

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BOŞLUKLU BETONARME PERDELERDE BAĞ KİRİŞİ DAVRANIŞLARININ  
İRDELENMESİ VE YENİ MEKANİK SİSTEMLERİN ÖNERİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Hasan SESLİ**

**ARALIK 2018**

**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Hasan SESLİ Tarafından Hazırlanan**

**BOŞLUKLU BETONARME PERDELERDE BAĞ KİRİŞİ DAVRANIŞLARININ  
İRDELENMESİ VE YENİ MEKANİK SİSTEMLERİN ÖNERİLMESİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 11 /12 /2018 gün ve 1782 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**DOKTORA TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

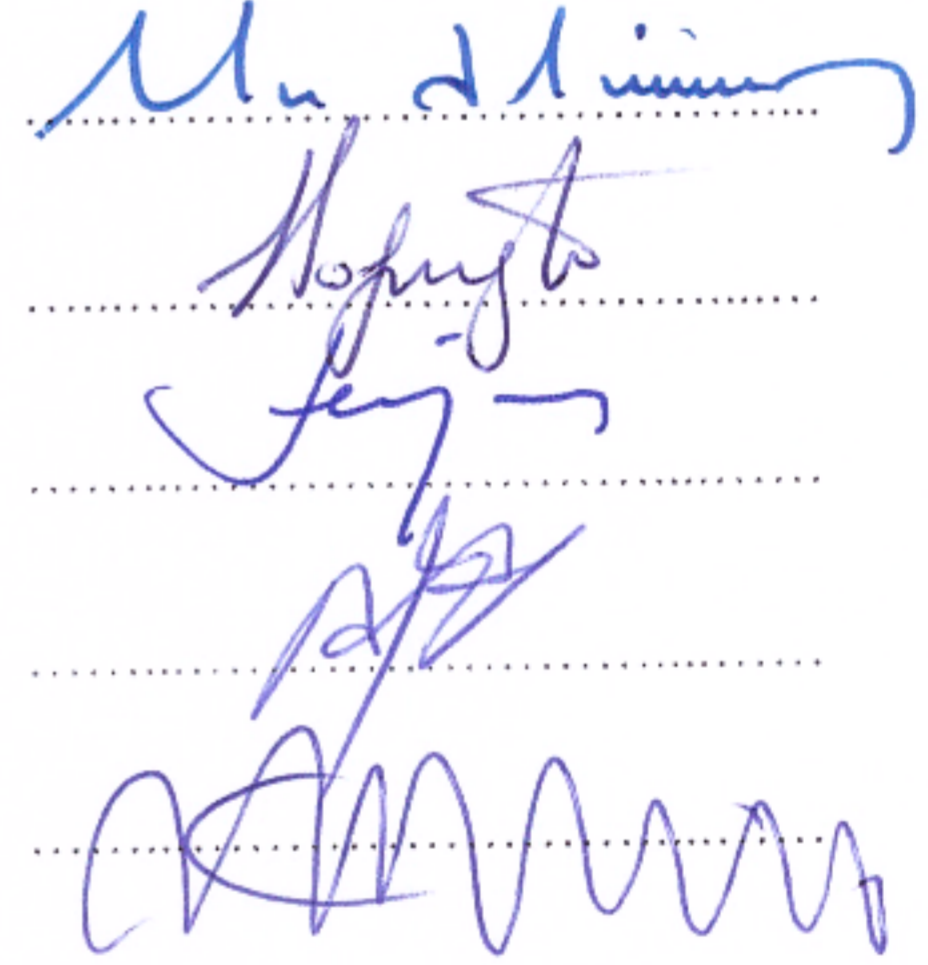
**Başkan : Prof. Dr. Metin HÜSEM**

**Üye : Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU**

**Üye : Prof. Dr. Selim PUL**

**Üye : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN**

**Üye : Prof. Dr. Şükrü YETGİN**



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

“Boşluklu Betonarme Perdelerde Bağ Kirişi Davranışlarının İrdelenmesi ve Yeni Mekanik Sistemlerin Önerilmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Metin HÜSEM’e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca değerli vakitlerini ayırıp tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, tez izleme komitesi üyeleri değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Selim PUL ve Sayın Prof. Dr. Hasan SOFUOĞLU ile jüri üyeliği görevini üstlenen değerli hocalarım Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN ve Şükrü YETGİN’e ayrıca teşekkür ederim.

Tez konusu seçiminde öncülük eden Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yer Bilimsel Etüt Dairesi Başkanı Sayın Cahit KOCAMAN’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince çalışmalarımı sürekli takip eden ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Düzce Üniversitesi Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Mehmet Emin ARSLAN ve Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU’na ilgi ve alakalarından ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bilgi ve yardımlarını esirgemeyerek kıymetli vakitlerini ayıran mesai arkadaşlarım Dr. Serhat Demir, Dr. Barbaros ATMACA, Mehmet Tevfik SEFEROĞLU, Ahmet KUVAT, Bayram Ali TEMEL, Muhammet ÇELİK ve değerli iş adamı Ali Osman KOÇ’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda kıymetli vakitlerini ayıran Ufuk KANDİL, Safa NAYIR, Memduh NAS ve adını sayamadığım tüm arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Bana Yurtiçi Doktora Bursu vererek ödüllendiren ve bu suretle çalışmalarımı destekleyen TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın sağlıklı bir şekilde yürütülmesi için destek sağlayan Üniversitemizin Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim.

Öğrenim süresi boyunca tek felsefem, ülkeye fayda getirecek çalışmalarda bulunup, her alanda daha iyi olmayı hak eden bu güzel ülkemizi üst seviyelere taşıyacak değerlerden biri olabilmektir. İnanıyorum ki, bu çalışmam hedeflerimin başlangıcı olacaktır.

Hasan SESLİ  
Trabzon, 2018

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Boşluklu Betonarme Perdelerde Bağ Kirişı Davranışlarının İrdelenmesi ve Yeni Mekanik Sistemlerin Önerilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Metin HÜSEM'in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 27/12/2018.

  
Hasan SESLİ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XX
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XXI
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1 Giriş .....	1
1.2. Perde Duvarlar .....	2
1.3. Dolu Gövdeli Betonarme Perde Duvarlar.....	3
1.3.1. Dolu Gövdeli Betonarme Perde Duvarların Tasarımı İçin Başlıca Kriterler.....	4
1.3.2. Dolu Gövdeli Betonarme Perde Duvarların Göçme Biçimleri .....	5
1.3.3. Dolu Gövdeli Betonarme Perde Duvarlardan Beklenen Performans .....	8
1.4. Boşluklu Betonarme Perde Duvarlar .....	9
1.5. Boşluklu Perde Duvarlarda Boşluk Durumuna Göre Hasar Gelişimi .....	15
1.6. Bağ Kirişli Boşluklu Betonarme Perde Duvarlar ve Bağlantı Etkileşimi.....	18
1.7. Bağ Kirişlerinin Göçme Mekanizması .....	26
1.8. Bağ Kirişleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar .....	31
1.9. Yönetmeliklere Göre Bağ Kirişleri İçin Tasarım Koşulları.....	55
1.10. Literatür Özeti, Amaç ve Kapsam .....	60
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	66
2.1. Giriş .....	66
2.2. Deney Düzeneginin Tasarımı .....	68
2.3. Deney Elemanı Boyutlarının Belirlenmesi .....	72
2.4. Deney Elemanı Başlık Donatısının Tasarımı.....	75
2.5. Deney Elemanında Oluşan Kesit Tesirlerinin Belirlenmesi .....	78

2.6.	Geleneksel Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanının (CRCB) Tasarımı ve Üretimi .....	81
2.7.	Sargılı Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanının (DRCB) Tasarımı ve Üretimi .....	98
2.8.	Sargısız Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanının (DRCB-FC) Tasarımı ve Üretimi .....	103
2.9.	Demet Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanının (BDRCB) Tasarımı ve Üretimi .....	108
2.10.	Hasır Donatılı (19° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanının (MRCB-19) Tasarımı ve Üretimi .....	112
2.11.	Hasır Donatılı (45° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanının (MRCB-45) Tasarımı ve Üretimi .....	118
2.12.	Güçlendirilmiş Hasır Donatılı (45° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanının (DBMRCB-45) Tasarımı ve Üretimi .....	122
2.13.	Tahterevalli Tipi Bağ Kirişinin (TETOD) Gelişimi .....	128
2.14.	Tahterevalli Tipi Bağ Kirişinin Tasarımı.....	128
2.15.	Tahterevalli Tipi Bağ Kirişinin (TETOD) Tasarım Esasları .....	137
2.15.1.	Sönümleyici Üçgen Çelik Levhaların Tasarımı.....	137
2.15.2.	Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi-Perde Duvar Arasındaki Yük Aktarımı.....	144
2.15.3.	Ray Plakasının Tasarımı .....	146
2.15.4.	Çelik Kulakların Tasarımı .....	151
2.15.5.	Çelik Kulak Takımının Üretimi .....	161
2.16.	Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi Deney Elemanının (TETOD) Tasarımı ve Üretimi .....	166
2.17.	Prefabrik Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi Deney Elemanının (PF-TETOD) Tasarımı ve Üretimi .....	173
2.18.	Deney Elemanlarına Uygulanan Yatay Yük.....	180
2.19.	Deneylelerden Elde Edilen Ölçümlerin Değerlendirilmesi .....	181
2.19.1.	Yatay Yük- Yatay Yerdeğiştirme Grafiklerinin Elde Edilmesi.....	181
2.19.2.	Kiriş Kayma Yerdeğiştirme-Yatay Yerdeğiştirme Grafiklerinin Elde Edilmesi .....	181
2.19.3.	Dayanım Zarfı Grafiklerinin Elde Edilmesi .....	181
2.19.4.	Etkili Rijitlik Değerlerinin Hesabı .....	181
2.19.5.	Enerji Tüketme Kapasitelerinin Hesabı.....	182
2.19.6.	Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranı Hesabı.....	183

3.	BULGULAR VE İRDELEMELER.....	185
3.1.	Giriş .....	185
3.2.	Deney Elemanlarının Tekrarlı Artımlı Çevrimsel Yük Altındaki Davranışları.....	185
3.2.1.	Geleneksel Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanı (CRCB).....	185
3.2.2.	Sargılı Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanı (DRCB) .....	192
3.2.3.	Sargısız Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanı (DRCB-FC).....	198
3.2.4.	Demet Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanı (BDRCB) .....	204
3.2.5.	Hasır Donatılı (19° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanı (MRCB-19).....	210
3.2.6.	Hasır Donatılı (45° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanı (MRCB-45).....	216
3.2.7.	Açılı Güçlendirilmiş Hasır Donatılı (45° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanı (DBMRCB-45) .....	221
3.2.8.	Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi Deney Elemanı (TETOD) .....	227
3.2.9.	Prefabrik Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi Deney Elemanı (PF-TETOD).....	236
3.3.	Deneysel Bulguların Karşılaştırmalı Olarak İrdelenmesi .....	244
3.3.1.	Yük Taşıma Kapasiteleri .....	244
3.3.2.	Etkili Rijitlikler .....	251
3.3.3.	Enerji Tüketim Kapasiteleri ve Süneklik.....	252
3.3.4.	Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranları.....	254
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	256
5.	KAYNAKLAR .....	262

ÖZGEÇMİŞ



Doktora Tezi

ÖZET

BOŞLUKLU BETONARME PERDELERDE BAĞ KİRİŞİ DAVRANIŞLARININ  
İRDELENMESİ VE YENİ MEKANİK SİSTEMLERİN ÖNERİLMESİ

Hasan SESLİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Metin HÜSEM  
2018, 268 Sayfa

Bu tez çalışmasında, boşluklu betonarme perde duvar sistemlerinin davranışını belirleyen ve kilit eleman vazifesi gören bağ kirişlerinin performansını geliştirecek ve imalat kolaylığı sağlayacak yeni donatı düzenlerinin beraberinde, yüksek dayanım ve rijitliğe cevap verebilecek hasar sonrası değiştirilebilir-takılabilir ‘Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi’ (TETOD) üzerinde yapılan deneysel çalışmalar anlatılmaktadır. Yeni donatı düzenlemesinde, kesitteki donatı oranında değişim olmaksızın boyuna donatıların eğim açılarının bağ kirişi performansı üzerindeki etkisi araştırılarak yönetmelikteki diyagonal donatı uygulamasının etkinliğinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda demet diyagonal donatılı ve hasır donatılı bağ kirişlerinin deneysel performansları incelenmiştir. Tahterevalli tipi bağ kirişinde ise perde duvarların aynı kat seviyesinde birbirine göreli yerdeğiştirmesi sebebiyle meydana getirdiği kesme kuvvetlerinin ve göreli yerdeğiştirmelerin eğilme kapasitesi yüksek metalik levhaların eğilme davranışı ile karşılanması planlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda, öncelikle betonarme ve tahterevalli tipi bağ kirişlerinin performansının belirlenebilmesi için gerekli olan uygun deney düzeneğinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Referans numunesi olarak dikkate alınan geleneksel, sargılı diyagonal ve sargısız diyagonal donatılı bağ kirişlerinin özellikleri ve tasarım esasları ortaya koyulmuştur. Diyagonal donatılı bağ kirişlerine alternatif olarak önerilen demet ve hasır donatılı bağ kirişlerinin özellikleri ayrıntılarıyla belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen tahterevalli tipi bağ kirişinin çalışma şekli, birleşim detayları ve tasarım esasları detaylı olarak anlatılmıştır. Daha sonra laboratuvar ortamındaki üretim aşamalarına ve deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular irdelenmiş ve sonuçlar ortaya koyularak bir takım önerilere yer verilmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında geliştirilen tahterevalli tipi bağ kirişinin yüksek sönüm, yüksek dayanım ve rijitlik yönünden boşluklu betonarme perde duvar sistemlerinde uygulanabileceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Boşluklu Betonarme Perde Duvar, Bağ Kirişi, Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi, Demet Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi, Hasır Donatılı Bağ Kirişi.

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF COUPLING BEAM BEHAVIOR IN REINFORCED CONCRETE  
COUPLED SHEAR WALLS AND RECOMMENDATION OF NOVEL MECHANICAL  
SYSTEMS

Hasan SESLİ

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Metin HÜSEM  
2018, 268 Pages

In this thesis, new reinforcement arrangements are presented to improve the performance of reinforced coupling beams which determine behavior of the coupled wall systems and act as a key element in the structural systems. In addition to, replaceable Teeter-Tooter Type Coupling Beam (TETOD) is recommended for high strength, rigidity, energy dissipation and damping. For the new reinforcement arrangements, the effect of the inclination angles of the longitudinal reinforcement bar on the performance of the reinforced coupling beams is investigated with same reinforcement ratio in the section and it is aimed to improve the effectiveness of diagonal reinforcement in code requirements. Therefore, the performances of bundled diagonally and mesh reinforced concrete coupling beams were experimentally investigated. The shear forces caused by the relative displacement of the shear walls at the same floor level and relative displacements are expected to be met by bending behavior of metallic plates having high bending capacity in Teeter-Tooter Type Coupling Beam. In this purpose, an experimental set-up designed for reinforced concrete and Teeter-Tooter Type coupling beams. Conventionally reinforced concrete coupling beam, diagonally reinforced concrete coupling beam and diagonally reinforced concrete coupling beam with full confined section were chosen as reference specimens. Properties and design criteria of bundled diagonally and mesh reinforced concrete coupling beams were presented. Behavior principles, connection details and design criteria of Teeter-Tooter Type coupling beams were given in detailed. And then, fabrication stages and experimental studies of specimens in laboratory were explained. Some results obtained from experimental studies were discussed and a number of suggestions were presented. As a result of the study, it was seen that replaceable Teeter-Tooter Type Coupling Beam was an applicable structural element for high strength, rigidity, energy dissipation and damping in reinforced concrete coupled shear walls.

**Key Words:** Reinforced Concrete Coupled Shear Walls, Coupling Beam, Teeter-Tooter Type Coupling Beam, Bundled Diagonally Reinforced Concrete Coupling Beam, Mesh Reinforced Concrete Coupling Beam.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Konsol perde duvar (Eren, 2010) .....	4
Şekil 1.2. Perdelerin göçme şekilleri .....	5
Şekil 1.3. 2002 Çay depreminde eğilme göçmesine maruz bir perde duvar (Eren, 2010) .....	6
Şekil 1.4. 1999 Düzce depreminde kesme kırılması meydana gelen bir perde duvar (Ireland vd., 2006).....	6
Şekil 1.5. 2010 Şili depreminde yatay kesme kırılmasına maruz perde duvarlar (Wallace vd., 2012) .....	7
Şekil 1.6. 2010 Şili depreminde yanal burkulmaya maruz perde duvar (Wallace vd., 2012) .....	8
Şekil 1.7. Betonarme perde duvarlar ve boşluk durumları .....	9
Şekil 1.8. Boşluklu perde türleri (Demir, 2008).....	11
Şekil 1.9. Boşluklu perde duvarlarda boşluk donatısı .....	12
Şekil 1.10. Perde duvarların boşluk durumuna göre sınıflandırılması (FEMA-306, 1998).....	16
Şekil 1.11. Perde duvarlarda boşluk veya delik durumuna göre hasar mekanizmasının gelişimi (FEMA-306, 1998).....	17
Şekil 1.12. 2010 Şili depreminde hasar gören boşluklu perde duvar ve elemanları (Wallace vd., 2012) .....	18
Şekil 1.13. Tipik bir boşluklu perde duvar ve bağ kirişleri (Suen, 2012) .....	19
Şekil 1.14. Yatay yüke maruz boşluklu perde duvarların eğilme gerilmeleri (Montgomery, 2011) .....	20
Şekil 1.15. Bağ kirişi-perde duvar birleşim şekillerine göre sistemin idealleştirilmiş gerilme dağılışı (Harries, 1995).....	21
Şekil 1.16. Boşluklu perde duvar davranışının gelişimi (Harries, 1995) .....	23
Şekil 1.17. Yatay yüke maruz boşluklu perde duvar (Montgomery, 2011) .....	24
Şekil 1.18. 1964 Alaska depreminde hasar gören bağ kirişi örnekleri (Suen, 2012) .....	24
Şekil 1.19. 1994 California depreminde hasar gören bağ kirişi örneği (Suen, 2012) .....	25
Şekil 1.20. a)Bağ kirişi ideal sınır şartları, b)Bağ kirişi kesme kuvveti diyagramı, c) Bağ kirişi moment diyagramı.....	27
Şekil 1.21. Bağ kirişlerinde tipik eğilme hasarı (Subedi, 1991).....	27

Şekil 1.22.	Eğilme göçmesine maruz bağ kirişi (Kwan ve Zhao, 2002).....	28
Şekil 1.23.	FEMA-306'ya göre bağ kirişlerinde kayma kırılması (FEMA-306, 1998) ...	28
Şekil 1.24.	Eğilme/kayma göçmesine maruz bağ kirişi (Brena ve Ihtiyar, 2011).....	28
Şekil 1.25.	Bağ kirişlerinde tipik kesme (diyagonal yarıлма) hasarı (Subedi, 1991).....	29
Şekil 1.26.	Diyagonal yarıлма ile göçmeye maruz bağ kirişi (Ahn vd., 2011).....	29
Şekil 1.27.	Bağ kirişlerinde kesme ve eğilme etkisi (Subedi, 1991).....	30
Şekil 1.28.	Bağ kirişlerinde diyagonal yarıлма ağırlıklı eğilme/kesme hasarı (FEMA-306, 1998).....	31
Şekil 1.29.	Geleneksel donatılı bağ kirişi ve hasar şekli (Paulay, 1971).....	32
Şekil 1.30.	Diyagonal donatılı bağ kirişi ve hasar şekli (Paulay ve Binney, 1974).....	33
Şekil 1.31.	Çelik plakla güçlendirilmiş beton kirişi (Fortney, 2005).....	35
Şekil 1.32.	Çelik bağ kirişi (Fortney, 2005).....	37
Şekil 1.33.	Yüzey taşıyıcı plaklar ve yardımcı düşey donatılar (Fortney, 2005).....	37
Şekil 1.34.	Pilye donatılı (a), Uzun çivileme donatılı (b) ve Kısa ankraj donatılı bağ kirişleri (c) (Tassios vd., 1996).....	39
Şekil 1.35.	Rombik (pilye donatılı) düzenine sahip diyagonal donatılı bağ kirişi (Galano ve Vignoli, 2000).....	39
Şekil 1.36.	Tipik kompozit bağ kirişi (Fortney, 2005).....	40
Şekil 1.37.	Farklı açıklık/derinlik oranına sahip kirişlerde hasar durumu (Kwan ve Zhao, 2002).....	41
Şekil 1.38.	Diyagonal ve geleneksel donatılı bağ kirişlerinde deney sonrası gözlenen hasar durumları (Kwan ve Zhao, 2002).....	42
Şekil 1.39.	HPFRCC bağ kirişi donatı düzenleri (Canbolat vd., 2005).....	43
Şekil 1.40.	Açıklık ortasında cıvata birleşimli çelik bağ kirişi (Fortney, 2005).....	43
Şekil 1.41.	Plakla güçlendirilmiş betonarme bağ kirişi (Fortney, 2005).....	44
Şekil 1.42.	Çelik plakla güçlendirilmiş betonarme bağ kirişi (Su ve Zhu, 2005).....	45
Şekil 1.43.	Bulon perde duvar ve bağ kirişi üzerindeki yerleşim şekli (Su ve Zhu, 2005).....	45
Şekil 1.44.	Plakla güçlendirilmiş kompozit bağ kirişleri (Su vd., 2007).....	46
Şekil 1.45.	Sonradan Germe Çelik Bağ Kirişi (Kurama ve Shen, 2008).....	47
Şekil 1.46.	Çatal yapılı viskoelastik sönümleyici (Montgomery, 2011).....	49
Şekil 1.47.	Hibrid sönümleyici (Kim vd., 2012).....	50
Şekil 1.48.	Boşluklu perde duvar elemanlarının detayı ve sönümleyiciler (Ahn vd., 2011).....	51
Şekil 1.49.	Kıvrımlı gövdeli çelik bağ kirişi (Hajsadeghi vd., 2014).....	52

Şekil 1.50.	Çift donatılı bağ kirişi (Hajyalikhani, 2015) .....	54
Şekil 1.51.	Demet diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesi (Han vd., 2015).....	54
Şekil 1.52.	Uç plaka birleşimli değiştirilebilir çelik bağ kirişi (Farsi, 2016) .....	54
Şekil 1.53.	Bağ kirişlerinin tasarımında kullanılan esaslar (Paulay ve Binney, 1974) ....	56
Şekil 1.54.	ACI 318-14'e göre diyagonal donatılı bağ kirişi donatı detayı (ACI 318-14) .....	57
Şekil 1.55.	TDBY-2018'e göre diyagonal donatılı bağ kirişi donatı detayı (TBDY-2018) .....	58
Şekil 2.1.	Boşluklu betonarme perde duvarlarda bağ kirişlerinin dönmesi: a) perde duvar ayaklarının dönmesi b) bağ kirişlerinin dönmesi (Kwan ve Zhao, 2002) .....	68
Şekil 2.2.	Deneysel çalışmalar için tasarlanan deney düzeneği .....	70
Şekil 2.3.	Deney platformu ve deney düzeneği kurulumu .....	71
Şekil 2.4.	Boşluklu betonarme perde duvar sistemlerinin hasar modları: (a) geleneksel donatılı bağ kirişli ve (b) diyagonal donatılı bağ kirişli.....	74
Şekil 2.5.	Deney elemanı ve boyutları.....	75
Şekil 2.6.	Deney elamanları başlık donatıları.....	77
Şekil 2.7.	Eşdeğer çerçeve yöntemine göre idealleştirilmiş sistem (Harries vd. 2000) .	78
Şekil 2.8.	İdealleştirilmiş deney düzeneği .....	79
Şekil 2.9.	Deney elemanına ait tesir diyagramları.....	80
Şekil 2.10.	Geleneksel donatılı bağ kirişi (CRCB) donatı detayı.....	83
Şekil 2.11.	Paslanmaz saplama cıvatanın çekme deneyi .....	84
Şekil 2.12.	Paslanmaz saplama cıvataya ait çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafığı .....	85
Şekil 2.13.	Çekme deneyine tabi tutulan saplama cıvatanın deney öncesi ve deney sonrası görünümü .....	85
Şekil 2.14.	Eksenel çekme etkisindeki cıvata birleşimli boyuna donatılarda kaynak dikişinin dayanımının test edilmesi .....	86
Şekil 2.15.	Kaynaklı birleşime ait eksenel çekme kuvveti-birim şekildeğiştirme grafığı .....	87
Şekil 2.16.	Cıvata birleşimli boyuna donatıların eksenel çekme testi öncesi ve sonrası görünümü .....	87
Şekil 2.17.	8 mm çapındaki donatı çeliğinin çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafığı .....	88
Şekil 2.18.	8 mm çapındaki donatı çeliğinin eksenel çekme testi öncesi ve sonrası görünümü .....	89

Şekil 2.19.	12 mm çapındaki donatı çeliğinin çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafiği .....	89
Şekil 2.20.	12 mm çapındaki donatı çeliğinin aksenal çekme testi öncesi ve sonrası görünümü .....	90
Şekil 2.21.	14 mm çapındaki donatı çeliğinin çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafiği .....	90
Şekil 2.22.	14 mm çapındaki donatı çeliğinin aksenal çekme testi öncesi ve sonrası görünümü .....	91
Şekil 2.23.	Geleneksel donatılı bağ kirişine ait donatı düzenlemesi .....	91
Şekil 2.24.	Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı donatı düzenlemesi.....	92
Şekil 2.25.	Asal donatılara yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerlerin su geçirmez bant ile sarılması.....	93
Şekil 2.26.	Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı betonu numuneleri.....	93
Şekil 2.27.	Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının telis bezi ile muhafaza edilmesi.....	94
Şekil 2.28.	Standart silindir numuneye kükürt başlık yapılması ve şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmesi .....	94
Şekil 2.29.	Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği.....	95
Şekil 2.30.	Yatay ve düşey yerdeğiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi .....	96
Şekil 2.31.	Birim şekildeğiştirme ölçerlerin beton yüzeyine yerleştirilmesi.....	97
Şekil 2.32.	Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü .....	97
Şekil 2.33.	Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi (DRCB) donatı detayı.....	99
Şekil 2.34.	Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişine ait donatı düzenlemesi .....	100
Şekil 2.35.	Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı kalıp işlerinin tamamlanması.....	100
Şekil 2.36.	Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme oranı grafiği .....	102
Şekil 2.37.	Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü .....	102
Şekil 2.38.	Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi (DRCB-FC) donatı detayı .....	104
Şekil 2.39.	Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişine ait donatı düzenlemesi .....	105
Şekil 2.40.	Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının beton dökümü öncesi son hali .....	106
Şekil 2.41.	Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme oranı grafiği .....	107
Şekil 2.42.	Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü .....	107

Şekil 2.43.	Demet diyagonal donatılı bağ kirişi (BDRCB) donatı detayı .....	109
Şekil 2.44.	Demet diyagonal donatılı bağ kirişine ait donatı düzenlemesi .....	110
Şekil 2.45.	Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının beton dökümü öncesi son hali .....	110
Şekil 2.46.	Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü .....	111
Şekil 2.47.	Hasır donatılı (19° açılı) deney elemanı için tasarlanan hasır yaprak .....	113
Şekil 2.48.	Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanı (MRCB-19) donatı detayı .....	114
Şekil 2.49.	Deney elemanı için gerekli olan hasır yaprakların tamamlanması .....	115
Şekil 2.50.	Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişine ait donatı düzenlemesi .....	115
Şekil 2.51	Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanı kalıp işlerinin tamamlanması.....	116
Şekil 2.52.	Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme oranı grafiği .....	117
Şekil 2.53.	Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü .....	117
Şekil 2.54.	Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı için tasarlanan hasır yaprak .....	118
Şekil 2.55.	Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı (MRCB-45) donatı detayı .....	119
Şekil 2.56.	Deney elemanı için gerekli olan hasır yaprakların tamamlanması .....	120
Şekil 2.57.	Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişine ait donatı düzenlemesi .....	120
Şekil 2.58.	Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı beton dökümü öncesi son hali .....	121
Şekil 2.59.	Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü .....	121
Şekil 2.60.	Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı için tasarlanan hasır yaprak .....	123
Şekil 2.61.	Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı (DBMRCB-45) donatı detayı .....	124
Şekil 2.62.	Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı için tasarlanan hasır yaprağın üretimi .....	125
Şekil 2.63.	Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişine ait donatı düzenlemesi	126
Şekil 2.64.	Birim şekildeğiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi .....	126
Şekil 2.65.	Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı donatı düzenlemesi .....	127

Şekil 2.66.	Güçlendirilmiş hasır donatılı ( $45^\circ$ açılı) bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü.....	127
Şekil 2.67.	ADAS sistemi (Wu vd., 2012) .....	129
Şekil 2.68	T-ADAS sistemi (Tsai vd., 1993) .....	129
Şekil 2.69.	T-ADAS sistemi çalışma şekli (Christolopoulos ve Filiatrault, 2006) .....	130
Şekil 2.70.	Metalik sönümleyicili çapraz eleman (Gray vd., 2014).....	131
Şekil 2.71.	Testere tipi sismik enerji sönümleyici (Demir, 2018).....	131
Şekil 2.72.	Kiriş kolları arasındaki kayma düzlemi .....	132
Şekil 2.73.	Kulak takımı.....	133
Şekil 2.74.	Ray plakası .....	134
Şekil 2.75.	TETOD.....	134
Şekil 2.76.	TETOD üstten görüntüsü .....	135
Şekil 2.77.	TETOD'un sistem içerisindeki yerleşimi.....	136
Şekil 2.78.	TETOD'un sistem içerisinde şekil değiştirmiş durumu.....	136
Şekil 2.79.	Dikdörtgen formdaki ankastre elemanlarda meydana gelen şekildeğişmeler (Demir, 2018) .....	137
Şekil 2.80.	Üçgen formda ankastre elemanlarda meydana gelen şekildeğişmeler (Demir, 2018) .....	138
Şekil 2.81.	Yatay yük etkisinde kiriş koluna gelen kesme yükü ve çelik kulaklara aktarımı.....	140
Şekil 2.82.	Çelik kulaklara gelen yükün dağılımı ve kesit tesirleri.....	141
Şekil 2.83.	Eğilmiş bir metal kulağın şematik görünümü (Gray, 2012).....	142
Şekil 2.84.	Sunulan hesap yöntemine göre TETOD'un yük-yerdeğiştirme ilişkisini gösteren zarf eğrisi .....	144
Şekil 2.85.	Ray plakasının genel görünümü.....	146
Şekil 2.86.	Ray plakasının idealleştirilmesi .....	147
Şekil 2.87.	Deney için tasarlanan ray plakası.....	148
Şekil 2.88.	ASTM A370'e göre Hardox-400 sınıfı sertleştirilmiş çelik için üretilen çekme çubuğu geometrik formu.....	149
Şekil 2.89.	Hardox-400 sınıfı sertleştirilmiş çeliğin çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafiği.....	149
Şekil 2.90.	Hardox-400 sınıfı sertleştirilmiş çeliğe ait çekme kuponunun aksenal çekme testi öncesi ve sonrası görünüm .....	150
Şekil 2.91.	Lazer kesim ile 12 mm genişliğinde oluklar açılan ray plakasının görüntüsü.....	151
Şekil 2.92.	Çelik kulaklarda rijit başlık boyutları.....	152



Şekil 2.93.	S235JR kalitesi çelik için çekme deneyi ve birim şekildeğiştirme ölçerin yerleştirilmesi .....	153
Şekil 2.94.	S235JR kalitesi çelik için gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği.....	154
Şekil 2.95.	Çekme deneyine tabi tutulan deney kuponunun deney öncesi ve deney sonrası görünümü .....	154
Şekil 2.96.	Çelik kulakların geometrik özellikleri.....	156
Şekil 2.97.	Optimizasyon elemanına ait boyutlar.....	157
Şekil 2.98.	Sonlu eleman modeli .....	158
Şekil 2.99.	Birim şekildeğiştirme değerlerinin okunduğu düğüm noktalarının konumu.....	158
Şekil 2.100.	Çelik kulak modellerinin yüzeyinde oluşan birim şekildeğiştirme dağılımı.....	159
Şekil 2.101.	Kulak uç yerdeğiştirmesine bağlı birim şekildeğiştirme grafiği .....	160
Şekil 2.102.	Üretim aşamasında olması gereken çelik kulak boyutları.....	162
Şekil 2.103.	Çelik kulak ve rijit başlığın kaynak öncesi görünümü .....	163
Şekil 2.104.	Tasarlanan ankraj plakasının görünümü .....	164
Şekil 2.105.	Ankraj plakasının üretimi .....	165
Şekil 2.106.	Çelik kulak ve plaka yüzeyi arasındaki boşluğun kaynak ile doldurulması.....	165
Şekil 2.107.	Çelik kulak takımının görünümü.....	165
Şekil 2.108.	Betonarme kiriş kolu ankraj plakası.....	166
Şekil 2.109.	TETOD ölçüleri.....	167
Şekil 2.110.	Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı (TETOD) donatı detayı .....	168
Şekil 2.111.	TETOD'un tamamlanmış görüntüsü .....	169
Şekil 2.112.	Tahterevalli tipi bağ kirişine ait donatı montajının tamamlanmış görüntüsü.....	169
Şekil 2.113.	Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı donatı düzenlemesi .....	170
Şekil 2.114.	Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının beton dökümü öncesi görüntüsü .....	171
Şekil 2.115.	Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği.....	172
Şekil 2.116.	Çelik kulaklara birim şekildeğiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi .....	172
Şekil 2.117.	Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü .....	173
Şekil 2.118.	Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı (PF-TETOD) donatı detayı .....	174
Şekil 2.119.	Çelik kiriş kolu boyutlar ve kiriş kolu kesiti .....	175

Şekil 2.120. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi.....	176
Şekil 2.121. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının donatı düzenlemesi	177
Şekil 2.122. Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği.....	178
Şekil 2.123. Çelik kulaklar ve çelik kiriş koluna yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerler.....	179
Şekil 2.124. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü .....	179
Şekil 2.125. Yatay yükleme protokolü .....	180
Şekil 2.126. Her bir çevrim için etkili rijitlik değerlerinin belirlenmesi .....	182
Şekil 2.127. i. çevrimde tüketilen enerji ve depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisi (Chopra, 2007).....	183
Şekil 3.1. Geleneksel donatılı bağ kirişinin nihai yük adımıdaki hasar durumu .....	187
Şekil 3.2. Köşegenlerin üst ve alt kısımlarında kalan betonların parçalanması ve dökülmesi.....	187
Şekil 3.3. Büyük yerdeğiştirme altındaki deney sisteminin görüntüsü .....	189
Şekil 3.4. Deney sonrası kiriş donatılarının görünümü .....	189
Şekil 3.5. Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı.....	190
Şekil 3.6. RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri .....	190
Şekil 3.7. Büyük yerdeğiştirme altındaki deney sisteminin görüntüsü .....	193
Şekil 3.8. Büyük yerdeğiştirme altındaki sargılı diyagonal donatılı bağ kirişinde oluşan hasar .....	194
Şekil 3.9. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı.....	195
Şekil 3.10. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri.....	196
Şekil 3.11. RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri .....	196
Şekil 3.12. Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü .....	199
Şekil 3.13. Nihai hasar sonrası diyagonal donatıların burkulması .....	200
Şekil 3.14. Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı.....	201
Şekil 3.15. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri.....	202
Şekil 3.16. RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri .....	202
Şekil 3.17. Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü .....	205
Şekil 3.18. Nihai hasar sonrası diyagonal donatılarda burkulma ve kopma .....	206

Şekil 3.19.	Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı.....	207
Şekil 3.20.	LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri.....	208
Şekil 3.21.	RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri .....	208
Şekil 3.22.	Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü .....	211
Şekil 3.23.	Nihai hasar sonrası donatılarda burkulma .....	211
Şekil 3.24.	Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı.....	212
Şekil 3.25.	LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri.....	214
Şekil 3.26.	RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri .....	214
Şekil 3.27.	Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü .....	217
Şekil 3.28.	Nihai hasar sonrası donatıların görünümü .....	217
Şekil 3.29.	Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı.....	218
Şekil 3.30.	LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri.....	219
Şekil 3.31.	RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri .....	219
Şekil 3.32.	Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü .....	222
Şekil 3.33.	Nihai hasar sonrası gövde donatılarında burkulma .....	222
Şekil 3.34.	Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı .....	224
Şekil 3.35.	LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri.....	224
Şekil 3.36.	RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri .....	225
Şekil 3.37.	Büyük yerdeğiştirme altındaki deney sisteminin görüntüsü .....	228
Şekil 3.38.	Büyük yerdeğiştirme altında çelik kulakların eğilmiş hali ve TETOD.....	228
Şekil 3.39.	Çelik kulakların TETOD içerisinde nihai eğilmiş görüntüsü.....	229
Şekil 3.40.	Ankraj plakalarındaki kaynak dikişlerinin deney sonrası görünümü.....	230
Şekil 3.41.	Çelik kulak takımlarının deney sonrası görünümü .....	231
Şekil 3.42.	Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı.....	233
Şekil 3.43.	LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri.....	233
Şekil 3.44.	RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri .....	234
Şekil 3.45.	Büyük yerdeğiştirme altındaki deney sisteminin görüntüsü .....	237
Şekil 3.46.	Büyük yerdeğiştirme altında çelik kulakların eğilmiş hali ve PF-TETOD ..	237
Şekil 3.47.	Çelik kulakların TETOD içerisinde nihai eğilmiş görüntüsü.....	238

Şekil 3.48.	Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının çevrimsel yük altındaki performansı.....	241
Şekil 3.49.	LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri.....	241
Şekil 3.50.	RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri .....	242
Şekil 3.51.	Deney elemanlarına ait yük-yerdeğiştirme grafiklerine bağlı zarf eğrilerinin oluşumu .....	247
Şekil 3.52.	Deney elemanlarına ait zarf eğrileri .....	248
Şekil 3.53.	Deney elemanlarının yerdeğiştirmeye bağlı etkili rijitlikleri .....	252
Şekil 3.54.	Toplam olarak tüketilen enerjinin yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiği .....	254
Şekil 3.55.	Yerdeğiştirme adımlarına bağlı olarak viskoz sönüm oranlarının değişimi .....	255



## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1.	Kat sayısına bağlı olarak a, b, c ve k katsayıları .....	14
Tablo 2.1.	Çalışma kapsamında üretilen deney elemanları .....	67
Tablo 2.2.	Deneysel çalışmalarda kullanılan deney numunesi boyutları ve ölçekleri ....	73
Tablo 2.3.	Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları .....	94
Tablo 2.4.	Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları .....	101
Tablo 2.5.	Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları .....	106
Tablo 2.6.	Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları .....	116
Tablo 2.7.	Optimizasyon elemanlarının özellikleri .....	156
Tablo 2.8.	10.9 kalitesi cıvataların özellikleri .....	163
Tablo 2.9.	Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları .....	171
Tablo 2.10.	Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları .....	177
Tablo 3.1.	CRCB'ye ait deney sonuçları .....	191
Tablo 3.2.	DRCB'ye ait deney sonuçları .....	197
Tablo 3.3.	DRCB-FC'ye ait deney sonuçları .....	203
Tablo 3.4.	BDRCB'ye ait deney sonuçları .....	209
Tablo 3.5.	MRCB-19'a ait deney sonuçları .....	215
Tablo 3.6.	MRCB-45'e ait deney sonuçları .....	220
Tablo 3.7.	DBMRCB-45'e ait deney sonuçları .....	226
Tablo 3.8.	TETOD'a ait deney sonuçları .....	235
Tablo 3.9.	PF-TETOD'a ait deney sonuçları .....	243
Tablo 3.10.	Nihai yük ve yerdeğiştirme değerleri .....	249
Tablo 3.11.	Deney elemanlarına ait değerler .....	250
Tablo 3.12.	Kümülatif enerji tüketimi ve yerdeğiştirme arasındaki değişim .....	253

## SEMBOLLER DİZİNİ

$a$	: Basınç bloğu derinliği
$a_b$	: Perde duvar üzerinde açılan boşluk alanı
$b_r$	: Yatay dikmenin yani ray plakasının kalınlığı
$b_t$	: Kulak genişliği
$b_u$	: Kulak uç genişliği
$b_w$	: Bağ kirişi genişliği
$b_x$	: Diyagonal donatı demetlerinin dıştan dışa genişliği
$b(x)$	: Kulak genişliği
$c_c$	: Paspayı
$d$	: Perde duvar kesiti faydalı yüksekliği
$d_f$	: Çelik kiriş yüksekliği
$d_0$	: Diyagonal donatı çapı
$f_{ck}$	: Beton karakteristik basınç dayanımı
$f_{rv}$	: Yük altında cıvata oluşmuş gerilme
$f_{yk}$	: Donatının karakteristik akma dayanımı
$h$	: Kulak kalınlığını
$h_b$	: Bağ kirişi yüksekliği
$h_r$	: Yatay dikme yüksekliği
$h_w$	: Boşluklu perde perde duvar yüksekliği
$h_x$	: Diyagonal donatı demetlerinin dıştan dışa yüksekliği
$k_E$	: Tek bir kulak takımının rijitliği
$k_{eff}$	: Etkili rijitlik
$l_{cb}$	: Metal kulaklara ait pim merkezinden perde yüzeyine olan mesafe
$l_k$	: Kulak uzunluğu
$l_n$	: Bağ kirişi uzunluğu
$l_w$	: Deney elemanı başlık genişliği
$n$	: Kat sayısı
$s$	: Sargı donatıları arasındaki mesafe

$s_{max}$	: Diyagonal donatı demetinin çevresinde kullanılması gereken enine veya sargı donatıları arasındaki maksimum mesafe
$t$	: Perde duvarı kalınlığı
$t_f$	: Çelik kiriş başlık kalınlığı
$t_w$	: Çelik kiriş gövde kalınlığı
$w_b$	: Plaka taban genişliği
$A$	: Boşluksuz perde duvarın yüzey alanı
$A_{ch}$	: Sargı donatısı ile sarılı kesit alanı
$A_{pb}$	: Ezilmeye maruz kesit alanıdır
$A_s$	: Çekme veya basınç bölgesindeki diyagonal donatı miktarı
$A_{sh}$	: Diyagonal donatıların etrafındaki enine ve sargı donatılarının kesit içerisindeki toplam alanı
$A_w$	: $s$ aralığında bulunan kesme donatısı alanı
$C_u$	: Basınç donatılarına gelen basınç kuvveti
$CR$	: Bağlantı mertebesi
$D_w$	: Perde duvar uzunluğu
$E_c$	: Betonun elastisite modülü
$E_{hi}$	: Numune tarafından i. çevrimde tüketilen çevrimsel enerji
$E_{Si}$	: i. çevrimde depolanan elastik şekil değiştirme enerjisi
$F_{nt}$	: Cıvatanın çekme gerilmesi dayanımı
$F_{nv}$	: Cıvatanın kesme gerilmesi dayanımı
$H_w$	: Perdenin mafsal merkezleri arası dikkate alınarak hesaplanan yüksekliği
$I_r$	: Yatay dikmenin atalet momenti
$M$	: Devrilme momenti ve moment kesit tesiri
$M_i$	: Dış yük etkisiyle her bir perde duvar ayağına gelen moment
$M_r$	: Yatay dikmeden düşey orta dikme yüzeyine aktarılan momenti
$M_p(x)$	: Plastik mafsal oluşumuna neden olan moment
$M_u$	: Kiriş mesnet bölgelerinde meydana gelen moment
$M(x)$	: Çelik kulaklara etkiyen moment
$N$	: Normal kuvvet kesit tesiri
$N_i$	: Her bir duvara gelen eksenel kuvvet
$N_i L_i$	: Perde eksenlerine gelen eksenel kuvvetin etkisiyle kompozit kesitin ekseninde oluşan bağ momenti

$N_p(x)$	: Plastik mafsal oluşumuna neden olan normal kuvvet
$N_u$	: Perde duvara gelen aksenal çekme kuvvetidir
$N(x)$	: Dikdörtgen bir kesitte normal kuvvet
$P$	: Boşluk oranı
$P_p$	: Çelik kulakların akma dayanımına ulaştığı anda kiriş kolunda oluşan kesme kuvvetidir
$P_y$	: Kiriş koluna gelen kesme yükü
$T$	: Perde duvar ve bağ kirişi kesitine bağlı doğal hakim periyot
$T_r$	: Yatay dikmeden düşey orta dikme yüzeyine aktarılan kesme kuvveti
$T_u$	: Çekme donatılarına gelen çekme kuvveti
$V$	: Kesme kuvveti tesiri
$V_B$	: Perde duvar ayaklarına normal kuvvet olarak etki eden bağ kirişi kesme kuvvetlerinin toplamı
$V_c$	: Beton tarafından sağlanan kesme dayanımı
$V_s$	: Kesme donatıları tarafından sağlanan kesme dayanımı
$V_p(x)$	: Plastik mafsal oluşumuna neden olan kesme kuvveti
$V_u$	: Dış yüklerin etkisi ile kiriş kesitinde oluşan kesme kuvveti
$V_{yf}$	: Çelik kiriş kesme dayanımı
$V(x)$	: Çelik kulaklara etkileyen kesme kuvveti
$W$	: Ortalama kat ağırlığı
$\alpha$	: Diyagonal donatıların eğim açısı
$\varepsilon$	: En dış lifindeki birim şekildeğiştirme
$\varepsilon_y$	: Malzemenin akma birim şekildeğiştirmesi
$\theta$	: Perde duvarın dönme acısı
$\lambda$	: Betonun mekanik özelliklerini yansıtan değişim katsayısı
$\xi_{eq}$	: Eşdeğer viskoz sönüm oranı
$\sigma_y$	: Mafsal için kullanılan çeliğin karakteristik akma dayanımı
$\tau_r$	: Yatay dikmede oluşan ortalama kesme gerilmesi
$\Phi$	: Kulak eğriliği
$\Omega$	: Bağlantı mertebesi kriteri



## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Dünya genelindeki kentleşme yüksek binaların inşasını da beraberinde getirmektedir. Özellikle gelişmekte olan Orta ve Doğu Asya ülkelerinde yüksek binalara olan yönelim artmakta ve dünyada inşa edilen yeni binaların %70'i bu bölgede inşa edilmektedir. Tüm dünyada, sadece 2001-2010 yılları arasında 31-40 katlı yaklaşık 1000, 41-60 katlı yaklaşık 700 civarında yüksek bina inşa edilmiştir (Montgomery, 2010).

Binaların yüksekliği ve narinliği arttıkça, yatay yüklere karşı performansı hassas hale gelmektedir. Hesap aşamasında yapıların yatay yüklere karşı performansında karşılaşılabilecek sorunlar kat sayısının azaltılması, yatay yük taşıyıcı sistemlerin rijitliğinin artırılması, yapısal tasarımın değiştirilmesi ve yapı içerisinde sönümleyicilerin kullanılması gibi çözüm yolları ile giderilmektedir. Binaların yatay yüklere karşı performansında dikkate alınan en öncelikli çözüm yolu yatay yük taşıyıcı sistemlerin rijitliğinin artırılması olmaktadır.

Yatay yüklere karşı emniyeti yalnızca çerçeve sistemle sağlamak eleman boyutlarını artırmayla mümkün olacaktır. Ancak gerek kullanılabilir alanların azalması gerekse de maliyetin artması sebebiyle uygun bir çözüm olmamaktadır. Bu sebeple çerçeve sistemlerde yatay yüklere karşı rijitliği zayıf olan kolonlar yerine perde duvarlar tercih edilmektedir.

Bina yüksekliğine bağlı olarak tercih edilen perde duvarlar, yüksek binalarda çekirdek perde duvar adı altında esas taşıyıcı sistemi teşkil etmektedir. Bina yüksekliği boyunca süreklilik gösteren bu duvarlarda ihtiyaca bağlı olarak kapı, pencere ve tesisat gibi mimari sebeplerden ötürü boşluklar açılmaktadır. Bu boşluklar her kat seviyesinde açıldığında yapısal duvar tekil sistemden bağımsız duvarlar gibi davrandığı için yatay rijitlikte azalma meydana gelmektedir. Sistemin rijitlik ve dayanımı, bağımsız kalan duvarların kısa bağ kirişleri ile bağlanması ile büyük ölçüde geri kazanılmaktadır. Devrilme momentine karşı ekstra katkı sağlayan bağlantı kirişleri ile duvarlar arasındaki kesme aktarımı sayesinde tekil duvarlardan beklenen eğilme rijitliği ve dayanım bağlantı etkisiyle azalmaktadır. Kirişlerle bağlanarak oluşturulan bu sistem boşluklu perde duvarlar olarak adlandırılmaktadır.

Boşluklu perde duvarlar, sadece binadaki deformasyonu azaltmakla kalmaz aynı zamanda kirişler ve perde ayaklar arasındaki hem yatay hem düşey elastik olmayan deformasyonun dağılımını sağlar. Boşluklu perdelerden istenilen davranışın elde edilmesi için bağ kirişleri ve perde ayaklarının yeterli rijitliği ve dayanımı sağlayacak şekilde ayarlanması ve tasarlanması gerekir. Ayrıca sistem içerisinde sigorta görevi yaptığı kabul edilen bağ kirişleri perde ayaklarından önce elastik ötesi davranış ve iyi enerji tüketme kabiliyeti ortaya koymalıdır. Çünkü yatay yükler altında, perde duvarlarda ciddi hasarlar olmadan büyük miktarda enerji yutulmakta ve önemli hasarlar bağ kirişlerinde toplanabilmektedir. Böylece hasar gören bağ kirişlerinin onarılması daha kolay olmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde betonarme perde duvarlar, boşluklu betonarme perde duvarlar ve bağ kirişleri hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Bağ kirişleri için literatürde yapılan çalışmaların geniş özeti ve yönetmeliklerdeki tasarım koşulları sunulmaktadır.

## **1.2. Perde Duvarlar**

Çerçeve sistemlerde bina yüksekliğine bağlı olarak yerdeğiştirmeler aşırı artmakta ve yük taşıma kapasitesi azalmaktadır. Yeterli performansın sağlanabilmesi için çerçeve sistemlerle beraber farklı taşıyıcı elemanların kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Bu elemanlardan biri de tabanlarından zemine tam veya yarı ankastre mesnetli, dolu gövdeli veya boşluklu olarak oluşturulan perde duvarlardır.

Perde duvarlar, yatay yükler altında rijitlikleri dikkate alındığında yatay yerdeğiştirmeleri sınırlandırmak, yeterli dayanım ve sünekliği sağlayabilmek için en uygun eleman olmaktadır. Yatay yüklerin taşınmasında etkili olan perdeler, yapıya çerçevesel sistemlere nazaran daha fazla rijitlik kazandıran, farklı geometrik şekillerde çeşitli malzemelerden yapılan ve düşey konsol davranışı gösteren düzlemsel düşey diyaframlardır.

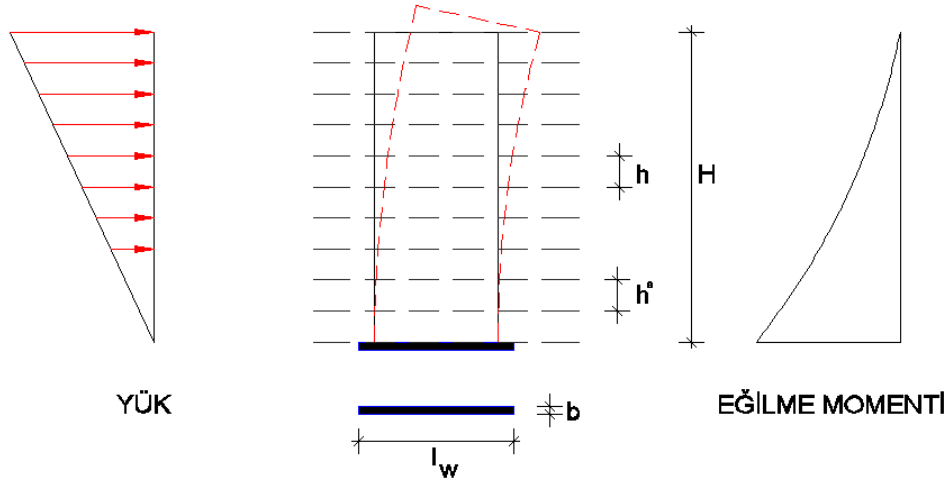
Özellikle yüksek binalarda inşası önem kazanan perde duvarlar, geometrik özelliklerine, malzemelere, davranış biçimlerine ve enkesit şekillerine göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır:

- a) Geometrik özelliklerine göre perde duvarlar: Perde duvarlar binanın kullanım amacı ve tasarımına göre dolu gövdeli (konsol) perde duvarlar, boşluklu perde duvarlar ve bağ kirişli boşluklu perde duvarlar olarak tasarlanmaktadır.

- b) Malzeme özelliklerine göre perde duvarlar: Malzeme teknolojisinin gelişimi ve ergonomik tasarım gereksinimi, perde duvarların farklı malzemelerden tasarımını da beraberinde getirmektedir. Bu sebeple bilimsel çalışmalar ışığında betonarme perde duvarlar, fiberle güçlendirilmiş betonarme perde duvarlar, düz çelik plak perde duvarlar, profilli çelik plak perde duvarlar, tek ya da çift yönlü çelik plaklı kompozit perde duvarlar ve çift yüz profilli kompozit perde duvarlara uygulamalarda sıkça rastlanmaktadır.
- c) Davranış biçimlerine göre perde duvarlar: Perde duvarlar davranış biçimlerine göre narin (eğilme momenti etkisinde) ve kısa (kesme kuvveti etkisinde) perdeler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu ayrım, perde duvarların  $H_w/l_w$  (yükseklik/uzunluk) oranına bağlı olarak yönetmeliklerde sunulmaktadır.
- d) Enkesit şekillerine göre perde duvarlar: Perde duvarlar dikdörtgen kesitli olmasının yanı sıra I, L, H, Y, U, T kesitleriyle de ortaya çıkmakta ve bu tür perde duvarların minimum boyutları ve tasarım değerleri yönetmelikler tarafından belirtilmektedir.

### **1.3. Dolu Gövdeli Betonarme Perde Duvarlar**

Betonarme perde duvarlar, deprem ve rüzgar gibi yatay yükler altındaki yüksek yapıların dayanım ve rijitliğini sağlayan geleneksel yatay yük taşıyıcı sistemlerdir. Yüksek yapılarda ortaya çıkan perde duvarlar, yatay yükler altında bir konsol kiriş gibi davranmakta ve elastik eğrileri konsol kirişin elastik eğrisiyle eşdeğer olmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Konsol perde duvar (Eren, 2010)

Konsol perde duvarlar, yatay yüklerden oluşan eğilme momenti yanında, düşey yüklerden gelen aksel normal kuvvetin de etkisi altındadır. Kolonlarla kıyaslandığında rijitlikleri nedeniyle önemli bir eğilme momenti taşırlar. Bu nedenle kesitlerinde eğilme momenti etkilidir. Yüksek binalarda devrilme momentleri binanın her iki yanında oluştuğu için perde duvar tabanlarına büyük tesirler gelebilir. Perde duvar tabanlarında yeterli normal kuvvetin sağlanması ve her kat döşemesinden yatay kuvvetlerin alınabilmesi için döşeme ile perde duvar arasında gerekli bağın oluşturulması gerekir.

Yerdeğiştirmelerin sınırlanmasıyla, ikinci mertebeye tesirlerin büyümesi önlenir. Perde duvarlar kat planı içerisinde kapalı kutu olacak şekilde yerleştirilmelidir. Böylece kat içerisinde burulma momenti oluşmaz. Deprem iki yönlü etkisi dikkate alındığında binanın her iki yönüne eşit alanlı deprem perdesi yapılması uygun olmaktadır (Mertol, 2002).

### 1.3.1. Dolu Gövdeli Betonarme Perde Duvarların Tasarımı İçin Başlıca Kriterler

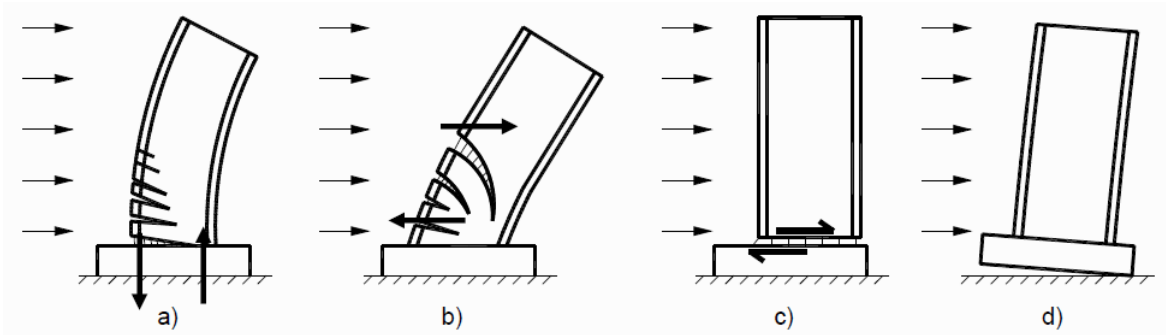
Deprem ve rüzgar gibi yatay yüklere dayanıklı yüksek binaların tasarımı için temel ilkeler, yeterli dayanım, yeterli rijitlik ve yeterli süneklik olarak belirtilmektedir. Bir bütün olarak deprem yüklerini taşıyan bina taşıyıcı sisteminde ve aynı zamanda taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların her birinde, deprem yüklerinin temel zeminine kadar sürekli bir şekilde ve güvenli olarak aktarılmasını sağlayacak yeterlikte rijitlik, dayanım ve süneklik bulunmalıdır. Bunlara ilave olarak, betonarme binaların davranışlarıyla ilgili olarak

kullanılan yeterli kararlılık (stabilite), yeterli sönüm ve yeterli uyum (adaptasyon) ilkeleri de göz önünde bulundurulmalıdır (Aktan ve Kıraç, 2009).

### 1.3.2. Dolu Gövdeli Betonarme Perde Duvarların Göçme Biçimleri

Perde duvarların tasarımında, plastik şekil değiştirmelerden dolayı oluşan enerji sönümlenmesinin ve plastik mafsal bölgelerinde oluşacak eğilme yer değiştirmesinin kontrol edilmesi istenir. Bu temel tasarım ilkesi, gevrek göçme mekanizmasının veya sınırlı sünekliğin oluşmasına izin vermez. Bu durum, kapasite boyutlandırma yöntemleri ile güç tükenmesi için istenen düzeni sağlayarak ve oluşabilecek plastik mafsal bölgelerinin uygun şekilde detaylandırılmasını sağlamakla mümkün olur (Bayülke, 2004).

Dolu gövdeli betonarme perde duvarların göçme biçimleri Şekil 1.2’de verilmektedir. Eğilme göçmesinde, perdenin en büyük moment bölgesinde elastik ötesi eğilme şekil değiştirmeleri artarak kesitte güç tükenmesi meydana gelmektedir (Şekil 1.2a). Perde duvarın moment taşıma gücüne ulaştığı ancak hala kesme kuvvetlerini taşıyacak kapasitesinin bulunduğu durumlarda eğilme göçmesi oluşmaktadır. Afyon’a bağlı Çay ilçesinde 2002 yılında meydana gelen depremde eğilme etkisinden dolayı, perde duvar alt bölgesinde hasar durumu, duvar şekil 1.3 ‘te gösterilmektedir. Perde duvarlarda oluşan kesme kırılması, kesme kuvvetlerine bağlı olarak ortaya çıkan eğik asal çekme gerilmesinden dolayı kesitin kesme kapasitesine ulaşmasıyla meydana gelmektedir (Şekil 1.2b). Şekil 1.4, 1999 Düzce depreminde kesme donatıları yetersiz olduğu için kesme kırılmasına maruz kalan bir perde duvarı göstermektedir.



Şekil 1.2. Perdelerin göçme şekilleri



Şekil 1.3. 2002 Çay depreminde eğilme göçmesine maruz bir perde duvar (Eren, 2010)



Şekil 1.4. 1999 Düzce depreminde kesme kırılması meydana gelen bir perde duvar (Ireland vd., 2006)

Dolu gövdeli perdelerde, diğer göçme biçimi, perde ve temel birleşiminde meydana gelen kayma kesme kırılmasıdır. Yanal yüklerden dolayı oluşan gerilemelere bağlı perde-temel birleşiminin zayıflığı nedeniyle perdenin rijit bir kütle hareketi yaparak, yatay düzlem üzerinde kayması sonucu oluşmaktadır (Şekil 1.2c). Tersinir yüklere maruz perde duvar tabanının her iki ucundaki boyuna donatılar, akma sınırını aşması ve basınç etkisinde kalan betonun yükün yön değiştirmesi ile çekme gerilmelerine maruz kalması, perde duvar tabanının tamamen açılmasına sebep olmaktadır. Bu davranışın tekrarlı yükler etkisinde gelişimi ile tabanda kayma yüzeyi oluşmaktadır. Şili’de 2010 yılında meydana gelen

depremde hasar gören bir binada yatay kesme kırılmasına maruz perde duvarlar Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5. 2010 Şili depreminde yatay kesme kırılmasına maruz perde duvarlar (Wallace vd., 2012)

Son göçme şekli de eğilme momentinin karşılanamaması nedeniyle oluşan devrilme göçmesidir (Şekil 1.2d). Sünek göçme olan eğilme göçmesi dışındaki kesme kuvveti göçmesi, toptan kayma göçmesi ve devrilme göçmesi ani olarak gerçekleşen gevrek kırılma türleridir (Celep, 2013). Ayrıca, oldukça yüksek aksel gerilmeler ile beraber yüksek çevrimsel şekildeğiştirme altında beton örtüsünde dökülme olmaksızın ani burkulmalar meydana gelebilir. Bazı durumlarda, perde duvarın boyuna donatılarındaki burkulma, donatıların kopmasıyla aynı anda gerçekleşir. Şekil 1.6, 2010 yılında Şili'de meydana gelen depremde perde duvarda tespit edilen yanal burkulmayı göstermektedir. Thomsen ve Wallace (2004) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda yanal stabilite sorunları araştırılmıştır Fakat perde duvarların buna benzer göçme durumları üzerinde yeterince deneysel çalışma yürütülmemiştir.



Şekil 1.6. 2010 Şili depreminde yanal burkulmaya maruz perde duvar (Wallace vd., 2012)

### 1.3.3. Dolu Gövdeli Betonarme Perde Duvarlardan Beklenen Performans

Yönetmelikler, yapısal elemanlardaki elastik ötesi davranışı ve dolayısı ile oluşacak plastik mafsal oluşumlarını kontrol altında tutmak için kapasite tasarım ilkelerini esas almaktadırlar. Kapasite tasarımı ile tasarım yüklerinin etkisi altında oluşması beklenen en uygun plastik mafsal bölgesi belirlenmektedir. Belirlenen tasarım yükleri altında, plastik mafsal oluşumu için eleman üzerinde belirlenen bölgenin diğer bölgelerden önce elastik ötesi davranışa geçmesi sağlanarak sünek davranış elde edilmekte ve olası hasar bölgeleri sınırlandırılabilmektedir.

Kapasite tasarım koşulları çerçevesinde, betonarme perde duvarlarda aranan özellikler şunlardır:

- Perde duvarda sadece moment ile güç tüketimi (plastik mafsal) oluşmalıdır.
- Perde duvarda kesme kırılmasının oluşmasına kesinlikle izin verilmemelidir.
- Plastik mafsal oluşumu ile hasar gören perde-temel birleşiminde, filiz donatılarında ve perde içerisindeki diğer boylama donatılarında ankraj sıyrılması olmamalıdır.

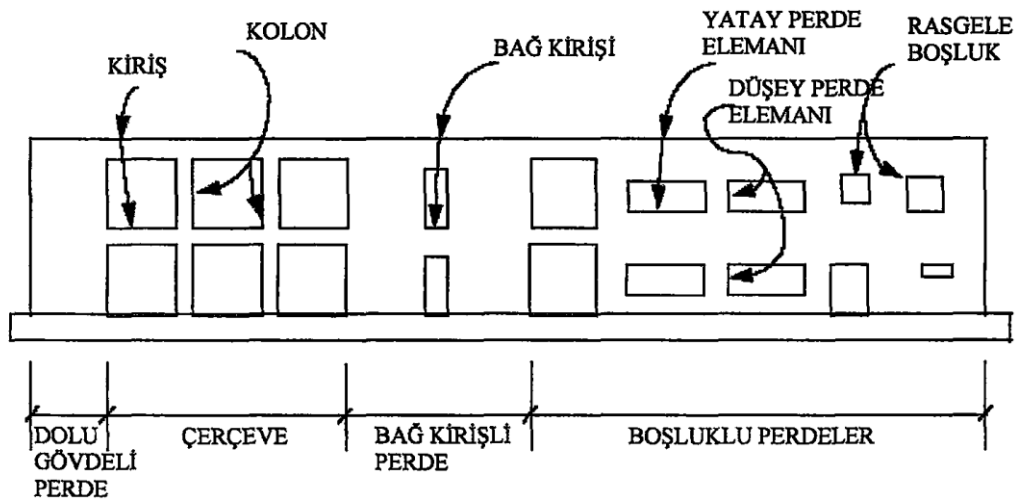


- Tersinir yatay yükler altında, perde betonunda oluşan X- eğik asal çekme çatlakları ve kesme kuvvetinin çok büyük olmasına göz yumulması durumunda eğik asal basınç ezilmelerine izin verilmemelidir.

Sonuç itibariye betonarme perde duvarlarda eğilme çatlaklarının etkisiyle plastik mafsallık oluşmalı ve kesmeye bağlı güç tüketimi ve beton ezilmelerine asla müsaade edilmemelidir (Atımtay, 2009).

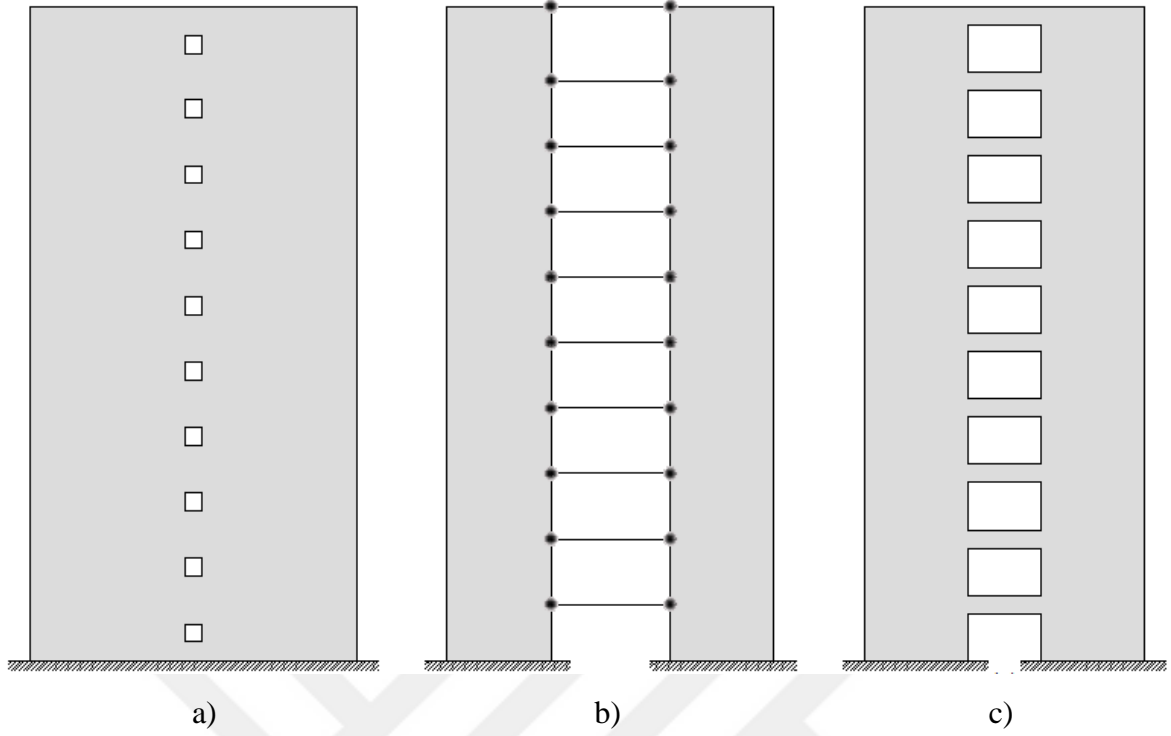
#### 1.4. Boşluklu Betonarme Perde Duvarlar

Betonarme perde duvarlar, yüksek binalarda hem yatay hem de düşey yükleri taşımak için kullanılan önemli yapı elemanlarıdır. Düşey konsol gibi davranış gösteren perde duvarlar, yüklerin üst yapıdan temele aktarımını sağlar ve yapı için bir tür yatay germe vazifesi taşır. Perde duvar sistemleri, rüzgar ve deprem gibi yatay yükler karşısında rijitlik, dayanım ve süneklik yönüyle iyi performans sağlaması sebebiyle yüksek binalarda en çok tercih edilen taşıyıcı sistemlerdir. Yüksek binalardaki yatay yüklerin yaklaşık olarak tamamını karşılayan birbirinden bağımsız perdeler ve eğilme rijitliğine sahip elemanlar birbirine bağlanarak yapının yatay yükler altında rijitliği daha da artırılır. Ayrıca katlardaki pencere, kapı ve tesisat vb. gibi kullanıma yönelik mimari durumlar ve bunun dışında konstrüktif nedenlerle dolu perdelerde boşlukların açılması gerekir (Şekil 1.7). Elde edilen sistem, kolon ve kirişlerden oluşan çerçeve sisteme benzerlik gösterir. Bu tür yapı elemanları boşluklu perde duvarlar olarak adlandırılır.



Şekil 1.7. Betonarme perde duvarlar ve boşluk durumları

Boşluklu perdelerin davranışı, üzerinde açılan boşluğun türüne göre değişiklik göstermekte ve hesap kabulleri boşluklara göre değişmektedir. Perdedeki boşlukların çok küçük olduğu ve bunların perdenin davranışına etki etmeyeceği varsayılan durumlarda, perde duvarın boşluksuz konsol kirişe benzer davranış gösterdiği kabul edilir (Şekil 1.8a). İkinci durum ise betonarme perde duvarları birbirine bağlayan elemanların uçlarının mafsalı olması veya eğilme rijitliğinin ihmal edilebilir seviyede düşük olmasıdır (Şekil 1.8b). Bu durumda perdeleri bağlayan yatay elemanlar, pandül ayağa benzer özellik taşıması sebebiyle kesme kuvveti ve moment aktarımını yerine getiremezler. Yatay kuvvetler bu elemanlar tarafından bir perde duvar ayağından diğerine aktarılır. Perdelerde sadece kesme kuvveti ve eğilme momenti meydana gelir. Bu durumların dışında ise perde duvar üzerinde açılan boşluklar sebebiyle geleneksel kirişten daha fazla kesme kuvvetine maruz kısa ve derin kirişler veya bağlantı elemanları meydana gelir (Şekil 1.8c). Bu elemanların bir özelliği sisteme gelen eğilme momentini kesme kuvvetleri yoluyla perde ayaklarına aksel yük olarak aktarmalarıdır. Devrilme momentinin aksel kuvvetlerin etkisiyle azalarak perde ayaklara aktarılması tasarım açısından uygun görülmektedir (Çıtıptıoğlu ve Doğan, 1994). Bu sebeple dolu konsol bir perde üzerinde açılan boşluklardan kaynaklanan rijitlik azalması bu bağlantı elemanlarının perde ayakları üzerindeki davranışı ile karşılanmaktadır. Açılan boşluklar sebebiyle ortaya çıkan perde duvar ayaklarını birbirine bağlayan bu bağlantı elemanlarına veya derin kirişlere bağ kirişleri adı verilmektedir.



Şekil 1.8. Boşluklu perde türleri (Demir, 2008)

Bir perde duvarın tasarımının gerçekleştirilebilmesi için öncelikle belirtilen boşluk durumları çerçevesinde türüne karar verilmesi gerekmektedir. Mevcut yönetmelikler ve bilimsel araştırmalarda kabul gören bazı kıstaslar perde duvarların boşluk durumlarının değerlendirilmesine rehber olmaktadır. Yönetmelikler ve literatürdeki araştırmalara göre perde duvar tipinin belirlenmesi için 3 farklı değerlendirme yapılmaktadır. Bunlar,

- Boşluk oranı
- Bağlantı mertebesi (bağ derecesi katsayısı)
- Formülasyon

olarak ifade edilmektedir.

Boşluk oranı için en genel değerlendirme Hasgür ve Gündüz (1996) tarafından yapılmıştır. Buna göre, boşluk oranı,

$$P = \sqrt{\frac{a_b}{A}} \quad (1.1)$$

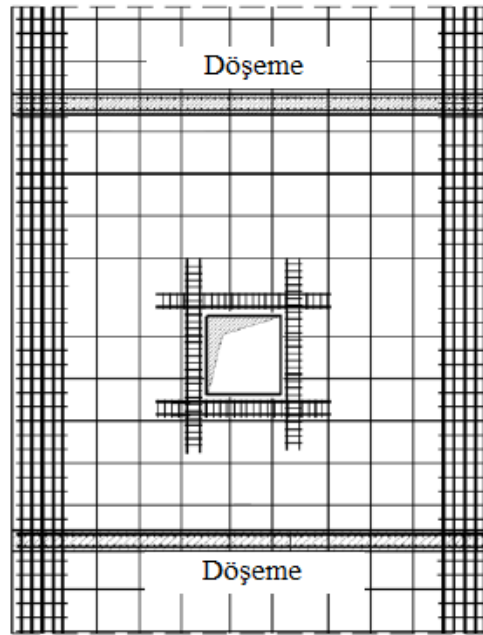
olarak belirtilmektedir. Burada  $a_b$  ve  $A$  sırasıyla perde duvar üzerinde açılan boşluk alanı ve boşluksuz perde duvarın yüzey alanını göstermektedir.  $P < 0.4$  olması durumunda perde

duvar dolu gövdeli perde duvar olarak dikkate alınmalıdır.  $P > 0.5$  olması durumunda ise perde duvarlar çerçeve sistem gibi davranmaya başlar ve hem kayma hem de eğilme kirişine benzer davranış gösterirler (Demir, 2008).

DBYBHY 2007 'ye göre perde duvarlarda oluşturulan boşlukların büyüklüğüne göre bir tanımlama yapılmamıştır. Fakat bağ kirişli boşluklu perdelerde bağ kirişlerinin tasarım koşulları ve donatı düzenlemesine yer verilmektedir.

TBDY 2018'e göre ise bağ kirişli boşluklu perde duvarların tasarım koşullarının geliştirilmesi yanında dolu gövdeli perde duvar olarak kabul edilecek boşluklu perde duvarlarda boşluk sınırları ve donatı düzenlemesi için yeni koşullar eklenmiştir. Buna göre,

- Perde duvar içinde bulunan pencere ve tesisat gibi boşluklar planda perdenin orta üçte birlik bölgesinde oluşturulacak, boşluğun yatay boyutu perde genişliğinin %20'sinden büyük ve dikey boyutu kat yüksekliğinin %20'sinden büyük olmayacaktır.
- Boşluğun kenarlarına, üstüne ve altına, etriyelerle sarılı ilave dikey ve yatay donatı yerleştirilecek (Şekil 1.9); bu bölgelere yerleştirilen ilave donatının her bir doğrultudaki toplam kesit alanı, boşluk bölgesine yerleştirilmemiş olan donatının toplam kesit alanından az olmayacak ve etriye aralığı 150 mm'den daha büyük alınmayacaktır.



Şekil 1.9. Boşluklu perde duvarlarda boşluk donatısı

TBDY 2018'e göre bağ kirişli olarak tasarlanması muhtemel boşluklu perde duvarlar için bağlantı mertebesi ( $\Omega$ ) kriteri getirmiştir. DBYBHY 2007'de yer verilmeyen fakat TBDY 2018'de detaylı olarak ortaya konan boşluklu perdelerde bağlantı mertebesi, tasarımcılara önemli yol gösterici olmaktadır. Buna göre bağ kirişleri ile perde duvar tabalarına aktarılan toplam momentin, perde duvar tabanlarında oluşan toplam devrilme momentine oranı olarak ifade edilmektedir. TBDY 2018'e göre tasarlanmakta olan boşluklu perde duvar sisteminin bağ kirişli olarak tasarlanabilmesi için bağlantı mertebesinin en az 1/3 olması gerekmektedir. Bağ kirişleri ile birbirine bağlanan perde duvarlar arasındaki mesafe arttıkça bağ kirişi üzerindeki kesme kuvveti etkisi azalacaktır. Bu sebeple perde duvar ayaklarına aktarılacak moment de azalacağı için bağlantı mertebesi azalacaktır. Bağlantı mertebesinin 1/3'ten düşük olması durumunda perde duvarlar arasındaki bağlantı ihmal edilerek her bir perde duvar için gerekli olan tasarımlar dolu gövdeli perde duvar tasarımı kabullerine göre gerçekleştirilecektir. TBDY 2018'e göre, bağ kirişleri ile bağlanan perde duvarlarda aşırı eksenel kuvvetlerin oluşmasını için bakımından  $\Omega \leq 2/3$  koşulunun da sağlanması çalışılmalıdır.

Chaallal vd. (1996), bağlantı mertebesinin hesabının uzun süre alması ve yapısal analiz gerektirmesi sebebiyle, boşluklu betonarme perde duvarların sınıflandırması için yöntem geliştirmişlerdir. Sınıflandırmayı doğal hakim periyodu ve bağlantı mertebesi esaslı olarak yapmışlardır. Chaallal vd. (1996), periyot esaslı sınıflandırma için,

$$T = 3n \left( \frac{l_n}{h_b} \right)^{0.19} \left( \frac{h_w}{D_w} \right)^{0.76} \sqrt{\frac{W}{gE_c t}} \quad (1.2)$$

formülünü önermişlerdir. Burada  $T$ ,  $h_w$ ,  $D_w$ ,  $l_n$ ,  $h_b$ ,  $n$ ,  $W$ ,  $E_c$  ve  $t$  sırasıyla, perde duvar ve bağ kirişi kesitine bağlı doğal hakim periyodunu, boşluklu perde duvar yüksekliğini, duvar uzunluğunu, bağ kirişi uzunluğunu, bağ kirişi yüksekliğini, kat sayısını, ortalama kat ağırlığını, betonun elastisite modülünü ve perde duvar kalınlığını göstermektedir.

Wallace ve Moehle (1992) tarafından esnek ve rijit perde duvarlar için geometrik özelliklere bağlı olarak Wallace esnek ve rijit periyot formülleri ortaya koyulmuştur. Chaallal ve çalışma ekibi 1.2 numaralı formül ile elde ettikleri doğal hakim periyodu değerini, Wallace esnek ve rijit hakim periyot değerleri ile kıyaslayarak boşluklu perde

duvarların bağlantı türüne veya sınıflandırılmasına karar vermişlerdir. Buna göre,  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları sırasıyla, 1.1 ve 0.9 olmak üzere,

- $T\alpha \leq T_{\text{Stiff}}^{\text{Wallace}}$  olması durumunda perde duvarlar tek parça olarak modellenmelidir.
- $T \geq \beta T_{\text{Flexible}}^{\text{Wallace}}$  olması durumunda perde duvarlar birbirinden bağımsız perde duvar olarak modellenmelidir.
- $\alpha T_{\text{Stiff}}^{\text{Wallace}} \leq T \leq \beta T_{\text{Flexible}}^{\text{Wallace}}$  perde duvarlar boşluklu veya bağ kirişli perde duvar olarak modellenebilir.

Bağlantı mertebesi esaslı sınıflandırma için kat yüksekliği 18-120m, kat sayısı 6-40 kat, duvar uzunluğu 2-7m, bağ kirişi uzunluğu 1.50-4m ve bağ kirişi yüksekliği 0.20-1.50m arasında değişen 500'den fazla boşluklu perde duvar üzerinde, döşeme rijitlikleri ve burulma etkisini dikkate almaksızın gerçekleştirdikleri analizlere göre,

$$CR = \frac{(\gamma/0.6)^{a/3}}{(\gamma/0.6)^{b/3}} k \frac{h_b^a}{D_w^b l_b^c} \quad (1.3)$$

formülünü önermişlerdir. Burada , a, b, c ve k katsayıları kat sayısına bağlı olarak Tablo 1.1'de sunulmaktadır.

Tablo 1.1. Kat sayısına bağlı olarak a, b, c ve k katsayıları

Kat Sayısı (n)	k	a	b	c
6	2.976	0.706	0.615	0.698
10	2.342	0.512	0.462	0.509
15	1.697	0.352	0.345	0.279
20	1.463	0.265	0.281	0.190
30	1.295	0.193	0.223	0.106
40	1.190	0.145	0.188	0.059

Önerilen formülasyondan elde edilen bağlantı mertebesi, kat sayısına göre asgari olarak aşağıda verilen aralıklarda olmalıdır.

- 6 katlı sistem için  $0.101 \leq CR \leq 0.316$
- 10 katlı sistem için  $0.211 \leq CR \leq 0.561$
- 15 katlı sistem için  $0.219 \leq CR \leq 0.447$

- 20 katlı sistem için  $0.304 \leq CR \leq 0.420$

30 ve 40 katlı sistem için bir aralık ifade edilmemiştir. Fakat 30 kattan daha yüksek sistemler için bağlantı mertebesi değerinin 0.66 değerinden yüksek olması gerektiği belirtilmiştir.

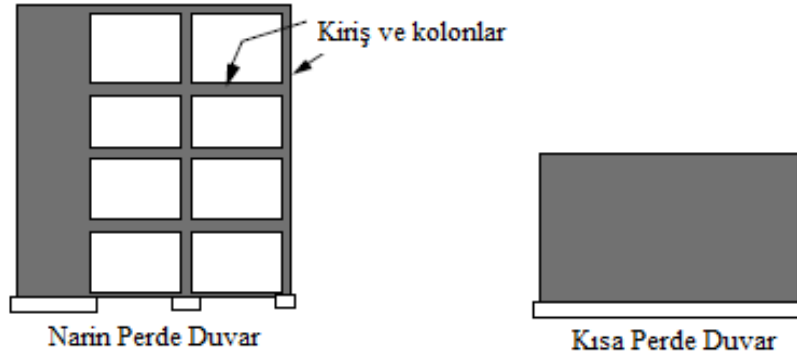
### 1.5. Boşluklu Perde Duvarlarda Boşluk Durumuna Göre Hasar Gelişimi

Yatay yükler altında hayati yıkımların önüne geçebilmek için bina yatay yük taşıyıcı sistemler, elastik ötesi davranış sayesinde şekildeğiştirme enerjisini tüketme kabiliyeti ortaya koyabilecek kadar dayanıma ve sünekliğe sahip olmalıdır. Bu sebeple, perde duvar sistemleri de, gerekli olan yatay dayanım ve deformasyon kapasitesini ortaya koyabilecek şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmelidir. Betonarme perde duvarlarda aranan dayanım, süneklik ve rijitlik kapasiteleri, sadece beton dayanımı, donatı oranı, donatı düzeni ve narinliğine bağlı olarak değil, aynı zamanda işlevselliğine göre değişen boşlukların varlığına bağlı olarak da büyük değişim göstermektedir.

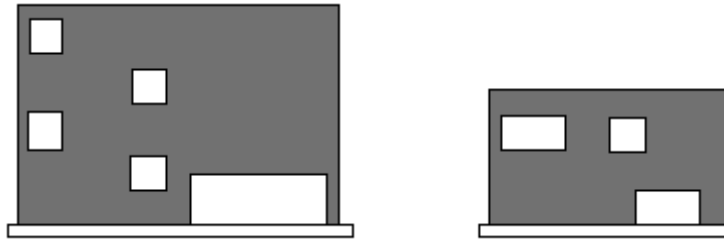
FEMA-306'ya göre perde duvarlar, üzerinde açılan boşluk veya delik durumuna göre 3 gruba ayrılmaktadır.

- Dolu gövdeli perde duvarlar (narin ve kısa perde duvarlar) (Şekil 1.10a)
- Düzensiz delikli veya küçük boşluklu perde duvarlar (Şekil 1.10b)
- Düzenli boşluklu perde duvarlar (zayıf kiriş-güçlü perde ayağı ve güçlü kiriş-zayıf perde ayağı) (Şekil 1.10c)

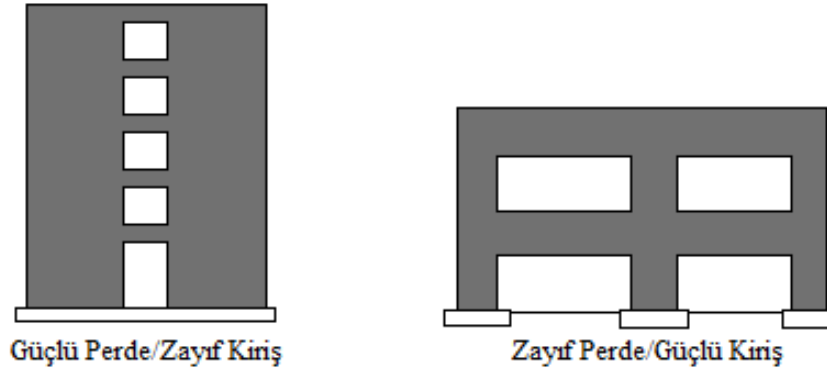
Şekil 1.10, perde duvarların boşluklu veya boşluksuz durumlarına göre ortaya çıkan farklı formlarını göstermektedir. Şekilde görülen perde duvar tiplerinin tamamına uygulamada sıkça rastlamak mümkündür. FEMA-306'ya göre yapılan sınıflandırma için oluşması muhtemel hasar mekanizmaları da ortaya konmaktadır. Üzerinde küçük boşluk açılmış veya delinmiş perde duvarlar ve dolu perde duvar elemanları, boşluklu perde duvarların aksine, düzensiz delik veya boşluk dağılım modeli sergileyebilir. Boşlukların sayısına bağlı olarak yerleşim düzeni değiştikçe perde duvarların davranışı tasarım amacı ve koşullarının dışına çıkmaktadır. Boşluk alanı toplamı perde duvarın dolu alanına nazaran azaldıkça davranış, dolu gövdeli perde duvar davranışına evrilmektedir.



a) Dolu gövdeli perde duvarlar



b) Düzensiz delikli veya küçük boşluklu perde duvarlar



c) Düzenli boşluklu perde duvarlar

Şekil 1.10. Perde duvarların boşluk durumuna göre sınıflandırılması (FEMA-306, 1998)

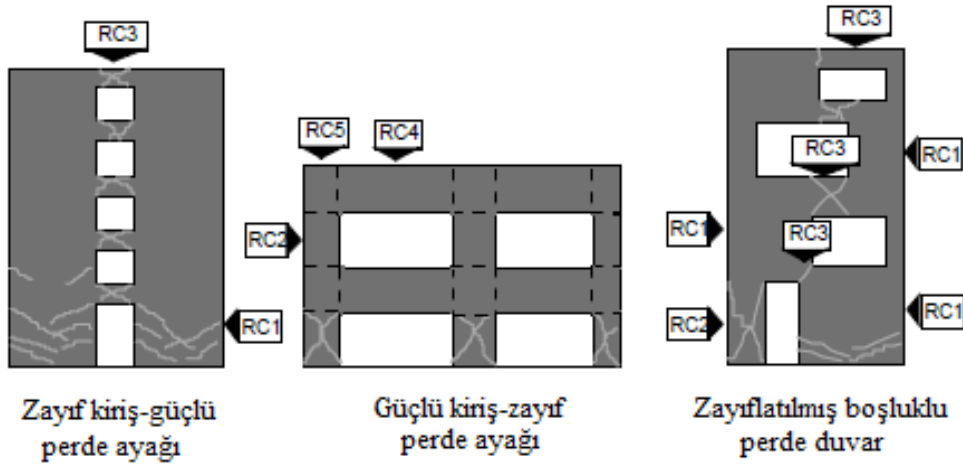
Dolu gövdeli perde duvardan boşluklu perde duvara doğru hasarın evrilmesi Şekil 1.11’de gösterilmektedir. Perde duvar üzerindeki açıklıklar, boşluklu perde duvarın dolu alanına göre artması durumunda düzenli veya düzensiz boşluk düzenine sahip boşluklu perde duvar davranışına eğilim göstermektedir. Bu sebeple, perde duvarların arzu edilen dayanım, süneklik ve rijitlik bakımından tasarlanması tek başına yeterli olmamaktadır.



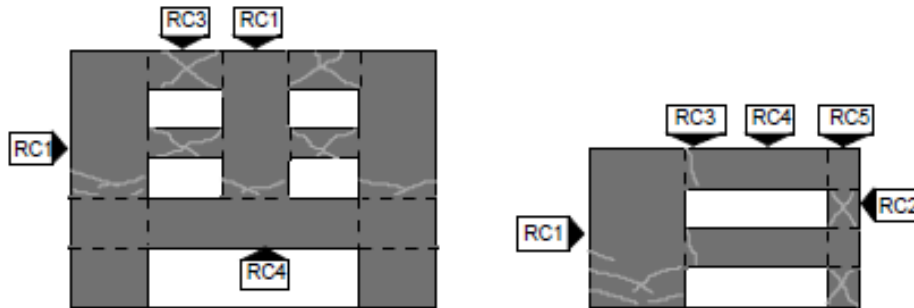
Perde duvarda uygun hasar mekanizmasının oluşumunu sağlayacak tasarımın sağlanabilmesi gerekmektedir. Perde duvar üzerinde tasarım veya üretim aşamasında oluşacak boşlukların perde duvar davranışını doğrudan etkileyebileceği göz ardı edilmemelidir.



a)Konsol perde duvar hasar mekanizması



b)Kiriş-perde duvar hasar mekanizması



c)Karma sistem hasar mekanizması

Şekil 1.11. Perde duvarlarda boşluk veya delik durumuna göre hasar mekanizmasının gelişimi (FEMA-306, 1998)

Şekil 1.11’de perde duvarların elemanları için yapılan tanımlamalarda RC1, RC2, RC3, RC4 ve RC5 sırasıyla, konsol veya dolu gövdeli perde duvar, zayıf perde duvar ayağı, zayıf kiriş, güçlü kiriş ve kiriş-perde duvar birleşim bölgesi olarak ifade edilmiştir. 2010 yılında Şili’de meydana gelen depremde hasar gören perde duvarlar, boşluklu perde duvarlardaki hasar mekanizmasına çok iyi bir örnek teşkil etmektedir (Şekil 1.12). Burada, boşluk sayısı ve alanı kadar boşlukların dağılımının da hasar mekanizmasının oluşumunda çok büyük etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 1.12. 2010 Şili depreminde hasar gören boşluklu perde duvar ve elemanları (Wallace vd., 2012)

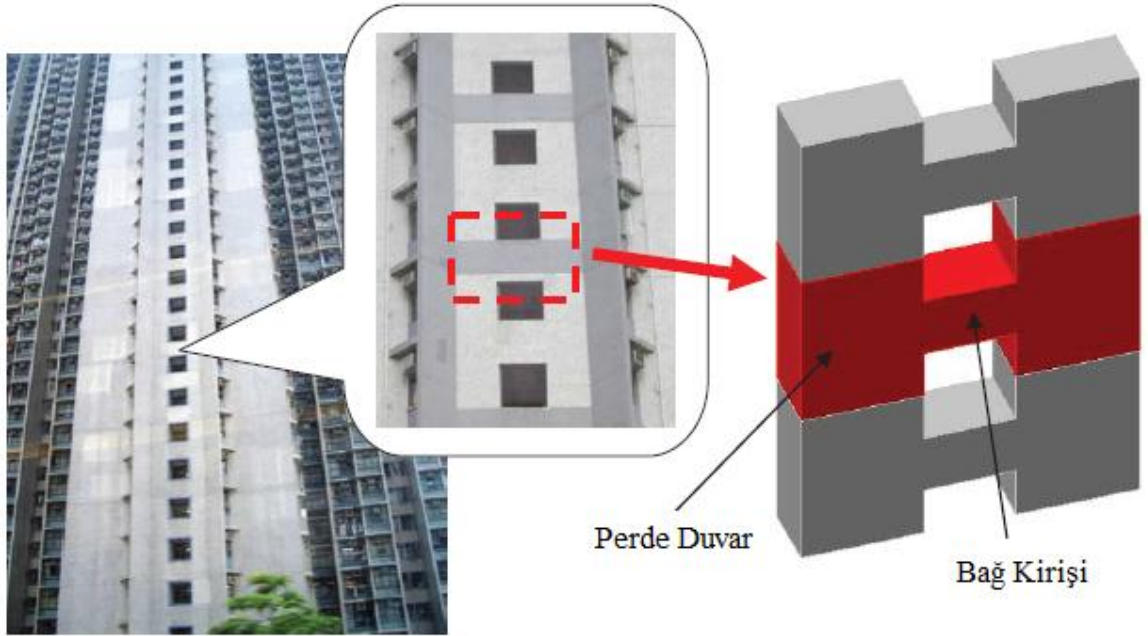
### 1.6. Bağ Kirişli Boşluklu Betonarme Perde Duvarlar ve Bağlantı Etkileşimi

Bağ kirişli boşluklu betonarme perde duvarlar, orta ve yüksek katlı binalarda iki ve daha fazla perde duvarın bağ kirişleri ile bağlanarak oluşturulduğu boşluklu perde duvar şeklindedir. Yapının fonksiyonu bakımından ihtiyaç duyulan duvarlar arasındaki boşlukları sağlaması yanında düşey ve yatay yüklerin karşılanmasında etkin rol oynamaktadır. Boşluklu perde duvar ve bağ kirişlerinin uygulamadaki bir görüntüsü Şekil 1.13’te verilmektedir.

Boşluklu perde duvarlar, sadece binadaki yatay yüklere karşı deformasyonu azaltmakla kalmaz aynı zamanda kirişler ve perde ayakları arasındaki hem yatay hem düşey elastik olmayan deformasyonun dağılımını sağlamakla görevlidir. Bu sebeple boşluklu perde duvar sistemi içerisinde tekil perde duvar ayakları ile bağ kirişleri arasındaki bağlantı

şeklinin iyi ayarlanması gerekmektedir. Tekil perde duvar ayakları ile bağ kirişleri arasındaki bağlantının perde duvar sistemi üzerinde 3 önemli yararı vardır:

- Yapısal sistemin davranışı üzerinde etkin rol oynayan perde duvar ayaklarının yatay yükler etkisinde meydana devrilme momentlerinin azalmasını sağlar.
- Bağ kirişlerinin elastik olmayan deformasyona uğraması sonucu perde duvar sisteminin yüksekliği boyunca yatay yüklerden gelen dinamik enerji tüketilir.
- Bağımsız perde ayaklarının sağlamış olduğu toplam yatay rijitlikten çok daha fazlasını sisteme kazandırır (El Tawil vd., 2010).

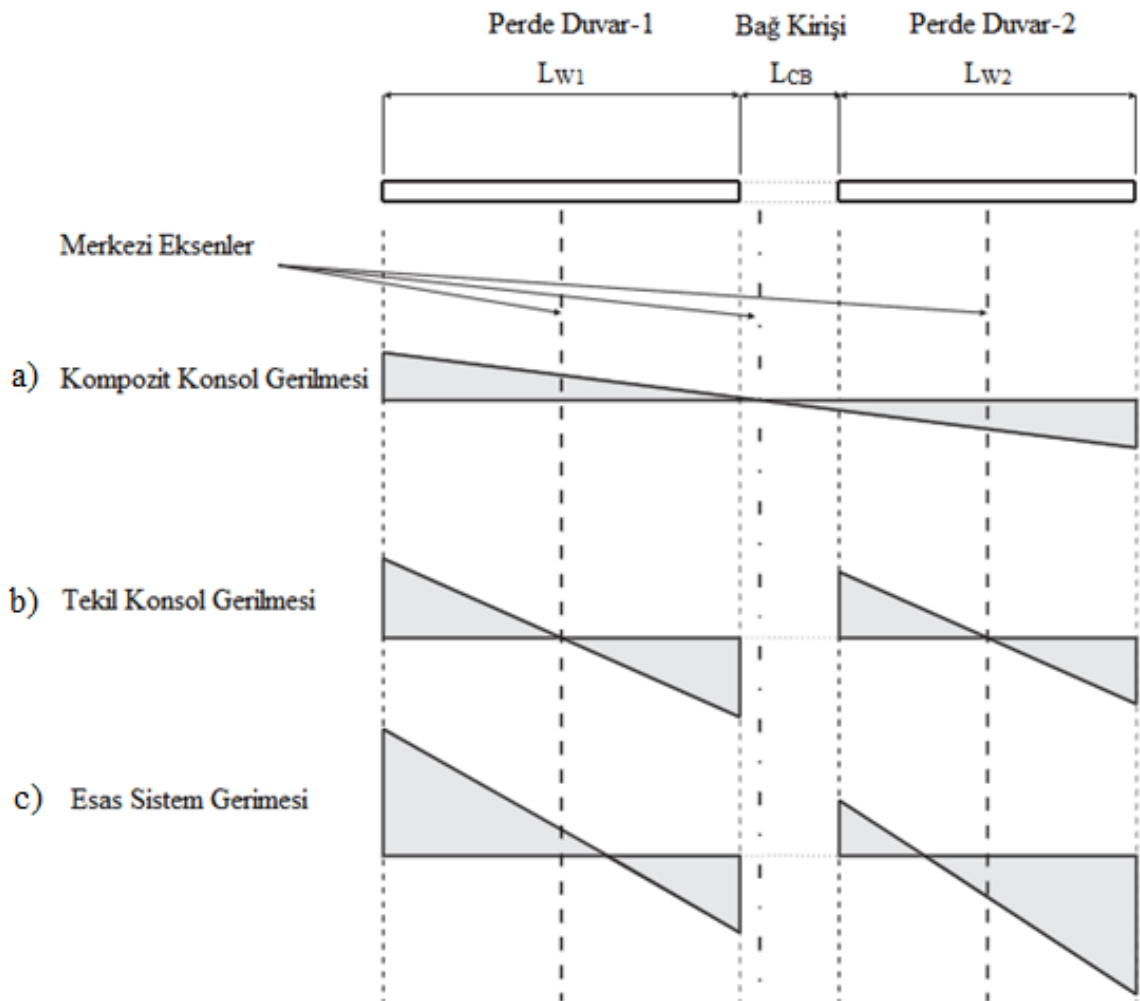


Şekil 1.13. Tipik bir boşluklu perde duvar ve bağ kirişleri (Suen, 2012)

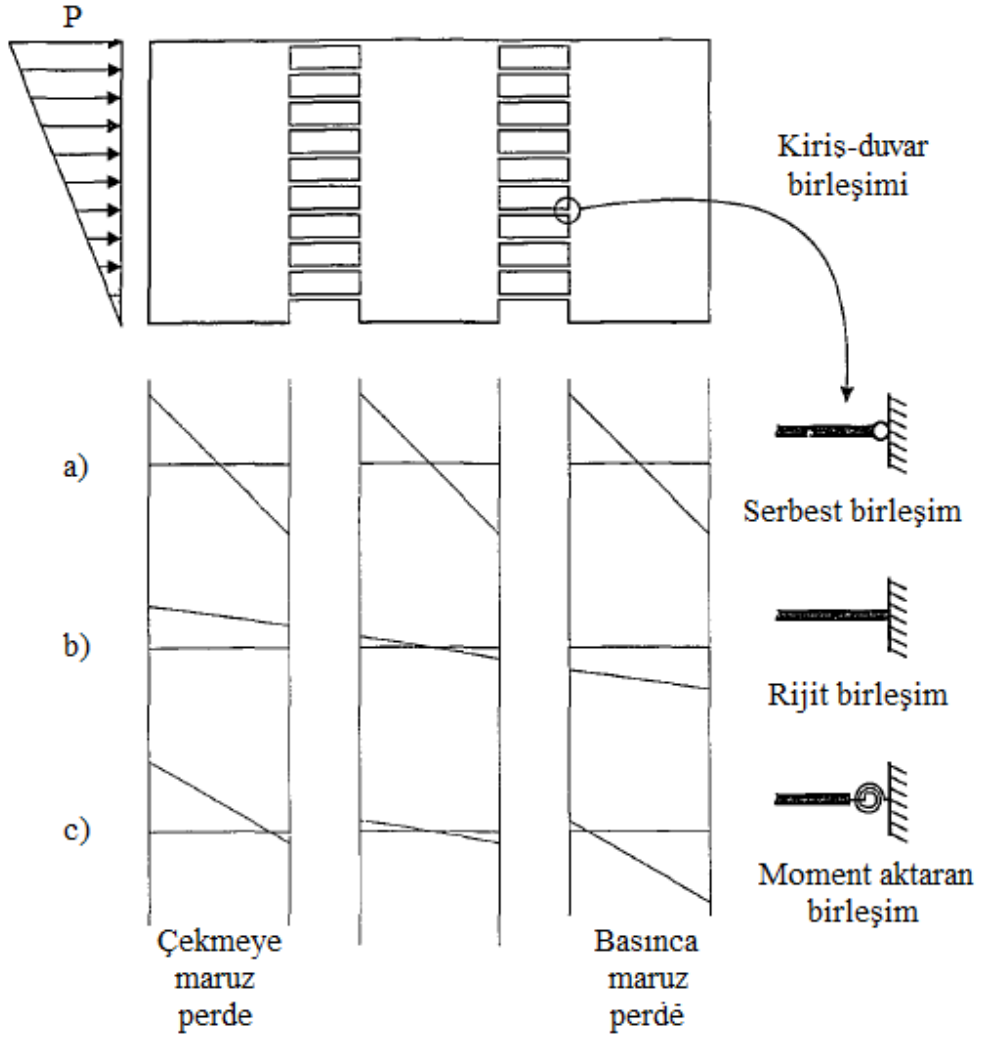
Bağ kirişli boşluklu perde duvarlar, düzlem içerisinde ortak merkezi eksen etrafında dönen kompozit konsollar gibi davranmaktadır (Montgomery, 2011). Bağ kirişlerinin rijitliği arttıkça sistem, tek parça kompozit konsol davranışı göstermektedir. Kompozit konsola gelen momentin perde duvar tabanında meydana getirdiği normal gerilme, uç noktadaki maksimum çekme ve minimum basınç gerilmesi arasında lineer olarak değişmektedir (Şekil 1.14a). Bağ kirişlerinin esnekliği arttıkça sistem iki bağımsız konsol gibi davranmaya başlamakta ve gerilme dağılışı Şekil 1.14b'deki gibi olmaktadır. Genel olarak boşluklu perde duvar davranışı, bu iki bağlantı türünün arasında yer almaktadır. Şekil 1.14c'de yatay yüklere maruz boşluklu perde duvarların davranışının genelleştirilmiş

hali verilmektedir. Bağ kirişi-perde duvar birleşim Şekillerine gşe, sistemin idealleştirilmiş gerilme dağılışı Şekil 1.15'te verilmektedir.

Bořluklu perde duvarlarda baę kiriřleri, perde duvar taban gerilme daęılıřı yanında, kat yůkseklėęi boyunca moment daęılıřı ve yerdeęiřtirmesinde de bůyůk rol oynamaktadır. Őekil 1.16'da gřeüleceęi ůzere konsol dolu perde duvarların tabanından tepe noktasına doęru moment pozitif deęerlerden sıfır deęerine dőnůřüm gősterirken (Őekil 1.16a), baę kiriřlerinin tersinir yőnde oluřturduęu momentler sebebiyle perde duvarların tepe noktasına doęru moment deęerlerinin negatife dőnůřtůęu gřeulmektedir (Őekil 1.16c).



Őekil 1.14. Yatay yůke maruz bořluklu perde duvarların eęilme gerilmeleri (Montgomery, 2011)



Şekil 1.15. Bağ kirişi-perde duvar birleşim şekillerine göre sistemin idealleştirilmiş gerilme dağılışı (Harries, 1995)

Boşluklu perde duvarlar yatay yük etkisi altında hareket ettiğinde bağ kirişleri dönerek çift eğrilikli düşey eğilme davranışı göstermektedir. Bu etkiden dolayı bağ kirişlerinde oluşan kesme kuvvetleri perde duvarlarda, yüklemenden gelen dış momente tersinir yönde eğilme momentleri meydana getirir. Yatay yüke maruz boşluklu perde duvarın şekil değiştirmiş hali Şekil 1.17b'de verilmektedir.

Katlardan etkileyen momentlerin bileşkesi veya toplam taban devrilme momenti  $M$ ,

$$M = \sum M_i + \sum N_i L_i \quad (1.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $N_i$ ,  $M_i$  ve  $N_i L_i$  sırasıyla her bir duvara gelen eksenel kuvveti, dış yük etkisiyle her bir perde duvar ayağına gelen momenti ve perde eksenlerine gelen eksenel kuvvetin etkisiyle kompozit kesitin ekseninde oluşan bağ momentini göstermektedir. Eğer tek bir bağ kirişi ile iki perde duvar bağlanıyorsa, bileşke moment (devrilme momenti),

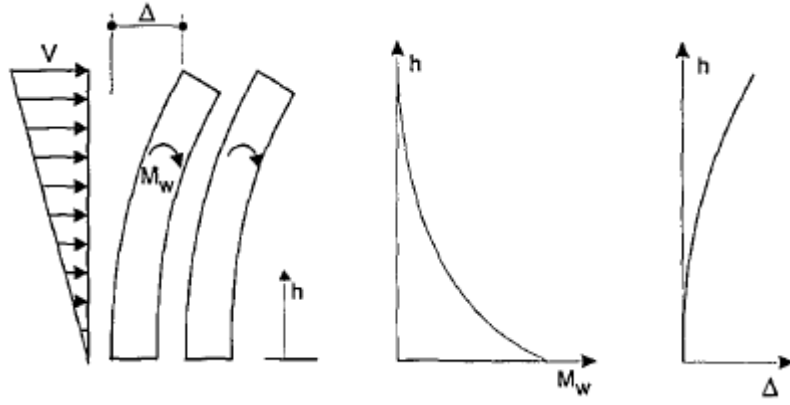
$$M = M_1 + M_2 + NL \quad (1.5)$$

olmaktadır. Burada L, iki perdenin eksenleri arasındaki mesafedir. Serbest cisim diyagramı Şekil 1.17c'de verilmektedir. n tekil perde duvar sayısı olmak üzere  $\sum_{i=1}^n N_i L_i$  değeri, bağ kirişlerinin sonsuz rijit olması durumunda maksimum, sonsuz esnek olması durumunda ise sıfır olmaktadır.

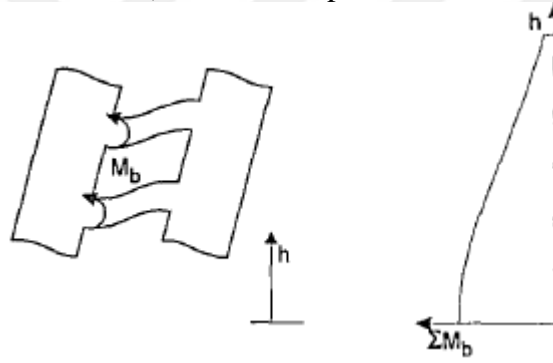
Santhakumar (1974), 20 katlı boşluklu betonarme perde duvar üzerinde yaptığı çalışmada bağ kirişi derinlik/açıklık oranının sistem içerisindeki momentin dağılımına olan katkısını araştırmıştır. Açıklık/derinlik oranı 3'ten daha küçük olan bağ kirişleri kullanılması durumunda sistemdeki momentin %80' ninin bağ kirişleri tarafından karşılandığını ortaya koymuştur. Paulay ve Taylor (1981) döşeme tipi bağ kirişleri üzerinde yaptıkları çalışmada döşeme tipi bağ ve kiriş tipi bağların konsol perde duvarlara göre devrilme momenti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Buna göre, derin kirişlerle bağlanan boşluklu perde duvarların devrilme momentinin yaklaşık %75'i kirişler tarafından karşılanırken, döşeme türü sığ elemanlar ile bağlanan boşluklu perde duvarlarda devrilme momentinin yaklaşık %20'si döşemeler tarafından karşılanabildiğini belirtmişlerdir.

Hasar mekanizması açısından uygun olarak tasarlanan boşluklu perde duvarlar, deprem ve rüzgar gibi büyük yatay yüklere maruz kaldığında, yüke bağlı olarak sisteme gelen enerjinin bağ kirişlerinin elastik ötesi şekil değiştirmeleri ile karşılanacağı kabul edilmektedir. Bağ kirişleri, böylece boşluklu perde duvar sisteminin gerekli dayanım, rijitlik ve enerji tüketme (süneklik) kabiliyeti göstermesini sağlamakta ve arzu edilen bağlantı mertebesini sisteme kazandırmaktadır. Şekil 1.18-19'da deprem sonrası hasar gören bağ kirişi örnekleri verilmektedir. Örnekler incelendiğinde depreme maruz kalan binalardaki perde duvarlarda hasar oluşmadan enerjinin büyük bölümünün bağ kirişlerinin

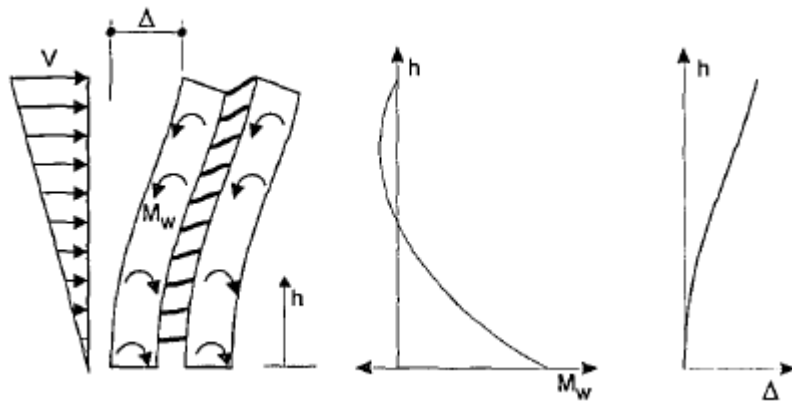
elastik ötesi şekil değiştirmesi ile karşılandığı ve hasarın tamamının bağ kirişlerinde toplandığı görülmektedir.



a)Konsol dolu perde duvar

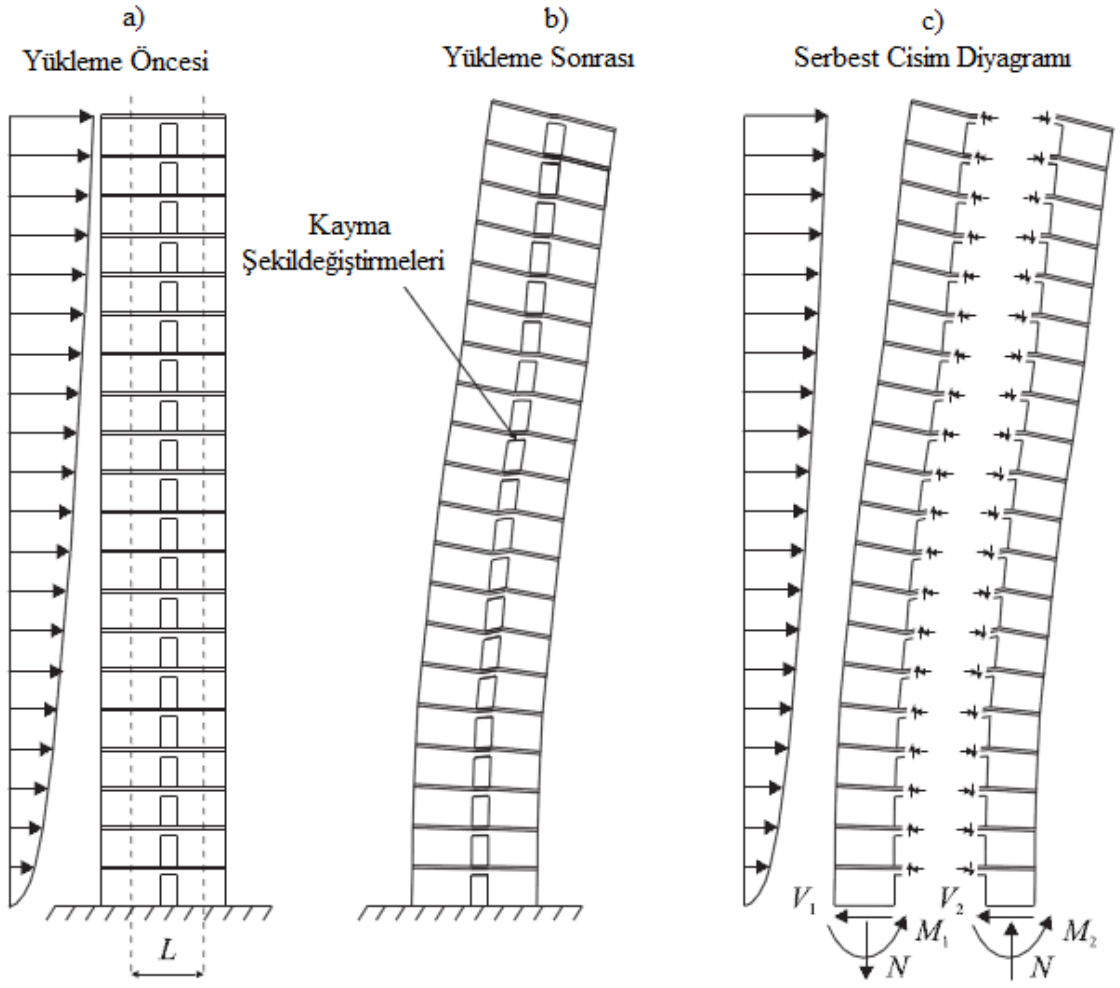


b)Bağ kirişleri tarafından ortaya çıkan ters momentler



c)Boşluklu perde duvar davranışı

Şekil 1.16. Boşluklu perde duvar davranışının gelişimi (Harries, 1995)



Şekil 1.17. Yatay yüke maruz boşluklu perde duvar (Montgomery, 2011)



Şekil 1.18. 1964 Alaska depreminde hasar gören bağ kirişi örnekleri (Suen, 2012)





Şekil 1.19. 1994 California depreminde hasar gören bağ kirişi örneği (Suen, 2012)

Yapısal davranışın bir ölçüsü olan bağlantı mertebesi ( $CR$ ), boşluklu perde duvar sisteminin yatay yüklere karşı tepkisini etkileyen en önemli bir parametredir (Harries vd.,2000). TBDY 2018'e göre ise bu değer bağ derecesi katsayısı olarak tanımlanmıştır. Bağlantı mertebesi ( $CR$ ), bağlantı etkisiyle duvarda meydana gelen eksenel etkinin meydana getirdiği devrilme momentinin, tüm sistemde meydana gelen devrilme momentine oranı olarak ifade edilir ve

$$CR = \frac{L \sum V_B}{L \sum V_B + \sum M_i} \quad (1.6)$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $V_B$ , perde duvar ayaklarına normal kuvvet olarak etki eden bağ kirişi kesme kuvvetlerinin toplamıdır.  $CR=0.0$  olması durumunda bağ kirişleri uç momentleri meydana getiremez ve sistem üzerinde bağlantı etkisi bulunmaz. Bağ kirişinin olmadığı veya Şekil 1.8b'deki gibi mafsallı bağlantının yapıldığı kabul edielir.  $CR=0.50$  olması durumunda devrilme momentinin ( $M$ ) yarısı bağlantı etkisi ile karşılanırken diğer yarısı da perde duvar ayakları ile karşılanmaktadır ( Şekil 1.17c'deki  $M_1$  ve  $M_2$ ).  $CR=1.0$  olması durumunda ise, boşluklu perde duvar, dolu perde duvar davranışı gösterir, yani bağ kirişi uzunluğunun ya da boşluk genişliğinin çok küçük olduğu kabul edilir (El Tawil vd., 2010).  $CR=0.45-0.80$  aralığında olması durumunda boşluklu perde duvarlarda bağlantının etkinliği ve avantajları tam olarak ortaya çıkmaktadır (El-Tawil vd., 2009). TBDY 2018'e göre, bağ kirişleri ile bağlanan perde duvarlarda aşırı eksenel kuvvetlerin oluşmasını önlemek bakımından  $0.33 \leq CR \leq 0.67$  koşulunun sağlanması gerekmektedir.

### 1.7. Bağ Kirişlerinin Göçme Mekanizması

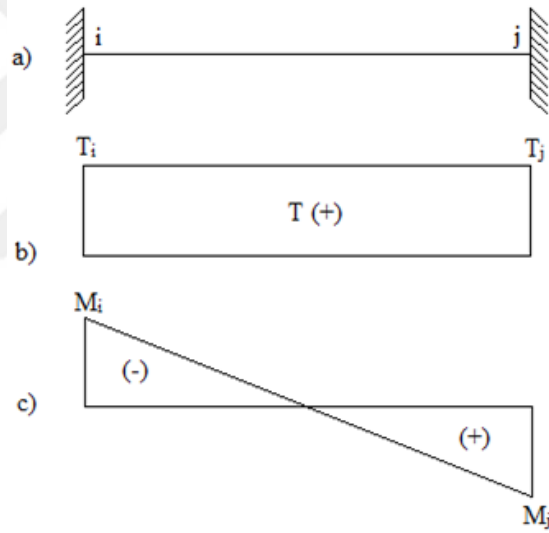
Paulay (1970), boşluklu perde duvarlarda perde ayaklarında tam kapasite dayanımına ulaşabilmesi için bağ kirişlerinin dönme kapasitesinin yüksek olması gerektiğini ifade etmiştir. Bağ kirişlerinin derin ve kısa olması, gerekli olan dönme kapasitesine ulaşma ihtimalini zorlaştırmaktadır. Yapılan ilk çalışmalarda bütün bağ kirişlerinin eğilme etkisinde hasar gördüğü kabul edilmiştir. Bağ kirişlerinin eğilme etkisinde kırılabilmesi için yüksek dönme kabiliyeti gerektirmesine rağmen yapılan bu kabulün çoğu zaman karşılanamadığı görülmüştür. Paulay (1971), Subedi (1986) ve Subedi (1988) tarafından derin kirişler kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda bağ kirişleri için esas göçme mekanizmasının kesme veya diyagonal yırtılmanın olduğu belirtilmiştir.

Bağ kirişlerinin göçme mekanizmasının daha anlaşılabilir olması için yatay yük etkisi altında bağ kirişlerinin ekseni boyunca meydana gelen kesme kuvveti ve moment kesit tesirlerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Boşluklu perde duvar içerisinde yer alan bağ kirişinin sınırlandığı alan bir bant olarak dikkate alındığında, bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesi ankastre mesnet gibi davranmaktadır (Subedi, 1991). Bu durumda kiriş ekseni boyunca kesme kuvveti ve moment diyagramı Şekil 1.20’de gösterildiği gibi olmaktadır. Yatay yük etkisi altında, bağ kirişi uç dönmeleri her zaman eşit olmakta ve bağ kirişleri eksenleri boyunca sabit kesme kuvvetine maruz kalmaktadır. En büyük momentler birleşim bölgelerinde oluşmakta ve bağ kirişinin her iki ucundaki momentler eşit olmaktadır. Bağ kirişlerinin uzunluğu arttıka kesme kuvveti etkisi azalsa bile uç momentleri artmakta ve kirişler eğilme etkisine maruz kalmaktadır. Fakat kiriş açıklığı azaldıkça kesme kuvveti etkisi artarken kiriş uç momentleri azalmaktadır. Böylece, eğilme etkisi yerini kesme etkisine bırakmaktadır.

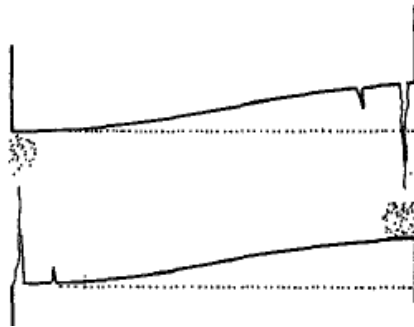
Normal kirişlerde olduğu gibi bağ kirişlerinin çift eğrilikli davranış göstermediği, eğilme donatılarının kiriş açıklığı boyunca çekmeye maruz kaldığı ve moment sıfır bölgesinde bile düşük gerilme alanının yer almadığı kabul edilmektedir (Paulay, 1971). Bu sebeple, bağ kirişinin eğilme etkisine maruz kalabilmesi için açıklık/derinlik oranının büyük, dönme kapasitesinin oldukça yüksek ve derin kiriş özelliğinden oldukça uzak olması gerekmektedir. Eğilme tipi hasarlarda, Şekil 1.21’de görüldüğü gibi kiriş çift eğrilikli olarak eğilmeye çalışmaktadır. Kirişin bel verme bölgesi boyunca meydana gelen kesme kuvvetleri birleşim bölgelerine yakın kesitlerde en büyük eğilme momentlerini oluşturur ve eğilme çatlakları meydana getirir. Kesme kuvvetleri arttıka, bu bölgelerdeki

eğilme momentlerinin beraberinde eğilme çatlakları basınç bölgelerine doğru ilerlemeye başlar. Şekil 1.22’de Kwan ve Zhao (2002) tarafından yapılan deneysel çalışma sonucunda sadece eğilme ile nihai dayanımına ulaşan bağ kirişi elemanı gösterilmektedir.

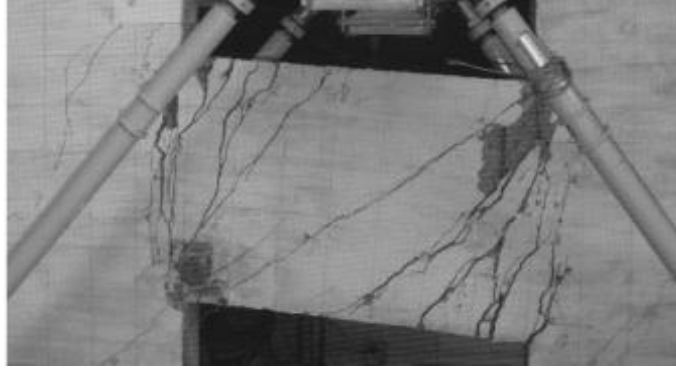
Yerdeğiştirmelerin oldukça artması durumunda FEMA-306’da belirtildiği gibi tersinir yükler altında basınç bölgesinde de aynı çatlaklar gelişim göstereceği için birleşim bölgelerinde kayma düzlemi oluşur ve bağ kirişi taşıyıcı özelliğini tamamen kaybeder (Şekil 1.23). Şekil 1.24’te, Brena ve İhtiyar (2011) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda açıklık/derinlik oranı 2.67 olan sık etriyeli ve zayıf eğilme donatılı bir bağ kirişinde meydana gelen eğilme/kayma hasarı görülmektedir. Kayma kırılması yüklemeye bağlı olarak değişmektedir. Kayma kırılmasının oluşumuna temel oluşturan bozulmalar yüklemenin yoğunluğuna ve çevrim sayısına bağlı olarak değişir (Barney vd., 1980).



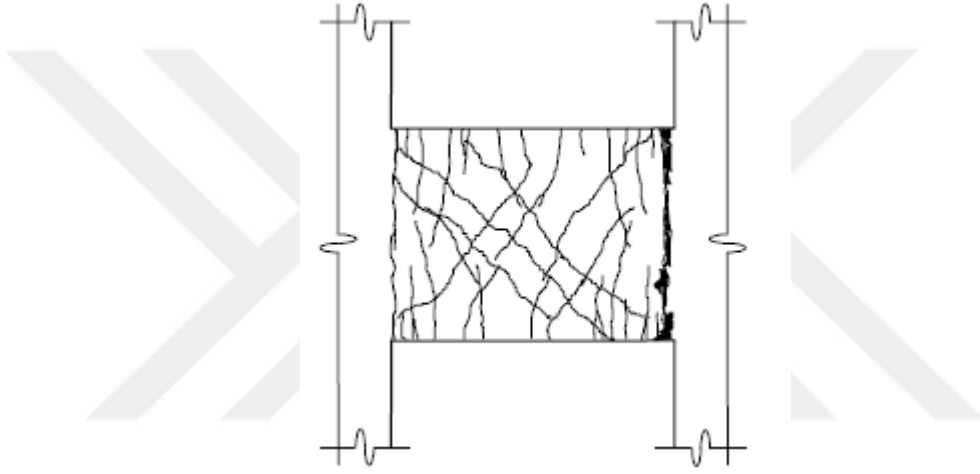
Şekil 1.20. a)Bağ kirişi ideal sınır şartları, b)Bağ kirişi kesme kuvveti diyagramı, c) Bağ kirişi moment diyagramı



Şekil 1.21. Bağ kirişlerinde tipik eğilme hasarı (Subedi, 1991)



Şekil 1.22. Eğilme göçmesine maruz bağ kirişi (Kwan ve Zhao, 2002)



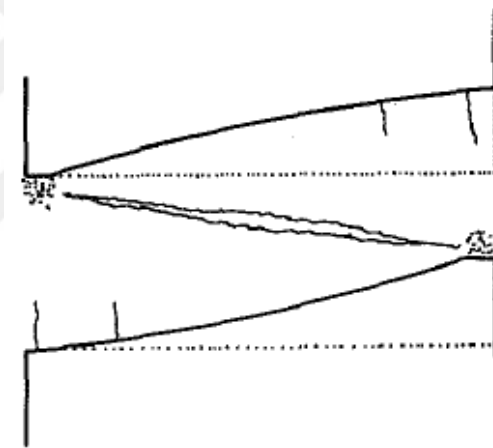
Şekil 1.23. Bağ kirişlerinde kayma kırılması (FEMA-306, 1998)



Şekil 1.24. Eğilme/kayma göçmesine maruz bağ kirişi (Brena ve İhtiyar, 2011)

Bağ kirişlerinde geleneksel eğilme donatıları ile kayma kırılmalarının önüne geçilemeyeceği görülmüştür. Bu sebeple Paulay ve Binney (1974) tarafından diyagonal donatılı bağ kirişleri önerilmiştir.

Kesme ağırlıklı hasarlarda, kiriş uzunluğu boyunca hem alt hem de üst bölgelerin aynı anda çekme gerilmelerine maruz kalması gerekmektedir. Bu durumda bağ kirişi üzerinde basınç ve çekme köşegenleri oluşmaktadır. Diyagonal donatılar veya yeterli gövde donatısının sağlanamaması durumunda diyagonal çatlaklar köşegen üzerinde artarak yırtılma (yarılma) meydana gelir. Genel olarak bağ kirişlerinde kesme kırılması diyagonal çatlakların yayılması ve basınç bölgelerindeki betonun ezilmesi olarak ifade edilebilir (Şekil 1.25). Şekil 1.26'da, Ahn vd. (2011) tarafından yürütülen deneysel bir çalışmada sade kesme etkisi ile göçen bir bağ kirişi verilmektedir. Bağ kirişleri büyük kesme kuvveti altında çatlak oluşumuna maruz kalmaktadır. Eğilme çatlaklarında çok daha fazla gözlemlenen diyagonal çatlaklar kirişlerin eğilme rijitliklerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Çok yoğun yükler altında rijitlik azalmasının %85 civarında olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Paulay, 1969).

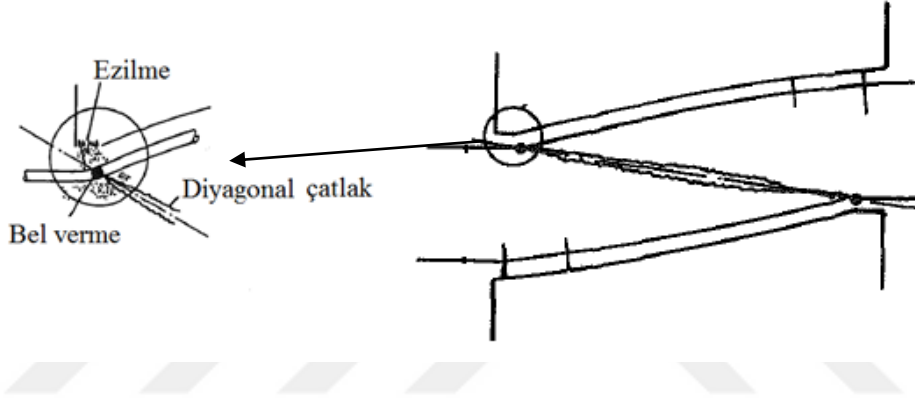


Şekil 1.25. Bağ kirişlerinde tipik kesme (diyagonal yarılma) hasarı (Subedi, 1991)



Şekil 1.26. Diyagonal yarılma ile göçmeye maruz bağ kirişi (Ahn vd., 2011)

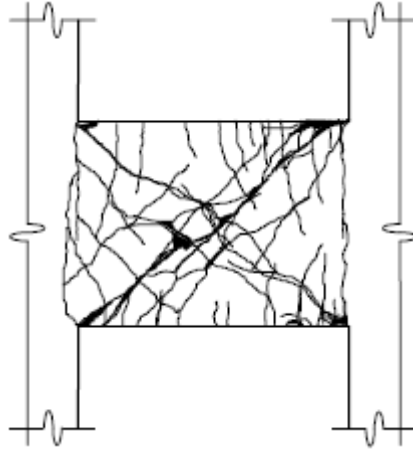
Bağ kirişlerinde olması gereken en uygun hasar şekli eğilme ve kesme hasarlarının beraber olduğu hasar şeklidir. Bu durumda bağ kirişi öncelikle çift eğrilikli olarak eğilmeye çalışır ve kiriş uzunluğu boyunca eğilme çatlakları gelişmeye başlar. Fakat bağ kirişine gelen yüklerin artmasıyla beraber kirişin bel verme bölgesinde kesme etkisiyle ilk diyagonal çatlak oluşmaya başlar. Diyagonal çekme ve basınç etkisiyle çatlak açılarak, kiriş orta bölgesinden köşelere doğru yayılmaya başlar. Eğilme ve kesme etkisi ile basınç köşelerindeki donatılarda bel verme oluşur ve beton yüzeyin çoğu diyagonal olarak çatlaklar. Basınç bölgelerindeki beton tamamen döküldüğünde kiriş yük taşıma kapasitesine ulaşır (Şekil 1.27).



Şekil 1.27. Bağ kirişlerinde kesme ve eğilme etkisi (Subedi, 1991)

FEMA-306'ya göre yetersiz sargı donatısı ve aşırı eğilme donatısı kullanılması durumunda bu hasar durumu ortaya çıkacaktır (Şekil 1.28). Eğer yeterli sargı donatısı veya gövde donatısı sağlanabilirse diyagonal yarıma gibi gevrek davranış ortadan kalkarak eğilme ve kesme çatlaklarının eşit dağıldığı daha sünek davranış ortaya çıkacaktır.

Bağ kirişli boşluklu perde duvar sisteminde arzu edilen hasar mekanizması tüm bağ kirişlerinin her iki ucunda plastik mafsallı oluşumundan sonra perde duvar ayaklarında plastik mafsallı oluşumdur. Birçok depremde perde duvar ayakları nihai dayanımına ulaşmadan önce bağ kirişlerinin tamamının göçtüğü tespit edilmiştir. Bu arzu edilen bir durum olsa bile, kesme etkisindeki diyagonal çatlakların oluşumuyla gerçekleşen gevrek göçmeler olması iyileştirilmesi gereken bir husustur (Paulay, 1970).



Şekil 1.28. Bağ kirişlerinde diyagonal yarıma ağırlıklı eğilme/kesme hasarı (FEMA-306, 1998)

### 1.8. Bağ Kirişleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

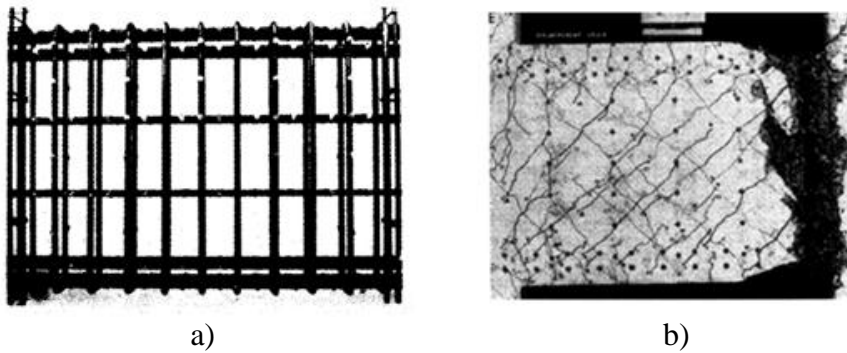
Yatay yüklere maruz yüksek yapıların davranışında önemli rol oynayan boşluklu perdelerdeki bağ kirişleri ve bağlantı etkileşimi, 1970'li yılların başından itibaren bilim insanlarının çalışma konusu olmuştur. Perde duvar ayaklarından ziyade bağ kirişlerinin performansının iyileştirilmesi boşluklu betonarme perde duvarların davranışının geliştirilmesine doğrudan katkı sağlayacağı öngörülmüştür. Bu amaçla, malzeme ve tasarım yönünden farklı bağ kirişlerinin davranışları analitik ve deneysel olarak incelenmiş ve bu süreçte birçok çalışma ortaya koyulmuştur.

Paulay, 1969 yılında açıklık/derinlik oranı birbirinden farklı geleneksel donatılı bağ kirişlerinin deneysel çalışmasını gerçekleştirmiştir. Perde duvarların etkisini ortaya koymak için bağ kirişleri her iki ucunda beton bloklar ile beraber dökülmüş ve düşey hidrolik krikolar vasıtasıyla bu bloklara eşit dönmeler verilerek perdelerdeki dönmeler temsil edilmiştir. Kirişteki eğilme ve kesme çatlakları sırasıyla nihai dayanımın yaklaşık %35 ve %40 seviyelerinde oluşurken, %75 seviyelerinde kirişin açıklık boyunca çekme etkisinde kaldığı tespit edilmiştir. Bu tarz kirişlerde yükleme öncesindeki düzlem kesitlerin aynı şekilde yükleme sonrasında düzlem kalmadığı ve kirişlerin normal kirişlere benzer olarak çift eğrilikli davranmadığı gözlenmiştir. Diyagonal çatlakların oluşumundan sonra eğilme donatılarının kiriş açıklığı boyunca çekme etkisine maruz kaldığı, bu sebeple donatılardaki gerilmelerin sadece momentin en büyük olduğu kiriş uç bölgelerinde değil moment sıfır bölgesinde de yüke bağlı olarak arttığı görülmüştür. Bu tarz kirişlerde kesme

kuvvetlerinin meydana getirdiği yay etkisi ile eğilme donatılarının eğilme dayanımında azalma meydana getirdiği için hesaplarda eğilme ve kesme kuvveti etkileşiminin dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Basınç bölgelerindeki donatıların eğilme dayanımına karşı etkinliğinin azaldığı ve betonun ezilmesi ile açıklık boyunca hesap edilen moment kolunun da yüklemeye bağlı olarak azaldığı vurgulanmıştır.

Paulay (1970), yaklaşık yöntemle 18 katlı boşluklu perde duvarın elasto-plastik analizlerini gerçekleştirmiştir. Analizlerin sonucunda, perde duvarlar üzerinde oluşacak plastik deformasyonların oluşması için bağ kirişlerinin dönme kabiliyetinin çok yüksek olması gerektiğini vurgulamıştır. Perde duvarların rijitliğinin süneklik talebini etkilediğini ve bu talebi azaltmak için bağ kirişlerinin nihai dayanımının perde duvar yüksekliği boyunca etkin kesme kuvvetleri ile orantılı olması gerektiğini belirtmiştir.

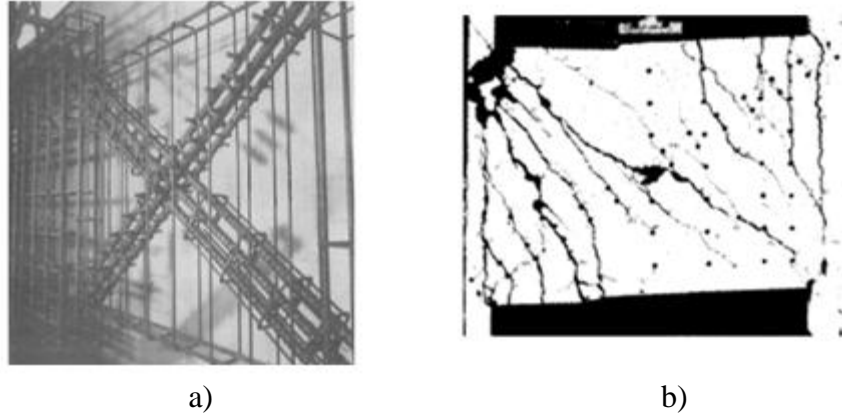
Paulay (1971), depremlerde hasar gören yüksek binaların perde duvarlarında yer alan geleneksel donatılı, kısa ve derin betonarme kirişlerin davranışını incelemiştir. Kirişlerin diyagonal çekme kırılmaları yeterli gövde donatısı ile karşılanırsa bile büyük kesme kuvvetleri ile kirişlerin eğilme dayanımının azaldığını belirtmiştir. Diyagonal çatlaklı bağ kirişlerindeki kesme deformasyonlarının, eğilme deformasyonlarından daha fazla olduğunu ve çatlayan bağ kirişinin rijitliğinin, çatlamayan kirişin rijitliğinin %20'sinden az olduğunu ortaya koymuştur. Geleneksel bağ kirişi Şekil 1.29a ve hasar sonrası diyagonal donatı eksikliğinden kaynaklı çatlak durumu Şekil 1.29b'de (FEMA-306, 1998) verilmektedir. Tasarım koşulları ACI-318 ve TDBY-2018 yönetmeliklerinde yer almaktadır. Diyagonal kesme çatlaklarından dolayı üst ve alt boyuna donatılarda aynı anda çekme meydana gelir ve bu durum kirişte uzamayla sonuçlanır (Paulay, 2002). Kiriş uçlarında oluşan düşey çatlaklar uzamayla beraber kayma düzlemi oluşturur.



Şekil 1.29. Geleneksel donatılı bağ kirişi ve hasar şekli (Paulay, 1971)



Paulay ve Binney (1974), yetersiz süneklik ve gevrek kırılma mekanizmasına sahip geleneksel donatılı bağ kirişlerine alternatif olarak diyagonal donatılı bağ kirişlerini önermişlerdir. Buradaki esas düşünceleri bağ kirişlerinde oluşacak diyagonal çekme ve basınç gerilmelerini karşılamak ve kayma kesme kırılmalarını önlemektir. Süneklik ve enerji tüketme kabiliyetleri yüksek olan bu kirişlerde diyagonal donatıların stabilite sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu sorunda enine donatılarla ortadan kaldırılmaktadır. Orta seviye hasarlar ve düşük süneklik düzeyinde gelişen kesme çatlakları geleneksel donatılarla karşılanır. Kiriş derinliğinin kiriş boyuna oranı 4'ten büyük olması durumunda diyagonal donatıların eğim açısı azalacağından diyagonal donatıların etkinliği azalmaktadır (Harries vd., 2005). Donatı yerleşim şekli Şekil 1.30a ve diyagonal donatıların etkisiyle meydana gelen çatlak gelişimi Şekil 1.30b'de verilmektedir. İlgili tasarım koşulları ACI-318 ve TDBY-2018 yönetmeliklerinde detaylı olarak sunulmaktadır.



Şekil 1.30. Diyagonal donatılı bağ kirişi ve hasar şekli (Paulay ve Binney, 1974)

Barney ve çalışma ekibi 1980 yılında donatı düzeni, açıklık/derinlik oranı ve çekirdek beton kalınlığı açısından farklı 1/3 ölçekli 8 deney elamanı ile bağ kirişlerinin çevrimsel yük altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Çekirdek beton kalınlığı 67 mm ve 89 mm ile açıklık/derinlik oranı 2.5 ve 5.0 olarak değişen farklı donatı düzenlerine sahip bağ kirişlerini deney tabii tutmuşlardır. Geleneksel donatılı bağ kirişleri üzerinde yapılan deneylerde kiriş-perde birleşim bölgesinde yeterli sargı donatısı olmasına rağmen kayma kırılması meydana gelmiştir. Özellikle betonarme elemanlarda, çekirdek betonundaki bozulma ve kesme etkisine karşı direnç mekanizmasında azalmadan (rijitlikten ani azalma) dolayı yüke bağlı yerdeğiştirme grafiklerinde daralma (pinching effect) meydana

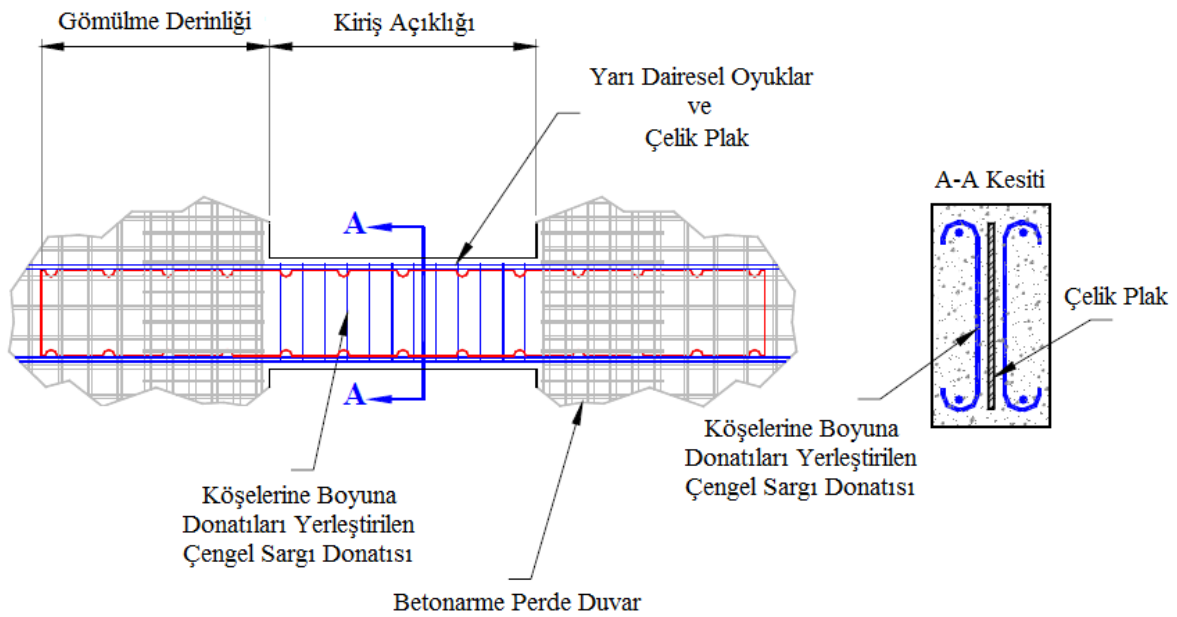
gelmektedir. Yüke bağlı yerdeğiştirme grafiklerinde oluşan daralmalar uzun açıklıklı geleneksel donatılı kirişlerde azalmıştır. Çekirdek beton kalınlığının artması elastik ötesi davranışı geliştirmiştir. Bu çalışmada geleneksel donatılı bağ kirişlerinde oluşan plastik mafsal bölgelerindeki davranışı geliştirmek için kafes etkisi oluşturacak plastik mafsal bölgesinde diyagonal donatı düzenlemesi yapılmıştır. Bu donatı düzenlemesi geleneksel donatı düzenlemesine nazaran davranış üzerinde bir miktar etkili olsa bile işçilik yönünden zor ve karmaşık olması arzu edilen talebi karşılamamıştır. Yüke karşılık yerdeğiştirme grafiklerindeki daralma etkisi bu donatı düzenlemesi için de gözlemlenmiştir. Paulay ve Binney tarafından 1974 yılında sunulan diyagonal donatı düzenlemesi kullanılarak üretilen bağ kirişi elemanları çok iyi dayanım, süneklik ve enerji tüketme kapasitesi göstermiştir. Diyagonal donatı düzenlemesi kafes etkisi oluşturarak yüke karşılık yerdeğiştirme grafiklerinde oluşan daralma ortadan kalkmıştır. Uzun açıklıklı kirişlerde diyagonal donatıların etkinliğinin azalması sebebiyle kiriş davranışında donatı düzenlemesinin etkisi görülmemiştir. Çekirdek betonu kalınlığındaki artış davranışı çok düşüğe olsa geliştirmiştir.

Derin bağ kirişlerinin kullanılmadığı bazı orta yükseklikteki binalarda, betonarme perde duvarların tek parça betonarme döşemeler ile bağlandığı görülmüştür. Bu sebeple Paulay ve Taylor (1981), döşeme tipi bağ kirişlerinin perde duvar davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Enine donatıların birleşim bölgesindeki etkisini ve döşeme tipi bağ kirişlerinin performans üzerindeki etkisini 4 adet deney elemanı üzerinde araştırmışlardır. İlk deney elemanında sadece boyuna donatıların etkinliği, ikinci deney elemanında hem boyuna hem de birleşim bölgesinde enine donatıların etkinliği, üçüncü deney elemanında enine donatılar ve çelik profilin etkinliği ve dördüncü deney elemanında çelik profille güçlendirilmiş döşeme tipi bağ kirişlerinde beton başlık yapılarak T kesitin etkisi araştırılmıştır. Deney sonunda bütün boyuna donatılarda akma meydana geldiği ve döşemenin serbest kenarlarına doğru bu donatıların etkinliğinin tamamen azaldığı gözlemlenmiştir. Birleşim bölgelerinde meydana gelen zımbalama hasarı enine donatılarla kısmen giderilse de çelik profillerin bu konuda daha etkin rol oynadığı görülmüştür. T kesitli eleman üzerinde yapılan çalışmada, T kirişin kesmede beklenenden daha önce hasar gördüğü ve bu sebeple ani dayanım kaybına sebep olduğu belirtilmiştir.

Saatçioğlu vd. (1987), yapısal ve yer hareketi parametrelerinin boşluklu perde duvarların elastik olmayan davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapısal parametre olarak hakim periyot, perde duvar dayanımı, kiriş-perde duvar rijitlik oranı, kiriş-perde

duvar dayanım oranı, bağlantı kolu, kiriş net açıklığı, düşey yükler ve yapı kütlesini dikkate almışlardır. Yer hareketi parametresi olarak ise deprem frekans karakteristiği, deprem süresi ve şiddetini dikkate almışlardır. Depreme dayanıklı boşluklu betonarme perde duvar tasarımında yapı hakim periyodu, duvar dayanımı, kiriş-perde duvar rijitlik oranı, kiriş-perde duvar dayanım oranı, yer hareketinin frekans karakteristiği ve yer hareketinin şiddetinin tasarım parametresi olarak dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca elastiklik mertebesinin eğilme akma seviyesi ile doğrudan ilişkili olduğunu, bu sebeple duvar akma dayanımındaki %50 azalmanın duvar sünekliğini %100 artırmasının yanında bağ kirişlerindeki süneklik talebini de %250 artırdığını belirtmişlerdir.

Subedi (1989), geleneksel donatılı betonarme kirişlerde kullanılan boyuna donatılara alternatif olarak gövde çelik plaklı bağ kirişlerini geliştirmiştir. Eğilme momentini karşılamak için geleneksel boyuna donatı kullanırken kesme kuvvetini karşılamak için ise düşey çelik plakın betona gömülmesinin uygun olup olmadığını araştırmıştır. 6 tane düşey çelik plaklı beton kiriş üzerinde deney yapmıştır. Elde edilen değerler, geleneksel etriyeli kirişlerden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Kesitteki kompozit etkisini sağlamak için plak kenarları boyunca yarı dairesel oyuklar açılmıştır (Şekil 1.31). Elde edilen sonuçlar iyi dayanım, süneklik ve kararlı histeretik davranış göstermiştir. Bu kirişler, çelik plakla güçlendirilmiş ya da çelik plaklı bağ kirişleri olarak adlandırılmaktadır.



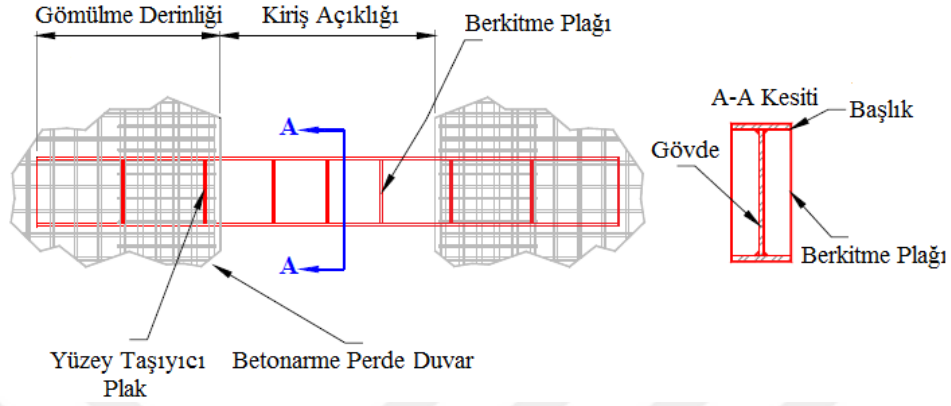
Şekil 1.31. Çelik plakla güçlendirilmiş beton kirişi (Fortney, 2005)

Subedi (1991), esas kırılma modları olan eğilme ve kesme (diyagonal yırtılma olarak da bilinir) kırılma modlarını dikkate alarak bağ kirişlerinin davranışını matematiksel bir model ile ortaya koymuştur. Bağ kirişlerinin analizi için önerdiği yöntemi, Paulay (1971) tarafından 9 farklı bağ kirişi üzerinde deneysel olarak elde edilen sonuçları doğrulamak için kullanmıştır. Betonarme bağ kirişlerinin davranışının elastik analizlerde kullanılan geleneksel çift eğrilikli eğilme kapsamından çok farklı olduğunu ve bu tür kirişlerin nihai dayanımına ulaşması durumunda muhtemelen diyagonal yırtılma moduyla kırılacağını ortaya koymuştur. Diyagonal yırtılma modunun esas donatılarda açıklık boyunca çekme gerilmelerine ve basınç bölgesinde betonda küçük ezilmelere sebep olduğunu göstermiştir. Kırılan bağ kirişinin üçgen kısmı (diyagonal yarıma sonucu bağ kirişi 2 ayrı üçgen bölgeye dönüşür) üzerinde kurulan denge denklemlerini esas alan yöntemin kırılma modunun, nihai dayanımın ve esas donatıdaki yük dağılımının tahmininde iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Subedi (1991), bağ kirişinin esas kırılma modlarının ve rijitliğinin boşluklu betonarme perde duvar davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Bağ kirişlerinin durumuna göre betonarme perde duvarda oluşması muhtemel 3 farklı göçme durumunu (bağ kirişlerinin esnek olması, bağ kirişlerinin diyagonal yarıma şeklinde kırılması, bağ kirişlerinin rijit olması) detayları ile ifade etmiştir. Boşluklu betonarme perde duvarın nihai dayanımı ve göçme şeklinin tahmin edilmesini sağlayan kolay bir yöntem sunmuştur. Sunduğu yöntemin uygunluğunu ortaya koymak için 15 katlı boşluklu betonarme perde duvarın 1/30 ölçekli 3 farklı modeli üzerinde deneysel çalışma yapmıştır. Deneysel çalışma sonunda boşluklu betonarme perde duvarların davranışının bağ kirişlerinin davranışıyla doğrudan etkilendiğini, bu doğrultuda boşluklu betonarme bağ kirişlerinde 3 farklı kırılma modunun meydana geldiğini, önerdiği hesap yönteminin dayanım ve davranış tespitinde elle yapılacak hesaplarda büyük kolaylık sağladığını ve bu yöntem ile elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyum sağladığını ifade etmiştir.

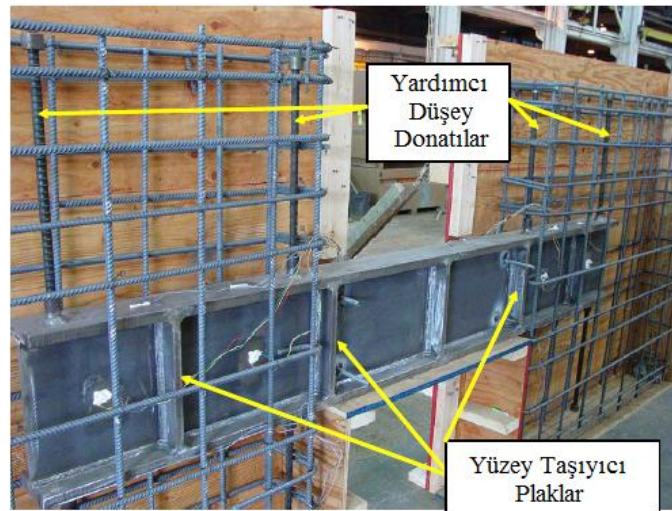
Harries vd. (1993), 1978 yılında Roeder ve Popov tarafından ortaya atılan “eksantrik gergili çerçevelerdeki çelik bağlantı kirişleri çevrimsel yük altında önemli ölçüde süneklik ve enerji tüketme kabiliyeti gösterir” düşüncesinden yola çıkarak deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Geleneksel ve diyagonal betonarme bağ kirişlerinin yerine kullanılacak iki ucundan perde duvarlara gömülü çelik elemanların uygunluğunu incelemiştir. Çelik bağ kirişinin (Şekil 1.32) betonarme perdelerle gömülen kısımlarının kiriş açıklığında oluşan kesme ve moment kapasitelerini artıracak şekilde tasarlanması gerektiğini ortaya

koymuşlardır. Çelik kirişin gömülme derinliğinin betonarme perde bağlantı etkileşimine bağlı olarak azaltılabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 1.32. Çelik bağ kirişi (Fortney, 2005)

Shahrooz vd. (1993), geleneksel ve diyagonal betonarme bağ kirişlerinin yerine kullanılacak perde duvarlara yardımcı düşey donatılar kullanarak iki ucundan gömülen çelik bağ kirişlerinin çevrimsel yük altındaki davranışını incelemiştir (Şekil 1.33). Yarım ölçekli tasarlanan 3 örnek üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Çelik kirişin başlıklarına eklenen düşey donatıların rijitlikteki azalmayı büyük oranda azalttığını belirlemiştir. Ayrıca başlıklardaki düşey donatıların yük döngüsü esnasında simetrik dayanım ve rijitlik sağladığı görülmüştür.



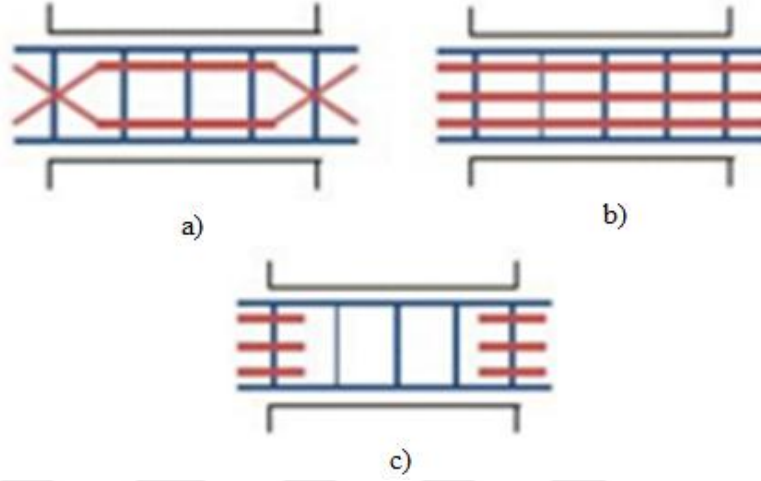
Şekil.1.33. Yüzey taşıyıcı plaklar ve yardımcı düşey donatılar (Fortney, 2005)

Harries (1995), 8 farklı deney numunesi üzerinde 2 aşamalı olarak gerçekleştirdiği çalışmada betonarme bağ kirişlerine alternatif olarak iki ucundan perde uç elemanlarına gömülü yapısal çelik elemanların uygunluğunu ve plakla güçlendirilmiş betonarme bağ kirişlerinde plakla güçlendirmenin kesme dayanımına katkısını ve plak ile beton arasındaki sürekliliği sağlayacak metodları araştırmıştır. Geleneksel donatılı bağ kirişlerine alternatif olarak eğilme kritik çelik ve diyagonal donatılı betonarme bağ kirişleri için ise kesme kritik çelik dikkate almıştır. Hem eğilme hem de kesme kritik çeliklerin geleneksel ve diyagonal donatılı bağ kirişlerine enerji tüketme ve süneklik bakımından çok iyi alternatif olacağını ortaya koymuştur. Ayrıca, plakla güçlendirme yöntemi bağ kirişlerinin dayanım, rijitlik, yer değiştirme kapasitesi ve enerji tüketme kapasitesi yönünden gelişme sağlasa da boyuna donatıların burkulmasının kontrol edilememesi ve yetersiz sargı donatıları sebebiyle bağ kirişlerinde arzu edilen plastik mafsallaşmanın sağlanamadığını öne sürmüştür.

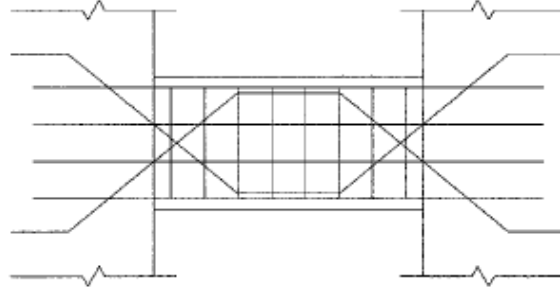
Tassios vd. (1996), farklı açıklık-derinlik oranlarına (1 ve 1.66) sahip geleneksel donatılı, diyagonal donatılı ve geleneksel donatılı sisteme katkı sağlayacağı düşünülen pilye donatılı, uzun ve kısa ankraj donatılı bağ kirişlerinin performansını araştırmışlardır (Şekil 1.34). Diyagonal donatı düzenlemesi, tüm donatı düzenlemesine göre en iyi performansı göstermiştir. Diyagonal donatılı kirişler dışındaki tüm kirişlerin yüke bağlı yerdeğiştirme diyagramlarında daralma etkisi gözlenmiştir. Pilye donatıları, geleneksel donatılı kirişin nihai taşıma kapasitesini %30 artırmış ve geleneksel donatılı kirişlere nazaran her yönüyle daha iyi performans ortaya koymuştur. Fakat kısa ve uzun ankraj donatıları kiriş-perde birleşim bölgesindeki kayma düzlemini ortadan kaldırsa bile daha fazla gevrek davranış göstermiştir. Geleneksel donatılı kirişin olumsuz davranışları iyileştirilse bile diyagonal donatılı kirişin performansı karşılanamamıştır. Açıklık/derinlik oranı 1.66 olan kirişler, açıklık/derinlik oranı 1 olan kirişlere nazaran daha iyi elastik ötesi davranış sergilediği ve daha düşük rijitlik azalmasına sahip olduğu görülmüştür. Tassios vd. açıklık/derinlik oranına göre ortaya çıkan farklılığı, kısa kirişlerin diyagonal basınca çalışan bir çubuk davranışı sergilemesi ve uzun kirişlerin kafes mekanizması oluşturmasına bağlamıştır.

Galano ve Vignoli (2000), betonarme perdelerine gömülen kısmının bir bölümünün yatay olacak şekilde eğildiği eşkenar dörtgen düzenli diyagonal donatılı bağ kirişlerinin (Şekil 1.35) çevrimsel yük altındaki davranışını incelemiştir. Normal diyagonal donatılı bağ kirişlerinden daha fazla sünek ve enerji tüketme kabiliyetine sahip bu kirişlerin normal

diyagonal donatıların bağ kirişlerin imalatından da oldukça kolay olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, önerilen donatı düzeninin diyagonal ve geleneksel donatılı bağ kirişlerine göre daha az dayanım ve rijitlik kaybına uğradığı ortaya koyulmuştur.



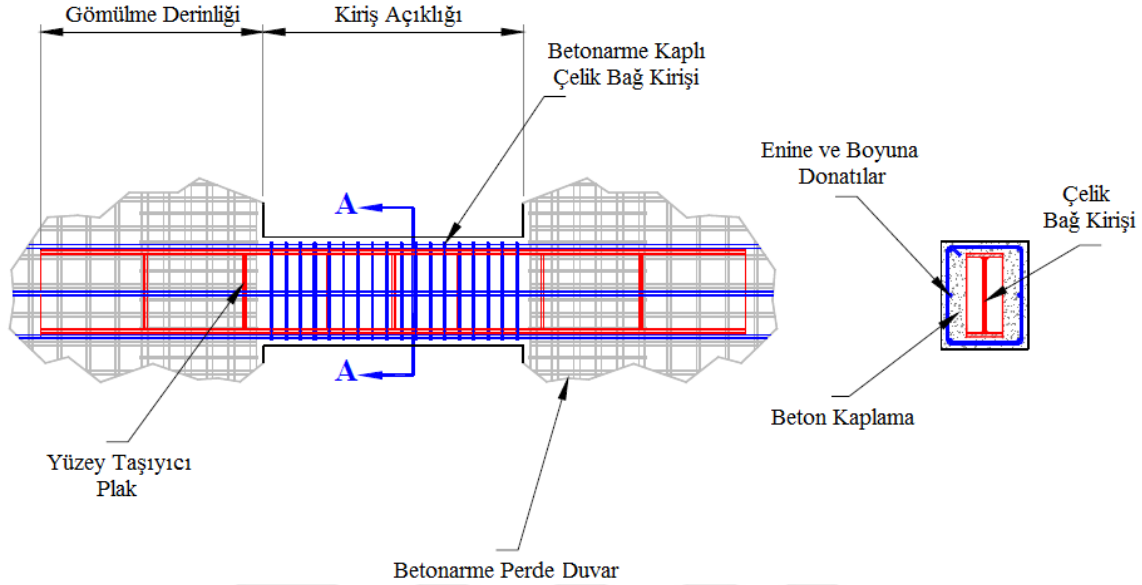
Şekil 1.34. Pilye donatılı (a), Uzun çivileme donatılı (b) ve Kısa ankraj donatılı bağ kirişleri (c) (Tassios vd., 1996)



Şekil 1.35. Rombik (pilye donatılı) düzenine sahip diyagonal donatılı bağ kirişi (Galano ve Vignoli, 2000)

Gong ve Shahrooz (2001a ve 2001b), betonarme çekirdekle kaplanmış çelik bağ kirişlerinin davranışını analitik ve deneysel olarak incelemiştir. 1/3 ölçekte 4 farklı örnek üzerinde çalışma yapmışlardır. Konsol olarak dikkate alınan bağ kirişlerinin yüklemesi aynı zamanda konsolun ucu olan bağ kirişinin ortasından (moment sıfır noktasından) yapılmıştır. Çelik bağ kirişleri etrafındaki betonarme kaplamanın kirişin rijitliğini artırdığını ve berkitmelerle önlenen gövde burkulması ve başlıktaki stabilite sorununun önüne geçildiğini belirtmişlerdir. Bu kompozit bağ kirişlerinden (Şekil 1.36)

beklenen kesme dayanımının elde edilebilmesi için kiriş gömülme derinliğinin uygun bir biçimde hesap edilmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır.



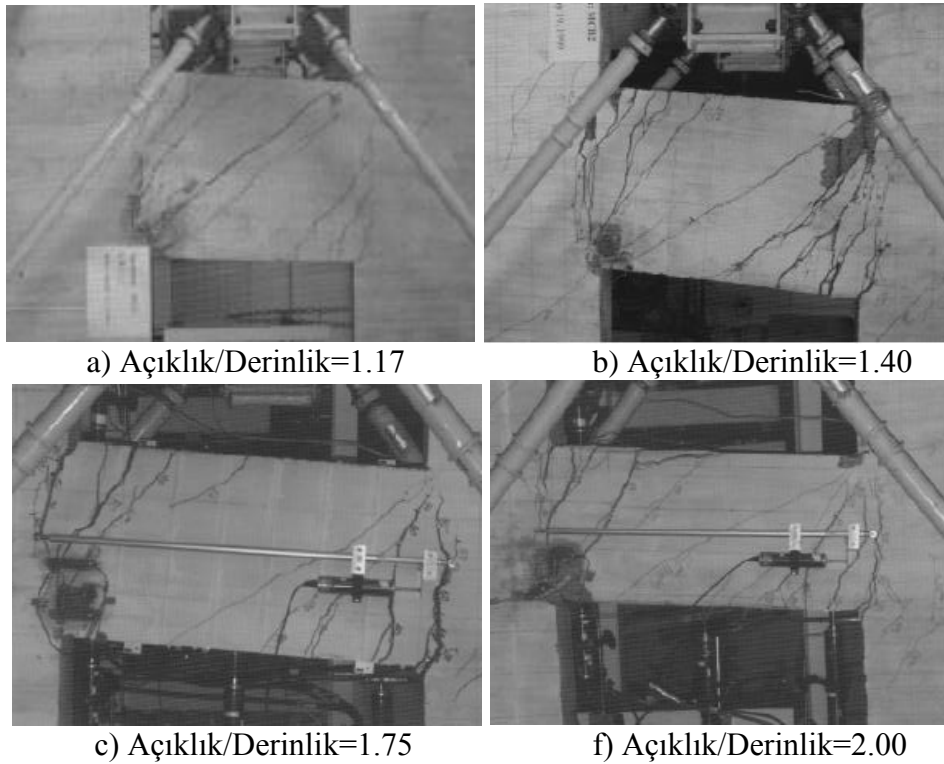
Şekil 1.36. Tipik kompozit bağ kirişi (Fortney, 2005)

Kwan ve Zhao (2002), betonarme bağ kirişleri için kiriş uçlarında eşit dönme yanında kiriş-perde birleşim bölgesinde oluşması muhtemel hasarların gelişimine olanak sağlayacak yeni deney düzeneği önermişlerdir. Bu deney düzeneği için  $\frac{1}{2}$  ölçeğinde 120 mm kalınlığa ve 700 mm açıklığa sahip 4 farklı bağ kirişini deneye tabi tutmuşlardır. Önerilen deney düzeneğinde deneye tabi tutulan her bir kiriş elemanı için elde edilen hasar durumu (Şekil 1.37), gerçek hayattaki kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde oluşabilecek yerdeğiştirme sınır şartlarını sağladığını ortaya koymuştur. Paulay (1969) tarafından da vurgulanan boyuna donatılar kiriş açıklığı boyunca çekmeye maruz kalır ve kiriş açıklığı boyunca sıfır gerilme bölgesi yoktur' ifadesi bir kez daha kanıtlanmıştır. Açıklık/derinlik oranı 1.17 olan kiriş diyagonal kesme etkisinde kırılırken, diğer kirişler eğilme etkisinde kırılmıştır. Ayrıca, eğilme ile kırılan kirişlerin 10'dan daha büyük, kesme ile kırılan kirişlerin ise 5'ten daha büyük süneklik oranına sahip olduğu ortaya koyulmuştur.

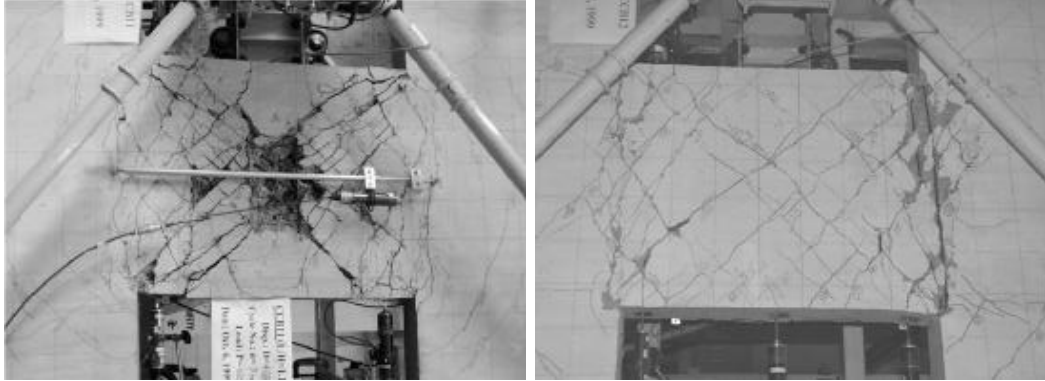
Kwan ve Zhao (2002), alternatif donatı düzenlemeleri olmasına rağmen yine de geleneksel donatılı bağ kirişlerinin tercih edilmesi sebebiyle geleneksel donatılı bağ kirişlerinin deprem esnasındaki davranışlarını belirlemek için farklı açıklık ve donatı oranlarına sahip  $\frac{1}{2}$  ölçekli 6 deney elemanı üzerinde deneysel çalışma



gerçekleştirmişlerdir. Geleneksel donatılı bağ kirişine göre performansa katkısını görmek için 1 adet diyagonal donatılı bağ kirişi üretmişlerdir. Açıklık/derinlik oranı arttıkça kirişte eğilmenin beraberinde süneklik kapasitesi de artmıştır. Kesmeye karşı oldukça iyi tasarlanan aynı açıklık/derinlik oranına sahip geleneksel ve diyagonal donatılı bağ kirişleri beklenen performansları ortaya koymuştur. Şekil 1.38'de görüldüğü gibi geleneksel donatılı bağ kirişlerinde yeterli sargı donatılarının sağlanması sebebiyle kayma kırılması şeklinde göçme meydana gelirken, diyagonal donatılı bağ kirişlerinde göçme diyagonal donatıların burkulması ile meydana gelmiştir. Açıklık/derinlik oranı 2'den küçük olan kirişlerin çerçeve sistemde yer alan kirişlere göre daha farklı davranış ortaya koyduğu vurgulanmıştır. Diyagonal donatılı bağ kirişlerinde çekme ve basınç gerilmeleri aynı anda doğrudan diyagonal donatılar tarafından taşınması sebebiyle betonda büyük açılmalar meydana gelmemektedir. Bu sebeple geleneksel donatılı bağ kirişlerinin yüke bağlı yerdeğiştirme grafiklerinde görülen daralma etkisi diyagonal donatıların kullanımı ile tamamen ortadan kalkmıştır. Diyagonal donatılı bağ kirişlerinin enerji tüketme kapasitesi ve süneklik seviyeleri her ne kadar yüksek olsa bile nihai yerdeğiştirme kapasitesi veya şekil değiştirebilirliği açısından çok fazla katkı sağlayamadığı görülmüştür.



Şekil 1.37. Farklı açıklık/derinlik oranına sahip kirişlerde hasar durumu (Kwan ve Zhao, 2002)



a) Diagonal Donatılı Bağ Kirişi

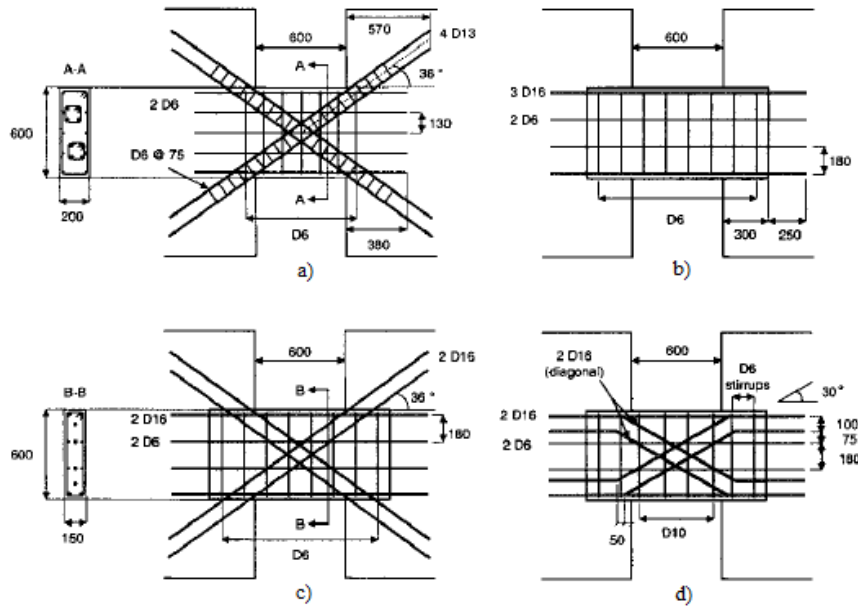
b) Geleneksel Donatılı Bağ Kirişi

şekil 1.38. Diagonal ve geleneksel donatılı bağ kirişlerinde deney sonrası gözlenen hasar durumları (Kwan ve Zhao, 2002)

Canbolat vd. (2005), mevcut yönetmelik şartlarını daha da kolaylaştıracak yüksek performanslı fiberle güçlendirilmiş çimentolu kompozitle (HPFRCC) üretilen yeni tip bağ kirişi geliştirmişlerdir. Bu amaçla açıklık/derinlik oranı 1.0 olan  $\frac{3}{4}$  ölçekli 4 farklı deney elemanı üretmişlerdir. Deney elemanlarından ilki, ACI-318-02'ye göre üretilen sargılı diagonal donatılı bağ kirişi olup (şekil 1.39a), geleneksel beton ile üretilerek referans elemanı olarak kullanılmıştır. İkinci deney elemanı, %0.2 oranında fiberle güçlendirilmiş geleneksel donatılı bağ kirişidir (şekil 1.39b). Üçüncü deney elemanı ise sargısız diagonal donatılı bağ kirişi olup (şekil 1.39c), yine aynı oranda fiberle güçlendirilmiştir. Dördüncü deney elemanı ise perde uç elemanları içerisinde yatay olarak kırılmış sargısız diagonal donatılı bağ kirişidir (şekil 1.39d) ve %1.5 fiberle güçlendirilmiştir. Diagonal donatılı bağ kirişlerinin üretiminin zor olması ve fiberle güçlendirilmiş betonun üretiminin şantiye koşullarında yapılamaması sebebiyle 3. ve 4. deney elemanları prefabrik olarak üretilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde fiberle güçlendirilmiş betonun, geleneksel donatılı bağ kirişlerinde rastlanan daralma etkisini, fiberlerin çatlakların açılmasını sınırlaması sebebiyle büyük oranda azalttığı tespit edilmiştir. Diagonal donatılı bağ kirişlerindeki sargı donatılarına olan gereksinimin azalarak sargılı durumdaki performansın sağlanabildiği vurgulanmıştır. HPFRCC ile üretilen bağ kirişlerinin daha yüksek kesme dayanımı ve rijitliği muhafaza etme kabiliyeti sağladığı ortaya koyulmuştur.

Fortney (2005), diagonal donatılı betonarme bağ kirişi ve çelik bağ kirişi yanında ilk defa önerdikleri açıklık ortasında sigorta görevi gören cıvata birleşimli çelik bağ kirişi (şekil 1.40) ve yüzeye dik başlıksız kesme cıvatalarından oluşan plakla güçlendirilmiş betonarme bağ kirişinin (şekil 1.41) çevrimsel yük altındaki davranışlarını incelemiştir.

Diyagonal donatılı betonarme bağ kirişlerinin optimum tasarımı için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca çelik bağ kirişli ve diyagonal donatılı betonarme bağ kirişlerinden oluşan yapıların lineer olmayan dinamik analizlerini gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak, çelik bağ kirişlerinin çok iyi rijitlik ve enerji tüketme kabiliyeti gösterdiğini, diyagonal donatılı betonarme bağ kirişlerinin kabul edilebilir oranda davranış sergilediğini, açıklık ortasında sigorta görevi gören cıvata birleşimli çelik bağ kirişinin beklendiği gibi çok iyi rijitlik, enerji tüketme, dönme kapasitesi sergileyerek hasar sonrası güçlendirme/değiştirme maliyetini azalttığını ve plakla güçlendirilmiş betonarme kirişin istenilen performansa ulaşmadan göçtüğünü ortaya koymuştur.



Şekil 1.39. HPRCC bağ kirişi donatı düzenleri (Canbolat vd., 2005)



Şekil 1.40. Açıklık ortasında cıvata birleşimli çelik bağ kirişi (Fortney, 2005)



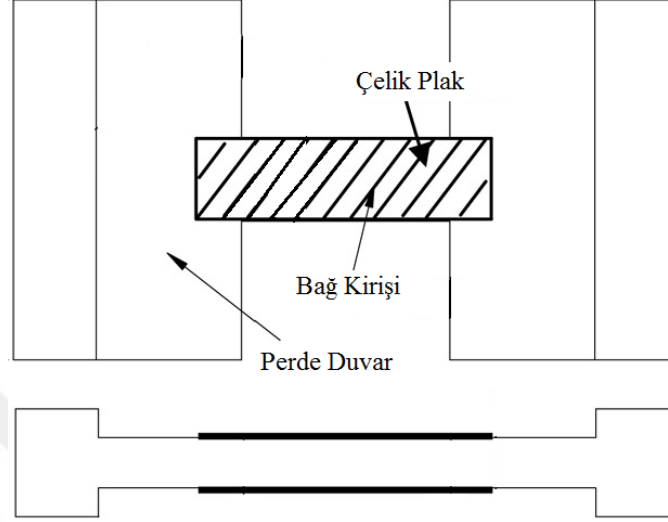
Şekil 1.41. Plakla güçlendirilmiş betonarme bağ kirişi (Fortney, 2005)

Park ve Yun (2005), başlıklarında betona gömülen bulonlara sahip çelik bağ kirişlerinin betonarme perdelerle gömülen kısımlarının uzunluğunun hesabını sağlayacak bir model geliştirmek için Marcakis ve Mitchell (1980), Mattock ve Gaafar (1982), Kent ve Park (1982) ve Minami (1985) tarafından sunulan 4 hesap modelinin dışında yeni bir model geliştirmişlerdir. 5 farklı modele göre üretilen bağ kirişlerinin deneysel çalışmalarını yapmışlardır. Gömülme derinliğinin hesabı için kullanılan eski modellerin etkili bağlantı detayı sunmadığı ve yeni modellerle beraber yeterli bağlantının sağlandığını ortaya koymuşlardır. Bağ kirişlerinin kesme kritik elemanlar olduğu ve kesme akma elemanları olarak tasarlanmasının daha uygun olacağını deneysel sonuçlarla göstermişlerdir.

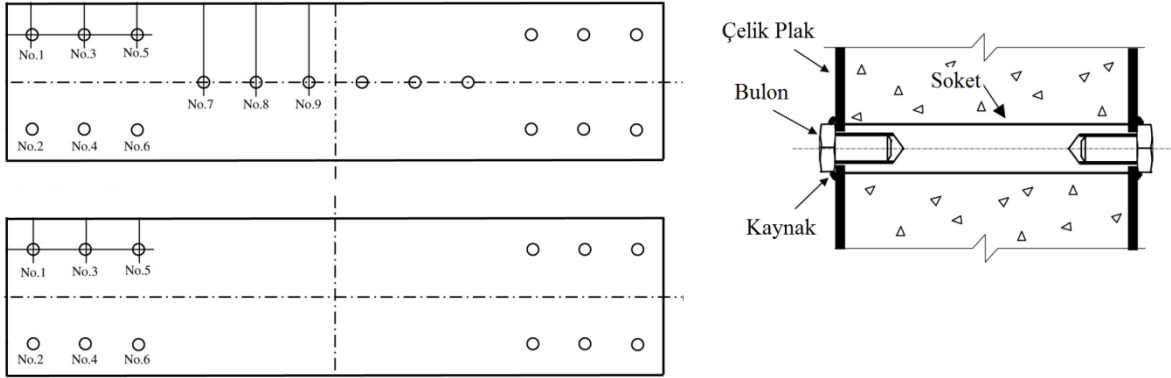
Su ve Zhu (2005), betonarme bağ kirişlerini bulonlu çelik plakla güçlendirerek analitik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bunun için bulon sayıları ve plak kalınlıkları yönünden farklı 2 bağ kirişinden (Şekil 1.42 ve Şekil 1.43) elde edilen sonuçlar güçlendirilmemiş bağ kirişinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, perde duvar ayakları ve bulonlar arasında kaymalar gözlemlenmiştir. Parametrik çalışmalar neticesinde 3mm'den büyük kaymaların bulon bağlantılarının yük taşıma kapasitesini etkilediği ortaya koyulmuştur. Farklı bulon yerleşimi, plak kalınlığı ve donatı tasarımı ile çok daha iyi sonuçların elde edilebileceği belirtilmiştir.

Kuang ve Baczkowski (2006), çelik fiberle güçlendirilmiş betonarme bağ kirişlerinin deneysel çalışmalarını yapmışlardır. Çelik fiberin bağ kirişlerinin kesme davranışı ve kesme dayanımı üzerindeki etkisini açıklık/derinlik oranı 1-1.50-2 olan tam ölçekli 3 ayrı örnek üzerinde araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar fiberle güçlendirilmiş betonarme bağ

kirişlerinin kesme kapasitesinin geleneksel betonarme bağ kirişlerinkinden çok daha iyi olduğunu ortaya koymuştur.



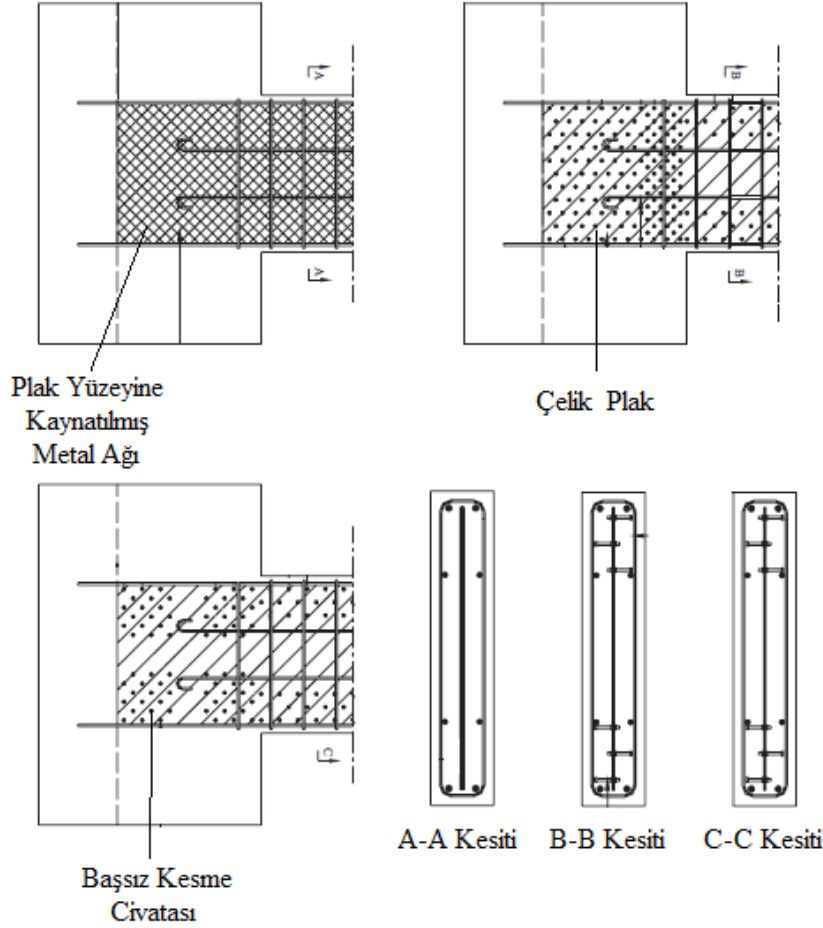
Şekil 1.42. Çelik plakla güçlendirilmiş betonarme bağ kirişi (Su ve Zhu, 2005)



Şekil 1.43. Bulon perde duvar ve bağ kirişi üzerindeki yerleşim şekli (Su ve Zhu, 2005)

Su vd. (2007), plakla güçlendirilmiş kompozit bağ kirişlerini önermiş ve davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. 3 farklı plakla güçlendirilmiş (yüzeyde kaynakla oluşturulan metal ağırlı plak, seyrek kesme donatılı plak ve sık kesme donatılı plak) bağ kirişinin (Şekil 1.44) çevrimsel yük altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Elde edilen sonuçları geleneksel ve diyagonal bağ kirişlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır. Yapılan çalışmalar, gömülü çelik plakaların çevrimsel yük

altındaki bağ kirişlerinde meydana gelen sıkışmayı önlediğini ve bu kirişlerin kesmeye karşı yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur.

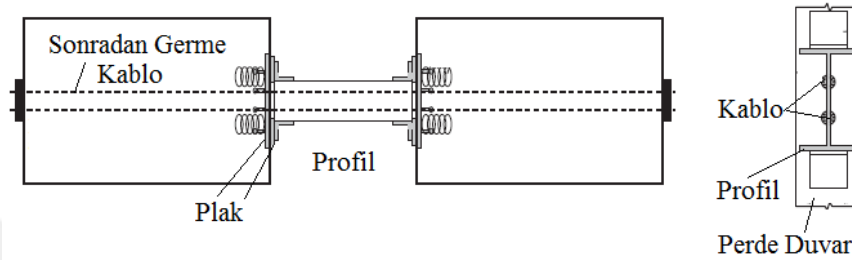


Şekil 1.44. Plakla güçlendirilmiş kompozit bağ kirişleri (Su vd., 2007)

Kurama ve Shen (2008), sonradan germe çelik bağlantılı bağ kirişlerinden oluşan boşluklu perdelerin sismik tasarımı ve davranışı üzerinde analitik çalışma yapmışlardır. Hem yerinde döküm hem de prekast perde duvar ayaklar dikkate almışlardır. Sistemdeki enerjinin sönmülmesi için bağ kirişlerinin uçlarında çelik başlık ve köşebentler kullanmışlardır (Şekil 1.45). Bu birleşimlerden elde edilen sonuçlar geleneksel gömülü çelik bağ kirişli birleşimden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, yeni tasarımın perde duvar ayaklarında oluşturduğu uç yer değiştirmelerinin geleneksel sistemdeki uç yer değiştirmelerinden daha fazla olduğunu göstermiştir.

Zhang vd. (2008), açıklık/derinlik oranı 1.50 değerinde 4 tane ve açıklık/derinlik oranı 2.50 değerinde 2 tane olmak üzere çelik plakla güçlendirilmiş 6 farklı betonarme bağ

kirişi üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Bunun yanında deneye tabi tutulan bir örneğin sonlu eleman modelinin lineer olmayan analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalar neticesinde, çelik plakla güçlendirilmiş bağ kirişlerinde plak kalınlığı ve derinliği arttıkça kirişin kesme dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Deneysel ve analitik çalışmalar neticesinde bir kiriş kesiti için minimum çelik plak oranının %1.8 değerinde olmasını tavsiye etmişlerdir.



Şekil 1.45. Sonradan Germe Çelik Bağ Kirişi (Kurama ve Shen, 2008)

Diyagonal donatılı bağ kirişlerinin inşaa maliyetinde etriyelerin miktarı konumu ve şekilleri önemli yer tutmaktadır. Bu sebeple Fortney vd. (2008) tarafından farklı sargı donatısı oranına sahip diyagonal donatılı bağ kirişlerinin performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı sargı donatısı düzenlemesine sahip 2 adet diyagonal donatılı bağ kirişi çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlarına göre sargı donatısı daha az olan kirişte maksimum yük seviyesinden sonra ani dayanım kaybı görülürken, diğer kiriş daha kararlı davranış göstermiştir. Bu sebeple sargı donatısının yüksek olması enerji tüketme kabiliyetini daha da artırmıştır. İşçilik ve imalat maliyeti açısından daha zor olsa bile sargı donatısının artırılması çekirdek betonun zedelenmesini ve diyagonal donatıların burkulmasını geciktirmesi sebebiyle diyagonal donatılı bağ kirişlerinin davranışında etkin rol oynamaktadır.

Naish (2010), ACI 318-05'te ve ACI 318-08'de verilen diyagonal donatı yerleşiminin, betonarme ve sonradan germe döşemelerin bağ kirişlerinin dayanımı ve sünekliği üzerindeki etkisini deneysel ve analitik çalışmalarla araştırmıştır. Bu sebeple donatı tasarımı ve döşeme etkileri farklı, açıklık/derinlik oranı 2.40 ve 3.33 olan yarım ölçekli 8 model üzerinde çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde yeni yönetmelik koşullarının iyi performans sağladığını, betonarme döşemenin kesme

dayanımını %15 artırırken sonradan germe döşemenin ise kesme dayanımına %10 katkı sağladığını ortaya koymuştur.

Brena ve Ihtiyar (2011), farklı açıklık-derinlik oranı ve farklı kesme-eğilme donatı oranlarına sahip geleneksel donatılı bağ kirişlerinin davranışlarını incelemiştir. Bu doğrultuda farklı tasarımlara ve boyutlara sahip 4 adet geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanını çevrimsel yüklemeye tabi tutmuşlardır. Bağ kirişlerinde çift eğrilikli eğilme meydana getirecek, bağ kirişlerinin her iki ucunda perde duvar ayaklarını temsil eden betonarme başlıklara sahip ve her iki başlığa mafsallar ile bağlı rijit bir yükleme kirişinden oluşan deney düzeneği ile deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda bütün elemanların kiriş-perde birleşim bölgelerinde oluşan düşey çatlaklar ile birlikte kayma düzlemi meydana geldiğini gözlemlemiştir. Açıklık-derinlik oranı küçük kirişlerde diyagonal çatlaklar köşeden köşeye devam ederken açıklık-derinlik oranı büyük kirişlerde ise diyagonal çatlakların birleşim bölgesine yakın kısımlarda yoğunlaştığını ortaya koymuşlardır. Kayma yer değiştirmelerinin kirişte akma meydana geldikten hemen sonra hızlı bir biçimde arttığını, özellikle bu durumun açıklık-derinlik oranı yüksek ve gövde donatısı olmayan elemanda gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. Kayma yer değiştirmesi değerleri kıyas edildiğinde açıklık-derinlik oranı yüksek ve eğilme donatısı oranı az olan kirişin kayma yer değiştirmesinin oldukça büyük olduğunu ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmalar neticesinde kirişlerin birleşim bölgelerinde boyuna donatılarının akmasıyla meydana gelen geniş çatlakların oluştuğunu ve dönmelerin büyük bölümünün kesme kaymasıyla oluştuğunu vurgulamışlardır.

Lequesne (2011), fiberle güçlendirilmiş betonarme bağ kirişlerinin deneysel çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Çalışmayı bağ kirişleri perde duvarlardan bağımsız ve perde duvarlarla beraber olmak üzere iki aşamada gerçekleştirmiştir. Öncelikle farklı donatı düzeninde üretilen ve açıklık/derinlik oranı 1.75 olan 3 adet prekast bağ kirişi deney elemanı üzerinde deneyleri gerçekleştirmiştir. Perde duvar elemanlarına yerleşiminin daha kolay olması için diyagonal donatılar perde duvar elemanları içerisinde yatay olarak kırılmıştır. Daha sonra 4 katlı büyük ölçekte 2 tane boşluklu perde duvar modelinin yatay yük altındaki davranışını incelemiştir. Bağımsız bağ kirişleri üzerinde yapılan çalışmada, fiberin sargısız diyagonal donatılı bağ kirişlerinde sargı görevi gördüğü ve kesme dayanımına büyük ölçüde katkı sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca, perde duvarların dayanımı, rijitliği ve enerji tüketme kabiliyetini de artırdığını ortaya koymuştur. Prekast olarak



HPFRCC ile bağ kirişlerinin, bağlantı detayı açısından yapısal çelik elemanlarına göre çok daha etkin olduğunu vurgulamıştır.

Montgomery (2011), betonarme bağ kirişlerinin yerini alacak çatal yapılı viskoelastik sönümleyici (Şekil 1.46) geliştirmiştir. Viskoelastik malzemenin davranışını karakterize etmek için küçük ölçekli 5 viskoelastik sönümleyici ve betonarme perde duvarla birlikte geniş ölçekte 6 sistemi deneysel olarak incelemiştir. Gerçek yapı üzerindeki etkisini dikkate almak için betonarme boşluklu perdelerden oluşan 85 katlı bir yapı üzerinde sayısal incelemesini gerçekleştirmiştir. Daha farklı birleşim detayı ve daha farklı yapılar üzerindeki etkisinin incelenmesiyle, uygulanabilir bir eleman olabileceğini ortaya koymuştur.

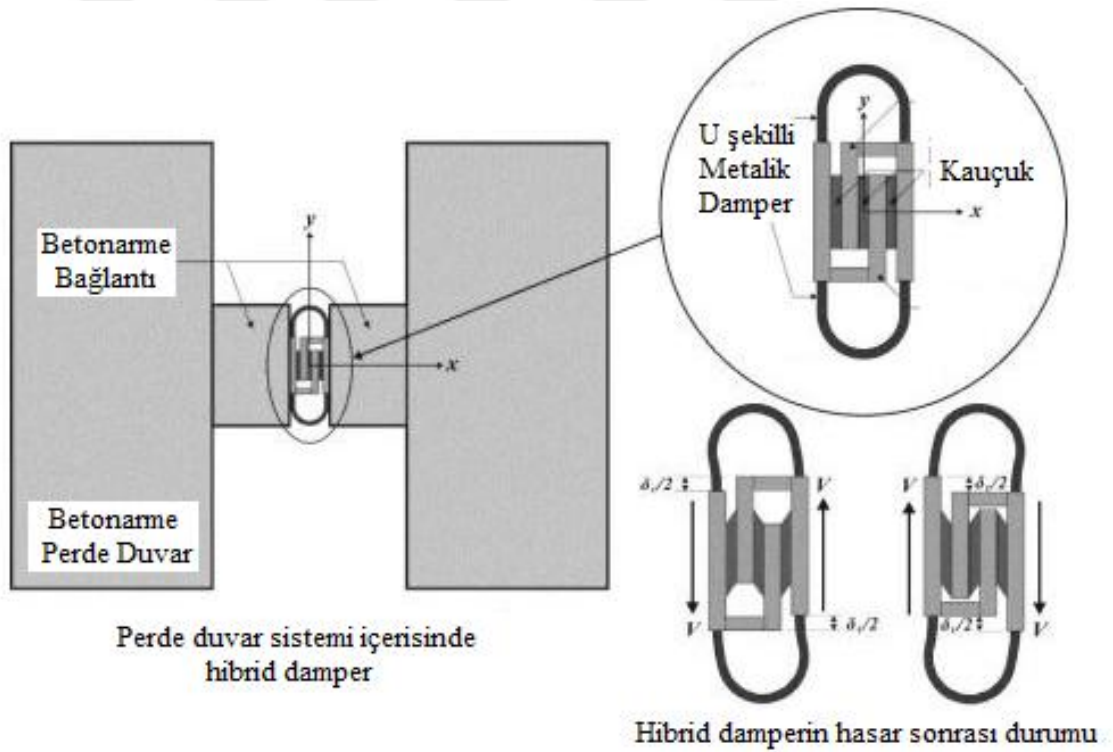


Şekil 1.46. Çatal yapılı viskoelastik sönümleyici (Montgomery, 2011)

Suen (2012), çelik plak gömülü beton kirişlerin kesme kapasitesini geliştirmek için monotonik ve çevrimsel yüklemeler altında çelik plak oranı, etriye oranı ve açıklık/derinlik oranının etkinliğini deneysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla referans olarak 2 adet geleneksel donatılı bağ kirişi ve 9 adet plak gömülü beton bağ kirişi numunesi üretmiştir. 4 adet bağ kirişi monotonik yüklemeye tabi tutulurken, geriye kalan 7 adet numune çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Çelik plaklar, geleneksel donatılı bağ kirişlerinin kesme dayanımını oldukça yükseltmiştir. Çelik plak gömülü bağ kirişleri, daha stabil dayanım kaybı ve yüksek enerji tüketme kabiliyeti ortaya koymuştur. Açıklık/derinlik oranı arttıkça kesme dayanımı ve enerji tüketme kapasitesi azalmıştır. Çelik plak

oranındaki artış, hem kesme dayanımını hem de enerji tüketme kabiliyetini artırmıştır. Etriyeler, çelik plak ve beton arasındaki kuvvet dengesini sağlaması sebebiyle en azından minimum oranda kullanılmasının gerekli olduğu vurgulanmıştır.

Mevcut yönetmeliklerde yer alan bağ kirişi detaylarının uygulanmasının zor ve maliyetli olması sebebiyle Kim vd., 2012 yılında U şekilli metalik sönümleyici ve yüksek sönümlü kauçuktan oluşan hibrid sönümleyici sistemini önermişlerdir (Şekil 1.47). Tam ölçekli 2 farklı deney elamanı üzerinde yarı-statik yükleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, önerdikleri hibrid sönümleyici sistemin elemanlardaki hasarları azalttığını ve plastik mafsallaşmayı üzerinde topladığını ortaya koymuşlardır. Yapının titreşim genliğini azaltarak enerji tüketme kapasitesini artırdığını ve uygulanabilirlik açısından kolaylık ve ucuzluk sağladığını belirtmişlerdir.

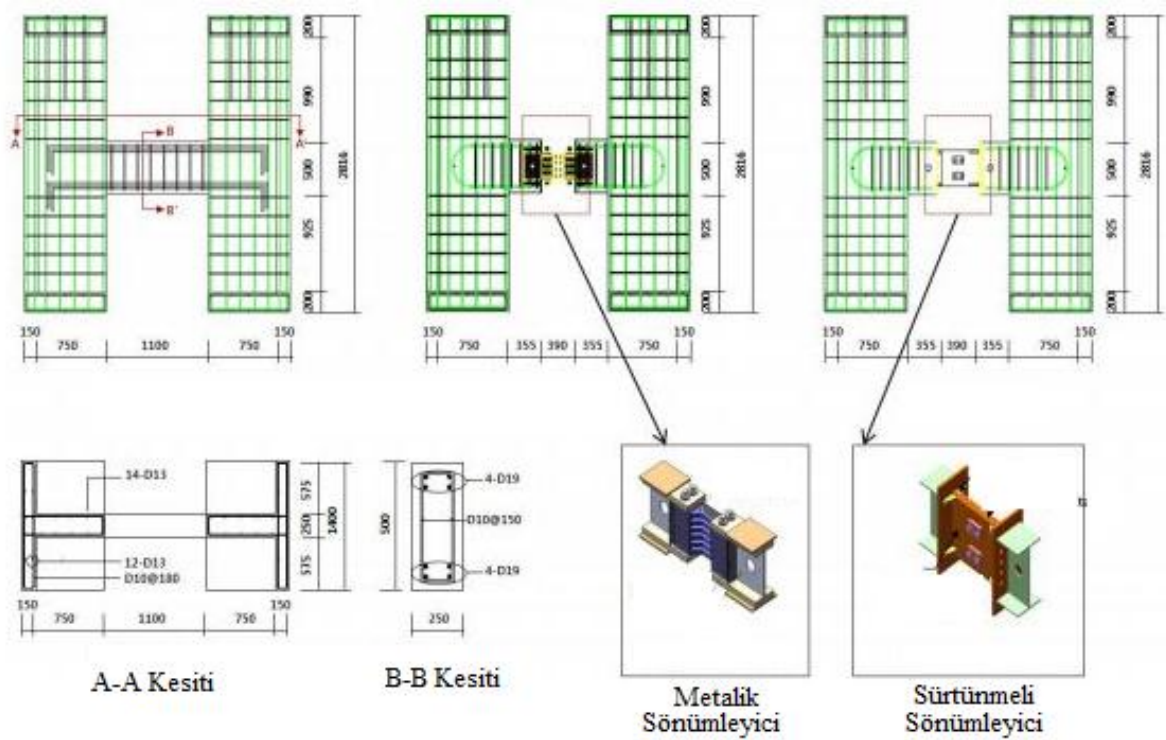


Şekil 1.47. Hibrid sönümleyici (Kim vd., 2012)

Motter vd. (2012), beton kaplı çelik bağ kirişlerinin çevrimsel yük altındaki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu sebeple betonarme perde duvara gömülme derinliği biri diğerinin %75'i olan iki farklı model dikkate almışlardır. Ayrıca gömülme derinliği küçük olan modelin perde duvarlarına gelen yükü diğer modelin 2.5 katı olarak

almışlardır. Gömülme derinliği yüksek olan kirişin dönme kapasitesi %10 seviyelerine ulaştığında bile kirişte dayanım kaybı meydana gelmediği görülmüştür. Fakat gömülme derinliği daha az olan kirişte ise yük-yerdeğiştirme grafiğinde daralma etkisi ile beraber kiriş dönmesi %6 seviyelerine ulaştığında dayanım değerinin maksimum yükün %75'i seviyelerine kadar düştüğü gözlenmiştir. Böylece gömülme derinliğinin beton kaplı çelik bağ kirişlerinin davranışında doğrudan etkili parametre olduğu ortaya koyulmuştur.

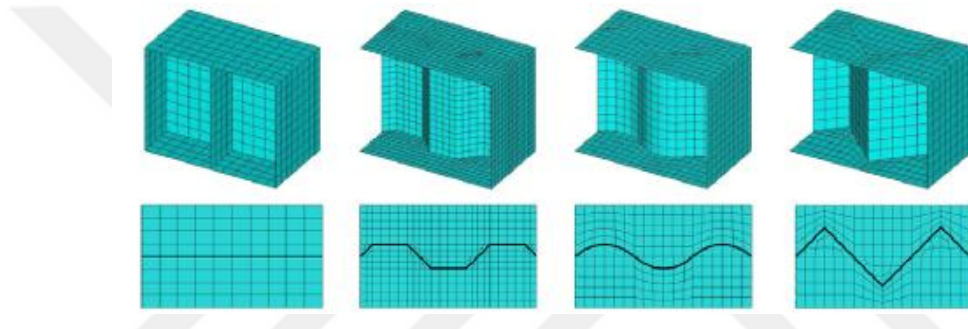
Ahn vd., 2013 yılında bağ kirişi ve perde duvar için uygulamayı daha da kolaylaştırmak, enerji tüketme kapasitesini artırmak ve yapı üzerindeki hasarı azaltmak için metalik ve sürtünme tipi sönümleyici elemanları geleneksel bağ kirişi uygulamalarına alternatif olarak sunmuşlardır (Şekil 1.48). Tam ölçekli 3 farklı deney elemanı üzerinde gerçekleştirdikleri yarı-statik yükleme deneyleri sonucunda, hasarın büyük bölümünü sönümleyicilerde toplamış ve geleneksel bağ kirişlerine nazaran daha iyi histeretik davranış elde ettiklerini öne sürmüşlerdir.



Şekil 1.48. Boşluklu perde duvar elemanlarının detayı ve sönümleyiciler (Ahn vd., 2011)

Çelik bağ kirişlerinin dönme sünekliklerini geliştirmek için Hajsadeghi vd. (2014), çelik levhalar ile berkitilmiş düz çelik profil gövdelerine alternatif olarak farklı geometrik

formlarda kıvrımlı gövdeye sahip çelik bağ kirişlerinin performansını araştırmışlardır. Bu amaçla, düz, trapezoidal, kavisli ve zikzak formlar ile gövde kalınlığı, kıvrım sayısı ve kıvrım açısının çelik profil davranışına olan katkısını sonlu eleman modelleri üzerinde incelemiştirler (Şekil 1.49). Kıvrımlı gövdeye sahip çelik bağ kirişlerinde gövde berkitme levhalarında önemli ölçüde kısıtlama sağlandığı ve çelik bağ kirişlerinin dönme sünekliğinde önemli bir artış sağlandığı yapılan çalışma ile ortaya koyulmuştur. Fakat araştırması yapılan parametreler, çelik bağ kirişlerinin davranışı üzerinde her ne kadar etkili olsa bile daha fazla sayısal ve deneysel çalışmalar ile desteklenmesi gerektiği ifade edilmiştir.



Şekil 1.49. Kıvrımlı gövdeli çelik bağ kirişi (Hajsadeghi vd., 2014)

Hajyalikhani (2015), diyagonal donatılı bağ kirişlerindeki tasarım ve üretim aşamasındaki zorluklar sebebiyle daha yenilikçi ve basitleştirilmiş donatı düzenlemesi üzerinde çalışmıştır. Bu doğrultuda 2 adet geleneksel bağ kirişinden oluşan çift donatılı bağ kirişi tasarımını ortaya koymuştur (Şekil 1.50). Açıklık/derinlik oranı 2.4 ve 3.3 olan farklı kesitler üzerinde deneysel çalışma yapmıştır. Önerilen bağ kirişinin, yönetmelikteki gerilme sınırını karşılayabildiği ve dayanım kaybına kadar yüksek dönme sünekliği sağladığı görülmüştür. Özellikle açıklık/derinlik oranı 3.3 olan çift donatılı bağ kirişlerinin diyagonal donatılı bağ kirişlerine nazaran daha sünek davrandığı ortaya koyulmuştur. Mimari koşullar sebebiyle, bazen tesisat vb. durumlar için yapısal elemanlarda boşluklar açılması gerekmektedir. Fakat bağ kirişleri gibi elemanlarda donatı düzenlemesi buna olanak tanımamaktadır. Önerilen çift donatılı bağ kirişinde, iki geleneksel donatılı eleman arasında bir miktar mesafenin olması ihtiyaç duyulan boşluklara imkan vermektedir. Çift donatı düzenlemesinin, performans üzerinde olumsuz bir etki meydana getirmeden bu

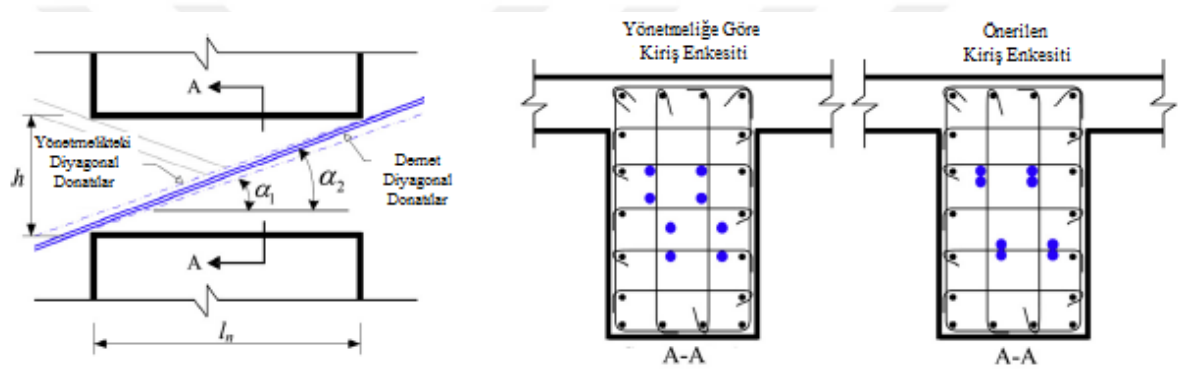
boşluklara imkân verse bile yine bu boşlukların kiriş uçlarına doğru yerleştirilmesinin uygun olacağı vurgulanmıştır.

Han vd. (2015), diyagonal donatı düzenlemesinin deprem esnasında arzu edilen elastik ötesi hasarlara olanak sağlamasına rağmen şantiye ortamında üretiminin zor olması sebebiyle demet diyagonal donatı düzenini önermişlerdir (Şekil 1.51). ACI-318-11 standardına göre sargısız diyagonal donatılı bağ kirişini referans almışlardır. Önerdikleri donatı düzeninin bağ kirişi performansı üzerindeki etkisini ortaya koymak için açıklık/derinlik oranı 2.0 ve 3.5 olan 1/2 ölçekli 4 deney elemanı üretmişlerdir. Yönetmelik gereği düzenlenen kirişlerde aynı doğrultudaki diyagonal donatıların birleştirilmesiyle oluşturulan demet diyagonallerin açısı açıklık/derinlik oranı 2.0 olan kiriş için  $20.04^\circ$  den  $22.1^\circ$  ye, açıklık/derinlik oranı 3.0 olan kiriş için  $8.9^\circ$  den  $10.7^\circ$  ye yükseltilmiştir. Çevrimsel yüklemeye tabi tutulan bağ kirişleri çatlak durumları, kesme dayanım seviyeleri, rijitlikleri, enerji tüketme kabiliyetleri ve süneklik oranları açısından değerlendirildiğinde demet diyagonal donatılı bağ kirişlerinin en az yönetmelik koşulları kadar performans ortaya koyduğu görülmüştür. Açıklık/derinlik oranı yüksek sığ kirişlerde diyagonal donatı düzenlemesine ve şantiye ortamında daha kolay uygulanabilmesine olanak sağlaması açısından arzu edilen performans sağlanmıştır.

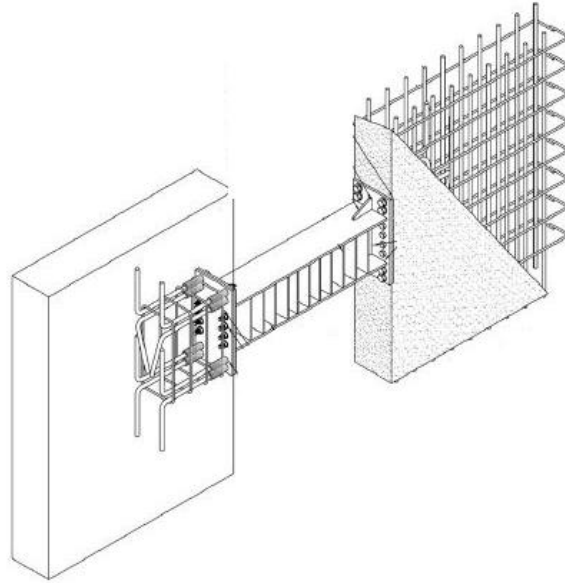
Farsi vd., 2016 yılında yaptıkları çalışmada sönüm kabiliyetinden daha ziyade mevcut elemanın mekanik özelliklerinde ve sistemin davranışında değişiklik olmadan prefabrik imalat yoluna gitmişlerdir. Bu doğrultuda, imalat ve hasar sonrası onarım kolaylığı sağlaması açısından çelik bağ kirişlerine alternatif olarak değiştirilebilir çelik bağ kirişi önermişlerdir (Şekil 1.52). Sismik davranışı ve hasar sonrası değiştirilebilirliği ortaya koymak için farklı dayanım ve rijitliğe sahip 2 deney elemanının tam ölçekli deneysel çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle sabit perde elemanı üzerinde ilk elemanın deneyini gerçekleştirmişlerdir. Perde duvar üzerinde küçük hasar seviyelerinde beklenenin çok üstünde enerji tüketme ve deformasyon yapabilme kapasitesini elde etmişlerdir. İkinci durumda hasar gören perde duvar üzerinde hafif onarım sonrası dayanım ve rijitlik yönünden iyileştirilmiş ikinci elemanın deneyini gerçekleştirmişlerdir. Çekme bulonlarının bulunduğu alanda oluşan hasar sebebiyle ikinci elemanda göçme meydana gelse bile bu bölgede yapılacak iyileştirme ile böyle bir sorunun ortadan kalkabileceğini vurgulamışlardır.



Şekil 1.50. Çift donatılı bağ kirişi (Hajyalikhani, 2015)



Şekil 1.51. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesi (Han vd., 2015)



Şekil 1.52. Uç plaka birleşimli değiştirilebilir çelik bağ kirişi (Farsi, 2016)

### 1.9. Yönetmeliklere Göre Bağ Kirişleri İçin Tasarım Koşulları

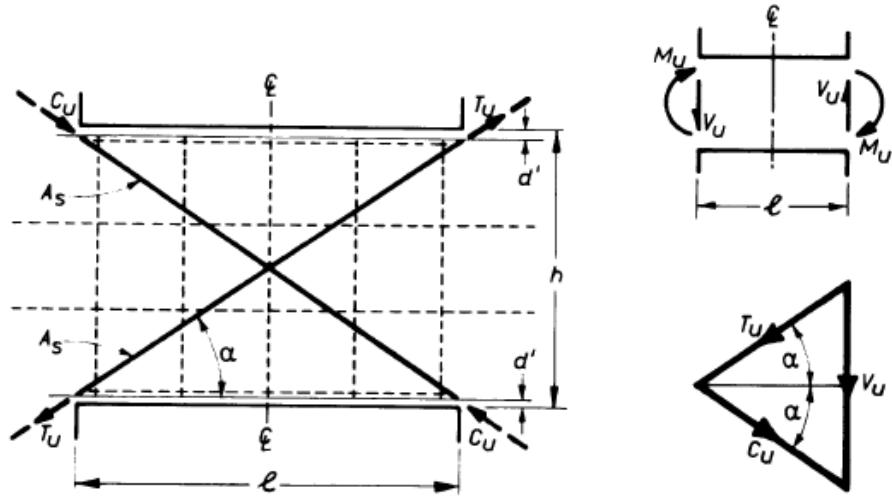
Geleneksel donatılı bağ kirişlerinin gevrek kırılma mekanizmasına sahip olması sebebiyle 1974 yılında Paulay ve Binney tarafından geleneksel donatılı bağ kirişlerine alternatif olarak diyagonal donatılı bağ kirişleri önerilmiş ve ilerleyen yıllarda birçok araştırmacı tarafından geliştirilmesi için birçok çalışma ortaya koyulmuştur. Diyagonal donatı düzenlemesine göre kiriş kesitinde oluşan kesme kuvvetinin tamamen diyagonal donatılar tarafından taşındığı kabul edilir. Geleneksel donatılı kirişlerde kesme kuvveti hesabında yer alan beton ve sargı donatılarının kesmeye olan katkısı tamamen ihmal edilmektedir. Fakat yönetmeliklerde ve literatürdeki çalışmalarda kesme dayanımı betonun basınç dayanımı ile ilişkili olarak sınırlandırılmaktadır. Diyagonal donatılı bağ kirişlerinin tasarımında Şekil 1.53'te yer alan statik olarak sınırlı model esas alınmıştır. Kirişte meydana gelen ilk akma sonrası ve çevrimsel yüklerin ardından bütün kuvvetler (çekme ve basınç kuvvetleri) diyagonal donatılar tarafından taşınmaktadır. Buna göre kirişin akma dayanımının gelişimi,  $T_u = C_u = A_s f_y$  ve  $V_u = 2T_u \sin \alpha$  olmak üzere,

$$A_s = \frac{V_u}{2f_y \sin \alpha} \quad (1.7)$$

denklemleri yardımıyla dış yüklerin etkisi ile kiriş kesitinde oluşan kesme kuvvetinin karşılanabilmesi için gerekli donatı alanı hesaplanmaktadır. Bu denklemde,  $T_u$ ,  $C_u$ ,  $A_s$ ,  $F_y$ ,  $V_u$  ve  $\alpha$  sırasıyla, çekme donatılarına gelen çekme kuvveti, basınç donatılarına gelen basınç kuvveti, çekme veya basınç bölgesindeki diyagonal donatı miktarı, diyagonal donatıların akma dayanımı, dış yüklerin etkisi ile kiriş kesitinde oluşan kesme kuvveti ve diyagonal donatıların eğim açısıdır. Kiriş mesnet bölgelerinde meydana gelen moment ( $M_u$ ) ise,

$$M_u = V_u \frac{l}{2} = lT_u \sin \alpha \quad (1.8)$$

denklemleriyle hesaplanırken, diyagonal donatılı bağ kirişlerinin kesmeye karşı teorik nihai taşıma kapasitesi 1.7 denklemi esas alınarak hesap edilmektedir.



Şekil 1.53. Bağ kirişlerinin tasarımında kullanılan esaslar (Paulay ve Binney, 1974)

Diyagonal donatılı bağ kirişleri, ilk defa 1999 yılında Amerikan Bina Yönetmeliğinde (ACI 318-99) boşluklu çekirdek perde duvar sistemlerde diyagonal olarak güçlendirilmiş betonarme bağ kirişi olarak yer almıştır. 2005, 2008, 2011 ve 2014'te güncel halleriyle ACI 318 yönetmeliğinde yerini almıştır.

Diyagonal donatılı bağ kirişleri, Türkiye'de ilk defa 2007 Deprem Yönetmeliğinde dikkate alınmış olup 2018 Deprem Yönetmeliğinde yeni tasarım koşullarıyla tasarımcılara sunulmuştur.

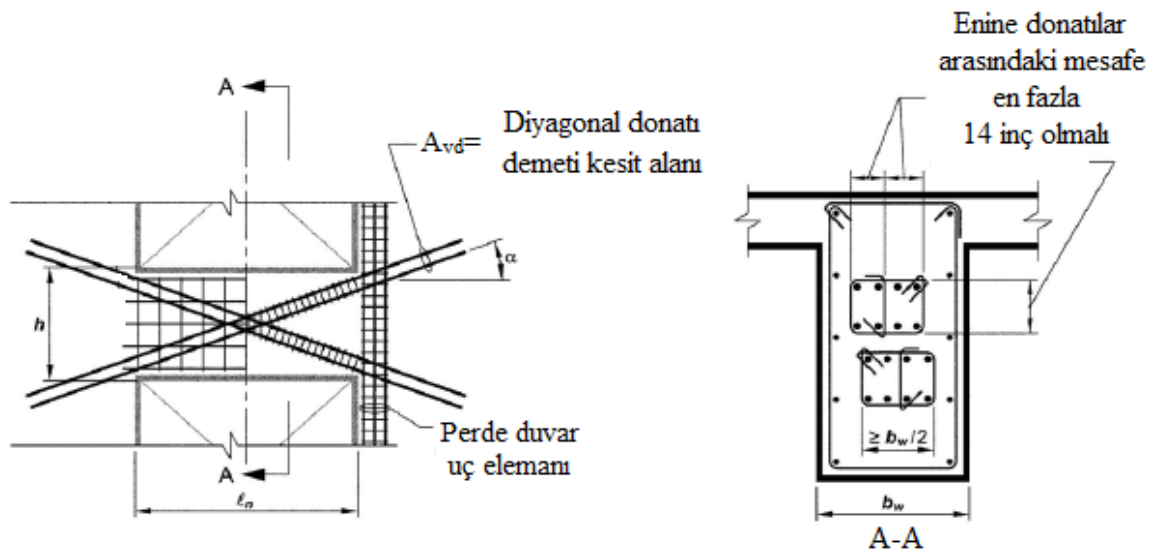
ACI 318-14'e göre tasarlanacak olan bağ kirişinin açıklık/derinlik oranı ( $l_n/h_b$ ) 4'ten büyük olması durumunda diyagonal donatıların etkinliğinin azalması sebebiyle geleneksel donatılı kesit olarak tasarımının yapılması gerekmektedir.  $2 \leq l_n/h_b < 4$  olması durumunda bağ kirişi hem geleneksel hem de diyagonal donatılı kesit olarak tasarımı yapılabilmektedir.  $l_n/h_b < 2$  ve kiriş tasarım kesme kuvvetinin ( $V_u$ )  $0.33 \sqrt{f_{ck}} A_{cw}$  değerini aşması durumunda sadece diyagonal donatılı kesit tasarımı yapılması gerekmektedir. Burada  $A_{cw}$  ve  $f_{ck}$ , sırasıyla bağ kirişi kesit alanı ve ACI 318-14'te bağ kirişi betonu karakteristik basınç dayanımı olarak kabul edilmektedir.

DBYBHY-2007'ye göre  $l_n/h_b > 3$  ve  $V_u \leq 1.5b_w h_b f_{ctd}$  koşulları sağlanamaması durumunda diyagonal donatılı bağ kirişi tasarımı yapılması gerektiği ifade edilmiştir.

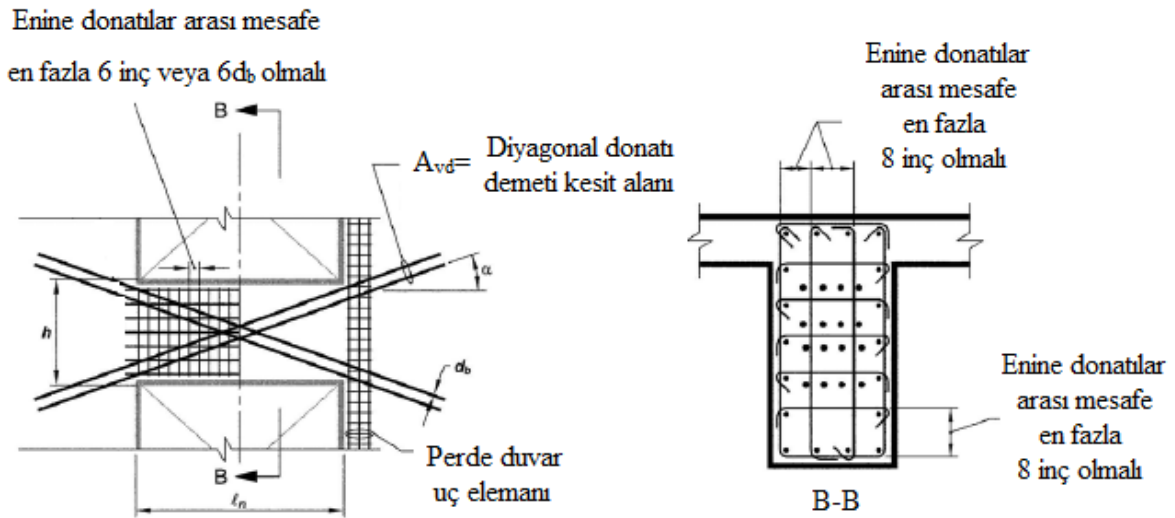
TBDY-2018'e göre  $l_n/h_b > 2$  ve  $V_u \leq 1.5b_w h_b f_{ctd}$  koşulları sağlanamaması durumunda diyagonal donatılı bağ kirişi tasarımı yapılması uygun görülmüştür.



ACI 318-14 yönetmeliği, 2 farklı diyagonal donatı düzeni önermektedir. Bunlardan birincisi, ACI 318-99 yönetmeliğinden beri yer alan sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesidir (Şekil 1.54a). Diğeri ise ilk defa ACI 318-08 yönetmeliğinde yer almaya başlayan sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesidir (Şekil 1.54b). Bu donatı düzenlemesinde, sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesinden farklı olarak bütün açıklık boyunca kiriş kesiti yatay ve düşey enine donatılarla güçlendirilmektedir. Boyuna donatıların sargısız olması, özellikle dar gövdeli bağ kirişlerinde imalatı daha kolay hale getirmektedir.



a) Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesi

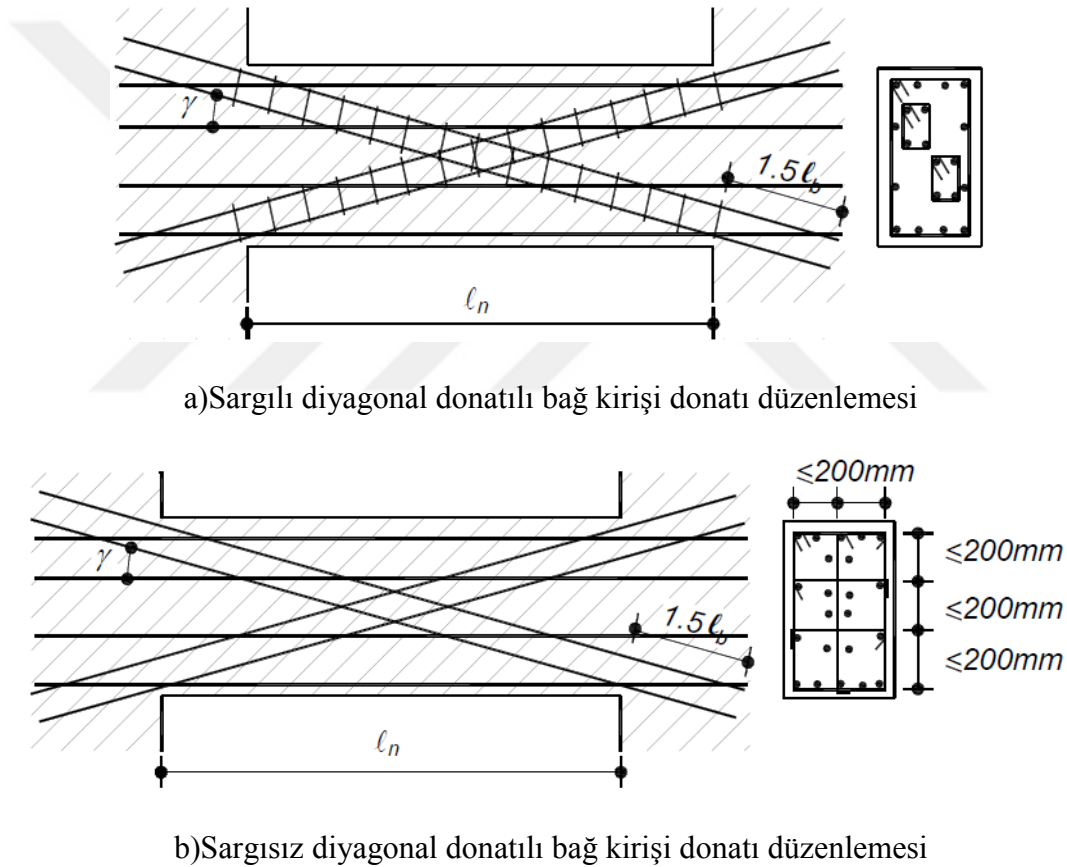


b) Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesi

Şekil 1.54. ACI 318-14'e göre diyagonal donatılı bağ kirişi donatı detayı (ACI 318-14)

DBYBHY-2007’de sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesine yer verilmezken, TDBY-2018’de sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesine alternatif donatı düzenlemesi olarak yer almıştır (Şekil 1.55).

ACI 318-14’te tasarım kesme dayanımı sınırlandırılmaktadır. Kiriş kesitinde oluşabilecek, maksimum müsaade edilebilir kayma gerilmesi  $0.83\sqrt{f_{ck}}$  değeri olarak kabul edilmiştir. DBYBHY-2007’de böyle bir sınırlama bulunmazken, TDBY-2018’de  $f_{ck}$  beton karakteristik basınç dayanımı olmak üzere, maksimum müsaade edilebilir kayma gerilmesi  $0.85\sqrt{f_{ck}}$  olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 1.55. TDBY-2018’e göre diyagonal donatılı bağ kirişi donatı detayı (TBDY-2018)

Diyagonal donatı demetlerinin dıştan dışa boyutları (sargı donatıları dahil) ACI 318-14’ e göre  $b_w$  bağ kirişi genişliği olmak üzere, genişliği ( $b_x$ )  $b_w/2$  ve derinliği ( $h_x$ )  $b_w/5$  değerinden daha az olmayacak şekilde seçilmelidir. DBYBHY-2007 ve TDBY-2018’e göre ise böyle bir sınırlandırmaya yer verilmemiştir.

ACI 318-14'e göre diyagonal donatı demetinin çevresinde kullanılması gereken enine veya sargı donatıları arasındaki maksimum mesafe ( $s_{max}$ ) 1.9 denklemi ile verilen değerlerin en küçüğü kadar olmalıdır. Ayrıca diyagonal donatıların etrafındaki enine ve sargı donatılarının kesit içerisindeki toplam alanı ( $A_{sh}$ ) 1.11 ve 1.12 denklemi ile elde edilen değerden daha az olmamalıdır. 1.12 denkleminde,  $A_g$  ve  $A_{ch}$  sırasıyla beton ile kaplı kesit alanı ve sargı donatısı ile sarılı kesit alanı olarak ifade edilmiştir. Kiriş uzunluğu boyunca her iki doğrultuda kullanılan boyuna ve enine donatılar arasındaki mesafe 12 inç değerini aşmamalı ve  $0.002b_w s$  değerinden daha az olmamalıdır.

$$s_{max} = \text{en küçük} \begin{cases} \text{En küçük kiriş enkesit boyutu} \\ \text{Diyagonal donatı çapının } (d_0) \text{ 6 katı} \\ s_0 \end{cases} \quad (1.9)$$

$$s_0 = 4 + \left( \frac{14 - h_x}{3} \right) (h_x \text{ inç cinsindedir.}) \quad (1.10)$$

$$A_{sh} = 0.09 s b_c \frac{f_{ck}}{f_y} \quad (1.11)$$

$$A_{sh} = 0.3 s b_c \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \quad (1.12)$$

Kiriş gövdesinde ise kiriş uzunluğu boyunca kullanılacak enine veya sargı donatılar arasındaki mesafe diyagonal donatı çapının 6 katını ve 6 inç değerini aşmamalıdır. Kullanılan enine ve sargı donatılarının kesit alanı en az 1.11 ve 1.12 denklemleri ile hesaplanan donatı alanına eşit olmalıdır.

DBYBHY-2007 ve TBDY-2018'e göre, diyagonal donatı demetleri özel deprem etriyeleri ile sarılacak ve kullanılacak etriyelerin çapı 8 mm' den, aralığı ise çapraz donatı çapının 8 katından ve 100 mm' den daha büyük olmayacaktır. Çapraz donatılara ek olarak, bağ kirişine TS 500'de öngörülen minimum miktarda etriye ve yatay donatı konulacaktır. Ayrıca TBDY-2018'e göre, diyagonal donatı demeti özel deprem etriyeleri ile sarılmadığı durumda, kiriş etriyelerinin aralığı çapraz donatı çapının 6 katını ve 150 mm'yi

geçmeyecektir. Ayrıca kiriş yüksekliği boyunca 200 mm'yi ve kiriş genişliği boyunca 200 mm'yi geçmeyen aralıklarla yatay ve düşey çirozlar kullanılacaktır

### **1.10. Literatür Özeti, Amaç ve Kapsam**

Yüksek binalar, 20. yüzyılın başlarından itibaren inşa edilen binalar arasında önemli teknolojik yenilik olarak yerini almaktadır. Yüksek binaların ortaya çıkışı sadece modernliğin, ekonomik refahın veya yaşam kalitesinin değil, aynı zamanda inşa alanları ve kaynaklarının daha verimli kullanılabilmesi için dikey genişleme talebinin bir sembolüdür. Şehir merkezlerindeki arsaların azalması, arazi maliyetlerinin artışı, ekonomideki hızlı gelişim, malzeme teknolojisindeki gelişmeler, teknolojik atılımlar, ticari ve konut amaçlı kullanılan yüksek binaların inşasını artırmaktadır.

Yüksek binalarda, kat sayısı ve yükseklik arttıkça deprem ve rüzgar gibi doğa olaylarının meydana getirdiği yatay yüklere karşı olan hassasiyeti de artmaktadır. Bu sebeple yüksek binaların davranışı yatay yüklerin kontrolüne girmeye başlamaktadır. Deprem ve rüzgardan kaynaklanan yatay yükler, alçak ve yüksek katlı binalar arasındaki farklılığı oluşturan, yapı taşıyıcı sistemi ve yapısal tasarımın belirlenmesinde rol oynayan baş aktörlerdir.

Kullanım amacı, mimari tasarım ve bina yüksekliğine bağlı olarak tasarım mühendisleri tarafından birçok farklı taşıyıcı sistem tercihi yapılmaktadır. Yüksek binalar için tercih edilen taşıyıcı sistemler içerisinde en fonksiyonel taşıyıcı eleman, hem yatay hem de düşey yükleri taşıyan betonarme perde duvarlar olmaktadır. Yüksek dayanım, rijitlik ve süneklik kabiliyetine sahip betonarme perde duvarlar, yatay yükleri üst yapıdan temele aktarabilen ve yapı içerisinde yatay gergi vazifesi taşıyan en yaygın taşıyıcı elemanlardır. Bu sebeple betonarme perde duvar sistemleri yüksek binalar için en fazla tercih edilen taşıyıcı sistemlerdir.

Bina yüksekliği boyunca süreklilik arz eden betonarme perde duvarlarda kapı, pencere, tesisat vb. gereksinimler sebebiyle boşluklar açılmaktadır. Bazı durumlarda ise aynı eksen üzerinde yan yana inşa edilen perde duvarlar döşeme ve kiriş benzeri bağlantı elemanları ile birbirlerine bağlanmaktadır. Yanal rijitlik ve dayanımı daha yüksek olan tekil sistem inşa edilebilmesi için perde duvarlar arasındaki veya içerisindeki boşluk düzeninin uygun olarak tasarlanması gerekmektedir. Açılan boşluklardan kaynaklanan rijitlik ve dayanım kaybını telafi etmek ve aynı eksen üzerinde yan yana duran perde

duvarların etkileşimini geliştirmek için kesme dayanımı yüksek bağlantı elemanları kullanılmalıdır. Bu durumda, yatay yük taşıyıcı sistem sadece eğilme etkisindeki tekil perde duvarlardan, devrilme momentlerine kısmen aksel basınç-çekme çifti ile direnen bir sisteme dönüşmektedir. Çerçeve sisteme benzeyen bu oluşum, boşluklu betonarme perde duvar sistemi olarak adlandırılmaktadır. Boşluklu betonarme perde duvar sisteminde tekil perde duvar ayaklar birbirine çoğunlukla kısa ve derin kirişler ile bağlanır. Bu şekilde oluşan kısa ve derin kirişler ise bağ kirişleri olarak adlandırılmaktadır.

Bağ kirişleri, eksantrik gergili çerçevelerde yer alan bağlantı kirişleri ile benzer rolü taşımaktadır. İyi tasarlanmış bağ kirişleri, yatay yük etkisi altında her iki ucunda eşit dönmelere maruz kalmakta ve ani plastik mafsallık oluşumunu sağlamaktadır. Yatay yük etkisiyle sisteme giren enerji, sadece perde duvar ayaklarında yoğunlaşması yerine bina yüksekliği boyunca bağ kirişlerine dağıtılabilmektedir. Sistemden optimum düzeyde performans sağlamak için enerji tüketme mekanizmasının perde duvarların tabanında ve bağ kirişlerinin tamamında plastik mafsallık mekanizmasıyla sağlanması gerekmektedir. Bu mekanizma aynı zamanda moment taşıyan çerçeve sistemlerdeki güçlü kolon-zayıf kiriş tasarım ilkesiyle benzerlik taşımaktadır. Boşluklu perde duvarlardan beklenen performansın sağlanabilmesi için bağ kirişlerinin uygun dayanım, rijitlik ve süneklik kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Ayrıca sünek davranışın ortaya konabilmesi için bağ kirişleri, perde duvar ayaklarından önce elastik ötesi davranış göstererek, enerji tüketme kabiliyeti sağlamalıdır.

Bağ kirişleri uygun olarak tasarlandığında boşluklu perde duvar sisteminin gerekli dayanım, rijitlik ve enerji tüketme (süneklik) kabiliyeti göstermesini sağlar ve arzu edilen bağlantı mertebesini sisteme kazandırır. Bağlantı mertebesi, bağlantı etkisiyle perde duvarlarda meydana gelen aksel yükün karşıladığı devrilme momentinin tüm sistemde meydana gelen devrilme momentine oranı olarak ifade edilir. Boşluklu perde duvar sistemindeki bağlantı mertebesi, bağ kirişlerindeki kesme kuvvetleri ile sağlanmaktadır. Güçlü bağlantı ile tek parça konsol perde duvar ve zayıf bağlantı ile birbirinden bağımsız tekil konsol perde duvarların oluşumu ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple bağ kirişlerinin histeretik davranışı, bağlantı mertebesi yüksek boşluklu perde duvar sistemlerinin davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. Boşluklu betonarme perde duvarların davranışını anlayabilmenin tek yolu, bağ kirişlerinin histeretik davranışının tam olarak anlaşılabilmesinden geçmektedir.

Bağ kirişlerinin, boşluklu perde duvarlar üzerindeki etkisinin incelenmesi ve sistemin yekpare ele alınabilmesi için çok büyük deney platformlarında çalışılması gerekmektedir. Laboratuvar koşullarının yetersiz ve çok katlı perde duvarın inşasının zor olması, araştırmacıları sistemi idealleştirme yoluna sevk etmiştir. Bu sebeple, yapılan çalışmaların çok büyük bölümü bağ kirişlerinin davranışının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi üzerine olmuştur. Boşluklu perde duvarların davranışında hakim rol oynayan bağ kirişlerinin davranışlarının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi ile perde duvar ayaklarının da aynı oranda iyileştirilmiş olacağı tüm araştırmacılar tarafından kabul görmüştür.

1964 Alaska, 1994 California ve 2010 Şili depremlerinde eğilme etkisine göre hesapları yapılan geleneksel donatı düzenine sahip betonarme bağ kirişlerinin onarım ve güçlendirme yapılamayacak seviyede büyük hasarlar gördüğü belirlenmiştir. Bu sebeple araştırmacılar tarafından geleneksel donatılı bağ kirişlerinin davranışı üzerinde deneysel araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, geleneksel donatılı bağ kirişleri yeterli sargı donatısına sahip olsa bile, çekme etkisinde kirişteki uzama sebebiyle boyuna donatıların taşıyıcı özelliğini kaybettiğini ve uzama etkisinde birleşim bölgelerinde kayma kırılması meydana geldiğini göstermiştir. Bu tarz kırılmaların ani ve gevrek olması sistem içerisinde istenmeyen ani dayanım ve rijitlik kayıplarına yol açmıştır. Geleneksel donatılı bağ kirişlerinde karşılaşılan gevrek davranışı ortadan kaldırmak ve çift eğrilikli eğilmeden farklı davranış sergileyen bağ kirişlerinin çalışma prensibine uygun olması için diyagonal donatılı bağ kirişleri önerilmiştir. Buradaki esas düşünce, bağ kirişlerinde oluşacak diyagonal çekme ve basınç gerilmelerini karşılamak ve kayma kırılmalarını önlemektir. Süneklik ve enerji tüketme kapasitesi yüksek olan bu kirişlerde, diyagonal donatıların stabilite sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu sorun enine donatılarla ortadan kaldırılmaktadır. Fakat kiriş derinliğinin kiriş boyuna oranı 4'ten büyük olması durumunda diyagonal donatıların eğim açısı azalacağından diyagonal donatıların etkinliği azalmaktadır. Bu sebeple açıklık-derinlik oranı 4'ten büyük olan bağ kirişlerinde diyagonal donatı düzenlemesinin bir katkısının olmayacağı bilinmektedir. Bununla birlikte diyagonal donatı düzenlemesinin işçilik açısından imalatı da zor olmaktadır. Sargı donatılarının sadece kiriş gövdesindeki yatay donatılarda ve diyagonal donatılarda kullanıldığı iki ayrı diyagonal donatı düzenlemesi ACI-318 ve TBDY yönetmeliklerinde detaylı olarak sunulmaktadır.

Geleneksel donatılı bağ kirişlerinin yetersiz performansı ve diyagonal donatılı bağ kirişlerinin belirli açıklık-derinlik oranlarındaki performans düzeyi ve imalat zorluğu,

araştırmacıları farklı donatı düzenlemelerine yönlendirmiştir. İlerleyen süreçte diyagonal donatılı ve geleneksel donatılı sisteme katkı sağlayacağı düşünülen pilye donatılı, uzun ankraj donatılı, kısa ankraj donatılı ve çift donatılı bağ kirişlerinin performansı araştırılmıştır. Pilye donatıları, geleneksel donatılı kirişin nihai taşıma kapasitesini artırmıştır. Kısa ve uzun ankraj donatıları kiriş-perde birleşim bölgesindeki kayma düzlemini ortadan kaldırsa bile daha gevrek davranış göstermiştir. Geleneksel donatılı kirişin olumsuz davranışları iyileştirilmesine rağmen diyagonal donatılı kirişin performansı karşılanamamıştır. Çift donatılı bağ kirişleri, tesisat gibi gereksinimlere imkân sağlamış ve diyagonal donatılı bağ kirişlerine göre daha iyi performans ortaya koymuştur. Fakat elastik ötesi davranış talebi karşısında ağır hasar gören betonarme bağ kirişlerinin onarım ve güçlendirilmesine çözüm bulunamamaktadır.

Malzeme teknolojisi ve uygulama tekniklerinin gelişmesi ile beraber geleneksel donatılı ve diyagonal donatılı bağ kirişlerinin performansının geliştirilmesi için çelik fiber ve çelik plak gibi güçlendirme yöntemlerinin yanı sıra çelik ve kompozit kesitlerin etkinliği uzun yıllar araştırılmıştır. Çelik fiberli betonun özel olarak sahada üretiminin zorluğu, çelik plaklardaki aderans problemi ve çelik profillerin perde duvar içerisindeki gömülme uzunluğu ile ortaya çıkan imalat sorunları, ortaya koydukları performansın önüne geçmektedir. Bu sebeple, çelik lifle, çelik plakla ve çelik profillerle güçlendirilmiş kompozit bağ kirişleri üzerindeki araştırmalar halen devam etmektedir.

Depreme dayanıklı olarak tasarlanmış bir yapının dinamik dış etkiler altında yeterli deprem performansını gösterebilmesi yatay yük taşıyıcı elemanların enerji tüketme kapasitelerine bağlıdır. Yapısal elemanların ve dolayısıyla yapının sünekliğini artırarak ve plastik mafsalların oluşmasına izin vererek yapıya etkiyecek olan deprem kuvveti sınırlandırılmakta ve enerji tüketimi sağlanabilmektedir. Belirli bölgelerde plastik mafsalların oluşması, ana taşıyıcı elemanların hasar görmesini sınırlandırılmakta ve yapının tamamının göçmesini engelleyebilmektedir. Plastik mafsal oluşumu, onarılamaz hasarları meydana getirirse de can güvenliğini sağlaması, hasar sonrası onarım ve güçlendirmeye olanak sağlaması ve ekonomik bir tasarımı mümkün kılması nedeniyle mühendisler tarafından kabul görmektedir. Bu amaçla yapıların deprem performansını artırmak için yenilikçi yapısal kontrol sistemlerine başvurulmaktadır. Boşluklu perde ve bağ kirişlerine ait son 15 yıllık literatürde, betonarme, çelik veya kompozit olarak imal edilen bağ kirişlerinin birer sönümleyici elemana dönüştürülme çalışmalarının gerçekleştirildiği görülmektedir.

Donatı düzenlemesi, malzeme, güçlendirme tekniği ve tasarım bakımından ortaya konan çalışmalar incelendiğinde, boşluklu perde duvar sisteminin davranışı üzerinde etkin rol oynayan bağ kirişlerinin, yüksek dayanım, yüksek süneklik ve yüksek enerji tüketme kabiliyetlerinin yanında, işçilik kolaylığı ve hasar sonrası onarılabilir olma özelliğine sahip olmaları gerektiği ortaya çıkmaktadır. Yeni nesil uygulamalarda, yüksek süneklik, yüksek enerji tüketme kabiliyeti, kolay işçilik ve kolay onarılabilirlik talebine cevap verilse dahi yüksek dayanım ve sistem yerdeğiştirmesi (rijitlik) talebi karşılanamamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, yönetmeliklerde yer alan diyagonal donatılı bağ kirişlerinin daha geniş açıklıklarda bile arzu edilen performansı ortaya koyabilmesine imkân verecek ve imalat kolaylığı sağlayacak yeni donatı düzeninin beraberinde yüksek dayanım ve rijitliğe cevap verebilecek hasar sonrası değiştirilebilir-takılabilir metalik sönümleyicili bağ kirişinin geliştirilmesidir. Yeni donatı düzenlemesinde kesitteki donatı oranında değişim olmaksızın boyuna donatıların eğim açılarının bağ kiriş performansı üzerindeki etkisi araştırılarak diyagonal donatıların etkinliğinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Metalik sönümleyicili bağ kirişinde, bağ kiriş tarafından birbirine bağlanan perde duvarların aynı kat seviyesinde birbirine görel yerdęiřtirmesi sebebiyle meydana getirdiği kesme kuvvetlerinin ve görel yerdęiřtirmelerin eğilme kapasitesi yüksek metalik levhaların eğilme davranışı ile karşılanması planlanmıştır. Pratikte uygulanan sönümleyici tipi bağ kirişlerinden karşılanamayan yüksek dayanım ve rijitlik talebinin ise yerdęiřtirme kabiliyeti çok yüksek olan metalik levhaların uygun tasarımıyla sağlanması hedeflenmektedir. Yatay yükler altında, arzu edilen süneklik ve sönüm kabiliyetinin sağlanabilmesi için bağ kirişlerinin elastik ötesi davranış sergilemeleri gerekmektedir. Bu durum bağ kirişleri ile beraber bağ kiriş-perde duvar birleşim bölgelerinin de yoğun hasara maruz kalmasına sebep olmaktadır. Birleşim bölgelerindeki hasarın aza indirgenmesi ve hasar sonrası daha kolay onarım için değiştirilebilir-takılabilir sistemin yenilik getireceği düşünülmektedir.

Bu amaçlar doğrultusunda öncelikle betonarme ve metalik sönümleyicili bağ kirişinin performansının belirlenebilmesi için gerekli olan uygun deney düzeneğinin tasarımı gerçekleştirilmiş ve detayları anlatılmıştır. Referans numunesi olarak kullanılan geleneksel, sargılı diyagonal ve sargısız diyagonal donatılı bağ kirişlerinin özellikleri ve tasarım esasları ortaya koyulmuştur. Diyagonal donatılı bağ kirişlerine alternatif olarak önerilen demet ve hasır donatılı bağ kirişlerinin özellikleri ayrıntılarıyla belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen metalik sönümleyicili bağ kirişlerinin çalışma şekli,



birleşim detayları, tasarım esasları ve bütün ayrıntıları detaylı olarak anlatılmıştır. Daha sonra laboratuvar ortamındaki üretim aşamalarına, deneysel çalışmalara yer verilmiştir. 3. Bölüm’de yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular irdelenmiş ve 4. Bölüm’de sonuçlar ortaya koyulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda, bu çalışma kapsamında metalik sönümleyici olarak geliştirilen tahterevalli tipi bağ kirişlerinin, tasarım kolaylığı, yüksek enerji tüketme kabiliyeti, yüksek süneklik, yüksek sönüm oranı, yeterli rijitlik ve yeterli dayanıma ek olarak hasar sonrası değiştirilebilir olma yönüyle boşluklu betonarme perde duvarlarda bağ kirişi olarak kullanılabilir olduğu görülmüştür.



## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Boşluklu betonarme perde duvarlar, çok katlı binalarda yaygın olarak kullanılan yatay yük taşıyıcı elemanlardır. Boşluklu betonarme perde duvarlardan oluşan taşıyıcı sistemler, sistemi oluşturan perde duvar ayakların eğilme davranışı ve bağ kirişlerinin kazandırdığı çerçeve etkisi sayesinde yatay yüklere karşı direnç göstermektedir. Sisteme gelen yatay yüklerin etkisinde bağ kirişlerinde oluşan kesme kuvvetleri ile perde duvar ayaklarında aksel kuvvet ve tersinir taban momentinin oluşumuyla çerçeve etkisi sağlanmış olmaktadır. Bağ kirişlerinin çok rijit olması, aşırı normal kuvvet ve taban eğilme momenti etkisindeki perde duvarların daha önce hasar görmesine sebep olmaktadır. Perde duvar ayakların onarımının çok zor olması, yükleme sonrası oluşacak hasarlarla binanın güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Bu sebeple boşluklu perde duvar tasarımında yatay yük etkisi altında bağ kirişlerinin perde duvar ayaklarından önce elastik ötesi davranış göstererek, hem arzu edilen dayanımı sağlaması hem de sisteme giren enerjinin yutulması talep edilmektedir. Böylece, perde duvar ayaklarının elastik ötesi hasarının önüne geçilerek sistemin güvenliğinin sağlanması hedeflenmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, boşluklu betonarme perde duvarların yatay yüklere karşı daha güvenli olarak tasarlanabilmesi için bağ kirişlerinin uygun dayanım, rijitlik ve süneklik kabiliyetine sahip olması gerektiği görülmektedir. Bunun yanında, hasar sonrası kolay onarılabilir-değiştirilebilir olması da sistemin işlevselliğine önemli katkı sağlamaktadır.

Yönetmelikte yer alan diyagonal donatılı bağ kirişlerinin imalatının zor olması, diyagonal donatıların kiriş orta bölgesinde kesişmesi ile betonun içerisine giremeyecek kadar donatı yoğunluğu oluşturması ve açıklık/derinlik oranı arttıkça diyagonal donatıların etkinliğini azalması yeni donatı düzenlemesini gerektirmiştir.

Boşluklu betonarme perde duvar sistemlerinde elastik ötesi davranışın bağ kirişleri üzerinde toplanmış olması hasarı sadece bağ kirişlerinde sınırlandırmamaktadır. Bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgeleri de hasarın oldukça yoğunlaştığı bölgeler olarak görülmektedir. Elastik ötesi davranış yardımıyla arzu edilen süneklik ve enerji yutma kabiliyeti sağlanırken, birleşim bölgelerinin elastik ötesi hasara maruz kalmaması

gerekmektedir. Son yıllarda birer pasif sönümleyici olarak tasarlanan bağ kirişlerinden talep edilen en önemli husus, birleşim bölgelerinin hasar sonrası onarıma olanak sağlamasıdır. Bu sebeple takılabilir-çıkartılabilir özelliğindeki prefabrik elemanlar, bağ kirişleri için önemli yenilik olarak yerini almaktadır. Ayrıca, yapılan çalışmalarda sönümleyici tipi bağ kirişlerinin, perde duvar ayaklarının davranışı üzerinde etkili olan kesme dayanımı ve rijitlik özelliklerinin tam manası ile karşılanamaması yeni sönümleyici tipi bağ kirişinin tasarımını gerekli kılmaktadır.

Bu kapsamda, yapılan çalışmalar Tablo 2.1’de özetlenmektedir. Tablo 2.1’de özetlenen 9 adet deney elemanına ait deney düzeneğinin tasarımı, tasarım aşamaları, üretim aşamaları ve ilgili malzeme deneyleri detaylı olarak sunulmaktadır.

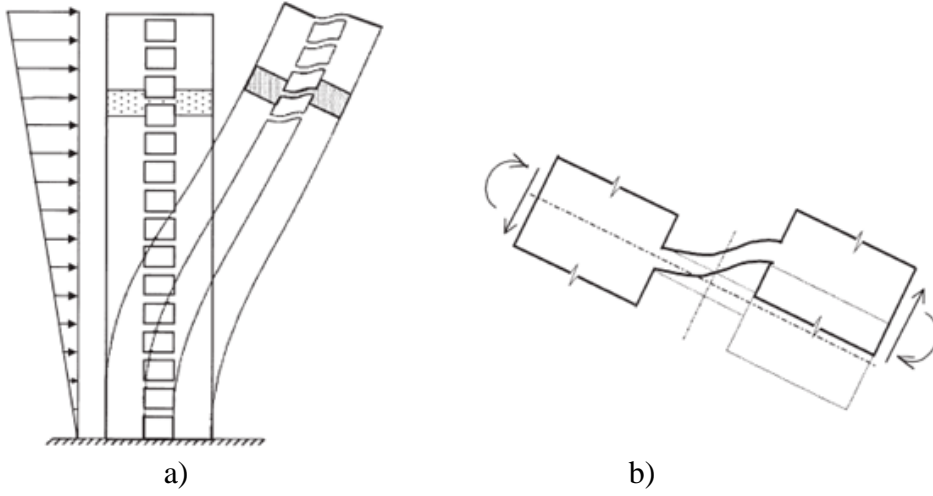
Tablo 2.1. Çalışma kapsamında üretilen deney elemanları

<b>Deney Elemanı Kodu</b>	<b>Deney Elemanı Adı</b>	<b>Gerekçe</b>
CRCB	Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı	Referans elemanı
DRCB	Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı	Referans elemanı
DRCB-FC	Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı	Referans elemanı
BDRCB	Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı	Diyagonal donatıların dezavantajlarını ortadan kaldırmak için alternatif
MRCB-19	Hasır donatılı bağ kirişi (19° açılı) deney elemanı	Diyagonal donatıların dezavantajlarını ortadan kaldırmak için alternatif
MRCB-45	Hasır donatılı bağ kirişi (45° açılı) deney elemanı	Diyagonal donatıların dezavantajlarını ortadan kaldırmak için alternatif
DBMRCB-45	Güçlendirilmiş hasır donatılı bağ kirişi (45° açılı) deney elemanı	Hasır donatılı bağ kirişlerinde oluşan kayma kesme kırılmalarını önlemek
TETOD	Tahterevalli tipi bağ kirişi	Betonarme bağ kirişleri kadar dayanım ve rijitliğin yanında yüksek süneklik ve enerji yutma kabiliyeti sağlamak
PF-TETOD	Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi	Hasar sonrası onarım ve güçlendirmeye olanak sağlamak

## 2.2. Deney Düzenine Tasarımı

Boşluklu betonarme perde duvar sistemlerinde bağ kirişi ile bağlanan iki perde duvar ayağı, yatay yük etkisi altında yerdeğiştirme ve dönme hareketi yapmaktadır. Perde duvarların dönme hareketi aynı zamanda aynı kat seviyesindeki noktaların rölatif olarak düşey hareketine sebep olmaktadır. Aynı kat seviyesinde oluşan rölatif düşey yer değiştirme, bağ kirişlerini yoğun kesme kuvvetine maruz bırakmaktadır.

Kat döşemeleri ile sınırlanan perde duvar ayakları aynı kat seviyelerinde eşit değerlerde dönmektedir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi bu dönme hareketi ile bağ kirişleri de perde duvarlarla birleşen her iki ucundan ters yönlere eşit değerlerde dönme hareketine maruz kalmaktadır. Bu sebeple bağ kirişlerinin davranışını elde etmek için boşluklu perde duvar sisteminin bütününe dikkate almak yerine uygun uç elemanları (başlık) kullanarak uygun bir deney düzeneği ile benzer sonuçları elde etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 2.1. Boşluklu betonarme perde duvarlarda bağ kirişlerinin dönmesi: a) perde duvar ayaklarının dönmesi b) bağ kirişlerinin dönmesi (Kwan ve Zhao, 2002)

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde boşluklu betonarme perde duvar ve özellikle de bağ kirişleri için farklı deney düzeneklerinin dikkate alındığı görülmektedir (Paulay, 1969; Barney vd., 1980; Igarashi vd., 1992; Harries vd., 1993; Tassios vd., 1996; Galano vd., 2000; Kwan ve Zhao, 2002; Canbolat vd., 2005; Kuang ve Baczkowski, 2006; Brena ve İhtiyar, 2011; Montgomery, 2011). Elemanlar için kullanılan malzeme ve donatı düzenlemesi açısından yapılacak araştırmalarda kullanılan düzeneklerin çalışma üzerinde

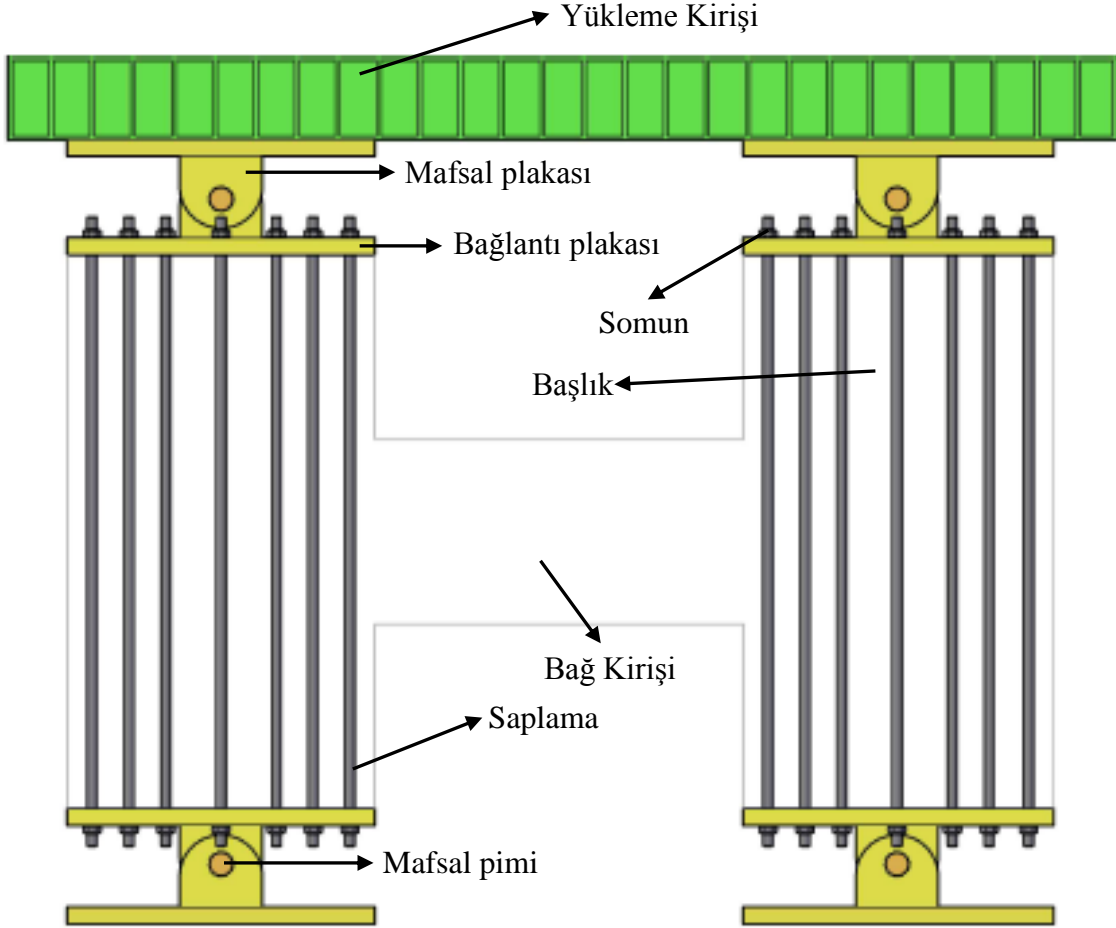
dezavantajı bulunmamaktadır. Fakat boşluklu betonarme sistemi dikkate alındığında süneklik, dayanım, dönme, yerdeğiştirme, birleşim noktalarındaki ve uç elemanlardaki lokal deformasyonlar açısından deney düzeneklerinin dezavantajlarının olabileceği, yapısal sistem davranışının tam olarak ortaya konamayacağı ilgili çalışmalarda görülmektedir (Kwan ve Zhao, 2002). Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için bağ kirişleri ile ilgili deneysel çalışmalarda kullanılacak deney düzenekleri şu esaslara göre belirlenmelidir:

- Bağ kirişlerinin her iki ucundaki dönme eşit olmalıdır.
- Bağ kirişine ait başlıklar, kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde oluşacak lokal deformasyonları gerçekçi olarak sağlamalıdır.
- Düzenek, pik davranış sonrasında incelenebilmesi için yer değiştirme kontrollü olmalı ve süneklik kontrolü için yük-yerdeğiştirme eğrisini tam olarak verebilmelidir.
- Bağ kirişlerinde normal kuvvet oluşumuna engel olmalıdır.
- Tek yönlü ve iki yönlü yükleme imkânı sağlayabilmelidir
- Büyük ölçekli deney elemanlarının üretimine ve test edilmesine olanak sağlamalıdır.
- Laboratuvar ortamında montaj kolaylığı ve müdahale etme kolaylığı sağlamalıdır.
- Deney elemanı özellikleri dışında kullanılan bağlantı elemanlarının hasar üzerinde etkisi bulunmamalıdır.
- Mümkün oldukça en az bağlantı elemanına sahip olmalıdır.
- Daha fazla ve detaylı sonuç alabilmek için gerekli deney teçhizatlarının kullanımına imkan vermelidir.
- Perde duvar hareketini sağlayan piston gibi kontrolü zor elemanlar sınırlı olarak kullanılmalıdır.

Bu çalışma kapsamında önerilen ‘Tahterevalli’ tipi bağ kirişi, perde duvarların eğilme etkisinde yaptığı birbirine göre rölatif düşey yer değiştirme hareketinden faydalanılarak tasarlanmıştır. ‘Tahterevalli’ tipi bağ kirişinin yapısal performansının incelenmesinin yanında perde duvar elemanları üzerinde oluşan hasarların gelişimi üzerindeki etkisi de bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır. Bu sebeple bu çalışma kapsamındaki deneysel çalışmalarda kullanılacak deney düzeneklerinin eşit dönme, rölatif düşey yer değiştirme ve birleşim bölgelerindeki lokal hasarları sağlaması gerekmektedir.

Literatürdeki deney düzenekleri incelendiğinde, doğrudan yükleme sistemlerinin bu çalışmaya uygun olmayacağı görülmektedir (Barney vd., 1980; Igarashi vd., 1992; Harries

vd., 1993; Tassios vd., 1996; Kwan ve Zhao, 2002). Dolaylı yükleme sistemleri ayrı ayrı incelendiğinde ise mafsallar ile perde duvarlara bağlı 1 adet yükleme kirişine sahip 4 mafsallı sistemin kullanılmasının arzu edilen davranışı sağlayacağı öngörülmüştür (Şekil 2.2).

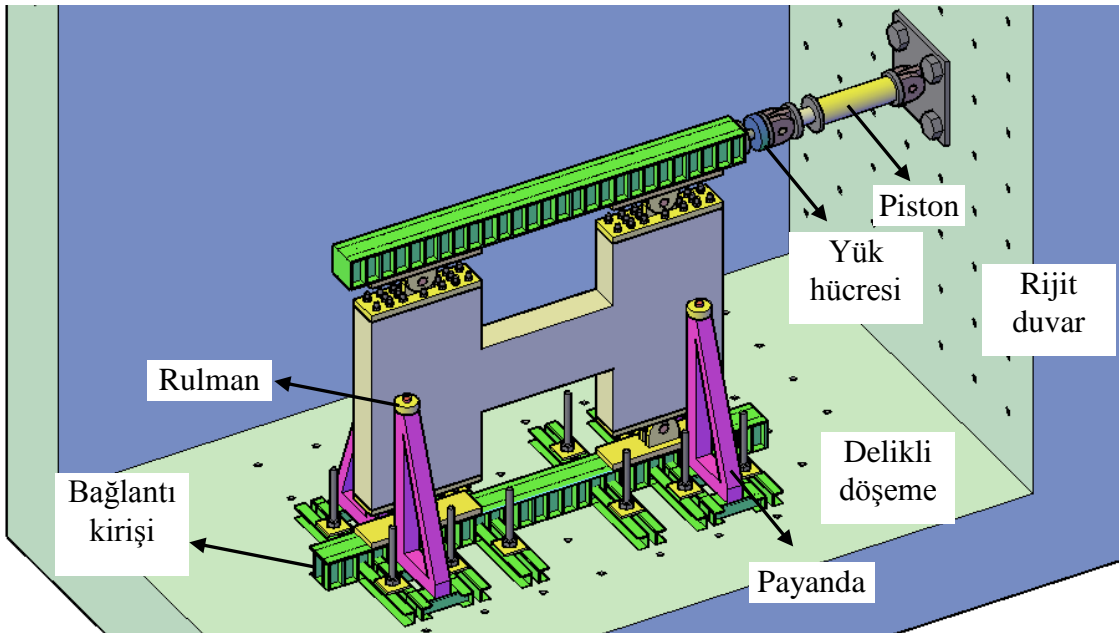


Şekil 2.2. Deneysel çalışmalar için tasarlanan deney düzeneği

Tasarlanan deney düzeneğinde yatay yükler, piston yardımıyla mafsallar ile başlıklara bağlanan yükleme kirişine aktarılmaktadır. Yükleme kirişine gelen yatay yükün yarısı her bir mafsal yardımıyla başlıklara doğrudan etkililmektedir. Başlık gövdesinde boyuna donatılar yerine saplama (boy cıvata) tercih edilmektedir. Başlık betonu, alt ve üst bağlantı plakaları arasında saplama cıvatalar yardımıyla sıkıştırılmaktadır. Bu sayede, başlıkları saran üst bağlantı ve alt bağlantı plakaları aynı anda aynı miktarda dönmektedir. Yükleme kirişinden üst mafsallara aktarılan yükler, yüklemenin ilk aşamasında başlıklarda kesme kuvveti oluşturmaktadır. Fakat saplamalarda oluşan gergi kuvveti yardımıyla başlıklara gelen kesme kuvveti başlık gövdesinde sınırlandırılarak alt mafsallara doğrudan

aktarılmış olmaktadır. Başlık ile bağlantı levhaları arasındaki çekme kuvvetlerinin tamamı saplamalar, basınç kuvvetlerinin tamamı ise beton tarafından karşılanmaktadır. Başlık gövdeleri için kabul edilen bu tasarım modeli, perde duvar elemanlardan arzu edilen rijit davranışı ortaya koyarak eşit dönmeler yardımıyla yüklerin bağ kirişlerine aktarımı sağlanmaktadır. Rijit başlıklarda oluşan hasarlar, bağ kirişi-perde duvar arasındaki etkileşim sonucu oluşan hasarlarla sınırlandırılarak, farklı tasarım koşullarına sahip bağ kirişlerinin birleşim bölgelerine etkisi tam olarak yansıtılabilmektedir.

Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında deneysel çalışmalara uygun olarak tasarlanmış deney platformu yer almaktadır. Bu deney platformu, deney elemanları için düşey ve yatay bağlantılara olanak sağlayan delikli döşeme ve rijit duvara sahiptir. Bu çalışma için tasarlanan deney düzeneği, delikli döşemeye saplamalar yardımıyla bağlanan bağlantı kirişine bağlantı plakaları yardımıyla monte edilmiştir (Şekil 2.3). Rijit duvara bağlı olan piston, uygun aparatlar (yük hücresi, mafsal vb.) kullanılarak yükleme kirişine bağlanmıştır. Deney düzeneği, yatay ve düşey olarak sınırlandırılmış olmasına rağmen, yükleme sırasında oluşabilecek yanal stabilite sorununu ortadan kaldırmak için deney numunesinin yanal hareketini önden ve arkadan sınırlandıran payandaların kullanılması uygun görülmüştür. Pistonun itme-çekme hareketi ile dönmeye başlayan başlıkların payandalar arasındaki hareketini kolaylaştırmak için payandaların başlıklara temas eden kısımlarına rulmanlar yerleştirilmiştir.



Şekil 2.3. Deney platformu ve deney düzeneği kurulumu

Yükleme ve bağlantı kirişleri iki adet IPN200 çelik profili yan yana birleştirilerek üretilmiştir. Özellikle bağlantı noktalarında oluşabilecek stabilite sorununu ortadan kaldırmak için 10 mm kalınlığında çelik berkitme levhaları ile 80 mm aralıklar ile berkitilmiştir. Deney düzeneğine ait parçaların sayısı ve tasarım özellikleri, sistem yük kapasitesi, deney elemanı boyutları ve deney platformu ölçülerine göre değişmektedir. Bu sebeple, öncelikle deney platformu ölçüleri dikkate alınarak deney elemanı boyutları belirlenmiştir.

### **2.3. Deney Elemanı Boyutlarının Belirlenmesi**

Bağ kirişi deney elemanları, bir adet bağ kirişi ve perde duvarları temsil eden iki adet başlıktan oluşmaktadır. Deney düzenekleri ve deney elemanları, bağ kirişlerinde oluşan hasarların yanında bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgelerindeki hasarı da boyut etkisi altında kalmadan sağlayabilmelidir. Uygulamadaki bağ kirişi boyutlarının mimari tasarım ve kullanım amacına bağlı olarak değişmesi standart boyutlarda deney elemanı kullanımını engellemektedir. Ayrıca, deneysel araştırmaların birçoğunun açıklık/derinlik oranına bağlı olarak gerçekleştirilmesi, deney düzeneği ve laboratuvar imkanları vb. sebeplerden ötürü deney elemanı boyutları araştırmacılara göre değişmektedir. Bu sebeple araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda araştırmacılara özgü deney elemanları üzerinde deneysel çalışmalar yürütülmüştür (Tablo 2.2).

Kwan ve Zhao'ya (2002) göre perde duvar veya başlık üzerinde, birleşim bölgesinden itibaren kiriş yüksekliğinin yarısı kadar derinlikte hasar meydana gelmektedir. Başlık üzerindeki lokal hasarların tam olarak sağlanabilmesi için başlık genişliği en az kiriş yüksekliği kadar ve başlık yüksekliği de en az kiriş yüksekliğinin 2 katı kadar alınmalıdır.

Bağ kirişi ve perde duvarlar arasındaki etkileşim sonucu birleşim bölgelerindeki olası hasar derinliği, Sesli vd. (2016) tarafından yapılan sayısal çalışma ile ortaya konmuştur. Geleneksel donatılı ve diyagonal donatılı bağ kirişlerinden oluşan 2 adet 4 katlı boşluklu betonarme perde duvarın sonlu eleman modeli üzerinde hasar oluşumları incelenmiştir (Şekil 2.4). Kwan ve Zhao (2002) tarafından ifade edilen hasar sınırlarının aşılmadığı görülmüştür. Diyagonal donatılı bağ kirişlerinde hasar derinliği birleşim bölgelerinde artmasına rağmen kiriş derinliğinin yarısı kadar bir bölgede sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Gerek Kwan ve Zhao'nun (2002) çalışmasından gerekse de Sesli vd. (2016) tarafından



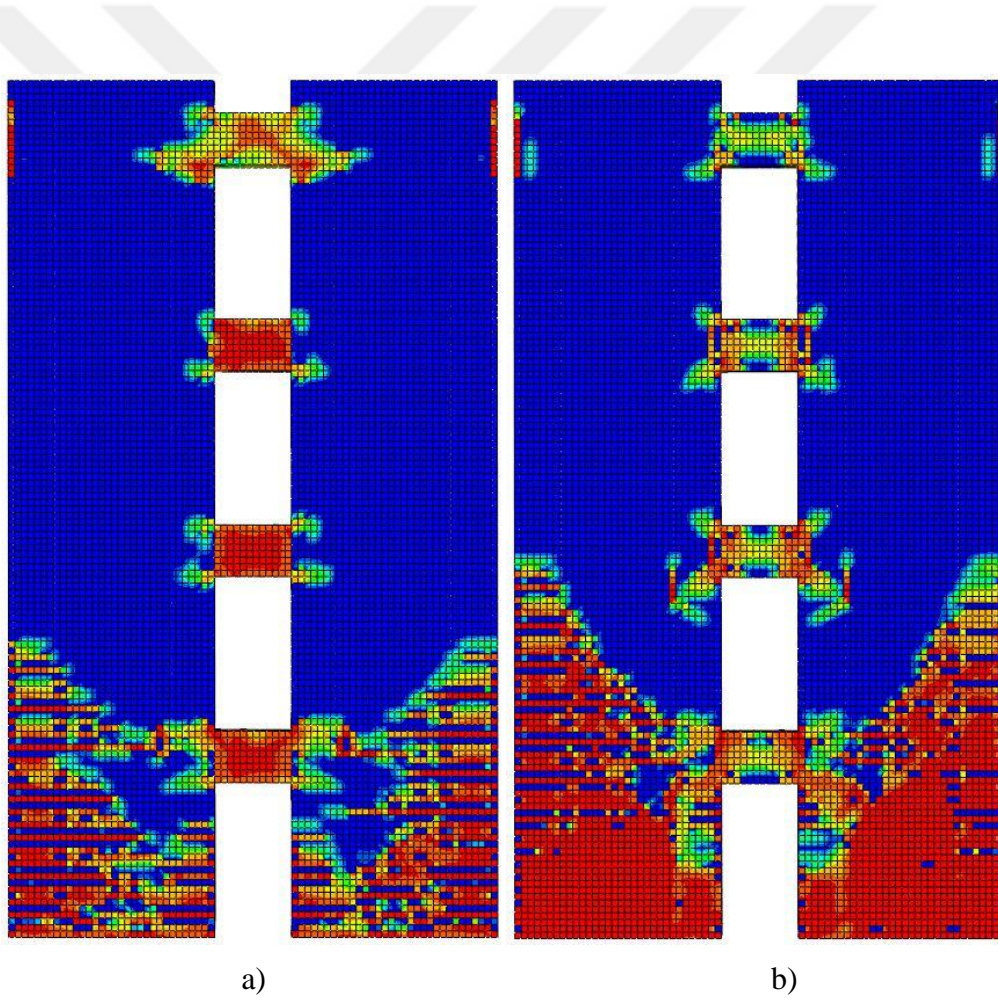
yapılan çalışmalardan elde edilen hasar derinliği dikkate alındığında kiriş başlığı yüksekliğinin kiriş yüksekliğinin en az 2 katı olması gerektiğine karar verilmiştir.

Tablo 2.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney numunesi boyutları ve ölçekleri

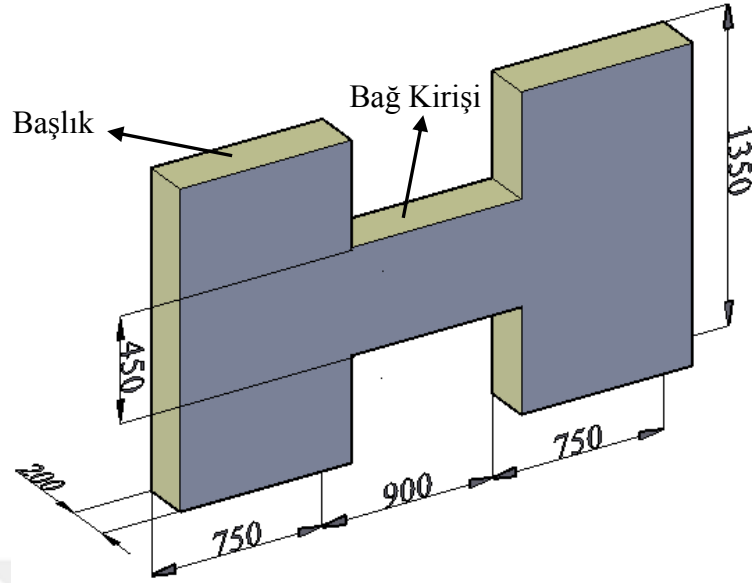
Yazar ve yılı	Başlıklar (l-h)	Kirişler (l-h)	Açıklık/Derinlik (l/h)	Genişlik (mm)	Ölçek
Harries, 1993	1500-1800	1200-347	3.46	300	1/1
Kwan and Zhao, 2002	850-1300	700-350	2.00	120	1/2
Kwan and Zhao, 2002	850-1300	700-400	1.75	120	1/2
Kwan and Zhao, 2002	850-1300	700-500	1.40	120	1/2
Kwan and Zhao, 2002	850-1300	700-600	1.17	120	1/2
Fortney, 2005	1689-1575	914-356	2.57	254	1/2
Su and Zhu, 2005	825-1300	750-300	2.50	180	1/1
Canpolat vd., 2005	600-1700	600-600	1.00	200	3/4
Lam vd., 2005	525-1300	750-300	2.50	180	1/1
Kuang and Baczkowski, 2006	800-1060	400-360	1.11	100	1/2
Kuang and Baczkowski, 2006	800-1060	600-360	1.67	100	1/2
Kuang and Baczkowski, 2006	800-1060	800-360	2.22	100	1/2
Su vd., 2007	800-1300	700-600	1.17	120	1/2
Zhang vd., 2008	725-1250	750-500	1.50	150	1/1
Naish, 2010	1000-1000	1000-400	2.40	300	1/2
Naish, 2010	1000-1000	1500-450	3.33	300	1/2
Ahn vd., 2011	900-2800	1100-500	2.20	250	1/1
Brena and Ihtiyar, 2011	760-1650	510-380	1.34	250	1/1
Brena and Ihtiyar, 2011	720-1650	1020-380	2.68	250	1/1
Kim vd. 2012	650-3000	1000-450	2.22	200	1/1
Chen and Lu, 2012	Perde Sistem	600-200	3.00	200	1/2
Oh vd., 2012	625-3000	1000-450	2.22	200	1/1
Lehman vd., 2013	Perde Sistem	610-305	2.00	150	1/3
Lequesne vd., 2013	Perde Sistem	600-350	1.70	125	1/3
Cheng vd., 2015	Perde Sistem	450-300	1.50	200	1/2
Han vd., 2015	-	1050-525	2.00	250	1/2
Han vd., 2015	-	1050-300	3.50	250	1/2

ACI 318-14 yönetmeliğine göre bir bağ kirişinin hem geleneksel hem de diyagonal donatılı olarak tasarlanabilmesi için açıklık/derinlik oranı en az 2 olması gerekmektedir. Bu sebeple bu çalışmada kullanılan deney elemanlarının açıklık/derinlik oranı 2 olarak dikkate alınmıştır. Geniş ölçekte çalışmak için, literatür çalışmalarına paralel olarak kiriş

yüksekliği 450 mm ve açıklığı 900 mm olan bağ kirişinin deneysel araştırma için uygun olacağı kabul edilmiştir. Diyagonal donatıların yerleştirilmesine olanak sağlaması için minimum kiriş kalınlığı ise 200 mm olarak dikkate alınmıştır. Uygulama ile benzerlik taşıması açısından bağ kirişi ve perde duvar kalınlığı eşit alınmıştır. Yükleme kirişi, bağlantı kirişi, bağlantı plakaları ve mafsalların yanında rijit duvar üzerindeki delik yükseklikleri dikkate alındığında kabul edilen kiriş boyutlarına göre olması gereken minimum başlık yüksekliği 1350 mm (Kiriş yüksekliğinin 3 katı) olarak hesaplanmıştır. Yönetmeliğe göre kenetlenme boyunun kirişlerde kullanılan donatıların çapına bağlı olarak artması ve başlıkların kirişlere göre daha rijit olmasını sağlamak için başlık genişliği 750 mm olarak tercih edilmiştir. Deney elemanın boyutları Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.4. Boşluklu betonarme perde duvar sistemlerinin hasar modları: (a) geleneksel donatılı bağ kirişli ve (b) diyagonal donatılı bağ kirişli



Şekil 2.5. Deney elemanı ve boyutları

#### 2.4. Deney Elemanı Başlık Donatısının Tasarımı

Farklı tip bağ kirişlerinin performansının karşılaştırılabilmesi için kesit boyutları ve donatı tasarımı aynı olan perde duvarların tercih edilmesi gerekir. Bu çalışmada, bütün deney elemanları için paspayı değeri ( $c_c$ ), 20 mm olarak dikkate alınmıştır. Başlık betonu içerisinde kullanılan düşey donatıların çapı 14 mm, yatay donatıların çapı 8 mm olarak tercih edilmiştir. Deneysel olarak test edilen bütün deney elemanları için aynı kesit ve donatı düzenine sahip başlıklar kullanılmıştır. Deney düzeneğinin çalışma prensibine göre çekme kuvvetleri başlıklarda kullanılan saplamalar, basınç kuvvetleri ise beton tarafından karşılanmaktadır. ACI 318-14 yönetmeliğine göre yerinde döküm perde duvarlarda kullanılması gereken minimum düşey donatı oranı 0.0015 olması gerekmektedir. 200mmx750mm kesit alanına sahip başlıklarda kullanılması gereken düşey miktarı 15 adet olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada S420 kalitesinde 18 adet 14 mm çapında donatı kullanılmıştır. Bu donatı çeliklerinin minimum karakteristik akma dayanımı ( $f_{yk}$ ) 420 N/mm<sup>2</sup> olarak dikkate alınmaktadır. Deney elemanlarında kullanılacak beton için hedef karakteristik basınç dayanımı ( $f_{ck}$ ) 30 N/mm<sup>2</sup> seçilmiştir. Bu durumda tasarımı yapılan başlıkların tasarım çekme dayanımı yaklaşık 1163 kN ve tasarım basınç dayanımı yaklaşık 4500 kN olarak hesap edilmiştir.

ACI 318-14 yönetmeliğine göre, betonarme perde duvarların tasarımında belirlenen kesit için öngörülen kesme dayanımı:

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.1)$$

denklemleri ile hesap edilmektedir. Burada  $V_c$  ve  $V_s$  sırasıyla, beton tarafından sağlanan kesme dayanımı ve kesme donatıları tarafından sağlanan kesme dayanımı olarak ifade edilmektedir. Eksenel basınca maruz perde duvarlar için  $V_c$ ,

$$V_c = 0.166\lambda\sqrt{f_{ck}}td \quad (2.2)$$

değerini aşmamalıdır (ACI 318, 2014). Burada  $t$ ,  $d$  ve  $\lambda$  sırasıyla, perde duvar kalınlığı, perde duvar kesiti faydalı yüksekliği ve betonun mekanik özelliklerini yansıtan değişim katsayısıdır.  $\lambda$  değerinin normal betonlar için 1.0 alınması önerilmektedir. Eksenel çekmeye maruz perde duvarlar için,

$$V_c = 2\left(1 + \frac{-N_u}{500A_g}\right)\lambda\sqrt{f_{ck}}td \quad (2.3)$$

denklemleri önerilmiştir. Bu formüle göre çıkan değer negatif (-) olması durumunda betonun kesmeye katkısı sıfır kabul edilmektedir. Burada  $N_u$ , perde duvara gelen eksenel çekme kuvvetidir.

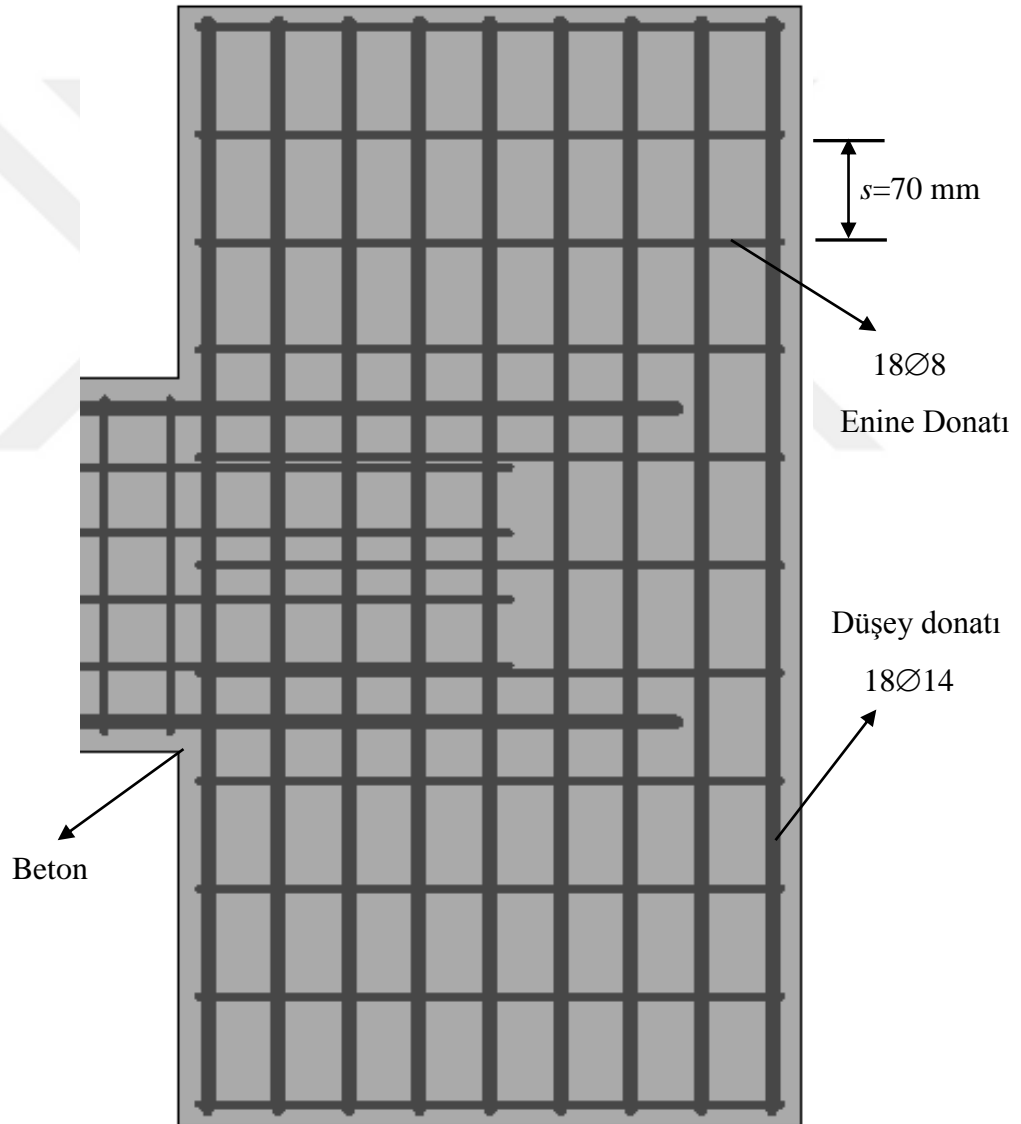
Kesme donatıları tarafından sağlanan kesme dayanımı  $V_s$ ,

$$V_s = \frac{A_w f_{yk} d}{s} \quad (2.4)$$

denklemleri ile hesap edilmektedir. Burada  $s$  ve  $A_w$  sırasıyla, iki sargı donatısı arasındaki mesafe ve  $s$  aralığında bulunan kesme donatısı alanıdır. Perde duvarların düşey kesiti boyunca minimum donatı oranı 0.0025 olması gerekmektedir.

Tüm başlıklarda 70 mm aralıklarla 8 mm çapında enine donatılar kullanılmıştır. Deneylemler için kullanılan pistonların maksimum yük kapasitesi 1000 kN'dur. Bu durumda,

eksenel basınç etkisinde  $V_c$  yaklaşık 110 kN, 1000 kN'luk eksenel çekme etkisinde olsa bile  $V_c$  yaklaşık 110 kN olarak hesap edilmiştir.  $V_s$  ise yaklaşık 362 kN olarak hesap edilmiştir. Kısacası, donatı tasarımı yapılan her bir perde duvar başlığının elastik yük taşıma sınırı, yaklaşık 472 kN olarak hesap edilmiştir. Her bir deney elemanı 2 adet başlığa sahip olduğu için pistonlar vasıtası ile yükleme kirişine aktarılması gereken en büyük yük değerinin yaklaşık 944 kN olması gerekmektedir. Donatı tasarımı yapılan başlıkların donatı detayı ve boyutları Şekil 2.6'da verilmektedir.

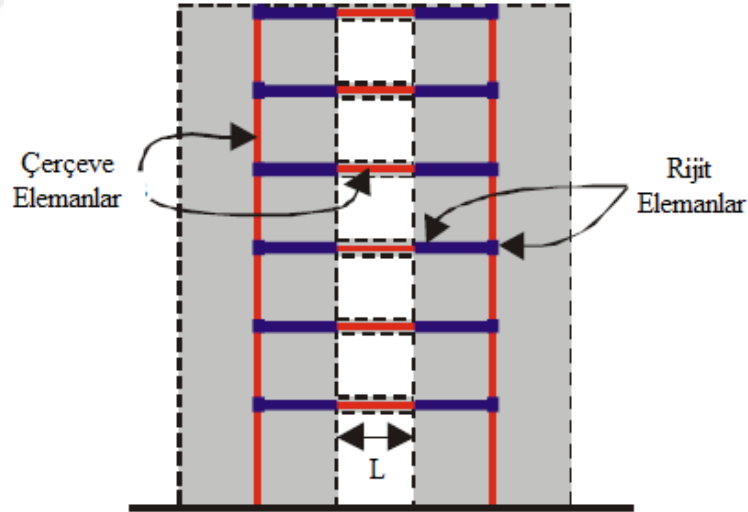


Şekil 2.6. Deney elamanları başlık donatıları

## 2.5. Deney Elemanında Oluşan Kesit Tesirlerinin Belirlenmesi

Birden fazla betonarme perde duvar ayağından oluşan boşluklu perde duvar sisteminin kapalı form çözümleri ile analizlerinin gerçekleştirilmesi oldukça zor olmaktadır (Hassan, 2004). Bu yüzden, daha basit ve çok amaçlı olmasının yanında lineer olmayan analizlere de olanak sağlayabilmesi sebebiyle boşluklu betonarme perde duvar sistemlerinin analizleri için genellikle eşdeğer çerçeve yöntemi tercih edilmektedir.

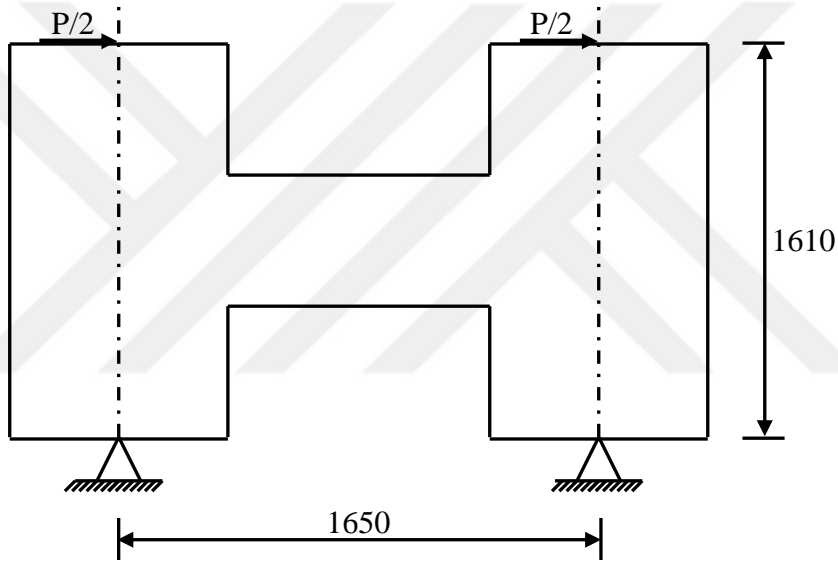
Eşdeğer çerçeve yönteminde boşluklu perde duvar sistemi, perde ayakların merkezine eşdeğer kolon yerleştirilerek idealleştirilen bir çeşit çerçeve elemanlar düzeni olarak modellenmektedir. Kolonların aksel ve eğilme rijitlikleri perde ayaklarında olduğu gibi modelde kullanılmaktadır. Kiriş-duvar birleşimi ve efektif kolon arasında kalan perde ayak bölgesi rijit bölüm olarak modellenirken bağ kirişleri ise mevcut yapısal özellikleri ile ifade edilmektedir (Şekil 2.7). Bu rijit bölümler, duvar yüzeyinde oluşacak dönme ve düşey yerdeğiştirmelerin tam olarak elde edilmesini sağlamak için kullanılmaktadır (Eljadei, 2012).



Şekil 2.7. Eşdeğer çerçeve yöntemine göre idealleştirilmiş sistem (Harries vd. 2000)

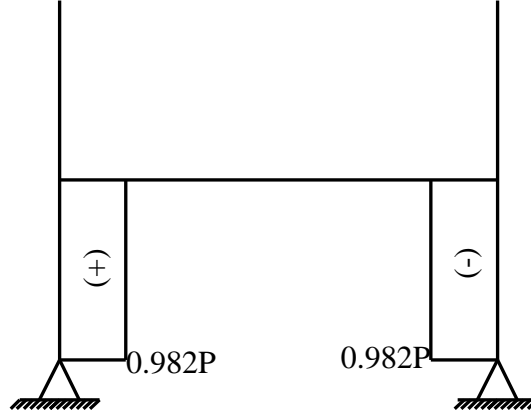
Deney elemanı, mafsal plakası ve bağlantı levhalarının tasarımı yapılarak deney düzeneğinin boyutlandırma aşaması tamamlanmıştır. Deney elemanının kesit tesirlerinin eşdeğer çerçeve yöntemine göre tayin edilmesi için öncelikle mesnet koşullarının idealleştirilmesi gerekmektedir. Yükleme kirişi ile başlıklar arasındaki üst mafsallar,

yüklemeye kirişinden gelen yükü sadece başlıklara aktarmaktadır. Yani, dönme hareketinin yanında yerdeğiştirme hareketi de yaparak yüklemeye kirişinden gelen herhangi bir  $P$  yükü her iki perde başlığına  $P/2$  olarak aktarılmış olmaktadır. Mafsalsal plakası ve bağlantı levhaları, başlık gövdesine rijit bağlantılı olması sebebiyle başlık yüksekliği analizler için pimler arası mesafe olarak dikkate alınmıştır. Bu sebeple, mafsal merkezine gelen  $P/2$  yükü, başlık merkezine etkilmiştir. Bağlantı kirişi ile başlık arasındaki alt mafsallar, yüklemeye sırasında sadece dönme hareketine serbestlik sağlaması sebebiyle bu bölge sabit mesnet olarak kabul edilmiştir. Eşdeğer çerçeve yöntemi ile çözüm için kullanılan idealleştirilmiş sistem Şekil 2.8'de verilmektedir.

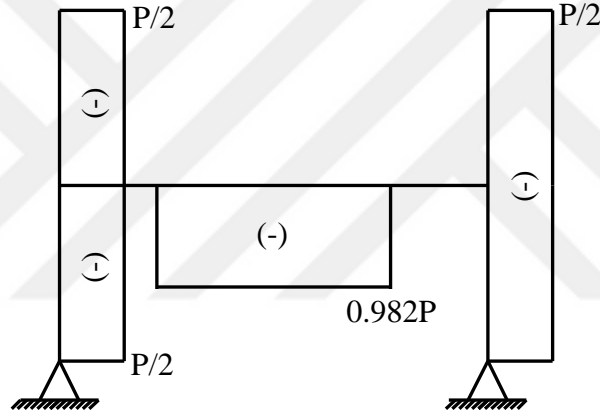


Şekil 2.8. İdealleştirilmiş deney düzeneği

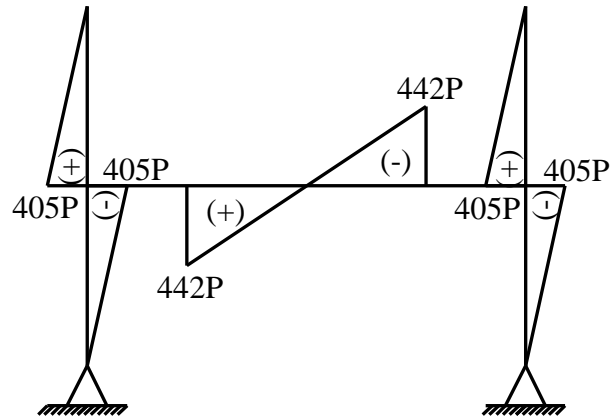
İdealleştirilmiş deney düzeneğinin eşdeğer çerçeve yöntemi ile analiz edilmesi sonucu başlıklar ve bağ kirişine gelene normal kuvvet ( $N$ ), kesme kuvveti ( $V$ ) ve moment ( $M$ ) kesit tesirleri belirlenmiştir. Normal kuvvet kesit tesiri diyagramı (Şekil 2.9a) incelendiğinde, normal kuvvetlerin sadece başlıkların alt bölgelerinde oluştuğu ve kirişlere gelen kesme kuvvetlerine tekabül ettiği görülmektedir. Şekil 2.9b'de kesme kuvvetlerinin başlık yüksekliği boyunca eşit olarak dağıldığı, kiriş uzunluğu boyunca kesme kuvvetlerinin sabit olduğu ve kirişlerin daha fazla kesme kuvveti aldığı görülmektedir. Bağ kirişlerinde moment sıfır bölgesinin kiriş ortasında olması ve maksimum momentlerin uç bölgelerde olması gerekmektedir. Moment dağılımı için gerekli koşulların sağlandığı açıkça görülmektedir (Şekil 2.9c).



a) Normal Kuvvet Tesir Diyagramı (N)



b) Kesme Kuvveti Tesir Diyagramı (T)



c) Moment Tesir Diyagramı (M)

Şekil 2.9. Denei elemanına ait tesir diyagramları



## 2.6. Geleneksel Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanının (CRCB) Tasarımı ve Üretimi

ACI 318-14 yönetmeliğine göre bağ kirişlerinin geleneksel donatılı olarak tasarlanabilmesi için açıklık/derinlik oranı ( $l_n/h_b$ ) $\geq 2$  olması ve kiriş tasarım kesme kuvvetinin ( $V_d$ )  $0.33\sqrt{f_{ck}}A_{cv}$  değerinden küçük veya eşit olması gerekmektedir. Bu sebeple, kesme donatılarının tasarımı için kesitlerde oluşacak kayma gerilmesi değeri  $0.33\sqrt{f'_{ck}}$  olarak dikkate alınmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan betonarme bağ kirişlerine ait deneysel çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için boyuna donatı oranı ve sargı donatısı oranı sabit tutulmaya çalışılmıştır. Literatür çalışmaları ve yönetmeliklere göre bağ kirişlerinde diyagonal donatı düzenlemesinin talep edilmesi sebebiyle, kullanılması gereken boyuna donatı miktarı ise diyagonal donatılı bağ kirişlerinin hesabına göre belirlenmiştir. (1.7) denklemine göre gerekli donatı alanının hesaplanabilmesi için diyagonal donatıların eğim açısının ( $\alpha$ ), diyagonal donatıların akma dayanımının ( $f_{yk}$ ) ve tasarım kesme dayanımının bilinmesi gerekmektedir. Beton tasarım dayanımı ( $f_{ck}$ ), 30 MPa olmak üzere, 200x450 enkesitine sahip bağ kirişi için tasarım kesme dayanımı 162 kN olarak dikkate alınmıştır. Diyagonal donatıların eğim açısı ( $\alpha$ ),

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{(h_b - 1.06h_x - 2c_c)}{l_n} \right] \quad (2.5)$$

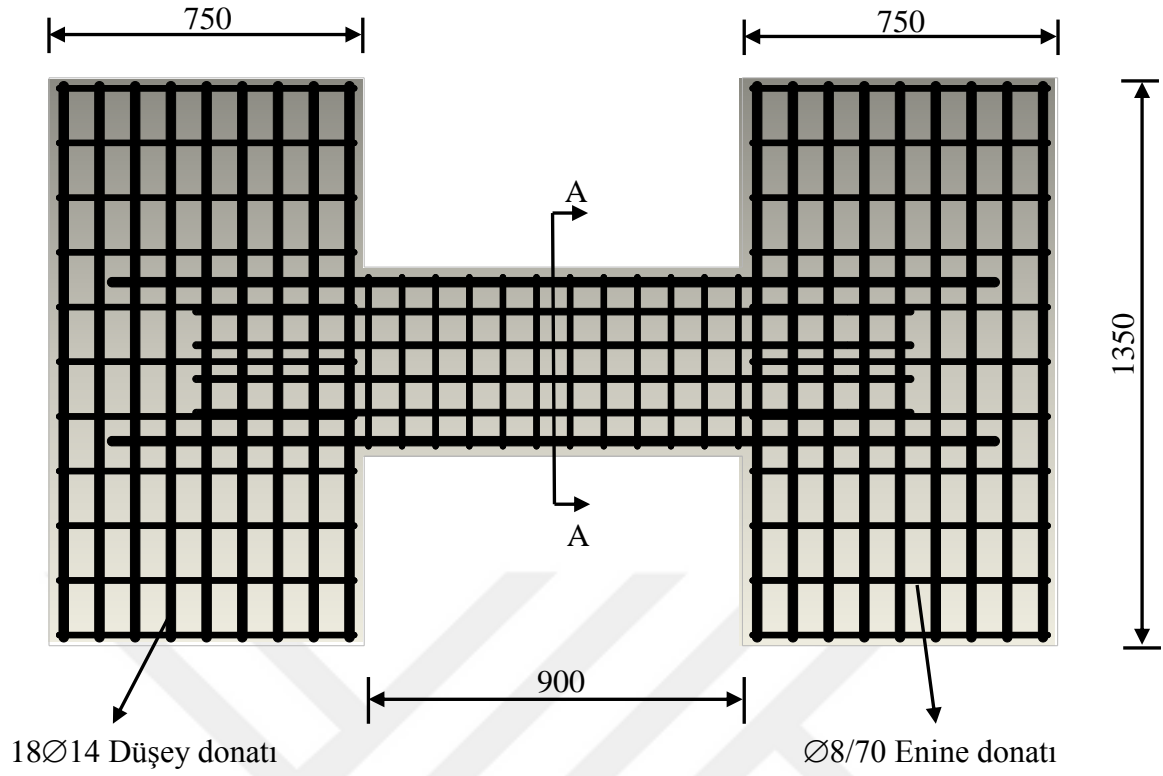
denkleminle hesaplanmaktadır (Fortney, 2005). Diyagonal donatı demetinin olması gereken minimum yükseklik ( $h_x$ ) ve minimum genişlik ( $b_x$ ) değeri Bölüm 1'de anlatılmıştır. Bu çerçevede  $h_x$  ve  $b_x$  değeri 100 mm olarak tercih edilmiştir.  $h$ ,  $h_x$ ,  $c_c$ , ve  $l_n$  sırasıyla, 450 mm, 100 mm, 20 mm, 900 mm olmak üzere diyagonal donatıların eğim açısı ( $\alpha$ ),  $18.66^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Deney elemanları için kullanılan donatı çeliklerinin minimum akma dayanımı ( $f_{yk}$ ),  $420 \text{ N/mm}^2$  olarak dikkate alınarak, (1.7) denkleminde ilgili değerler yerine konulduğunda kullanılması gereken diyagonal donatı miktarı  $602 \text{ mm}^2$  olarak bulunmuştur. Diyagonal donatı demetlerinde yönetmelik gereğince en az 4 adet donatı kullanılması gerekmektedir. Yönetmeliğe göre demet içerisinde yer alan donatı sayısı ve tasarım kesme dayanımına göre hesap edilen donatı miktarının sağlanabilmesi için donatı çapı 14 mm olarak tercih edilmiştir. Bu sebeple hem geleneksel donatılı hem de diyagonal donatılı bağ kirişlerinde 4 adet S420 kalitesinde 14 mm çapında nervürlü donatı

kullanılmıştır. Kullanılan donatı miktarı ve donatı eğim açısına bağlı olarak kesitin tasarım kesme kuvveti 166 kN olarak hesaplanmıştır.

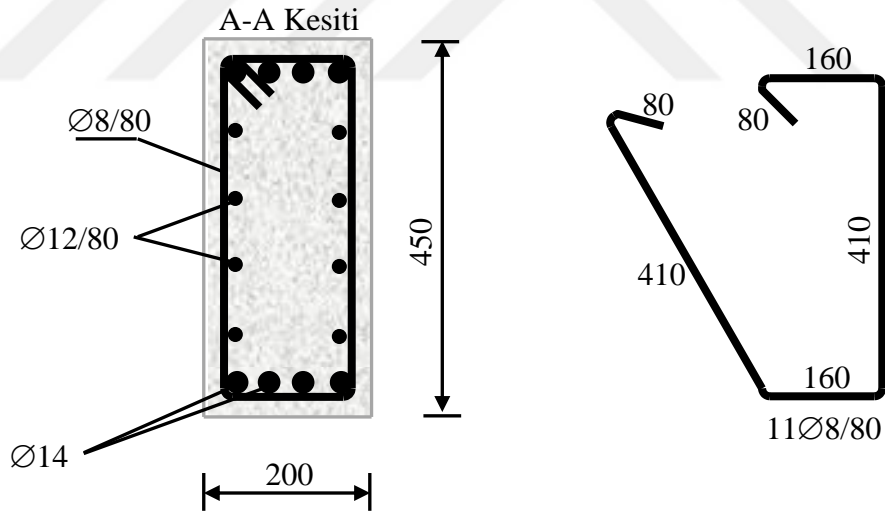
Bağ kirişlerinin kesme kuvvetlerinin daha fazla etkin olduğu elemanlar olması ve mesnet bölgelerinde moment oluşumu fazla olmasına karşın eğilmeye göre hesap edilen donatıların kirişteki uzama etkisi ile bu özelliklerini kaybetmesi sebebiyle bağ kirişlerinde eğilme donatısı hesabı yapılmamaktadır. Sadece kesme dayanımına göre tasarlanan diyagonal donatılı bağ kirişlerinde kiriş kesitine gelen kesme kuvvetleri, tamamen diyagonal donatılar tarafından karşılanmaktadır. Betonun ve sargı donatılarının kesme dayanımına olan katkısı ise ihmal edilmektedir.

Bu çalışmada kesitteki donatı miktarında değişiklik yapılmadan, farklı donatı düzenlerinin bağ kirişi davranışına etkisi araştırılmaktadır. Bu sebeple geleneksel donatılı bağ kirişlerinin alt ve üst bölgelerinde diyagonal donatılarda olduğu gibi 4 adet S420 kalitesinde 14 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Tasarımı yapılan kiriş kesitinin hesap edilen tasarım kesme kuvvetine bağlı tasarım momenti, (1.8) denklemine göre yaklaşık 75 kNm olarak hesap edilmiştir. Tasarımı yapılan geleneksel donatılı bağ kirişinin taşıma gücü momenti ise yaklaşık olarak 101 kNm olarak belirlenmiştir.

ACI 318-14 yönetmeliğine göre derin kirişler için önerilen minimum donatı koşulları ve sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi için önerilen minimum donatı koşulları dikkate alınarak seçilen kesit için gerekli olan gövde ve sargı donatıları hesaplanmıştır. Derin kirişlerde boyuna donatılara paralel olarak kullanılan gövde donatılarının çapı 12 mm olmak üzere, aralarındaki mesafenin ( $s_2$ ) boyuna donatı çapının en fazla 5 katı olmalıdır ve  $0.0025b_w s_2$  ile hesaplanan donatı miktarından az olmamalıdır. Bu sebeple gövde donatıları arası mesafe ( $s_2$ ) 80 mm olarak seçilmiştir. Boyuna donatılara dik kesme donatıları (etriye) arasındaki mesafenin de boyuna donatı çapının en fazla 5 katı olması gerekmektedir. Bu sebeple etriyeler arası mesafe ( $s$ ) 80 mm olarak seçilmiştir. Geleneksel donatılı bağ kirişi için kabul edilen tasarım kesme kuvveti dikkate alınarak 2.1, 2.2 ve 2.4 bağıntıları ile etriyeler arasında olması gereken minimum mesafe, 192 mm bulunmuştur. Yönetmelik koşulu sağlanamadığı için etriyeler arasındaki mesafe ( $s$ ), 80 mm olarak kabul edilmiştir. Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanına (CRCB) ait başlık ve kiriş donatılarının düzenlemesi Şekil 2.10'da verilmektedir.



a) Denei elemanı donatı düzenlemesi



b) Bağ kirişi enkesiti ve etriye açılımı

Şekil 2.10. Geleneksel donatılı bağ kirişi (CRCB) donatı detayı

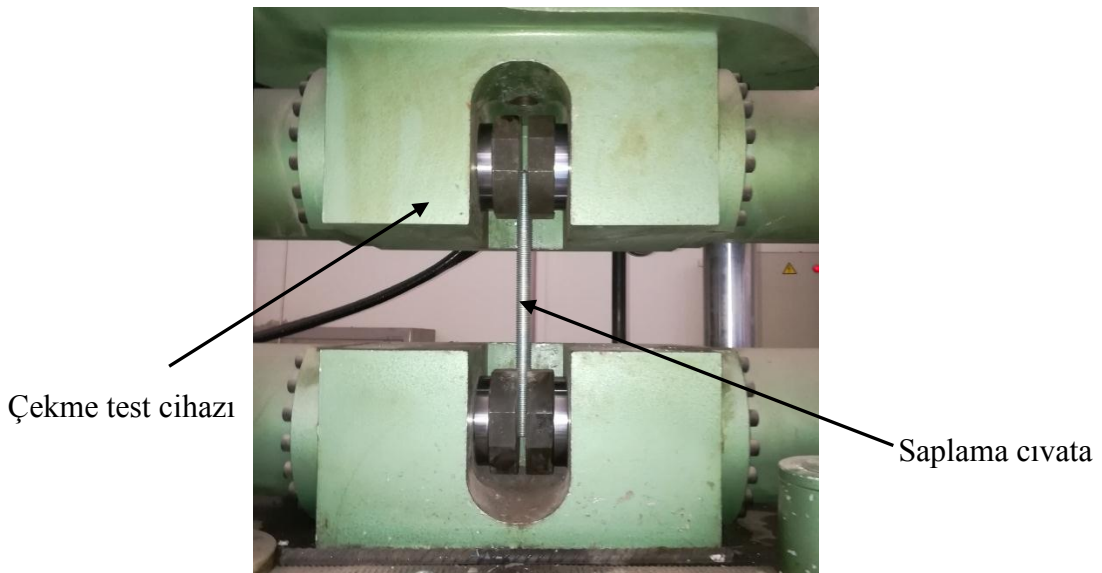
Bu çalışmaya ait denei elemanlarının başlıklarında kullanılan saplamaların denei ortamındaki gerçek dayanımını tespit etmek için Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında çelik çekme deneyi yapılmıştır (Şekil 2.11). Çekme deneyi

sonucu akma gerilmesi yaklaşık  $450 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. Saplama cıvataya ait çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.12’de sunulmaktadır.

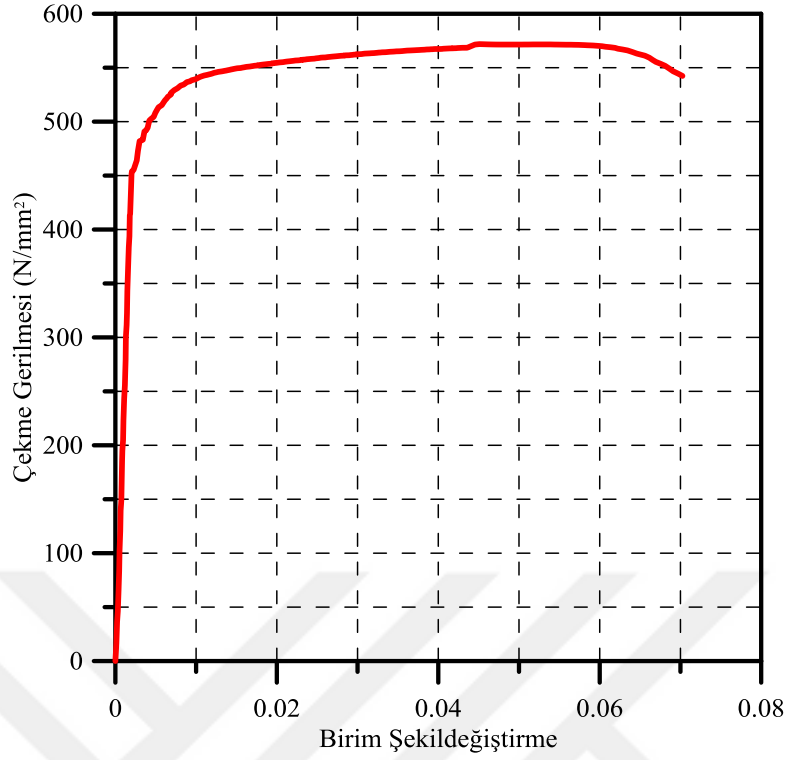
Saplamaların deney öncesi ve deney sonrası görünüşleri ise Şekil 2.13’te verilmektedir. Cıvatalar için akma gerilmesi üzerinden makaslama emniyet gerilmesi AISC 306-16’ya göre  $0.6\sigma_y$  olarak tanımlanmaktadır. Buna göre bir saplamanın akmaya göre emniyetle taşıyabileceği maksimum çekme yükü (diş dibi alanına göre  $(0.86d)$ ) yaklaşık  $120 \text{ kN}$ , maksimum kesme yükü yaklaşık  $72 \text{ kN}$  olarak hesaplanmıştır. Fakat AISC 306-16’ya göre aynı anda kesme ve çekme yüküne maruz cıvatalar için,

$$1.3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{F_{nv}} f_{rv} \leq F_{nt} \quad (2.6)$$

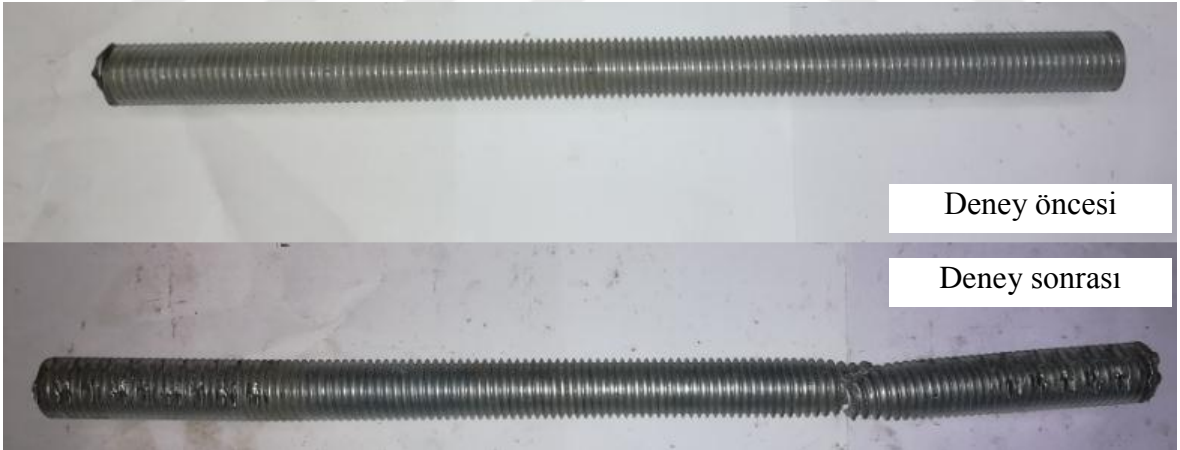
bağıntısı önerilmektedir. Burada,  $F_{nt}$ ,  $F_{nv}$  ve  $f_{rv}$  sırasıyla, cıvatanın çekme gerilmesi dayanımı, cıvatanın kesme gerilmesi dayanımı ve yük altında cıvata oluşmuş gerilmedir. 2.6 bağıntısında akma dayanımı dikkate alınarak, kullanılan saplamanın aksel çekme altında alabileceği maksimum gerilme değeri yaklaşık  $80 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır. Bağlantı levhaları için 18 adet  $20 \text{ mm}$  çapında saplama kullanılmıştır. Her bir saplamanın eşit kesme yüküne maruz kaldığı dikkate alınır, bir başlığın taşıyabileceği maksimum kesme yükü (diş dibi alanı dikkate alınarak)  $390 \text{ kN}$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.11. Paslanmaz saplama cıvatanın çekme deneyi



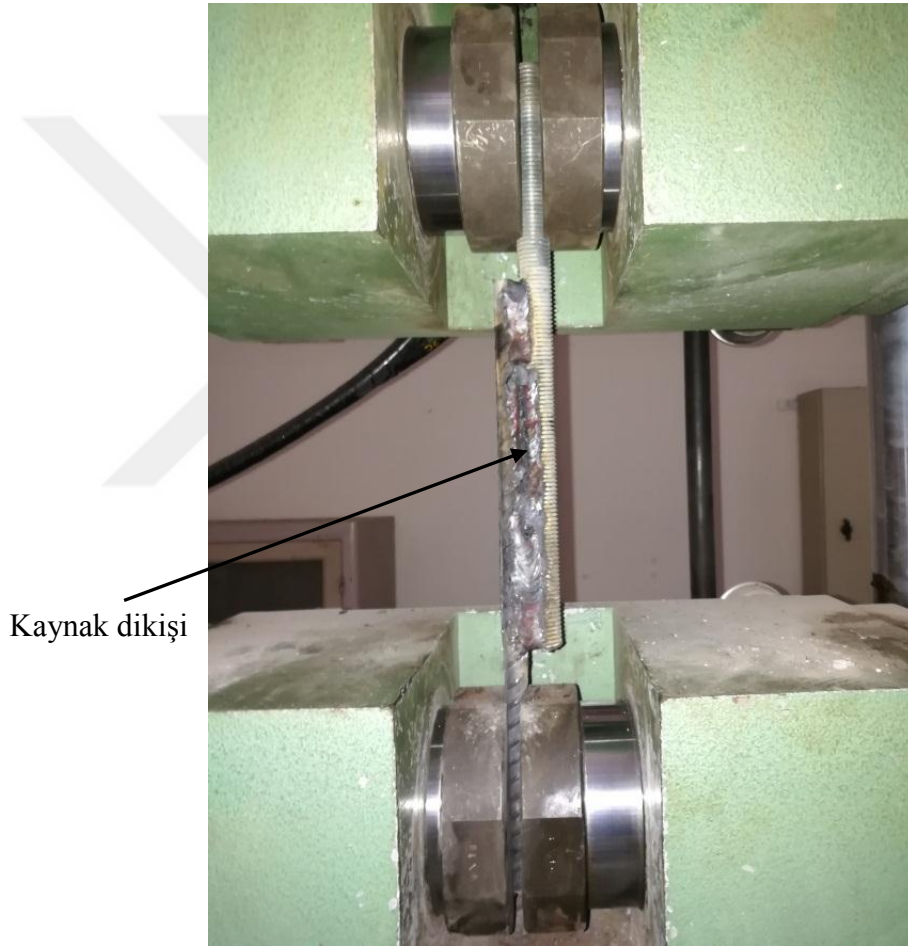
Şekil 2.12. Paslanmaz saplama cıvataya ait çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafiği



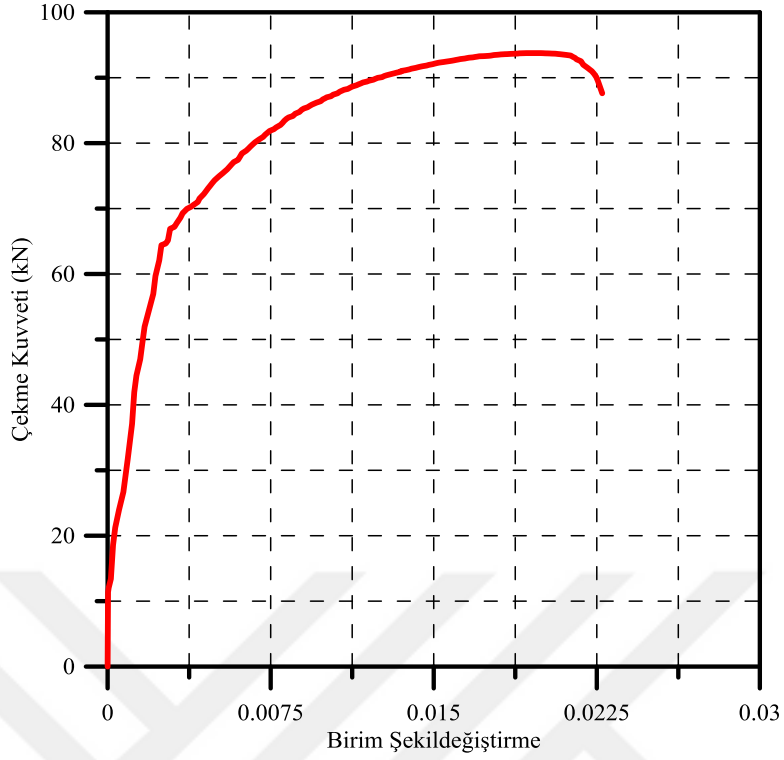
Şekil 2.13. Çekme deneyine tabi tutulan saplama cıvatanın deney öncesi ve deney sonrası görünümü

Başlık içerisinde kullanılan 14 mm çapındaki boyuna donatılar ve 20 mm çapındaki saplamlar arasında çekilen kaynak dikişlerinin dayanımını belirlemek için çekme test aletine uygun olarak cıvata birleşimli boyunda donatı üretilmiş ve çekme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 2.14). Çekme deneyi sonucu elde edilen kuvvet-birim şekildeğiştirme

grafiği Şekil 2.15'te verilmektedir. Bu Őekilden görüldüğü üzere eksenel çekme altındaki elastik sınır dayanımı yaklaşık 65 kN olarak belirlenmiştir. Cıvata birleşimli boyuna donatıların ucundaki saplamaların yaklaşık 250 mm'lik kısmının (kaynaklı bölge dahil) beton içerisinde kalması sebebiyle eksenel çekme altında beton-cıvata aderans kuvveti de devreye gireceği için tercih edilen bu birleşimin deney sonuçlarına etki etmeyeceği görülmektedir. Cıvata birleşimli boyuna donatının eksenel çekme testi öncesi ve sonrası görünümü Şekil 2.16'da sunulmaktadır.



Şekil 2.14. Eksenel ekme etkisindeki cıvata birleşimli boyuna donatılarda kaynak dikişinin dayanımının test edilmesi



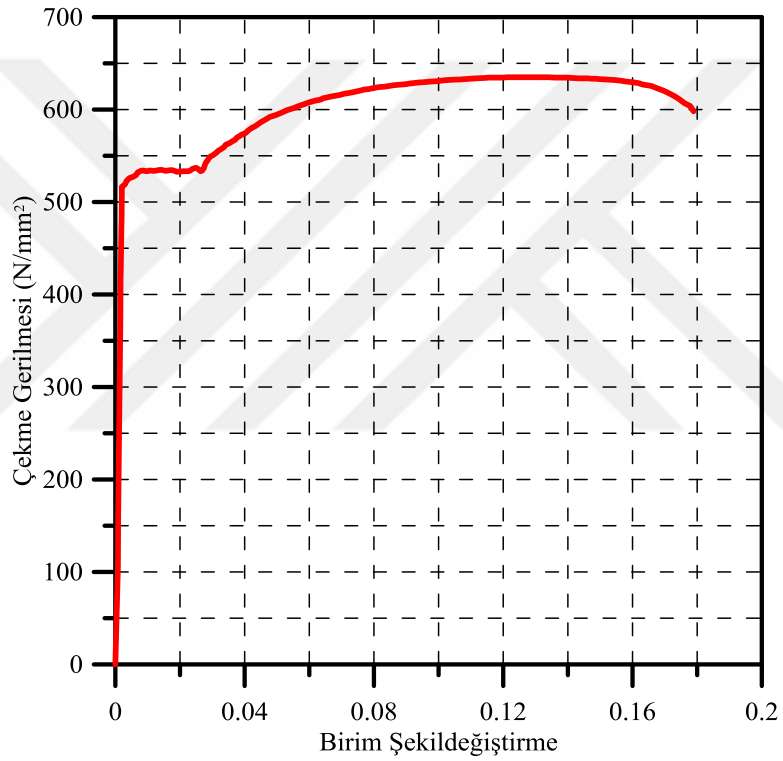
Şekil 2.15. Kaynaklı birleşime ait eksenel çekme kuvveti-birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 2.16. Cıvata birleşimli boyuna donatıların eksenel çekme testi öncesi ve sonrası görünümü

Deney elemanlarının betonarme tasarımlarında kullanılan çelik donatıların hem gerçek dayanımını hem de kaynak sonrası meydana gelen dayanım kaybını tespit edebilmek için, çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 8 mm çapındaki donatı çeliğine ait çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme oranı grafiği, Şekil 2.17’de verilmektedir. S420 kalitesindeki 8 mm çaplı donatı çeliğinin akma gerilmesi,  $516 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. 8 mm çapındaki donatı çeliğinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü Şekil 2.18’de

verilmektedir. 12 mm çapındaki donatı çeliğine ait çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme oranı grafiği Şekil 2.19’da verilmektedir. S420 kalitesindeki 12 mm çaplı donatı çeliğinin akma gerilmesi, 478 N/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. 12 mm çapındaki donatı çeliğinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü Şekil 2.20’de verilmektedir. 14 mm çapındaki donatı çeliğine ait çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme oranı grafiği ise Şekil 2.21’de verilmektedir. S420 kalitesindeki 14 mm çaplı donatı çeliğinin akma gerilmesi 469 N/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. 14 mm çapındaki donatı çeliğinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü Şekil 2.22’de verilmektedir.

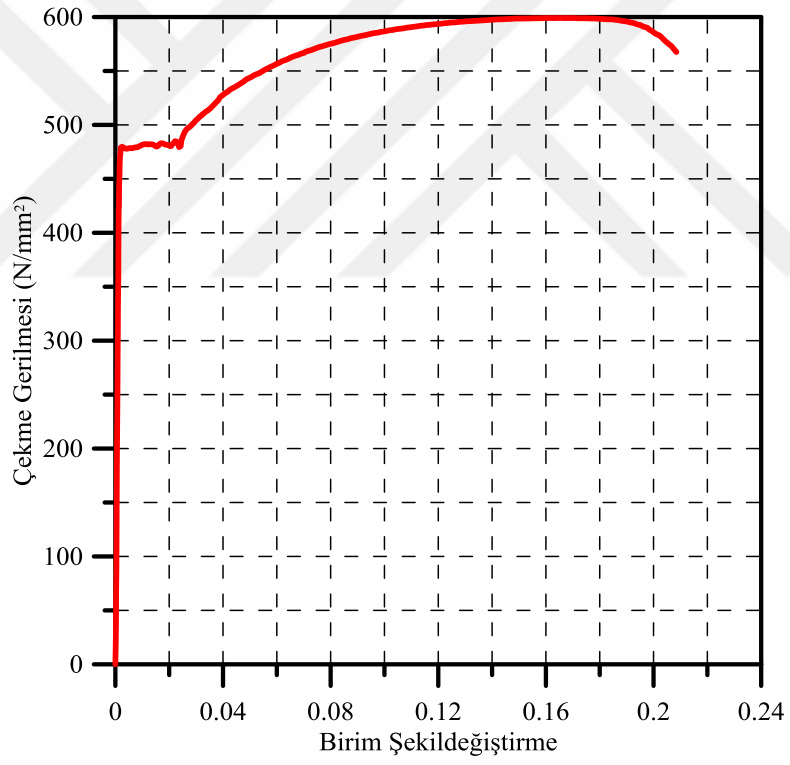


Şekil 2.17. 8 mm çapındaki donatı çeliğinin çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafiği





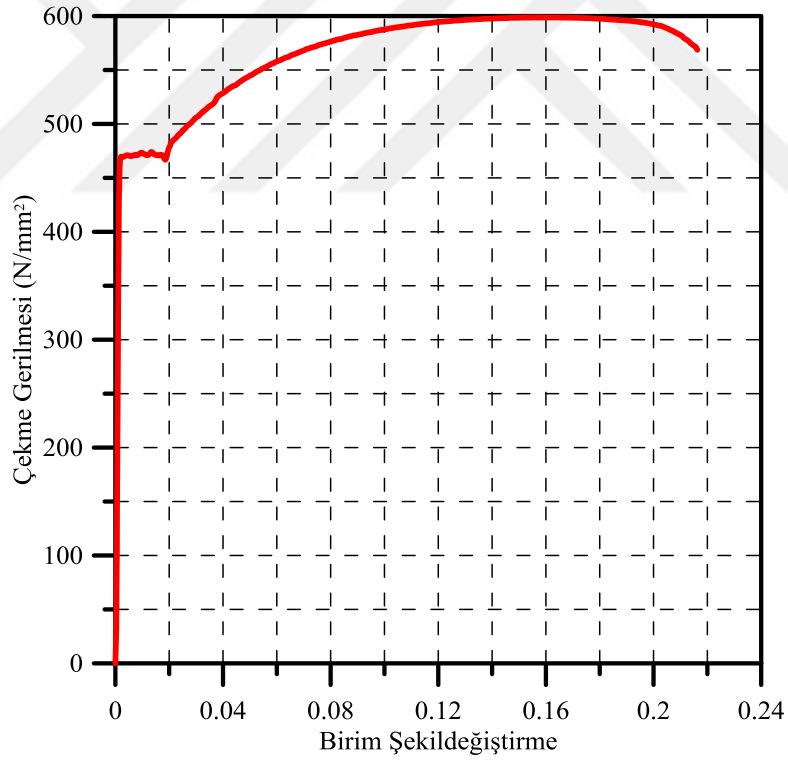
Şekil 2.18. 8 mm çapındaki donatı çeliğinin aksenal çekme testi öncesi ve sonrası görünümü



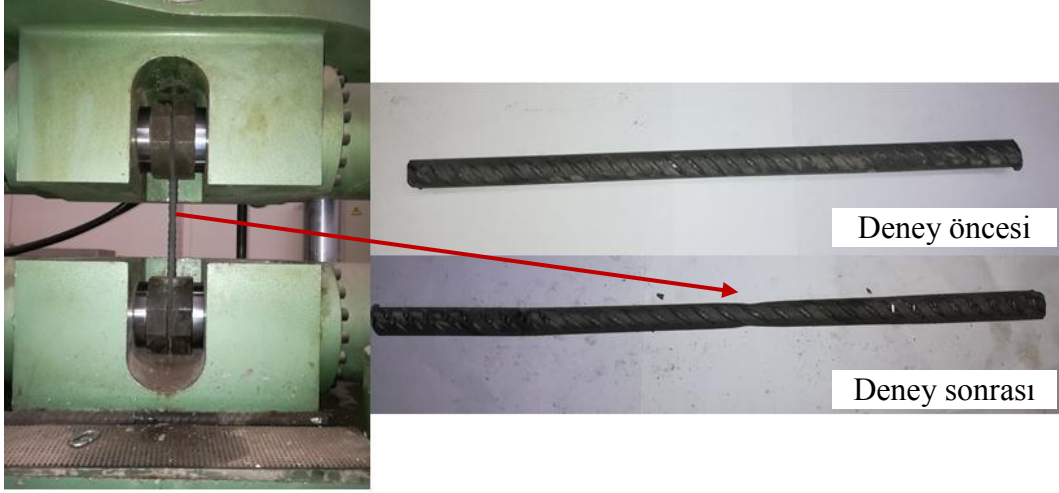
Şekil 2.19. 12 mm çapındaki donatı çeliğinin çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafiği



Şekil 2.20. 12 mm çapındaki donatı çeliğinin aksenal çekme testi öncesi ve sonrası görünümü



Şekil 2.21. 14 mm çapındaki donatı çeliğinin çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 2.22. 14 mm çapındaki donatı çeliğinin aksel çekme testi öncesi ve sonrası görünümü

Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının imalatı için öncelikle geleneksel donatılı bağ kirişinin donatıları (asal donatı, gövde donatısı ve etriye) geleneksel donatılı bağ kirişi donatı detayına göre (bkz. Şekil 2.10) bağlanarak perde başlıklarına yerleştirilmeye hazır hale getirilmiştir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Geleneksel donatılı bağ kirişine ait donatı düzenlemesi

Başlık alt boyuna donatıları (eleman üretimi yatay yapılmaktadır) yerleştirildikten sonra kesme donatıları başlık boyunca alt boyuna donatılara bağlanmış ve daha önceden hazırlanan geleneksel donatılı bağ kirişi yerine oturtulmuştur. Daha sonra başlıklardaki üst sıra cıvata birleşimli boyuna donatılar başlıklardan geçirilerek somunlar vasıtasıyla sabitlenmiştir. Alt boyuna donatılarının yerleştirilmesiyle bağlanan kesme donatıları, üst

boyuna donatıları saracak şekilde düzenlenerek geleneksel donatılı bağ kirişli elemanın donatı düzenlemesi Şekil 2.24’te verilmiştir.



Şekil 2.24. Geleneksel donatılı bağ kirişli deney elemanı donatı düzenlemesi

Deney süresince geleneksel donatılı bağ kirişlerinin asal (boyuna) donatılarında meydana gelecek şekildeğişirmeleri tespit etmek üzere kullanılacak olan birim şekildeğişirme ölçerleri (strain-gauges) yerleştirmek için alt ve üst asal donatılarda yüzeydeki pürüzler zımpara taşı yardımıyla giderilmiştir.

Donatı yüzeyi düzeltme işlemi, muhtemel hasar bölgesi olarak düşünülen kiriş-perde birleşim bölgesinin yaklaşık 5 cm uzağına uygulanmıştır. Her iki birleşim bölgesi için alt ve üst asal donatılar arasında toplam 4 donatı, şekildeğişirme ölçer yerleştirmeye hazır hale getirilmiştir. Çelik donatılar için uygun olarak imal edilen birim şekildeğişirme ölçerler hızlı yapıştırıcı vasıtasıyla temizlenen donatı yüzeylerine yerleştirilmiştir. Birim şekildeğişirme ölçerler, betonun prizini almasına kadar geçen sürede betondaki sudan etkilenmemesi için su geçirmez bant yardımıyla kuşatılmıştır (Şekil 2.25).

Donatı yerleştirilmesi öncesinde kalıp yağlandığı için başka bir işleme gerek duyulmadan deney elemanının yan kalıpları tamamlanmış ve beton dökümüne hazır hale getirilmiştir. Deney elemanına, beton santralinden temin edilen C25/30 dayanım sınıfında beton dökülmüştür ve dalgıç tipi vibratör yardımıyla sıkıştırılmıştır.



Şekil 2.25. Asal donatılara yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerlerin su geçirmez bant ile sarılması

Beton dökümü aşamasında 3 silindir ve 3 küp olmak üzere 6 adet numune alınmıştır (Şekil 2.26). Dökülen betonu uygun kür koşullarında muhafaza etmek için deney elemanı, prizini aldıktan hemen sonra telis bezleri ile sarılarak 28 gün 24 saat boyunca ıslak kalması sağlanmıştır (Şekil 2.27).

28 günlük kür koşulları altında bekletilen beton numunelerine yüzey düzgünlüğü sağlamak için kükürt başlıklar yapılmıştır. Kullanılan betonun basınç yük-şekildeğiştirme diyagramını elde etmek için bir silindir numunenin yüzeyi zımpara taşı ile temizlenerek bir adet birim şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 2.28). Kükürt başlıkları yapılan numuneler, basınç deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneye göre numunelerden elde edilen dayanım sonuçları, Tablo 2.3'te sunulmaktadır.



Şekil 2.26. Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı beton numuneleri



Şekil 2.27. Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının telis bezi ile muhafaza edilmesi



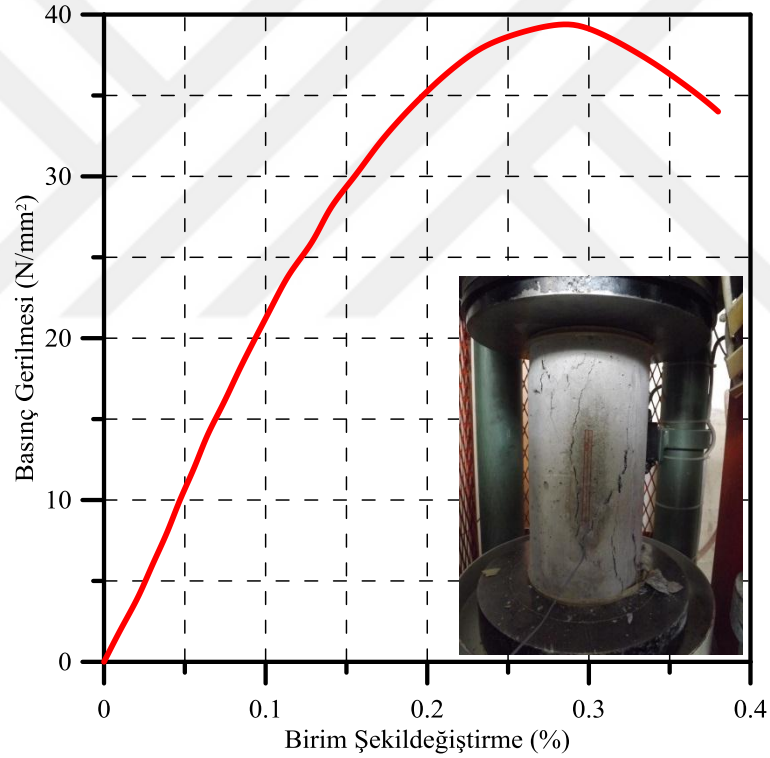
Şekil 2.28. Standart silindir numuneye kükürt başlık yapılması ve şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmesi

Tablo 2.3. Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları

Numune	Nihai Dayanım (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Standart Küp-1	44.83	45.96
Standart Küp-2	47.14	
Standart Küp-3	45.91	
Standart Silindir-1	38.42	39.91
Standart Silindir-2	41.24	
Standart Silindir-3 (Referans)	39.77	

Bu tablodan görüldüğü gibi, küp numunelerin ortalama basınç dayanımı 45.96 MPa olarak elde edilmiştir. Standart silindir numunelerin ortalama basınç dayanımı ise 39.91 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca küp numunelerin standart sapması 1.16 MPa ve silindir numunelerin standart sapması 1.41 MPa olarak hesap edilmiştir. Standart referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.29'da verilmektedir.

28 günlük beton bakımı sonrasında, kalıp üzerinde yatay olarak bekleyen geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı, vinç yardımıyla bağlantı plakalarından kaldırılarak, saplamalar ile rijit döşemeye ankre edilmiş ve bağlantı kirişi üzerindeki yerine yerleştirilmiştir. Yatay yükleme sırasında meydana gelebilecek yanal hareketleri önlemek için yanal stabilite ayakları yerlerine oturtulmuştur.

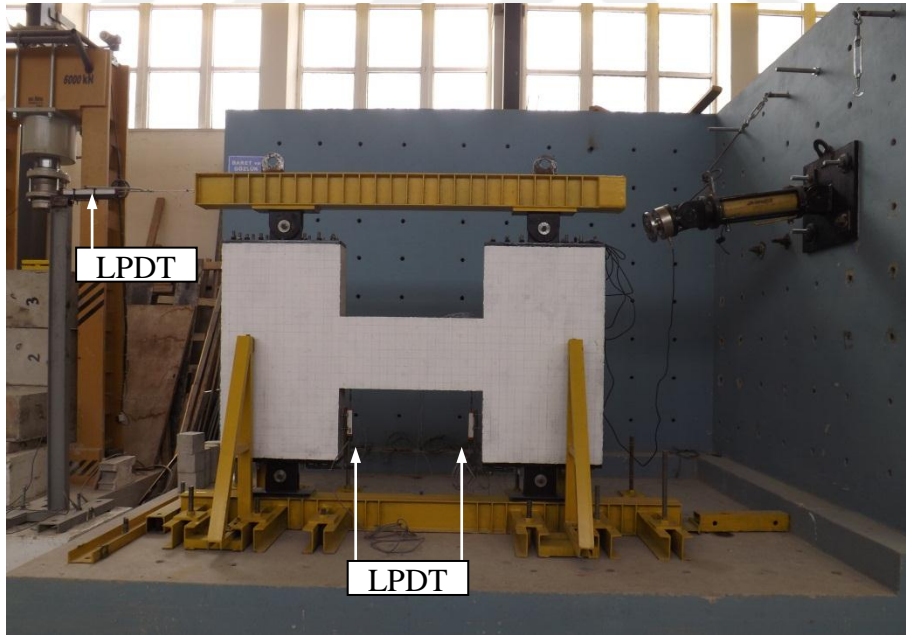


Şekil 2.29. Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği

Yükleme sırasında deney elemanı üzerinde meydana gelecek mikro çatlakları daha kolay görebilmek için elemanın ön yüzü beyaz badana ile boyanmıştır. Hasar alanını görmek ve kolayca belirlemek için tüm eleman 50 mm kenarlara sahip karelere bölünmüştür.

Bu çalışmaya konu olan farklı tip bağ kirişlerinin davranışlarını ortaya koymak ve aralarındaki farkları karşılaştırmak için farklı hasar modlarının yanında farklı noktalardan yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmelerin elde edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple, yapılacak yatay yükleme sırasında yatay yerdeğiştirme miktarını ölçmek için yükleme kirişi ekseninde 1 adet yatay yerdeğiştirme ölçer (LPDT), yatay yükleme sırasında bağ kirişi perde duvar arasında meydana gelebilecek kayma yerdeğiştirmesini (sliding-shear displacement) ölçmek için her iki birleşim bölgesine 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer olmak üzere 3 adet yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır (Şekil 2.30).

Farklı donatı düzenlerine sahip bağ kirişleri ve tahterevalli tipi bağ kirişleri arasındaki davranış farklılıklarını ortaya koyabilmek için 3 ayrı bölgede birim şekildeğiştirme ölçer (strain-gauge) kullanılmıştır. Bu amaçla bağ kirişinin orta bölgesine yatay ve düşey olmak üzere 2 adet, bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesine alt ve üst bölgeye yatay 2 adet ve perde duvar orta bölgesine yatay ve düşey olmak üzere 2 adet birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır (Şekil 2.31).



Şekil 2.30. Yatay ve düşey yerdeğiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi

Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü Şekil 2.32’de sunulmaktadır. Burada, 1000 kN itme ve 750 kN çekme kapasiteli pistonun itme ve çekme hareketi hidrolik el pompası yardımıyla sağlanmaktadır. Hidrolik piston tarafından sağlanan itme ve çekme kuvvetleri pistonun ön kısmında yer alan mafsala



bağlı 1000 kN yük hücresi (load-cell) tarafından okunarak bilgisayara aktarılmaktadır. Deney elemanı üzerinde boyuna donatılar için kullanılan 4 adet birim şekil değiştirme ölçerin, beton için kullanılan 6 adet birim şekil değiştirme ölçerin, kiriş uç bölgelerindeki düşey yerdeğitirmeler için kullanılan 2 adet LPDT'nin ve sistemin yatay yerdeğitirmesi için kullanılan 1 adet LPDT'nin pistonun itme ve çekme kuvvetine bağlı ölçtükleri veriler bilgisayarda toplanmıştır. Deney süresince beton yüzeyinde oluşan çatlakların gözlemlendiği andaki yük değerleri ve çatlakların ilerleyişi boyalı beton yüzeyinde yükleme boyunca sürekli olarak not edilmiştir.



Şekil 2.31. Birim şekil değiştirme ölçerlerin beton yüzeyine yerleştirilmesi



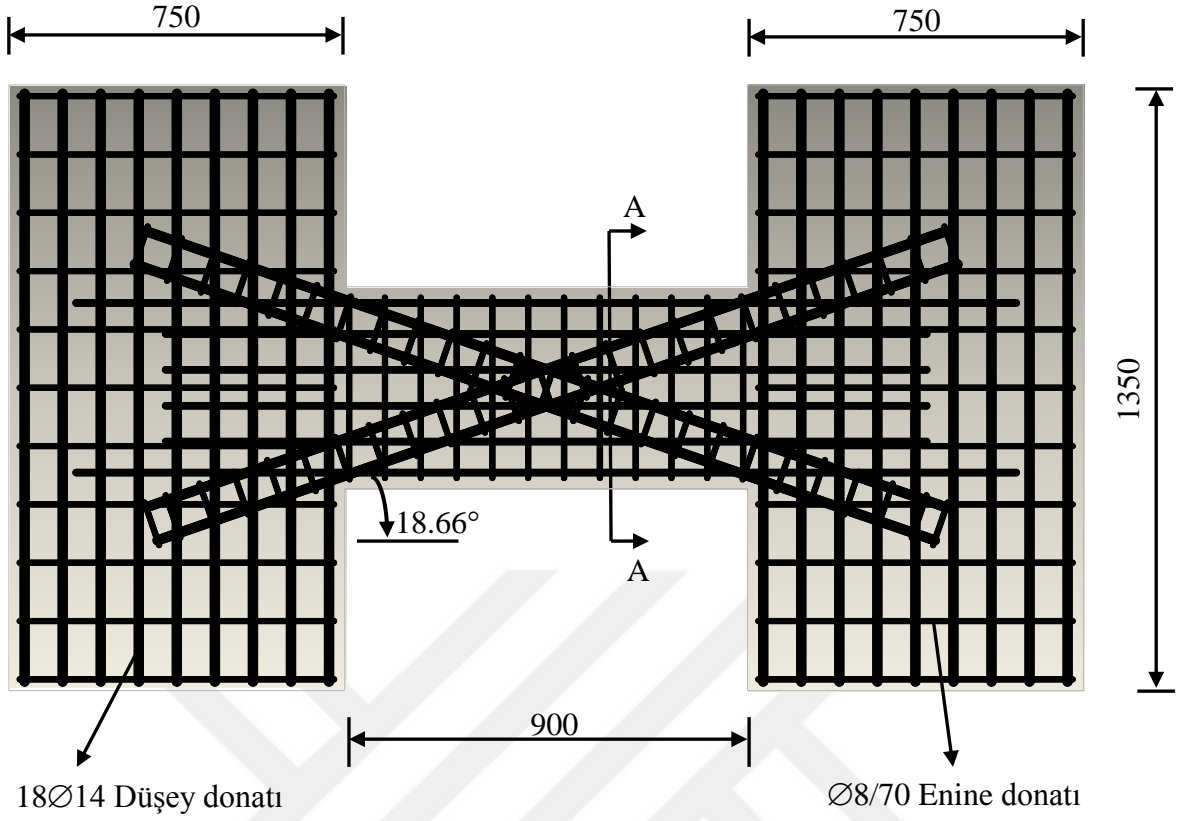
Şekil 2.32. Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü

## 2.7. Sargılı Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanının (DRCB) Tasarımı ve Üretimi

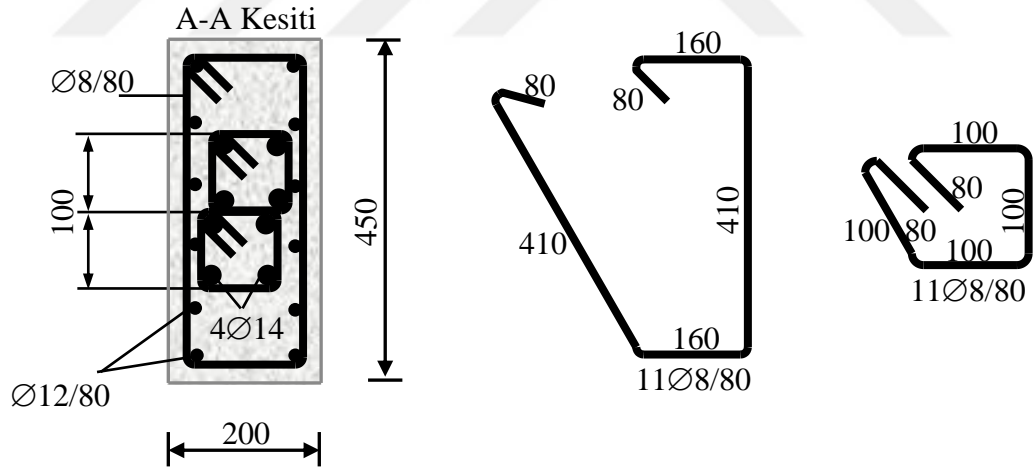
Yönetmelikteki diyagonal donatı koşullarını sağlaması sebebiyle sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanın gövdesi boyunca kullanılan sargı donatısı, geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının gövdesi boyunca kullanılan sargı donatısıyla aynı oranda tutulmuştur. Buna göre bağ kirişi gövdesi boyunca kullanılan sargı donatılarının çapı 8 mm ve sargı donatıları arasındaki mesafe 80 mm olarak dikkate alınmıştır. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanına (DRCB) ait başlık ve kiriş donatılarının düzenlemesi Şekil 2.33'te verilmektedir.

Deneysel çalışmaların başlangıcında, deney elemanlarının başlıklarında cıvata birleşimli nervürlü donatıların kullanılması kararlaştırılmış ve geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının üretimi sırasında bu donatılar kullanılmıştır. Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının deney aşamasında bu donatılardan kaynaklı herhangi bir hasara ve beklenenin dışında başlıklara bağlı hasarlara rastlanmamıştır. Fakat cıvata birleşimli nervürlü donatı için yapılan çekme deneylerinde, S420 kalitesindeki nervürlü donatıların kaynak etkisiyle sertleştiği ve dayanımını bir miktar kaybederek kopmanın kaynak dikişi yerine nervürlü donatıda meydana geldiği gözlemlenmiştir. Laboratuvar ortamında saplama cıvata ile nervürlü donatı arasında istenildiği gibi kaynak dikişinin oluşturulamaması ve kaynak işlemlerinin çok uzun sürmesi sebebiyle kullanılan nervürlü donatılara dış açılarak saplama kullanımının önüne geçilmiştir.

Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının imalatı için öncelikle diyagonal donatı demetleri uygun ölçülerde hazırlanan etriyeler ile bağlanarak 18.66°'lik açıyı sağlayacak şekilde birbiri içerisinden geçirilmiş ve kiriş gövdesine yerleştirilmeye hazır hale getirilmiştir. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi donatı detayı dikkate alınarak kiriş gövdesinde kullanılan etriyeler ve gövde donatıları, hazırlanan diyagonal donatı demetlerini saracak şekilde yerleştirilip sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi gövdesi oluşturulmuştur. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişine ait hazırlanan donatıların perde başlıklarına yerleştirilmeden önceki hali Şekil 2.34'te verilmektedir.



a) Deneysel eleman donatı düzenlemesi



b) Bağ kirişi enkesiti ve etriye açılımları

Şekil 2.33. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi (DRCB) donatı detayı



Şekil 2.34. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişine ait donatı düzenlemesi

Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı donatı montajı yapıldıktan sonra diyagonal donatılara birim şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Beton dökümü öncesi sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının görüntüsü Şekil 2.35’te verilmektedir.



Şekil 2.35. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı kalıp işlerinin tamamlanması

Elemanların üretimi için gerekli olan beton, geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanında da olduğu gibi temin edilmiş ve dökülmüştür. Bu deney elemanından da 3 silindir ve 9 küp numune alınmıştır. Deney elemanı, dökülen betonu uygun kür koşullarında muhafaza etmek için beton prizini aldıktan hemen sonra geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanında olduğu gibi telis bezleri ile sarılarak arzu edilen dayanıma ulaşana kadar ıslak kalması sağlanmıştır. Alınan beton numuneleri, beton prizini aldıktan hemen sonra kalıplarından çıkarılarak kür havuzunda beklemeye alınmıştır.

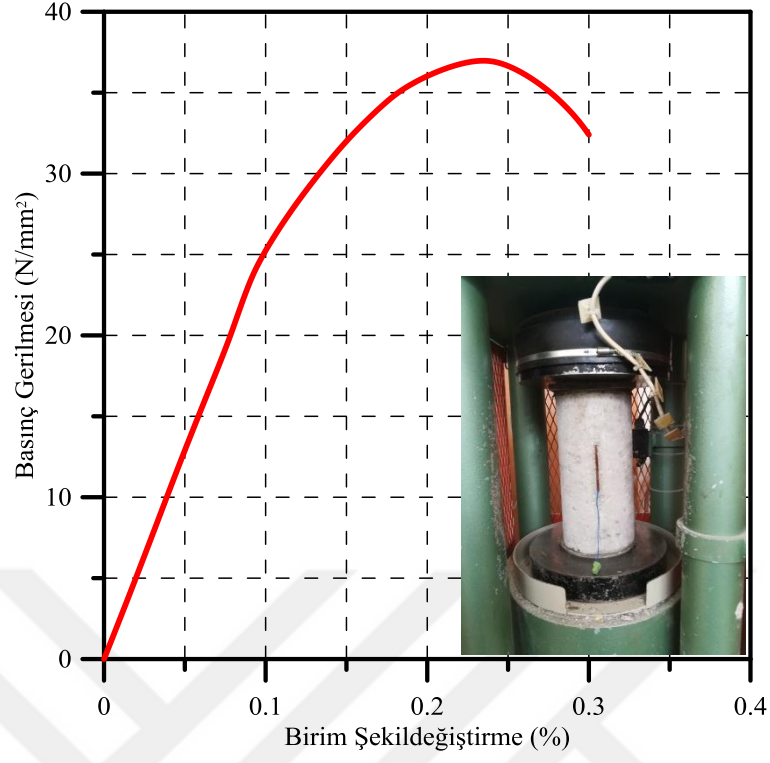
Deney elemanı üretimi aşamasında alınan numunelerin ortalama basınç dayanımları Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları

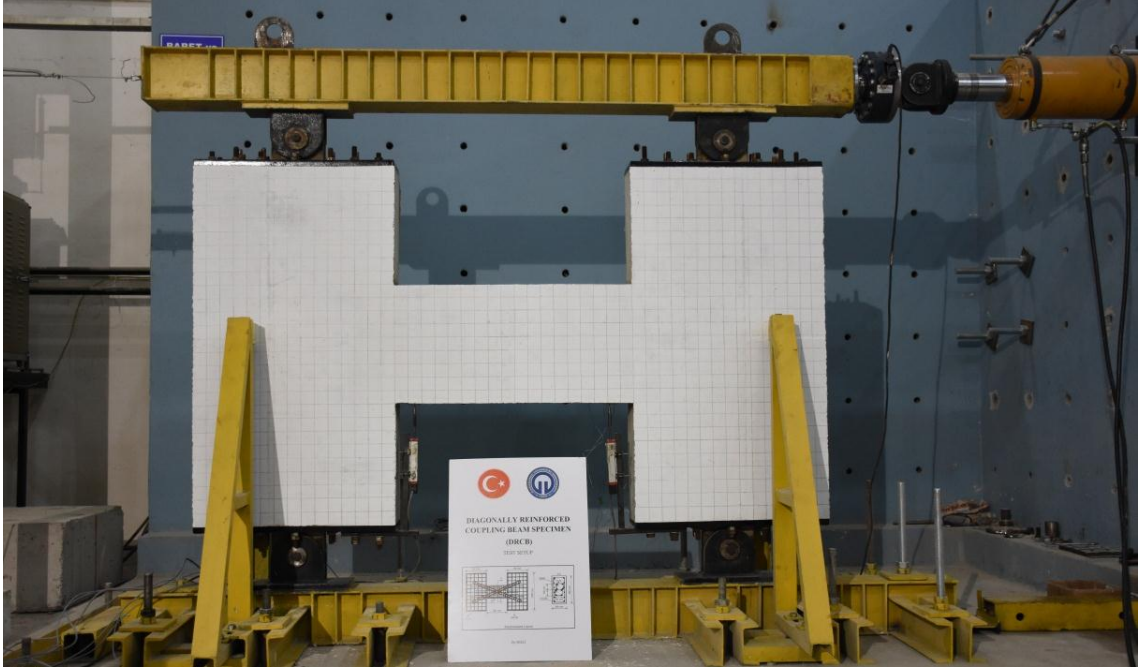
Numune	Nihai Dayanım (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Standart Küp-1	45.00	45.96
Standart Küp-2	46.66	
Standart Küp-3	44.21	
Standart Küp-4	45.97	
Standart Küp-5	45.10	
Standart Küp-6	43.98	
Standart Silindir-1	34.67	39.91
Standart Silindir-2	33.21	
Standart Silindir-3 (Referans)	36.95	

Bu tablodan görüldüğü gibi, küp numunelerin ortalama basınç dayanımı 45.15 MPa ve standart silindir numunelerin ortalama basınç dayanımı 34.94 MPa olarak elde edilmiştir. Küp numunelerin standart sapması 1.02 MPa ve silindir numunelerin standart sapması 1.88 MPa olarak hesap edilmiştir. Betonun gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.36'da verilmiştir.

Deney elemanının deney düzeneğine montajı, CRCB deney elemanında olduğu gibi yapılmıştır. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü Şekil 2.37'de sunulmaktadır.



Şekil 2.36. Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği



Şekil 2.37. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü

## 2.8. Sargısız Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanının (DRCB-FC) Tasarımı ve Üretimi

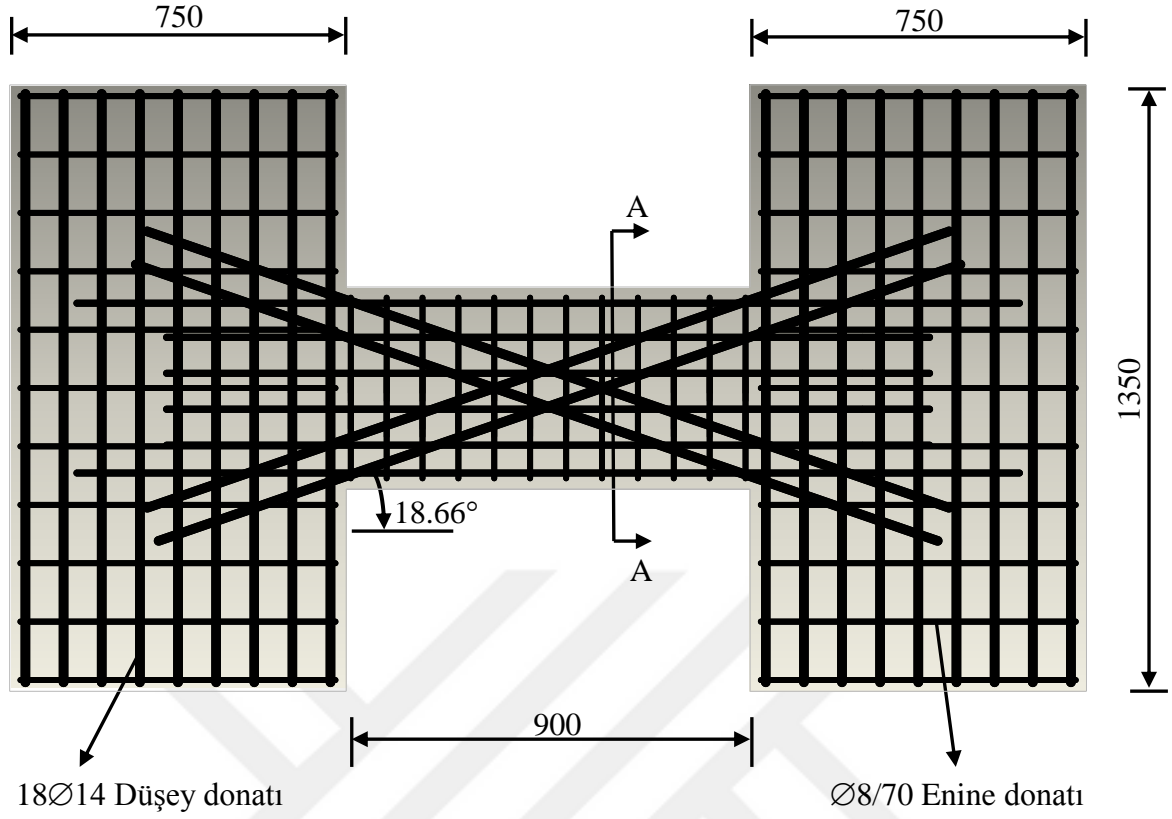
Çalışmanın 1. bölümünde de ifade edildiği gibi ilk defa ACI 318-08 yönetmeliğinde, sargılı diyagonal donatılı bağ kirişlerine alternatif olarak sargısız diyagonal donatılı bağ kirişleri önerilmiştir. Bu donatı düzenlemesinin sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi donatı düzenlemesinden farkı ise diyagonal donatılarda kullanılan sargı donatıları yerine kiriş kesitinin bütün açıklık boyunca yatay ve düşey enine donatılarla güçlendirilmesidir.

Yönetmelikteki diyagonal donatı koşullarını sağlaması sebebiyle sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının gövdesinde kullanılan sargı donatıları, geleneksel ve sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanın gövdesi boyunca kullanılan sargı donatısıyla aynı oranda tutulmuştur. Buna göre bağ kirişi gövdesi boyunca kullanılan sargı donatılarının çapı 8 mm ve sargı donatıları arasındaki mesafe 80 mm olarak dikkate alınmıştır.

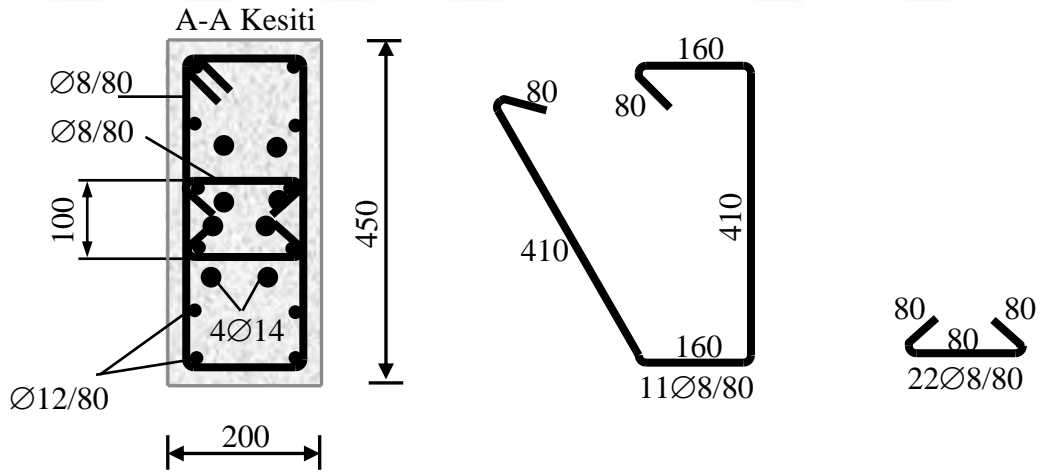
şekil 1.59b'de gösterilen donatı koşulları dikkate alınarak açıklık boyunca kiriş kesitinde kullanılan yatay ve düşey enine donatıların (çiroz) miktarı ve konumu belirlenmiştir. Dikkate alınan kesit için yatayda minimum 2 adet enine donatı kullanılması gerekirken düşeyde enine donatı gerekmemektedir. Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanına (DRCB-FC) ait başlık ve kiriş donatılarının düzenlemesi şekil 2.38'de detaylı olarak sunulmaktadır.

Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının imalatı için öncelikle diyagonal donatı demetleri üretilmiştir. Bunun için sargılı diyagonal donatılı elemandaki donatı demeti dış ölçülerini sağlayacak şekilde sargılı diyagonal donatılı elemanda kullanılan sargı donatıları şablon olarak kullanılmıştır. Hazırlanan donatı demetleri 18.66°'lik açıyı sağlayacak şekilde birbiri içerisinden geçirilmiş ve kiriş gövdesine yerleştirilmeye hazır hale getirilmiştir.

şekil 2.38'de verilen sargısız diyagonal donatılı bağ kirişine ait donatı detayı dikkate alınarak kiriş gövdesinde kullanılan etriyeler ve gövde donatıları, hazırlanan diyagonal donatı demetlerini saracak şekilde yerleştirilip sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi gövdesi oluşturulmuştur. ACI 318-14 yönetmeliği dikkate alınarak gövde boyunca kullanılması gereken çirozlar yerleştirilip, kaynak puntoları ile gövde donatılarına tutturulmuştur. Yönetmelik gereğince tasarımı yapılan sargısız diyagonal donatılı bağ kirişinin montajının tamamlanmış görünümü şekil 2.39'da verilmektedir.



a) Deneç elemanı donatı düzenlemesi



b) Bağ kirişi enkesiti ve etriye açılımları

Şekil 2.38. Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi (DRCB-FC) donatı detayı





Şekil 2.39. Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişine ait donatı düzenlemesi

Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişinin donatı montajından sonra başlık donatılarının montajı yapılarak donatı işleri tamamlanmıştır. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişinde olduğu gibi diyagonal donatıların birim uzama oranlarını tespit edebilmek için alt ve üst diyagonal donatılara toplam 2 adet birim şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Donatı montajı tamamlandıktan sonra deney elemanın kalıp işleri tamamlanarak beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (Şekil 2.40).

Bu deney elemanına da, önceki elemanlarda olduğu gibi beton dökülerek sıkıştırılmış ve beton dökümü sonrasında küre tabii tutulmuştur. Beton dökümü sırasında, 3 silindir ve 9 küp numune alınmıştır. Dökülen betonu uygun kür koşullarında muhafaza etmek için prizini aldıktan hemen sonra deney elemanı, telis bezleri ile sarılarak arzu edilen dayanıma ulaşana kadar ıslak kalması sağlanmıştır. Alınan beton numuneleri, beton prizini aldıktan hemen sonra kalıplarından çıkarılarak kür odasındaki kür havuzunda beklemeye alınmıştır.

28 günlük kür koşulları altında bekletilen beton numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Numunelerin sonuçları Tablo 2.5'te sunulmaktadır.

Standart küp numunelerin ortalama basınç dayanımı 36.67 MPa olarak elde edilmiştir. Standart silindir numunelerin ortalama basınç dayanımı ise 33.93 MPa olarak elde edilmiştir. Küp numunelerin standart sapması 0.86 MPa ve silindir numunelerin standart sapması 1.38 MPa olarak hesap edilmiştir. Standart Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği ise Şekil 2.41'de sunulmaktadır. 28 günlük beton bakımı sonrasında kalıp üzerinde yatay olarak bekleyen sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı, diğer deney elemanlarında olduğu gibi, deney düzeneğine

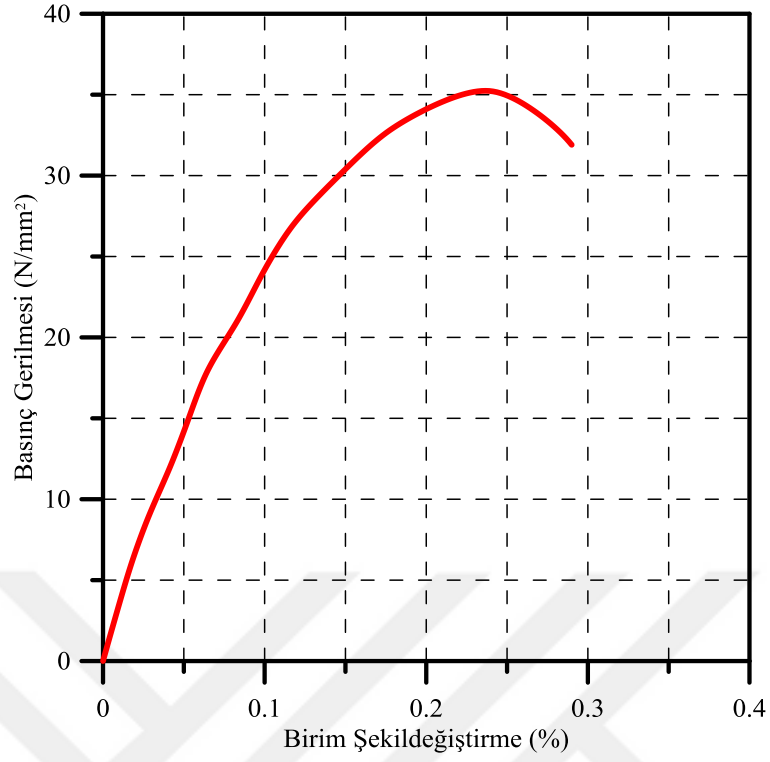
bağlanmıştır. Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü Şekil 2.42’de verilmektedir.



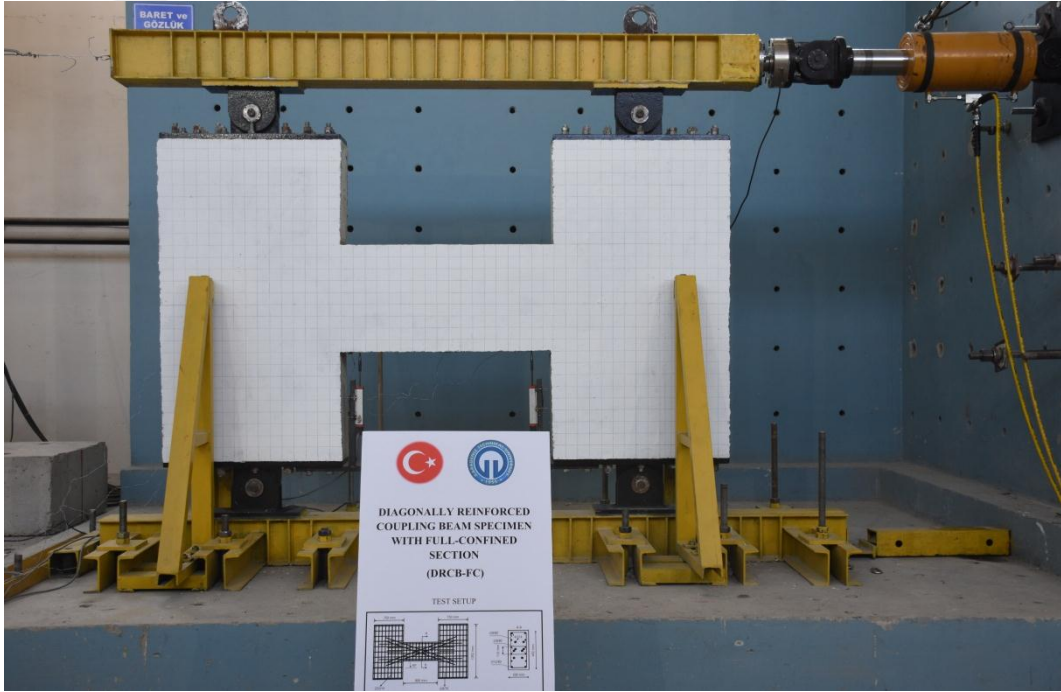
Şekil 2.40. Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının beton dökümü öncesi son hali

Tablo 2.5. Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları

Numune	Nihai Dayanım (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Standart Küp-1	36.76	36.67
Standart Küp-2	35.52	
Standart Küp-3	36.78	
Standart Küp-4	37.60	
Standart Silindir-1	32.47	33.93
Standart Silindir-2	34.11	
Standart Silindir-3 (Referans)	35.22	



Şekil 2.41. Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği



Şekil 2.42. Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü

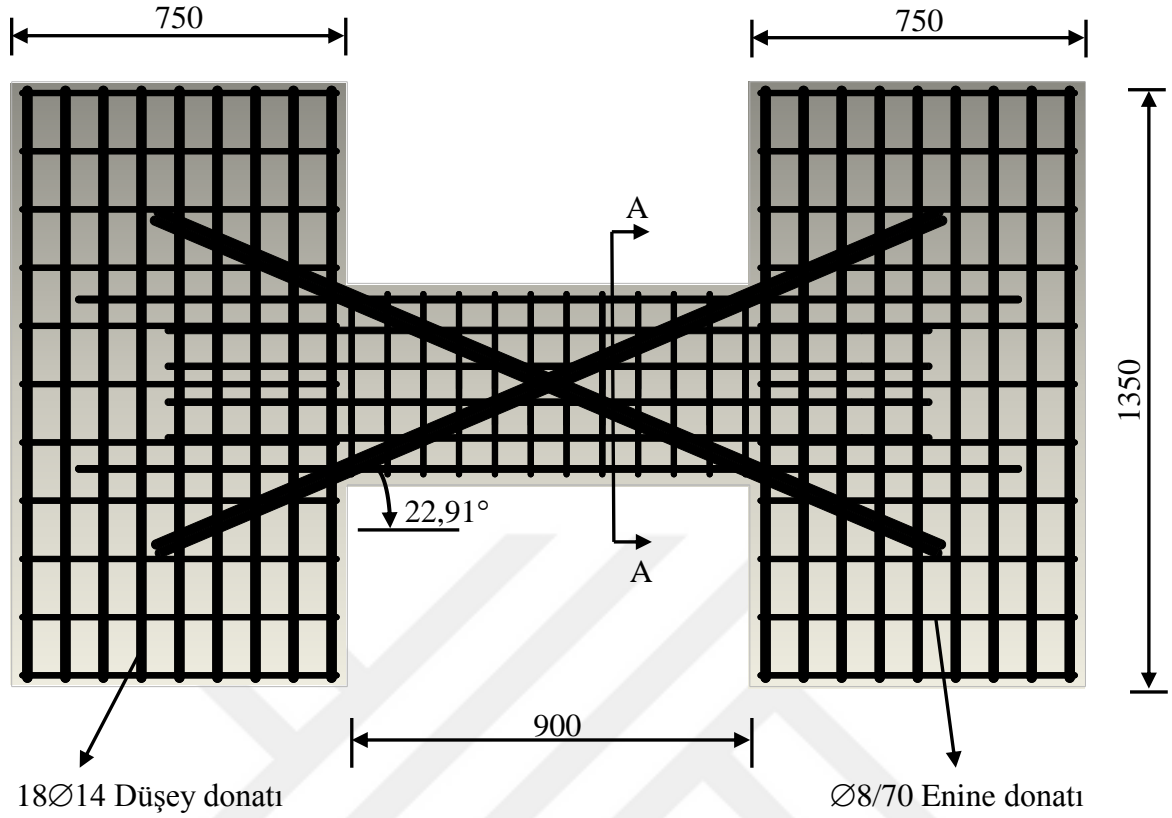
## 2.9. Demet Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanının (BDRCB) Tasarımı ve Üretimi

Kiriş gövdesinde minimum donatı koşulları dikkate alınsa bile diyagonal donatılar, kiriş orta bölgesinde kesişmekte ve yoğun donatı alanı oluşturmaktadır. Kesitteki diyagonal donatı miktarı arttıkça kesişim bölgesindeki yoğunluk daha da artmaktadır. Bu durum diyagonal donatı imalatındaki işçilik maliyetinin artmasının yanında bağ kirişi betonunun yerleşimini de zorlaştırmaktadır. Ayrıca, açıklık/derinlik oranı 2'den fazla olması durumunda diyagonal donatıların açısının azalması sebebiyle, diyagonal donatıların bağ kirişi kesme dayanımı üzerindeki etkisi de azalmaktadır. Kiriş kesitindeki diyagonal donatı demetinin eğim açısının artırılabilmesi için diyagonal donatı demetlerinin yüksekliğinin azaltılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, hem bağ kirişlerindeki diyagonal donatıların eğim açısının değişiminin dayanım üzerindeki etkisini araştırmak hem de yönetmelik koşullarında tasarlanan bağ kirişlerinin işçilik maliyetini azaltmak için yeni donatı düzeninin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu sebeple, ilk defa Han vd. (2015) tarafından üzerinde çalışılan demet diyagonal donatılı bağ kirişinin etkinliği araştırma kapsamına alınmıştır.

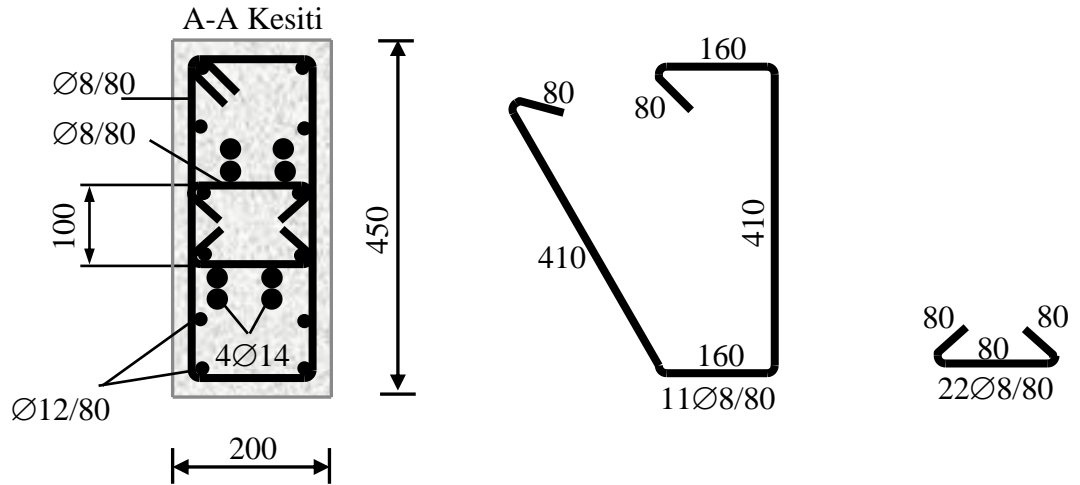
Donatı demeti yüksekliği ( $h_x$ ), sargılı ve sargısız diyagonal donatılı bağ kirişleri için 100 mm olarak kabul edilmiştir. Demet diyagonal donatılı bağ kirişinde diyagonal donatılar, bir demet içerisinde yer alan alt ve üst donatılar birleştirilerek oluşturulmaktadır. Her bir diyagonal donatının çapı 14 mm olmak üzere, demet diyagonal donatıların demet yüksekliği 28 mm olmaktadır. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı için donatı demeti yüksekliği 28 mm olarak dikkate alınıp (2.5) bağıntısında yerine konduğunda, donatı demeti eğim açısı ( $\alpha$ ),  $22.91^\circ$  olarak hesaplanmıştır.

Bu deney elemanı için sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının gövdesindeki sargı, gövde ve enine donatılarla aynı miktarda donatı kullanılmıştır. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanına (BDRCB) ait başlık ve kiriş donatılarının düzenlenmesi Şekil 2.43'te verilmektedir.

Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı ve sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı beraber üretilmiştir. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının imalatı için öncelikle uygun ölçülerde hazırlanan 14 mm çapındaki donatılar çiftler halinde bağ teli ile birleştirilmiştir.



a) Denev elemanı donatı düzenlemesi



b) Bağ kirişi enkesiti ve etriye açılımları

Şekil 2.43. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi (BDRCB) donatı detayı

Denev elemanının kesit koşullarına göre hazırlanan demet donatılar,  $22.91^\circ$ lik açıyı sağlayacak şekilde birbiri içerisinden geçirilmiş ve kirişi gövdesine yerleştirilmeye hazır

hale getirilmiştir. Şekil 2.43'te verilen demet diyagonal donatılı bağ kirişine ait donatı detayı dikkate alınarak kiriş gövdesinde kullanılan etriyeler ve gövde donatıları, hazırlanan diyagonal donatı demetlerini saracak şekilde yerleştirilip demet diyagonal donatılı bağ kirişi gövdesi oluşturulmuştur. Yönetmelik gereğince tasarımı yapılan demet diyagonal donatılı bağ kirişinin montajının tamamlanmış görünümü Şekil 2.44'te verilmektedir.

Demet diyagonal donatılı bağ kirişi donatı montajından sonra başlık donatılarının montajı yapılarak donatı işleri tamamlanmıştır. Donatı montajı tamamlandıktan sonra deney elemanın kalıp işleri tamamlanarak beton dökümüne hazır hale getirilmiştir. Şekil 2.43'e göre donatı montajı yapılan demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının beton dökümü öncesi son hali Şekil 2.45'te verilmektedir.



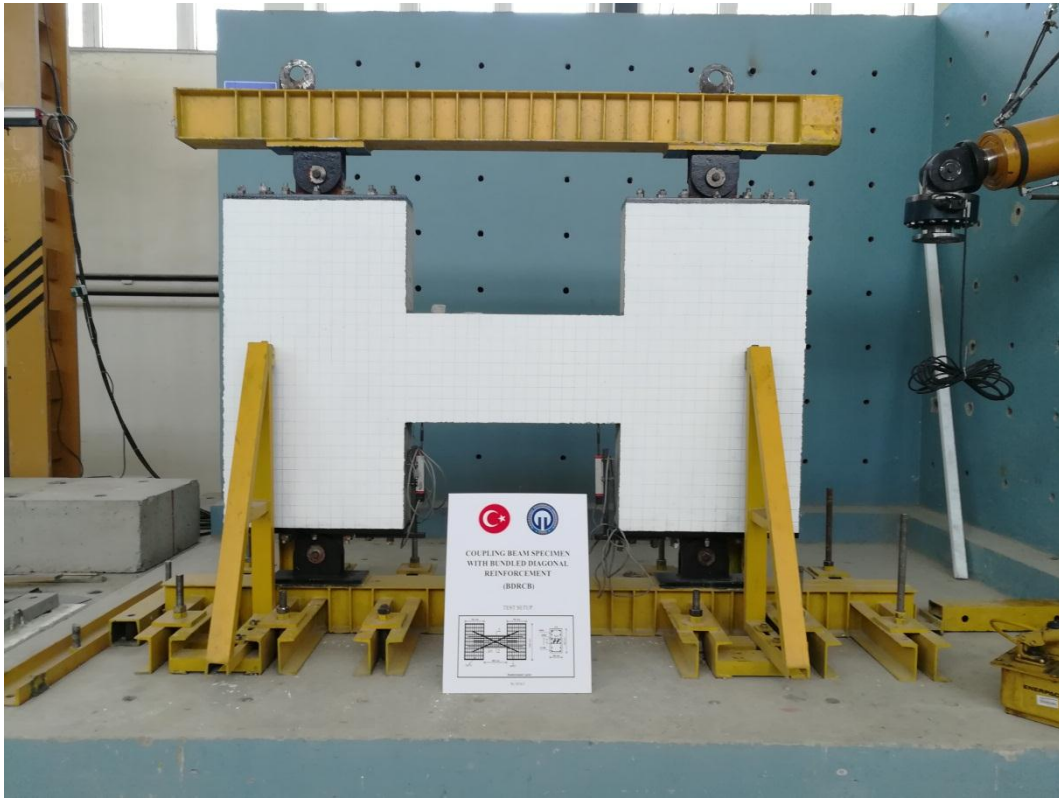
Şekil 2.44. Demet diyagonal donatılı bağ kirişine ait donatı düzenlemesi



Şekil 2.45. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının beton dökümü öncesi son hali

Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elamanı, sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı ile beraber üretildiği için beton dökümleri de aynı anda yapılmıştır. Bu deney elemanı, sargısız diyagonal deney elemanı ile birlikte dökülmesi sebebiyle, betondan alınan numunelerin dayanımları Tablo 2.5'te verilmiştir.

Deney elemanı, diğer deney elemanlarında olduğu gibi deney düzeneğine monte edilmiştir. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü Şekil 2.46'da verilmektedir.



Şekil 2.46. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü

## 2.10. Hasır Donatılı (19° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanının (MRCB-19) Tasarımı ve Üretimi

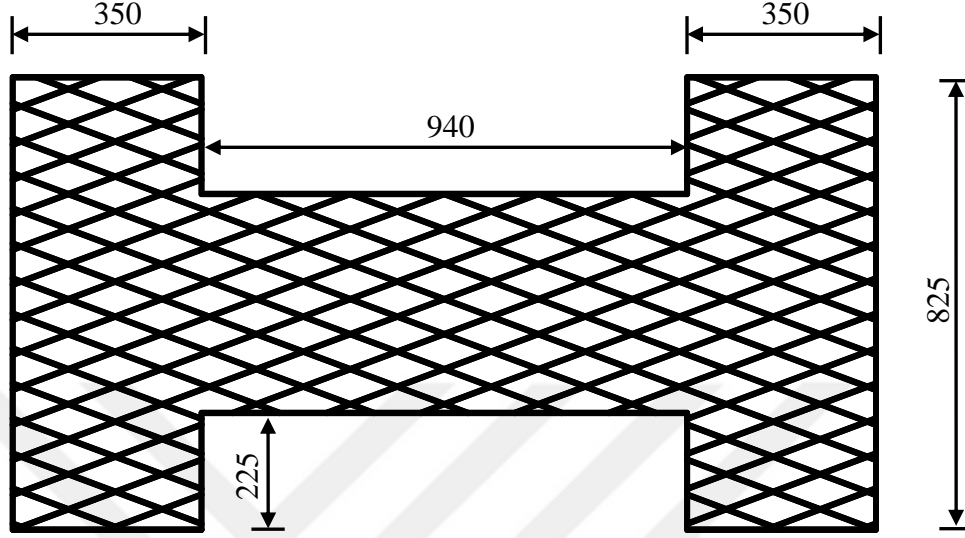
Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanında olduğu gibi diyagonal çekme ve diyagonal basınç etkisini karşılayacak olan diyagonal donatıların açısı değeri yükseldikçe bağ kirişinin kesme dayanımı artmaktadır. Demet diyagonal donatılı bağ kirişlerinde açısı değerinin yaklaşık 4-5° artırılması deney elemanı dayanımını artırsa bile diyagonal donatılı bağ kirişi imalatındaki işçilik maliyetine çözüm sağlayamamaktadır. Çekme ve basınç diyagonallerinin birbiri içerisinden geçirilmesi ve diyagonallerin kiriş orta bölgesinde çakışarak donatı yoğunluğu oluşturmasının önüne geçilememektedir. Bu sebeple, hem diyagonal donatıların açısının artırılmasını sağlayacak hem de donatıların kiriş boyunca düzenli dağılmasını sağlayarak belirli bölgelerdeki donatı yoğunlaşmasını azaltacak donatı düzeninin oluşturulması gerekmektedir. Bu çerçevede, diyagonal donatı düzeni yerine aynı açısı ve donatı oranını sağlayacak olan hasır donatıların bağ kirişi davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Hasır donatılar, her iki doğrultuda belirli açılarla düzenlenen donatılardan oluşan donatı ağlarıdır. Hasır donatıları oluşturan donatılar, isteğe bağlı olarak belirli çaplara sahip nervürlü donatılar ile belirli aralıklarda düzenlenebilmektedir. Bu sebeple, açıklık/derinlik oranı 2'den büyük bağ kirişlerinde diyagonal donatıların etkinliğini artırmak ve donatı yoğunluğunu azaltmak için diyagonal donatılar yerine hasır donatılar tercih edilmiştir.

Hasır donatılar, 8 mm çapında nervürlü donatılardan imal edilmesi durumunda, diyagonal donatı demetinde kullanılan 14 mm çapındaki her bir nervürlü donatı yerine en az 3 adet 8 mm çapında donatı kullanılması gerekmektedir. Her bir diyagonal donatı demetinde toplam 4'er adet 14 mm çapında nervürlü donatı bulunduğu için en az 12 adet 8 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Hasır donatılar, belirli eğimdeki donatıların birleşimi ile oluşturulması durumunda hasır donatının her bir yaprağı aynı miktar çekme ve basınç donatısına sahip olmaktadır. Bu sebeple, kirişin herhangi bir bölgesinden alınan kesitinde 18.66° eğiminde 6 adet 8 mm çapında nervürlü donatının yer alabilmesi için iki yaprak hasır kullanılmıştır. Diyagonal donatı miktarı ve açısına göre oluşturulan hasır donatılara, başlık içerisinden yeterli kenetlenmeyi sağlayacak ve başlık üzerindeki hasır gelişimine katkı sağlayacak biçimde başlık donatıları da eklenerek uygun hasır yaprak



tasarlanmıştır. Bağ kirişi deney elemanı için tasarlanan hasır yaprağın görünümü Şekil 2.47’de verilmektedir.



Şekil 2.47. Hasır donatılı (19° açılı) deney elemanı için tasarlanan hasır yaprak

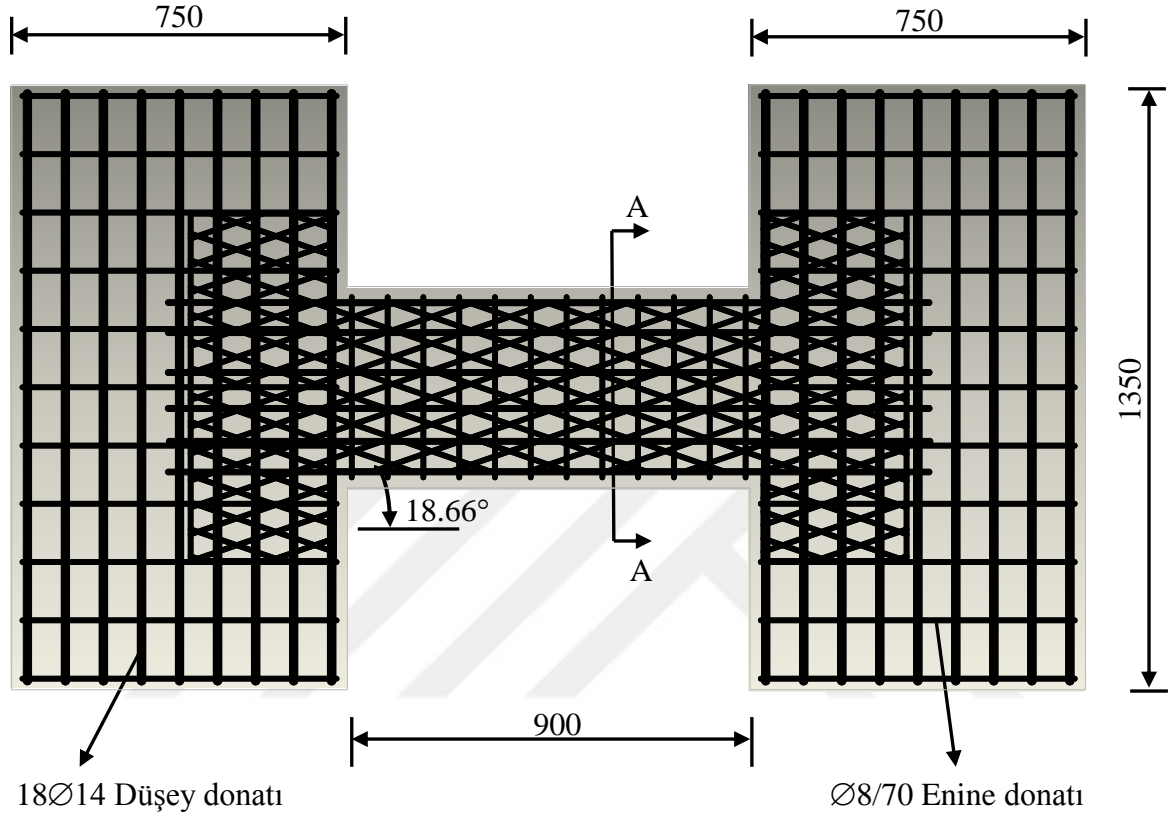
Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanına (MRCB-19) ait başlık ve kiriş donatılarının düzenlemesi Şekil 2.48’de verilmektedir.

Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanının imalatı için hasır yaprak hazırlanmıştır (bkz. Şekil 2.47). Tasarımı verilen hasır yaprağın düz bir zemin üzerinde şablonu hazırlanarak, 8 mm çapındaki donatılar 18.66°’lik açılarla iki doğrultuda yerleştirilerek iki farklı doğrultudaki donatılar birleşim bölgelerinden kaynak puntoları yardımıyla birbirine montajlanmıştır. Hasır yaprakların tamamlanmış görüntüsü Şekil 2.49’da verilmektedir.

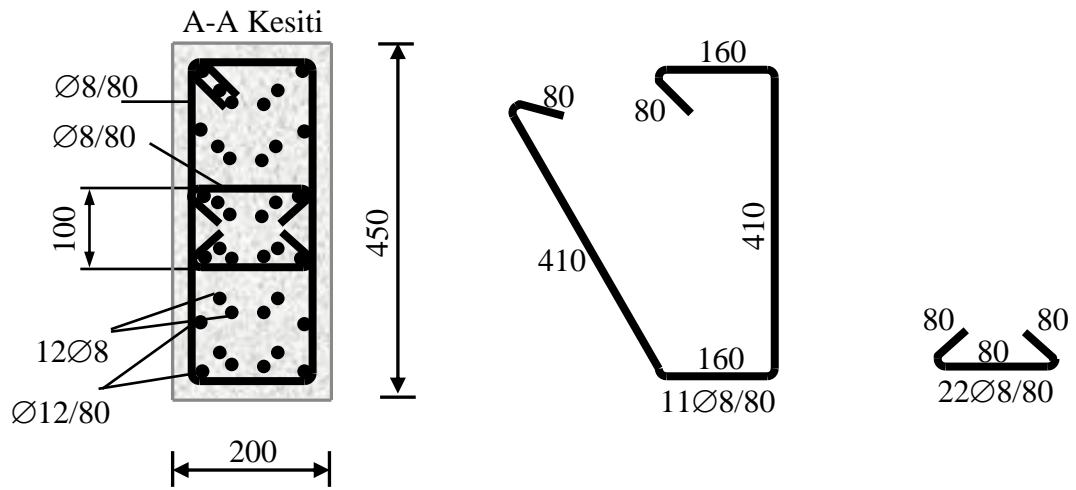
Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişine ait donatı detayı dikkate alınarak kiriş gövdesinde kullanılan etriyeler ve gövde donatıları, hazırlanan hasır donatı yapraklarını saracak şekilde yerleştirilip Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi gövdesi oluşturulmuştur (Şekil 2.50).

Hasır yapraklar, 8 mm çapındaki nervürlü donatılardan oluşmaktadır. 8 mm çapındaki nervürlü donatıda pürüzsüz düz yüzey oluşturulmasına rağmen donatı çapının küçük olması sebebiyle diğer deney elemanlarında kullanılan birim şekildeğiştirme ölçerler

yerleştirilememiştir. Bu sebeple donatıların yatay yük etkisinde birim şekildeğiştirme oranları tespit edilememiştir. Tasarımı yapılan hasır donatılı ( $19^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanının beton dökümü öncesi görüntüsü ise Şekil 2.51’de verilmektedir.

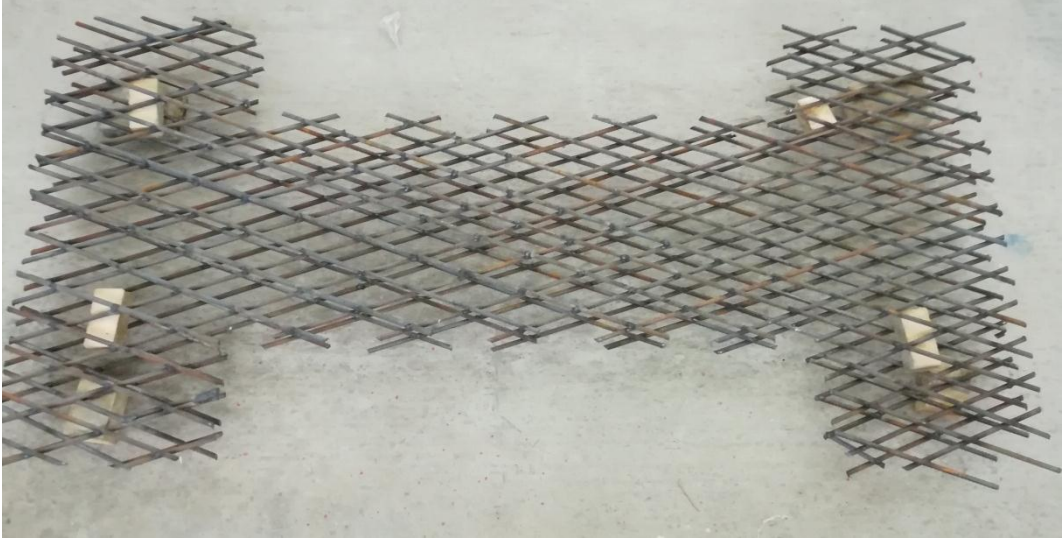


a) Deney elemanı donatı düzenlemesi

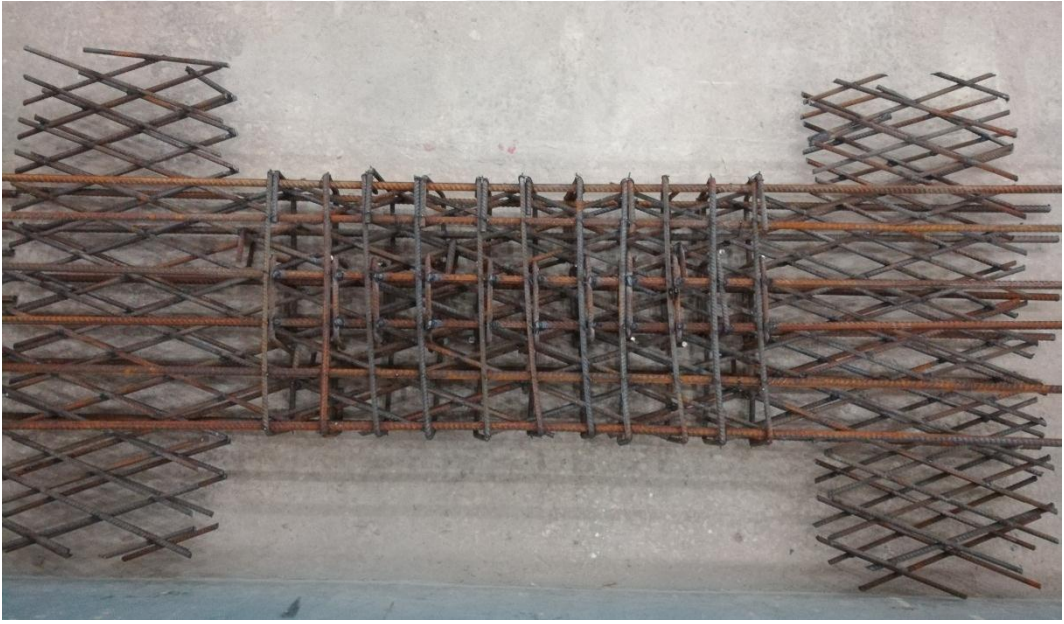


b) Bağ kirişi enkesiti ve etriye açılımları

Şekil 2.48. Hasır donatılı ( $19^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanı (MRCB-19) donatı detayı



Şekil 2.49. Deney elemanı için gerekli olan hasır yaprakların tamamlanması



Şekil 2.50. Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişine ait donatı düzenlemesi

Bu deney elemanında da, diğer deney elemanlarında olduğu gibi hazır beton kullanılmış ve aynı şekilde beton dökülerek, vibratör yardımıyla sıkıştırılmıştır. Ayrıca, beton dökümü sırasında 3 adet standart silindir ve 6 adet standart küp numuneler alınmıştır. Alınan beton numuneleri, kür bakımlarından sonra basınç test cihazında basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney elemanı üretimi aşamasında alınan numunelerin ortalama basınç dayanımları, Tablo 2.6'da verilmiştir.

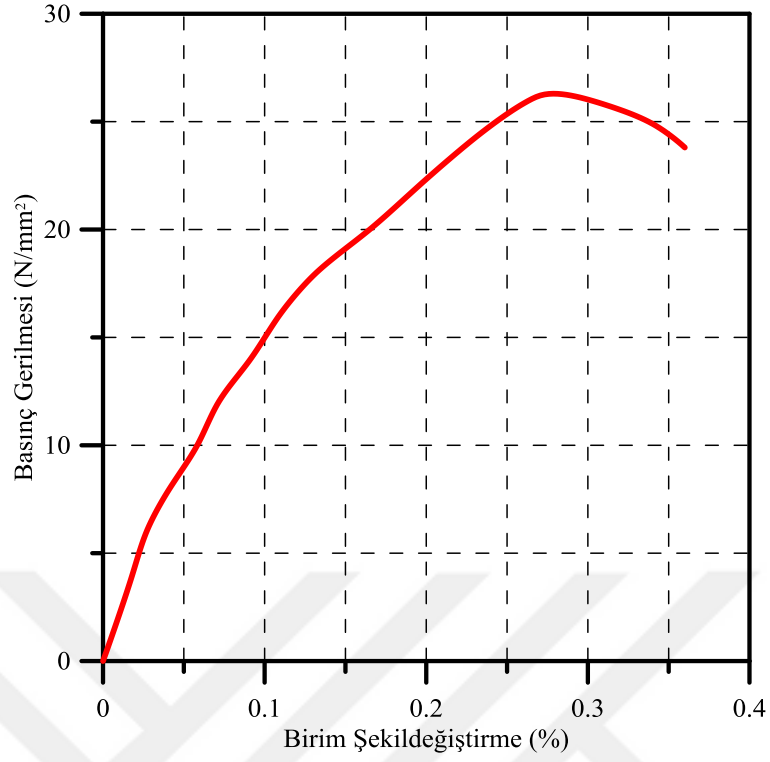


Şekil 2.51. Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanı kalıp işlerinin tamamlanması

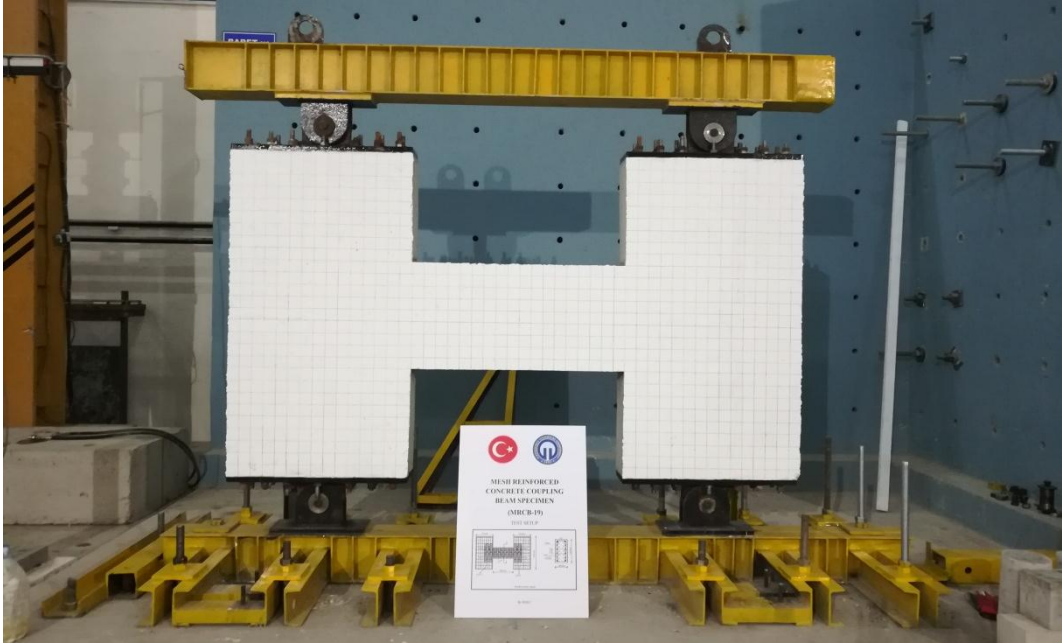
Tablo 2.6. Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları

Numune	Nihai Dayanım (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Standart Küp-1 (32 gün)	28.00	28.67
Standart Küp-2	29.00	
Standart Küp-3	29.00	
Standart Silindir-1	28.00	27.40
Standart Silindir-2	28.00	
Standart Silindir-3 (Referans)	26.20	

Standart küp numunelerin ortalama basınç dayanımı 28.67 MPa olarak elde edilmiştir. Standart silindir numunelerin ortalama basınç dayanımı ise 27.40 MPa olarak elde edilmiştir. Küp numunelerin standart sapması 0.58 MPa ve silindir numunelerin standart sapması 1.04 MPa olarak hesap edilmiştir. Beton numunesinden elde edilen gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.52’de verilmektedir. Beton bakımı sonrasında kalıp üzerinde yatay olarak bekleyen hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanı, diğer deney elemanlarında olduğu gibi deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deney elemanının deney düzeneğine montajlı hali ve deney öncesi görüntüsü Şekil 2.53’te verilmektedir.



Şekil 2.52. Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği

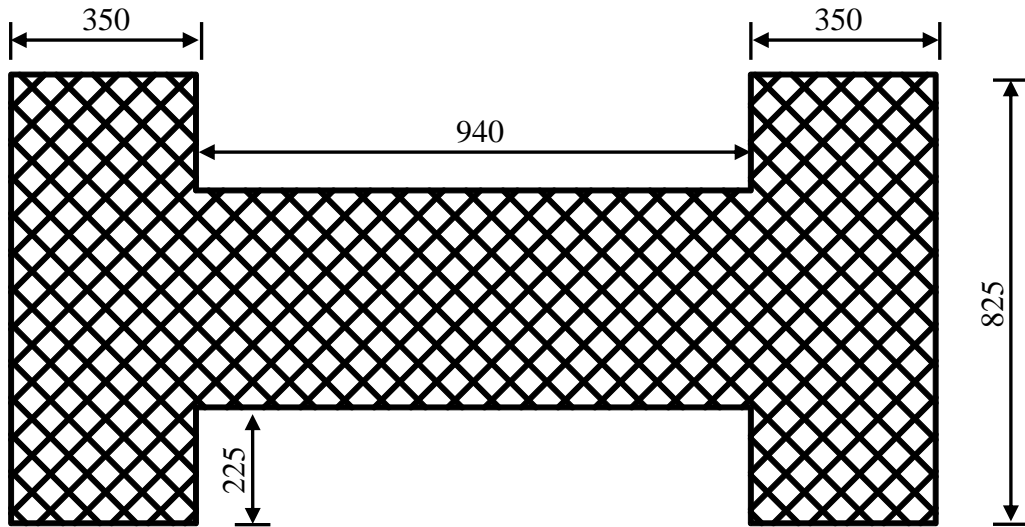


Şekil 2.53. Hasır donatılı ( $19^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü

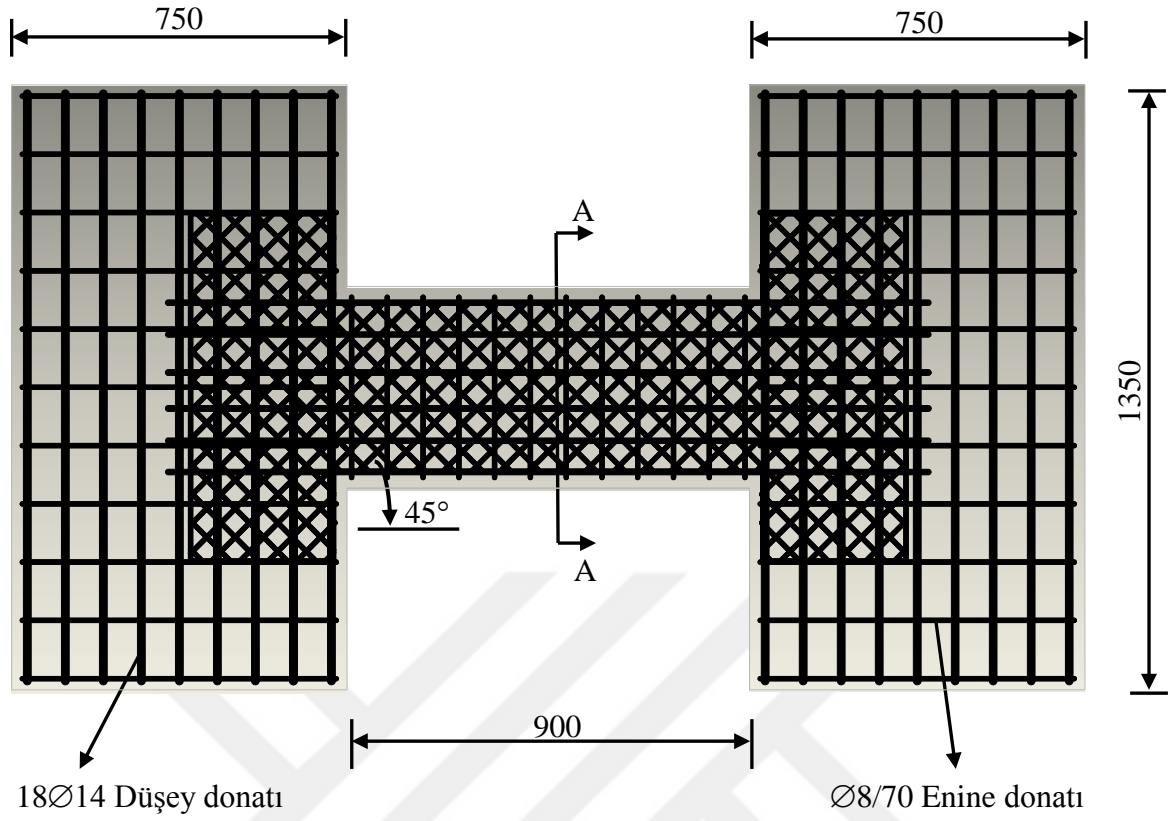
### 2.11. Hasır Donatılı (45° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanının (MRCB-45) Tasarımı ve Üretimi

Diyagonal çekme ve diyagonal basınç etkisini karşılayacak olan diyagonal donatıların açı değeri yükseldikçe bağ kirişinin kesme dayanımı teorik olarak artmaktadır. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanında bu durum denenmiş ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Fakat demet diyagonal donatılı bağ kirişlerinde açı değeri sınırlı olarak artırılabilen ve kesme dayanımı üzerinde çok büyük değişim ortaya konamamaktadır. Hasır donatıları oluşturan nervürlü donatılar, arzu edilen açılarda ve aralıklarda yerleştirilebildiği için demet diyagonal donatılar ile sağlanamayan donatı eğim açıları sağlanabilmektedir. Bu doğrultuda, diyagonal donatı düzenlemesindeki donatı oranını sağlayan ve 45° açı ile düzenlenmiş hasır donatıların bağ kirişi davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

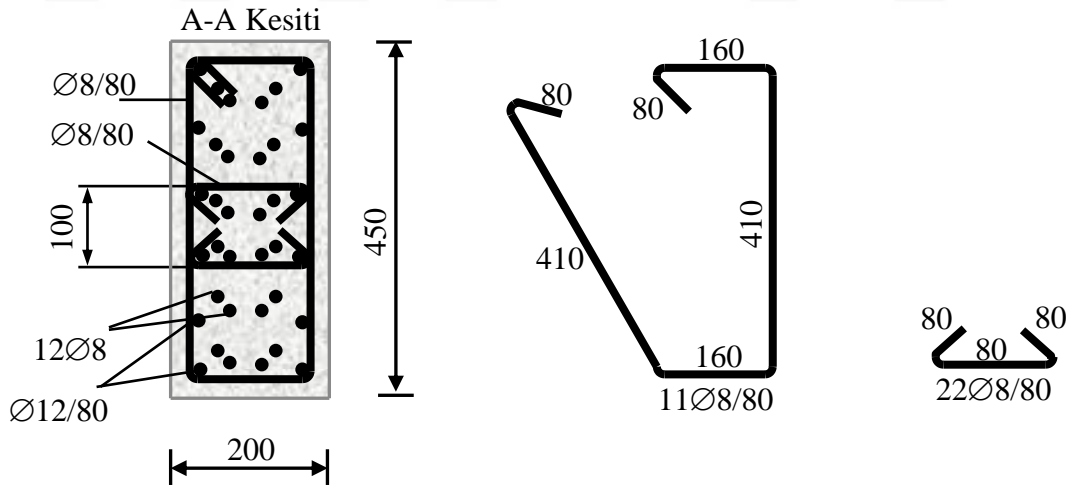
Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanında (MRCB-19) olduğu gibi 45° açığa göre hazırlanan hasır donatılara, başlık içerisinde yeterli kenetlenmeyi sağlayacak ve başlık üzerindeki hasar gelişimine katkı sağlayacak biçimde başlık donatıları eklenerek uygun hasır yaprak tasarlanmıştır. Bağ kirişi deney elemanı için tasarlanan hasır yaprağın görünümü Şekil 2.54’te verilmektedir. Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanına (MRCB-45) ait başlık ve kiriş donatılarının düzenlemesi Şekil 2.55’te verilmektedir.



Şekil 2.54. Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı için tasarlanan hasır yaprak



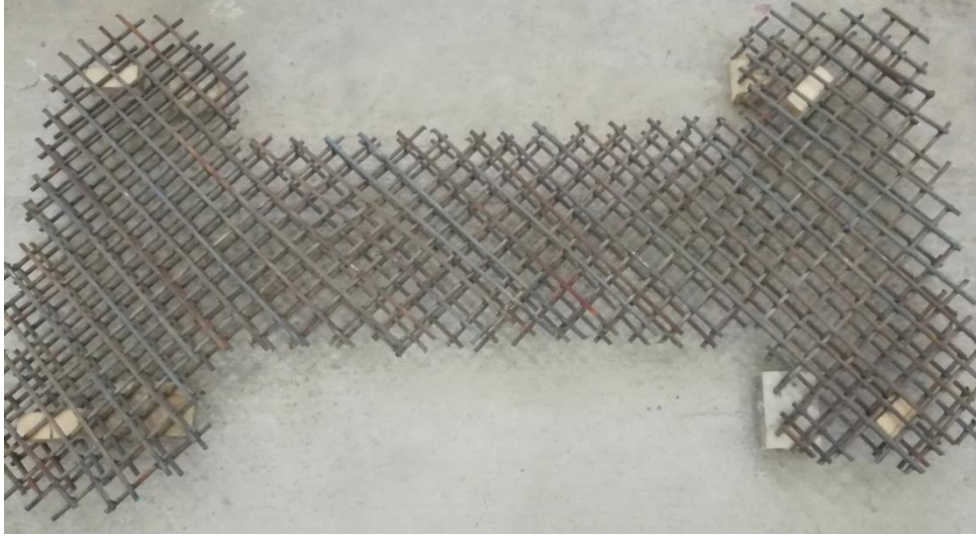
a) Denei elemanı donatı düzenlemesi



b) Bağ kirişi enkesiti ve etriye açılımları

Şekil 2.55. Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi denei elemanı (MRCB-45) donatı detayı

Hasır donatılı (45° açılı ) bağ kirişi denei elemanın imalatı için öncelikle hasır yapraklar hazırlanmıştır. Hazırlanan hasır yaprakların görünümü Şekil 2.56'da verilmiştir.



Şekil 2.56. Deney elemanı için gerekli olan hasır yaprakların tamamlanması

Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişine ait donatı detayı dikkate alınarak kiriş gövdesinde kullanılan etriyeler ve gövde donatıları, hazırlanan hasır donatı yapraklarını saracak şekilde yerleştirilip hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi gövdesi oluşturulmuştur. Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişine ait hazırlanan donatıların perde başlıklarına yerleştirilmeden önceki hali Şekil 2.57'de verilmektedir.



Şekil 2.57. Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişine ait donatı düzenlemesi

Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanının beton dökümü öncesi görünümü Şekil 2.58'de verilmektedir. Deney elemanının betonu, hasır donatılı (19° açılı)



bağ kirişi deney elemanı betonu ile beraber dökülmüştür. Betona ait dayanım verileri Tablo 2.6'da verilmektedir. Hasır donatılı ( $45^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görünümü Şekil 2.59'da verilmektedir.



Şekil 2.58. Hasır donatılı ( $45^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanı beton dökümü öncesi son hali



Şekil 2.59. Hasır donatılı ( $45^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü

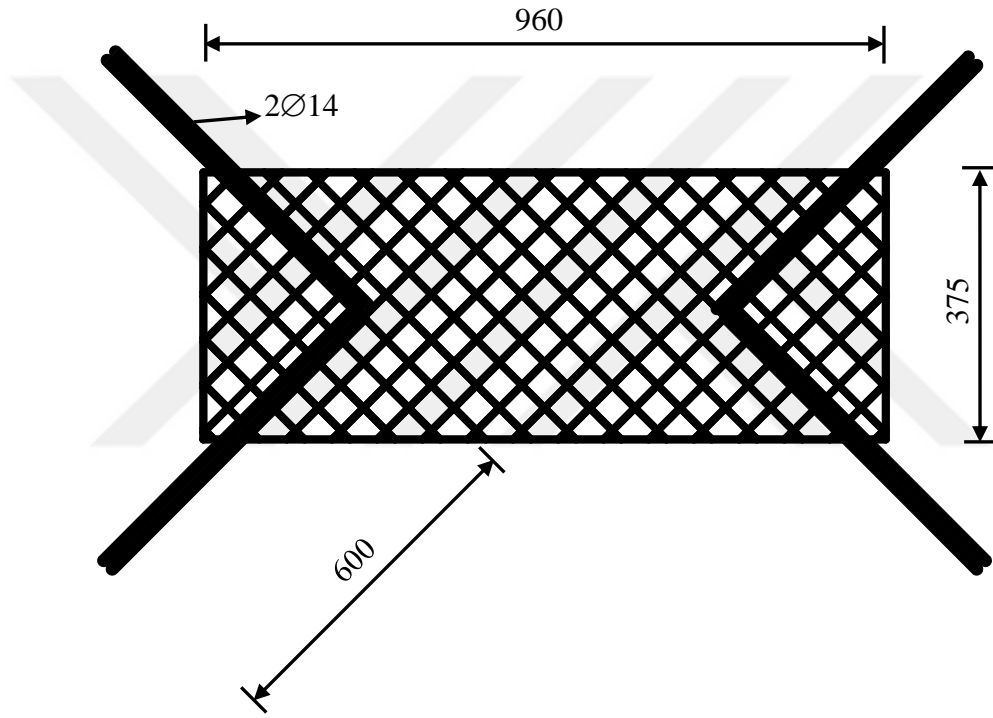
## 2.12. Güçlendirilmiş Hasır Donatılı (45° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanının (DBMRCB-45) Tasarımı ve Üretimi

Tasarım şablonunun oluşturulması ve kaynak işlemleri açısından hasır donatı yapraklarının laboratuvar ortamında üretimi zor olsa bile, seri üretime dönüştürülmesi ile hasır donatı yaprakları kolaylıkla üretilerek temin edilebilmektedir. Bu sebeple, gerek istenilen donatı eğim açısını ve donatı alanını sağlaması gerekse de diyagonal donatıların kiriş orta bölgesinde meydana gelen donatı yoğunluğunu ortadan kaldırması açısından hasır donatılar oldukça avantaj sağlamaktadır. Ayrıca kiriş açıklığı boyunca bütün kesitlerde eşit donatı yerleşimi sağlayarak hasır donatılar kiriş bütünlüğüne katkı sağlamaktadır.

Hasır donatı yapraklarının tasarım ve üretim açısından birçok avantajı olsa bile performans açısından bağ kirişlerinde kullanımı bir takım sorunları da beraberinde getirmektedir. Çalışmanın önceki kısımlarında da ifade edildiği üzere, yatay yük etkisinde bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgelerinin alt ve üst kısımları aynı anda çekme ve basınç etkisine maruz kalmaktadır. Bunun beraberinde kiriş açıklığı boyunca, diyagonal çekme ve diyagonal basınç eksenleri meydana gelmektedir. Bu sebeple, bağ kirişi zorları öncelikle birleşim bölgelerinin alt ve üst kısımlarından başlamaktadır. Diyagonal donatılı ve geleneksel donatılı bağ kirişleri için hesap edilen donatıların tamamının bu bölgelerde yer alması yatay yük etkisindeki ilk kiriş zorlarını karşılanmasında etkin rol almaktadır. Fakat hasır donatılı bağ kirişlerinde, geleneksel ve diyagonal donatılı bağ kirişlerinin basınç ve çekme bölgeleri için hesap edilen asal donatıların kiriş gövdesine dağıtılması birleşim bölgelerindeki basınç ve çekmenin karşılanamamasına sebep olmaktadır. Özellikle çekme etkisinde oluşan çatlaklar sebebiyle hasır donatılı bağ kirişleri, diyagonal donatılı bağ kirişi performansına ulaşmadan birleşim bölgelerindeki hasarların tersinir yüklerde kiriş yüksekliği boyunca ilerlemesiyle kayma göçmesine maruz kalmaktadır.

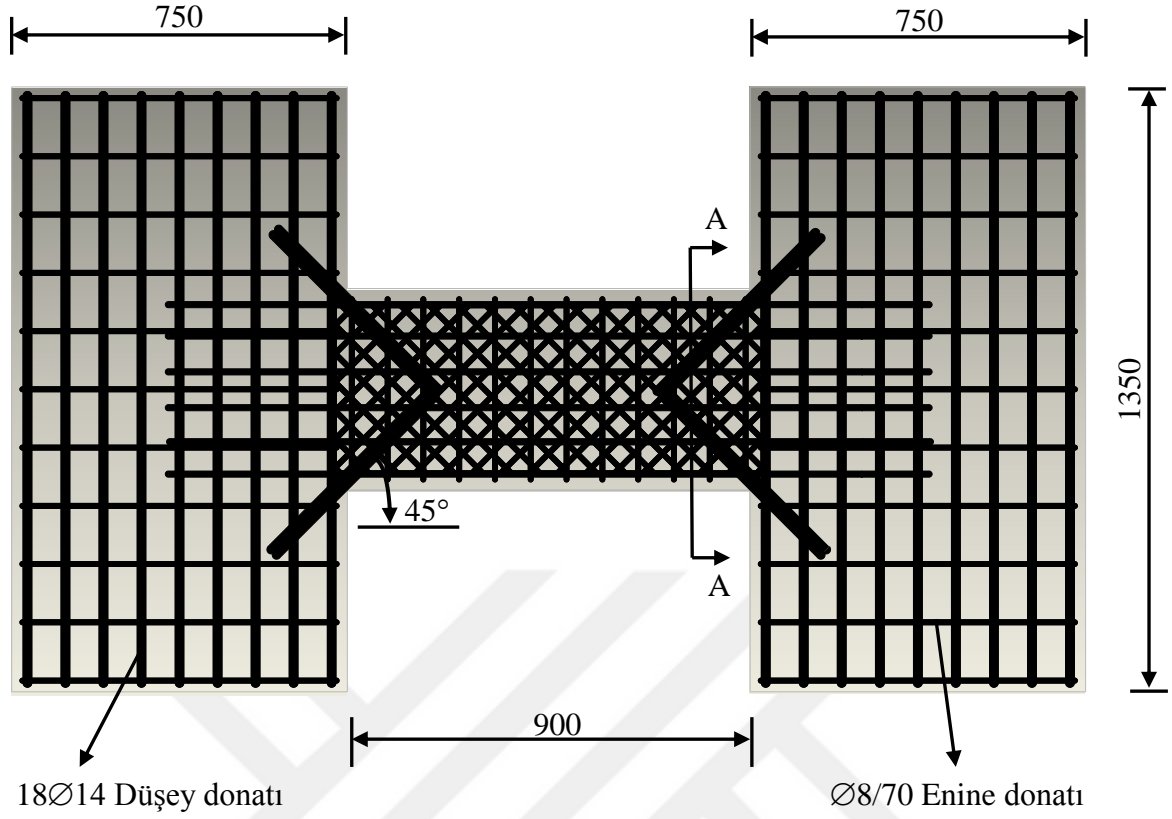
Birleşim bölgesindeki çekme ve basıncın karşılanabilmesi ve diyagonal eksen boyunca aktarılabilmesi için (1.7) denklemi ile elde edilen hesap donatılarının alt ve üst birleşim bölgelerinde mutlaka bulunması gerekmektedir. Bu sebeple hasır donatılı bağ kirişlerinin hasır donatıların açısıyla aynı açığa sahip diyagonal donatılar ile güçlendirilmesinin daha doğru olacağı kanaatine varılmıştır. Bu durumda bağ kirişinin orta bölgesindeki basınç ve çekme kuvvetleri hasır donatılar ile karşılanırken, birleşim bölgelerindeki basınç ve çekme kuvvetleri ise aynı açılarda yerleştirilen diyagonal donatılar ile karşılanmaktadır.

Hasır yapraklar aynı açılarda köşelerden güçlendirme yapılacağı için (1.7) denklemde hesap edilen donatı miktarı dikkate alınarak her hasır yaprak köşesine 2 adet 14 mm çapında nervürlü donatı eklenmiştir. 2 adet hasır yaprak kullanılacağı için kiriş içerisinde kullanılması gereken toplam 4 adet 14 mm çapında nervürlü donatı kullanılmış olmaktadır. Köşelere yerleştirilen 14 mm çapındaki donatılar hem kiriş hem de başlık içerisinde yeterli beton-donatı kenetlenmesini sağlayacak uzunluklarda yerleştirilmiştir. Güçlendirilmiş hasır yaprakların görünümü ve boyutları Şekil 2.60'ta verilmektedir.

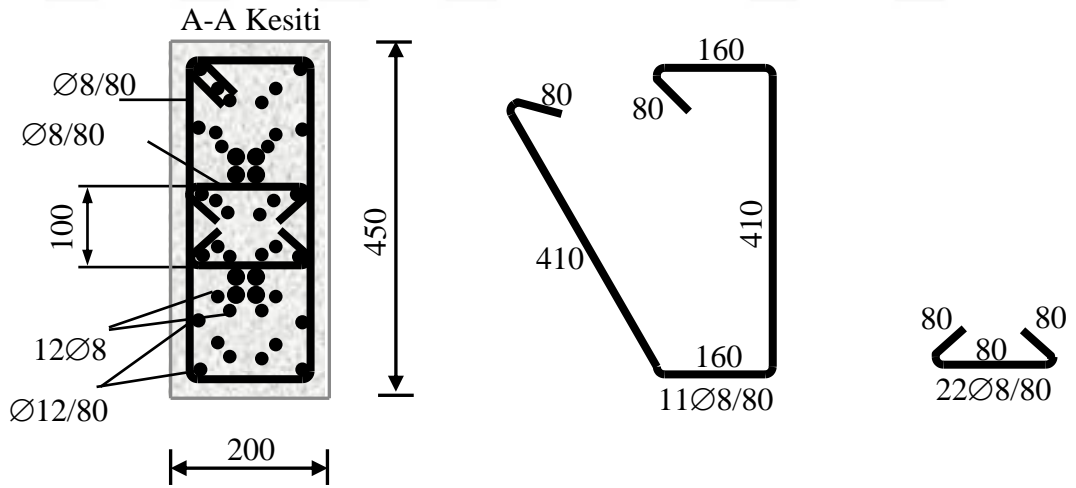


Şekil 2.60. Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı için tasarlanan hasır yaprak

Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanına (DBMRCB-45) ait başlık ve kiriş donatılarının düzenlemesi, Şekil 2.61'de verilmektedir.



a) Denei elemanı donatı düzenlemesi

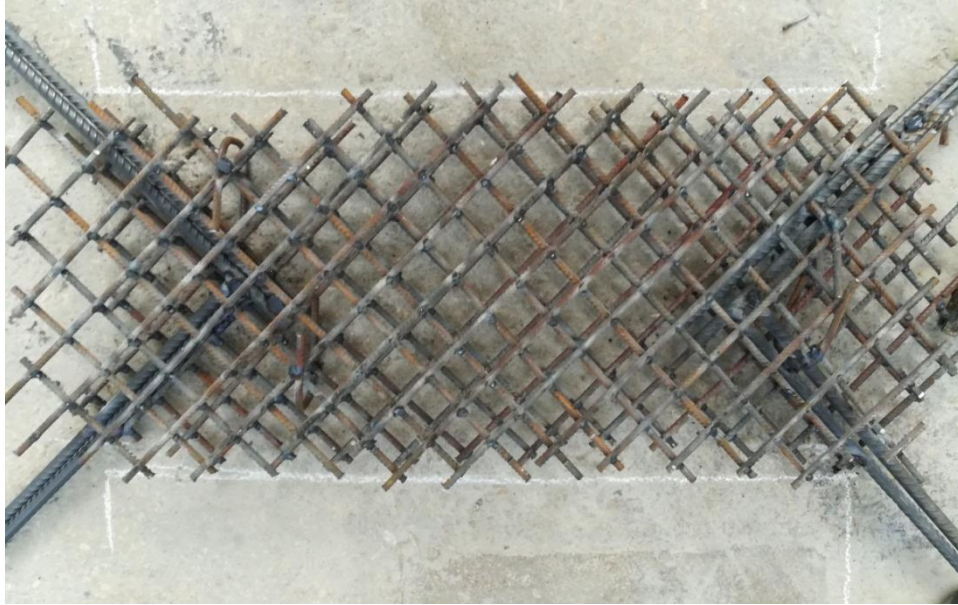


b) Bağ kirişi enkesiti ve etriye açılımları

Şekil 2.61. Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi denei elemanı (DBMRCB-45) donatı detayı

Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi denei elemanın imalatı için öncelikle hasır yapıpraklar hazırlanmıştır. Hasır yapıprakların diyagonal köşelerden 45° açı ile

güçlendirilmesi için Şekil 2.60'ta görülen 600 mm uzunluğundaki 8 adet 14 mm çapında nervürlü donatı hasır yaprağın her bir köşesine yerleştirilmiş ve kaynak puntoları yardımıyla hasır yaprağa montajı yapılmıştır. Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı için tasarlanan hasır yaprağın üretilmiş hali Şekil 2.62'de verilmektedir. Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı (DBMRCB-45) donatı detayı dikkate alınarak kiriş gövdesinde kullanılan etriyeler ve gövde donatıları, hazırlanan hasır donatı yapraklarını saracak şekilde yerleştirilip güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi gövdesi oluşturulmuştur. Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişine ait hazırlanan donatıların perde başlıklarına yerleştirilmeden önceki hali Şekil 2.63'te verilmektedir.

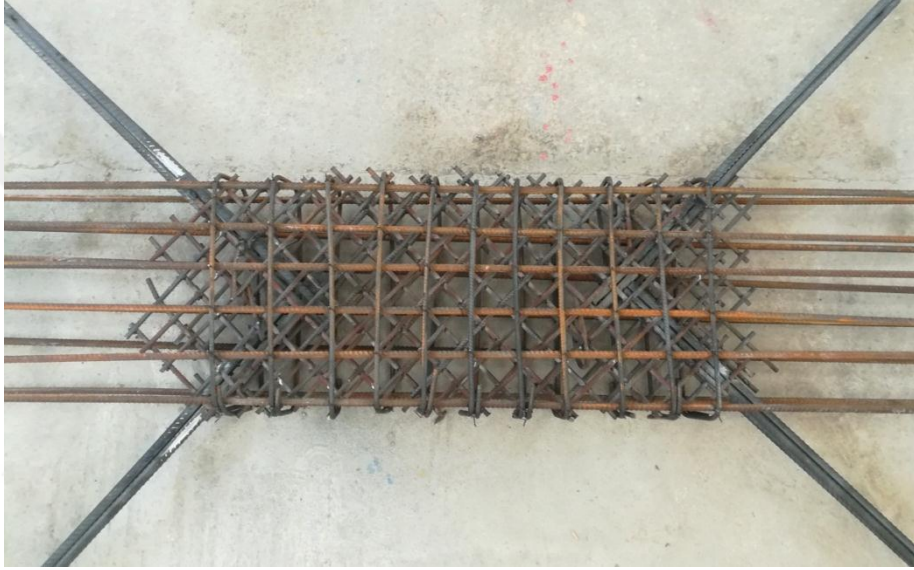


Şekil 2.62. Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı için tasarlanan hasır yaprağın üretimi

Hasır donatılı (19° ve 45° açılı) bağ kirişlerinde 8 mm çapındaki donatılara birim şekildeğiştirme ölçerler takılamamıştır. Fakat bu deney elemanında kiriş köşelerini güçlendirmek için kullanılan 14 mm çapındaki donatılar diğer elemanlarda olduğu gibi uygun bölgeleri pürüzsüz hale getirilerek birim şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Birim şekildeğiştirme ölçerlerin donatı üzerinde yerleştirilme işlemleri, Şekil 2.64'te gösterilmektedir. Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanının donatı montajının tamamlanmış görünümü Şekil 2.65'te verilmektedir.

45° açılı güçlendirilmiş hasır donatılı bağ kirişi deney elemanı, sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı ile beraber üretildiği için beton dökümü de beraber yapılmıştır.

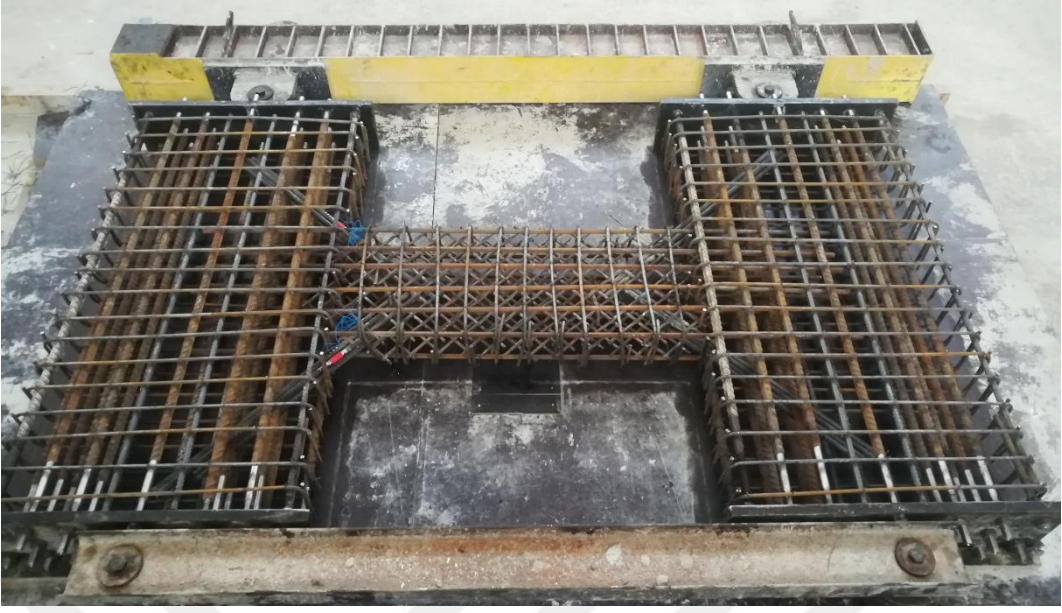
Beton kür bakımı sonrasında kalıp üzerinde yatay olarak bekleyen güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanı, diğer deney elemanları gibi deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Deney elemanının deney öncesi görünümü, Şekil 2.66'da verilmektedir.



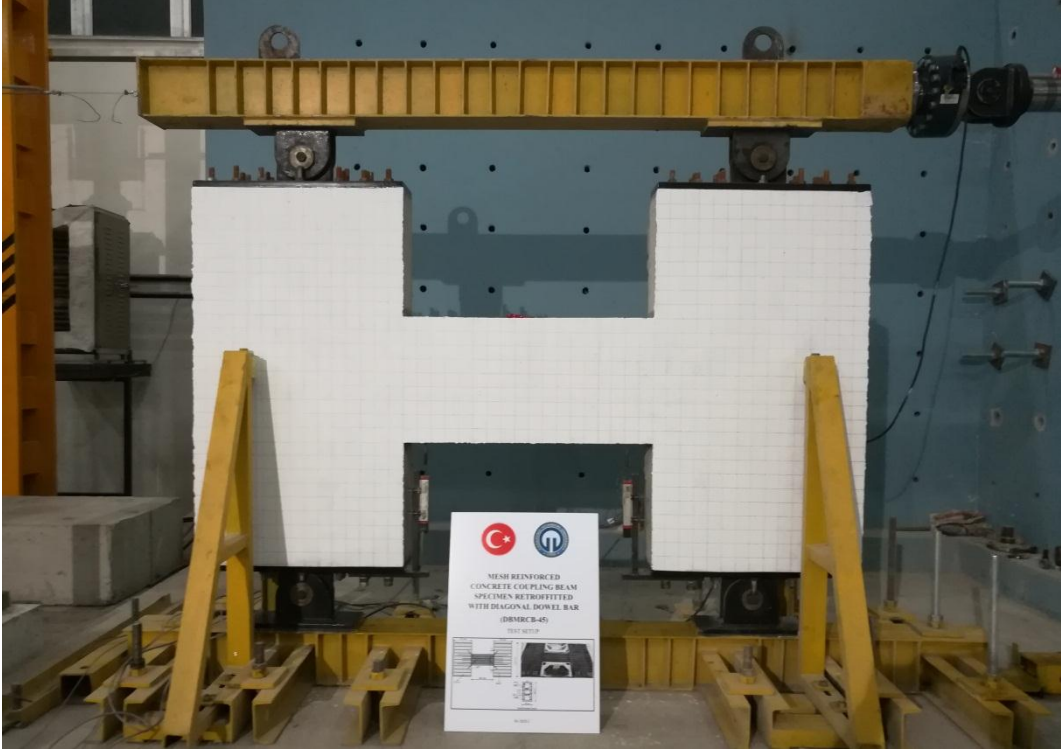
Şekil 2.63. Güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişine ait donatı düzenlemesi



Şekil 2.64. Birim şekil değiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi



Şekil 2.65. Güçlendirilmiş hasır donatılı ( $45^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanı donatı düzenlemesi



Şekil 2.66. Güçlendirilmiş hasır donatılı ( $45^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü

### **2.13. Tahterevalli Tipi Bağ Kirişinin (TETOD) Gelişimi**

Deprem ve rüzgar gibi zamana bağlı değişen yatay yüklere maruz bir yapının yük etkisi altında yeterli performans ortaya koyabilmesi için enerji tüketme kapasitesinin oldukça yüksek olması gerekmektedir. Yapıların enerji tüketme kapasiteleri, yatay yük taşıyıcı elemanların ve bunların taşıyıcılığındaki yapının sünekliği artırılarak veya yapı içerisinde plastik mafsalları oluşumlarına izin verilerek artırılabilir.

Boşluklu betonarme perde duvarlar, yüksek binalarda yaygın olarak kullanılan esas yatay yük taşıyıcı elemanlardır. Bağ kirişlerinin uygun olarak tasarlanması durumunda sistemden talep edilen sünekliğin ve dolayısıyla enerji yutma kabiliyetinin karşılanabilmesi mümkün olabilmektedir. Bu sebeple bağ kirişleri, boşluklu betonarme perde duvar sistemlerinde plastik mafsalları oluşum bölgeleri olarak kabul edilmektedir.

Donatı düzenlemesi, malzeme, güçlendirme tekniği ve tasarım bakımından farklılık gösteren bağ kirişlerinin yüksek süneklik ve yüksek enerji yutma kabiliyetlerinin yanında, işçilik kolaylığı ve hasar sonrası onarılabilir olma özelliklerine de sahip olmaları gerekmektedir. Bu durumda betonarme, çelik veya kompozit olarak üretilen bağ kirişlerinden bütün bu özelliklerin talep edilmesi mümkün olmamaktadır.

Yüksek süneklik, yüksek enerji yutma kabiliyeti, işçilik kolaylığı ve hasar sonrası onarılabilirlik özelliklerinin karşılanabilmesi için sürtünme sönümleyicili, metalik sönümleyicili, kauçuk sönümleyicili ve hibrid sönümleyicili bağ kirişleri, tasarımcılar ve araştırmacılar tarafından önerilmektedir. Bu tür elemanların yüksek süneklik ve yüksek enerji yutma kabiliyeti ortaya koyabilmesi bir avantaj olarak gözükebilecek dayanım ve rijitlik yönünden zayıf olmaları tasarımcılar için büyük dezavantaj olarak ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada, çelik çaprazlı çerçeve sistemlerde yaygın olarak kullanılan ve daha önce bağ kirişleri için uygulanmamış T-ADAS sistemlerinden esinlenerek ortaya çıkan 'tahterevalli' tipi bağ kirişi (TETOD), yukarıda bahsi geçen dezavantajları ortadan kaldıracak yenilikçi sönümleyici tipi bağ kirişi olarak önerilmektedir.

### **2.14. Tahterevalli Tipi Bağ Kirişinin Tasarımı**

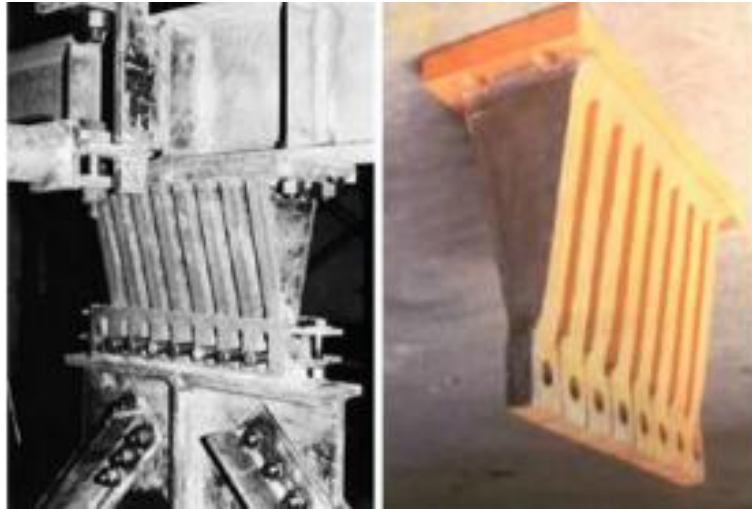
T-ADAS (üçgen şekilde ilave sönüm ve ilave rijitlik sistemi) sistemi, 1991 yılında Whittaker vd. tarafından ortaya konan ADAS (ilave sönüm ve ilave rijitlik sistemi) sisteminin Tsai vd. tarafından 1993 yılında geliştirilmiş halidir. ADAS sistemi sınırlı sayıda 'X' şeklinde



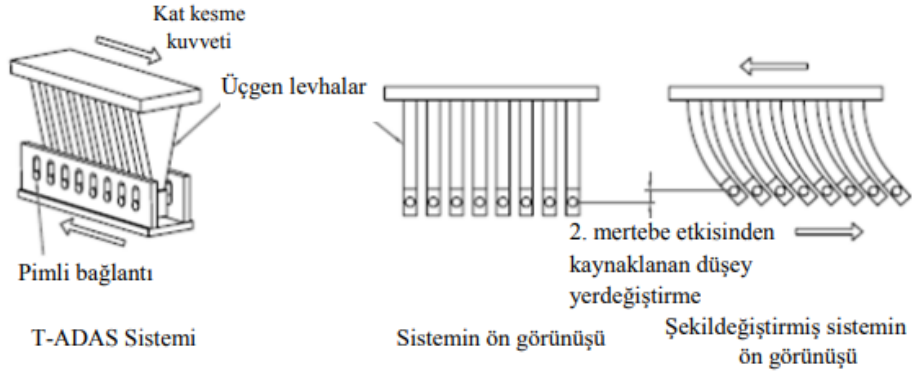
çelik plakalardan oluşurken (Şekil 2.67), TADAS sistemi ise üçgen şeklindeki çelik plakalardan oluşmaktadır (2.68). ADAS sistemi, rijitlik ve dayanım açısından iyi performans ortaya koysa bile süneklik ve enerji tüketme kabiliyeti açısından yetersiz kalmıştır. Bu sebeple T-ADAS sistemi, ADAS sistemine alternatif olarak önerilmiştir. Sistem, bir tarafından kirişe ankastre bağlanırken, üçgen levhalar dar ucundan çelik çaprazlara pim vasıtası ile bağlanmakta ve bu uçta dönme serbest bırakılmaktadır (Şekil 2.69). Böylelikle yatay yük etkisinde meydana gelecek rölatif ötelenmeler sonucunda çelik levhalar zayıf eksenine doğrultusunda ankastre kirişe benzer şekilde tek eğrilikli olarak eğilmektedir. Çelik plakaların üçgen formda tasarlanmasının sebebi, şekildeğiştirmelerin plaka boyunca düzgün yayılmasını sağlamak ve düşük yük çevrimlerinde yorulmanın meydana gelmesini geciktirmektir (Demir, 2018). Aksi durumda (dikdörtgen olması durumunda), plastik mafsallar plakanın ankstre bağlı olduğu (momentin en yüksek olduğu bölge) bölgede oluşmakta ve çelik plakalar taşıma gücünü erken yitirmektedir. Şekildeğiştirmeler üçgen form sayesinde çelik plaka yüzeyi boyunca düzgün yayılmakta ve sistem çevrimsel yük altında kararlı bir davranış sergilemektedir.



Şekil 2.67. ADAS sistemi (Wu vd., 2012)



Şekil 2.68. T-ADAS sistemi (Tsai vd., 1993)

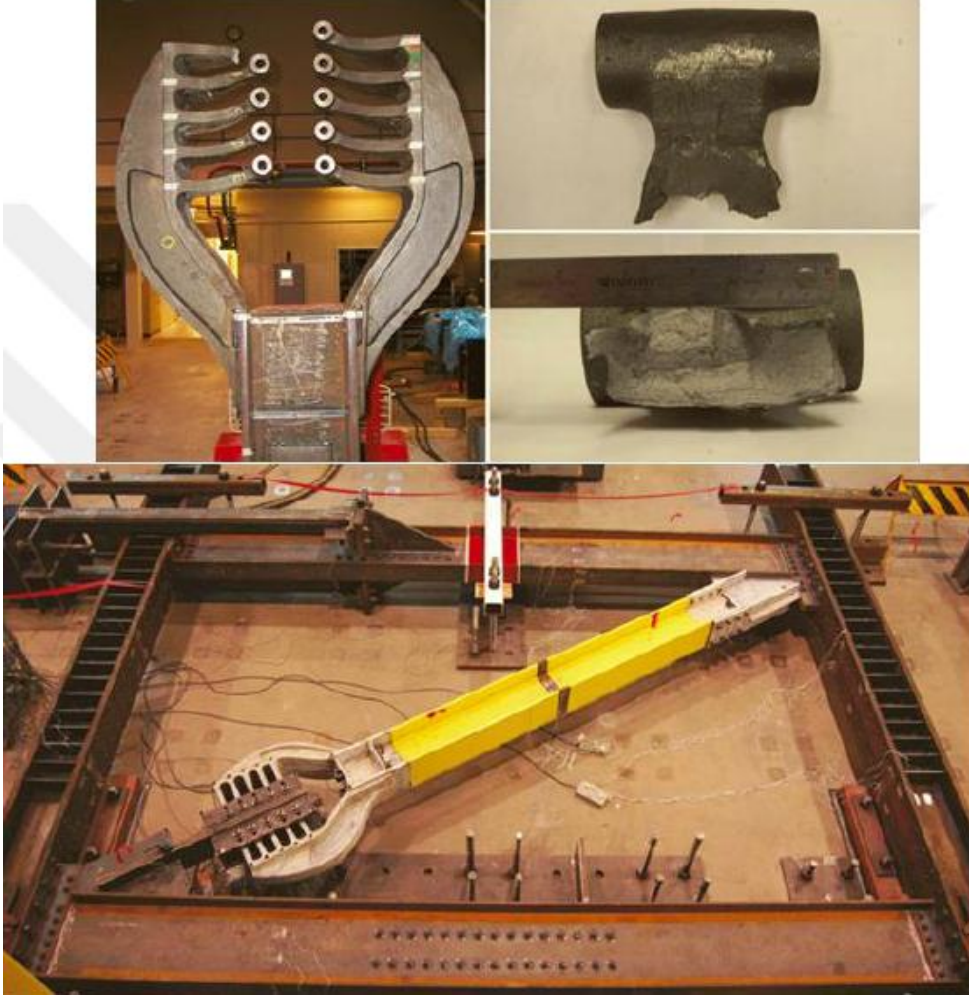


Şekil 2.69. T-ADAS sistemi çalışma şekli (Christolopoulos ve Filiatrault, 2006)

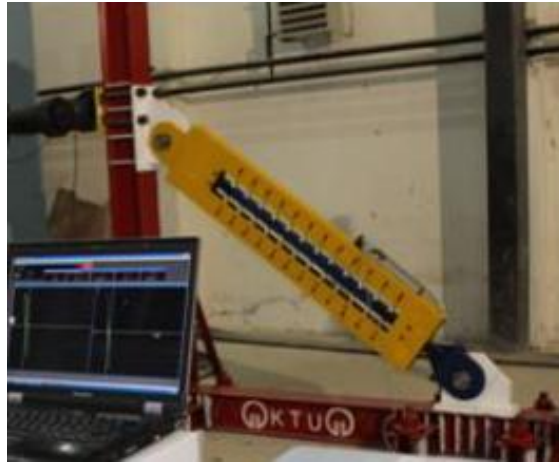
T-ADAS sistemi, ilk dönemlerde V tipi çelik çaprazlı sistemlerde tercih edilen önemli metalik sönümleyici sistemler olarak yerini almıştır. Gray vd. (2014), T-ADAS sistemini geliştirerek ilk defa çelik çaprazlı sistemlerde, çapraz elemanların uçlarına sönümleyici sistem olarak yerleştirmişlerdir (Şekil 2.70). Ancak bu sistemde sınırlı sayıda metalik sönümleyici kullanılabilir. Yüksek taşıma kapasitesine ihtiyaç duyulan elemanlarda daha kalın çelik plakaların kullanılması gerekmektedir. Sadece eğilme etkisinde tasarlanan bu elemanlarda kalınlığın artması ile kayma gerilmeleri de artarak kırılma modu değişmektedir. Çapraz elemanların taşıyıcı çerçeveye ankastre bağlı olması sebebiyle aksel uzama ve kısalmanın dışında farklı kesit tesiri ve düzlem dışı zorlanmalara sebebiyet vermektedir. Bu sebeple Demir (2018), her iki ucunda mafsallı birleşime ve daha fazla çelik plakaya sahip ve sadece aksel kesit tesirleri altında çalışan ‘Testere’ tipi sismik enerji sönümleyicileri geliştirmiştir (Şekil 2.71)

V-tipi gergili çelik çerçeve sistemlerde kesme ve çapraz gergili çelik çerçeve sistemlerde normal kuvvetler, çelik plakaların eğilme davranışı sayesinde karşılanarak, T-ADAS sistemleri hem taşıyıcı hem de sönümleyici eleman olarak taşıyıcı sistemlere uyarlanmıştır. Bağ kirişleri ile birbirine bağlı betonarme perde duvarlar, aynı kat seviyesinde eşit dönme ve eşit yerdeğiştirmeye maruz kalmaktadır. Bu durumda bağ kirişleri, ihmal edilebilir moment ve normal kuvvetlerin yanında aşırı kesme kuvveti etkisine maruz kalmaktadır. Bağ kirişleri ile birbirine bağlanan perde duvar ayakları, Şekil 2.72’de görüldüğü gibi simetrik iki parça olarak kabul edilirse, eğilme etkisinde rölatif düşey yerdeğiştirme hareketi meydana getirmekte ve kayma düzlemi oluşturmaktadır. Gergili çerçevelere benzer olarak, sadece kesme kuvveti etkisini karşılayan uygun birleşim detayının tasarlanması ile iki

perde duvar arasındaki yük aktarımı ve boşluklu perde duvar sisteminden talep edilen etkileşimin karşılanması mümkün olabilir.

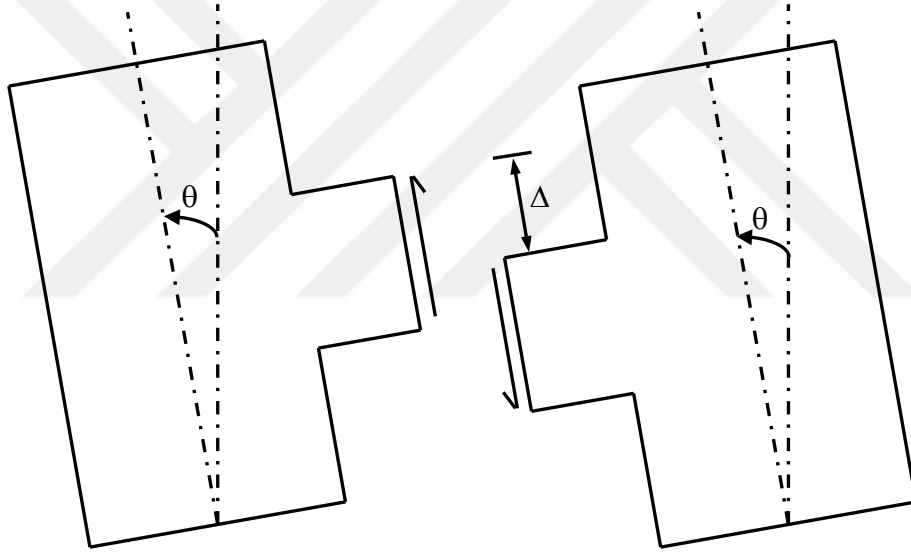


Şekil 2.70. Metalik sönümleyicili çapraz eleman (Gray vd., 2014)



Şekil 2.71. Testere tipi sismik enerji sönümleyici (Demir, 2018)

Şekil 2.72’de olduğu gibi perde duvarlar  $\theta$  açısı kadar dönme yaptığında, kayma eksenini içerisinde her bir perde duvara bağlı bağ kirişi kolları arasında  $\Delta$  kadar yerdeğiştirme meydana gelmektedir. Kayma düzlemi oluşmadığı için betonarme, çelik ve kompozit bağ kirişlerinde diyagonal çekme ve basınç etkilerinin yanında açıklık boyunca yoğun kesme kuvvetleri meydana gelmekte ve bağ kirişleri zayıf bölgelerinden göçmeye maruz kalmaktadır. Bağ kirişi orta bölgesi, kayma düzlemi olarak seçilerek sönümleyici eleman bu bölgeye yerleştirildiğinde zayıf bölge, kayma düzlemi içerisinde kalmakta ve hasar sönümleyici eleman üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bağ kirişlerinin sönümleyici elemana dönüştürülme sebebi her ne kadar sünekliliğin artırılması, sisteme giren enerjinin tüketilmesi ve hasarın toplanması olsa bile bu durum esasen rijitlik ve dayanımdan ödün verilmesi anlamına gelmektedir.



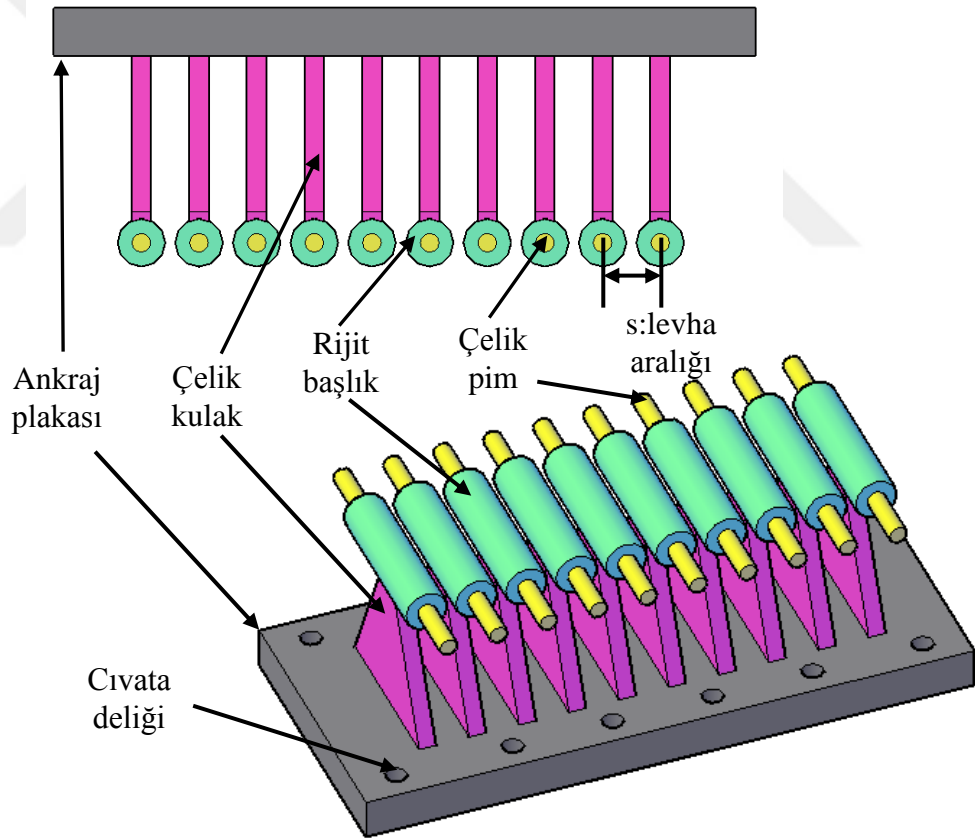
Şekil 2.72. Kiriş kolları arasındaki kayma düzlemi

Boşluklu perde duvar sisteminde bağlantı etkileşiminde etkin rol oynayan en önemli parametrelerden bir tanesi, bağ kirişlerinden perde duvar ayaklarına aktarılan normal kuvvetlerdir. Perde duvar ayakları için gerekli olan normal kuvvetin perde duvarlara kazandırılabilmesi ise bağ kirişlerinin kesme kuvveti taşıma kapasitesine bağlıdır. Sönümleyici tasarımında dayanımın azalması, bağlantı etkileşimi için gerekli olan normal kuvvet aktarımının engellenmesi anlamını taşımaktadır.

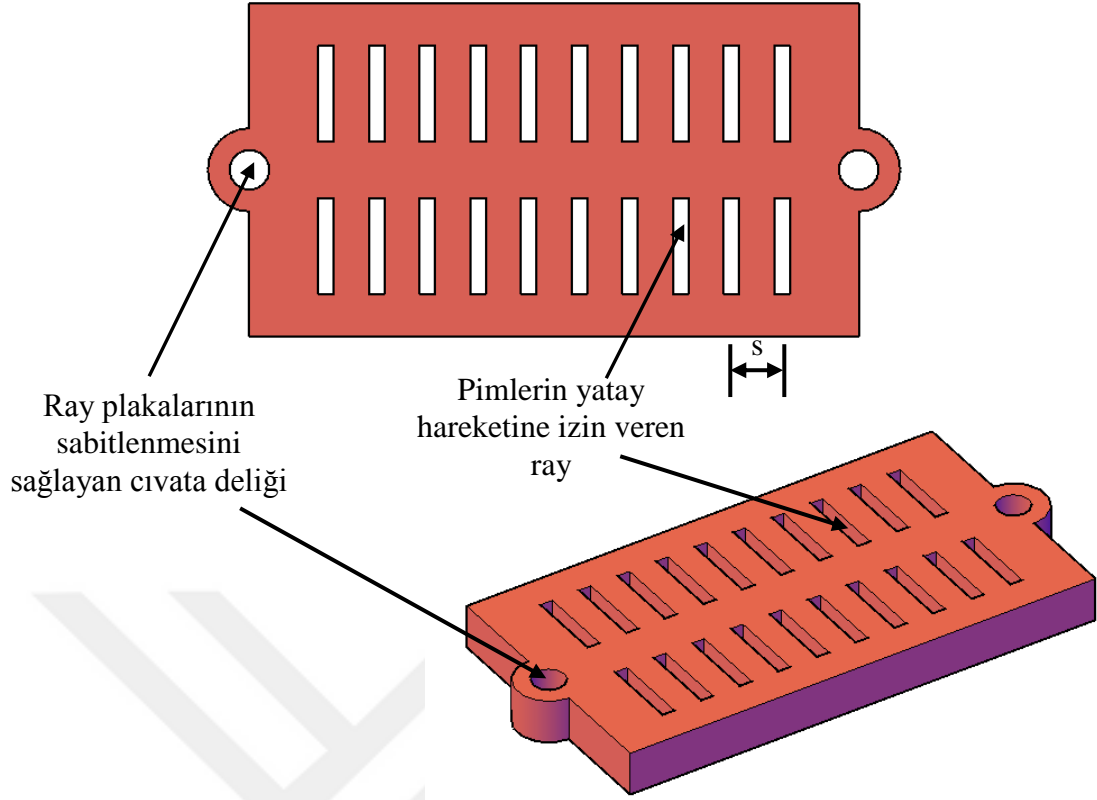
Betonarme bağ kirişlerinin taşıdığı kesme kuvveti değerlerinin yüksek olması, yerine tasarlanacak sönümleyicide kullanılacak üçgen çelik plakaların kalınlığının artırılmasına sebep olmaktadır. Bu amaçla, daha fazla üçgen çelik plakaların kullanımına olanak

sağlayacak sönümleyici eleman tasarımı ortaya konması gerekmektedir. T-ADAS sistemi, üçgen levhaların bağlı olduğu üçgen levha takımı ve pimlerin kesme yükünü aktararak serbest hareket ettiği raydan oluşmaktadır. Şekil 2.72 dikkate alındığında, üçgen levha takımının bir perde ayağında, rayın ise diğer perde ayağında olması gerekmektedir. Bu durumda kiriş yüksekliği boyunca kullanılabilir üçgen çelik levha sayısı azalmaktadır. Bu sebeple T-ADAS sistemine nazaran daha özgün bir tasarımın geliştirilmesi gerekmektedir.

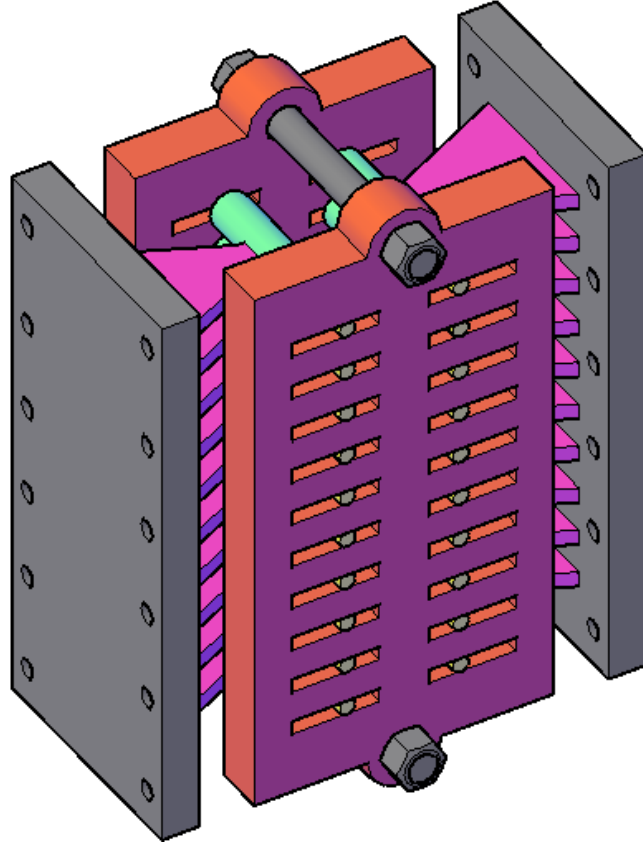
‘Tahterevalli’ tipi bağ kirişinin (TETOD), yukarıda ifade edilen tüm sorunlara çözüm olacak şekilde tasarımı gerçekleştirilmiştir. TETOD, her bir kiriş koluna bağlı çelik kulak takımı (Şekil 2.73) ve kayma eksenine paralel hareket eden serbest raylardan (2.74) oluşmaktadır. TETOD’un birleştirilmiş hali Şekil 2.75’te verilmektedir. TETOD’un üstten görüntüsü ve üzerinde kullanılan parçaların görünümü ise Şekil 2.76’da verilmektedir.



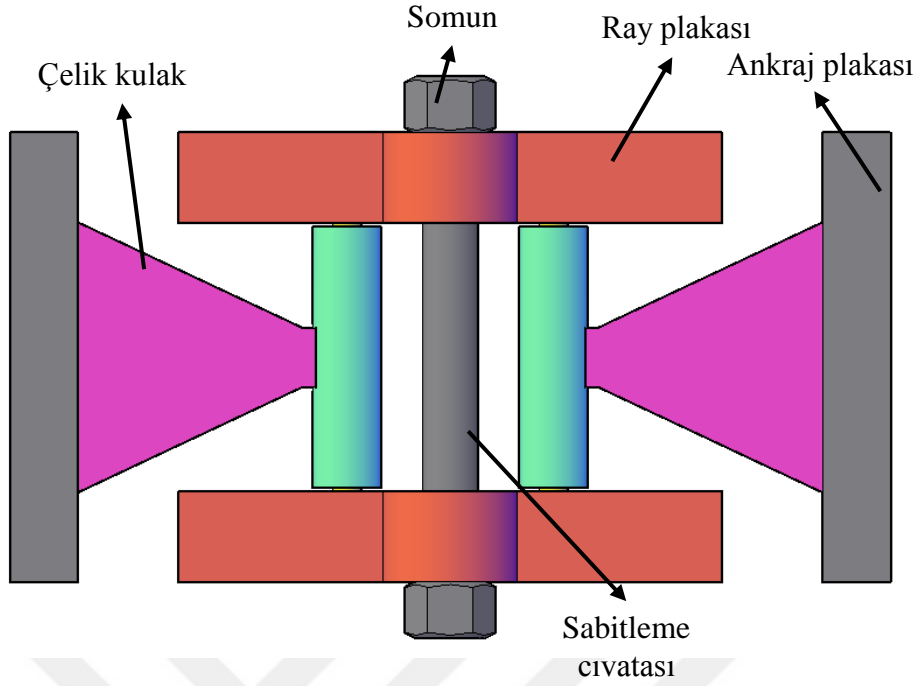
Şekil 2.73. Kulak takımı



Şekil 2.74. Ray plakası



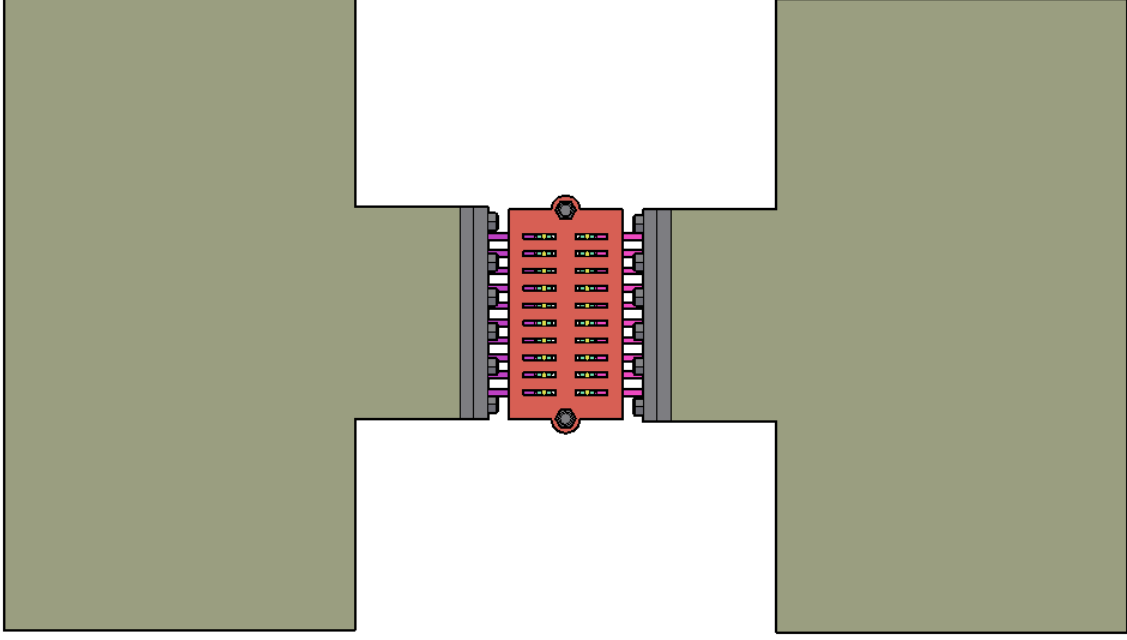
Şekil 2.75. TETOD



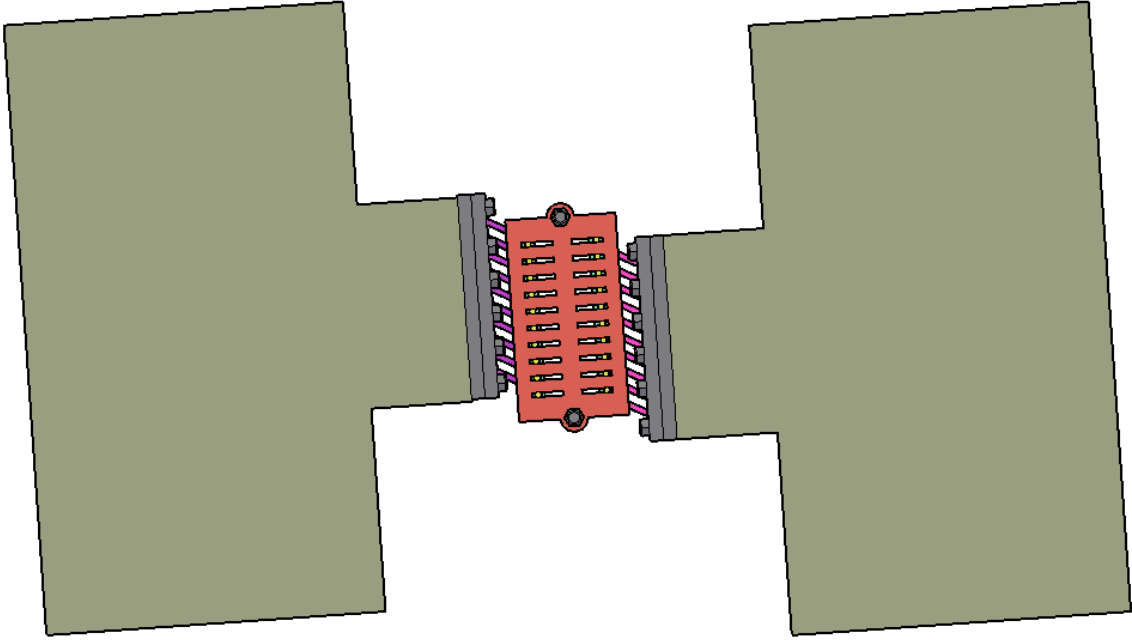
Şekil 2.76. TETOD üstten görüntüsü

TETOD'un boşluklu perde duvar sistemi içerisindeki yerleşimi, Şekil 2.77'de verilmektedir. TETOD'un özgün tasarımı sayesinde iki adet çelik kulak takımı kullanılarak, daha fazla üçgen levhanın kullanılabilmesine olanak sağlanmaktadır. Her bir kulak takımı, bağ kirişi kollarına rijit bağlı çelik plakalara civatalar vasıtasıyla monte edilmektedir. Çelik kulakların eğilmesi için kullanılan pimlerin rahat hareket etmesinin yanında yük aktarımı sağlayan iki adet ray plakası, kirişin ön ve arka yüzeyine simetrik olacak şekilde yerleştirilmektedir. Şekil 2.72'de olduğu gibi yatay yük etkisinde, kiriş kollarından biri yukarı yönlü hareket ederken diğeri ise aşağı yönlü hareket etmekte ve kiriş kolları arasında 'Δ' değeri kadar bir yerdeğiştirme meydana gelmektedir. Kiriş kollarına monte edilen çelik kulak takımları, kiriş kolları ile beraber hareket ettiği için çelik kulak takımlarının pim merkezleri arasındaki dikey mesafede buna bağlı olarak değişmektedir. Çelik kulakların dikey hareketinin pimlerin hareket ettiği ray plakaları ile sınırlandırılması, çelik kulakların eğilme davranışı yapmaya zorlamaktadır. Perde duvaralar her kat seviyesinde eşit dönme yapması sebebiyle kiriş kollarının ve dolayısı ile çelik kulak takımlarının yerdeğiştirme miktarı da eşit olmaktadır. Çelik kulak takımlarının ters yönlerde eşit yerdeğiştirme hareketi yapması sebebiyle ray plakaları çelik kulaklara bağlı hareket ederek, yükleme süresince kiriş kollarına paralel kalmaktadır (Şekil 2.78). Tersinir yüklerde, çelik kulak takımlarının hareket yönlerinin değişmesi ve her iki kiriş kolu arasında yük dengesinin oluşması sebebiyle davranış biçimi

tahterevalliye benzetilmiş ve bu şekilde oluşan bağ kirişi ‘tahterevalli’ tipi bağ kirişi (TETOD) olarak adlandırılmıştır



Şekil 2.77. TETOD'un sistem içerisindeki yerleşimi



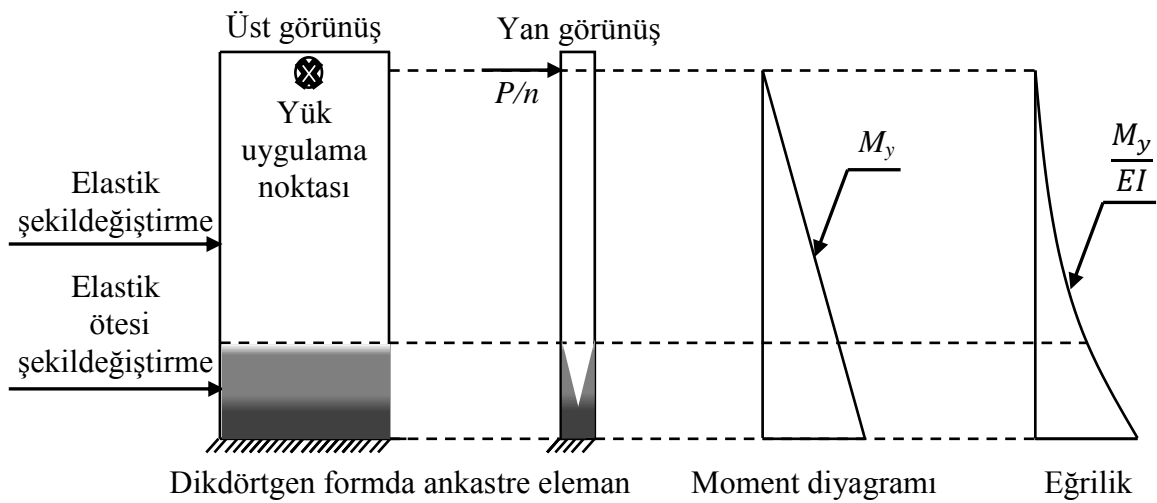
Şekil 2.78. TETOD'un sistem içinde şekil değiştirmiş durumu



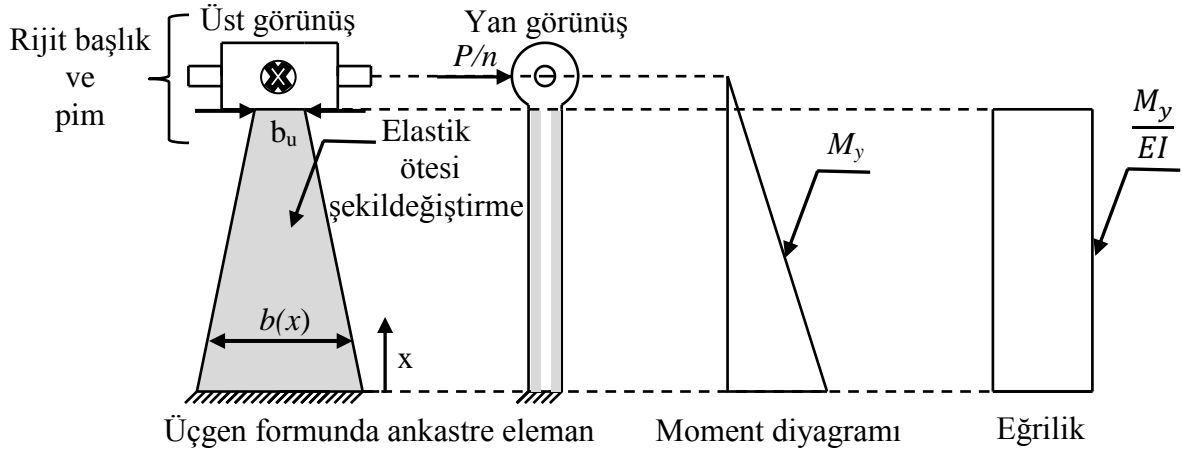
## 2.15. Tahterevalli Tipi Bağ Kirişinin (TETOD) Tasarım Esasları

### 2.15.1. Sönümleyici Üçgen Çelik Levhaların Tasarımı

Taşıyıcı sistemlerin tasarımında olduğu gibi enerji sönümleyicili sistemlerin tasarımında da dikkat edilmesi gereken en önemli husus, sönümleyici elemanların sünek davranış ortaya koyabilmesini sağlamaktır. Metalik sönümleyici sistemlerde kullanılan metal levhalar genellikle eğilme etkisine maruz ankastre kirişe benzer olarak tasarlanmaktadır. Ankastre kiriş gibi tasarlanan metal levhaların açıklık boyunca dikdörtgen şeklinde olması durumunda eğrilik ve elastik ötesi şekildeğişirmeler mesnet bölgesinde yoğunlaşmaktadır (Şekil 2.79) (Demir, 2018). Bu durumda sistemin erkenden göçmesi olası olmakla beraber talep edilen süneklik karşılanamamaktadır. ADAS'ta X formunda ve T-ADAS'ta üçgen formda kullanılan sönümleyici metal levhalar, elastik ötesi şekildeğişirmelerin yaklaşık levha uzunluğu boyunca eşit yayılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarımda üçgene benzer bir formun kullanılması durumunda eğriliğin levha boyunca eşit olması ve hasarın da levha açıklığı boyunca eşit dağılım göstermesi sağlanabilmektedir (Şekil 2.80). Böyle bir tasarım formu ile dikdörtgen formdaki metal levhalara nazaran ani göçme engellenebilmekte ve talep edilen sünek davranış sağlanabilmektedir. Tahterevalli tipi bağ kirişlerinde kullanılacak olan sönümleyici çelik levhaların boyutlandırılması için Tsai vd. (1993) tarafından önerilen tasarım yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 2.79. Dikdörtgen formdaki ankastre elemanlarda meydana gelen şekildeğişirmeler (Demir, 2018)



Şekil 2.80. Üçgen formda ankastre elemanlarda meydana gelen şekil değişimleri (Demir, 2018)

Tsai vd. (1993), sönümleyici kapasite tasarımı çerçevesinde sönümleyici levhaların tasarımı için hesap yöntemi geliştirmişlerdir. Serbest ucundan tekil yüke maruz kalan ankastre elemanlardaki moment, serbest uca doğru doğrusal olarak azalmaktadır. Kiriş boyutlarının moment diyagramına uyumlu olarak değişmesi ekonomik ve sünek bir tasarıma olanak sağlamaktadır.

TETOD içerisindeki her bir çelik kulak takımında  $n$  adet çelik kulak bulunmaktadır. Her bir kiriş koluna gelen  $P$  kesme kuvvetinden her bir çelik kulağa aktarılan kuvvet  $P/n$ 'dir.  $l$ , çelik kulakların moment kolu ve  $x$  çelik kulak tabanına olan mesafe olmak üzere çelik kulaklara etkiyen moment,  $M(x)$ , ve kesme kuvveti,  $V(x)$ , aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilir.

$$M(x) = \frac{P(l-x)}{n} \quad (2.7)$$

$$V(x) = \frac{P}{n} \quad (2.8)$$

Plastik mafsal oluşan dikdörtgen bir kesitte normal kuvvet,  $N(x)$ , moment,  $M(x)$ , ve kesme kuvveti,  $V(x)$ , arasında aşağıdaki şartın sağlanması gerekmektedir (Gray, 2012):

$$\frac{M(x)}{V(x)} + \left( \frac{N(x)}{N_p(x)} \right)^2 + \frac{\left( \frac{V(x)}{V_p(x)} \right)^4}{\left[ 1 - \left( \frac{N(x)}{N_p(x)} \right)^2 \right]} = 1 \quad (2.9)$$

burada  $M_p(x)$ ,  $V_p(x)$  ve  $N_p(x)$  kesitte plastik mafsall oluşumuna neden olan kuvvetlerdir ve dikdörtgen kesitler için aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$M_p(x) = \frac{b(x)h^2}{4} \sigma_y \quad (2.10)$$

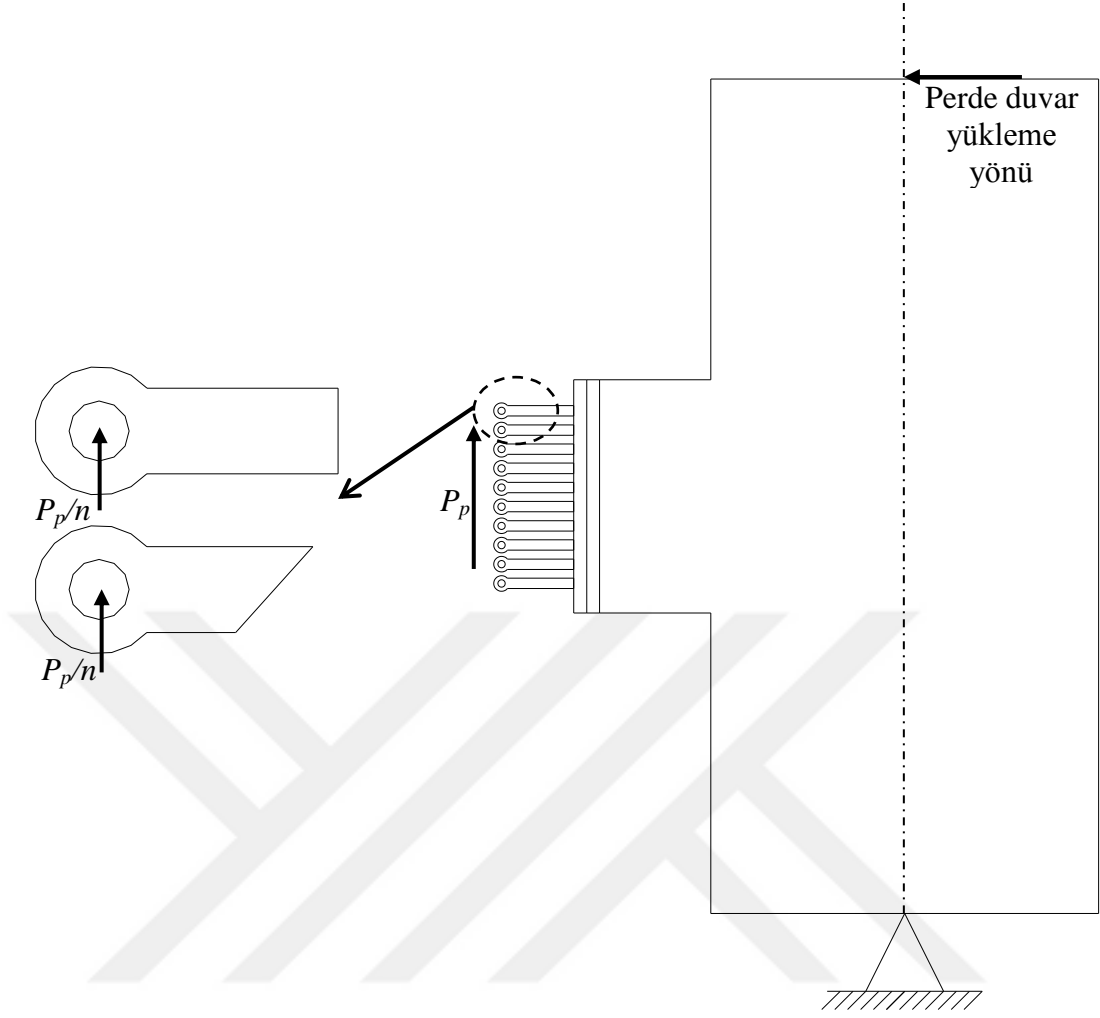
$$V_p(x) = \frac{b(x)h}{2} \sigma_y \quad (2.11)$$

$$N_p(x) = b(x)h\sigma_y \quad (2.12)$$

Burada  $h$ , çelik kulak kalınlığını ifade etmektedir. TETOD'ta kullanılan çelik kulakların bir ucundan serbest şekilde dönmesi, ray plakası ile sağlanmaktadır. Serbest uçtan eğilmeye zorlanacak kulakların serbest ucunun ray plakasında bırakılan oluk içerisindeki yatay hareketi serbest bırakılmaktadır. Bu sebeple eğilme sırasında çelik kulaklara yalnızca moment ve kesme kuvveti etkiyecek olup normal kuvvet ihmal edilebilecek kadar küçük kalacaktır. Bu durumda (2.9) denklemi yeniden düzenlenir ve (2.7), (2.8), (2.9) ve (2.10) denklemleri yerine yazılırsa:

$$\frac{4P_p(l-x)}{nb(x)h^2\sigma_y} + \left( \frac{2P_p}{nb(x)h\sigma_y} \right) \quad (2.13)$$

denklemi elde edilmektedir. Burada  $\sigma_y$  çeliği akma dayanımını,  $b(x)$  kulak genişliğini,  $h$  kulak kalınlığını,  $l$  kulak uzunluğunu (moment kolu) ve  $P_p$  çelik kulakların akma dayanımına ulaştığı anda kiriş kolunda oluşan kesme kuvvetidir (Şekil 2.81). (2.13) denklemi kullanılarak kiriş kolunda oluşan kesme yüküne göre bir çelik kulak takımı için gerekli olan ön boyutlandırma ve levha sayısı belirlenebilmektedir.

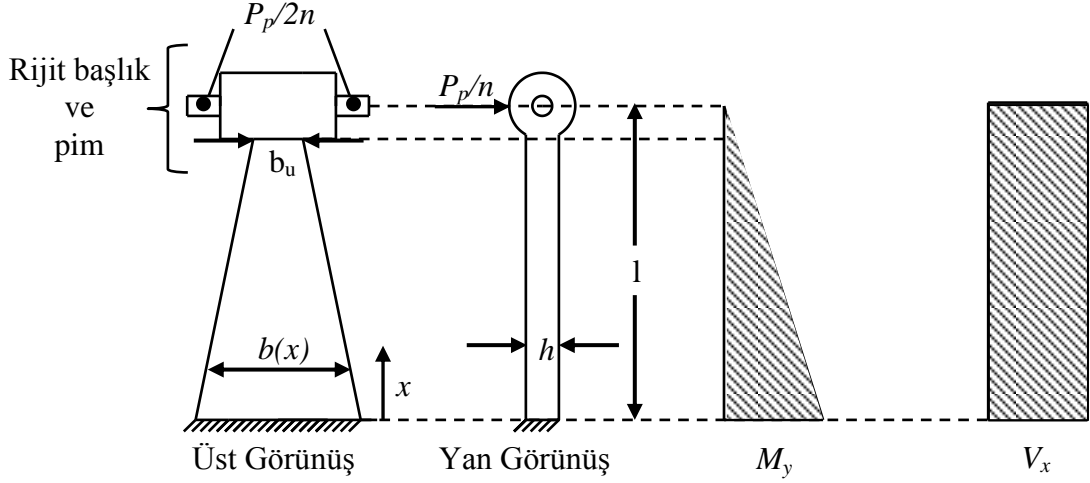


Şekil 2.81. Yatay yük etkisinde kiriş koluna gelen kesme yükü ve çelik kulaklara aktarımı

Kiriş kollarına gelen kesme kuvveti her bir çelik kulağa pimler vasıtası ile aktarılmaktadır. Her bir kulak takımında  $2n$  adet pim bulunmaktadır. Bu sebeple her bir pime gelen yük  $P_p/2n$  kadar olmaktadır. Çelik kulaklara gelen yükün dağılımı ve kesit tesirleri, Şekil 2.117’de verilmektedir.

TETOD’un elastik rijitliği, sönümleyici levhaların elastik yük taşıma kapasitesi ile doğru orantılıdır. Dikdörtgen kesitli bir sönümleyici levhada en dış lifte akma birim şekildeğiştirmesinin meydana geldiği andaki moment ( $M_y$ ), elastik mukavemet momenti yardımı ile aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$M_y(x) = \frac{b(x)h^2}{6} \sigma_y \quad (2.14)$$



Şekil 2.82. Çelik kulaklara gelen yükün dağılımı ve kesit tesirleri

(2.14) denkleminde  $x=0$  olması durumunda,  $b(x)=b_t$  kulak genişliği olmak üzere, çelik kulakların en dış lifinde akma birim şekildeğiştirmesinin meydana geldiği anda kiriş koluna gelen kesme yükü ( $P_y$ ), (2.7) denklemi (2.14) denkleminde yerine konarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$P_y = \frac{nb_t h^2}{6l_k} \sigma_y \quad (2.15)$$

Kesitlerde plastik mafsall oluşumunun meydana gelmesi ile kiriş koluna gelen kesme yükü ( $P_p$ ) ise,

$$P_p = \frac{nb_t h^2}{4l_k} \sigma_y \quad (2.16)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Çelik kulak boyunca eğriliğin ( $\Phi$ ) sabit olması, levha ucuna etkiyen yüke karşılık gelen yerdeğiştirmenin ( $\delta$ ) bulunmasında büyük kolaylık sağlamaktadır. Eğilmiş metal bir kulağın şematik görünümü Şekil 2.83'te verilmektedir. Şekil 2.83'teki geometrik bağıntılardan faydalanarak levha ucunda meydana gelen yerdeğiştirmeyi, yaklaşık olarak;

$$\delta = \Phi l_k l_k \quad (2.17)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Düzlem kesitlerin düzlem kaldığı kabul edilerek, (2.18) denklemleri kulağın en dış lifindeki birim şekildeğiştirmenin ( $\varepsilon$ ) bir fonksiyonu olarak yazıldığında, levha ucunun yaptığı düşey yerdeğiştirmeyi veren ifade aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

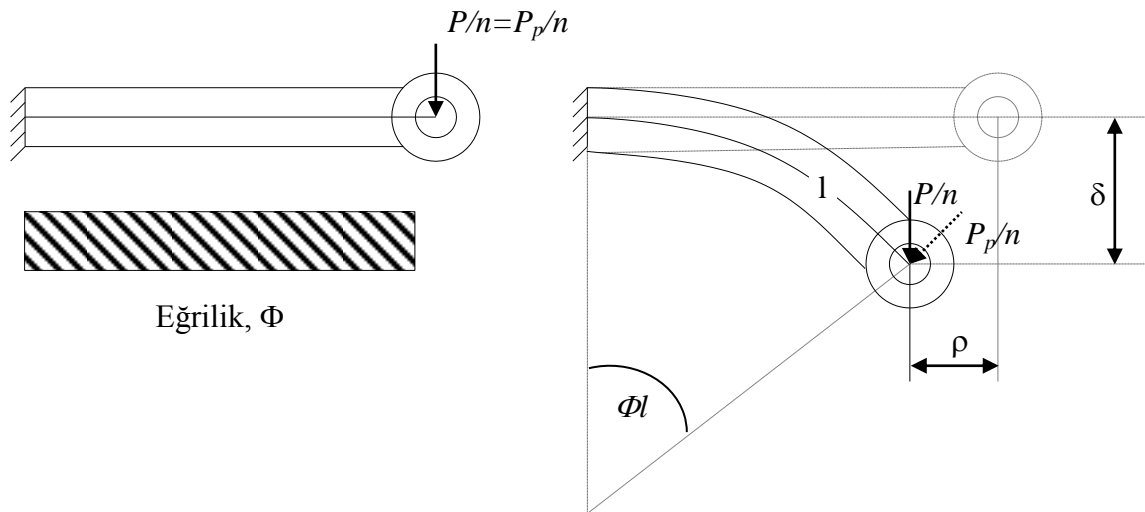
$$\delta = \left( \frac{2\varepsilon}{h} \right) l_k^2 = \frac{2\varepsilon l_k^2}{h} \quad (2.18)$$

Çelik kulakta en dış lifte akma birim şekildeğiştirmesinin meydana geldiği andaki yerdeğiştirme kullanılan malzemenin akma birim şekildeğiştirmesinin ( $\varepsilon_y$ ) bilinmesi durumunda aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\delta = \frac{2\varepsilon_y l_k^2}{h} \quad (2.19)$$

TETOD içerisinde kullanılan bütün çelik kulaklar benzer geometrik özelliklerde olduğu için, tek bir kulak takımının rijitliği ( $k_E$ ) şöyle hesaplanabilir:

$$k_E = \left( \frac{P_y}{\delta_y} \right) = \frac{nb_l \sigma_y}{6\varepsilon_y} \left( \frac{h}{l_k} \right) = \frac{nb_l E h^3}{6l_k^3} \quad (2.20)$$



Şekil 2.83. Eğilmiş bir metal kulağın şematik görünümü (Gray, 2012)

Metal kulakların süneklığı, TETOD'un elastik aşamadan sonraki performansını belirleyen en önemli parametredir. TETOD'ta metal kulaklar, perde duvar ayaklarına bağlı kiriş kollarının birbirine göreli hareketi neticesinde ray plakaları vasıtası ile eğilmeye zorlanmaktadır. Metal kulaklar, ne kadar eğilirse eğilsin, pimler ray plakalarındaki oluklarda serbest hareket ettiği için uçlarından rahatlıkla dönebilmektedir. Bu durumda metal kulakları eğilmeye zorlayan  $P/n$  kuvveti, Şekil 2.83'te olduğu gibi kirişin bağlı olduğu perde yüzeyine paralel kalacaktır. Eğriliğin metal kulak uzunluğu boyunca sabit olduğu kabulü yapılarak,  $P/n$  (kiriş yüzeyine dik kuvvet) kuvveti,  $P_p/n$  kuvvetinin (kulak eğriliğine bağlı olarak metal kulak kesitine paralel kuvvet) bir fonksiyonu olarak,

$$P = \frac{P_p}{\cos(\Phi l_k)} \quad (2.21)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. (2.17) denklemini (2.21) denkleminde yerine yazılırsa TETOD'un bir kulak takımından kiriş koluna aktarılan akma yükünden sonraki yük değeri, (2.22) denklemini ile hesaplanmaktadır.

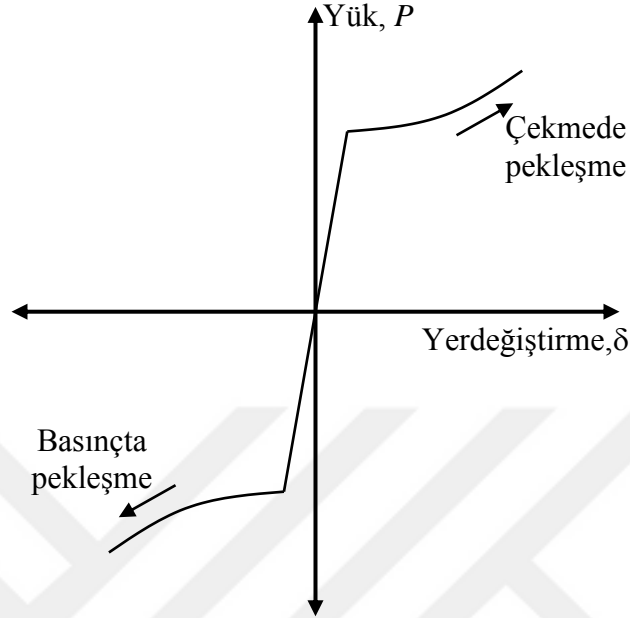
$$P = \frac{P_p}{\cos\left(\frac{2\delta}{l_k}\right)} \quad (2.22)$$

Şekil 2.83'te görüldüğü gibi metal kulaklar eğildikçe, eğriliğe bağlı olarak metal kulakların uç kısımlar  $\rho$  değeri kadar geriye doğru hareket etmektedir. (2.22) denkleminde benzer şekilde geometriye bağlı olarak  $\rho$  değeri, (2.23) denklemini ile elde edilmektedir.

$$\rho = l_k - \frac{l_k^2 \sin\left(\frac{2\delta}{l_k}\right)}{2\delta} \quad (2.23)$$

Bu çalışmada önerilen yaklaşık hesap yöntemine göre TETOD'un yük yerdeğiştirme ilişkisini gösteren zarf eğrisi Şekil 2.84'te verilmektedir. Burada TETOD'un akma yükünden sonraki performansı metal kulakların geometrik ve mekanik özelliklerinin sağlayacağı süneklığe bağlıdır. Daha önce de bahsedildiği gibi, metal kulak geometrisinin, meydana gelecek olan birim şekildeğiştirme dağılımının levha boyunca eşit olmasını temin edecek şekilde

tasarlanması kulakların kırılmasını geciktirmektedir. Bu sayede pekleşmesinden de yararlanılarak sistemin yük taşıma kapasitesi ve sünekliği artmaktadır.



Şekil 2.84. Sunulan hesap yöntemine göre TETOD'un yük-yerdeğiştirme ilişkisini gösteren zarf eğrisi

### 2.15.2. Tahterevallli Tipi Bağ Kirişi-Perde Duvar Arasındaki Yük Aktarımı

Şekil 2.72'de olduğu gibi perde duvarlar  $\theta$  açısı kadar dönme yaptığında, kayma ekseninde her bir perde duvara bağlı bağ kirişi kolları arasında  $\Delta$  kadar yerdeğiştirme meydana gelmektedir.  $\theta$  açısı arttıkça kiriş kollarının birbirine paralel olarak görel hareketi sonucu  $\Delta$  yerdeğiştirmesi de artmaktadır.  $l_b$  bağ kirişi uzunluğu,  $l_w$  perde duvar genişliği,  $H_w$  perde duvar yüksekliği (Deney elemanı için mafsalsal merkezleri arası mesafe dikkate alınır) olmak üzere  $\Delta$  yerdeğiştirmesi,

$$\Delta = \frac{(l_b + l_w) \sin \theta}{\cos \theta} \quad (2.24)$$

denklemleri ile hesap edilmektedir.  $\Delta$  yerdeğiştirmesi, ray plakası sayesinde iki kiriş koluna bağlı kulak takımlarına yarı yarıya bölüştürülmektedir. Bu durumda her bir kulağın perde duvarların dönmesine bağlı yerdeğiştirme değeri şu şekilde olmaktadır.



$$\delta_{\theta} = \frac{(l_b + l_w) \sin \theta}{2 \cos \theta} \quad (2.25)$$

Metal kulaklar eğildikçe eski konumuna göre  $\rho$  değeri kadar pim merkezinden uzaklaşmaktadır.  $\rho$  değeri,  $\theta$  dönmesine bağlı olarak kulakların düşey yerdeğiştirme değerini ihmal edilebilir ölçüde bir miktar daha artırmaktadır.  $\rho$  değeri  $\delta_{\theta}$  değerine bağlı olmak üzere, her bir kulağın kiriş koluna paralel yaptığı nihai deplasman değeri,

$$\delta = \frac{(l_b + l_w) \sin \theta}{2 \cos \theta} + \rho \sin \theta \quad (2.26)$$

denklemini ile elde edilmektedir.

Metal kulakların eğilmesi ile kiriş kollarına kesme kuvveti ve moment aktarılmaktadır. Yapılan bu çalışmada betonarme bağ kirişleri ile tahterevalli tipi bağ kirişi arasında kıyaslama yapılabilmesi için kiriş kollarına gelen kesit tesirlerinin birbirine yakın olması gerekmektedir. Kiriş kollarına gelen kesit tesirlerinin sağlanması durumunda perde duvarlara aktarılan kesit tesirleri de sağlanmış olacaktır.

Tahterevalli tipi bağ kirişi-perde duvar arasındaki yük aktarımının belirlenebilmesi için ideal sınır koşulları ve sistemin çalışma şeklinin bilinmesi gerekmektedir. Betonarme bağ kirişlerinin açıklık ortasındaki moment, sıfır olarak kabul edilmektedir. Kirişin bu kesiti sadece kesme kuvvetine ve ihmal edilebilir ölçüde normal kuvvete maruz kalmaktadır. Tahterevalli tipi sönümleyici eleman, bağ kirişi orta bölgesine yerleştirildiğinde bir mafsal eleman olarak davranacağı düşünülebilir. Fakat deneysel ve sayısal çalışmalar sonucu bu bölgenin bir mafsal gibi çalışmadığı görülmüştür. Bu sebeple, çelik kulakların ray plakası içerisinde serbest hareketi dikkate alınarak pim ve ray arasının kayıcı mesnet olarak kabul edilmiştir. Böylece perde duvarlar iki ayrı parça olarak çalışmakta ve hesaplar tek bir perde duvar üzerinde yapılabilmektedir.

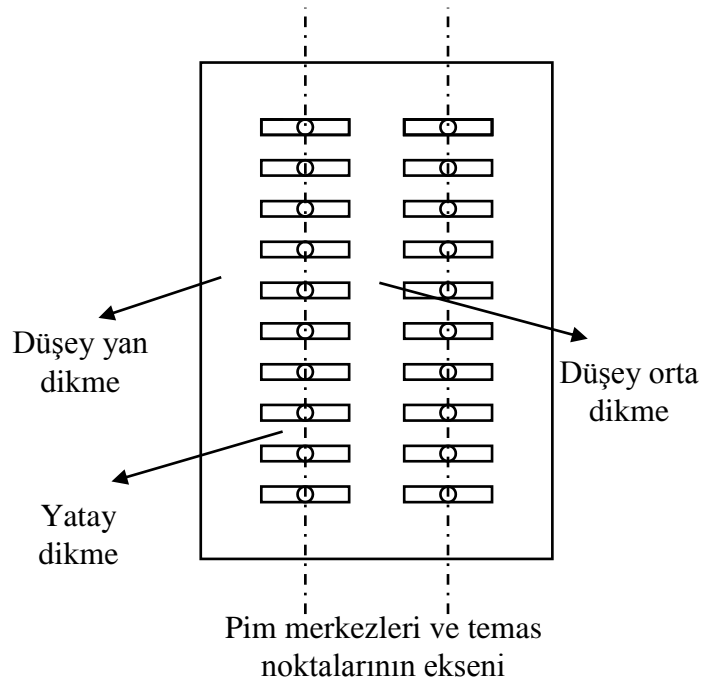
Deney elemanlarının üretimi için tercih edilen eleman boyutlarına, sınır şartlarına ve TETOD'un anlatılan özelliklerine bağlı olarak sistemin kesit tesiri diyagramlarının oluşturulması gerekmektedir. Şekil değiştirmemiş sistem üzerinden yapılan hesaplara göre, metal kulak takımında  $P_p$  yükünün oluşması için gerekli olan perde duvar itme yükü,

$$P = \frac{P_p \left( l_{cb} + \frac{l_w}{2} \right)}{H_w \cos \left( \frac{2\delta}{l_k} \right)} \quad (2.27)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada  $P$ ,  $H_w$ ,  $l_{cb}$ ,  $l_w$  sırasıyla, tek bir perde duvara gelen yatay yük, perdenin mafsalsal merkezleri arası dikkate alınarak hesaplanan yüksekliği, metal kulaklara ait pim merkezinden perde yüzeyine olan mesafe ve perde duvar genişliğidir. Perde duvar boyutlarına göre yerdeğiştirmelerin küçük olması sebebiyle şekil değiştirmiş sisteme göre hesaplanacak kesit tesirlerinin şekil değiştirmemiş sisteme göre hesaplanan kesit tesirleri arasındaki farkın ihmal edilebilir seviyede olacağı düşünülmüştür.

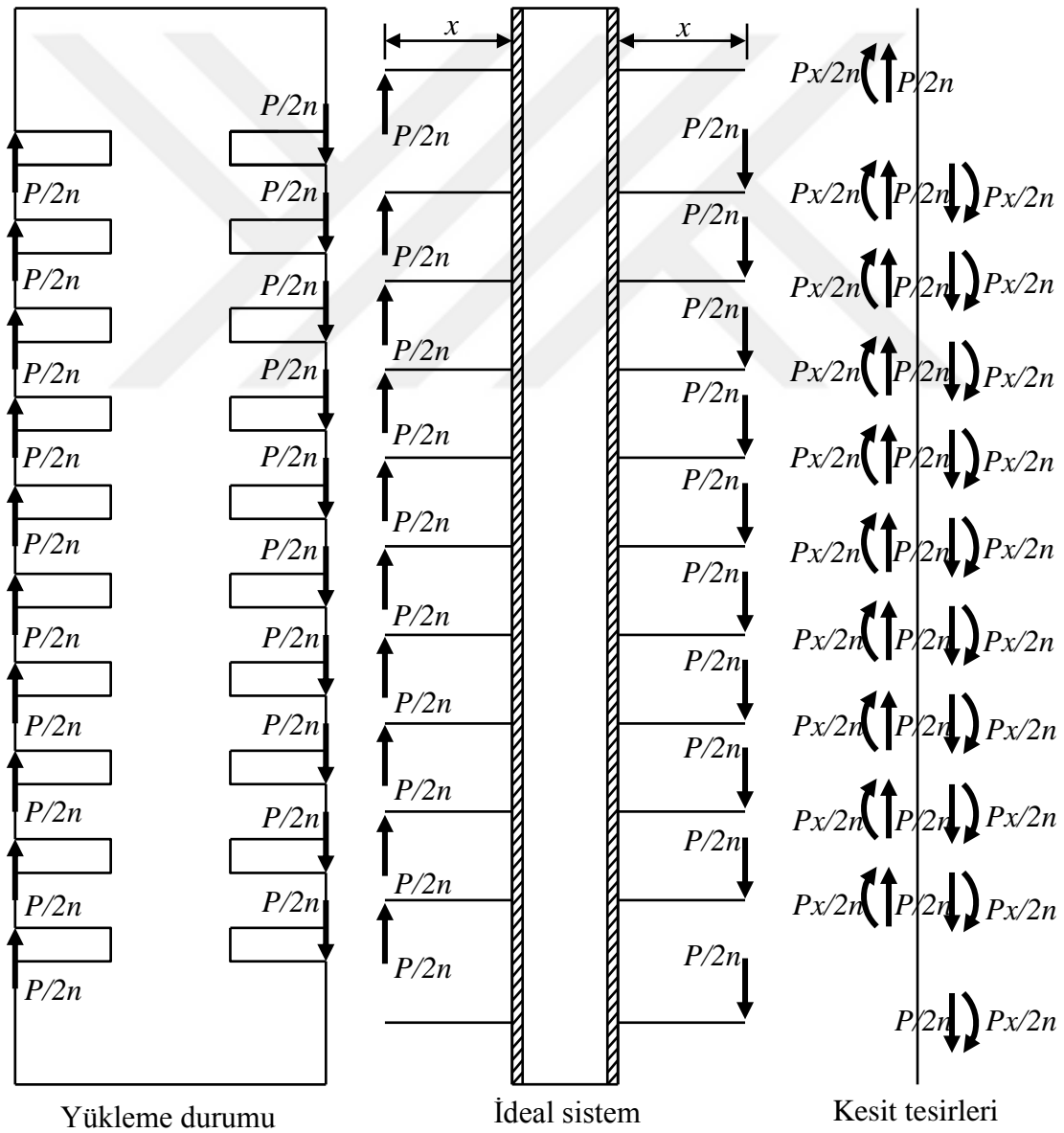
### 2.17.3. Ray Plakasının Tasarımı

Ray plakasında metal kulaklara yükü aktaran pimlerin serbest hareketine imkan veren, pim çapı kadar yüksekliğe ve metal kulakların eğriliğine olanak sağlayacak uzunluğa sahip oyuklar açılmaktadır. Metal kulakların aksenal yüke maruz kalmaması için bu oyukların yeterli uzunlukta oluşturulması gerekmektedir. Oyukların açılması ile beraber plaka da düşey ve yatay dikmeler oluşmaktadır (Şekil 2.85).



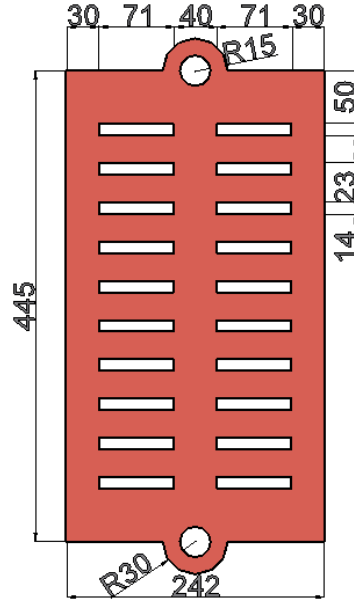
Şekil 2.85. Ray plakasının genel görünümü

Pimlere gelen  $P/2n$  (her metal kulakta 2 adet pim bulunmaktadır) yükü yatay dikmelerden düşey orta dikmeye aktarılmaktadır. Perde duvarın yükleme yönüne bağlı olarak, bir perdeye ait pimlere gelen yükler aşağı yönde, diğer perdeye ait pimlere gelen yükler yukarı yönlü olmakta ve ray plakasının orta düşey dikmesi  $2P$  kesme yüküne maruz kalmaktadır. Bu durumda yatay dikmelerin ideal sınır şartına göre yük taşıma kapasitesinin ve düşey orta dikmesinin kesme dayanımının bilinmesi gerekmektedir. Yatay dikmelerin sadece düşey orta plaka ile yük aktarımı içerisinde girmesi sebebiyle pim temas noktası ile birleşim noktası arası konsol eleman gibi davranış sergilemektedir. Pim merkezleri ile düşey orta plaka arasındaki yük etkileşimi ve ideal sınır şartı Şekil 2.86'da gösterilmektedir.



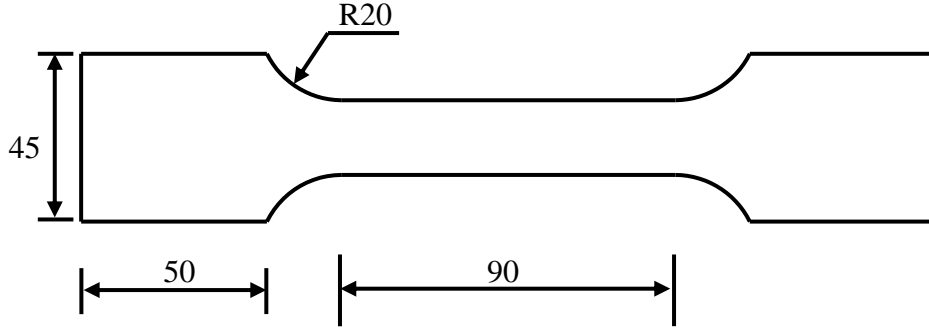
Şekil 2.86. Ray plakasının idealleştirilmesi

Pim merkezlerinin düşey orta plakadan  $x$  kadar mesafede bulunması durumunda her bir yatay dikmeden düşey orta plaka yüzeyine  $P/2n$  kadar kesme kuvveti ve  $Px/2n$  kadar moment aktarılmıştır. Bu çalışma kapsamında sağ perde duvarda 10 adet ve sol perde duvarda 10 adet çelik kulağın kullanımına olanak sağlayacak şekilde tasarlanan ray plakasının görünümü Şekil 2.87’de verilmektedir.

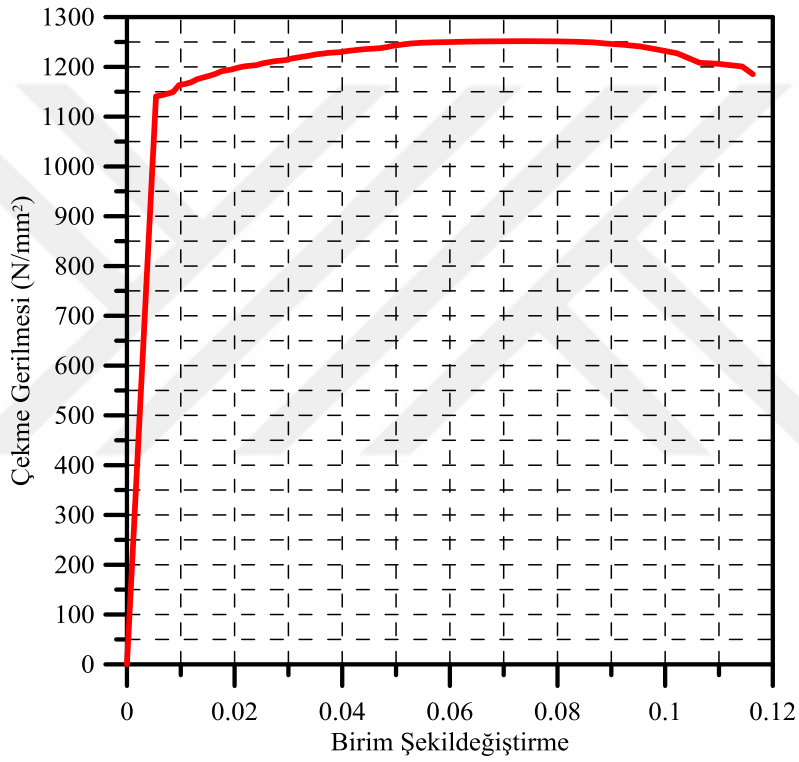


Şekil 2.87. Deney için tasarlanan ray plakası

Ray plakası için aşınma dayanımı ve akma dayanımı yüksek olarak imal edilen Hardox-400 tipi sertleştirilmiş çelik tercih edilmiştir. Şekil 2.87’de verilen ölçülere ve ideal sistem kabulüne göre ray plakasının taşıma kapasitesinin belirlenebilmesi için kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Hardox-400 sınıfı sertleştirilmiş çeliğin deney ortamındaki gerçek dayanımını tespit etmek için Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında çelik çekme deneyi yapılmıştır. Ray plakası için kullanılan Hardox-400 tipi sertleştirilmiş çeliğin çekme deneyi için ASTM A370 standardına uygun olarak Şekil 2.88’de verilen boyutlara sahip 6 mm kalınlığında çelik çekme kuponları üretilmiştir. Çekme deneyi sonucu elde edilen çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 2.89’da verilmektedir. Çekme deneyine tabi tutulan deney kuponunun deney öncesi ve deney sonrası görünümü ise Şekil 2.90’da verilmektedir. Hardox-400 tipi sertleştirilmiş çeliğin akma dayanımı,  $1150 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.88. ASTM A370'e göre Hardox-400 sınıfı sertleştirilmiş çelik için üretilen çekme kuponu geometrik formu

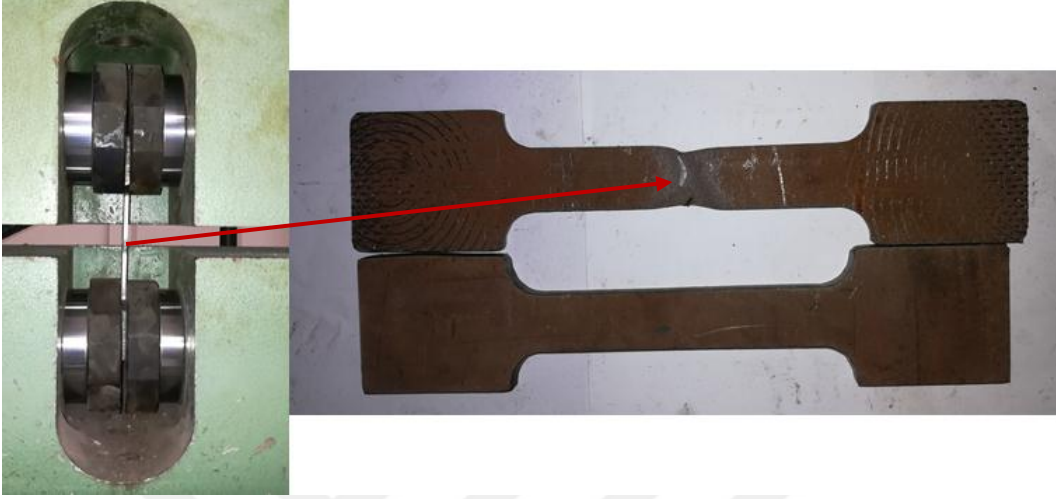


Şekil 2.89. Hardox-400 sınıfı sertleştirilmiş çeliğin çekme gerilmesi-birim şekildeğiştirme grafiği

$h_r$  yatay dikme yüksekliği olmak üzere, dikdörtgen enkesite sahip yatay dikmelerin en büyük eğilme gerilmesi değeri tarafsız eksenin kesit ortasından geçtiği kabul edilerek,

$$\sigma = \frac{M_r h_r}{2I_r} \quad (2.28)$$

denklemleri ile hesap edilmektedir. Burada  $\sigma$ ,  $M_r$  ve  $I_r$  sırasıyla, ray plakası için kullanılan malzemenin akma gerilmesi dayanımı, yatay dikmeden düşey orta dikme yüzeyine aktarılan  $Px/2n$  momenti ve yatay dikmenin atalet momentidir.



Şekil 2.90. Hardox-400 sınıfı sertleştirilmiş çeliğe ait çekme kuponunun aksel çekme testi öncesi ve sonrası görünüm

Yatay dikmeden düşey orta dikme yüzeyine aktarılan  $P/2n$  kesme kuvvetleri altında yatay dikmede oluşan ortalama kesme gerilmesi ise,

$$\tau_r = \frac{T_r}{b_r h_r} \quad (2.29)$$

denklemleri ile belirlenmektedir. Burada  $b_r$  ve  $T_r$ , yatay dikmenin yani ray plakasının kalınlığını ve yatay dikmeden düşey orta dikme yüzeyine aktarılan  $P/2n$  kesme kuvvetini ifade etmektedir. AISC 360-10'a göre çeliklerin kesme dayanımı, akma dayanımının %60'ı mertebelerinde kabul edilmektedir. Tasarlanan ray plakasının ray uzunluğu 71 mm'dir. Ray içerisinde hareket eden çelik kulak pimlerinin sistemdeki en büyük yerdeğiştirme dikkate alınarak düşey orta dikmeye olan mesafesi 50 mm'de sınırlandırılmaktadır. Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında test edilen Hardox-400 sınıfı sertleştirilmiş çeliğin akma dayanımına ve pimlerin düşey orta dikmeden olan uzaklığı 50 mm olması kabulüne göre, tasarlanan ray plakasının eğilmeye ve kesmeye göre taşıyabileceği nihai yük (kiriş kollarına aktarılabilecek en büyük yük) değerleri sırasıyla, 1216 kN ve 9522 kN olarak hesap edilmiştir.

Plakalar halinde bulunan çelik sac levhaların istenilen boyut ve geometrik formlarda parçalara ayrılabilmesi için lazer kesim ve su jeti kesim olmak üzere 2 ayrı kesim yöntemi bulunmaktadır. Yüksek ısının çelikte sertleşme meydana getirmesi sebebiyle plazma kesim, hassas elemanlarda pek tercih edilmemektedir. Bunun yanında su jeti kesimi ise her yerde bulunmamakta ve maliyeti plazma kesime kıyasla oldukça yüksektir. Bu çalışmada çelik parçaların üretimi için plazma kesim tercih edilmiştir. Ray plakalarındaki ray yükseklikleri 14 mm olarak tercih edilmiştir. Plazma kesim sonucu oluşan çapakları pürüzsüz almak için Hardox-400 sınıfı sertleştirilmiş çelik plakalarda 12 mm genişliğinde oluklar açılmıştır (Şekil 2.91).



Şekil 2.91. Lazer kesim ile 12 mm genişliğinde oluklar açılan ray plakasının görüntüsü

Lazer kesim sonucu ortaya çıkan çapakların temizlenmesi ve oluk genişliğinin 14 mm'ye çıkarılabilmesi için ray plakası, Hardox-400 tipi sertleştirilmiş çelik için özel olarak temin edilen bıçak vasıtası ile düşey freze tezgahında torna edilmiştir

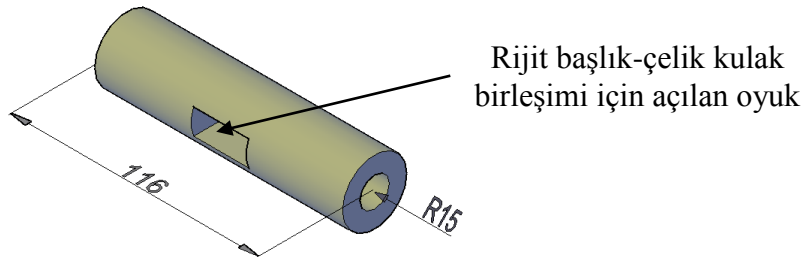
#### 2.15.4. Çelik Kulakların Tasarımı

TETOD'un davranışını etkileyen en önemli unsur, çelik kulakların boyutlarıdır. Enerji tüketimi, süneklik ve sönüm kapasitesinin artırılabilmesi için çelik kulakların çevrimsel

yükler altında taşıma gücünü erkenden kaybetmemesi gerekmektedir. Bu durum, metal kulaklarda eğilme etkisi ile meydana gelecek birim şekildeğişirmelerin levha boyunca dengeli dağılması ile sağlanması mümkün olmaktadır.

TETOD'u oluşturan çelik kulakların tasarımı için geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanına ait deney sonuçları referans alınmıştır. Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının akmaya başladığı yük değeri ve ilk rijitlik değeri sırasıyla, yaklaşık olarak 324 kN ve 17 kN/mm olarak hesap edilmiştir. Belirlenen bu yük değerine göre kiriş kesitinde oluşan kesme yükü yaklaşık 314 kN değerine eşit olmaktadır (Şekil 2.9'a göre hesap edilmiştir). Bu durumda, her bir çelik kulak takımındaki çelik kulaklarda plastik mafsalların oluşmaya başladığı yani kesitin tamamen aktığı yük değeri 314 kN olarak dikkate alınmıştır. Bu yük değeri aynı zamanda kiriş koluna aktarılan kesme kuvvetine tekabül etmektedir. Çelik kulaklarda en dıştaki lifte akma meydana gelene kadar olan bölge elastik kabul edilerek, bu bölgeye kadar olan rijitlik değeri elastik rijitlik olarak ifade edilmektedir. Ayrıca sistemin elastik rijitlik değeri, yaklaşık 21 kN/mm civarında olacak şekilde çelik kulakların tasarımı gerçekleştirilmiştir.

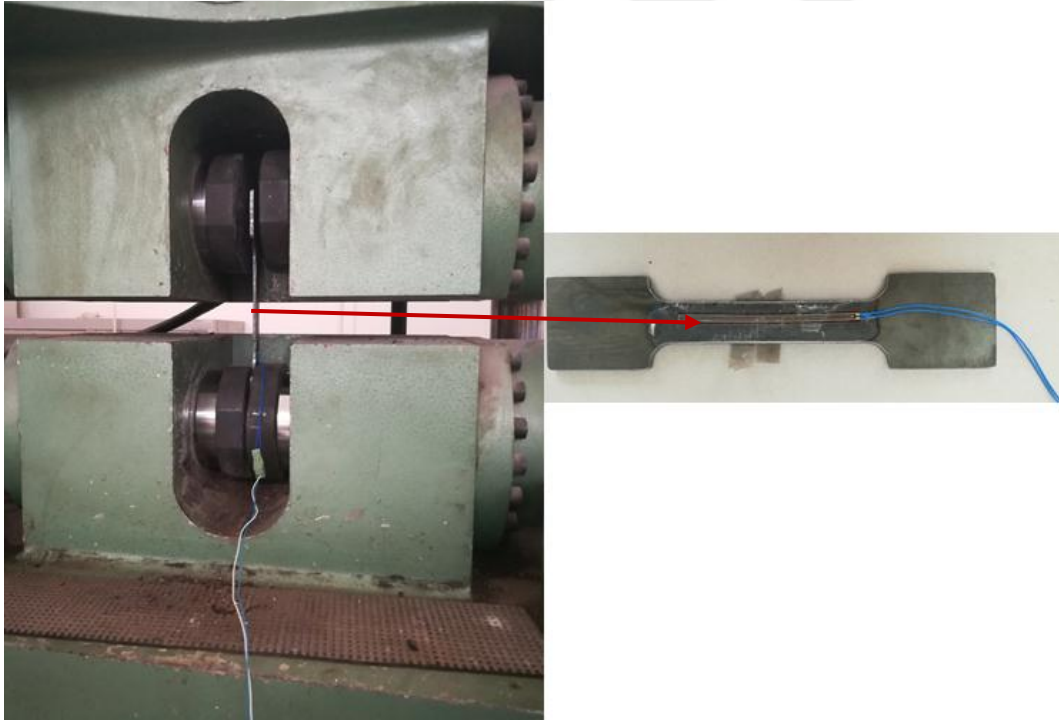
Sisteme gelen yükler, pimler vasıtası ile çelik kulaklara aktarılmaktadır. Pimlerin yükü metal kulaklara aktarabilmesi için pim-çelik kulak birleşim bölgesinin rijit olması gerekmektedir. Bu sebeple, rijit bir başlık ile gerekli olan birleşimin sağlanabileceği düşünülmüştür. Rijit başlık için Şekil 2.92'de verilen 30 mm çapında dolu çelik mil tercih edilmiştir. Yükün sağ ve sol pimlerin merkezinden geçen eksen üzerine dik olarak etki etmesi için çelik kulakların uç kısımlarının bu eksen üzerinde olması gerekmektedir. Tercih edilen rijit başlığa göre, çelik kulakların 15 mm'lik kısmı rijit bölgenin içerisinde kalmaktadır. Çelik kulak ile rijit başlığın birleşiminin kaynak ile gerçekleştirilmesi sebebiyle çelik kulakların yaklaşık olarak 5 mm'lik kısmı da kaynaklı bölge içerisinde kalarak rijit bölgeye dahil olmaktadır. Bu durumda, 1 uzunluğundaki bir çelik kulağın uçtan itibaren 20 mm'lik kısmı tamamen rijit bölge içerisinde bırakılmaktadır.



Şekil 2.92. Çelik kulaklarda rijit başlık boyutları



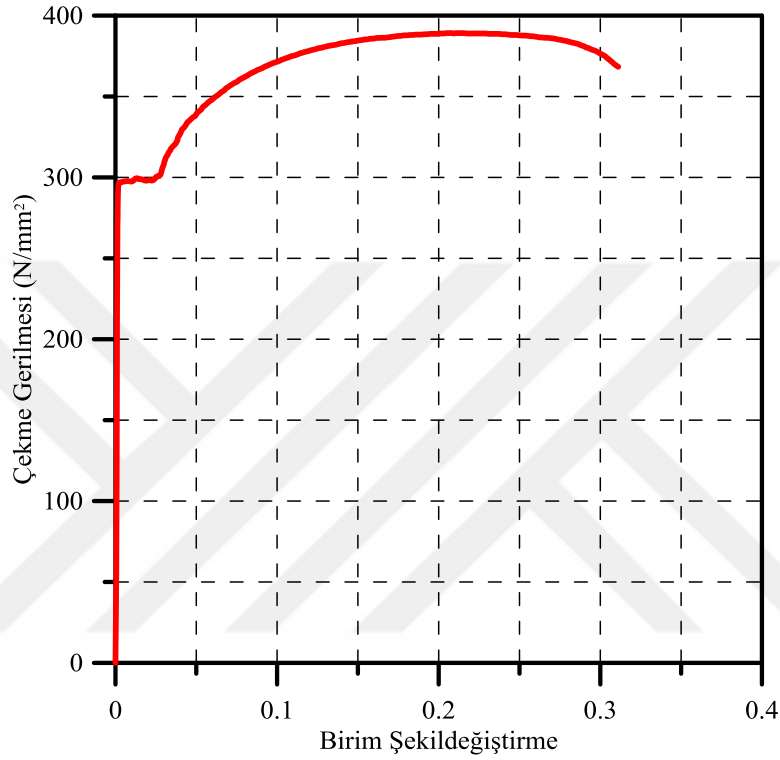
Çelik kulakların, TETOD için istenen dayanım ve rijitlik değerlerini sağlayabilmesi için kulak boyutlarının yanında kullanılan malzemenin elastisite modülü ve akma dayanımı değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple, çelik kulaklar için kullanılacak olan S235JR kalite yumuşak çeliğe ait hazırlanan kupon ile çelik çekme deneyi yapılmıştır. Daha önce ASTM A370 standardına uygun olarak Hardox-400 sertleştirilmiş çelik için tasarlanan çelik çekme kuponu dikkate alınarak S235JR kalitesi yumuşak çelik için çekme kuponu hazırlanmıştır. Çelik çekme test aletlerinde, çekme deneyinin ilk aşamalarında çekme kuponlarını sıkıştıran çeneler ve kupon arasında sıyrılma olmaktadır. Bu sıyrılma bazen çekme deneyinin sonuna kadar devam etmektedir. Çekme dayanımı üzerinde herhangi bir etkisi olmayan bu sıyrılmalar, birim uzama miktarını değiştirmesi sebebiyle birim şekil değiştirme oranını ve dolayısı ile elastisite modülünü büyük oranda değiştirmektedir. Bu sebeple, Şekil 2.93'te gösterildiği gibi çekme deneyi için hazırlanan çekme kuponuna birim şekil değiştirme ölçer takılarak, birim şekil değiştirme değerlerinin daha hassas elde edilmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 2.93. S235JR kalitesi çelik için çekme deneyi ve birim şekil değiştirme ölçer yerleştirilmesi

Çekme deneyi sonucu elde edilen çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 2.94'te verilmektedir. Çekme deneyine tabi tutulan deney kuponunun deney öncesi ve deney

sonrası görünümü ise Şekil 2.95'te verilmektedir. S235JR kalite çeliğin akma gerilmesi yaklaşık olarak  $296 \text{ N/mm}^2$  olarak belirlenmiştir. Birim şekildeğiştirme ölçer yardımıyla veri toplayıcıda okunan gerinim üzerinden kuponun akma birim şekildeğiştirme oranı 0.00213 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre S235JR kalite çelik için elastisite modülü ( $E$ ), yaklaşık  $140000 \text{ N/mm}^2$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.94. S235JR kalitesi çelik için gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği



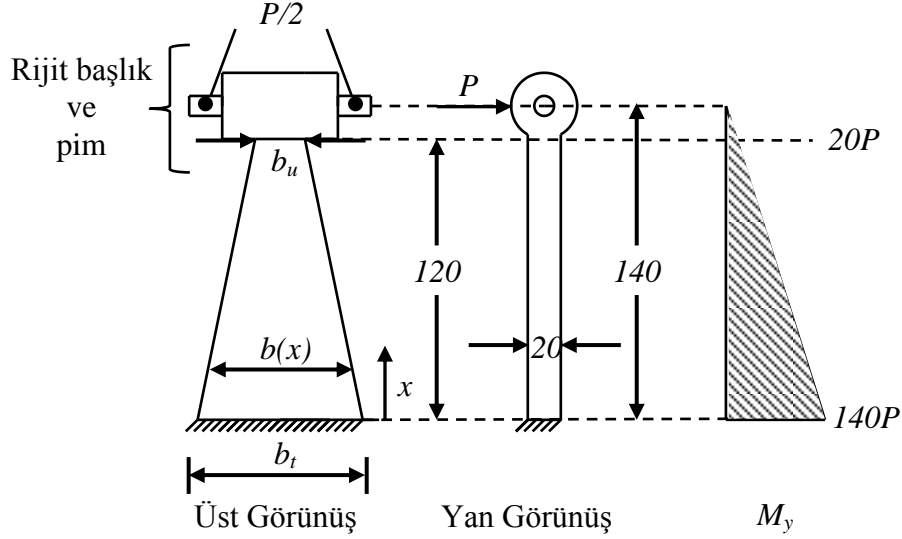
Şekil 2.95. Çekme deneyine tabi tutulan deney kuponunun deney öncesi ve deney sonrası görünümü

Çelik kulaklar için kullanılan S235JR kalitesi çeliğin akma dayanımı  $296 \text{ kN/mm}^2$  ve elastisite modülü  $140000 \text{ kN/mm}^2$  dikkate alınarak hedef plastikleşme dayanımı ve elastik rijitlik için çelik kulakların ön boyutlandırılması yapılmıştır. Buna göre kulak kalınlığı ( $h$ ) 20 mm, kulak uzunluğu ( $l_k$ ) 140 mm ve kulak genişliği ( $b_t$ ) 120 mm olarak tercih edilmiştir. Bu durumda çelik kulağa ait belirlenmeyen tek boyut  $b_u$  kulak uç genişliğidir.

Şekil 2.96'da, boyutları belirlenen çelik kulağın ucuna etkiyen yükün etkisinde meydana gelen moment, şematik olarak gösterilmiştir. Tasarımda 20 mm'lik kısım rijit bölge kabul edildiği için kulak uzunluğunun 120 mm'lik kısmındaki birim şekildeğiştirmenin eşit dağılması amaçlanmıştır.  $M_y$  momenti,  $b(x)$  levha genişliğini,  $h$  levha kalınlığını ve  $\sigma_y$  çeliğin akma dayanımını göstermek üzere; çelik kulak kesitinin elastik moment taşıma kapasitesi (2.14) denklemi ile hesaplanabilmektedir. P yükü altında çelik kulakta meydana gelen en büyük moment  $x=0$ 'da  $140P$  olarak meydana gelmektedir. Kulak kalınlığı kulak uzunluğu boyunca sabit olmak üzere,  $x=0$ 'da  $140P$  momenti etkisinde akma birim şekildeğiştirmesinin meydana geldiği kulak taban genişliği  $b_t$  (120 mm) olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde 120 mm'de oluşacak  $20P$  momenti etkisinde akma birim şekildeğiştirmesinin meydana geleceği kulak uç genişliği,  $b_u$  olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak, kulağın 120 mm uzunluğu boyunca yüzeyde oluşan birim şekildeğiştirmenin düzgün olarak dağılabilmesi için kulak uç genişliğinin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.96'ya dikkat edilirse kulak uzunluğu boyunca moment değişimi doğrusaldır. Bu nedenle 120 mm uzunluğundaki açıklık boyunca kulak genişliğindeki değişimin de doğrusal olması gerekmektedir. Böylelikle çelik kulak uzunluğu boyunca birim şekildeğiştirmelerin yaklaşık olarak eşit dağılması sağlanmış olmaktadır.

Çelik kulakların boyutlandırılmasında kullanılan bu yöntem ile çelik kulaklarda meydana gelecek birim şekildeğiştirmelerin kulak yüzeyi boyunca eşit dağılmasını sağlayabilmek için yalnızca moment etkisi dikkate alınmaktadır. Fakat çelik kulakların uzunluğu boyunca kesme etkisinin eşit olması, levha ucuna doğru kesme etkilerini artmasına sebep olmaktadır. Bu durum, kulak ucuna doğru ilerledikçe birim şekildeğiştirme dağılımında sapmalara sebep olmaktadır. Bu sebeple, çelik kulak yüzeyi boyunca meydana gelecek birim şekildeğiştirme dağılımının öncelikle sayısal yöntemler vasıtasıyla belirlenerek levha uç genişliğinin optimize edilmesi gerekmektedir.

Çelik levhaların sayısal olarak optimizasyonu için farklı kulak uç genişliklerine sahip 6 adet kulağın ABAQUS/CAE sonlu eleman programında sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Optimizasyon elemanlarının özellikleri Tablo 2.7'de sunulmaktadır.



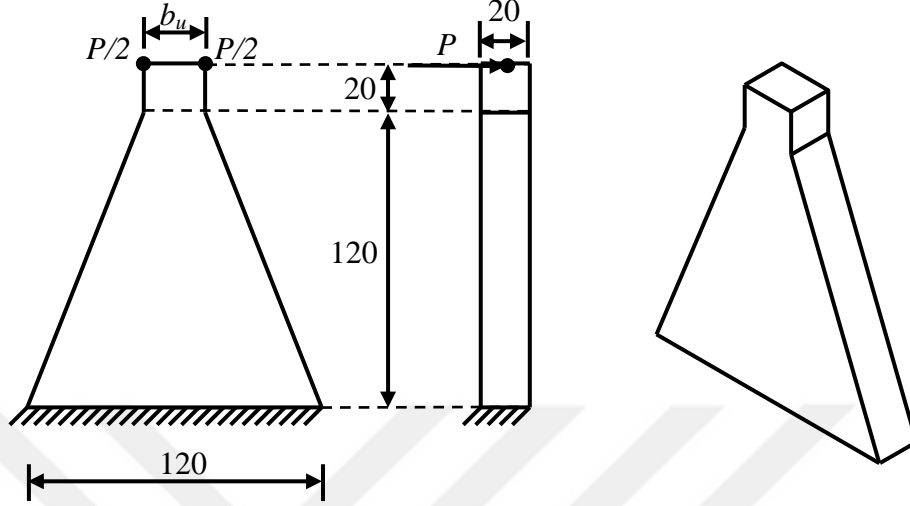
Şekil 2.96. Çelik kulakların geometrik özellikleri

Tablo 2.7. Optimizasyon elemanlarının özellikleri

Optimizasyon elemanı	Çelik kulak			
	Taban genişliği ( $b_t$ ), mm	Uç genişliği ( $b_u$ ), mm	Kalınlık ( $h$ ), mm	Moment kolu ( $l$ ), mm
1	120	21	20	140
2		22		
3		23		
4		24		
5		25		
6		26		

Sonlu eleman analizlerini etkileyecek en önemli husus, kabul edilen sınır şartlarının deney düzeneğindeki yüklemeyi en iyi şekilde temsil etmesidir. Çelik kulaklar, gerçekte rijit başlığın tam ortasında bulunan pimlere aktarılan itme sonucu eğilmeye zorlanmaktadır. Eğilme sırasında pimler, rijit başlık ile beraber serbest bir şekilde dönmektedir. Sonlu eleman programında model oluşturmadan önce modelleme kolaylığı için çelik kulak modelinde basitleştirme yapılmıştır. Bu sebeple, rijit bölgedeki rijit başlıklar ve pimler sonlu eleman modeline dahil edilmemiştir. Bunun yerine pimin orta noktası ile çelik kulak uç kesiti orta noktalarının birleşiminde yer alan düğüm noktalarından yükleme yapılmıştır. Yüklemenin yalnızca bir doğru parçasının her iki ucu üzerinde bulunan noktalara uygulanması ile gerçekte olduğu gibi rijit başlığın dönmesi sağlanabilmektedir. Çelik kulaklar kiriş kollarına kaynak yardımıyla ankastre mesnetlenmesi sebebiyle metal kulak modellerinin tabanlarının her üç

yöne olan hareketi sınırlandırılmıştır. Sonlu eleman modeli için seçilen optimizasyon elemanın boyutları ve yükleme şekli Şekil 2.97’de verilmektedir.

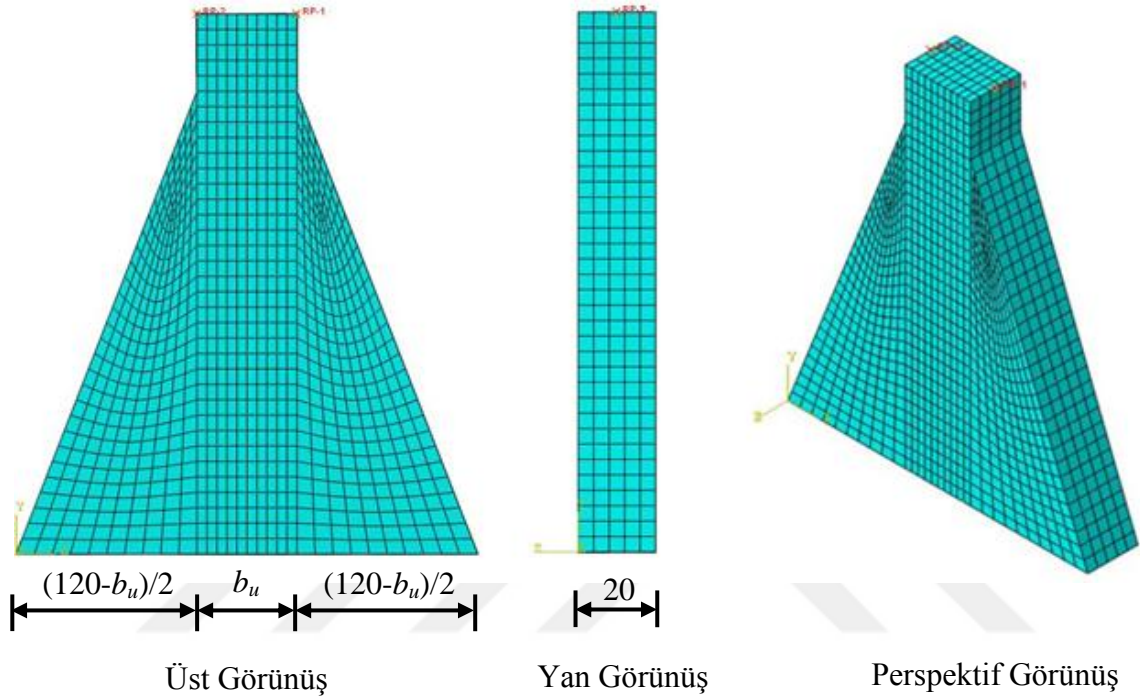


Şekil 2.97. Optimizasyon elemanına ait boyutlar

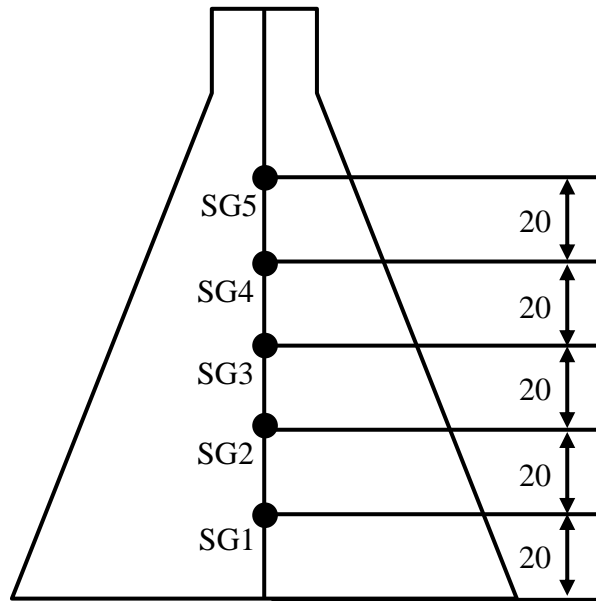
Sonlu eleman modeli için doğrusal kübik katı C3D8R elemanı tipi kullanılmıştır. Her biri üç serbestlik dereceli 8 düğüm noktasına sahip bu eleman tipi, büyük yerdeğiştirme ve elastik olmayan şekildeğiştirme yapması beklenen elemanların modellenmesinde kullanılmaktadır. Malzeme modeli için ise çekme kuponuna ait çekme deneyinden elde edilen malzeme özellikler kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi, fiziksel problemlerin yaklaşık çözümleri için uygulama kolaylığı sağlayan bir metottür. Sonuçların doğruluğu ve güvenilirliği, eleman tipinin doğru seçilmesi ve kullanılan eleman sayısına bağlılık göstermektedir. Kullanılan eleman sayısı arttıkça çözümlerin doğruluk payı da artmaktadır. Fakat kullanılan sonlu eleman sayısının artırılması, zaman ve bilgisayar kapasitesinin artırılmasını gerekli kılmaktadır. Gerekli olan sonlu eleman ağının belirlenmesi için farklı eleman boyutları ile yapılan analizlerle yakınsaklık değerlendirmesi yapıp en uygun sonlu eleman boyut ve sayısının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, benzer sonlu eleman ağına sahip 6 farklı çelik kulağın analizi yapılacağı için gerçek değerlere yakınsama aranmamaktadır. Bu sebeple sonlu eleman ağı için yakınsaklık çalışması yapılmamıştır. Pimlere gelen yükler modele atanan referans noktalarının yer değiştirme kontrollü yükleme olarak (RP1 ve RP2) atanmıştır. 6 farklı modelde eşit sayıda dilimlere bölünerek sonlu elemanlara ayrılmıştır. Oluşturulan sonlu eleman modeli, Şekil 2.98’de gösterilmektedir.

Analiz sonunda çelik kulak açıklığı boyunca birim şekildeğiştirme değeriminin belirlenebilmesi için açıklık boyunca aynı eksen üzerinde bulunan bazı düğüm noktalarından birim şekildeğiştirme değerleri alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Çelik kulak açıklığı boyunca birim şekildeğiştirme değerleri alınan düğüm noktalarının konumu (genişlik ortasından geçen eksen üzerinde) Şekil 2.99'da verilmektedir.

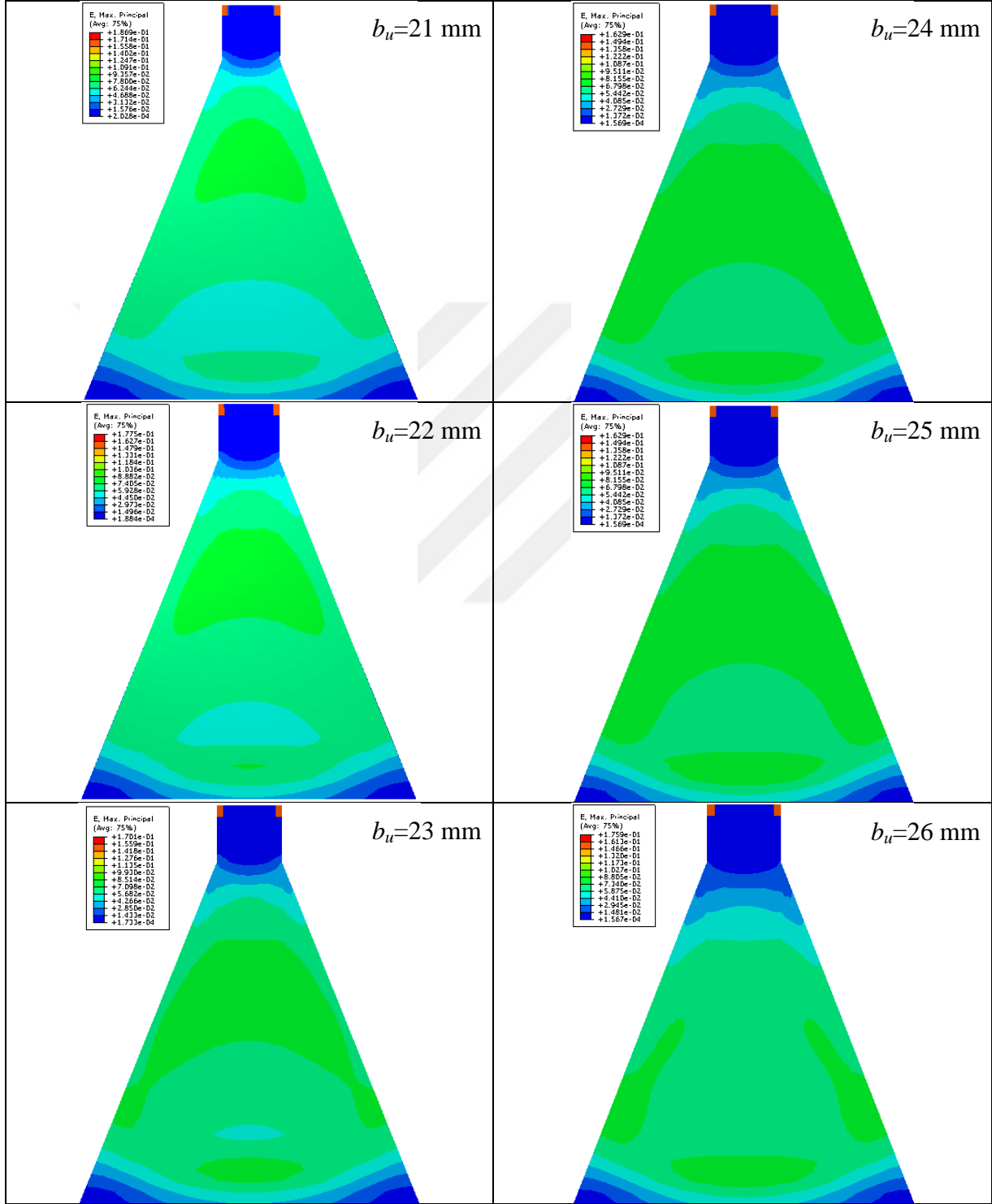


Şekil 2.98. Sonlu eleman modeli

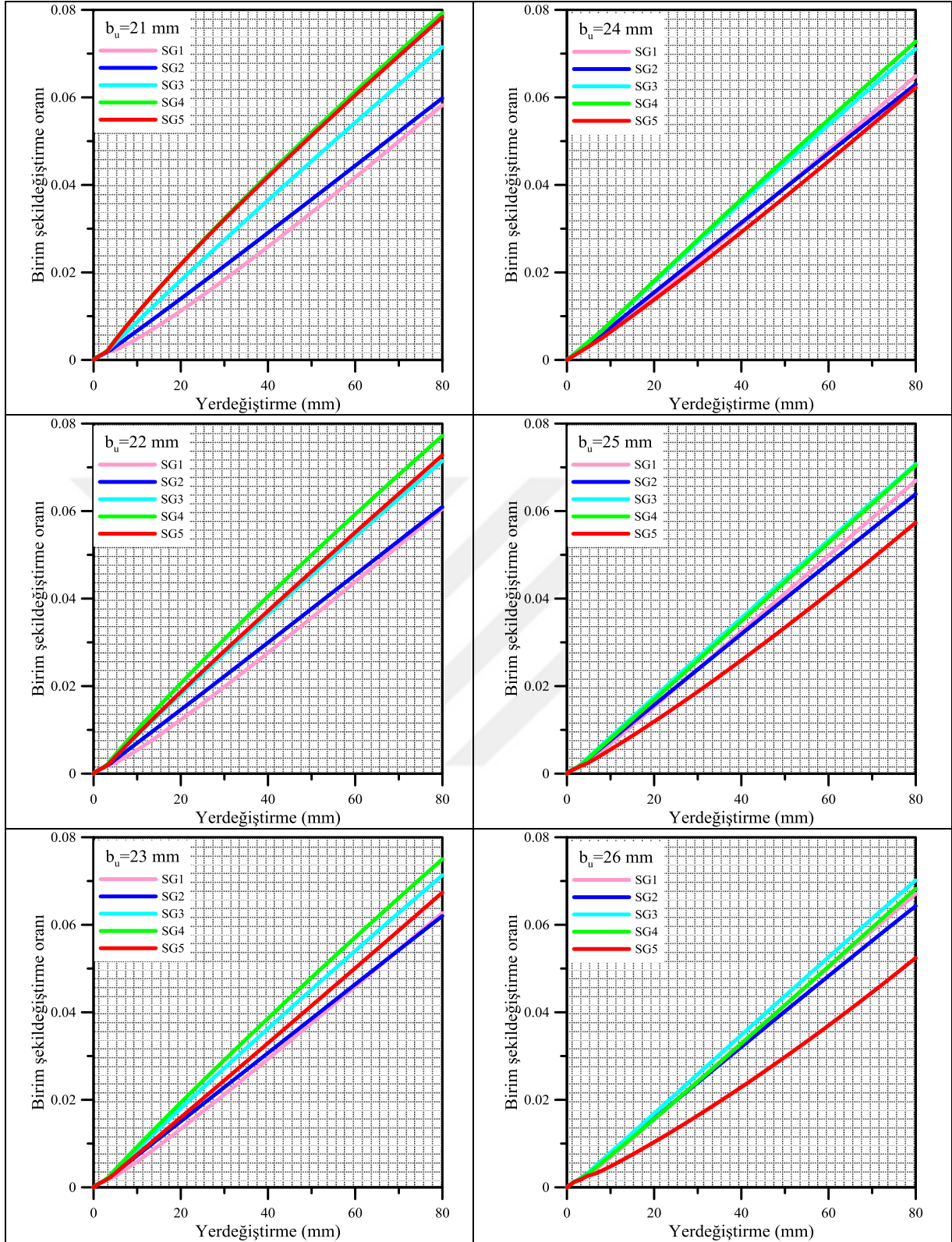


Şekil 2.99. Birim şekildeğiştirme değerlerinin okunduğu düğüm noktalarının konumu

Analizler sonucunda çelik kulakların yüzeyinde meydana gelen birim şekildeğiştirme dağılımı Şekil 2.100’de verilmektedir. Kulak uç yerdeğiştirmesine bağlı birim şekildeğiştirme grafiği ise Şekil 2.101’de verilmektedir.



Şekil 2.100. Çelik kulak modellerinin yüzeyinde oluşan birim şekildeğiştirme dağılımı



Şekil 2.101. Kulak uç yerdeğiştirmesine bağlı birim şekil değiştirme grafiği

Analiz sonuçları incelendiğinde çelik kulak uç genişliği arttıkça birim şekil değiştirmelerin kulak tabanına doğru yoğunlaştığı görülmektedir. 21 mm, 22 mm ve 23



mm uç genişliğine sahip çelik kulakların uzunluğu boyunca birim şekildeğiştirmelerin homojen dağılmadığı ve genişlik değerı azaldıkça her bir noktadan alınan değerler arasında farkın açıldığı görölmektedir. Şekil 2.101'de verilen grafiklere göre 24 mm ve 25 mm uç genişliğine sahip kulaklar, uzunluk boyunca daha homojen birim şekildeğiştirme dağılımını göstermektedir. Fakat 26 mm uç genişliğine sahip çelik kulakta homojen dağılım azalmakta ve birim şekildeğiştirmeler kulak tabanına doğru yoğunlaşmaktadır.

Demir (2018)'e göre levha uç genişliği taban genişliğinin 5'te biri olması gerekmektedir. Tasarlanan çelik kulak için bu değer 24 mm'ye tekabül etmektedir. 24 mm ve 25 mm uç genişliğindeki çelik kulak modellerinde şekildeğiştirmelerin homojen dağılımını açısından benzerlik taşımaktadır. Bu çalışma için tasarlanan çelik kulak modelinin uç genişlik değerı 25 mm olarak tercih edilmiştir.

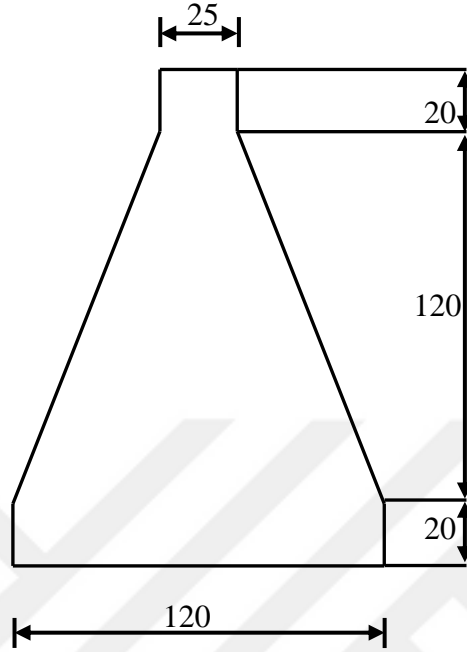
#### **2.15.5. Çelik Kulak Takımının Üretimi**

Çelik kulak takımı, çelik pim, rijit başlık, çelik kulak ve ankraj plakası olmak üzere 4 farklı parçadan oluşmaktadır. Ray plakasından pimplere gelen kesme yükünün kiriş kollarına aktarılabilmesi ve çelik kulakların ideal mesnet koşullarının sağlanabilmesi için çelik kulak ve kiriş kolu arasında bağlantı görevi taşıyan ankraj plakasının tasarlanması gerekmektedir. Ankraj plakası, kaynaklı birleşim ile çelik kulakları üzerinde bulundurmak ve cıvatalı birleşim ile kiriş kollarına bağlanmak üzere tasarlanan çelik plakadır.

Çelik kulakların ankraj plakasına montajı, kaynaklı birleşim ile yapılmaktadır. Ankraj plakası yüzeyi ile tasarlanan çelik kulak tabanı arasında köşe kaynağın yapılması gerekmektedir. Köşe kaynağın kalınlığına bağlı olarak çelik kulak tabanı kesit kalınlığı artacağı için hesap edilen kulak uzunluğu kısalacak veya tasarımda öngörölen davranış elde edilemeyecektir. Bu sebeple uzunluğu etkisi olmayacak şekilde kulakların ankraj plakasına montajı yapılmalıdır.

İfade edilen köşe kaynak sorununun ortadan kaldırılması ve ankraj plakası-çelik kulak arası rijit birleşimin sağlanabilmesi için uygun kalınlıkta seçilen ankraj plakasına boşluk oluşturmayacak şekilde her bir çelik kulak için çelik kulak kalınlığı kadar oyuk açılması ve kaynağın arka yüzeyden yapılması kararlaştırılmıştır. Bu amaçla ankraj plakasının kalınlığı 30 mm olarak tercih edilmiştir. Çelik kulakların tabandan 20 mm'lik kısmı ankraj plakasında açılan oyuk içerisinde bırakılarak arada kalan 10 mm'lik boşluğu kaynak ile doldurulması uygun görölmüştür. Bu durumunda çelik kulakların üretim aşamasında 20 mm daha uzun

üretilmesi gerekmektedir. Buna göre üretim aşamasında olması gereken 20 mm kalınlığındaki çelik kulak boyutları Şekil 2.102’de verilmektedir.



Şekil 2.102. Üretim aşamasında olması gereken çelik kulak boyutları

Şekil 2.92’de boyutları verilen rijit başlık üretilerek, sağ ve sol tarafına 14 mm çapında pim için dişli delikler açılmıştır. Çelik kulak uç kısmı ve rijit başlık birleşimi için ise 15 mm derinliğinde 25 mmx15 mm boyutlarında oyuk açılmıştır.

Rijit başlığa dış cidarları daraltmamak için 15 mm yüksekliğinde oyuk açılmıştır. Tasarım boyutlarının sağlanabilmesi için 20 mm kalınlığında üretilen çelik kulağın uç kısmının 15 mm’lik bölümü rijit başlıkta açılan oyuğun içine girmesi için frezede 15 mm kalınlığa düşürülmüştür. Çelik kulaklar ve rijit başlıkların kaynak öncesi görünümü Şekil 2.103’te verilmektedir.

Çelik kulakların tasarımı sırasında çelik pimlerin çapının 14 mm olmasına karar verilmiştir. Çelik pimleri rijit başlıkla beraber tek parça olarak üretmek mümkündür. Fakat rijit başlıkların S235JR kalitesi yumuşak çelikten üretilmesi sebebiyle, bu kalitede bir pimin gelebilecek kesme yükünü karşılayamayacağı düşünülmüştür. Çünkü TETOD’un tasarımına bağlı olarak her bir çelik pime ray plakalarından aktırılacak yük 30 kN değerini aşmaktadır. S235JR kalitesi çelikten üretilecek 14 mm çapındaki pimin bu yükü taşıması mümkün

değildir. Ayrıca, TETOD'un üretim amaçlarından bir tanesi sökülebilir-takılabilir sistem olmasıdır. Mümkün oldukça bütün parçaların müdahale edilebilir olması gerekmektedir. Bu sebeple pim yerine 10.9 kalitesi çelikten üretilen 14 mm çapında cıvatalar kullanılmıştır. Kullanılan yük aktarıcı cıvatalara ait özellikler, Tablo 2.8'de sunulmaktadır.



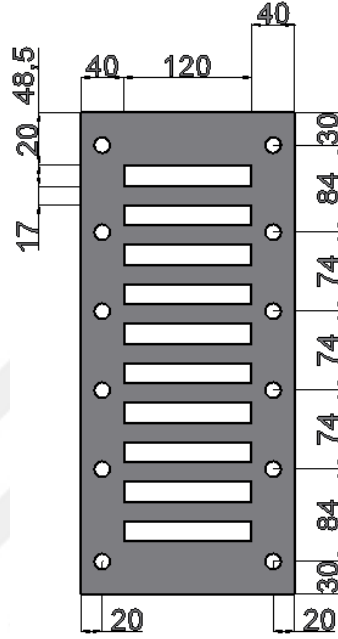
Şekil 2.103. Çelik kulak ve rijit başlığın kaynak öncesi görünümü

Tablo 2.8. 10.9 kalitesi cıvataların özellikleri

Çap, d (mm)	Anahtar ağzı, s (mm)	Kafa kalınlığı, k (mm)	Cıvata boyu, l (mm)	Diş boyu, b (mm)	Karakteristik akma dayanımı (MPa)	Karakteristik çekme dayanımı (MPa)
M14	22	8.80	80	34	900	1000

Çelik kulak takımına ait son ve en önemli parça, ankraj plakasıdır. Ankraj plakasının hem 10 adet çelik kulağı taşıması hem de çelik kulaklardan gelen kesme yükünü kiriş kollarına aktarması gerekmektedir. Bu sebeple ankraj plakaları, 30 mm kalınlığında S235JR kalitesi çelikten üretilen plakalardan üretilmiştir. Ankraj plakası üzerinde, ray plakasındaki

ray olukları ile pimlerin aynı seviyede olmasını sağlayacak kulak kalınlığında ve taban genişliğinde 10 adet oyuk açılmıştır. Ayrıca kiriş koluna montajı için S235JR kalitesi çelik için plakada ezilme ve kesme kontrolü yapılarak oyukların sağ ve sol yanlarına 6'şar adet 22 mm çapında civata deliği açılmıştır. Tasarlanan ankraj plakası ve üzerindeki oyukların yerleşimi Şekil 2.104'te verilmektedir.



Şekil 2.104. Tasarlanan ankraj plakasının görünümü

S235JR kalitesi 30 mm kalınlığındaki çelik plakalardan kesilen ankraj plakaları üzerinde düşey freze yardımıyla 14x120 mm boyutlarına sahip oyukların açılmıştır. Çelik kulakların oyuklara boşluk olmaksızın yerleşmesi için oyuklar, düşey frezede açılmıştır (Şekil 105).

Çelik kulakların tabanı ile ankraj plakasının arka yüzeyi arasında kaynak için 10 mm boşluk kalacak şekilde çelik kulaklar, ankraj plakasındaki oyuklara yerleştirilmiştir. Daha sonra 10 mm derinliğindeki 14 mmx120 mm'lik alan tamamen kaynak ile doldurularak çelik kulakların ankraj plakasına rijit bağlantısı tamamlanmıştır (Şekil 2.106). Çelik kulak takımının tamamlanmış görünümü, Şekil 2.107'de verilmektedir.



Şekil 2.105. Ankraj plakasının üretimi



Şekil 2.106. Çelik kulak ve plaka yüzeyi arasındaki boşluğun kaynak ile doldurulması



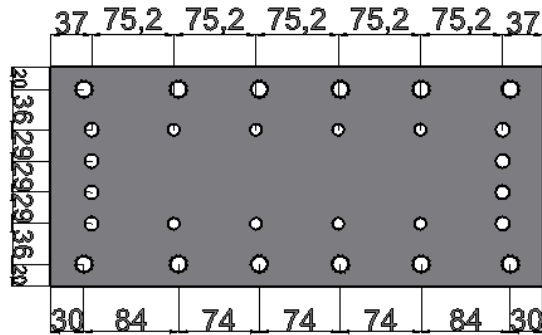
Şekil 2.107. Çelik kulak takımının görünümü

## 2.16. Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi Deney Elemanının (TETOD) Tasarımı ve Üretimi

Deneyisel çalışmaların bu bölümüne kadar donatı düzenlemesi yönünden 7 farklı betonarme deney elemanının performansı incelenmiştir. Bu deney elemanlarının performansının araştırılması için geleneksel ve sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanları referans elemanı olarak seçilmiştir. TETOD deney elemanının performansının sadece dayanım, rijitlik, enerji yutma kabiliyeti ve süneklik açısından değerlendirilmesi yeterli değildir. Aynı zamanda perde duvar ve perde duvar-bağ kirişi birleşim bölgelerindeki hasar gelişimine olan katkısının da değerlendirilmesi gerekmektedir.

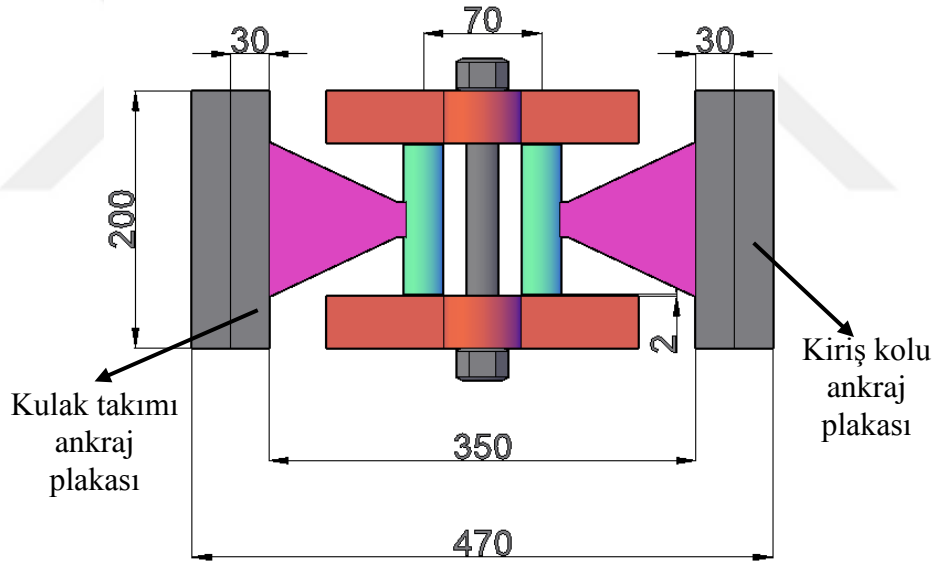
TETOD'un hasar gelişimine olan katkısının belirlenebilmesi için, çelik kulak takımlarının bağlı olduğu kirişi kollarındaki donatıların referans numunesi ile mukayese edilebilir şekilde düzenlenmesi gerekir. Bu sebeple geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı referans alınarak çelik kulakların bağlı olduğu betonarme kirişi kollarının donatısı, geleneksel donatılı bağ kirişi donatılarına benzer olarak düzenlenmiştir.

Çelik kulak ankraj plakalarının betonarme kirişi kollarına bağlantısı için kirişi içerisindeki geleneksel donatı düzenini sağlayacak şekilde kirişi koluna ankraj edilen ankraj plakasının kullanılması gerekir. Bu amaçla S235JR kalitesi 30 mm kalınlığında çelik plakalardan kirişi enkesit boyutları ile benzer ölçüde ankraj plakası kesilmiştir. Geleneksel donatılı bağ kirişi içerisinde 4 adet 14 mm çapında alt ve üst asal donatıları ve 4 adet 12 mm çapında sağ ve sol gövde donatıları yer almaktadır. Donatıların çelik plakalara rijit olarak bağlanması için donatı uçlarına dış açılarak kirişi ankraj plakalarına açılacak olan cıvata deliklerine monte edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple Şekil 2.108'de verilen kirişi ankraj plakası tasarlanmıştır. Buna göre 8 adet 14 mm çapında, 8 adet 12 mm çapında ve 12 adet 20 mm çapında cıvata deliği açılmıştır.



Şekil 2.108. Betonarme kirişi kolu ankraj plakası

Tahterevalli tipi bağ kirişinin deney elemanının tasarımının tamamlanması için kiriş kolu açıklığının belirlenmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında 900 mm açıklığında ve 200 mmx450 mm enkesitinde bağ kirişi boyutları dikkate alınmıştır. Tahterevalli tipi bağ kirişinin deney elemanının açıklığı boyunca 2 adet kiriş kolu ve TETOD yer almaktadır. TETOD'un uzunluğunun belirlenmesi durumunda tahterevalli tipi bağ kirişinin deney elemanında kullanılacak kiriş kollarının uzunluğu da belirlenmiş olmaktadır. Bu kapsamda, öncelikle ray plakası, çelik kulak takımı ve kiriş kolu ankraj plakası dikkate alınarak betonarme kiriş kolları dışındaki TETOD 'a montajlı boyutları belirlenmiştir. TETOD'un montajlı ölçüleri Şekil 2.109'da verilmektedir. Ray plakası ile rijit başlıklar arasında sürtünme olmaması için 2 mm'lik boşluk bırakılmıştır. İki çelik kulak takımının içten içe uzaklığı 350 mm olmak üzere, çelik kulak ankraj plakası ve kiriş kolu ankraj plakası dahil olmak üzere TETOD'un toplam uzunluğu 470 mm olmaktadır. Bu durumda her iki perde duvara bağlı kiriş kolunun uzunluğu ise 215 mm olmaktadır.

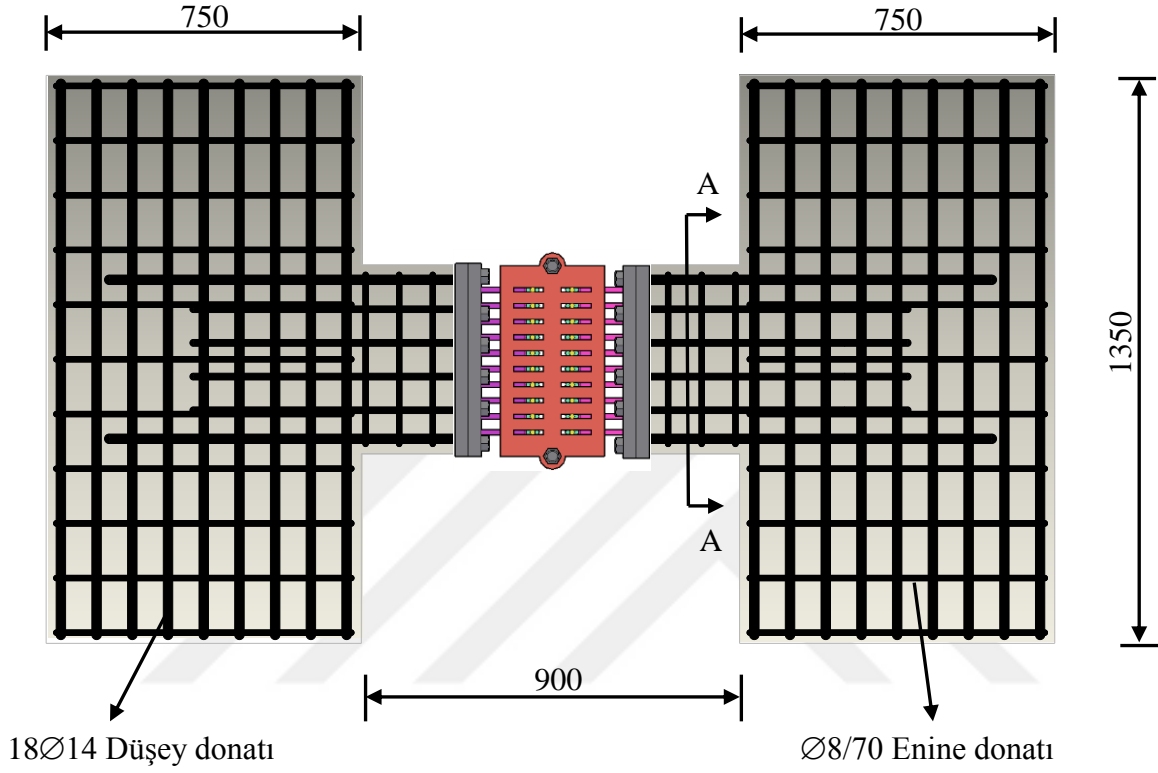


Şekil 2.109. TETOD ölçüleri

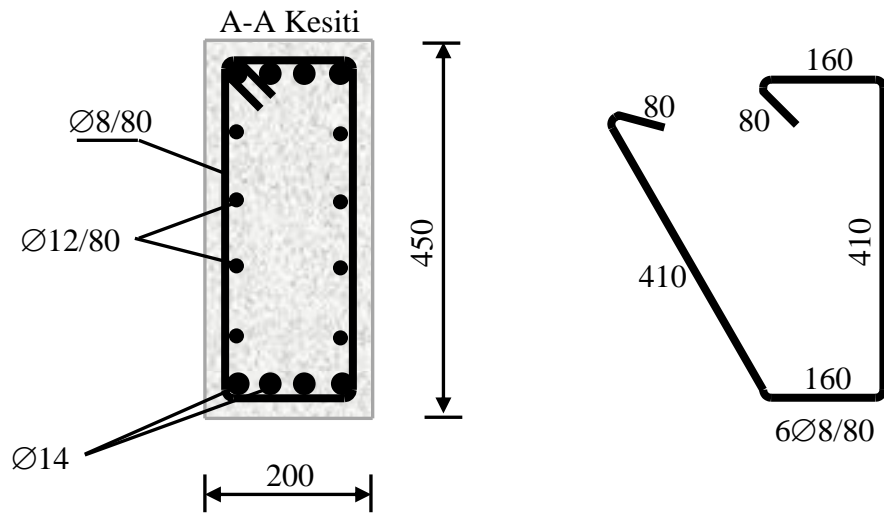
Kiriş kollarında, geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanında kullanılan donatı miktarı ve düzeni dikkate alındığı için yeni donatı hesabı yapılmamıştır. Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanına ait başlık ve kiriş donatı düzenlemesi ile TETOD'un yerleşimi Şekil 2.110'da verilmektedir.

Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanın donatı montajı yapılmadan önce TETOD için üretilen parçalar bir araya getirilerek deney elemanının üretimi için hazır hale getirilmiştir.

TETOD'un donatı montajı yapılmadan önce tamamlanmış hali Şekil 2.111'de verilmektedir. Yükleme esnasında ray plakasında oluşması muhtemel dönme ve kaymalar için ray plakası ile kulak takımı ankraj plakası arasına cıvata ve somunlardan üretilen ayarlanabilir çelik tamponlar yerleştirilmiştir.



a) Deney elemanı donatı düzenlemesi

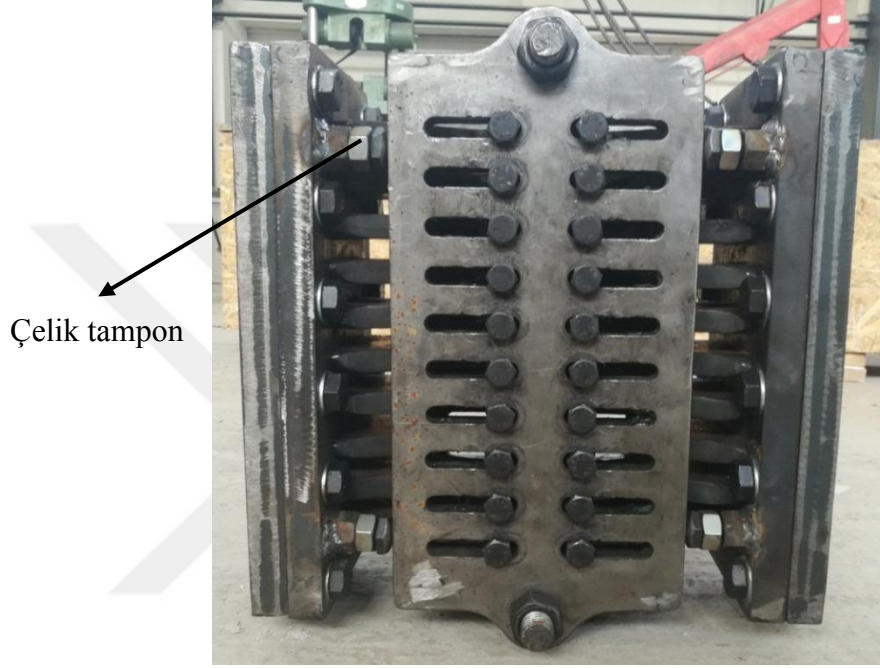


b) Betonarme kiriş kolu enkesiti ve etriye açılımı

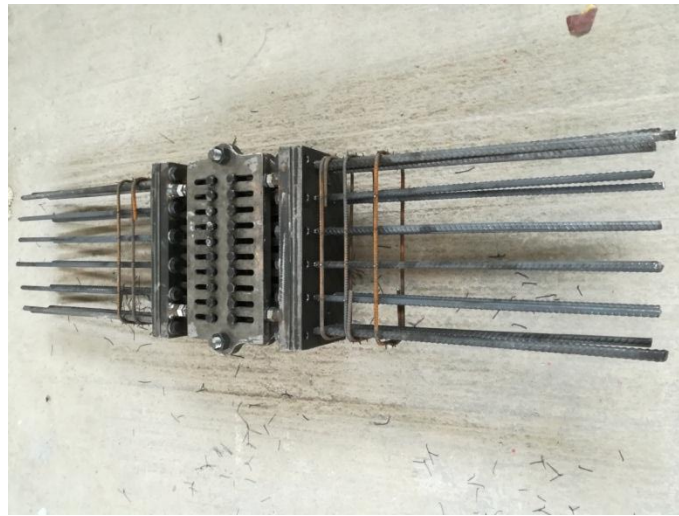
Şekil 2.110. Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı (TETOD) donatı detayı



Kiriş kollarında bulunan donatılar, kenetlenme boyunu sağlayacak uzunluklarda kesildikten sonra kiriş kolu ankraj plakasına montajı için tornada dış açılmıştır. Hazırlanan donatılar, kiriş kolu ankraj plakası üzerinde yer alan cıvata deliklerine takıldıktan sonra, kiriş kolunda bulunması gereken sargı donatıları yerleştirilip tahterevalli tipi bağ kirişi donatı düzenlemesi tamamlanmıştır. Tahterevalli tipi bağ kirişine ait donatı montajının tamamlanmış görüntüsü Şekil 2.112’de verilmektedir.

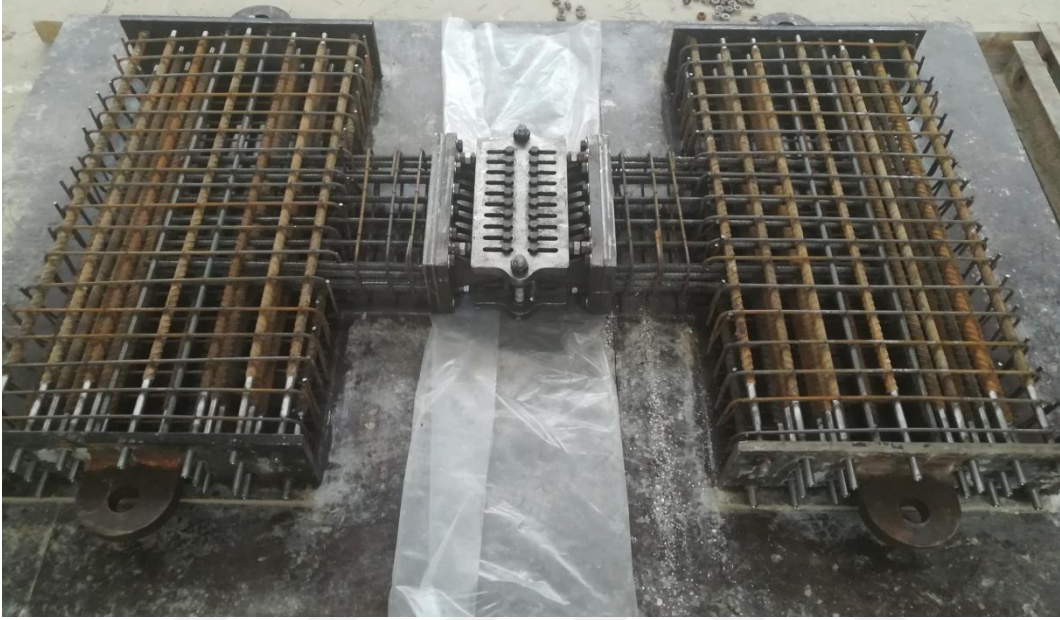


Şekil 2.111. TETOD'un tamamlanmış görüntüsü



Şekil 2.112. Tahterevalli tipi bağ kirişine ait donatı montajının tamamlanmış görüntüsü

Tahterevalli tipi bağ kirişi donatı montajı tamamlandıktan sonra başlık donatılarının montajı yapılarak tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanına(TETOD), donatı düzenlemesi tamamlanmıştır (şekil 2.113).



şekil 2.113. Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı donatı düzenlemesi

Sadece tek bir birleşim bđlgesi için alt ve st asal donatılar arasında toplam 2 donatı, şekildeğiştirme ölçer yerleştirmeye hazır hale getirilmiş ve şekildeğiştirme ölçerler hızlı yapıştırıcı vasıtasıyla temizlenen donatı yüzeylerine yerleştirilmiştir. şekildeğiştirme ölçerler, betonun prizini almasına kadar geçen sürede betondaki sudan etkilenmemesi için su geçirmez bant yardımıyla kuşatılmıştır.

Donatı yerleştirilmesi öncesinde kalıp yağlandığı için başka bir işleme gerek duyulmadan deney elemanının yan kalıpları tamamlanmış ve beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (şekil 2.114). Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının betonu, diğer deney elemanlarında olduğu gibi dışarıdan hazır beton olarak temin edilmiştir. Dökülen betondan 3 adet silindir ve 8 adet küp olmak üzere 11 adet numune alınmıştır.

Kullanılan betonun basınç yk-birim şekildeğiştirme diyagramını elde etmek için bir silindir numunenin yüzeyi zımpara taşı ile temizlenerek bir adet şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Kükürt başlıkları yapılan numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesi için beton basınç test cihazında basınç deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneye göre numunelerden elde edilen dayanım sonuçları Tablo 2.9'da sunulmaktadır.



Şekil 2.114. TETOD deney elemanı beton dökümü öncesi görüntüsü

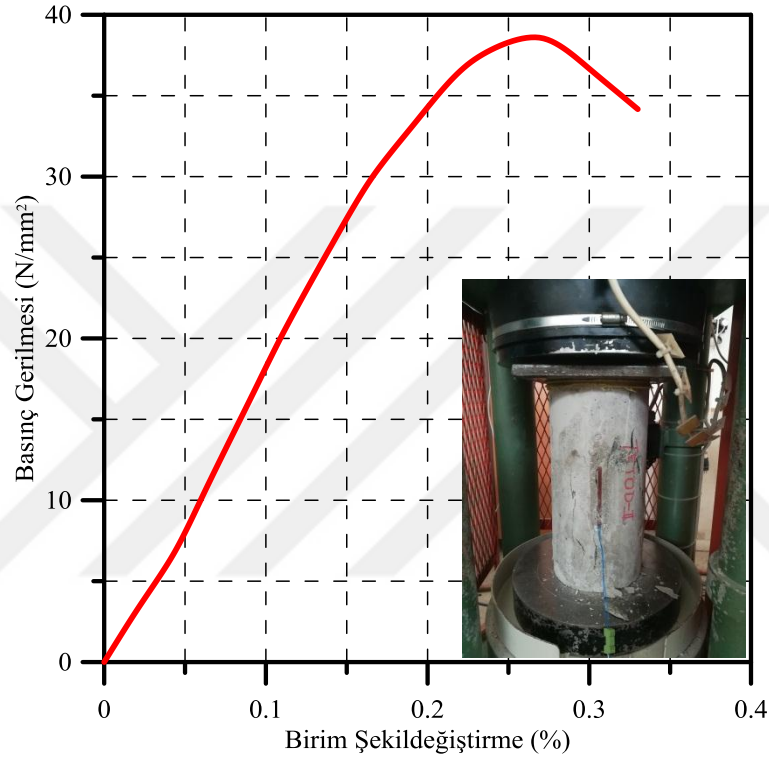
Tablo 2.9. Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları

Numune	Nihai Dayanım (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Standart Küp-1	42.41	42.65
Standart Küp-2	41.34	
Standart Küp-3	42.16	
Standart Küp-4	43.22	
Standart Küp-5	42.34	
Standart Küp-6	44.40	
Standart Silindir-1	39.23	39.31
Standart Silindir-2	40.13	
Standart Silindir-3 (Referans)	38.57	

Standart küp numunelerin ortalama basınç dayanımı 42.65 MPa olarak elde edilmiştir. Standart silindir numunelerin ortalama basınç dayanımı ise 39.31 MPa olarak elde edilmiştir. Küp numunelerin standart sapması 1.05 MPa ve silindir numunelerin standart sapması 0.78 MPa olarak hesap edilmiştir. Standart referans numunesinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 2.115'te verilmektedir.

Kalıp üzerinde yatay olarak bekleyen tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı, kirişi üzerindeki yerine yerleştirilmiştir. Yüzeydeki birim şekil değiştirme dağılışının homojen olması için sayısal yöntem yardımı ile optimizasyonu yapılan çelik kulaklar için kabul edilen boyutların deneysel olarak doğrulanması için bir adet çelik kulak üzerine uzunluk boyunca 3

farklı noktaya birim şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Deney sırasında kiriş kollarına bağlı çelik kulak takımlarından birindeki kulakların üst yüzeyi çekmeye çalışırken diğer kulak takımındaki kulakların üst yüzeyi basınca çalışmaktadır. 3 birim şekildeğiştirme ölçer takılan kulaktan alınan sonuçları daha sağlıklı değerlendirebilmek için diğer kulak takımındaki kulaklardan bir tanesinin yüzeyinin ortasına da 1 adet birim şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 2.116).



Şekil 2.115. Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği



Şekil 2.116. Çelik kulaklara birim şekildeğiştirme ölçerlerin yerleştirilmesi

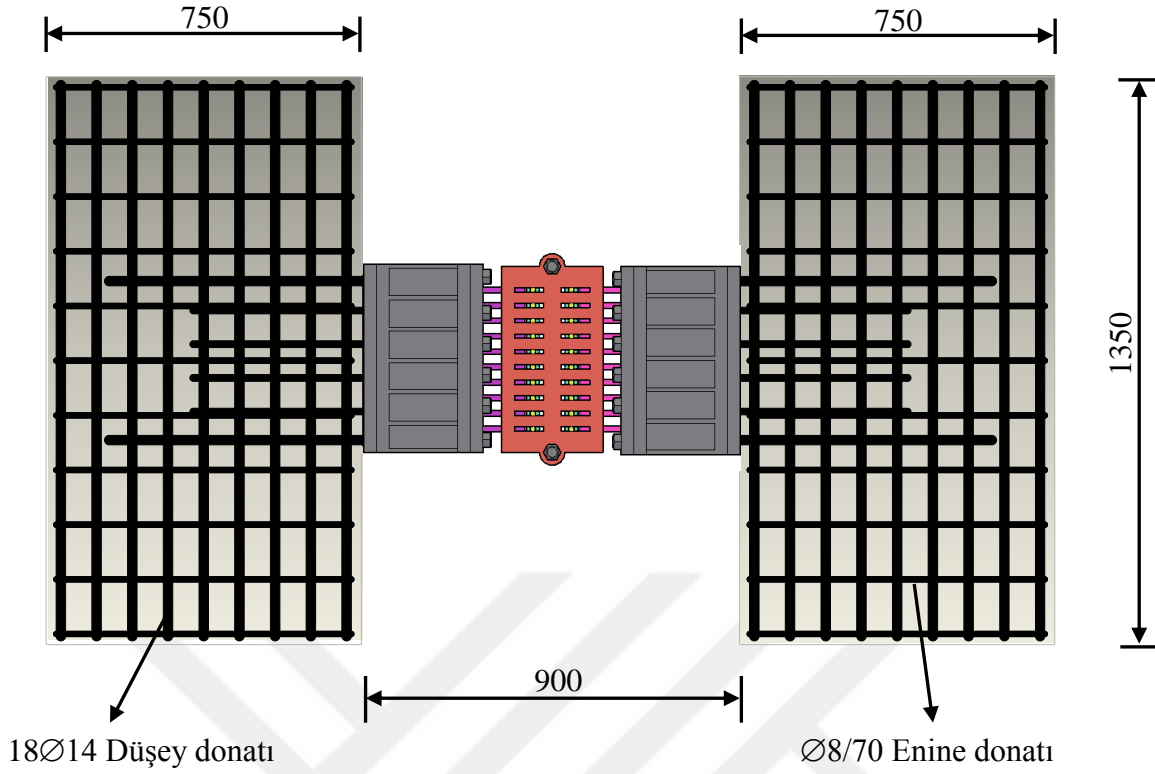
Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü Şekil 2.117’de sunulmaktadır.



Şekil 2.117. Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü

### 2.17. Prefabrik Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi Deney Elemanının (PF-TETOD) Tasarımı ve retimi

Boşluklu perde duvar davranışlarının iyileştirilmesi kapsamında yapılan bu çalışmanın esas amaçlarından bir tanesi hasarı üzerinde toplayarak onarım ve güçlendirme gerektiren bağ kirişlerinin hasar sonrası onarıma olanak sağlamasıdır. Betonarme, elik ve kompozit gibi perde duvar ayakları ile yekpare üretilen bağ kirişlerinin onarımı veya güçlendirilmesi pek mümkün olmamaktadır. Ayrıca bu tür bağ kirişleri ve perde duvarların birleşim bölgelerinde ciddi hasarların oluşması esas taşıyıcı sistem olan perde duvarlarda arzu edilmeyen bir durumdur. Bu sebeple birleşim bölgelerindeki hasarın azaltılması ve hasar sonrası kolay onarım ve güçlendirme için çıkartılabilir-takılabilir sistemin uygunluğu araştırılmak üzere, prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı üretilerek deneysel olarak incelenmiştir. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi (PF-TETOD) deney elemanın donatı detayı ve görünümü Şekil 2.118’de verilmektedir.



Şekil 2.118. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı (PF-TETOD) donatı detayı

TETOD deney elemanında, TETOD'un geleneksel donatılı bağ kirişi ile mukayese edilebilmesi için çelik kulak takımlarının bağlı olduğu kiriş kolları, perde duvarlar ile tek döküm geleneksel donatılı betonarme eleman olarak üretilmiştir. PF-TETOD'ta ise betonarme kiriş kolları yerine perde duvarlara cıvata birleşimli çelik kiriş kolu kullanılmaktadır. AISC 360-10'da kesme etkili elemanlar için,

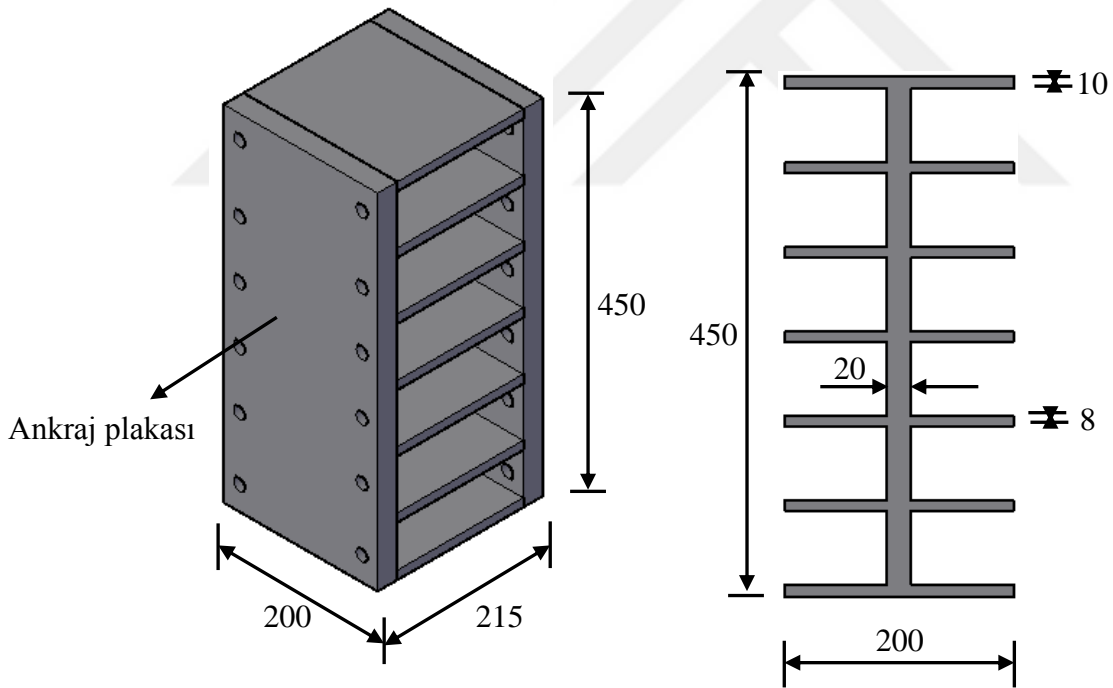
$$V_{yf} = 0.6f_y(d_f - 2t_f)t_w \quad (2.30)$$

önerilen denklemi yardımıyla betonarme kiriş kolu yerine I enkesitli çelik kiriş tasarlanmıştır. (2.30) denkleminde yer alan  $f_y$ ,  $d_f$ ,  $t_f$  ve  $t_w$  sırasıyla, çelik akma dayanımı, kiriş yüksekliği, başlık kalınlığı, gövde kalınlığı olarak ifade edilmektedir. 215 mm uzunluğunda S235JR kalitesi çelikten I enkesitli kiriş kolu için  $f_y$ ,  $d_f$ ,  $t_f$  ve  $t_w$  değerleri sırasıyla, 235 N/mm<sup>2</sup>, 450 mm, 10 mm ve 20 mm tercih edilmiştir. Malzeme kalitesi tespit edilmesi için malzeme deneyi yapılmamıştır. Tasarım hesabında karakteristik akma dayanımı olarak 235 N/mm<sup>2</sup> alınmıştır.

Bu tarz kirişlerin ön ve arka yüzeyinde kullanılacak berkitme levhalarının kalınlığı en az  $0.75t_w$  veya 10 mm olmalıdır (AISC 360, 2010). Her bir berkitme levhası arasındaki en büyük

mesafe ise  $30t_w-d/5$  değerini aşmamalıdır. Bu durumda kiriş kolunun perde duvara ve çelik kulak takımlarına montajı için gerekli olan ankraj plakalarının kullanılması yeterli olmaktadır. Ankraj plakaları ise 25 mm kalınlığında seçilmiştir. Düşey berkitme levhaları yerine yatayda 75 mm aralıklar ile 8 mm kalınlığında berkitme levhaları kullanılmıştır. TETOD'un taşıma kapasitesi dikkate alındığında, kiriş kolu için tercih edilen tasarım boyutlarının deneysel taşıma gücü ve lokal burkulma yönünden sorun teşkil etmeyeceği öngörülmüştür. Tasarlanan kiriş kolunun görünümü ve ilgili boyutları ile berkitme levhalarının, başlık levhalarının ve gövde levhasının kesit boyutları Şekil 2.119'da verilmektedir.

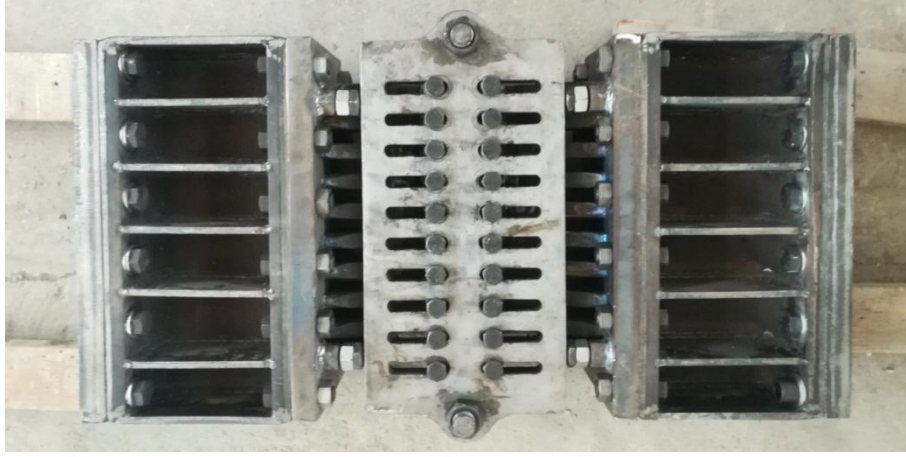
Şekil 2.119'da verilen kesit boyutlarına sahip kiriş kolu gerekli kalınlıklardaki çelik sac levhaların kaynaklı birleşimi ile üretildikten sonra, çelik kulak takımı ankraj plakası ve perde duvar ankraj plakasına montaj için gerekli olan delikler torna tezgahında açılmıştır. Daha sonra yatay olarak tasarlanan berkitme levhaları 75 mm aralıklarla kaynak edilerek 2 adet kiriş kolu üretilmiştir.



Şekil 2.119. Çelik kiriş kolu boyutlar ve kiriş kolu kesiti

Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanın donatı montajı yapılmadan önce TETOD için üretilen parçalar bir araya getirilerek deney elemanının üretimi için hazır hale getirilmiştir. TETOD'un tasarımında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bu sebeple hazırlanan çelik kulak takımlarının ankraj plakalarından çelik kiriş ankraj plakalarına civatalı

birleşim ile montajı yapılmıştır. TETOD'un çelik kiriş kollarına montajlı hali Şekil 2.120'de verilmektedir.



Şekil 2.120. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi

Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişinin perde duvarlara montajı için Şekil 2.108'de verilen kiriş kolu ankraj plakasının benzeri kullanılmıştır. Perde duvarlar için kullanılan bu ankraj plakalarının kiriş kollarında kullanılan farkı alt ve üstte olmak üzere 6 adet 18 mm çapında dış açılmış nervürlü boyuna donatıların kullanımına olanak sağlamasıdır. Geleneksel betonarme kiriş kolunun alt ve üst kısmında ise 4'er adet 14 mm çapında dış açılmış nervürlü boyuna donatı kullanılmıştır. Ayrıca, 12 mm gövde donatıları yerine 14 mm çapında dış açılmış nervürlü donatılar kullanılmıştır.

Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişinin montajı için kullanılan dış açılmış nervürlü donatıların bir kısmı ankraj plakasındaki cıvata deliklerine takıldıktan sonra alt sıra boyuna ve enine donatılarının montajı tamamlanan başlıklara yerleştirilmiştir. Daha sonra ankraj plakasına diğer dış açılmış nervürlü donatılar takıldıktan sonra başlıkların boyuna donatılarının montajı yapılmıştır. Başlık üst boyuna ve enine donatılarının montajı yapılarak prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının donatı montajı tamamlanmıştır (Şekil 2.121).

Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının betonu için diğer deney elemanlarında olduğu gibi hazır beton tercih edilmiştir. Tedarik edilen betondan 3 adet silindir ve 9 adet küp olmak üzere 12 adet numune alınmıştır. Beton numunelerinin basınç dayanımları, Tablo 2.10'da verilmektedir. Standart küp numunelerin ortalama basınç dayanımı 44.50 MPa olarak elde edilmiştir. Standart silindir numunelerin ortalama basınç dayanımı ise 35.38 MPa olarak elde edilmiştir. Küp numunelerin standart sapması 1.10 MPa ve silindir numunelerin standart



sapması 0.88 MPa olarak hesap edilmiştir. Standart Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.122’de verilmektedir.

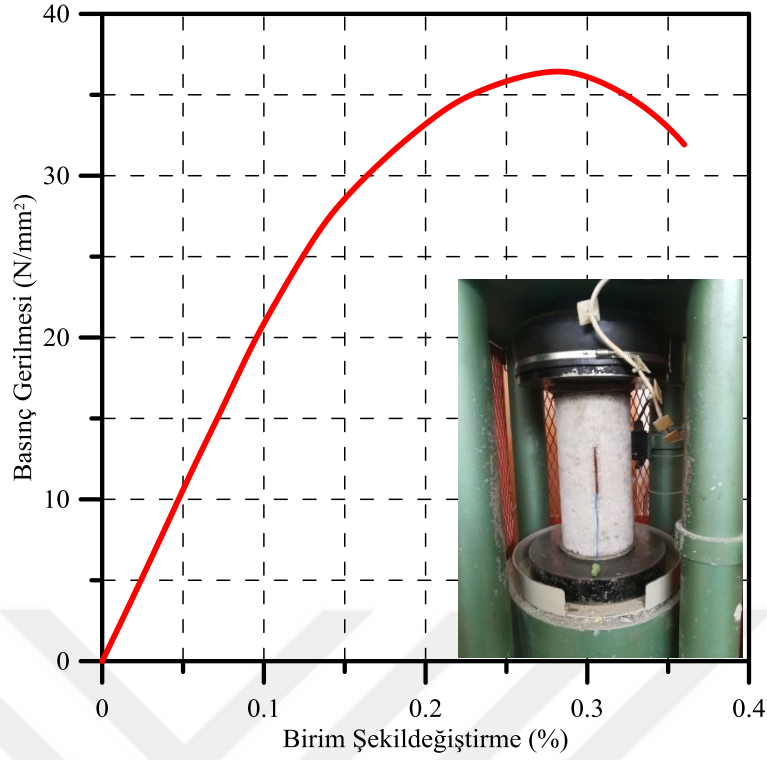
Beton bakımını sonrasında kalıp üzerinde yatay olarak bekleyen prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı, yere saplamalar ile ankre edilmiş bağlantı kirişi üzerindeki yerine yerleştirilmiştir.



Şekil 2.121. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının donatı düzenlemesi

Tablo 2.10. Standart küp ve silindir numunelerin nihai basınç dayanımları

Numune	Nihai Dayanım (Mpa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Standart Küp-1	44.43	44.50
Standart Küp-2	45.46	
Standart Küp-3	43.59	
Standart Küp-4	46.16	
Standart Küp-5	43.95	
Standart Küp-6	43.39	
Standart Silindir-1	35.45	35.38
Standart Silindir-2	34.27	
Standart Silindir-3 (Referans)	36.41	

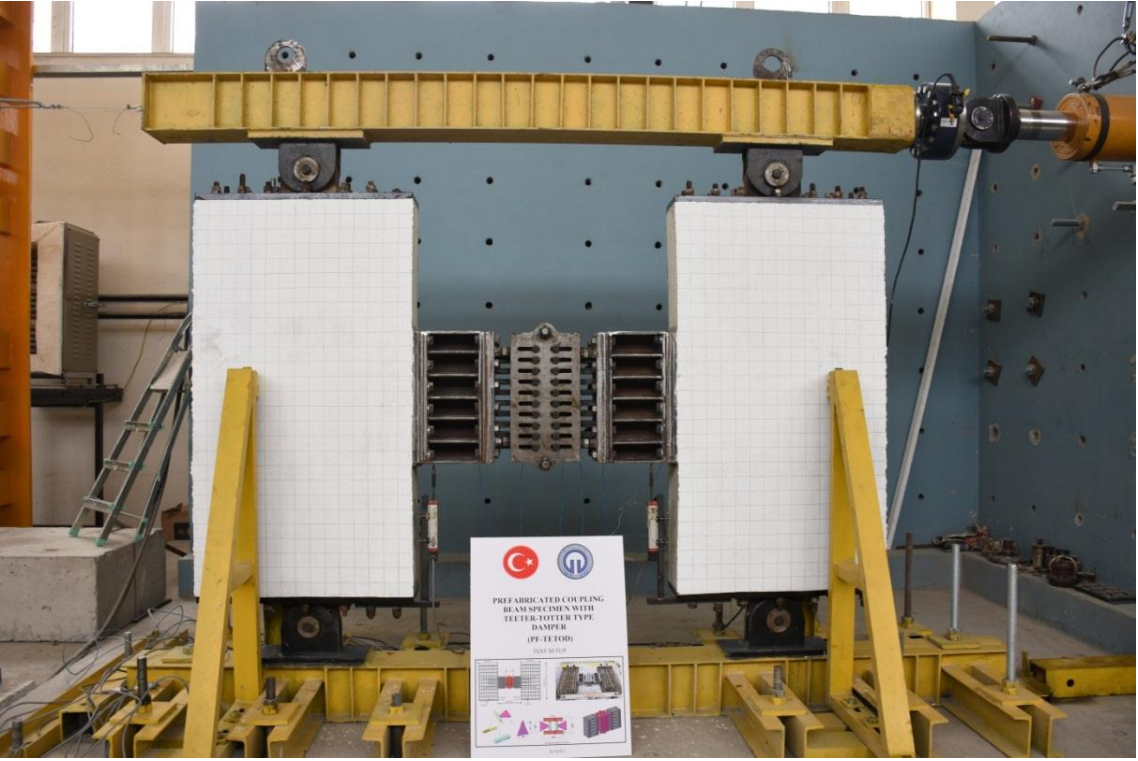


Şekil 2.122. Referans numunesinin gerilme-birim şekildeğiştirme grafiği

Yüzeydeki birim şekildeğiştirme dağılışının homojen olması için sayısal yöntem yardımı ile optimizasyonu yapılan çelik kulaklar için kabul edilen boyutların deneysel olarak doğrulanması için bir adet çelik kulak üzerine uzunluk boyunca 3 farklı noktaya birim şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. 3 birim şekildeğiştirme ölçer takılan kulaktan alınan sonuçları daha sağlıklı değerlendirebilmek için diğer kulak takımındaki kulaklardan bir tanesinin yüzeyinin ortasına da 1 adet birim şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Tasarımı yapılan çelik kiriş kollarında deney sonuçlarını etkileyecek deformasyonların yer almaması gerekmektedir. Bu sebeple yükleme süresince çelik kiriş kollarında meydana gelen birim şekildeğiştirmeler 1 adet birim şekildeğiştirme ölçer yardımı ile takip edilmiştir (Şekil 2.123). Çelik kiriş kolu-perde duvar birleşim bölgesine yakın alt ve üst bölgeye yatayda 2 adet ve perde duvar orta bölgesine yatayda 1 adet birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü Şekil 2.124'te verilmiştir.



Şekil 2.123. Çelik kulaklar ve çelik kiriş koluna yerleştirilen birim şekildeğiştirme ölçerler

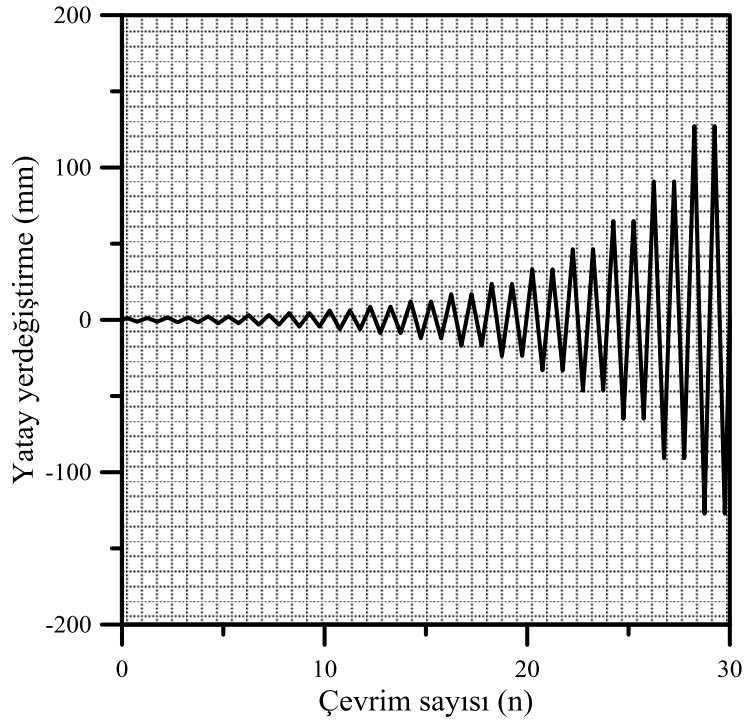


Şekil 2.124. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının ve deney platformunun deney öncesi görüntüsü

## 2.18. Deney Elemanlarına Uygulanan Yatay Yük

Deney elemanlarına uygulanacak olan çevrimsel yatay yük rijit duvara bağlı 1000 kN itme ve 750 kN çekme kapasiteli,  $\pm 150$  mm yatay yerdeğiştirme uygulayabilen el kontrollü hidrolik piston ile gerçekleştirilmiştir. Yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılan deneylerde yatay yük, iki yönlü giderek artan yerdeğiştirme çevrimleri şeklinde uygulanmıştır. Yerdeğiştirme çevrimleri yapısal ve yapısal olmayan elemanlar için FEMA-461 (2007) Bölüm 2.9.1'de önerilen esaslar dikkate alınarak belirlenmiştir. Her yük adımı iki 2 çevrim olarak tekrarlanmıştır.

FEMA-461, her bir yerdeğiştirme adımını rölatif kat ötelenmesine bağlı olarak belirlemektedir. Bu sebeple tahmini en küçük yerdeğiştirme genliğinin (rölatif kat ötelenmesi bağlamında,  $\Delta = \delta/H$ )  $0.0015H$  alınmasını tavsiye etmektedir. Her bir yerdeğiştirme adımı arasındaki oran 1.40 olacak şekilde yerdeğiştirme artımları yapılmaktadır. Bu çalışmada tahmini en küçük deformasyon için gerekli yük adımı 1.20 mm olarak dikkate alınmıştır. Deney düzeneğindeki mafsallar arasındaki mesafe 1610 mm olmak üzere, rölatif ötelenme miktarı 0.075 olarak hesap edilmiştir. 1.61 mm başlangıç yük adımı (kontrol amaçlı ilk yük adımı 1.20 mm olarak seçilmiştir) ve 1.40 artım faktörü ile oluşturulan çevrimsel artımlı yatay yükleme protokolü Şekil 2.125'te verilmektedir.



Şekil 2.125. Yatay yükleme protokolü

## **2.19. Deneylerden Elde Edilen Ölçümlerin Değerlendirilmesi**

### **2.19.1. Yatay Yük- Yatay Yerdeğiştirme Grafiklerinin Elde Edilmesi**

Şekil 2.125'te verilen yükleme protokolüne göre yapılan deneylerde her bir deney elemanı için, yükleme kirişinin yükleme eksenini boyunca yatay yerdeğiştirmesi ve buna karşılık gelen yatay yük değerleri ölçüm sisteminde kullanılan aletler vasıtasıyla ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Bu değerler kullanılarak her bir deney elemanı için yatay yük-yerdeğiştirme grafikleri oluşturulmuştur.

### **2.19.2. Kiriş Kayma Yerdeğiştirmesi-Yatay Yerdeğiştirme Grafiklerinin Elde Edilmesi**

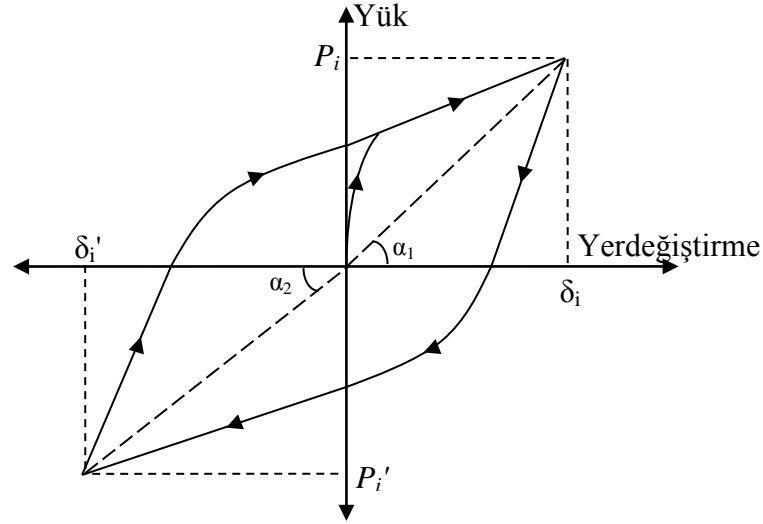
Her bir bağ kirişi deney elemanında bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgelerinde kirişlerde meydana gelen düşey kaymalar, düşey yerdeğiştirme ölçerler vasıtasıyla tespit edilmiştir. Bağ kirişlerinin her iki ucundan alınan düşey yerdeğiştirme değerlerinin yatay yük değerine bağlı olarak grafikleri oluşturulmuştur.

### **2.19.3. Dayanım Zarfı Grafiklerinin Elde Edilmesi**

Yatay yük-yerdeğiştirme grafiği üzerindeki her çevrim için, en büyük yük değeri ve bu değere karşılık gelen yerdeğiştirme miktarı dayanım zarfı üzerinde bir koordinat olmak üzere, ileri ve geri çevrimlerden elde edilen koordinatların birleştirilmesi ile dayanım zarfı eğrileri elde edilmiştir.

### **2.19.4. Etkili Rijitlik Değerlerinin Hesabı**

Çevrimsel yük etkisinde, deney elemanlarının rijitlikleri ilerleyen her çevrimde azalmaktadır. Deney elemanlarının rijitlik değerleri, her çevrim için yük-yerdeğiştirme grafiğinin eğimi bulunarak elde edilmiştir (Şekil 2.126).



Şekil 2.126. Her bir çevrim için etkili rijitlik değerlerinin belirlenmesi

Burada; *i*. çevrimde yük-yerdeğiştirme eğrisinde okunan yük değerleri  $P_i$  ve  $P_i'$  ile yerdeğiştirme değerleri  $\delta_i$  ve  $\delta_i'$  olmak üzere, etkili rijitlik değeri itme ve çekme için sırasıyla:

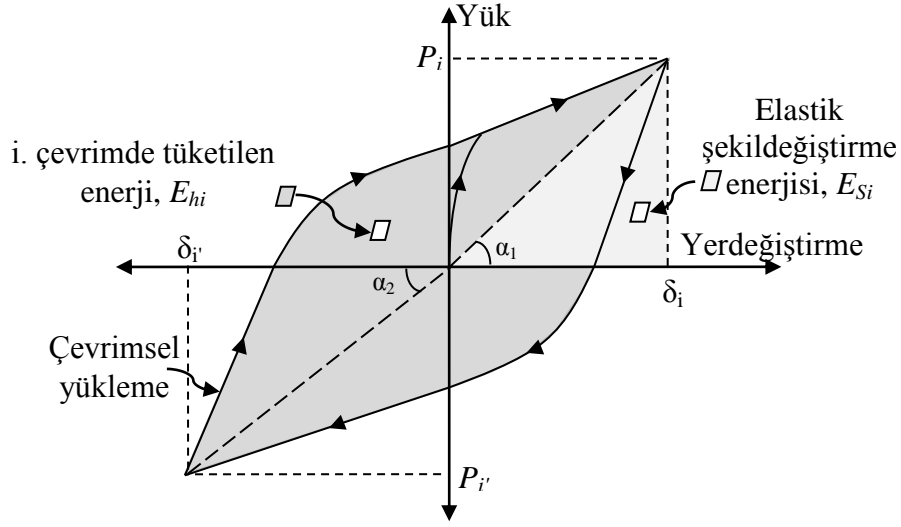
$$k_{eff}(i) = \tan(\alpha_1) = \frac{P_i}{\delta_i} \quad (2.31)$$

$$k_{eff}(\zeta) = \tan(\alpha_2) = \frac{P_\zeta}{\delta_\zeta} \quad (2.32)$$

bağıntıları ile hesaplanmıştır. Deney elemanları için elde edilen rijitlik değerlerinin kat ötelenme oranlarına göre değişiminin grafiksel olarak çizilmesi ile rijitlik azalımı grafikleri elde edilmiştir.

### 2.19.5. Enerji Tüketme Kapasitelerinin Hesabı

Yük altındaki yapılar, üzerlerine etkiyen yüklerin oluşturduğu enerjinin bir kısmını şekildeğiştirmeler yaparak tüketmektedirler. Tüketilen bu enerji özellikle deprem gibi dinamik yükleme durumları için oldukça önemlidir. Deney elemanlarının tüketebileceği enerji elastik olmayan şekildeğiştirme kapasitelerine bağlıdır. Deney elemanlarına uygulanan çevrimsel yükleme neticesinde elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinde her bir çevrimin kapsadığı alan ( $E_{hi}$ ) hesaplanmıştır (Şekil 2.127). Daha sonra her çevrim için tüketilen enerji değerleri artımsal olarak toplanarak toplam tüketilen enerji değeri hesaplanmıştır.



Şekil 2.127. i. çevrimde tüketilen enerji ve depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisi (Chopra, 2007)

#### 2.19.6. Eşdeğer Visköz Sönüm Oranı Hesabı

Eşdeğer viskoz sönüm oranı,  $\xi_{eq}$ , çevrimsel yükleme altında deney elemanlarının sönümlendiği enerji miktarını ifade etmenin bir diğer yolu olmakla birlikte, akma yükünden,  $P_p$ , sonra yük taşıma kapasitesindeki değişimin sistemin enerji tüketme kapasitesi ile ilişkisi hakkında da fikir vermektedir. Eşdeğer viskoz sönüm oranı elastik olmayan yerdeğiştirmenin gerçekleştiği her yük adımının ikinci çevrimi için aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Chopra, 2007):

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{hi}}{E_{Si}} \quad (2.33)$$

Burada  $E_{hi}$  numune tarafından i. çevrimde tüketilen çevrimsel enerjidir.  $E_{Si}$  ise i. çevrimde depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisi olup aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Şekil 2.127):

$$E_{Si} = \frac{P_i \delta_i}{2} \quad (2.34)$$

Denk. (2.34) Denk. (2.33)'de yerine yazılırsa:

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{E_{hi}}{P_i \delta_i} \quad (2.35)$$

denklemini elde edilir.

EN 15129 (2010)'a göre metalik sönümleyicilerin eşdeğer viskoz sönüm oranının en az  $\xi_{eq} > \%15$  olması ve sistemin yön değiştiren tekrarlı yükler altında stabil ve kararlı davranışı sağlayacak özellikte olması gerekmektedir.



### **3. BULGULAR VE İRDELEMELER**

#### **3.1. Giriş**

Çalışmaya ait bu bölümde, farklı donatı düzenlerine sahip bağ kirişlerinin ve tahterevalli tipi bağ kirişlerinin artımlı yatay yük etkisindeki davranışlarını belirlemek üzere yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular verilmekte ve birtakım irdelemeler yapılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, açıklık/derinlik oranı ve donatı oranı sabit alınarak geleneksel donatılı (CRCB), sargılı diyagonal donatılı (DRCB), sargısız diyagonal donatılı (DRCB-FC), demet diyagonal donatılı (BDRCB), 19° açılı hasır donatılı (MRCB-19), 45° açılı hasır donatılı (MRCB-45) ve 45° açılı güçlendirilmiş hasır donatılı (DBMRCB-45) olmak üzere 7 farklı betonarme bağ kirişi tekrarlı artımlı çevrimsel yatay yük etkisinde test edilmiştir. Bunun yanında, açıklık/derinlik oranı sabit olmak üzere betonarme kiriş kollarına sahip tahterevalli tipi bağ kirişi (TETOD) ve çelik kiriş kollarına sahip prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi (PF-TETOD) çevrimsel yük etkisinde test edilmiştir.

Tüm deney elemanlarına ait kiriş ve başlık boyutları sabit olup çevrimsel yüklemeler 1000 kN itme ve 750 kN çekme kapasiteli hidrolik piston vasıtası ile yapılmıştır. Tüm deneylere itme yüklemesi ile başlanmıştır. Yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılan çevrimsel yüklemelere göre elde edilen grafiklerde “+” itme yüklemesini, “-” çekme yüklemesini göstermektedir.

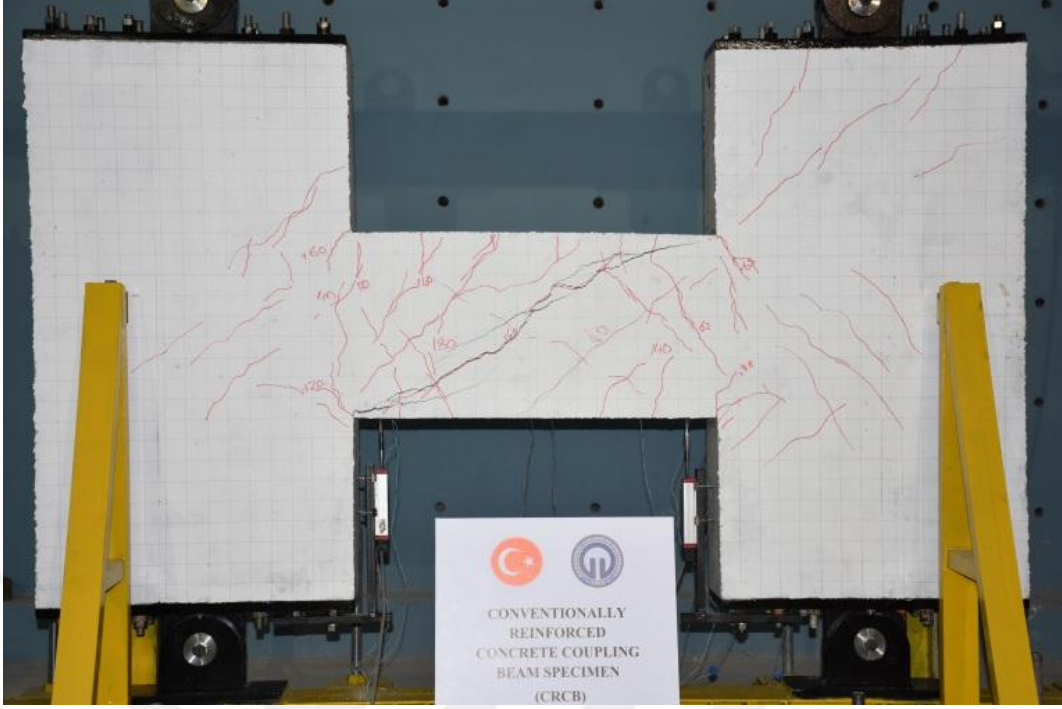
#### **3.2. Deney Elemanlarının Tekrarlı Artımlı Çevrimsel Yük Altındaki Davranışları**

##### **3.2.1. Geleneksel Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanı (CRCB)**

FEMA-461’ göre hazırlanan yerdeğiştirme kontrollü artımlı çevrimsel yatay yük etkisinde davranışı incelenen geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanının deney süresince çatlak gelişimi aşamalı olarak incelenmiştir. Deney elemanındaki ilk çatlak, sol alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 5. yük adımında itmede 4.39 mm yerdeğiştirme ve 120 kN yük civarında meydana gelmiştir. İkinci çatlak, sağ üst kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 5. yük adımında itmede 3.63 mm yerdeğiştirme ve 88 kN yük

civarında meydana gelmiştir. Üçüncü çatlak, sol üst kiriş- perde duvar birleşim bölgesinde 5. yük adımıyla çekmede 2.19 mm yerdeğiştirme ve 64 kN yük civarında meydana gelmiştir. Dördüncü çatlak ise, sağ alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 5. yük adımıyla çekmede 2.89 mm yerdeğiştirme ve 88 kN yük civarında meydana gelmiştir. 5. yük adımıyla görülen bu çatlaklar yaklaşık 45°'lik açılar ile oluşmuşlardır. Yüklemin ilerleyen aşamalarında çatlak dağılımı, kiriş perde duvar birleşim bölgesinden kiriş ortasına ilerlemiştir. Kirişin alt ve üst bölgelerde dik olarak başlayan çatlaklar, kiriş ortasında doğru yaklaşık 45°'lik açılarla ilerlemiştir. 9. yük adımıyla itmede 8.72 mm yerdeğiştirme ve 160 kN yük civarında büyük diyagonal çatlak oluşmuştur. Çatlaklar, ilk defa 9. yük adımıyla itmede yaklaşık 11.52 mm yerdeğiştirme ve 216 kN yük civarında sağ perde duvar alt bölgesinde oluşmaya başlamıştır. 10. yük adımıyla, itmede 23.88 mm yerdeğiştirme ve 385 kN civarında çatlaklar, her iki perde duvar üzerinde başlık levhalarına doğru ilerlemiştir. 9. yük adımıyla itmede 8.72 mm yerdeğiştirme ve 160 kN yük civarında oluşan büyük diyagonal çatlak, 11. yük adımıyla itmede 27.35 mm yerdeğiştirme ve 417 kN civarında genişlemeye başlayarak 29 mm yerdeğiştirme ve 423 kN yük değerinde deney elemanı yerdeğiştirmeler artmasına rağmen dayanım kaybetmeye başlamıştır. İtmede 29 mm yerdeğiştirme ve 423 kN yük değerinde nihai dayanımına ulaşan geleneksel donatılı bağ kirişi, diyagonal çekme (diyagonal yarıma) kırılmasına maruz kalmıştır (Şekil 3.1). 35.14 mm'ye kadar yerdeğiştirmeye zorlanan deney elemanında, sağ üst ve sol alt (basınç bölgesi) bölgelerde hafif döküntülerle beraber diyagonal yarıma artmış ve diyagonal çatlaklar yayılmıştır. Nihai hasar sonrası diğer yönde yapılan yüklemelerde çekmede 11 mm yerdeğiştirme ve 210 kN değerinde diğer köşegen doğrultusunda diyagonal çatlak ağı genişlemiş ve çekmede 35.11 mm yerdeğiştirme ve 280 kN yük değerinde nihai dayanımına ulaşmıştır. Ters yönde yapılan yükleme neticesinde geleneksel donatılı bağ kirişinde her iki diyagonalin üst ve altında kalan beton kısım dağılmış ve döküntü haline gelmiştir (Şekil 3.2). 11. yük adımının 2. çevriminde itmede 34.139 mm yerdeğiştirme değerinde yük 145 kN olarak elde edilmiştir. Elde edilen yük değeri nihai yükün %34 seviyesine tekabül etmesi sebebiyle, yüklemeye durdurulmuş ve yüklemeye protokolünün geriye kalan kısmı uygulanmamıştır.

Deneyden sonraki süreç içerisinde deney elemanının büyük yerdeğiştirme altındaki hasar durumunu görmek için deney elemanı her iki yüklemeye yönünde büyük yerdeğiştirmelere maruz bırakılmıştır. Sistemin yerdeğiştirme yapmış görüntüsü Şekil 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.1. Geleneksel donatılı bağ kirişinin nihai yük adımındaki hasar durumu



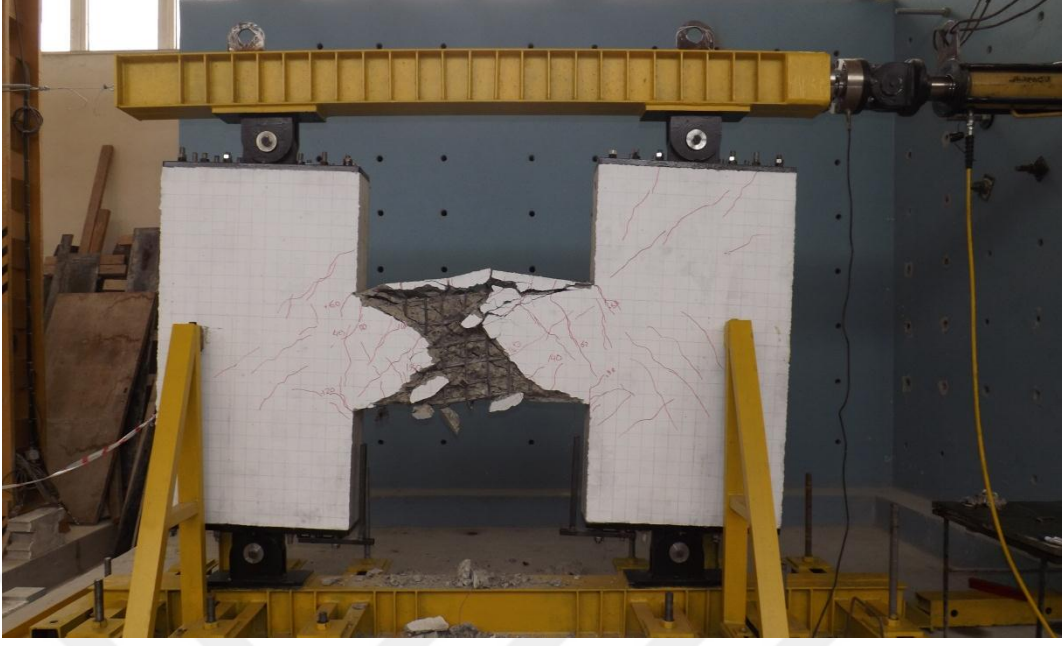
Şekil 3.2. Köşegenlerin üst ve alt kısımlarında kalan betonların parçalanması ve dökülmesi

Her iki yönde uygulanan büyük yerdeğiştirmeler altında geleneksel donatılı bağ kirişinin orta bölgesinin ön ve arka yüzündeki (kiriş uzunluğunun üçte biri) betonun tamamen parçalanarak döküldüğü Şekil 3.3'ten görülmektedir. Kirişin orta bölgesinde parçalanan çekirdek betonu da boşaltılarak Şekil 3.4'te görüldüğü gibi donatıların büyük hasar sonrası durumu incelenmiştir. Etriye kancalarının  $90^\circ$  olması sebebiyle, kancalarda

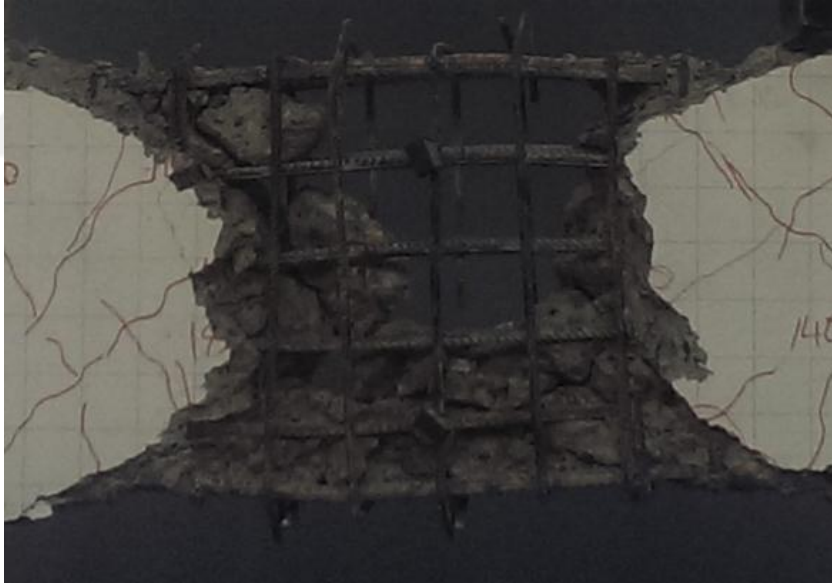
açılma gözlemlenmiştir. Fakat boyuna ve gövde donatılarında eğilme dışında herhangi bir durum gözlemlenmemiştir.

Deney sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisine ait grafik Şekil 3.5'te verilmektedir. Geleneksel donatılı bağ kirişinin orta bölgesine yatay ve düşey olmak üzere 2 adet, bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesinin alt ve üstüne yatay 2 adet ve perde duvar orta bölgesine yatay ve düşey olmak üzere 2 adet birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Kullanılan bütün birim şekildeğiştirme ölçerlerin okuma sınır değeri % 0.75 olarak sabitlenmiştir. Ayrıca alt ve üst boyuna donatılarda toplam 4 adet birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Fakat deney başlangıcında veri toplayıcının grafik arayüzünün kısıtlı veriye imkan sağlaması sebebiyle sadece birleşim bölgesindeki yatay 2 adet (I1, üst ve I2, alt), perde duvar üzerinde yatay 1 adet (W) ve alt ve üst donatılarda birer adet olmak üzere (T1, üst boyuna donatı ve T2, alt boyuna donatı) toplam 5 adet birim şekildeğiştirme ölçerden veri toplanabilmiştir. T1 donatısındaki birim şekildeğiştirme ölçerden ise deney esnasında voltaj alınamamıştır. Donatılarda ilk akma 10. yük adımında 18.54 mm yerdeğiştirme ve 324 kN yük seviyesi civarlarında meydana gelmiştir. Deney sonunda T2 donatısındaki birim şekildeğiştirme 0,0027 değeri ile sınırlı kalarak donatı çeliği akma birim şekildeğiştirme değerini bir miktar aşmıştır. Böylece bağ kirişinin donatılarının akma sınırında kaldığı kabul edilebilir. Perde duvar üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer (W), 10. yük adımına kadar 0.0005 seviyelerinde kararlı olarak okuma yaparken 10. yük adımından sonra gerinim hassasiyetini kaybetmiştir. I1 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçerden donatılar akmaya başladığı anda yaklaşık 0.005 birim şekildeğiştirme değeri okunmuştur. Nihai yük değerinde bile birim şekildeğiştirme ölçerlerin okuma sınır değeri olan 0.0075 değerine ulaşmamıştır. I2 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer ise donatılar akmaya başlamadan önce okuma sınır değerine ulaşmıştır.

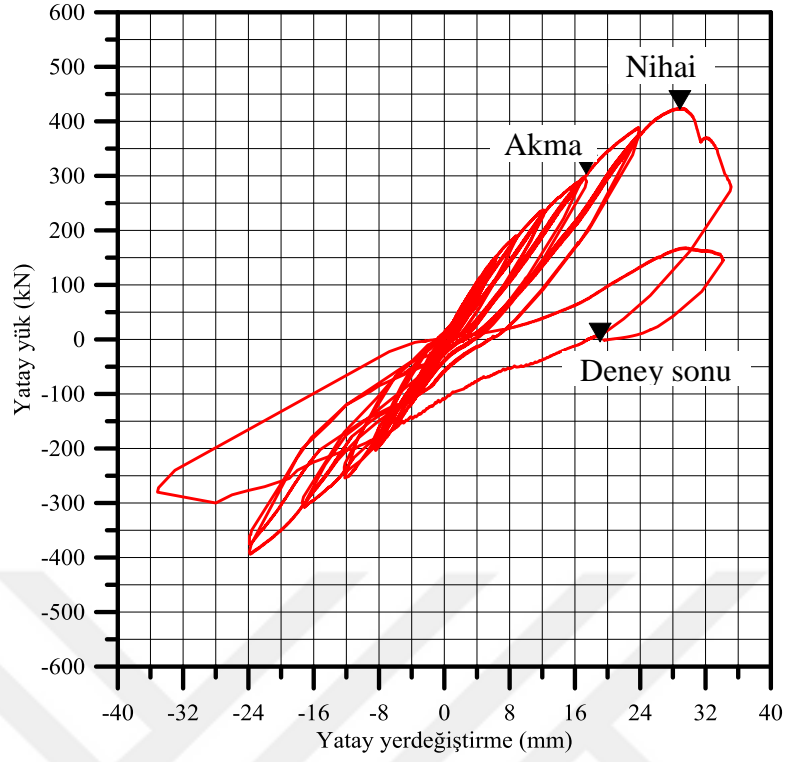
Bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmelerinin ölçümü için sol alt birleşimde (LLPDT) ve sağ alt birleşimde (RLPDT) 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Deney başlangıcında kalibrasyonda sorun olmamasına rağmen sol alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerden çevrimsel yükler altında sonuç alınamamıştır. Sağ alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerden alınan düşey kaymaların yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiği Şekil 3.6'da verilmektedir. Şekil 3.6 incelendiğinde, bağ kirişinin akmaya başladığı sırada düşey yerdeğiştirme yaklaşık 0.96 mm ve nihai yük değerinde ise 1.436 mm olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.1'de özetlenmiştir.



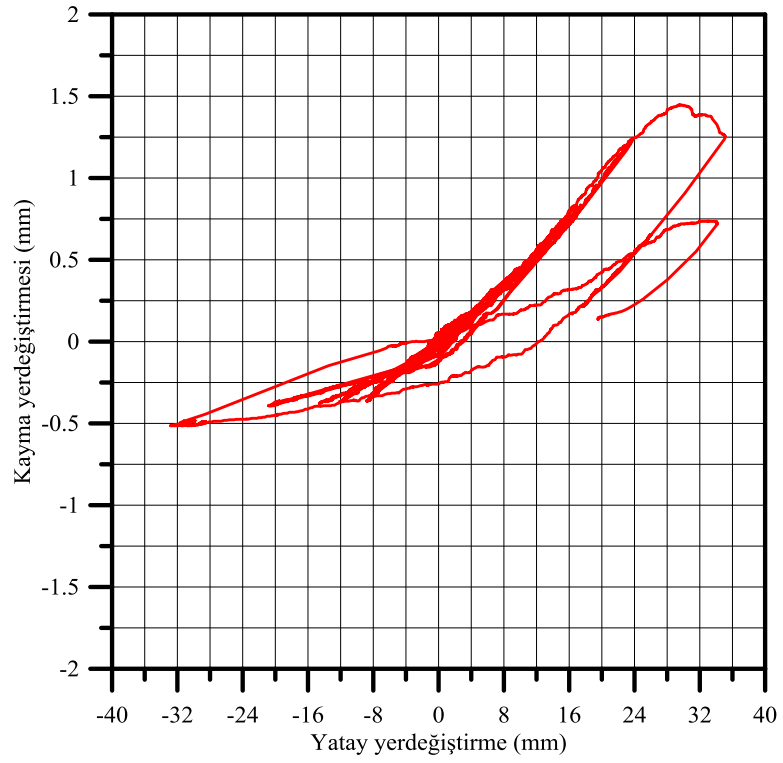
Şekil 3.3. Büyük yerdeğiştirme altındaki deney sisteminin görüntüsü



Şekil 3.4. Deney sonrası kiriş donatılarının görünümü



Şekil 3.5. Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı



Şekil 3.6. RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğıştirmeleri

Tablo 3.1.1. CRCB'ye ait deney sonuçları

Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	İtme (+)			Çekme (-)			Deneysel gözlemler
		P, kN	d, mm	Kayma (mm)	P, kN	d, mm	Kayma (mm)	
1	2	36.38	1.27	0.034	54.54	1.23	0.034	Hasar yok
2	2	47.61	1.65	0.049	67.73	1.74	0.067	Hasar yok
3	2	66.00	2.33	0.080	82.87	2.39	0.077	Hasar yok
4	2	88.44	3.26	0.119	102.52	3.26	0.098	Hasar yok
5	2	114.71	4.38	0.175	116.63	3.97	0.153	Köşe çatlakları
6	2	152.66	6.39	0.196	155.77	6.00	0.208	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
7	2	190.04	8.81	0.404	202.79	8.44	0.331	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
8	2	237.44	12.16	0.542	253.97	12.18	0.358	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
9	2	289.90	17.41	0.833	299.90	17.41	0.380	Büyük diyagonal çatlak
10	2	384.45	23.87	1.243	390.46	23.83	0.398	Çatlaklar perde başlıkları üzerinde
11	2	423.64	28.98	1.436	280.13	35.13	0.514	Diyagonal çatlağın açılması ve ani göçme

### 3.2.2. Sargılı Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanı (DRCB)

FEMA-461' göre hazırlanan yerdeğiştirme kontrollü artımlı çevrimsel yatay yük etkisinde davranışı incelenen sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının deney süresince çatlak gelişimi aşamalı olarak incelenmiştir. Deney elemanındaki ilk çatlak, sol üst kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında itmede 3.23 mm yerdeğiştirme ve 64.489 kN yük civarında meydana gelmiştir. İkinci çatlak, sağ alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında itmede 3.23 mm yerdeğiştirme ve 63.695 kN yük civarında meydana gelmiştir. Üçüncü çatlak, sol alt kiriş- perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında çekmede 3.24 mm yerdeğiştirme ve 55.656 kN yük civarında meydana gelmiştir. Dördüncü çatlak ise, sağ üst kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında çekmede 3.256 mm yerdeğiştirme ve 55.259 kN yük civarında meydana gelmiştir. 4. yük adımında görülen bu çatlaklar yaklaşık 45°'lik açılar ile oluşmuşlardır. 5. ve 6. yük adımında çatlaklar, dik açılar yaparak kiriş perde duvar birleşim bölgesinden kiriş ortasına doğru ilerlemiştir. 7. yük adımında kiriş orta bölgesine yakın itmede 8.676 mm ve çekmede 8.74 mm yerdeğiştirme ve bunlara mukabil 181.976 kN ve 157.769 kN yük değerlerinde diyagonal çatlaklar görülmüştür. 8. yük adımında ise perde duvar başlıklarındaki ilk çatlaklar ortaya çıkmıştır. Başlıklarda ortaya çıkan ilk çatlakların yerdeğiştirme değerleri sırasıyla itmede 12.188 mm ve çekmede 12.188 mm ve yük değerleri sırasıyla 259.393 kN ve 223.084 kN olarak tespit edilmiştir. 9. yük adımında tersinir yüklerde hem perde duvarlardaki çatlak ağı genişlemiş hem de bağ kirişindeki dik ve diyagonal çatlaklar artmıştır. 10. yük adımında yük değeri, itmede 497.239 kN ve çekmede 468.020 kN değerine ulaşmış olmasına rağmen bağ kirişinde sadece ince diyagonal ve dik çatlak ağı artmış ve başlıklardaki çatlaklar mesnetlere doğru ilerlemiştir. 11. yük adımında itmede 33.346 mm yerdeğiştirme ve 608.216 kN yük değerinde çekmeye maruz sol üst ve sağ alt birleşim bölgelerinde çekme çatlakları açılmış ve basınca maruz sol alt ve sağ üst birleşim bölgesindeki betonda ezilme döküntüsü oluşmuştur. Tersinir yüklerde basınç etkisinde ezilen beton, çekme etkisinde ise birleşim bölgesindeki çatlak ağının birleşim yüzeyi boyunca ilerlemesini kolaylaştırmıştır. 12. yük adımında basınç altında ezilen köşe betonu, çekme etkisiyle döküntü haline gelmiştir. İtmede 46.662 mm ve 639.727 kN yük değeri sonrasında alt ve üst birleşim bölgelerindeki çatlaklar birleşmiş ve beton dökülmeye devam etmiştir. 12. yük adımının sonunda kiriş-duvar birleşim



köşelerindeki betonlarda büyük miktarda döküntüler ve kiriş gövdesindeki çatlaklarda açılmalar görülmüştür. 13. yük adımının ilk çevriminin itme aşamasında kiriş gövdesindeki diyagonal çatlaklar döküntü oluşturacak seviyeye gelirken, çekme aşamasında ise sol alt birleşim bölgesinden büyük miktarda beton parçası kopmuştur. 13. yük adımının sonunda ise kiriş alt betonu tamamen dökülmüştür. Yük adımları içerisinde ani yük kaybı oluşmamıştır, fakat 12. yük adımının ikinci çevriminden sonra yükler azalmaya başlamıştır. 13. yük adımında, yük değeri nihai yük değerinin %20'si seviyelerine kadar düşmesi sebebiyle deney durdurulmuştur. Deney elemanı, basınç etkisiyle ezilen köşe betonlarının dökülmesi ve çatlakların üst birleşimden alt birleşim bölgesine ilerleyerek eğilme dayanımını kaybetmesi sonucu göçmüştür.

Deneyden sonrası deney elemanının büyük yerdeğiştirme altındaki hasar durumunu görmek için deney elemanı her iki yükleme yönünde büyük yerdeğiştirmelere maruz bırakılmıştır. Sistemin yer değiştirmiş görüntüsü Şekil 3.7'de ve yerdeğiştirme sonrası bağ kirişinin hasar görüntüsü Şekil 3.8'de verilmektedir.



Şekil 3.7. Büyük yerdeğiştirme altındaki deney sisteminin görüntüsü



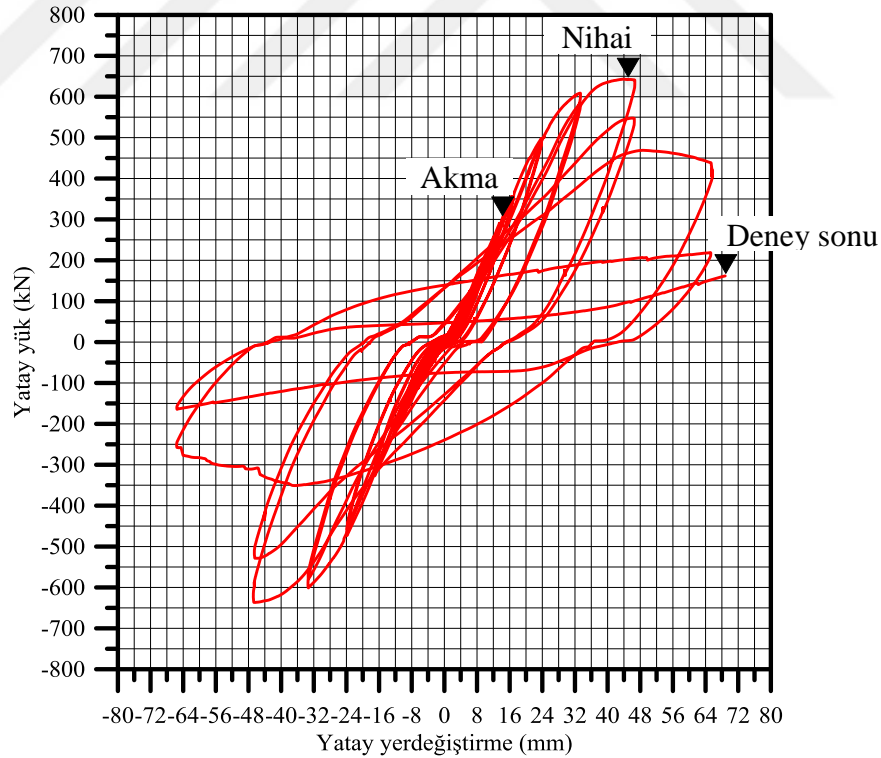
Şekil 3.8. Büyük yerdeğiştirme altındaki sargılı diyagonal donatılı bağ kirişinde oluşan hasar

Büyük yerdeğiştirmeler altında çekirdek beton parçalandığı için diyagonal donatıların durumu kolaylıkla tespit edilmektedir. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi diyagonal donatıların bir kısmının burkulduğu, bir kısmının ise kırıldığı görülmektedir. Büyük yerdeğiştirmeler altında diyagonal donatıların etrafındaki sargıların bile yeterli olmadığı görülmüştür.

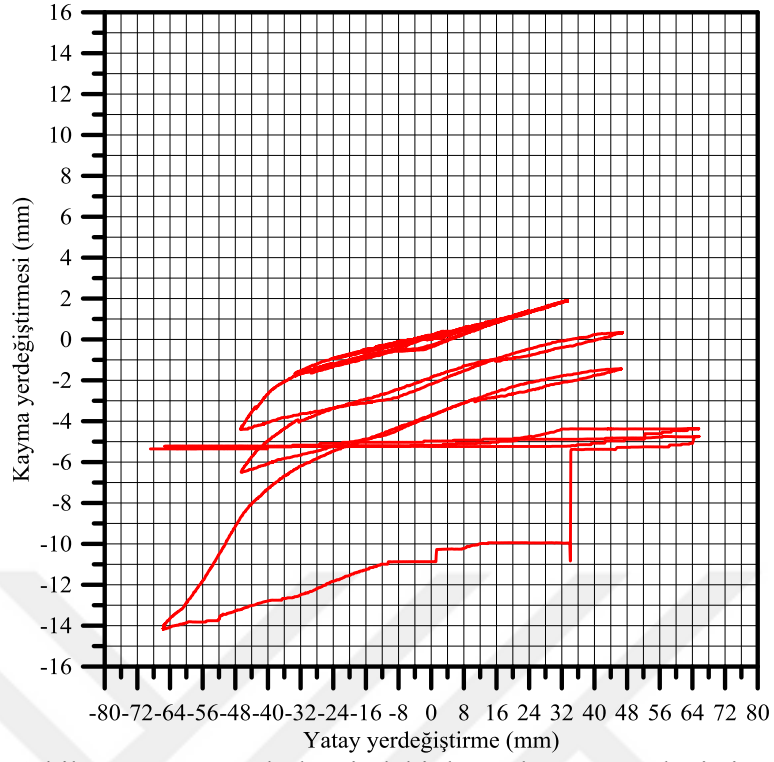
Deney sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisine ait grafik Şekil 3.9’da verilmektedir. Sargılı diyagonal donatılı deney elemanının bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesinde, alt ve üst bölgeye olmak üzere yatay 2 adet (I1 ve I2) ve perde duvar orta bölgesine yatay 1 adet (W) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Kullanılan bütün birim şekildeğiştirme ölçerlerin okuma sınır değeri % 0.75 olarak sabitlenmiştir. Ayrıca alt ve üst diyagonal donatılarda toplam 2 adet (T1 ve T2) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. T1 donatısındaki birim şekildeğiştirme ölçerden ise deney esnasında voltaj alınamamıştır. Donatılarda ilk akma 9. yük adımında 14,490 mm yerdeğiştirme ve 310,251 kN yük seviyesi civarlarında meydana gelmiştir. T2 donatısındaki birim şekildeğiştirme ölçer, 10. yük adımının ilk çevriminden sonra okuma yapmamıştır. Bu nedenle deneyin sonuna kadar donatılardaki birim şekildeğiştirme değerleri elde edilememiştir. Perde duvar üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer (W), deney sonuna kadar 0.0025 seviyelerinde kararlı olarak okuma yapmıştır. I1 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer 10. yük adımının sonunda nihai sınırına kadar çıkmıştır. 11. yük adımının ilk çevriminde ise okuma

sınır değerine tamamen ulaşmıştır. I2 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer ise 10. yük adımının sonunda nihai sınırına kadar çıkmış ve 11. yük adımının ilk çevriminde okuma sınır değerine tamamen ulaşmıştır.

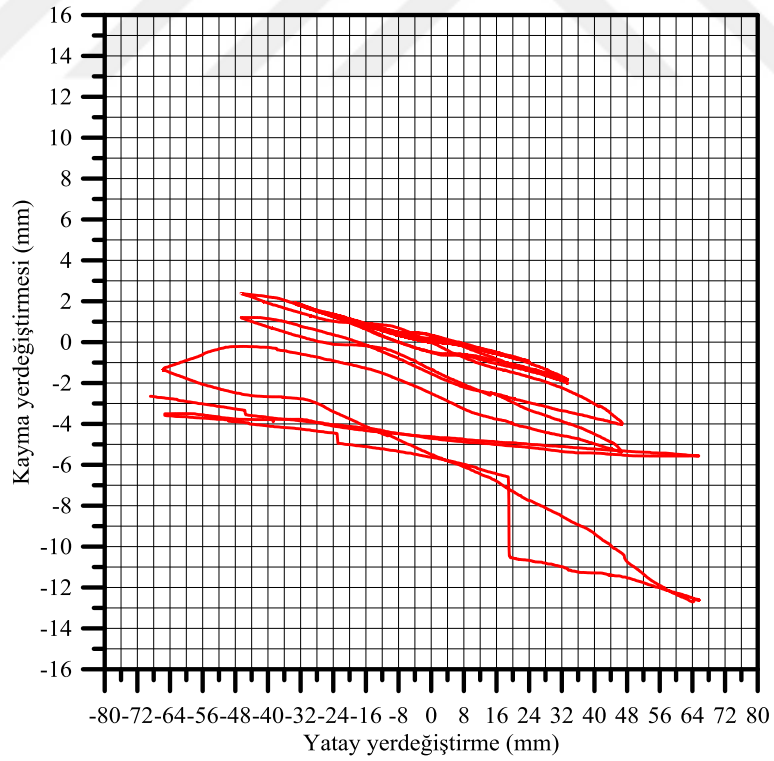
Bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmelerinin ölçümü için sol alt birleşimde (LLPDT) ve sağ alt birleşimde (RLPDT) 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Sol ve sağ alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerlerden alınan düşey kaymaların yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiği Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de verilmektedir. Şekil 3.10 incelendiğinde, kirişin sol tarafında 12. yük adımının ilk çevrimine kadar 2 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. Bu çevrimden sonra döküntü oluşması sebebiyle alınan ölçümler kararlılığını kaybetmiştir. Şekil 3.11’e göre, kirişin sağ tarafında 12. yük adımının ilk çevrimine kadar 2.30 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. Bu çevrimden sonra döküntü oluşması sebebiyle alınan ölçümler kararlılığını kaybetmiştir. Sonuçlar, Tablo 3.2’de özetlenmektedir.



Şekil 3.9. Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının çevrimsel yük altındaki performansı



şekil 3.10. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri



şekil 3.11. RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri

Tablo 3.2.DRCB'ye ait deney sonuçları

Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	İtme (+)			Çekme (-)			DeneySEL gözlemler
		P, kN	d, mm	Kayma (mm)	P, kN	d, mm	Kayma (mm)	
1	2	26.22	1.23	0.031	23.74	1.21	0.006	Hasar yok
2	2	33.71	1.64	0.040	30.90	1.72	0.006	Hasar yok
3	2	46.24	2.31	0.070	41.47	2.37	0.009	Hasar yok
4	2	64.48	3.22	0.107	55.65	3.23	0.021	Köşe çatlakları
5	2	88.26	4.43	0.162	77.69	4.512	0.043	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
6	2	124.73	6.27	0.248	110.79	6.38	0.095	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
7	2	181.97	8.67	0.361	157.76	8.740	0.171	Kiriş ortasında diyagonal çatlaklar
8	2	259.39	12.18	0.576	223.08	12.18	0.312	Perde duvar başlıklarında çatlak oluşumu
9	2	366.36	16.97	0.906	325.80	17.05	0.551	Perde duvar başlıklarında çatlak ağının genişlemesi
10	2	497.23	23.76	1.353	468.02	23.91	0.955	Kiriş ve başlıklarda çatlakların ilerlemesi
11	2	608.21	33.34	1.935	593.66	33.41	1.837	Basınç bölgelerinde beton döküntüleri
12	2	639.72	46.66	2.379	625.69	46.80	3.962	Kiriş-perde birleşim yüzeyinde çatlak ilerlemesi
13	2	427.49	65.48	-1.304	253.12	65.60	12.619	Kiriş sol alt köşesinden betonun kopması

### 3.2.3. Sargısız Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanı (DRCB-FC)

Çevrimsel yatay yük etkisinde davranışı incelenen sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının deney süresince çatlak gelişimi aşamalı olarak incelenmiştir. Deney elemanındaki ilk çatlak, sol üst kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 3. yük adımında itmede 2.34 mm yerdeğiştirme ve 69.72 kN yük civarında meydana gelmiştir. İkinci çatlak, sağ alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında itmede 3.54 mm yerdeğiştirme ve 93.02 kN yük civarında meydana gelmiştir. Üçüncü çatlak, sol alt kiriş- perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında çekmede 3.29 mm yerdeğiştirme ve 81.66 kN yük civarında meydana gelmiştir. Dördüncü çatlak ise, sağ üst kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında çekmede 3.29 mm yerdeğiştirme ve 81.66 kN yük civarında meydana gelmiştir. 4. yük adımında görülen bu çatlaklar yaklaşık 45°'lik açılar ile oluşmuşlardır. 5. ve 6. yük adımında çatlaklar, dik açılar yaparak kiriş perde duvar birleşim bölgesinden kiriş ortasına doğru ilerlemiştir. 7. yük adımında kiriş orta bölgesine yakın itmede 8.75 mm ve 8.79 mm yerdeğiştirme ve buna mukabil 225.48 kN ve 208.97 kN yük değerlerinde diyagonal çatlaklar görülmüştür. 8. yük adımında ise perde duvar başlıklarındaki ilk çatlaklar ortaya çıkmıştır. Başlıklarda ortaya çıkan ilk çatlakların yerdeğiştirme değerleri sırasıyla itmede 12.07 mm ve çekmede 12.15 mm ve yük değerleri sırasıyla 284.73 kN ve 262.60 kN olarak tespit edilmiştir. 9. yük adımında tersinir yüklerde hem perde duvarlardaki çatlak ağı genişlemiş hem de bağ kirişindeki dik ve diyagonal çatlaklar artmıştır. 10. yük adımında yük değeri, itmede 472.89 kN ve çekmede 406.69 kN değerine ulaşmış olmasına rağmen bağ kirişinde sadece ince diyagonal ve dik çatlak ağı artmış ve başlıklardaki çatlaklar mesnetlere doğru ilerlemiştir. 11. yük adımında itmede 33.28 mm yerdeğiştirme ve 555.74 kN yük değerinde çekmeye maruz sol üst ve sağ alt birleşim bölgelerinde çekme çatlakları açılmış ve basınca maruz sol alt ve sağ üst birleşim bölgesindeki betonda ezilme döküntüsü oluşmuştur. Tersinir yüklerde basınç etkisinde ezilen beton, çekme etkisinde ise birleşim bölgesindeki çatlak ağının birleşim yüzeyi boyunca ilerlemesini kolaylaştırmıştır. 12. yük adımında basınç altında ezilen köşe betonu, çekme etkisiyle döküntü haline gelmiştir. İtmede 46.66 mm ve 639.72 kN yük değeri sonrasında alt ve üst birleşim bölgelerindeki çatlaklar birleşmiş ve beton dökülmeye devam etmiştir. 12. yük adımının ilk çevriminin itme aşamasında kiriş gövdesindeki diyagonal çatlaklar döküntü oluşturacak seviyeye gelirken, sağ üst, sağ alt ve sol alt betonunda dökülme olmuştur. 12. yük adımının sonunda ise kiriş diyagonal olarak çatlama ve

köşelerde eğilme çatlakları belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Yük adımları içerisinde ani yük kaybı oluşmamıştır, fakat 12. yük adımının 1. çevriminden sonra yükler azalmaya başlamıştır. 12. yük adımında, yük değeri nihai yük değerinin %60'ı seviyelerine kadar düşmesi sebebiyle deney durdurulmuştur. Deney tamamlandıktan sonra yükleme protokolüne bağlı olarak yüklemeye devam edilmiştir. Deney elemanı, basınç etkisiyle ezilen köşe betonlarının dökülmesi sonucu çatlakların üst birleşimden alt birleşim bölgesine ilerlemesi ile kiriş eğilme dayanımını kaybetmiş ve diyagonal çekme çatlaklarının kiriş gövdesinde artması sonucu göçmüştür.

Deneyden sonra deney elemanının büyük yerdeğiştirme altındaki hasar durumunu görmek için deney elemanı her iki yükleme yönünde büyük yerdeğiştirmelere maruz bırakılmıştır. Sistemin nihai hasar sonrası görüntüsü Şekil 3.12'de ve yerdeğiştirme sonrası bağ kirişinin hasar görüntüsü Şekil 3.13'te verilmektedir. Büyük yerdeğiştirmeler altında çekirdek beton parçalandığı için diyagonal donatıların durumu kolaylıkla tespit edilmektedir. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi diyagonal donatılar, birleşim bölgesinin gerisinden simetrik olarak burkulmuşlardır.



Şekil 3.12. Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü

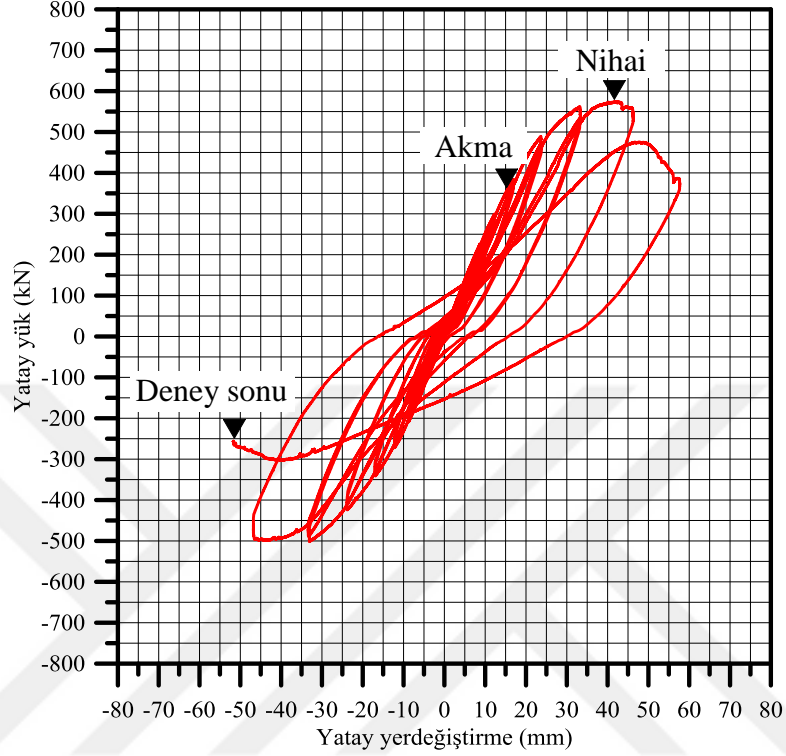


Şekil 3.13. Nihai hasar sonrası diyagonal donatıların burkulması

Deney sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisine ait grafik Şekil 3.14’te verilmektedir. Sargısız diyagonal donatılı deney elemanının bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesinde, alt ve üst bölgeye olmak üzere yatay 2 adet (I1 ve I2) ve perde duvar orta bölgesine yatay 1 adet (W) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Ayrıca alt ve üst diyagonal donatılarda toplam 2 adet (T1 ve T2) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. T1 donatısındaki ilk akma 9. yük adımında 16.19 mm yerdeğiştirme ve 371.18 kN yük seviyesi civarlarında meydana gelmiştir. T1 donatısındaki birim şekildeğiştirme ölçer, 11. yük adımının ilk çevriminden sonra okuma yapmamıştır. Bu nedenle deneyin sonuna kadar T1 donatısından 0.0075 birim şekildeğiştirmesinden sonraki değerler elde edilememiştir. T2 donatısındaki ilk akma, 10. yük adımında 23.31 mm yerdeğiştirme ve 484.83 kN yük seviyesi civarlarında meydana gelmiştir. T2 donatısındaki birim şekildeğiştirme ölçer, 11. yük adımının ilk çevriminden sonra okuma yapmamıştır. Bu nedenle deneyin sonuna kadar T2 donatısından 0.0075 birim şekildeğiştirmesinden sonraki değerler elde edilememiştir. Perde duvar üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer (W), deney başında voltaj dengesizliği sebebiyle düzensiz veri sağlamıştır ve deneyin ilk aşamalarından sonra veri alınamamıştır. I1 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer 9. yük adımının ilk çevriminde yaklaşık 0,006 birim şekildeğiştirme değerini yakalamış ve 10. yük adımının ilk çevriminden sonra nihai sınırına ulaşarak veri aktarma özelliğini kaybetmiştir. I2 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer ise 7. yük adımının ilk çevriminde 0.005 birim şekildeğiştirme

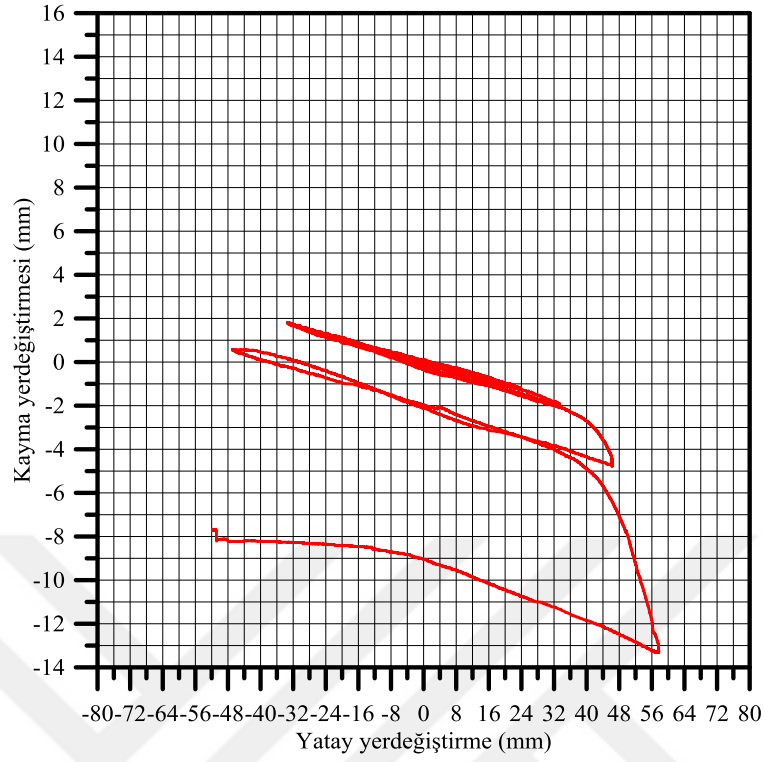


değerine ulaşmış ve 10. yük adımının ilk çevriminde okuma sınır değerine tamamen ulaşmıştır.

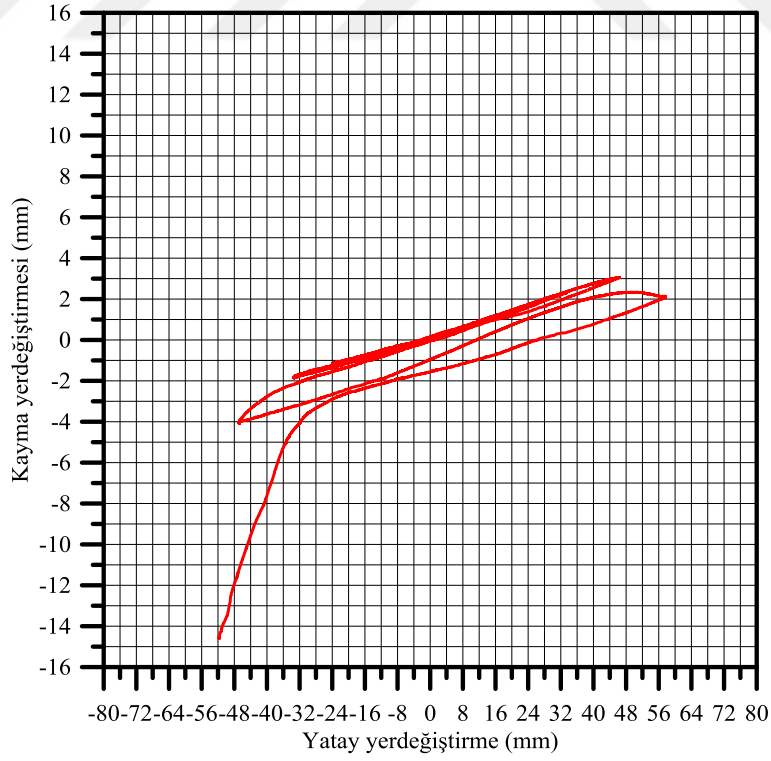


Şekil 3.14. Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının çevrimsel yük altındaki performansı

Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanında bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmelerinin ölçümü için sol alt birleşimde (LLPDT) ve sağ alt birleşimde (RLPDT) birer adet olmak üzere 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Sol ve sağ alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerlerden alınan düşey kaymaların yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiği Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da verilmektedir. Şekil 3.15 incelendiğinde, kirişin sol tarafında 12. yük adımının ilk çevrimine kadar yaklaşık 2 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. 12. yük adımının ilk çevriminin sonunda yaklaşık 4.80 mm değerinde düşey yerdeğiştirme okunmuştur. Diğer adımlarda oluşan beton döküntüleri sebebiyle alınan ölçümler kararlılığını kaybetmiştir. Şekil 3.16'ya göre, kirişin sağ tarafında 11. yük adımının ilk çevriminin sonuna kadar 2.315 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. 12. yük adımının ilk çevriminin sonunda ise 3.056 değerine kadar yükselmiştir. Sonuçlar, Tablo 3.3'te özetlenmektedir.



şekil 3.15. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri



şekil 3.16. RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri

Tablo 3.3. DRCB-FC'ye ait deney sonuçları

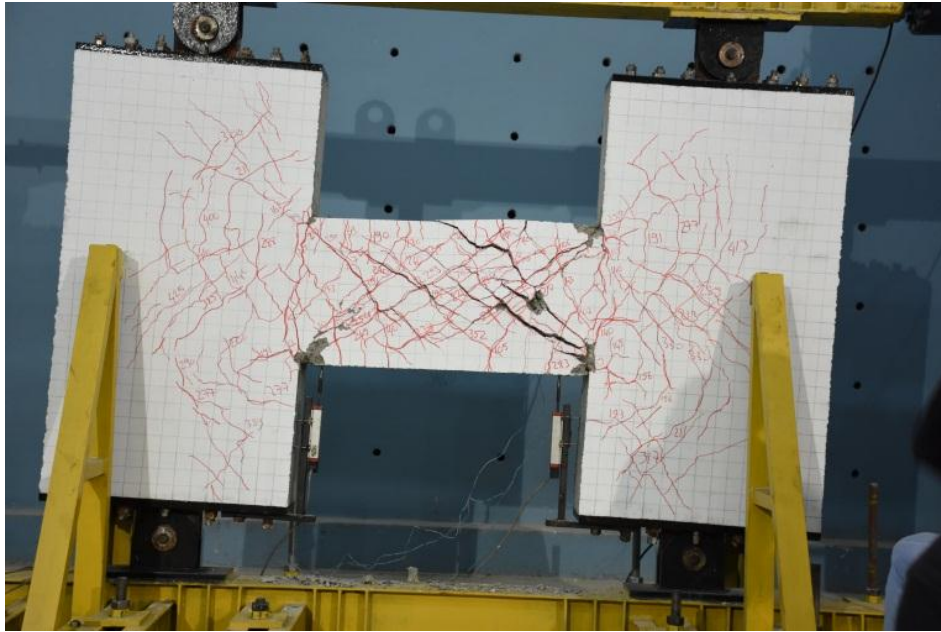
Yerdeğiştirme adımları	Çevrim sayısı	İtme (+)			Çekme (-)			Deneysel gözlemler
		P, kN	d, mm	Kayma (mm)	P, kN	d, mm	Kayma (mm)	
1	2	37.80	1.22	0.024	32.38	1.21	0.043	Hasar yok
2	2	48.35	1.58	0.046	43.64	1.72	0.043	Hasar yok
3	2	74.95	2.53	0.104	64.58	2.37	0.070	Köşe çatlakları
4	2	94.06	3.23	0.144	81.66	3.23	0.101	Köşe çatlakları
5	2	120.41	4.28	0.220	109.83	4.51	0.147	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
6	2	166.78	6.23	0.334	152.72	6.38	0.224	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
7	2	225.48	8.75	0.518	208.97	8.74	0.340	Kiriş ortasında diyagonal çatlaklar
8	2	299.51	12.31	0.824	261.76	12.18	0.518	Perde duvar başlıklarında çatlak oluşumu
9	2	381.52	17.00	1.216	338.54	17.05	0.787	Perde duvar başlıklarında çatlak ağının genişlemesi
10	2	482.48	23.68	1.672	423.55	23.91	1.148	Kiriş ve başlıklarda çatlakların ilerlemesi
11	2	555.74	33.28	2.315	493.29	33.41	1.767	Basınç bölgelerinde beton döküntüleri, eğilme çatlakları
12	2	538.38	46.28	3.056	498.34	46.80	3.553	Kiriş köşelerinde dökümler, diyagonal yarıma

### 3.2.4. Demet Diyagonal Donatılı Bağ Kirişi Deney Elemanı (BDRCB)

Çevrimsel yatay yük etkisinde davranışı incelenen demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının deney süresince çatlak gelişimi aşamalı olarak irdelenmiştir. Deney elemanındaki ilk çatlak, sağ üst kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 3. yük adımında çekmede 2.29 mm yerdeğiştirme ve 57.09 kN yük civarında meydana gelmiştir. İkinci çatlak, sol alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 3. yük adımında çekmede 2.29 mm yerdeğiştirme ve 57.09 kN yük civarında meydana gelmiştir. Üçüncü çatlak, sağ alt kiriş- perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında itmede 3.20 mm yerdeğiştirme ve 41.53 kN yük civarında meydana gelmiştir. Dördüncü çatlak ise, sol üst kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında 4. yük adımında 3,20 mm yerdeğiştirme ve 41,53 kN yük civarında meydana gelmiştir. 4. yük adımında görülen bu çatlaklar yaklaşık 45°'lik açılar ile oluşmuşlardır. 5. ve 6. yük adımlarında eğilme çatlakları, dik açılar yaparak kiriş perde duvar birleşim bölgesinden kiriş ortasına doğru ilerlemiştir. 7. yük adımında ise perde duvar başlıklarındaki ilk çatlaklar ortaya çıkmıştır. Başlıklarda ortaya çıkan ilk çatlakların yerdeğiştirme değerleri sırasıyla çekmede 8.63 mm ve itmede 8.65 mm ve yük değerleri sırasıyla 198.41 kN ve 156.66 kN olarak tespit edilmiştir. 8. yük adımında itmede 12.08 mm yerdeğiştirme ve 228.98 kN yük değerinde kiriş ortasındaki ilk diyagonal çatlaklar ortaya çıkmıştır. Çekmede 12.17 mm ve 277.21 kN yük değerinde tersinir yönde diyagonal çatlaklar belirginleşmiştir. Ayrıca perde başlıklarındaki çatlaklar mafsallara doğru ilerlemiştir. 9. yük adımında tersinir yüklerde hem perde duvarlardaki çatlak ağı genişlemiş hem de bağ kirişindeki dik ve diyagonal çatlaklar artmıştır. Kiriş-perde duvar birleşim bölgesindeki eğilme çatlağı belirginleşmiş ve ilerlemiştir. 10. yük adımında yük değeri, itmede 456.00 kN ve çekmede 490.27 kN değerine ulaşmış olmasına rağmen bağ kirişinde sadece ince diyagonal ve dik çatlak ağı artmış ve başlıklardaki çatlaklar mesnetlere doğru ilerlemiştir. 11. yük adımında yük değeri, itmede 564.72 kN ve çekmede 584.65 kN değerine ulaşmış olmasına rağmen bağ kirişinde sadece ince diyagonal ve dik çatlak ağı artmış ve başlıklardaki çatlaklar ağı yoğunlaşmıştır. 12. yük adımında itmede 46.94 mm yerdeğiştirme ve 633.03 kN yük değerinde çekmeye maruz sol üst ve sağ alt birleşim bölgelerinde eğilme çatlakları çekme etkisi altında açılmış ve basınca maruz sağ üst birleşim bölgesindeki betonda hafif ezilme döküntüsü oluşmuştur. Tersinir yüklerde basınç etkisinde ezilen beton, çekme etkisinde ise birleşim bölgesindeki çatlak ağının birleşim yüzeyi boyunca ilerlemesini kolaylaştırmıştır. 12. yük adımında basınç altında

ezilen köşe betonu, çekme etkisiyle döküntü haline gelmiştir. Çekmede 46,72 mm ve 635.44 kN yük değeri sonrasında alt ve üst birleşim bölgelerindeki çatlaklar birleşmiş ve beton dökülmeye devam etmiştir. 13. yük adımında itmede 65.14 mm ve 563.28 kN yük değerinde kiriş gövdesindeki diyagonal çatlaklar belirgin bir şekilde açılmıştır. Basınç bölgelerindeki betonda dökülmeler devam etmiştir. Tersinir yönde çekmede 48.16 mm yerdeğiştirme ve 500.81 kN yük değerinde ters diyagonal çatlaklar açılmış, yükün artışına bağlı olarak genişlemiştir. Çekmede 54.15 mm yerdeğiştirme ve 478.59 kN yük değerinde kirişin sağ birleşim bölgesinde büyük çatlak meydana gelmiştir. 13. yük adımının ilk çevriminin sonunda kiriş sağ üst bölgesindeki betonun büyük bölümü parçalanmıştır. Son çevrimde gövde betonunun tamamı dökülmüş ve burkulan diyagonal donatılar ortaya çıkmıştır. 13. yük adımı tamamlanarak deney durdurulmuştur.

Deneyden sonra deney elemanının büyük yerdeğiştirme altındaki hasar durumunu görmek için deney elemanı her iki yükleme yönünde büyük yerdeğiştirmelere maruz bırakılmıştır. Sistemin nihai hasar sonrası görüntüsü Şekil 3.17’de ve yerdeğiştirme sonrası bağ kirişinin hasar görüntüsü Şekil 3.18’de verilmektedir. Büyük yerdeğiştirmeler altında çekirdek beton parçalandığı için diyagonal donatıların durumu kolaylıkla tespit edilmektedir. Şekil 3.18’de görüldüğü gibi diyagonal donatılar, kirişin sağ birleşim bölgesine yakın yerden burkulmuştur. Burkulan ve kopan diyagonal donatılar açık bir şekilde görülmektedir.



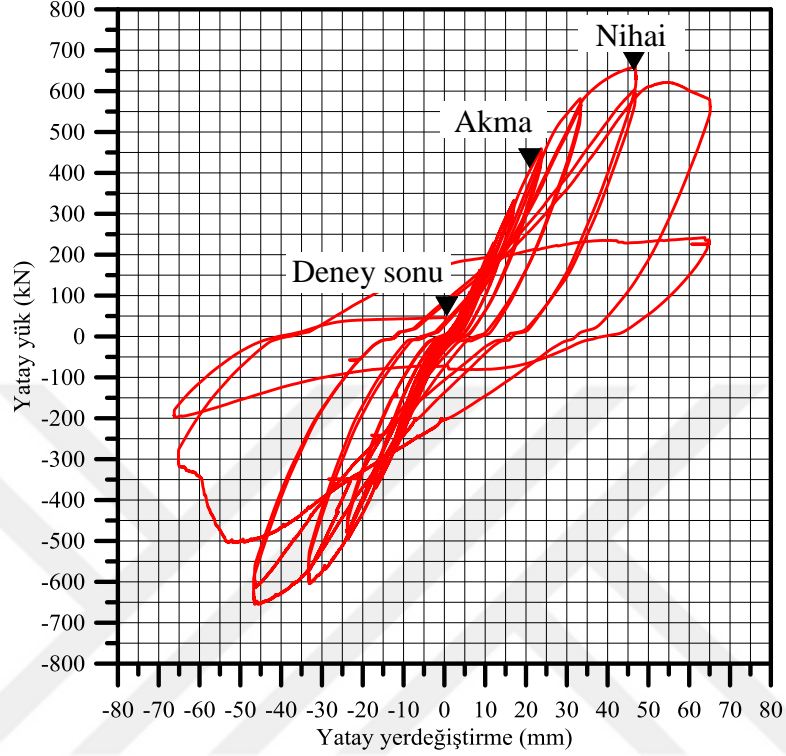
Şekil 3.17. Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü



Şekil 3.18. Nihai hasar sonrası diyagonal donatılarda burkulma ve kopma

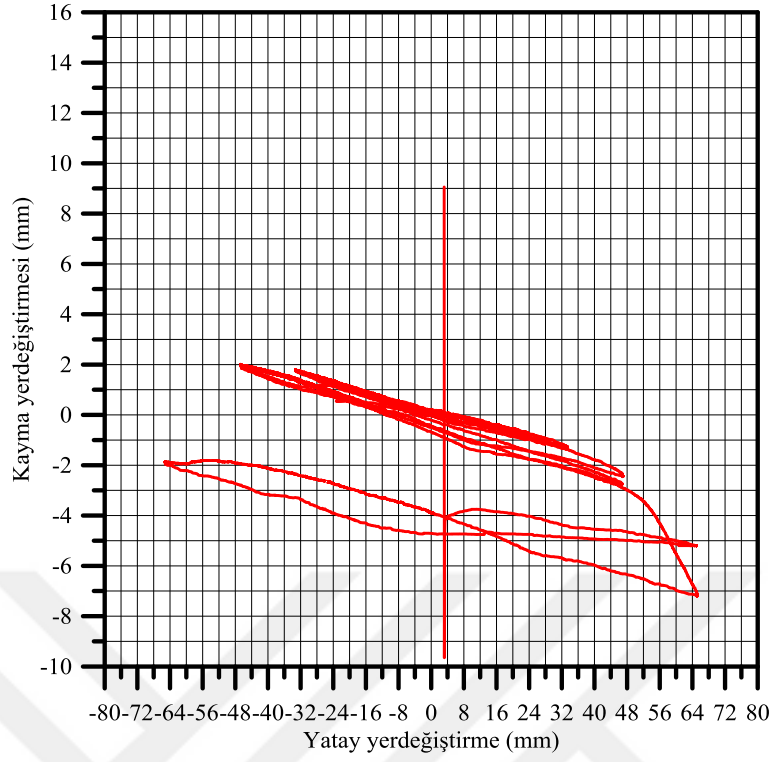
Deney sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisine ait grafik Şekil 3.19’da verilmektedir. Sargılı diyagonal donatılı deney elemanının bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesinde, alt ve üst bölgeye olmak üzere yatay 2 adet (I1 ve I2) ve perde duvar orta bölgesine yatay 1 adet (W) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Kullanılan bütün birim şekildeğiştirme ölçerlerin okuma sınır değeri % 0.75 olarak sabitlenmiştir. Ayrıca alt ve üst diyagonal donatılarda toplam 2 adet (T1 ve T2) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. T1 donatısındaki ilk akma 10. yük adımında 20,366 mm yerdeğiştirme ve 392,070 kN yük seviyesi civarlarında meydana gelmiştir. T1 donatısındaki birim şekildeğiştirme ölçer, 11. yük adımının ilk çevriminden sonra okuma yapmamıştır. Bu nedenle deneyin sonuna kadar T1 donatısından 0.0075 birim şekildeğiştirmesinden sonraki değerler elde edilememiştir. T2 donatısındaki ilk akma, 10. yük adımında çekmede 20.32 mm yerdeğiştirme ve 437.51 kN yük seviyesi civarlarında meydana gelmiştir. T2 donatısındaki birim şekildeğiştirme ölçer, 11. yük adımının son çevriminden sonra okuma yapmamıştır. Bu nedenle deneyin sonuna kadar T2 donatısından 0.0075 birim şekildeğiştirmesinden sonraki değerler elde edilememiştir. Perde duvar üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer (W), deney başında voltaj dengesizliği sebebiyle düzensiz veri sağlamıştır ve deneyin ilk aşamalarından sonra veri alınamamıştır. I1 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer 11. yük adımının ilk çevriminde yaklaşık 0.006 birim şekildeğiştirme değerinin yakalamış ve veri aktarma özelliğini kaybetmiştir. I2 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer ise 10. yük adımının son çevriminde 0.005 birim

şekildeğiştirme değerine ulaşmış ve 11. yük adımının ilk çevriminde okuma sınır değerine tamamen ulaşmıştır.

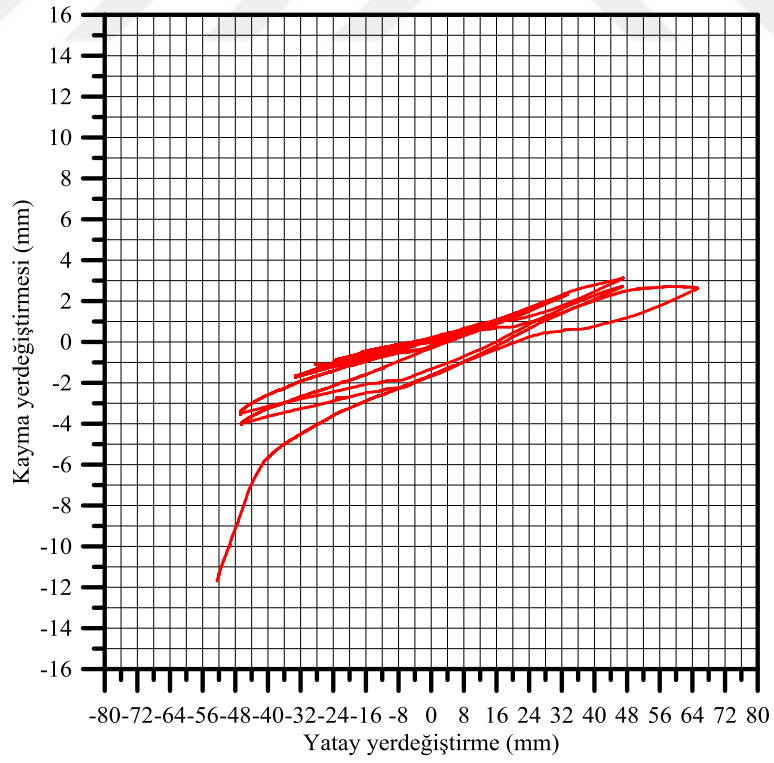


Şekil 3.19. Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanının çevrimsel yük altındaki performansı

Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanında bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmelerinin ölçümü için sol alt birleşimde (LLPDT) ve sağ alt birleşimde (RLPDT) birer adet olmak üzere 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Sol ve sağ alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerlerden alınan düşey kaymaların yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiği Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de verilmektedir. Şekil 3.20 incelendiğinde, kirişin sol tarafında 13. yük adımının ilk çevrimine kadar yaklaşık 2.00 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. 13. yük adımının ikinci çevriminin başında yaklaşık 6.00 mm değerinde düşey yerdeğiştirme okunmuştur. Diğer adımlarda oluşan beton döküntüleri sebebiyle alınan ölçümler kararlılığını kaybetmiştir. Şekil 3.21’e göre, kirişin sağ tarafında 12. yük adımının sonuna kadar yaklaşık 3.00 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. 13. yük adımının ilk çevriminin sonunda döküntüler alınan verilerin kararlılığını düşürmüştür. Bütün sonuçlar, Tablo 3.4’te özetlenmektedir.



şekil 3.20. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri



şekil 3.21. RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri



Tablo 3.4. BDRCB'ye ait deney sonuçları

Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	İtme (+)				Çekme (-)				DeneySEL gözlemler
		P, kN	d, mm	Kayma (mm)	P, kN	d, mm	Kayma (mm)			
1	2	13.50	1.23	0.037	34.50	1.22	0.006	Hasar yok		
2	2	18.00	1.64	0.043	43.06	1.66	0.006	Hasar yok		
3	2	27.32	2.30	0.080	57.09	2.29	0.015	Köşe çatlakları		
4	2	41.53	3.20	0.110	78.45	3.20	0.037	Köşe çatlakları		
5	2	70.17	4.45	0.165	105.41	4.47	0.037	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor		
6	2	107.15	6.24	0.279	145.14	6.30	0.070	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor		
7	2	161.83	8.67	0.426	198.41	8.63	0.141	Başlıklarda ilk çatlak oluşumları		
8	2	228.98	12.08	0.692	277.21	12.17	0.285	Kiriş gövdesinde diyagonal çatlakların oluşması		
9	2	315.20	16.24	1.050	369.94	16.90	0.499	Perde duvar başlıklarında ve kirişte çatlak ağının genişlemesi		
10	2	456.00	23.76	1.644	490.27	23.66	0.906	Kiriş ve başlıklarda çatlakların ilerlemesi		
11	2	564.72	33.40	2.352	584.65	33.25	1.696	Kiriş ve başlıklarda çatlakların ilerlemesi		
12	2	633.03	46.94	3.114	635.44	46.72	3.488	Birleşim bölgelerinde eğilme çatlakları ve hafif döküntüler		
13	2	563.28	65.14	2.627	306.27	65.15	-	Diyagonal donatılarda burkulma, diyagonal basınç kırılması		

### 3.2.5. Hasır Donatılı (19° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanı (MRCB-19)

Çevrimsel yatay yük etkisinde davranışı incelenen hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanının deney süresince çatlak gelişimi aşamalı olarak irdelenmiştir. Deney elemanındaki ilk iki çatlak, sol üst ve sağ alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 3. yük adımında itmede 2.32 mm yerdeğiştirme ve 50.76 kN yük civarında meydana gelmiştir. Üçüncü çatlak, sol alt kiriş- perde duvar birleşim bölgesinde 3. yük adımında çekmede 2.33 mm yerdeğiştirme ve 40.37 kN yük civarında meydana gelmiştir. Dördüncü çatlak ise, sağ üst kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında çekmede 3.30 mm yerdeğiştirme ve 60.60 kN yük civarında meydana gelmiştir. 4. yük adımında görülen bu çatlaklar yaklaşık 45°'lik açılar ile oluşmuşlardır. 5. 6. ve 7. yük adımında çatlaklar, dik açılar yaparak kiriş perde duvar birleşim bölgesinden kiriş ortasına doğru ilerlemiştir. 8. yük adımında kiriş orta bölgesine yakın itmede 8.81 mm ve çekmede 8.79 mm yerdeğiştirme ve buna mukabil 165.89 kN yük değerinde kiriş ortasındaki diyagonal çatlaklar ortaya çıkmıştır. 8. yük adımının ilk çevriminin sonunda ise perde duvar başlıklarındaki ilk çatlaklar ortaya çıkmıştır. Başlıklarda ortaya çıkan ilk çatlakların yerdeğiştirme değerleri sırasıyla itmede 12.15 mm ve çekmede 11.45 mm ve yük değerleri sırasıyla 220.05 kN ve 211.13 kN olarak tespit edilmiştir. 9. yük adımında tersinir yüklerde hem perde duvarlardaki çatlak ağı genişlemiş hem de bağ kirişindeki dik ve diyagonal çatlaklar artmıştır. 10. yük adımında yük değeri, itmede 384.09 kN ve çekmede 399.95 kN değerine ulaşmış olmasına rağmen bağ kirişinde sadece ince diyagonal ve dik çatlak ağı artmış ve başlıklardaki çatlaklar mesnetlere doğru ilerlemiştir. 11. yük adımında perde duvarlardaki çatlak ağı genişlemiş hem de bağ kirişindeki dik ve diyagonal çatlaklar artmıştır. 12. yük adımında birleşim bölgelerindeki eğilme çatlakları genişlemiştir. Çekmede 46.33 mm ve 388,37 kN yük değerinde sol alt ve sağ alt birleşim bölgelerinde betonda kopmalar oluşmuştur. 13. yük adımında birleşim bölgelerinin tamamında döküntüler oluşmuş ve birleşim bölgelerine yakın yerlerde dik eğilme çatlakları görülmüştür. 13. yük adımının ilk çevriminin sonunda sol alt birleşim bölgesinde büyük beton parçası kopmuştur. Tersinir yüklerde birleşim bölgelerindeki betonlar tamamen dökülmüş ve kayma yerdeğiştirmesi belirginleşmiştir. Donatılar ortaya çıkana kadar yükleme protokolü uygulanmış ve deney tamamlanmıştır. Deney elemanı, birleşim bölgelerindeki eğilme dayanımını karşılayamaması sebebiyle kayma göçmesine maruz kalmıştır.

Deneyden sonra deney elemanının büyük yerdeşistirme altındaki hasar durumunu görmek için deney elemanı her iki yükleme yönünde büyük yerdeşistirmelere maruz bırakılmıştır. Sistemin nihai hasar sonrası görüntüsü şekil 3.22’de ve yerdeşistirme sonrası bağ kirişinin hasar görüntüsü şekil 3.23’te verilmektedir. Büyük yerdeşistirmeler altında çekirdek beton parçalandığı için hasır ve gövde donatılarının durumu kolaylıkla tespit edilmektedir. şekil 3.23’te görüldüğü gibi eğilme etkisinde hasır ve gövde donatıları burkulmuştur.

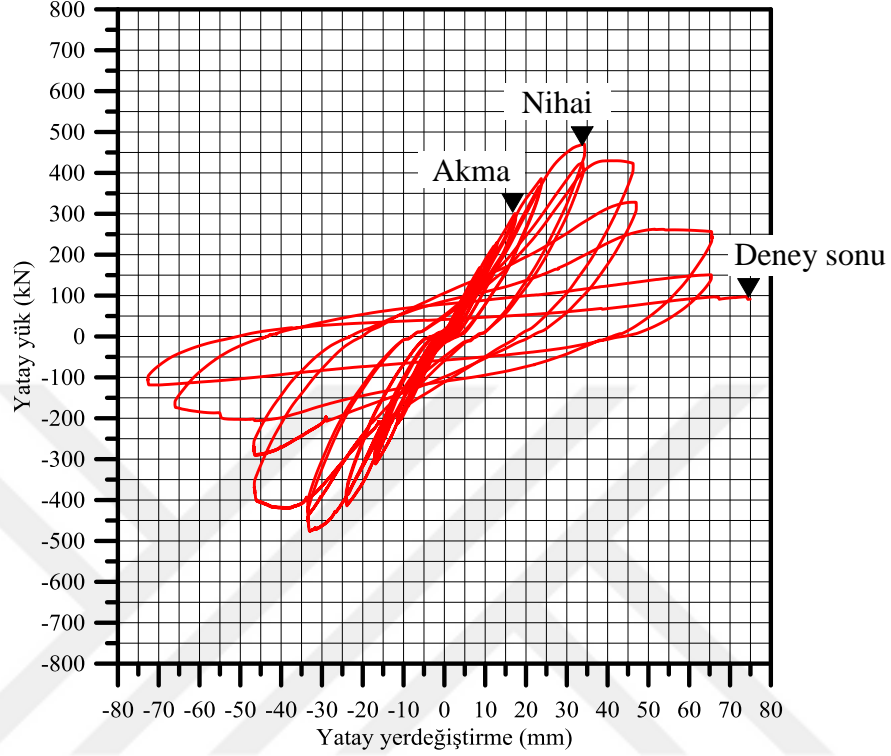


şekil 3.22. Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü



şekil 3.23. Nihai hasar sonrası donatılarda burkulma

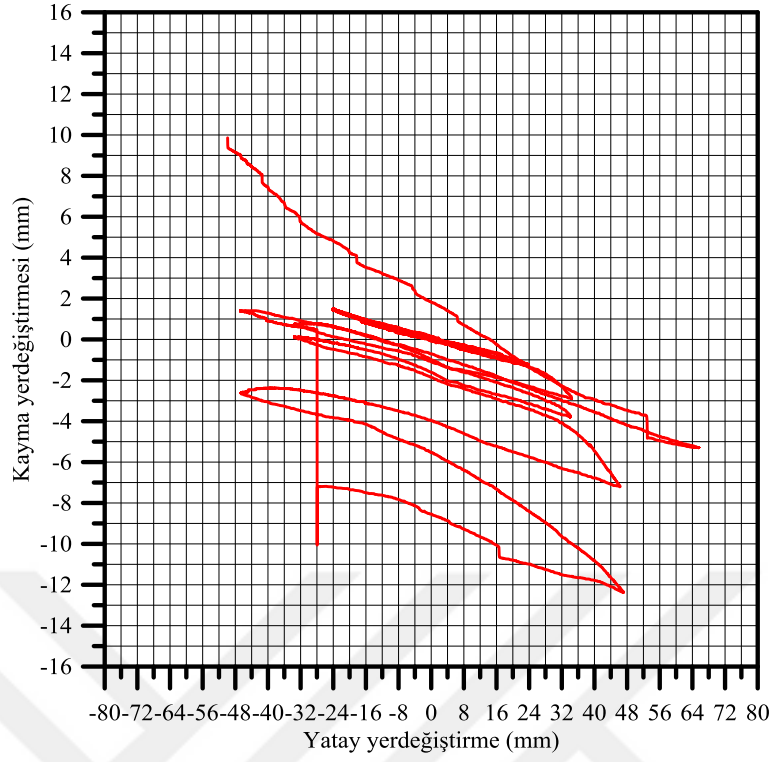
Deney sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisine ait grafik Şekil 3.24'te verilmektedir.



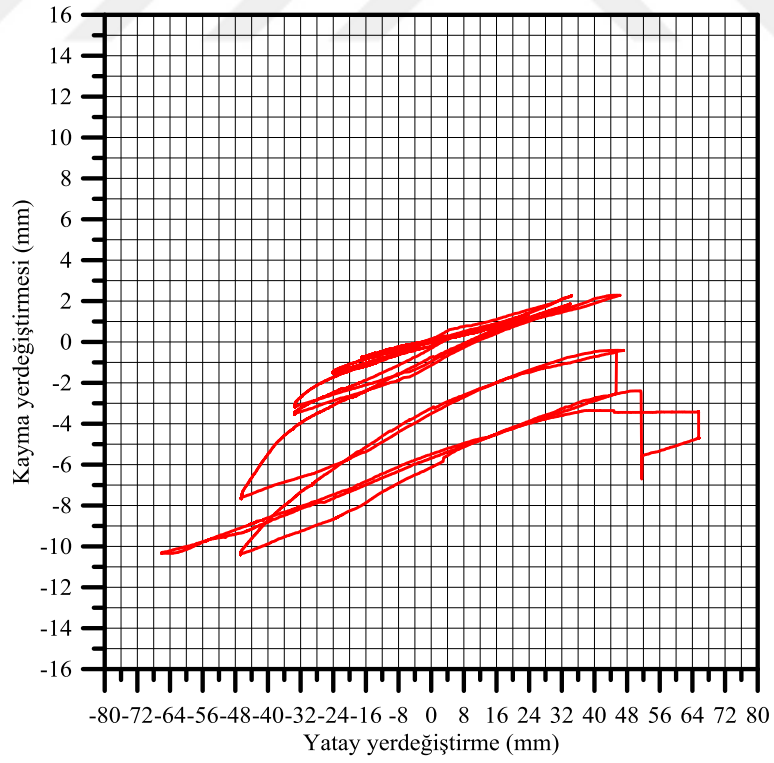
Şekil 3.24. Hasır donatılı (19° açılı) bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı

Hasır donatılı (19° açılı) deney elemanının bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesinde, alt ve üst bölgeye olmak üzere yatay 2 adet (I1 ve I2) ve perde duvar orta bölgesine yatay 1 adet (W) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Birim şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen birim şekildeğiştirme-yatay yerdeğiştirme eğrilerine ait grafikler, Şekil 3.43-45 arasında verilmektedir. I1 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer 9. yük adımının son çevrimine kadar yaklaşık 0,003 birim şekildeğiştirme değerini yakalamış ve nihai sınırına ulaşarak veri aktarma özelliğini kaybetmiştir. I2 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer ise 11. yük adımının ilk çevrimine kadar 0.005 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmış ve ilerleyen artımlarda okuma sınır değerine tamamen ulaşmıştır. Perde duvar üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer (W), deney başından itibaren tüm çevrimlerde en fazla 0,0004 birim şekildeğiştirme değerine ulaşabilmiştir.

Hasır donatılı ( $19^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanında bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmelerinin ölçümü için sol alt birleşimde (LLPDT) ve sağ alt birleşimde (RLPDT) birer adet olmak üzere 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Sol ve sağ alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerlerden alınan düşey kaymaların yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiğı Şekil 3.25 ve Şekil 3.26’da verilmektedir. Şekil 3.25 incelendiğinde, kirişin sol tarafında 12. yük adımının ilk çevrimine kadar yaklaşık 12.00 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiş ve betondaki kopma sebebiyle kararlılığını kaybetmiştir. Şekil 3.26’ya göre, kirişin sağ tarafında 13. yük adımında 10.00 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. İlerleyen çevrimlerde döküntüler alınan verilerin kararlılığını düşürmüştür. Alınan verilerin özeti, Tablo 3.5’te verilmektedir.



şekil 3.25. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri



şekil 3.26. RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri

Tablo 3.5. MRCB-19'a ait deney sonuçları

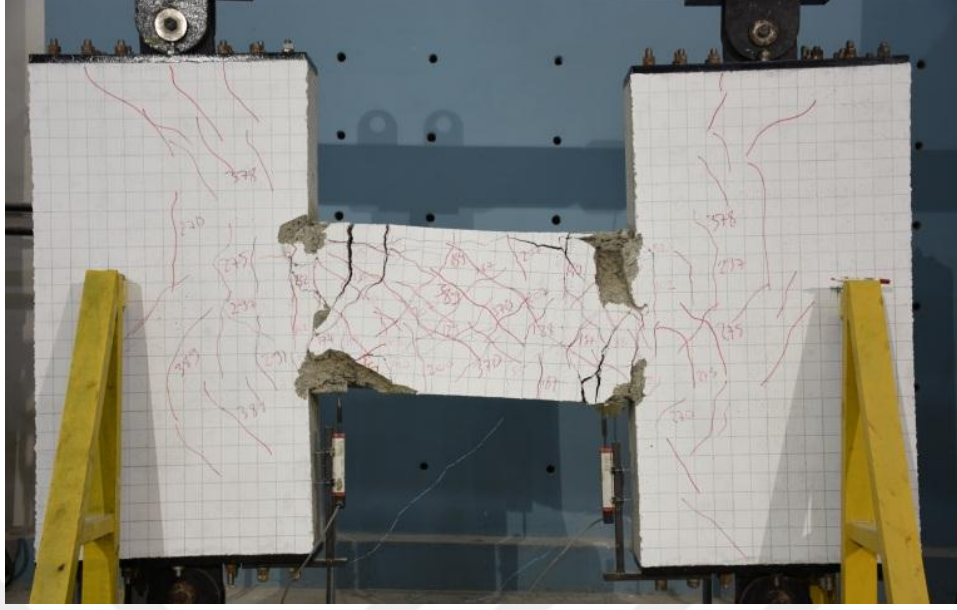
Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	İtme (+)			Çekme (-)			Deneysel gözlemler
		P, kN	d, mm	Kayma (mm)	P, kN	d, mm	Kayma (mm)	
1	2	39.73	1.27	0.037	20.75	1.28	0.018	Hasar yok
2	2	38.38	1.72	0.061	27.56	1.67	0.024	Hasar yok
3	2	50.76	2.32	0.077	40.37	2.33	0.034	Köşe çatlakları
4	2	70.81	3.25	0.122	60.60	3.30	0.067	Köşe çatlakları
5	2	95.11	4.48	0.193	83.25	4.49	0.110	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
6	2	127.11	6.23	0.269	116.38	6.26	0.171	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
7	2	168.31	8.70	0.367	169.04	8.81	0.273	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
8	2	220.05	12.15	0.527	211.13	11.45	0.438	Kiriş ortasında diyagonal çatlak ve perde üzerinde çatlak
9	2	300.22	17.31	0.830	301.11	16.96	0.778	Perde duvar başlıklarında çatlak ağının genişlemesi
10	2	384.09	23.76	1.369	399.95	24.05	1.488	Kiriş ve başlıklarda çatlakların ilerlemesi
11	2	457.99	34.40	2.257	449.07	33.37	3.108	Birleşim bölgelerinde eğilme çatlaklarının artması
12	2	416.61	46.26	2.284	388.37	46.33	7.435	Betonda ezilme ve kopma
13	2	242.09	65.55	-4.697	169.07	65.98	10.298	Sol alt bölgede büyük beton parçasının kopması
14	2	91.35	74.93	-	-	-	-	Kayma göçmesi

### 3.2.6. Hasır Donatılı (45° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanı (MRCB-45)

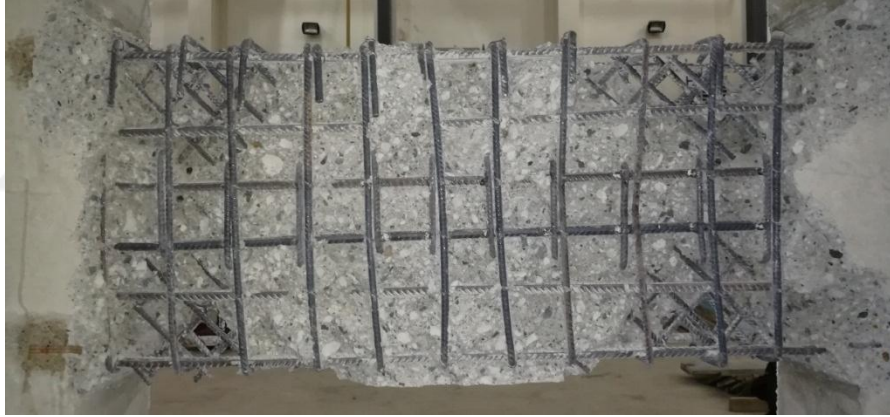
Çevrimsel yatay yük etkisinde davranışı incelenen hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanının deney süresince çatlak gelişimi, aşamalı olarak incelenmiştir. Deney elemanındaki ilk iki çatlak, sol üst ve sağ alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında itmede 3.25 mm yerdeğiştirme ve 40.34 kN yük civarında meydana gelmiştir. Üçüncü ve dördüncü çatlak, sol alt ve sağ üst kiriş- perde duvar birleşim bölgesinde 4. yük adımında çekmede 3.32 mm yerdeğiştirme ve 49.84 kN yük civarında meydana gelmiştir. 4. yük adımında görülen bu çatlaklar yaklaşık 45°'lik açılar ile oluşmuşlardır. 5. ve 6. yük adımında eğilme çatlakları, dik açılar yaparak kiriş perde duvar birleşim bölgesinden kiriş ortasına doğru ilerlemiştir. 7. yük adımında kiriş orta bölgesine yakın itmede 8.79 mm ve çekmede 8,77 mm yerdeğiştirme ve buna mukabil 132.61 kN ve 149.54 kN yük değerlerinde diyagonal çatlaklar görülmüştür. 8. yük adımında ise kiriş gövdesindeki diyagonal çatlak ağı artmıştır. 9. yük adımında ise perde duvar başlıklarındaki ilk çatlaklar ortaya çıkmıştır. Başlıklarda ortaya çıkan ilk çatlakların yerdeğiştirme değerleri sırasıyla itmede 17.20 mm ve çekmede 16.98 mm ve yük değerleri sırasıyla 276.57 kN ve 290.56 kN olarak tespit edilmiştir. 10. ve 11. yük adımlarında tersinir yüklerde hem perde duvarlardaki çatlak ağı genişlemiş hem de bağ kirişindeki dik ve diyagonal çatlaklar artmıştır. 10. yük adımının sonunda sol üst birleşim bölgesinde ilk beton parçası kopmuş ve sağ üst birleşimde eğilme çatlakları belirginleşmiştir. 12. yük adımında her bir köşede beton döküntüleri oluşmuş ve eğilme çatlakları artmıştır. Sağ üst birleşim bölgesinde büyük miktarda beton döküntüsü oluşmuştur. İtmede 46.66 mm ve 639.72 kN yük değeri sonrasında alt ve üst birleşim bölgelerindeki çatlaklar birleşmiş ve beton dökülmeye devam etmiştir. 12. yük adımının ilk çevriminin itme aşamasında kiriş gövdesindeki diyagonal çatlaklar döküntü oluşturacak seviyeye gelirken, sağ üst, sağ alt ve sol alt betonunda dökülme olmuştur. 13. yük adımının sonunda ise eğilme çatlakları ve beton döküntülerinin birleşmesiyle tersinir yüklerde kayma göçmesi meydana gelmiştir. Deneyden sonra deney elemanının büyük yerdeğiştirme altındaki hasar durumunu görmek için deney elemanı her iki yükleme yönünde büyük yerdeğiştirmelere maruz bırakılmıştır.

Sistemin nihai hasar sonrası görüntüsü Şekil 3.27'de ve yerdeğiştirme sonrası bağ kirişinin hasar görüntüsü Şekil 3.28'de verilmektedir. Büyük yerdeğiştirmeler altında çekirdek beton parçalandığı için hasır ve gövde donatılarının durumu kolaylıkla tespit edilmektedir. Şekil 3.28'de görüldüğü gibi gövde donatıları burkulmuş ve eğilmiştir.





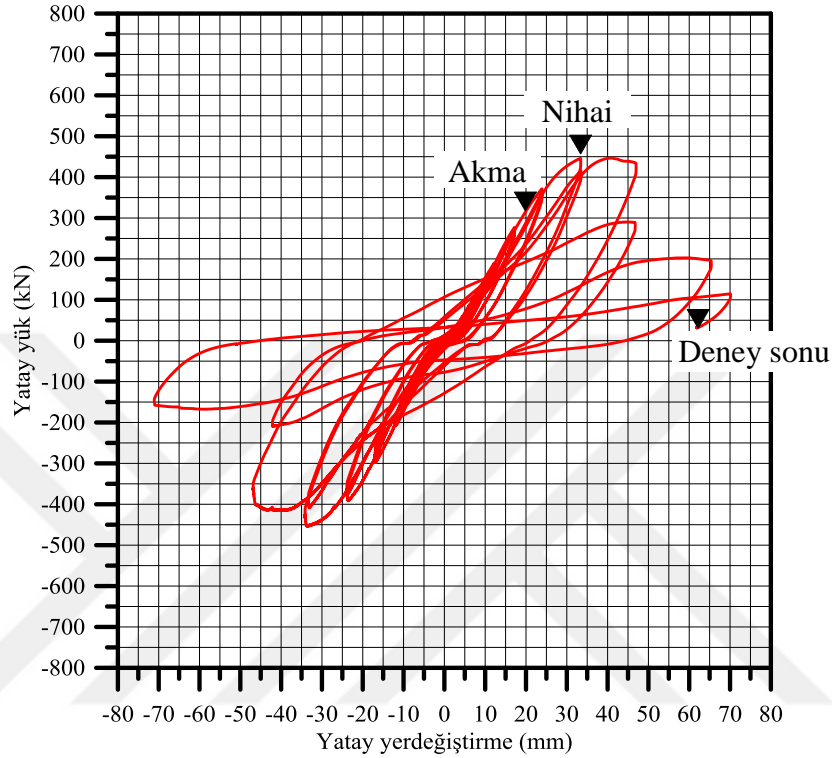
Şekil 3.27. Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü



Şekil 3.28. Nihai hasar sonrası donatıların görünümü

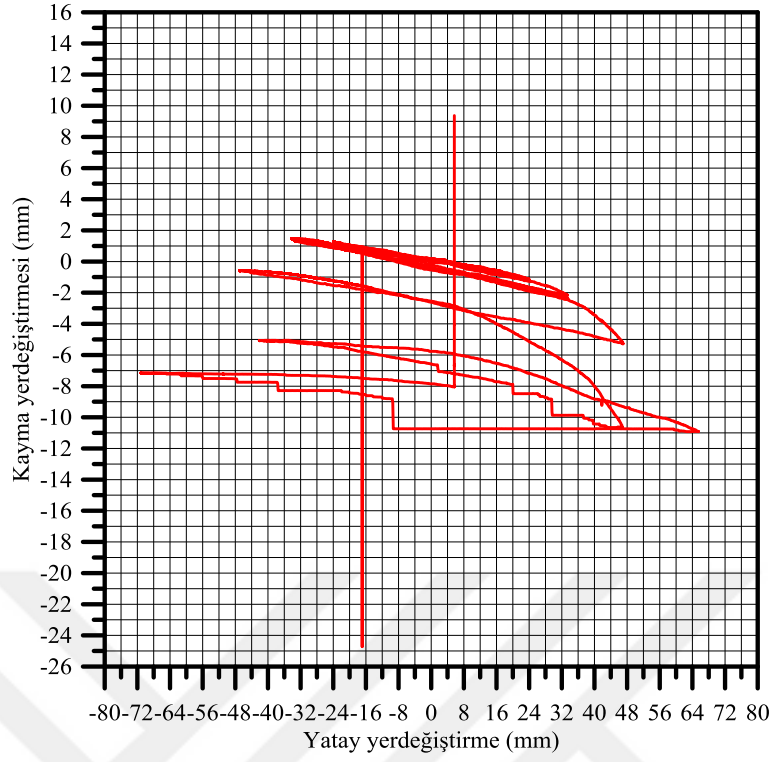
Deney sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisine ait grafik Şekil 3.29'da verilmektedir.  $45^\circ$  açılı hasır donatılı deney elemanının bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesinde, alt ve üst bölgeye olmak üzere yatay 2 adet (I1 ve I2) ve perde duvar orta bölgesine yatay 1 adet (W) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Kullanılan bütün birim şekildeğiştirme ölçerlerin okuma sınır değeri % 0.75 olarak sabitlenmiştir. I1 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer 9. yük adımının sonunda yaklaşık 0,005 birim şekildeğiştirme değerini yakalamış ve nihai sınırına ulaşarak veri aktarma özelliğini kaybetmiştir. I2 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer ise 9. yük adımının sonunda 0.005 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmış ve okuma sınır değerine tamamen

ulaşmıştır. Perde duvar üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer (W), deney başından sonuna kadar kararlı olarak okuma yapmış ve deney sonunda 0.0007 birim şekildeğiştirme değerinde sınırlı kalmıştır.

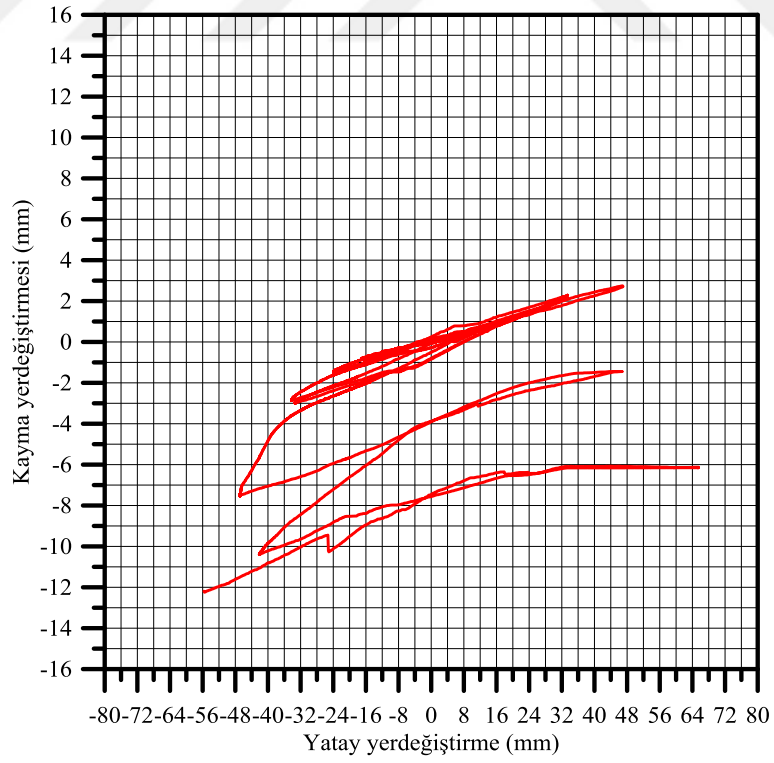


Şekil 3.29. Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı

Hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanında bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmelerinin ölçümü için sol alt birleşimde (LLPDT) ve sağ alt birleşimde (RLPDT) birer adet olmak üzere 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Sol ve sağ alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerlerden alınan düşey kaymaların yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiği Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de verilmektedir. Şekil 3.30 incelendiğinde, kirişin sol tarafında 12. yük adımının ilk çevriminin sonunda yaklaşık 4.00 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. 13. yük adımında 11.00 mm civarında okuma yapıldıktan sonra betondaki döküntüler sebebiyle alınan ölçümler kararlılığını kaybetmiştir. Şekil 3.31’e göre, kirişin sağ tarafında 12. yük adımının ilk çevriminin sonuna kadar yaklaşık 7.50 mm civarında düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. 13. yük adımının ilk çevriminin sonunda ise betondaki döküntüler sebebiyle veri alınamamıştır. Sonuçlar Tablo 3.6’da özetlenmektedir.



Şekil 3.30. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri



Şekil 3.31. RLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri

Tablo 3.6. MRCB-45'e ait deney sonuçları

Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	İtme (+)			Çekme (-)			DeneySEL gözlemler
		P, kN	d, mm	Kayma (mm)	P, kN	d, mm	Kayma (mm)	
1	2	12.86	1.22	0.028	24.54	1.22	0.052	Hasar yok
2	2	18.15	1.66	0.037	30.68	1.69	0.058	Hasar yok
3	2	26.56	2.33	0.086	39.36	2.40	0.070	Hasar yok
4	2	40.34	3.25	0.110	62.10	3.95	0.138	Köşe çatlakları
5	2	60.08	4.47	0.175	70.63	4.51	0.159	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
6	2	86.40	6.09	0.254	103.61	6.30	0.245	Kiriş ortasında diyagonal çatlaklar
7	2	132.615	8.79	0.401	149.54	8.77	0.343	Kiriş gövdesinde çatlak ağında genişleme
8	2	189.73	12.20	0.563	207.25	12.02	0.505	Perde duvar başlıklarında çatlak oluşumu
9	2	276.57	17.20	0.876	290.56	16.98	0.821	Perde duvar başlıklarında çatlak
10	2	370.61	23.94	1.448	381.06	23.76	1.443	Kiriş ve başlıklarda çatlakların ilerlemesi
11	2	441.73	33.40	2.287	445.34	33.95	2.753	Basınç bölgelerinde beton döküntüleri
12	2	430.58	46.96	2.725	366.03	46.81	7.447	Kiriş köşelerinde dökülmeler, eğilme çatlakları
13	2	188.42	65.40	6.146	149.70	71.08	-	Kayma göçmesi

### 3.2.7. Güçlendirilmiş Hasır Donatılı (45° Açılı) Bağ Kirişi Deney Elemanı (DBMRCB-45)

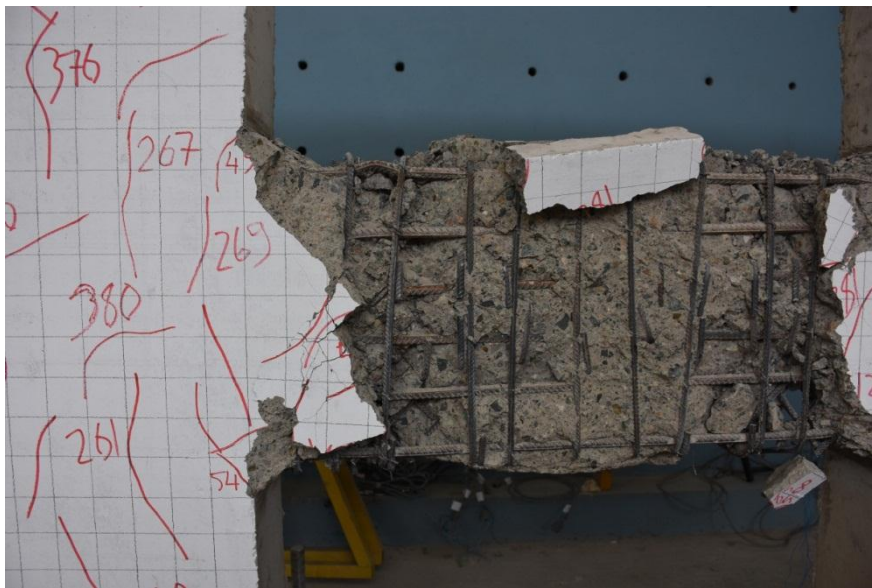
Çevrimsel yatay yük etkisinde davranışı incelenen güçlendirilmiş hasır donatılı (45° açılı) bağ kirişi deney elemanının deney süresince çatlak gelişimi aşamalı olarak irdelenmiştir. Deney elemanında sol üst ve sağ alt birleşim bölgesindeki ilk çatlaklar 4. yük adımında itmede 3.32 mm yerdeğiştirme ve 46.45 kN yük civarında meydana gelmiştir. Sağ üst ve sol alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde ise 4. yük adımında çekmede 3.33 mm yerdeğiştirme ve 54.55 kN yük civarında meydana gelmiştir. 4. yük adımında görülen bu çatlaklar yaklaşık 45°'lik açılar ile oluşmuşlardır. 5., 6. ve 7. yük adımında çatlaklar, dik açılar yaparak kiriş perde duvar birleşim bölgesinden kiriş ortasına doğru ilerlemiştir. 8. yük adımında kiriş orta bölgesine yakın itmede 12.24 mm ve çekmede 12.33 mm yerdeğiştirme ve buna mukabil 268.25 kN ve 266.14 kN yük değerlerinde diyagonal çatlaklar görülmüştür. 8. yük adımının 2. çevriminde ise perde duvar başlıklarındaki ilk çatlaklar ortaya çıkmıştır. Başlıklarda ortaya çıkan ilk çatlakların yerdeğiştirme değerleri sırasıyla itmede 12.24 mm ve çekmede 12.28 mm ve yük değerleri sırasıyla 268.25 kN ve -260.64 kN olarak tespit edilmiştir. 9. ve 10. yük adımlarında tersinir yüklerde hem perde duvarlardaki çatlak ağı genişlemiş hem de bağ kirişindeki dik ve diyagonal çatlaklar artmıştır. 11. yük adımında itmede 33.30 mm yerdeğiştirme ve 596.90 kN yük değerinde sol alt basınç bölgesinde ezilme oluşmuş ve diyagonallerin kesişim hizasında kirişe dik eğilme çatlakları oluşmuştur. 11. yük adımının sonunda kiriş sol alt birleşim bölgesindeki betonda döküntü oluşmuştur. 12. yük adımının ilk çevriminin sonunda sol alt ve sağ üst bölgede eğilme çatlakları genişleyerek betonun dökülmesini sağlamıştır. Ayrıca bu çevrimin sonunda sol üst ve sağ alt birleşimdeki beton ezilerek dökülme seviyesine gelmiştir. 12. yük adımının ikinci çevriminin itme aşamasında sağ üst betonunda büyük miktarda kopma meydana gelmiş ve çekme bölgelerindeki eğilme çatlakları açılmıştır. 12. yük adımının sonunda ise kiriş diyagonal olarak çatlakmış ve bütün köşelerde beton döküntüsü oluşmuştur. 13. Yük adımının ilk çevriminde 'X' şeklinde diyagonal çatlak oluşumu gözlemlenmiş ve çevrim sonunda kiriş alt bölgesindeki betonun tamamına yakını dökülmüştür. Yük adımları içerisinde ani yük kaybı oluşmamıştır, fakat 12. yük adımının 1. çevriminden sonra yükler azalmaya başlamıştır. Deney tamamlandıktan sonra yükleme protokolüne bağlı olarak yüklemeye devam edilmiştir. Diyagonal donatıların birleşim

bölgesi, mafsal gibi davranarak bu bölgelerde eğilme çatlakları yoğunlaşmış ve kiriş gövdesinde oluşan diyagonal çatlakların etkisiyle kiriş tamamen göçmüştür.

Sistemin nihai hasar sonrası görüntüsü Şekil 3.32’de ve yerdeğiştirme sonrası bağ kirişinin hasar görüntüsü Şekil 3.33’te verilmektedir. Büyük yerdeğiştirmeler altında çekirdek beton parçalandığı için diyagonal donatıların durumu kolaylıkla tespit edilmektedir.



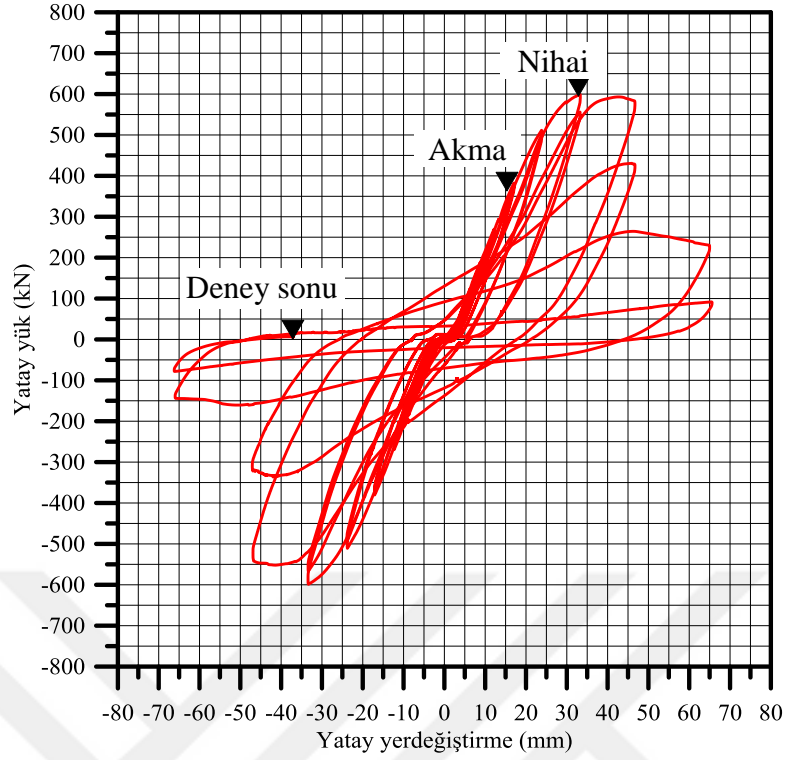
Şekil 3.32. Nihai hasar sonrası deney sisteminin görüntüsü



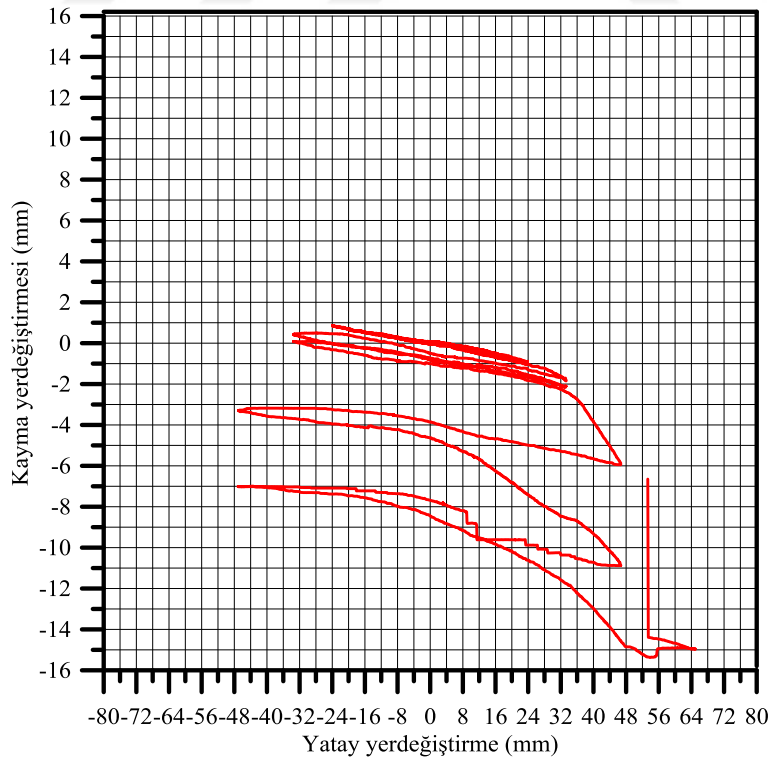
Şekil 3.33. Nihai hasar sonrası gövde donatılarında burkulma

Deney sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisine ait grafik Şekil 3.34'te verilmektedir. Güçlendirilmiş hasır donatılı ( $45^\circ$  açılı ) bağ kirişi deney elemanının bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesinde, alt ve üst bölgeye olmak üzere yatay 2 adet (I1 ve I2) ve perde duvar orta bölgesine yatay 1 adet (W) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Kullanılan bütün birim şekildeğiştirme ölçerlerin okuma sınır değeri % 0.75 olarak sabitlenmiştir. Ayrıca alt ve üst diyagonal donatılarda toplam 2 adet (T1 ve T2) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. T1 donatısındaki ilk akma 9. yük adımında itmede 16.19 mm yerdeğiştirme ve 371.18 kN yük seviyesi civarlarında meydana gelmiştir. T1 donatısından deneyin ilk aşamalarında veri aktarımında sorun yaşanmıştır. T2 donatısındaki ilk akma ise 9. yük adımında itmede 14.81 mm yerdeğiştirme ve 331.30 kN yük seviyesi civarlarında meydana gelmiştir. T2 donatısındaki birim şekildeğiştirme ölçer, 10. yük adımının ilk çevriminden sonra okuma yapmamıştır. Bu nedenle deneyin sonuna kadar T2 donatısından 0.0075 birim şekildeğiştirmesinden sonraki değerler elde edilememiştir. I1 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer 5. yük adımından sonra nihai sınırına ulaşarak veri aktarma özelliğini kaybetmiştir. I2 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer ise 10. yük adımının ilk çevriminde 0.006 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmış ve 10. yük adımından sonra okuma sınır değerine tamamen ulaşmıştır. Perde duvar üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer (W), 12. yük adımına kadar 0,002 birim şekildeğiştirme değerine kadar okuma yaparak nihai okuma değerine ulaşmıştır.

Güçlendirilmiş hasır donatılı ( $45^\circ$  açılı ) bağ kirişi deney elemanında bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmelerinin ölçümü için sol alt birleşimde (LLPDT) ve sağ alt birleşimde (RLPDT) birer adet olmak üzere 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Sol ve sağ alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerlerden alınan düşey kaymaların yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiğı Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da verilmektedir. Şekil 3.35 incelendiğinde, kirişin sol tarafında 12. yük adımının sonunda 11.00 mm yerdeğiştirme meydana gelirken, ilerleyen yük adımlarında beton döküntüleri sebebiyle veri alınamamıştır. Şekil 3.36'ya göre, kirişin sağ tarafında 12. yük adımının sonunda yaklaşık 11.00 mm yerdeğiştirme okunmuş fakat beton döküntüsü sebebiyle ilerleyen yerdeğiştirme adımlarında ölçüm alınamamıştır.  $45^\circ$  açılı güçlendirilmiş hasır donatılı bağ kirişi deney elemanına ait deney sonuçları Tablo 3.7'de özetlenmektedir.

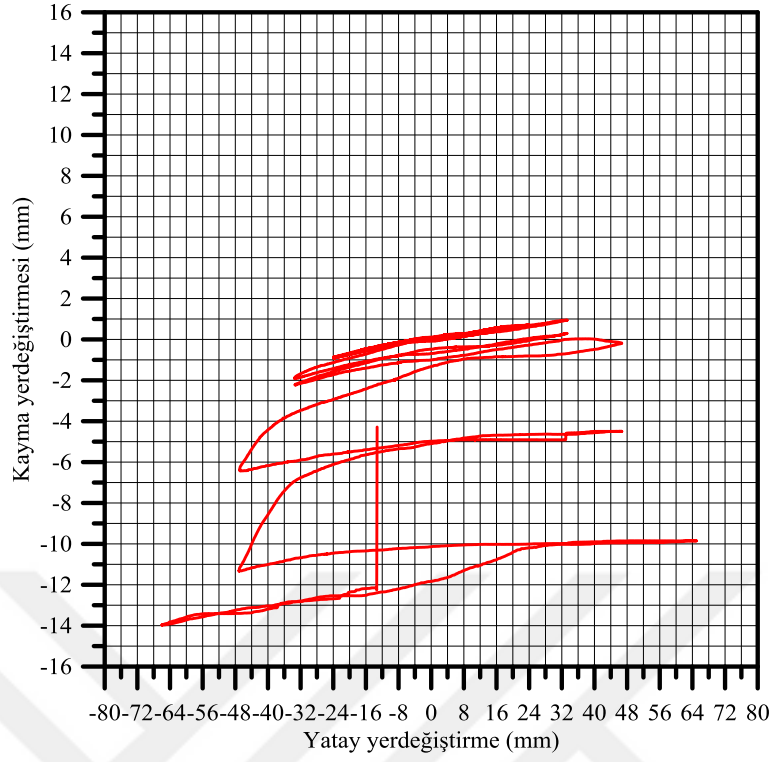


Şekil 3.34. Güçlendirilmiş hasır donatılı ( $45^\circ$  açılı) bağ kirişi bağ kirişi deney elemanın çevrimsel yük altındaki performansı



Şekil 3.35. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğştirmeleri





řekil 3.36. RLPDT bölgesindeki dűřey kayma yerdeğiřtirmeleri

Tablo 3.7. DBMRCB-45'e ait deney sonuçları

Yerdeğiştirme adını	Çevrim sayısı	İtme (+)			Çekme (-)			DeneySEL gözlemler
		P, kN	d, mm	Kayma (mm)	P, kN	d, mm	Kayma (mm)	
1	2	11.46	1.20	0.003	12.95	1.26	0.000	Hasar yok
2	2	15.22	1.67	0.006	18.55	1.64	0.000	Hasar yok
3	2	25.36	2.31	0.009	33.40	2.40	0.009	Hasar yok
4	2	46.45	3.23	0.043	54.55	3.33	0.034	Köşe çatlakları
5	2	76.95	4.46	0.067	83.40	4.54	0.064	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
6	2	122.43	6.27	0.122	126.93	6.31	0.104	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
7	2	185.42	8.731	0.208	180.75	8.74	0.175	Çatlaklar kiriş orta bölgesine ilerliyor
8	2	269.47	12.18	0.374	266.14	12.33	0.297	Kiriş gövdesinde diyagonal çatlak oluşumu
9	2	382.25	17.05	0.603	379.75	17.09	0.496	Perde duvar başlıklarında çatlak ağının genişlemesi
10	2	510.90	23.85	0.720	505.12	23.80	0.860	Kiriş ve başlıklarda çatlakların ilerlemesi
11	2	596.90	33.30	0.943	590.55	33.41	1.892	Betonda ezilme ve gövdede eğilme çatlaklarının genişlemesi
12	2	579.54	46.68	-0.181	531.62	46.89	6.342	Köşe betonlarında dökülme ve eğilme çatlaklarının artması
13	2	227.45	64.99	-9.854	141.96	65.96	13.966	Kiriş gövdesinde diyagonal çatlak oluşumu ve göçme

### 3.2.8. Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi Deney Elemanı (TETOD)

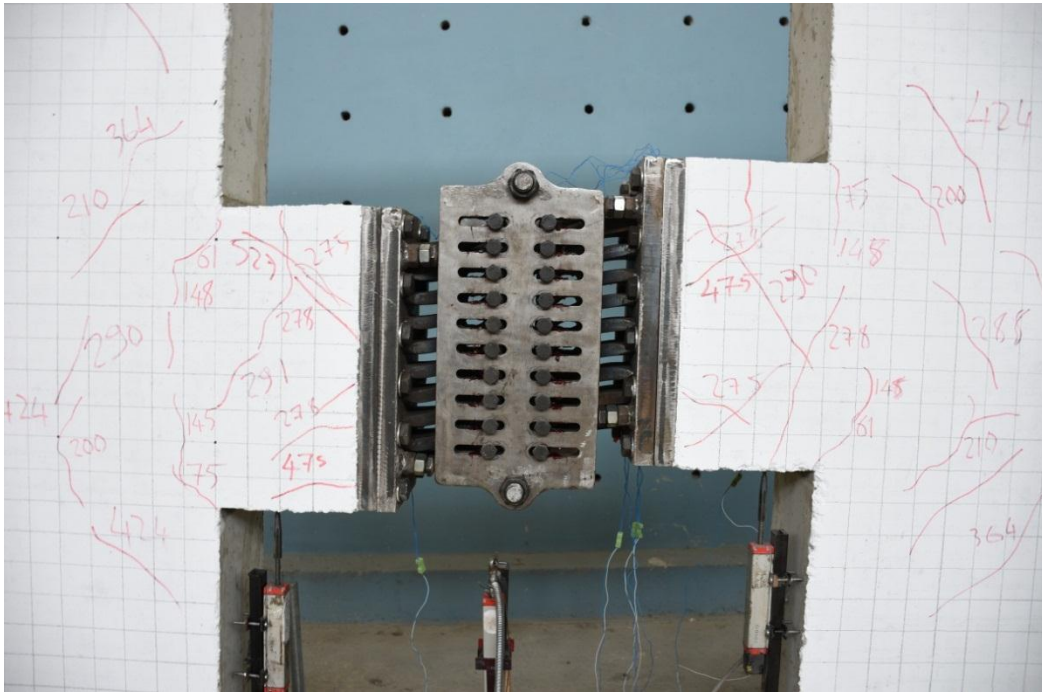
FEMA-461' göre hazırlanan yerdeğiştirme kontrollü artımlı çevrimsel yatay yük etkisinde davranışı incelenen tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı üzerinde deney süresince ortaya çıkan çatlakların gelişimi aşamalı olarak incelenmiştir. Deney elemanındaki ilk çatlaklar, sol üst ve sağ alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 5. yük adımında itmede 4.45 mm yerdeğiştirme ve 61.55 kN yük civarında meydana gelmiştir. İkinci çatlak ise sağ üst ve sol sol kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 5. yük adımında çekmede 4.50 mm yerdeğiştirme ve 73.47 kN yük civarında meydana gelmiştir. 5. yük adımında görülen bu çatlaklar yaklaşık 45°'lik açılar ile oluşmuşlardır. 7. yük adımının ilk çevriminde, köşelerde oluşan ilk çatlaklar birleşim yüzeyinde dik olarak ilerlemişlerdir. Birleşim bölgesinde çatlakların dik olarak ilerlediği yerdeğiştirme değeri itmede 8.12 mm ve yük değeri ise 148.17 kN'dur. Aynı çevrimin tersinir durumunda ise çekmede 8.18 mm yerdeğiştirme ve 140.16 kN yük değerinde birleşim bölgelerinde dik çatlaklar görülmüştür. 8. yük adımında ise perde duvar başlıklarındaki ilk çatlaklar ortaya çıkmıştır. Başlıklarda ortaya çıkan ilk çatlakların yerdeğiştirme değerleri sırasıyla itmede 11.68 mm ve çekmede 11.77 mm ve yük değerleri sırasıyla 209.69 kN ve 201.35 kN olarak tespit edilmiştir. 9. yük adımında betonarme bölgelerde herhangi bir değişim olmamıştır. 10. yük adımında itmede 19.10 mm yerdeğiştirme ve 278.85 kN yük değerinde betonarme kiriş kolunda eğilme çatlakları oluşmuştur. 11. yük adımında, itmede 29.01 mm ve çekmede 29.78 mm yerdeğiştirme değerleri ile buna mukabil 288.85 kN ve 281.36 kN yük değerlerinde perde duvar ve betonarme kiriş kollarında diyagonal çatlaklar oluşmuştur. 12. yük adımında, betonarme bölgelerde herhangi bir çatlak oluşumu veya ilerleyişi gözlenmemiştir. 13. yük adımının ikinci çevriminde itmede 65.04 mm yerdeğiştirme ve 363.40 kN yük değerinde perde üzerindeki çatlaklar ilerlemiştir. 14. yük adımının çekmede 91.97 mm yerdeğiştirme ve 398.94 kN yük değerinde çatlaklar perde duvar üzerinde ilerlemiştir. 15. yük adımının ilk çevriminde itmede 121.63 mm yerdeğiştirme ve 483.54 kN yük değeri ile çekmede 127.12 mm yerdeğiştirme ve 449.25 kN yük değerlerinde çatlaklar oluşmuş ve deney bu çevrim ile tamamlanmıştır.

Deney sisteminin deney sonrası maksimum yerdeğiştirme altındaki görüntüsü, Şekil 3.37'de verilmektedir. Şekil 3.37'den görüleceği üzere betonarme kiriş kolu ve perde yüzeyinde oluşan çatlak ağı sınırlı bir bölgede yoğunlaşmış ve beton döküntüsü olan bölgeler yer almamıştır.



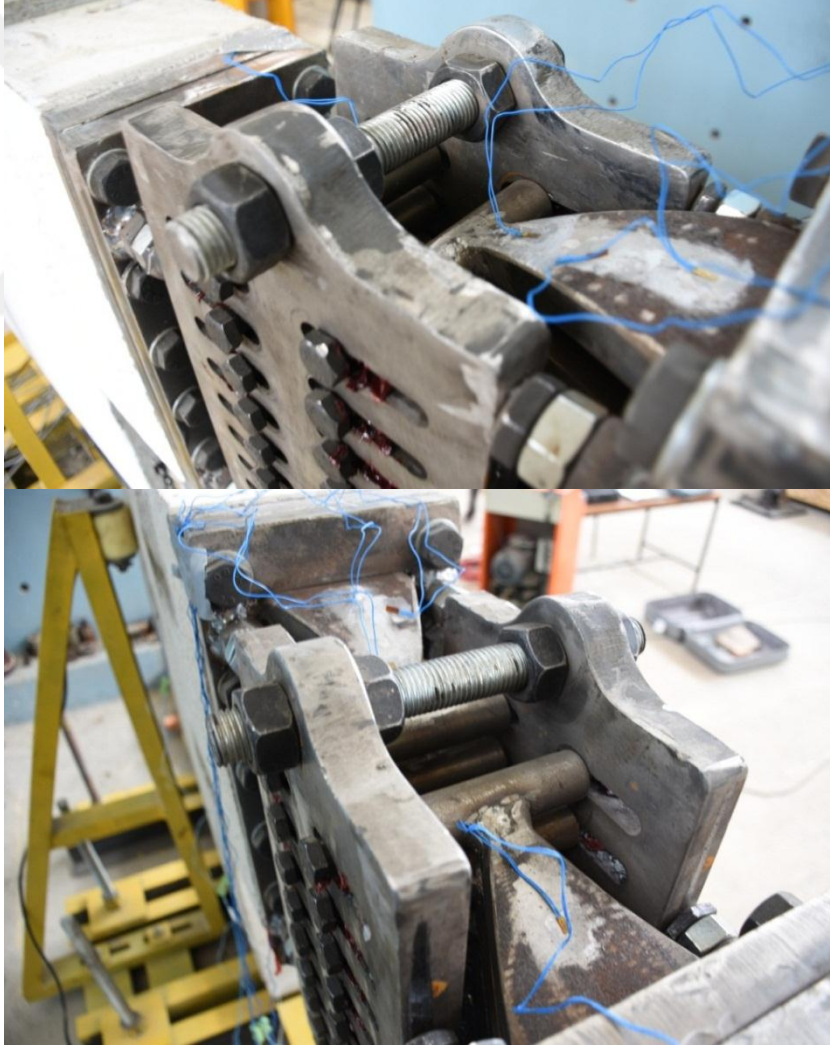
Şekil 3.37. Büyük yerdeğiştirme altındaki deney sisteminin görüntüsü

Betonarme kiriş kolu ve TETOD'un daha yakından görüntüsü Şekil 3.38'de verilmektedir. Deney sırasında betonarme kiriş kolları üzerinde, kiriş kolu ankraj plakalarına bağlı dış açılmış nervürlü donatılara paralel yatay çatlaklar gözlemlenmiştir.



Şekil 3.38. Büyük yerdeğiştirme altında çelik kulakların eğilmiş hali ve TETOD

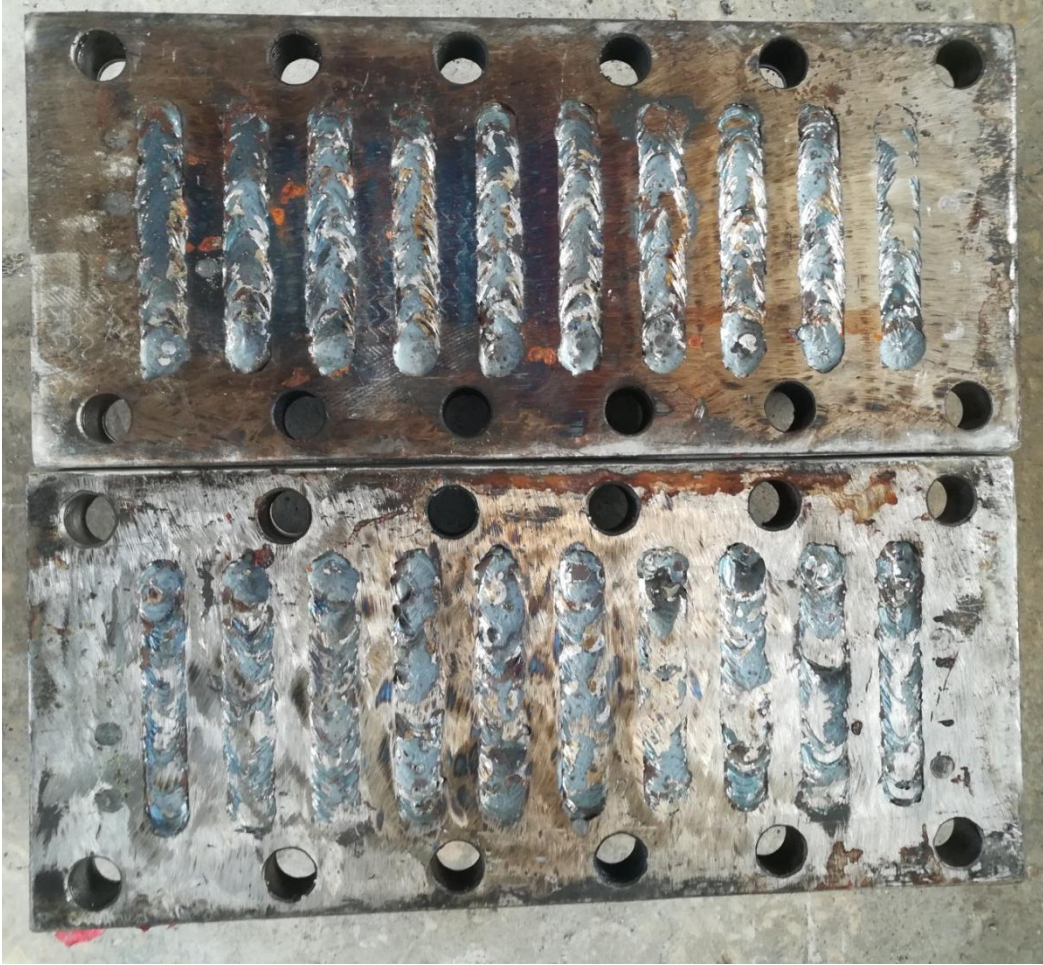
Deney sonrasındaki büyük yerdeğiştirme adımlarında bile deney elemanının betonarme kısımlarında oluşan çatlaklarda açılma veya genişleme görülmemiştir. Bunun dışında ise betonda ezilmeler meydana gelmediği için beton döküntülerine de rastlanmamıştır. Ray plakasında, ankraj plakalarında herhangi bir açılma, esneme veya ezilme görülmemiştir. Çelik kulaklar, yaklaşık 130 mm yatay yerdeğiştirme altındaki sistem içerisinde yaklaşık 65 mm kadar düşey olarak eğilmişlerdir. Bu aşamada TETOD içerisinde yer alan kulaklarda çatlama veya kopma olmamıştır. Rijit başlık ve kulak arasında yapılan kaynaklar ve kaynağa yakın bölgelerde herhangi bir bozulma görülmemiştir. Çelik kulakların TETOD içerisindeki nihai eğilmiş durumu Şekil 3.39’da verilmektedir.



Şekil 3.39. Çelik kulakların TETOD içerisinde nihai eğilmiş görüntüsü

Deney elemanlarının ön yüzeyinde beyaz tavan boyası mikro düzeydeki çatlakların gözle görünebilir olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, arka yüzey beton perdah yüzeyi olması sebebiyle hem pürüzlü hem de dış ortam etkisi sebebiyle çatlaklı yüzeydir. Bu durumda bile deney elemanının arka yüzeyinde, ne kiriş kolunda ne de perde yüzeyinde gözle görülür çatlaklara rastlanmamaktadır.

Deney elemanlarının üretimi sırasında çelik kulakların tabanı ile ankraj plakalarının arka yüzeyi arasına 10 mm kalınlığında kaynak dikişi çekilmiştir. Deney sırasında çelik kulakların kaynaklardan sıyrılması veya kaynakların çatlamaı deney sonucuna etki edecek parametrelerin başında gelmektedir. Fakat deney sırasında bunu tespit etmek mümkün değildir. Deney tamamlandıktan sonra TETOD'a ait bütün parçalar sökülmiş ve ankraj plakalarının arkasındaki kaynaklar kontrol edilmiştir. Kaynak yüzeyinde ve ankraj plakası yüzeyinde herhangi bir çatlak veya açılma olmadığı görülmüştür. Deney sonrası ankraj plakası ve kaynakların görünümü Şekil 3.40'ta verilmektedir.



Şekil 3.40. Ankraj plakalarındaki kaynak dikişlerinin deney sonrası görünümü

Deney sonrasında TETOD'a ait parçalar sökülmeden önce deney sistemi deney öncesi konumuna getirilerek bütün parçalar sökülmüştür. Çelik kulaklar incelendiğinde, deney öncesindeki konumlarına tamamen geri geldikleri görülmektedir. Çelik kulak takımlarının deney sonrasındaki görünümü Şekil 3.41'de verilmektedir.



Şekil 3.41. Çelik kulak takımlarının deney sonrası görünümü

TETOD'un deney sonucunda elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisine ait grafiği, Şekil 3.42'de verilmektedir. Tahterevallı tipi bağ kirişi deney elemanının bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesinde, alt ve üst bölgede olmak üzere yatay 2 adet (I1 ve I2) ve perde duvar orta bölgesinde yatay 1 adet (W) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Fakat I2 birleşimindeki birim şekildeğiştirme ölçerden deney öncesinde veri alınamamıştır. Alt ve üst donatılarda toplam 2 adet (T1 ve T2) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Fakat T2 donatısındaki birim şekildeğiştirme ölçerden ise deney esnasında voltaj alınamamıştır. Hem sayısal optimizasyonu teyit etmek hem de deney sırasındaki birim şekildeğiştirmelerin kulak uzunluğuna bağlı dağılımını görmek için üst sağ çelik kulak üzerinde 3 adet birim şekildeğiştirme ölçer (kulak ucundan dibine doğru SG-1, SG-2 ve SG-3) kullanılmıştır. TETOD içerisinde bir kulak takımı yukarı, bir kulak takımının aşağı yönlü hareketi sebebiyle bir yüzey basınca bir yüzey de çekmeye maruz kalmaktadır. Bu sebeple sol üst çelik kulağın ortasına bir adet birim şekildeğiştirme ölçer (SG-4) yerleştirilmiştir. SG-4, aynı zamanda sol ve sağ kulak takımlarındaki şekildeğiştirmelerin

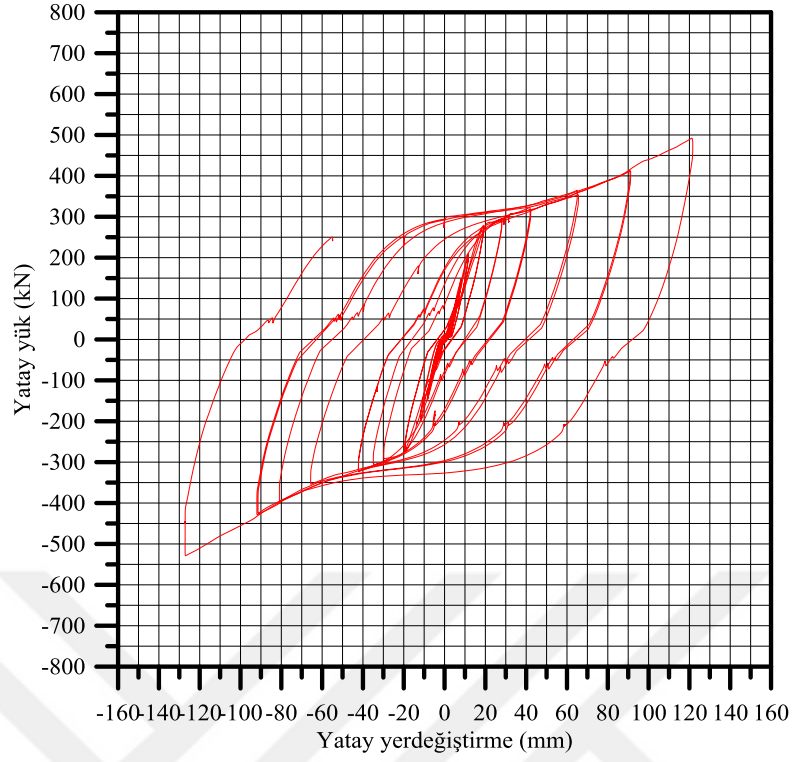
dengeli olup olmadığının kontrolü için yerleştirilmiştir. Fakat SG-4'ten deneyin ilk bölümlerinde veri alımında sorun yaşanmış ve anlamlı okuma yapılamamıştır.

T1 donatısında akma oluşmamış ve deneyin sonuna kadar yaklaşık 0.0018 birim şekildeğiştirme değerinin altında kalmıştır. I1 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer 10. yük adımının kadar yaklaşık 0.003 birim şekildeğiştirme değerlerini kararlı bir şekilde vermiştir. Fakat 11. yük adımının ilk çevriminde ise okuma sınır değerine tamamen ulaşmıştır. Perde duvar üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer (W), 14. yük adımının sonuna kadar 0.0005 birim şekildeğiştirme değerine kadar kararlı okuma yapmış ve 15. yük adımında nihai sınırına ulaşmıştır.

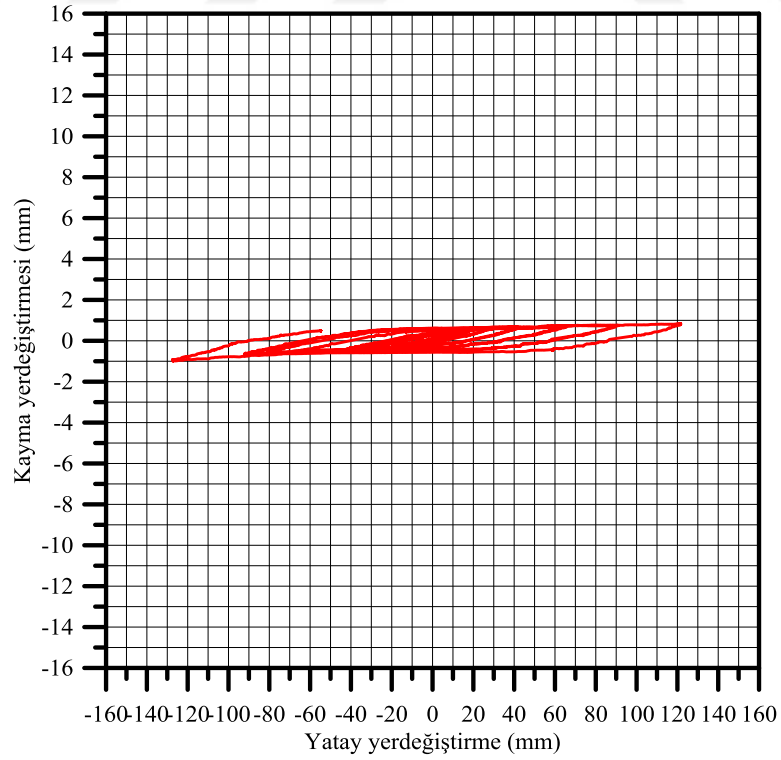
Çelik kulakların malzeme deneylerinde, akma birim şekildeğiştirme değeri 0.00213 olarak bulunmuştur. Deney sonunda SG-1, 8. yük adımında 11.39 mm yerdeğiştirme ve 205.66 kN yük değerinde 0.00213 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmıştır. SG-2, 8. yük adımında 11,23 mm yerdeğiştirme ve 203.30 kN yük değerinde 0.00213 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmıştır. SG-3, 8. yük adımında 11.09 mm yerdeğiştirme ve 200.58 kN yük değerinde 0.00213 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmıştır. Buradan seçilen çelik kulak boyutlarının uygun olduğu ve tasarım kriterlerinin sağlandığı görülmektedir.

Bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmelerinin ölçümü için sol alt birleşimde (LLPDT) ve sağ alt birleşimde (RLPDT) 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Sol ve sağ alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerlerden alınan düşey kaymaların yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiği Şekil 3.43 ve Şekil 3.44'te verilmektedir. Şekil 3.43 incelendiğinde, kirişin sol tarafında 15. yük adımının sonuna kadar yaklaşık 2.00 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. Deney süresince itme ve çekme döngülerinde kararlı olarak değişim göstermiştir. Şekil 3.44'e göre, kirişin sağ tarafında 12. yük adımının sonuna kadar yaklaşık 2.00 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. Görüleceği üzere sağ ve sol kiriş kollarındaki kayma yerdeğiştirmeleri arasında mutlak benzerlik görülmektedir. TETOD'a ait yapılan deneysel çalışmanın sonuçları, Tablo 3.8'de detaylı olarak verilmektedir.

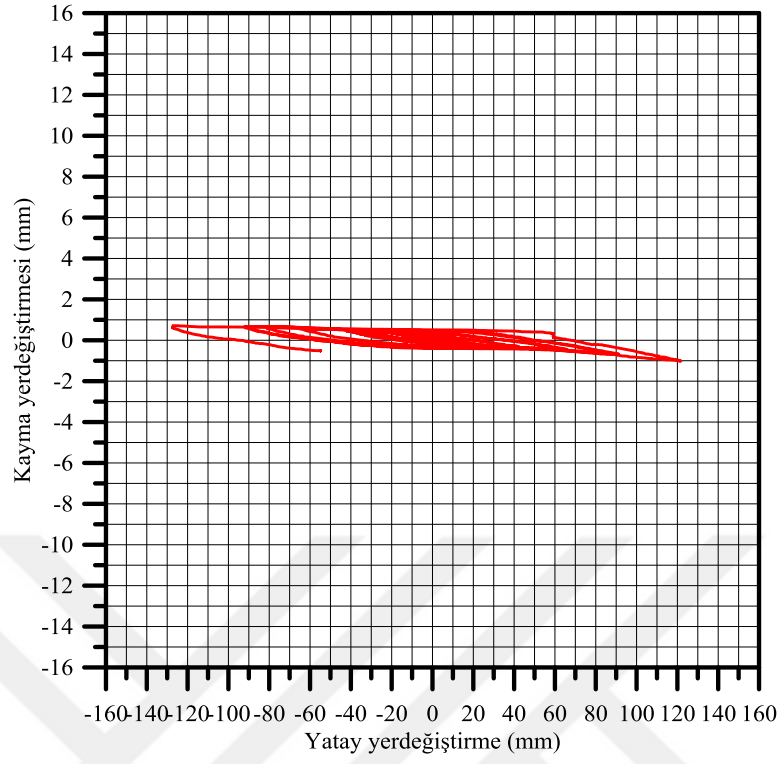




Şekil 3.42. Tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının çevrimsel yük altındaki performansı



Şekil 3.43. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri



řekil 3.44. RLPDT bölgesindeki dűřey kayma yerdeğiřtirmeleri

Tablo 3.8. TETOD'a ait deney sonuçları

Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	İtme (+)			Çekme (-)			DeneySEL gözlemler
		P, kN	d, mm	Kayma (mm)	P, kN	d, mm	Kayma (mm)	
1	2	16.87	1.15	0.0012	17.33	1.17	0.006	Hasar yok
2	2	23.07	1.60	0.021	29.86	1.62	0.000	Hasar yok
3	2	32.76	2.16	0.024	45.63	2.19	0.009	Hasar yok
4	2	41.22	3.21	0.033	49.89	3.26	0.023	Hasar yok
5	2	61.55	4.45	0.046	73.47	4.50	0.037	Kiriş kollarında köşe çatlakları
6	2	107.40	6.29	0.061	98.07	6.15	0.073	Hasar yok
7	2	148.41	8.12	0.101	140.16	8.18	0.147	Birleşim bölgesinde eğilme çatlakları
8	2	209.69	11.68	0.159	201.35	11.77	0.224	Kulaklarda akma, başlık üzerinde ilk çatlak
9	2	250.19	16.18	0.188	243.65	16.00	0.291	Hasar yok
10	2	278.92	19.10	0.224	268.25	19.34	0.364	Eğilme çatlakları
11	2	288.85	28.01	0.279	292.15	29.70	0.420	Kiriş ve perde üzerinde diyagonal çatlaklar
12	2	317.61	42.01	0.318	322.62	42.17	0.487	Hasar yok
13	2	352.67	64.86	0.447	359.52	80.90	0.582	Perde üzerindeki çatlak ağı genişledi
14	2	397.93	91.18	0.674	398.94	91.97	0.637	Perde üzerindeki çatlak ağı genişledi
15	2	483.54	121.63	1.017	528.99	127.01	0.628	Deney tamamlandı

### 3.2.9. Prefabrik Tahterevalli Tipi Bağ Kirişi Deney Elemanı (PF-TETOD)

FEMA-461' göre hazırlanan yerdeğiştirme kontrollü artımlı çevrimsel yatay yük etkisinde davranışı incelenen prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanı üzerinde deney süresince ortaya çıkan çatlakların gelişimi aşamalı olarak irdelenmiştir. Deney elemanındaki ilk çatlaklar, sol üst ve sağ alt kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 10. yük adımında itmede 19.45 mm yerdeğiştirme ve 257.68 kN yük civarında meydana gelmiştir. İkinci çatlak grubu ise sol alt ve sağ üst kiriş-perde duvar birleşim bölgesinde 10. yük adımında çekmede 19.35 mm yerdeğiştirme ve 246.77 kN yük değerinde ankraj plakalarına bağlı donatılara paralel olarak oluşmuştur. 12. yük adımında çekmede 42.50 mm yerdeğiştirme ve 298.14 kN yük civarında perde duvar üzerindeki ilk kesme çatlakları ortaya çıkmıştır. 12. yük adımının ikinci çevriminde itmede 42.10 mm yerdeğiştirme ve 291.30 kN yük değeri civarında perde duvarın diğer yönlerinde kesme çatlakları görölmüştür. 14. yük adımında çekmede 90.95 mm ve itmede 91.13 mm yerdeğiştirme ile bu yerdeğiştirme değerlerine mukabil 397.05 kN ve 376.11 kN yük değerlerinde perde duvar üzerindeki çatlak ağı ilerlemiştir. 15. yük adımının ilk çevriminde çekmede 132.25 mm yerdeğiştirme ve 501.91 kN yük değerinde çatlaklar perde duvarın mesnet bölgelerine doğru ilerlemiş ve hidrolik pistonun yerdeğiştirme sınırına ulaşılması sebebiyle deney durdurulmuştur.

Deney sisteminin deney sonrası maksimum yerdeğiştirme altındaki görünüşü, Şekil 3.45'te verilmektedir. Şekil 3.45'ten de görüleceği üzere betonarme perde yüzeyinde oluşan çatlak ağı sınırlı bir bölgede yoğunlaşmış ve beton döküntüsü olan bölgeler yer almamıştır. Çelik kiriş kolu ve TETOD'un daha yakından görünüşü Şekil 3.46'da verilmektedir. Deney sırasında ankraj plakası ve başlık yüzeyi arasında veya çelik kulak takımı ve ankraj plakası arasında herhangi bir açılma gözlenmemiştir.



Şekil 3.45. Büyük yerdeğiştirme altındaki deney sisteminin görüntüsü

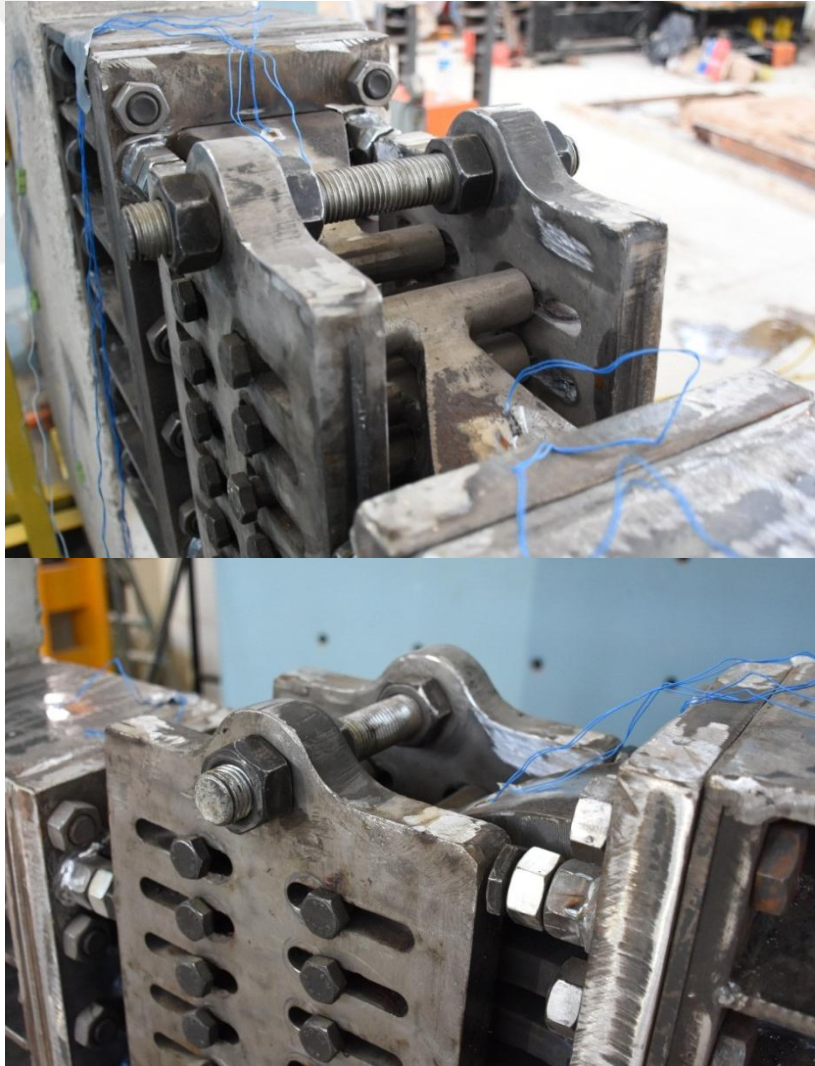


Şekil 3.46. Büyük yerdeğiştirme altında çelik kulakların eğilmiş hali ve PF-TETOD

Sağ perde duvar üzerinde 485 kN yük etkisi altında perde duvarın tabanına ve dış yüzeyine doğru ilerleyen kesme çatlakları oluşmuştur. Tespit edilen bu çatlaklar yüzeysel olup, deney sırasında çatlaklarda genişleme veya beton döküntüsü oluşmamıştır. Sol perde

duvarda ise 491 kN yük değerinde perde tabanına ve perde dışına doğru ilerleyen kesme çatlakları görülmüştür. Sağ perde duvarda olduğu gibi oluşan çatlaklar yüzeysel olup, yükleme sırasında genişleme ve döküntü oluşumu olmamıştır.

Uygulanan yükleme protokolünün en yüksek yerdeğiştirme adımımda bile ray plakasında, ankraj plakalarında herhangi bir açılma, esneme veya ezilme görülmemiştir. elik kulaklar, nihai olarak yaklaşık 132 mm yatay yerdeğiştirme altındaki sistem içerisinde yaklaşık 66 mm kadar düşey olarak eğilmişlerdir. Bu aşamada TETOD içerisinde yer alan kulaklarda çatlama veya kopma olmamıştır. Rijit başlık ve kulak arasında yapılan kaynaklar ve kaynağa yakın bölgelerde herhangi bir bozulma görülmemiştir. elik kulakların TETOD içerisindeki nihai eğilmiş durumu, Şekil 3.47'de verilmektedir.



Şekil 3.47. elik kulakların TETOD içerisinde nihai eğilmiş görüntüsü

PF-TETOD deney elemanına ait yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisine ait grafik, Şekil 3.48'de verilmektedir. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesinde, alt ve üst bölgede olmak üzere yatay 2 adet (I1 ve I2) ve perde duvar orta bölgesinde yatay 1 adet (W) birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. TETOD deney elemanındaki ölçümleri teyit etmek ve deney sırasındaki birim şekildeğiştirmelerin kulak uzunluğuna bağlı dağılımını görmek için üst sağ çelik kulak üzerinde 3 adet birim şekildeğiştirme ölçer (kulak ucundan dibine doğru SG-1, SG-2 ve SG-3) kullanılmıştır. TETOD içerisinde bir kulak takımı yukarı, bir kulak takımının aşağı yönlü hareketi sebebiyle bir yüzey basınca bir yüzey de çekmeye maruz kalmaktadır. Bu sebeple sol üst çelik kulağın ortasına da bir adet birim şekildeğiştirme ölçer (SG-4) yerleştirilmiştir. SG-4, aynı zamanda TETOD deney elemanında olduğu gibi sol ve sağ kulak takımlarındaki şekildeğiştirmelerin dengeli olup olmadığının kontrolü için yerleştirilmiştir. Kesme etkili olarak tasarlanan çelik kiriş kollarında çarpılma veya burkulma sonucu oluşabilecek birim şekildeğiştirmeleri tespit etmek için sol çelik kiriş kolu üzerine SGT birim şekildeğiştirme ölçeri yerleştirilmiştir.

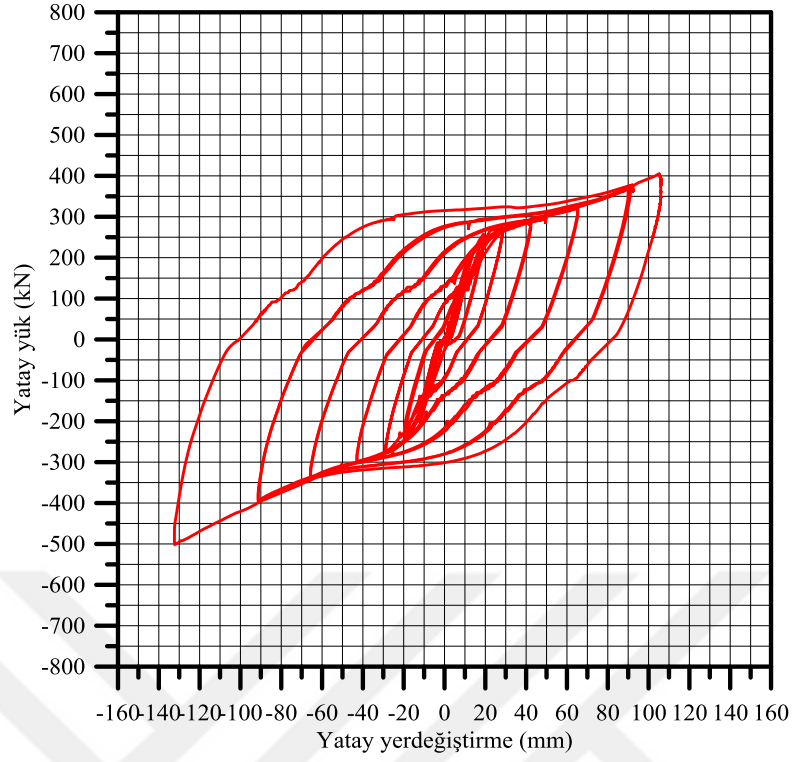
I1 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer 15. yük adımının sonuna kadar yaklaşık 0.0012 birim şekildeğiştirme değerinin üzerine çıkmamış ve deney boyunca kararlı değerler vermiştir. I2 birleşimi üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer 15. yük adımının sonuna kadar yaklaşık 0.002 birim şekildeğiştirme değerine kadar kararlı okuma yapmış deney sonunda 0.004 değerine kadar ulaşmıştır. Perde duvar üzerindeki birim şekildeğiştirme ölçer (W), 15. yük adımının sonuna kadar 0.0008 birim şekildeğiştirme değerine kadar kararlı okuma yapmış ve bu değerinin üzerine çıkmamıştır.

Çelik kulakların malzeme deneylerinde, akma birim şekildeğiştirme değeri 0.00213 olarak bulunmuştur. Deney sonunda SG-1, 8. yük adımında itmede 11.71 mm yerdeğiştirme ve 202.69 kN yük değerinde 0.00213 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmıştır. SG-2, 8. yük adımında itmede 10.75 mm yerdeğiştirme ve 188.42 kN yük değerinde 0.00213 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmıştır. SG-3, 8. yük adımında itmede 11.12 mm yerdeğiştirme ve 208.16 kN yük değerinde 0.00213 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmıştır. Buradan seçilen çelik kulak boyutlarının uygun olduğu ve tasarım kriterlerinin sağlandığı görülmektedir. TETOD deney elemanı ile oldukça uyumlu sonuçlar ortaya çıkmıştır. SG-4 birim şekildeğiştirme ölçer, 8. yük adımında itmede 11.31 mm yerdeğiştirme ve 196.98 kN yük değerinde 0.00213 birim şekildeğiştirme değerine ulaşmıştır. Buradan her iki çelik kulak takımının yükü dengeli

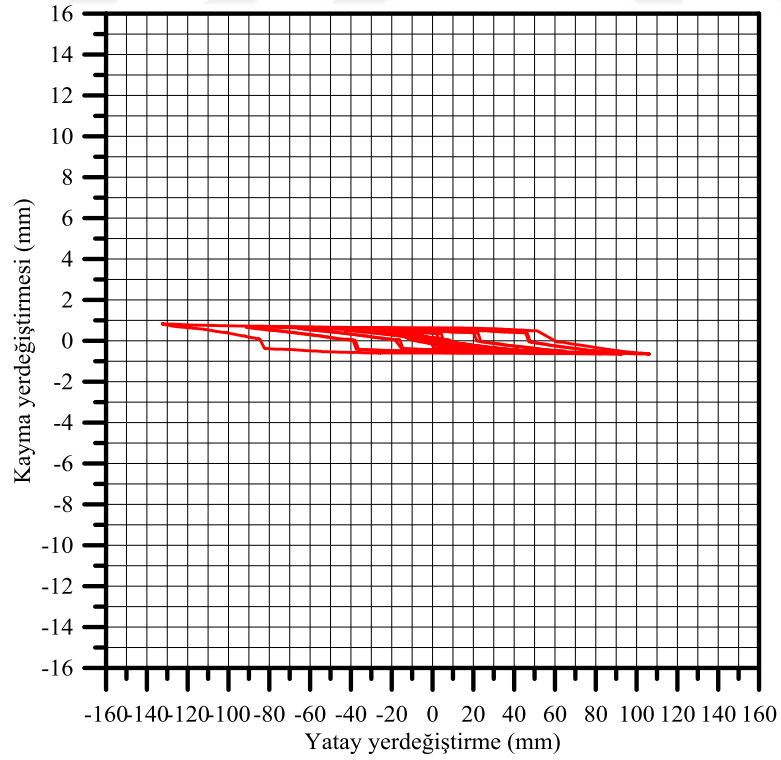
olarak dağıttığı ve çelik kulakların eşit oranlarda şekildeğiştirme yaptığı görülmektedir. SGT birim şekildeğiştirme ölçeri ise yaklaşık 132 mm nihai yerdeğiştirme sonrası bile 0.0005 birim şekildeğiştirme değerini aşmamış ve deney boyunca bu değer civarında okuma yapmıştır. SGT birim şekildeğiştirme ölçerden anlaşılacağı üzere, kesme etkili çelik kiriş kollarında çarpılma veya burkulma oluşmamıştır.

Bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmelerinin ölçümü için sol alt birleşimde (LLPDT) ve sağ alt birleşimde (RLPDT) 2 adet düşey yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Sol ve sağ alt birleşimdeki yerdeğiştirme ölçerlerden alınan düşey kaymaların yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiği Şekil 3.49 ve Şekil 3.50'de verilmektedir. Şekil 3.49 incelendiğinde, kirişin sol tarafında 15. yük adımının sonuna kadar yaklaşık 1.00 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. Deney süresince itme ve çekme döngülerinde kararlı olarak değişim göstermiştir. Şekil 3.50'ye göre, kirişin sağ tarafında 13. yük adımının sonuna kadar yaklaşık 0.75 mm civarına kadar düşey yerdeğiştirme meydana gelmiştir. Görüleceği üzere sağ ve sol kiriş kollarındaki kayma yerdeğiştirmeleri arasında yaklaşık olarak benzerlik görülmektedir. Çelik kiriş kollarının perde duvarlara rijit olarak montajının yapıldığı ve deney sırasında açılmaların olmadığı LLPDT ve RLPDT yerdeğiştirme ölçerlerinden alınan sonuçlarla teyit edilmiştir. TETOD'a ait yapılan deneysel çalışmanın sonuçları Tablo 3.9'da detaylı olarak verilmektedir.

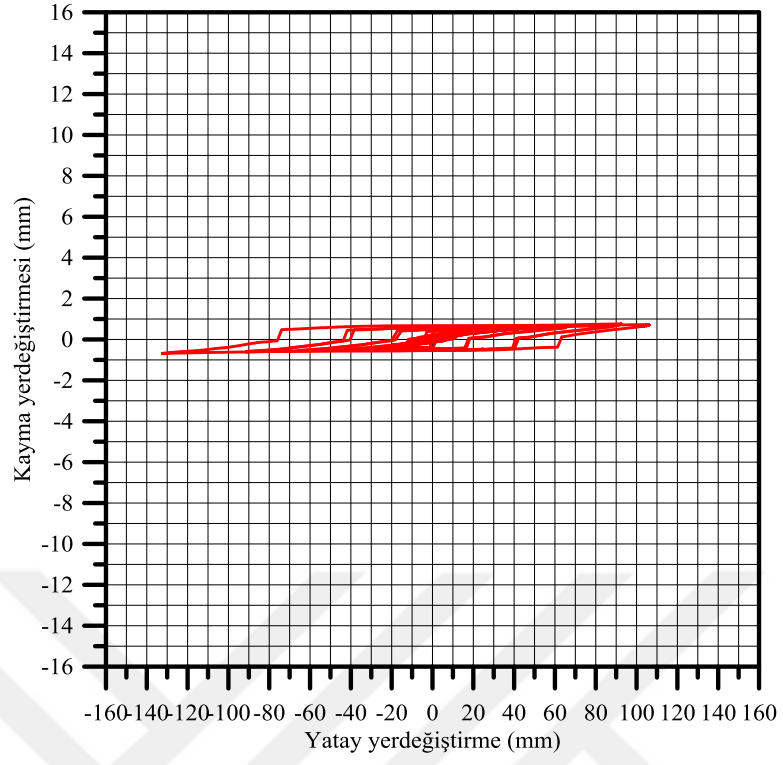




Şekil 3.48. Prefabrik tahterevalli tipi bağ kirişi deney elemanının çevrimsel yük altındaki performansı



Şekil 3.49. LLPDT bölgesindeki düşey kayma yerdeğiştirmeleri



řekil 3.50. RLPDT bölgesindeki dűřey kayma yerdeğiřtirmeleri

Tablo 3.9. PF-TETOD'a ait deney sonuçları

Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	İtme (+)			Çekme (-)			Deneysel gözlemler
		P, kN	d, mm	Kayma (mm)	P, kN	d, mm	Kayma (mm)	
1	2	13.96	1.12	0.0017	10.88	1.18	0.0035	Hasar yok
2	2	24.84	1.60	0.0053	14.21	1.63	0.053	Hasar yok
3	2	42.20	2.23	0.0100	29.67	2.24	0.007	Hasar yok
4	2	47.03	3.23	0.018	38.23	3.28	0.0148	Hasar yok
5	2	67.24	4.31	0.024	54.73	4.34	0.0235	Hasar yok
6	2	106.51	6.30	0.044	92.21	6.32	0.0359	Hasar yok
7	2	154.86	8.79	0.118	143.19	8.85	0.0694	Hasar yok
8	2	209.72	12.25	0.183	201.78	12.09	0.138	Hasar yok
9	2	233.13	16.14	0.244	223.78	16.41	0.184	Hasar yok
10	2	257.68	19.45	0.386	246.77	19.35	0.276	Perde üzerinde yatay çatlak oluşumu
11	2	271.55	28.25	0.476	277.97	28.64	0.420	Hasar yok
12	2	286.62	42.00	0.517	298.14	42.50	0.492	Perde üzerinde ilk kesme çatlakları
13	2	320.06	65.05	0.577	337.08	65.08	0.543	Hasar yok
14	2	368.75	89.54	0.683	397.05	90.65	0.601	Perde üzerindeki çatlak ağı genişledi
15	2	405.42	105.14	0.725	501.91	132.25	0.690	Deney tamamlandı

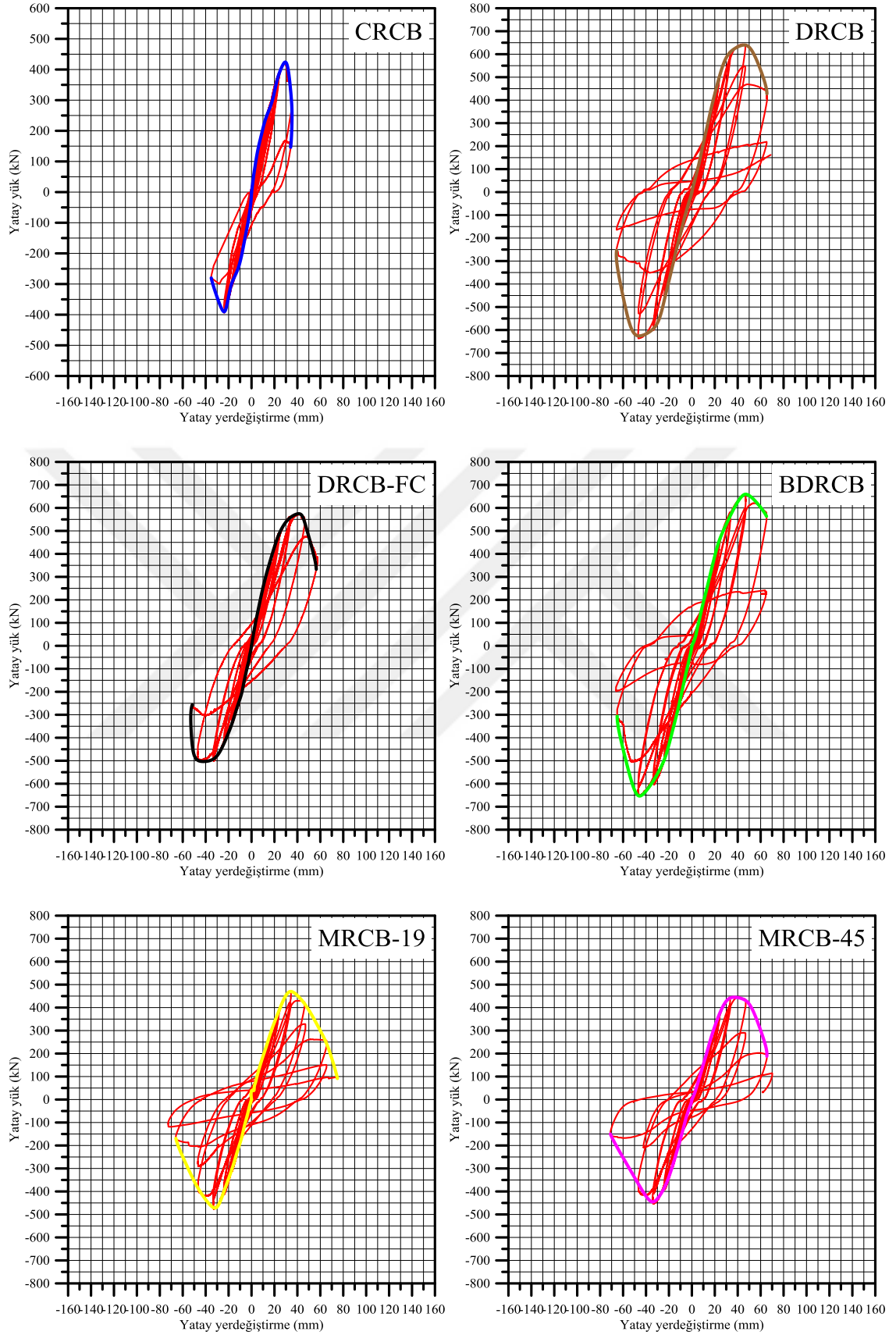
### 3.3. Deneysel Bulguların Karşılaştırmalı Olarak İrdelenmesi

#### 3.3.1. Yük Taşıma Kapasiteleri

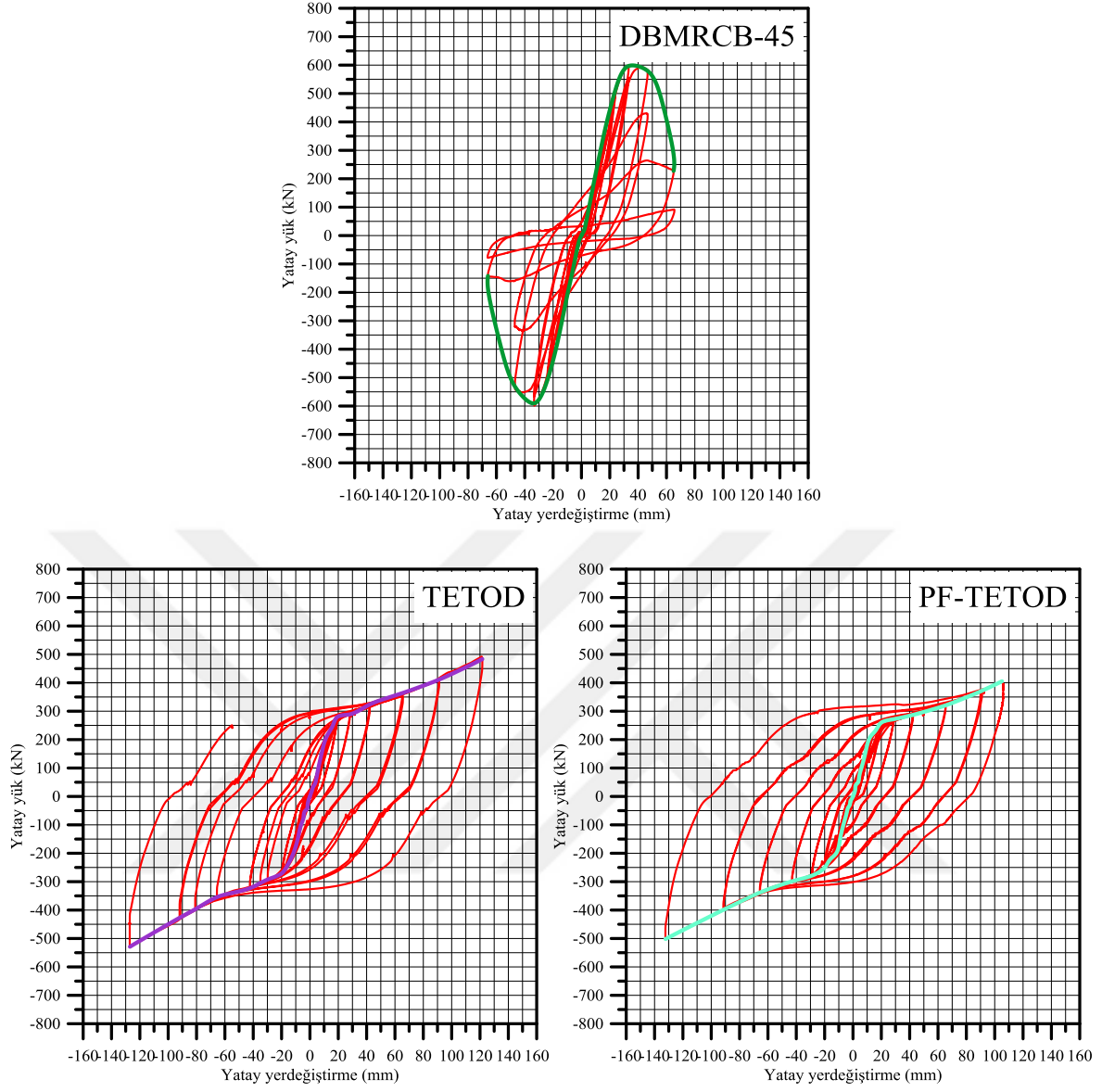
Çevrimsel artımlı yatay yerdeğiştirme etkisi altında davranışları incelenen deney elemanlarının, deney sonunda elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerine bağlı olarak dayanım zarf eğrileri elde edilmiştir. Zarf eğrileri, Şekil 3.51’de görüldüğü gibi, deney sonunda tüm deney elemanları için elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri içerisinde her bir yük adımının en büyük yük değerine karşılık gelen yerdeğiştirme değerleri dikkate alınarak çıkartılmıştır. Her bir deney elemanı için elde edilen zarf eğrileri karşılaştırmalı olarak tek bir grafik üzerinde Şekil 3.52’de verilmektedir. CRCB elemanına ait ilk akma, 324 kN yük değerinde meydana gelmiştir. İtme yönünde 423.65 kN yük değerinde ise nihai dayanımına ulaşmıştır. Nihai yüklemenin meydana geldiği yük adımının ikinci çevriminde, deney elemanın dayanımı nihai dayanımının %30’u seviyelerine kadar düşmüştür. DRCB elemanı akma dayanımına 310.25 kN yük değerinde ve nihai dayanımı ise 639.73 kN olarak tespit edilmiştir. DRCB deney elemanının nihai dayanımına ulaştığı yük adımından bir sonraki yük adımında ise dayanım değeri nihai dayanımın %70’i seviyelerine kadar düşmüştür. DRCB-FC deney elemanındaki ilk akmaya 371.18 kN yük değerinde ulaşılmıştır. Nihai dayanım yükü ise 573.08 kN olarak elde edilmiştir. Nihai yükleme adımından sonraki yerdeğiştirme adımında dayanım, 333.03 kN yük değerine kadar (Nihai dayanımın %58’i) azalmıştır. Sargılı ve sargısız diyagonal donatılı deney elemanlarına alternatif olarak üretilen BDRCB deney elemanı, 392 kN yük değerinde akma yüküne ulaşmıştır. 659.29 kN yük değerinde nihai dayanıma ulaşan BDRCB deney elemanı, nihai dayanıma ulaştığı yerdeğiştirme adımından sonraki yerdeğiştirme adımının ilk çevriminde dayanım değeri, yaklaşık olarak %15 azalarak 563.29 kN olarak elde edilmiştir. Fakat ikinci çevrimde demet diyagonal donatılardaki burkulma sebebiyle dayanım ani olarak %63 azalarak 244.88 kN değerine düşmüştür. MRCB-19 ve MRCB-45 deney elemanlarına ait donatılar üzerinde birim şekildeğiştirme ölçer kullanılmadığı için deney elemanları akma dayanımları tespit edilememiştir. Fakat geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı referans alınarak bu deney elemanlarının akma dayanımı nihai dayanımın yaklaşık %75’i olarak kabul edilmiştir. Buna göre MRCB-19 ve MRCB-45 deney elemanlarının akma dayanımları sırasıyla, 352.50 kN ve 331.30 kN olarak hesap edilmiştir. MRCB-19 ve MRCB-45 deney elemanlarının nihai dayanımları ise sırasıyla, 470.04 kN ve 441.74 kN

olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.52’de verilen zarf eğrileri incelendiğinde, MRCB-19 ve MRCB-45 deney elemanlarının zarf eğrileri nihai yük değerleri dışında birbiriyle örtüşmektedir. Birleşim bölgelerindeki eğilmelerin karşılanamaması sebebiyle hasır donatısındaki açı değişiminin deney eleman davranışı üzerinde etkisi görülmemiştir. Ayrıca, her iki deney elemanına ait hem itme hem de çekme yönündeki yük değerleri eşit çıkmıştır. Hasır donatılı deney elemanlarındaki eğilme çatlaklarının oluşumuyla meydana gelen kayma kesme hasarının önüne geçilmesi için test edilen DBMRCB-45 deney elemanı, 331.31 kN yük değerinde akma dayanımına ulaşmıştır. Nihai dayanımı 596.91 kN olan DBMRCB-45 deney elemanı, nihai dayanıma ulaştığı yerdeğiştirme adımından bir sonraki yerdeğiştirme adımında yük değeri, 17.36 kN yük değeri kadar azalmıştır. Fakat birleşim bölgelerine yakın oluşan eğilme hasarı sebebiyle bir sonraki yerdeğiştirme adımında yük değeri doğrudan %62 azalarak 227.45 kN yük değerine düşmüştür. TETOD deney elemanında betonarme kiriş kollarındaki donatılarda kısmen akma oluşmuştur. TETOD deney elemanındaki ilk akma ise 200.59 kN yük değerinde meydana gelmiştir. Tüm kesitte plastik mafsall oluşumunun başladığı plastikleşme yükü ise yaklaşık 270 kN olarak tespit edilmiştir. PF-TETOD deney elemanına ait çelik kiriş kolunda deney süresince burkulma ve akma meydana gelmemiştir. Buradan çelik kiriş kolunun deney dayanımına etkisinin olmadığı kabul edilerek PF-TETOD deney elemanı, akma dayanımına 188.43 kN yük değerinde ulaşırken, 257.68 kN yük değerinde çelik kulak kesitlerinde tam plastik moment oluşumu başlamıştır. PF-TETOD deney elemanı, TETOD’a kıyasla daha az yük değerine sahip olsa bile zarf eğrileri hem itme hem de çekme yönünde oldukça kararlı çıkmıştır.

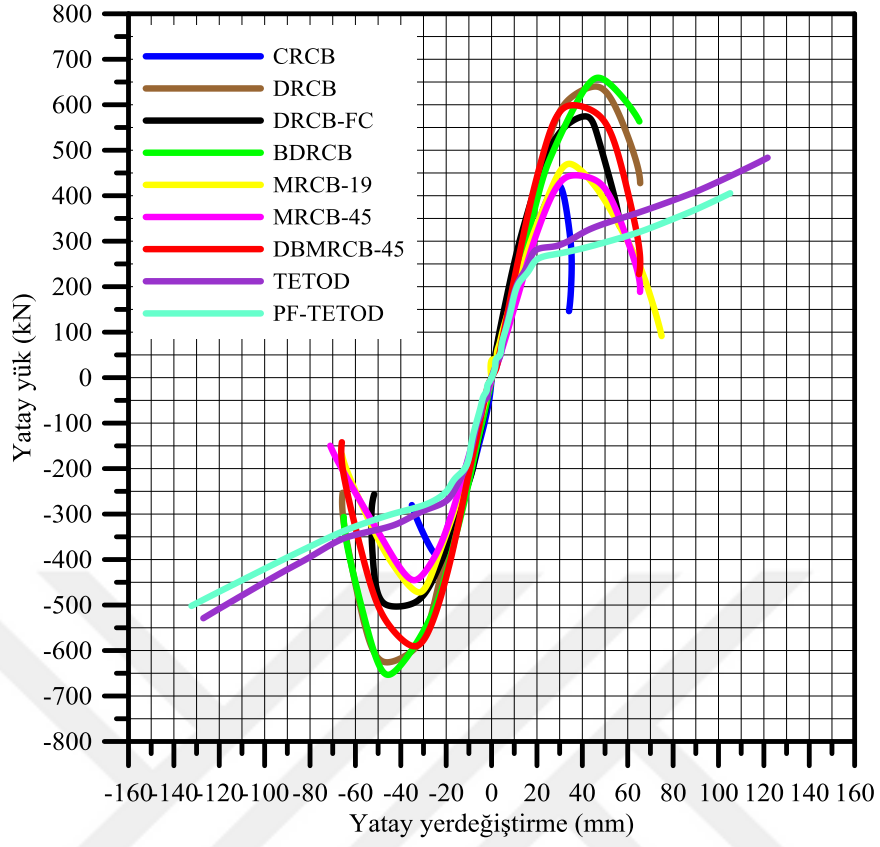
İtme ve çekme etkisindeki deney elemanlarından elde edilen sonuçlar Tablo 3.10 ve Tablo 3.11’de verilmektedir. Elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere en yüksek nihai dayanıma sahip deney elemanı, demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanıdır. BDRCB deney elemanına en yakın nihai dayanıma sahip deney elemanı ise DRCB deney elemanıdır. Açısal yerleşim dışında benzer donanıma sahip DRCB-FC ve BDRCB deney elemanlarının nihai dayanımları arasında yaklaşık 86.21 kN kadar bir farklılık oluşmuştur. DRCB deney elemanının nihai dayanımı, DRCB-FC deney elemanının nihai dayanımından 66.65 kN daha yüksek çıkmıştır. DBMRCB-45 deney elemanının nihai dayanımı, MRCB-19 ve MRCB-45 deney elemanlarına göre sırasıyla, 126.87 kN ve 155.20 kN daha fazla çıkmıştır.



Şekil 3.51. Deneysel elemanlarına ait yük-yerdeğiştirme grafiklerine bağlı zarf eğrilerinin oluşumu (Devamı diğer sayfada)



Şekil 3.51. Deney elemanlarına ait yük-yerdeğiştirme grafiklerine bağlı zarf eğrilerinin oluşumu



Şekil 3.52. Deney elemanlarına ait zarf eğrileri



Tablo 3.10. Nihai yük ve yerdeğiştirme değerleri

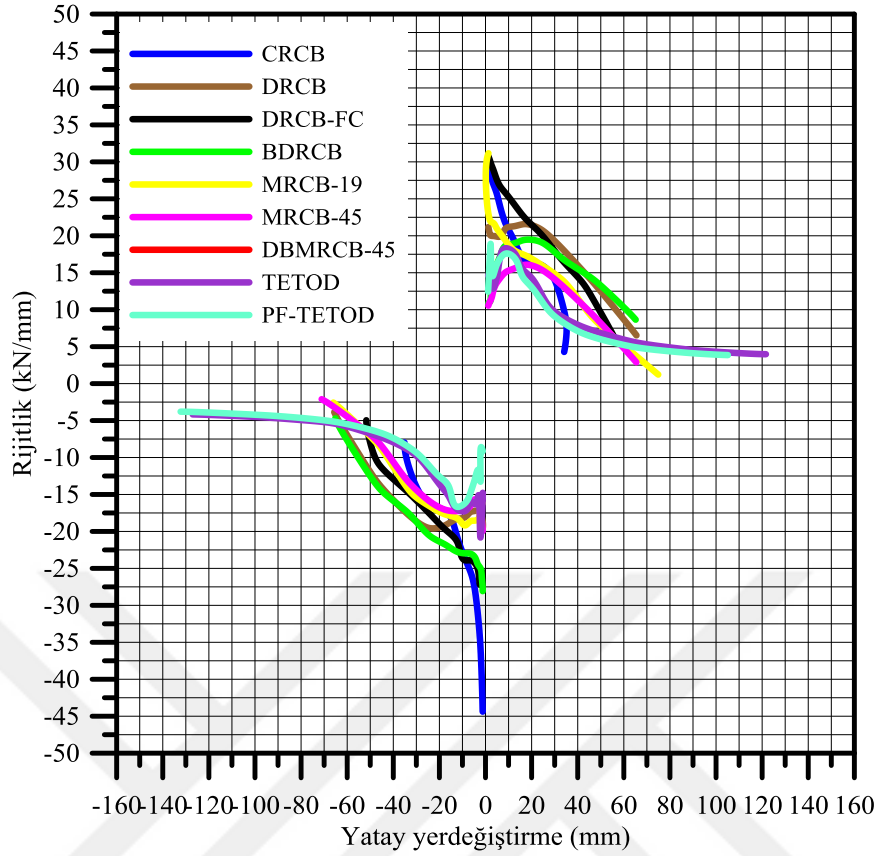
Deneç elemanı	Maksimum yük						Maksimum yerdeğiştirme					
	İtme (+)			Çekme (-)			İtme (+)			Çekme (-)		
	Nihai yük (kN)	$\delta$ (mm)	$\Delta$ (%)	Nihai yük (kN)	$\delta$ (mm)	$\Delta$ (%)	P (kN)	$\delta_{maks}$ (mm)	$\Delta$ (%)	P (kN)	$\delta_{maks}$ (mm)	$\Delta$ (%)
<b>CRCB</b>	423.65	28.98	1.80	390.46	23.832	1.48	146.15	34.12	2.12	280.14	35.13	2.18
<b>DRCB</b>	639.73	46.66	2.90	625.70	46.81	2.91	427.93	65.48	4.07	253.13	65.61	4.08
<b>DRCB-FC</b>	573.08	42.61	2.63	498.35	46.81	2.91	333.03	56.49	3.51	256.57	51.72	3.21
<b>BDRCB</b>	659.29	46.61	2.90	653.33	45.207	2.81	563.29	65.14	4.05	306.28	65.15	4.05
<b>MRCB-19</b>	470.04	33.93	2.11	471.71	31.40	1.95	91.36	74.94	4.65	169.08	65.99	4.10
<b>MRCB-45</b>	441.74	33.41	2.08	445.34	33.96	2.11	188.43	65.41	4.06	149.70	71.08	4.41
<b>DBMRCB-45</b>	596.91	33.31	2.07	590.55	33.41	2.08	227.45	64.99	4.04	141.97	65.97	4.10
<b>TETOD</b>	483.55	121.63	7.55	529.00	127.02	7.89	483.55	121.63	7.55	529.00	127.02	7.89
<b>PF-TETOD</b>	405.43	105.15	6.53	501.92	132.25	8.21	405.43	105.15	6.53	501.92	132.25	8.21

Tablo 3.11. Deneysel elemanlarına ait değerler

Deneysel elemanı	Nihai yük (kN)	Nihai yerdeğiştirme (mm)	Nihai Ötelenme (%)	Akma yerdeğiştirme (mm)	Süneklik ( $\mu$ )
<b>CRCB</b>	423.65	28.98	2.21	18.54	1.56
<b>DRCB</b>	639.73	46.66	2.90	14.49	3.22
<b>DRCB-FC</b>	573.08	42.61	2.63	16.19	2.63
<b>BDRCB</b>	659.29	46.61	2.90	20.37	2.29
<b>MRCB-19</b>	470.04	33.93	2.11	19.15	1.87
<b>MRCB-45</b>	441.74	33.41	2.08	18.74	1.78
<b>DBMRCB-45</b>	596.91	33.31	2.07	14.81	2.25
<b>TETOD</b>	483.55	121.63	7.55	11.09	10.97
<b>PF-TETOD</b>	405.43	105.15	6.53	10.75	9.78

### 3.3.2. Etkili Rijitlikler

Artımlı çevrimsel yerdeğiştirme etkisinde deney elemanlarının etkili rijitliklerin yerdeğiştirmeye bağlı değişimi Şekil 3.53'te verilmektedir. Deney elemanlarının etkili rijitlik değerleri itme ve çekme yönlerinde değişim göstermektedir. Bu sebeple her bir yükleme yönündeki rijitlikleri kendi içerisinde değerlendirilmiştir. TETOD ve PF-TETOD deney elemanları, rijitlik değerlerinin CRCB deney elemanının akma noktasındaki rijitlik değeri ile aynı seviyede tutulması sebebiyle en düşük rijitliğe sahip elemanlar olmuştur. İtmede ve çekmede en büyük rijitlik değerleri ise CRCB deney elemanından elde edilmiştir. Fakat ani ve gevrek kırılmaya maruz kalan CRCB deney elemanı aynı zaman da yükleme adımları arasında en büyük rijitlik kaybı oluşan deney elemanı olmuştur. Yerdeğiştirme adımlarının artmasıyla beraber deney elemanlarının rijitlikleri buna bağlı olarak azalmıştır fakat TETOD ve PF-TETOD deney elemanları, yük taşıma kapasitelerinin dengeli ve sürekli artışları sebebiyle daha kararlı rijitlik ortaya koymuşlardır. CRCB, DRCB, DRCB-FC, BDRCB, MRCB-19, MRCB-45, DBMRCB-45, TETOD ve PF-TETOD deney elemanlarının itmede yaklaşık 11 mm yerdeğiştirme değerinde (TETOD ve PF-TETOD'un akma sınırı) elde edilen rijitlikleri sırasıyla, 20.88, 21.12, 25.24, 18.74, 19.17, 16.07, 21.73, 18.11 ve 17.43 kN/mm olarak elde edilirken, çekme de 11 mm yerdeğiştirme değerinde ise sırasıyla, 22.13, 18.19, 22.88, 22.81, 18.66, 17.18, 21.04, 17.12 ve 16.69 kN/mm olarak elde edilmiştir. %2 ötelenmede yani yaklaşık 32.20 mm yerdeğiştirme değerinde CRCB, DRCB, DRCB-FC, BDRCB, MRCB-19, MRCB-45, DBMRCB-45, TETOD ve PF-TETOD deney elemanlarının rijitliklerinde (itme ve çekmede ortalaması alınarak) sırasıyla, %68, %14, %46, %15, %40, %33, %21, %48 ve %50 azalma meydana gelmiştir. DRCB ve BDRCB deney elemanları en az rijitlik kaybı yaşayan deney elemanları olmuştur.



Şekil 3.53. Deney elemanlarının yerdeğiştirmeye bağlı etkili rijitlikleri

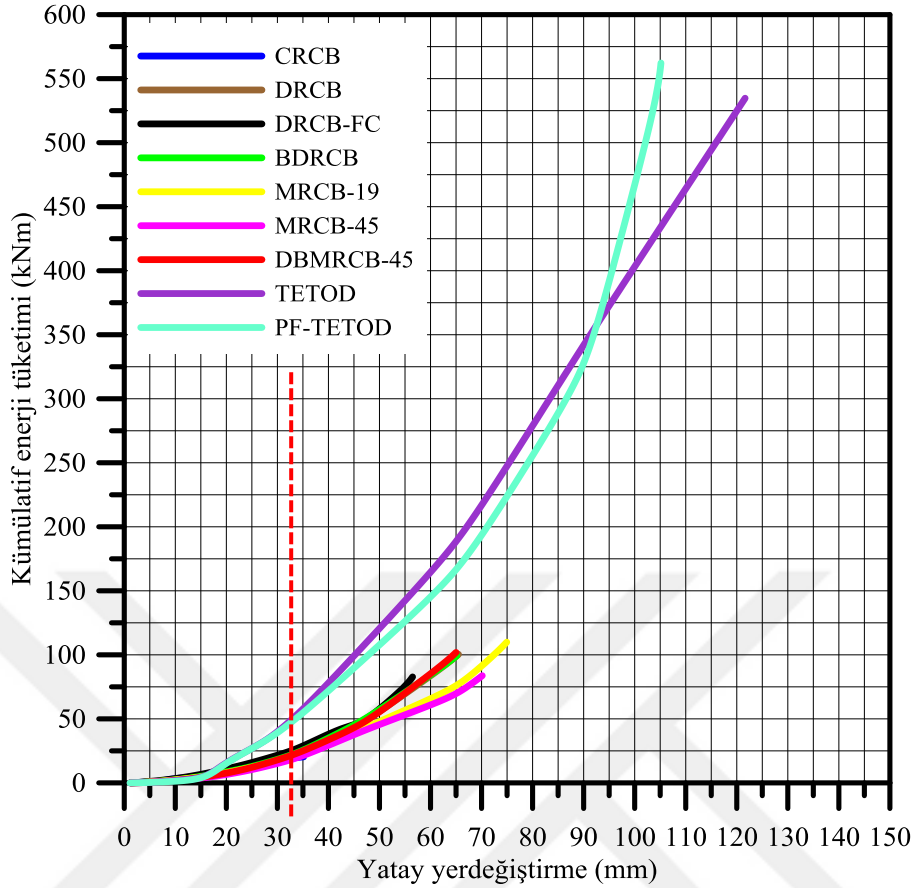
### 3.3.3. Enerji Tüketim Kapasiteleri ve Süneklik

Enerji tüketim kapasitesi, yapısal elemanların performanslarının anlaşılabilmesinde dikkate alınan en önemli ölçütlerden bir tanesidir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen yatay yük ve yatay yerdeğiştirme eğrilerindeki her bir çevrimin kapsadığı alanların kümülatif toplamı ile elde edilen kümülatif enerji tüketimi-yatay yerdeğiştirme grafiği Şekil 3.54'te verilmektedir. Deney elemanlarının enerji tüketim kapasiteleri yük taşıma ve rijitlik kapasiteleri ile değil, doğrudan süneklikleri ile alakalı olduğu açıkça görülmektedir. Bütün betonarme deney elemanları, TETOD ve PF-TETOD deney elemanlarından çok daha fazla yük taşıma ve rijitlik kapasitesine sahip olmasına rağmen enerji tüketim kapasiteleri %50 daha az olmuştur. Nihai yerdeğiştirme açısından değerlendirildiğinde ise CRCB, DRCB, DRCB-FC, BDRCB, MRCB-19, MRCB-45, DBMRCB-45, TETOD ve PF-TETOD deney elemanlarının enerji tüketim kapasiteleri sırasıyla, 18.36, 47.28, 42.30, 48.81, 21.10, 19.06, 19.06, 534.73 ve 562.21 kNm olarak elde edilmiştir. %2 yatay yerdeğiştirme seviyelerinde ise CRCB, DRCB, DRCB-FC, BDRCB, MRCB-19, MRCB-

45, DBMRCB-45, TETOD ve PF-TETOD deney elemanlarının enerji tüketim kapasiteleri sırasıyla, 17.62, 21.98, 26.00, 22.97, 21.10, 19.06, 22.39, 47.60 ve 48.4 kNm olarak elde edilmiştir. Elde edilen enerji tüketim değerleri deney elemanları ve yerdeğiştirme değerlerine bağlı olarak Tablo 3.12’de verilmektedir. Buradan yaklaşık 32.20 mm yerdeğiştirme adımına kadar TETOD ve PF-TETOD’un yaklaşık olarak betonarme deney elemanlarının 2 katı kadar enerji tükettiği kabul edilebilir. Ayrıca betonarme deney elemanlarından en az enerji tüketim kapasitesine sahip deney elemanı CRCB elemanı olarak göze çarpmaktadır. CRCB, DRCB, DRCB-FC, BDRCB, MRCB-19, MRCB-45, DBMRCB-45, TETOD ve PF-TETOD deney elemanlarının süneklik oranları sırasıyla, 1.56, 3.22, 2.63, 2.29, 1.87, 1.78, 2.25, 10.97 ve 9.78 olarak hesap edilmiştir. Nihai yerdeğiştirmeye bağlı enerji tüketimi ile süneklik oranları kıyaslandığında süneklik arttıkça enerji tüketim kapasitesinin de arttığı görülmektedir.

Tablo 3.12. Kümülatif enerji tüketimi ve yerdeğiştirme arasındaki değişim

Deney elemanı	Yerdeğiştirme mertebesi (%2)	Nihai yerdeğiştirme
	Kümülatif enerji tüketimi (kNm)	Kümülatif enerji tüketimi (kNm)
CRCB	17.62	18.36
DRCB	21.98	47.28
DRCB-FC	26.00	42.30
BDRCB	22.97	48.81
MRCB-19	21.10	21.10
MRCB-45	19.06	19.06
DBMRCB-45	22.39	19.06
TETOD	47.60	534.73
PF-TETOD	48.4	562.21

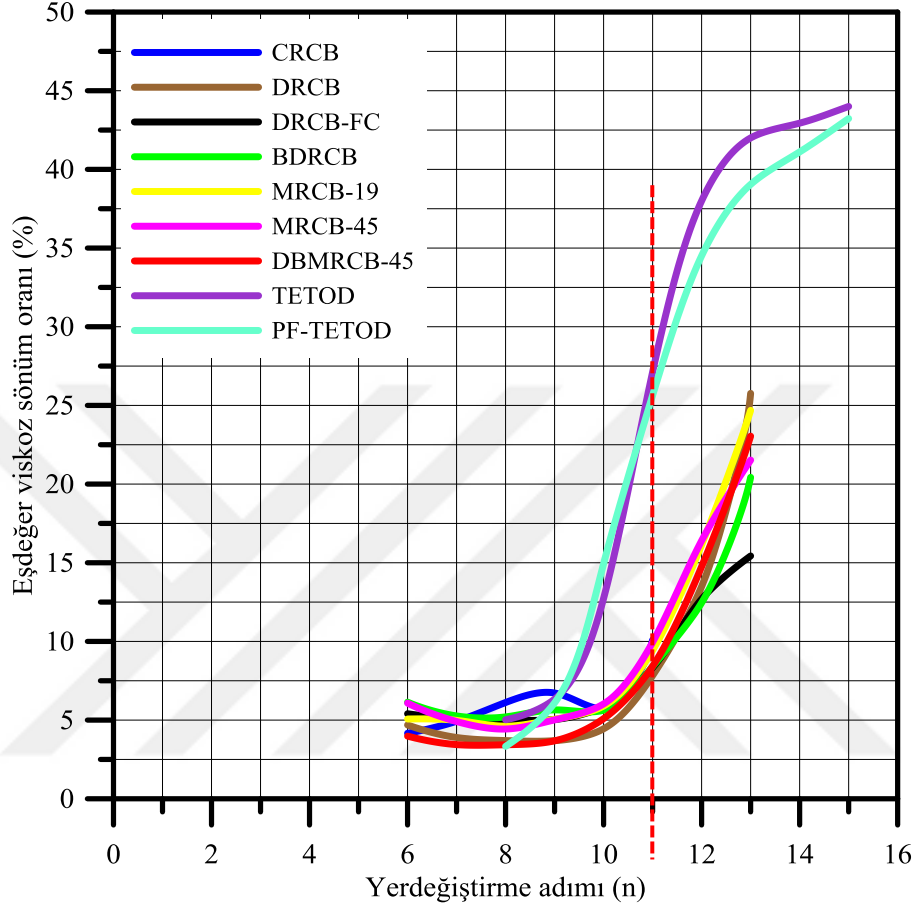


Şekil 3.54. Toplam olarak tüketilen enerjinin yatay yerdeğiştirmeye bağlı grafiği

### 3.3.4. Eşdeğer Viskoz Sönüm Oranları

Deney elemanlarında elastik olmayan şekildeğiştirmelerin meydana geldiği yerdeğiştirme adımlarının ikinci çevrimlerine göre hesaplanan viskoz sönüm oranlarının yerdeğiştirme adımlarına bağlı grafiği, Şekil 3.55'te verilmektedir. Elastik olmayan şekildeğiştirmelerin olduğu yerdeğiştirme adımlarına bağlı olarak CRCB, DRCB, DRCB-FC, BDRCB, MRCB-19, MRCB-45, DBMRCB-45, TETOD ve PF-TETOD deney elemanlarının viskoz sönüm oranları sırasıyla %6.72, %3.69, %5.04, %5.63, %5.46, %5.78, %3.54, %5.02 ve %3.33 olarak hesap edilmiştir. %2 yerdeğiştirme mertebelerinde ise CRCB, DRCB, DRCB-FC, BDRCB, MRCB-19, MRCB-45, DBMRCB-45, TETOD ve PF-TETOD deney elemanlarının viskoz sönüm oranları sırasıyla, %10.09, %7.83, %8.33, %8.40, %9.43, %9.95, %8.42, %35.60 ve %32.30 olarak hesap edilmiştir. %2 yerdeğiştirme mertebelerinde betonarme deney elemanlarının viskoz sönüm oranları birbirine oldukça yakın değerlere sahiptir. CRCB deney elemanının diğer betonarme deney

elemanlarından daha yüksek viskoz sönüm oranına sahip olmasının sebebi, nihai dayanım sınırına daha önceden ulaşmış olmasıdır.



Şekil 55. Yerdeğiştirme adımlarına bağlı olarak viskoz sönüm oranlarının değişimi

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yönetmeliklerde yer alan betonarme bağ kirişlerinin daha geniş açıklıklarda bile arzu edilen performansı ortaya koyabilmesine imkân verecek ve imalat kolaylığı sağlayacak yeni donatı düzenlerinin beraberinde yüksek dayanım ve rijitliğe cevap verebilecek hasar sonrası değiştirilebilir-takılabilir sönümleyici tipi bağ kirişi geliştirilmiştir. Donatı düzenlerinin ve sönümleyici tipi bağ kirişinin geliştirilmesinde, çalışmanın birinci bölümünde boşluklu perde duvar ve bağ kirişleri için anlatılan olumsuz durumlar göz önünde bulundurularak yapısal performansı artırıcı tasarımlar ortaya konmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında dikkate alınan geleneksel donatılı bağ kirişi (CRCB), sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi (DRCB), sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi (DRCB-FC), demet diyagonal donatılı bağ kirişi (BDRCB), hasır donatılı (19°) bağ kirişi (MRCB-19), hasır donatılı (45°) bağ kirişi (MRCB-45), güçlendirilmiş hasır donatılı (45°) bağ kirişi (DRMRCB-45), Tahterevallı tipi bağ kirişi (TETOD) ve prefabrik tahterevallı tipi bağ kirişi (PF-TETOD) üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen başlıca sonuçlar ve bazı öneriler aşağıda sunulmaktadır.

- Betonarme bağ kirişli deney elemanları arasında hasır donatılı (19°), hasır donatılı (45°) ve güçlendirilmiş hasır donatılı (45°) bağ kirişi deney elemanları, birim şekildeğiştirme ölçerlerden alınan verilere bağlı olarak en kararlı ve perde duvar üzerinde en az hasara sahip deney elemanları olmuştur.
- Bütün betonarme bağ kirişli deney elemanlarında kayma-kesme yerdeğiştirmesi oluşmuştur. %2 rölatif yerdeğiştirme adımı bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgelerindeki en büyük düşey yerdeğiştirmeler, hasır donatılı (19°) ve hasır donatılı (45°) bağ kirişi deney elemanlarında görülmüştür.
- %2 rölatif yerdeğiştirme adımı bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgelerinde en az düşey yerdeğiştirmesi meydana gelen deney elemanları, geleneksel donatılı ve güçlendirilmiş hasır (45°) donatılı bağ kirişi deney elemanları olmuştur.
- Geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı, diyagonal çekme etkisi altında ani ve gevrek olarak göçmüştür. Nihai yükün oluştuğu yerdeğiştirmelerden sonra bile boyuna ve gövde donatılarında burkulma ve kopma görülmemiştir.
- Sargılı diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanında eğilme ve kesme hasarları dengeli olarak dağılmış ve basınç bölgelerindeki betondaki ezilmelerin etkisiyle



- oluşan döküntüler sonucu göçme meydana gelmiştir. İleri seviye yerdeğiştirmeler altında diyagonal donatılar burkulmuş ve kopmuştur.
- Sargısız diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı, birleşim bölgelerindeki eğilme çatlaklarına rağmen diyagonal çekme etkisi altında göçmüştür. İleri seviye yerdeğiştirmeler altında, diyagonal donatılar burkulmuştur.
  - Demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı üzerinde nihai yük sınırına kadar yoğun olarak kesme ağırlıklı çatlak görülmüştür. Bağ kirişi-perde duvar birleşim bölgelerinde basınç ve çekme etkileri altında döküntü oluşumları ortaya çıkmıştır. Basınç diyagonallerindeki burkulma sebebiyle ani göçme meydana gelmiştir.
  - Yükleme protokolü süresince hasır donatılı ( $19^\circ$ ) bağ kirişi deney elemanı üzerinde dengeli eğilme ve kesme çatlakları görülmüştür. Birleşim bölgelerindeki eğilme çatlaklarının aşırı artması nedeniyle dayanımını kaybeden hasır donatılı ( $19^\circ$ ) bağ kirişi deney elemanı, nihai dayanım seviyesinden sonra 66.188 mm (%41) yerdeğiştirme değerine kadar bütünlüğünü korumuştur.
  - Hasır donatılı ( $45^\circ$ ) bağ kirişi deney elemanı üzerinde dengeli eğilme ve kesme çatlakları görülmesine rağmen birleşim bölgelerindeki kayma-kesme yerdeğiştirmelerinin etkisiyle dayanımını kaybetmiş ve kayma kırılmasına maruz kalmıştır.
  - Hasır donatılı ( $19^\circ$  ve  $45^\circ$ ) bağ kirişi deney elemanlarında birleşim bölgelerindeki aşırı yerdeğiştirmelerin etkisiyle alt ve üst montaj donatılarında belirgin yerel burkulmalar gözlemlenmiştir.
  - Güçlendirilmiş hasır donatılı ( $45^\circ$ ) bağ kirişi deney elemanı, deneyin ilk aşamalarında kesme ağırlıklı çatlaklara maruz kalırken, basınç bölgelerinde ezilmeler ve alt üst güçlendirme donatılarının birleşim bölgesi hizasında oluşan eğilme çatlaklarının etkisi sonucu dayanımını kaybetmiştir. Eğilme ve kesme dengeli kırılma ortaya çıkmıştır.
  - Aynı donatı oranlarına göre tasarlanan betonarme deney elemanları içerisinde geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı en düşük ve demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanı ise en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip deney elemanlarıdır.
  - Betonarme deney elemanları arasında %2 rölatif yerdeğiştirme değerlerinde rijitlik değerindeki azalması en az olan eleman sargılı ve demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanları olurken (%14 ve %15), en yüksek olan eleman ise %68'lik

rijitlik kaybı ile geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanı olmuştur. Buradan açıklık/derinlik oranı 2 olan bağ kirişinde geleneksel donatı düzenlemesinin kullanılmaması gerektiği ortaya çıkmıştır.

- %2 yerdeğiştirme mertebelerinde diyagonal donatılı deney elemanları (sargılı, sargısız ve demet diyagonal), benzer enerji tüketim kabiliyetine sahipken nihai yerdeğiştirme mertebesinde ise sargılı ve demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanları en yüksek enerji tüketme kapasitesine sahip deney elemanları olmuştur.
- Açıklık/derinlik oranı 2 olan bağ kirişleri, doğrudan diyagonal çekme ve diyagonal basınç etkisine maruz elemanlardır. Diyagonal çekme ve basınç eksenine açısına eşdeğer diyagonal donatı yerleşiminin yapılması, olası diyagonal çekme ve basınç kırılmalarının önüne geçmektedir.
- Han vd. (2015) tarafından demet diyagonal donatılı bağ kirişi üzerinde yapılan çalışmada, demet diyagonallerin bağ kirişi kesme dayanımını artırdığı ve yönetmelik koşullarına göre tasarlanan bağ kirişlerine benzer süneklik ve enerji yutma kabiliyeti ortaya koyduğu belirtilmiştir. Benzer olarak bu çalışmada, demet diyagonal donatılı bağ kirişleri, demet diyagonal donatılarının açılarının diyagonal eksen açısına yakın deney elemanı olması sebebiyle en iyi deneysel performansı ortaya koyan deney elemanı olmuştur.
- Hasır donatı düzeni, bağ kirişi merkezlerinde oluşan diyagonal çatlakların düzenli gelişimine ve ani kırılmaların önüne geçmektedir. Fakat diyagonal eksenler üzerindeki çekme ve birleşim bölgelerindeki eğilme etkileri, hasır donatıların performansını sınırlandırmıştır.
- Hasır donatıların kullanılmasıyla beraber diyagonal donatı eğim açısının artırılması hedeflenmiş ancak deneysel olarak herhangi bir performans artışı sağlanamamıştır.
- Hasır donatıların diyagonal olarak güçlendirilmesi bağ kirişi performansını büyük ölçüde geliştirmektedir. Fakat birleşim bölgesindeki plastik mafsal oluşumu diyagonallerin birleşim bölgesi hizasına kaymakta ve eğilme etkisi bağ kirişi dayanımını belirleyici unsur olmaktadır.
- Diyagonal olarak güçlendirilmeden sadece beton ve sargı donatıları ile kesme kuvvetlerini karşılayan geleneksel donatılı bağ kirişi deney elemanında bağ kirişinde oluşan nihai kayma gerilmesi  $0.73\sqrt{f_{ck}}$  olarak belirlenmiştir. Bağ kirişi

kesitinde oluşabilecek maksimum müsaade edilebilir kayma gerilmesi, ACI 318-14 yönetmeliğinde  $0.83\sqrt{f_{ck}}$  ve TBDY-2018’de ise  $0.85\sqrt{f_{ck}}$  olarak verilmiştir.

- Sargılı, sargısız ve demet diyagonal donatılı bağ kirişi deney elemanlarındaki bağ kirişi kesitlerinde oluşan kayma gerilmeleri, nihai yük değerlerinde sırasıyla  $1.18\sqrt{f_{ck}}$ ,  $1.09\sqrt{f_{ck}}$  ve  $1.26\sqrt{f_{ck}}$  değerlerine ulaşmıştır. Bu değerler yönetmeliklerde verilen değerler üzerinde olmuştur.
- Hasır donatılı ( $19^\circ$ ,  $45^\circ$  ve güçlendirilmiş  $45^\circ$  açılı) bağ kirişi deney elemanlarındaki bağ kirişi kesitlerinde oluşan kayma gerilmeleri, nihai yük değerlerinde sırasıyla  $1.0\sqrt{f_{ck}}$ ,  $0.94\sqrt{f_{ck}}$  ve  $1.12\sqrt{f_{ck}}$  elde edilmiştir. Diyagonal eksen açısına yakın açı değerine sahip hasır donatılar, diyagonal çekme etkilerini doğrudan karşılaması sebebiyle bağ kirişi kesme dayanımını önemli ölçüde iyileştirmektedir.
- Diyagonal eksenler doğrultusunda yerleştirilen donatıların açısı ve sargı donatılarının miktarı, boşluklu perde duvar rölatif ötelenme oranının artışında önemli rol oynamaktadır.
- Betonarme bağ kirişli deney elemanlarına nazaran tahterevalli tipi bağ kirişli deney elemanlarında perde duvar yüzeyinde oluşan çatlaklar belirli alanda sınırlı kalmıştır. Betonarme deney elemanlarında, uzunluk boyunca perde duvar düşey eksenini geçen çatlaklar, tahterevalli tipi bağ kirişli deney elemanlarında bu sınıra ulaşmamıştır. Tahterevalli tipi bağ kirişlerinin, enerji yutma ve sönüm kabiliyetlerinin yüksek olması, yarı-statik yüklemeler altında olsa bile perde duvar davranışını geliştirmiştir.
- Çelik kulakların ilk akması için sistem yerdeğiştirmesi, 7.65 mm olarak hesap edilmiştir. Fakat deneysel olarak sistem yerdeğiştirmeleri, TETOD ve prefabrik TETOD için sırasıyla 11.09 ve 10.75 mm olarak elde edilmiştir. TETOD ve prefabrik TETOD deney elemanlarının tam plastikleşme yerdeğiştirme değerleri ise 19.10 mm ve 19.46 mm olarak elde edilmiştir. Bu durum, tasarımı yapılan tahterevalli tipi bağ kirişlerinin enerji tüketiminde daha geç başlamasına sebep olmaktadır. Bu sebeple, tahterevalli tipi bağ kirişi tasarımlarında ilk akma yerdeğiştirmesi yerine tam plastikleşme yerdeğiştirme değerlerinin dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmıştır.

- Betonarme bağ kirişi diyagonal eksenleri doğrultusunda yapılan güçlendirmeler, sistemin süneklik oranlarını büyük oranda artırmaktadır. Tahterevalli tipi bağ kirişleri tam plastikleşme bölgesinden sonra büyük yerdeğiştirmelere maruz kalsa bile taşıma gücünü kaybetmemektedir. Çelik kulaklarda plastikleşme sınırının uygun olarak belirlenmesi durumunda, boşluklu perde duvar sisteminin sünek davranışı arzu edilebilir ölçüde geliştirilebilir.
- Betonarme bağ kirişlerinin tasarımında hesaplanan dayanım değerleri, deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerle kıyaslandığında oldukça düşük çıkmaktadır. Tahterevalli tipi bağ kirişlerinde akma yükü, plastikleşme dayanımı ve plastikleşme yerdeğiştirmesi sonrası her bir yerdeğiştirme adımına karşılık gelen dayanımların bilinmesi boşluklu perde duvar tasarımında tasarımcılara önemli bir kolaylık sağlamaktadır.
- Betonarme kiriş koluna sahip TETOD ve prefabrik çelik kiriş koluna sahip prefabrik TETOD deney elemanlarından alınan sonuçlar birbiriyle örtüşmektedir. Çelik kiriş kollarının perde duvarlara bağlantısında eğilme ve kesme etkileri dikkate alınarak uygun birleşim detayları ile tamamen prefabrik çıkartılabilir-takılabilir bağ kirişlerinin uygulanmasının mümkün olduğu görülmüştür.
- TETOD ve prefabrik TETOD deney elemanları, %2 yerdeğiştirme mertebelerinde sırasıyla %35.60 ve %32.30 viskoz sönüm değerlerine ulaşmıştır. EN 15129 (2010)'da önerilen  $\xi_{eq} > \%15$  şartı sağlanmaktadır. Betonarme ve prefabrik çelik kiriş kolları arasında yaklaşık %10 civarında sönüm farkı bulunmaktadır. Her iki birleşim detayı dikkate alındığında kesme kuvvelerinin çelik kulaklara doğrudan aktarılabilirdiği görülmektedir.
- Betonarme bağ kirişleri, maksimum %3 yerdeğiştirme mertebelerine kadar yük taşıyabilirken, tahterevalli tipi bağ kirişleri %7.5 yerdeğiştirme mertebelerine kadar kiriş kollarında ve çelik kulaklarda hasar oluşmadan giderek artan yük tesirlerini karşılayabilmişlerdir.
- Betonarme deney elemanlarının etkili rijitlikleri, donatı düzenine bağlı olarak değişmekte ve tasarım aşamasında tam olarak belirlenmemektedir Tahterevalli tipi bağ kirişlerinde ise çelik kulakların boyutlarına bağlı olarak arzu edilen etkili rijitlik değerlerini elde etmek mümkün olabilmektedir.
- Tahterevalli tipi bağ kirişleri, deney tamamlandıktan sonra, tüm parçaları perde duvar birleşimlerinde hasar olmaksızın kolay bir şekilde sökülebilmektedir. Gerçek

boşluklu perde duvar sisteminde arzu edilen çıkartılabilir-takılabilir olma özelliği, tahterevalli tipi bağ kirişlerinin enerji yutma ve sönüm kabiliyetlerinin yanında bağ kirişlerinin geliştirilmesinde önemli bir yenilik olarak öne çıkmaktadır.

Özet olarak, kesme etkili betonarme bağ kirişlerinin davranışlarının, donatıların yerleşimine bağlı olarak değiştiği ve bağ kirişlerinin betonarme perde duvarlara birleştiği bölgelerdeki mesnet momentlerinin ihmal edilebilir seviyede olmadığını göstermektedir. Ayrıca tasarım kolaylığı, yapısal davranışta öngörülebilirlik, yüksek enerji yutma kabiliyeti, yüksek süneklik, yüksek sönüm, etkin rijitlik ve etkin dayanıma ek olarak hasar sonrası kolay onarım ve değiştirilebilirlik açısından 'tahterevalli tipi bağ kirişlerinin' boşluklu perde duvar sistemlerinde uygulanabilir bir eleman olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında önerilen 'tahterevalli tipi bağ kirişlerinin' araştırılması için perde duvar başlıkları sadece tek bir deneye özel olarak kullanılmıştır. Perde duvar üzerindeki hasarlar sınırlı düzeyde kalsa bile perde duvarlardaki dayanım kaybı bilinmemektedir. Bu sebeple, ilerleyen çalışmalarda hem sönümleyicilerin perde duvar davranışı üzerindeki etkinliğinin ortaya konması hem de değiştirilebilirlik özelliğinin perde duvar davranışı açısından değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bağ kirişleri ile ilgili yapılan çalışmalarda döşeme etkileri dikkate alınmamaktadır. Özellikle sönümleyici tipi bağ kirişlerinin kullanılması durumunda döşemelerdeki hasarların hangi seviyelerde olacağı ve sönümleyici tipi bağ kirişlerinin performansını tam olarak yansıtmayacağı hususu araştırılabilir.

Boşluklu betonarme perde duvarlarda kat yüksekliğine bağlı olarak yerdeğiştirmeler de artmaktadır. Böylece, belirli kat sayısına kadar olan bağ kirişlerinde oluşabilecek hasarlar sınırlı kalmaktadır. Bağ kirişlerinin etkili kat seviyelerinin belirlenmesi, kullanılacak olan sönümleyici tipi bağ kirişlerinin sayısını da önemli ölçüde azaltacaktır. Bu sebeple, hem bağ kirişlerinin yüksek katlı boşluklu perde duvar sistemi içerisindeki performansının belirlenmesi hem de bağ kirişlerinin etkili olduğu etkin kat seviyelerinin belirlenmesi için deneysel sonuçlarla doğrulanmış sayısal modeller üzerinde çalışmalar yapılabilir.

Deneysel çalışmalar, yarı-statik yükleme deneyleri ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen elemanların üç boyutlu yapı sistemleri üzerinde, sarsma masası gibi titreşim etkileri altında incelenebilir.

## 5. KAYNAKLAR

- ACI 318-14, 2014. Building code requirements for structural concrete and commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Ahn, T., A., Kim, Y., Kim, S., D. ve Hwang, I., 2011. Seismic performance of coupling beam damper system, CTBUH 2011 World Conference, October, Seoul, Bildiriler kitabı:710-715.
- Ahn, T., Kim, Y. ve Kim, S., 2013. Large-Scale Testing of Coupled Shear Wall Structures with Damping Devices, Advances in Structural Engineering, 16, 11, 1943-1955.
- Aktan, A., E. ve Bertero, V., V., 1984. Conceptual seismic design of frame-wall structures, Journal of Structural Engineering, 110, 11, 2778-2797.
- Aktan, S. ve Kır aç, N., 2009. Betonarme Binalarda Perdelerin Davranışa Etkisi, Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University, 23, 1.
- ANSI/AISC 360-10, 2010. Specification for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago.
- Atımtay, E., 2009. Depremde  okmeyen Bina Nedir? Nasıl Projelendirilir?, Ankara, T rkiye.
- Barney, G., B., Shiu, K., N., Rabbat, B., G., Fiorato, A., E., Russel, H., G. ve Corley, W., G., 1980. Behaviour of coupling beams under load reversals, Research and Development Bulletin RD068.01B, Portland Cement Association, USA.
- Bay lke, N., 2004. Betonarme Perde Duvar Analitik Deneysel ve Deprem Davranışı, İnşaat M hendisleri Odası Seminerleri, Ankara.
- Bertero, V., V., Anderson, J., C., Krawinkler, H., Miranda, E. ve CUREE ve Kajima Araştırma Ekibi, 1991. Design Guidelines for Ductility and Drift Limits, Report No. UCB/EERC-91/15, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Brena, S., F. ve İhtiyar, O., 2011. Performance of Conventionally Reinforced Coupling Beams Subjected to Cycling Loading, Journal of Structural Engineering, 137, 6 665-676.
- Canbolat, B., A., Parra-Montesinos, G., J. ve Wight, J., K., 2005. Experimental study on seismic behavior of high-performance fiber-reinforced cement composite coupling beams, ACI Structural Journal, 102, 159-166.
- Celep, Z., 2013. Betonarme Yapılar, Beta Dağıtım, İstanbul.
- Chaallal, O., Gauthier, D. ve Malenfant, P., 1996. Classification Methodology for Coupled Shear Walls, Journal of Structural Engineering, 122, 12 1453-1458.

- Chen, Y. ve Lu, X., 2012. New Replaceable Coupling Beams for Shear Wall Structures, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 24-28 September, Lisbon.
- Chopra, A., K., 2007. Dynamics of Structure: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, Pearson/Prentice Hall.
- Christopoulos, C. ve Filiatrault, A., 2006. Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Çıtıptıoğlu, E., Yılmaz, Ç. ve Doğan, E., 1994. Delikli betonarme perde duvarların elastik analizi”, Yapı Mekaniği Semineri, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 175-187.
- Dalkılıç, S., 2013. İki Tabakalı Kompozit Olarak Düzenlenen Perdelerin Kayma Dayanımlarının Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Türkiye.
- DBYBHY, 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Demir, M., R., 2008. Boşluklu Perdelerin Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi.
- Demir, S. ve Hüsem, M., 2018. Saw Type Seismic Energy Dissipaters: development and cyclic loading test, Journal of Constructional Steel Research, 150, 264-276.
- Demir, S., 2018. Testere Tipi Sismik Enerji Sönümleyicilerin Tasarımı ve Çevrimsel Yük Etkisindeki Davranışlarının İncelenmesi, Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Eljadei, A., A., 2012. Performance Based Design of Coupled Wall Structures, Doctor of Philosophy, University of Pittsburgh.
- El-Tawil, S., Fortney, P., J., Harries, K., A., Shahrooz, B., M., Kurama, Y., Hassan, M. ve Tong, X., 2009. Recommendation for Seismic Design of Hybrid Coupled Wall Systems, ASCE/SEI.
- El-Tawil, S., Harries, K., A., Fortney, P., J., Shahrooz, B., M. ve Kurama, Y., 2010. Seismic Design of Hybrid Coupled Wall Systems: State of the Art, Journal of Structural Engineering, 136, 7, 755-769.
- EN 15129, 2010. Anti-seismic devices. European Committee for Standardization (CEN/TC 340), .
- Eren, F., E., 2010. Betonarme Perdelerde Kesme Kuvveti Dinamik Büyütme Katsayısının Doğrusal Olmayan Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi İle İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Farsi, A., Keshavarzi, F. Pouladi, P. ve Mirgharedi, R., 2016. Experimental study of a replaceable steel coupling beam with an end-plate connection, Journal of Constructional Steel Research, 122, 138-150.
- Federal Emergency Management Agency, 2007. Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, FEMA 461, Department of Homeland Security, Washington, USA.
- FEMA 306, 1998. Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings, Applied Technology Council, California.
- Fortney, P., J., 2005. The Next Generation of Coupling Beams, Doctor of Philosophy, University of Cincinnati, USA.
- Fortney, P., J., Rassati, G., A. ve Shahrooz, B., M., 2008. Investigation on Effect on Transverse Reinforcement on Performance of Diagonally Reinforced Coupling Beams, ACI Structural Journal, 781-788.
- Galano, L. ve Vignoli, A., 2000. Behavior of Short Coupling Beams with Different Reinforcement Layouts, ACI Structural Journal, 97, 6, 876-885.
- Gong, B., Shahrooz, B., M., 2001a. Concrete-steel Composite Coupling Beams. I: Component Testing, Journal of Structural Engineering, 127, 6, 625-631.
- Gong, B., Shahrooz, B., M., 2001.b. Concrete-Steel Composite Coupling Beams. II: Subassembly Testing and Design Verification, Journal of Structural Engineering, 127, 6, 632-638.
- Gray, M., G., 2012. Cast Yielding Brace System for Concentrically Braced Frames, Doctor of Philosophy, University of Toronto.
- Gray, M., G., Christopoulos, C. ve Packer, J., A., 2014. Cast Steel Yielding Brace System for Concentrically Braced Frames: Concept Development and Experimental Validations, Journal of Structural Engineering, 140, 04013095.
- Hajsadeghi, M., Zirakian, T., Keyhani, A., Naderi, R. ve Shahmohammadi, A., 2014. Energy dissipation characteristics of steel coupling beams with corrugated webs, Journal of Constructional Steel Research, 101, 124-132.
- Hajyalikhani, P., 2015. Experimental Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Coupling Beams and Rectangular Squat Walls with Innovative Reinforcement Configurations, Doctor of Philosophy, The University of Texas, Arlington.
- Han, S., W., Lee, C., S. ve Shin, M., 2015. Cyclic performance of precast coupling beams with bundled diagonal reinforcement, Engineering Structures, 93, 142-151.
- Harries, K., A., Cook, W., D., Rewood, R., G. ve Mitchell, D., 1993. Concrete walls coupled by ductile steel link beams, Earthquake Engineering, 3205-3210.



- Harries, K., A., 1995. Seismic Design and Retrofit of Coupled Walls Using Structural Steel, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering And Applied Mechanics, McGill University, Motreal, Canada.
- Harries, K., A., Gong, B., ve Shahrooz, B., M., 2000. Behaviour and Design of Reinforced Concrete, Steel and Steel-Concrete Coupling Beams, Earthquake Spectra, 16, 4, 775-799.
- Harries, K., A., 2001. Ductility and Deformability of Coupling Beams in Reinforced Concrete Coupled Walls, Earthquake Spectra, 3, 17 457-478.
- Hasgür, Z. ve Gündüz, N., 1996. Betonarme Yüksek Binalar, Beta A.Ş., İstanbul, Türkiye.
- Hassan, M., 2004. Inelastic dynamic behavior and design of hybrid coupled wall systems, Doctor of Philosophy, University of Central Florida.
- Igarashi, H., Izumita, S., Takeuchi, M., Arai, M., Fujisawa, M. ve Murakami, H., 1992. Deformation capacity of reinforced concrete beams used height strength concrete and reinforcement, Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Madrid.
- Ireland, M., G., Pampanin, S. ve Bull, D., K., 2006. Concept and Implementation of a Selective Weakening Approach for the Seismic Retrofit of R.C. Buildings, New Zealand Society for Earthquake Engineering Annual Technical Conference, 10-12 Mart, New Zealand.
- Kim, H., J., Choi, K., S., Oh., S., H. ve Kang, C., H., 2012. Comparative study on seismic performance of conventional RC coupling beams and hybrid energy dissipative coupling beams used for RC shear walls, 15TH World Conference on Earthquake Engineering, September, Bildiriler kitabı, 13335-13343.
- Kuang, J., S. ve Baczowski, B., J., 2006. Shear Capacity of Steel Fibre Reinforced Concrete Coupling Beams, Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering, June, Montreal, Canada.
- Kurama, Y., C. ve Shen Q., 2008. Seismic Design and Response Evaluation of Unbounded Post-Tensioned Hybrid Coupled Wall Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 37, 1677-1702.
- Kwan, A., K., H. ve Zhao Z., Z., 2002. Cyclic behaviour of deep reinforced concrete coupling beams, Structures and Buildings, 152, 3, 283-293.
- Kwan, A., K., H. ve Zhao Z., Z., 2002. Testing of coupling beams with equal end rotations maintained and local joint deformation allowed, Structures and Buildings, 152, 1, 67-78.
- Lam, W., Su, R., K. ve Pam, H., 2005. Experimental Study on Embedded Steel Plate Composite Coupling Beams, Journal of Structural Engineering, 131, 1294-1302.

- Lehman, D., Turgeon, J., A., Birely, A., C., Hart, C., R., Marley, K., P., Kuchma, D., A. ve Lowes, L., N., 2013. Seismic behavior of modern concrete coupled wall. *Journal of Structural Engineering*, 139, 1371-1381.
- Lequesne, R., D., 2011. Behaviour and Design of High Performance Fiber-Reinforced Concrete Coupling Beams and Coupled-Wall Systems, Doctor of Philosophy, University of Michigan, USA.
- Mertol, A. ve Mertol, H., C., 2002. Deprem Mühendisliği Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Kozan Ofset, Ankara.
- Montgomery, M., 2011. Fork Configuration Dampers for Enhanced Dynamic Performance of High-Rise Buildings, Doctor of Philosophy, University of Toronto.
- Motter, C., J., Wallace, J., W., Klemencic, R., Hooper, J., D. ve Fields, D., C., 2012. Large-Scale Testing and Analysis of Concrete Encased Steel Coupling Beams under High Ductility Demands, The 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portekiz.
- Naish, D., A., B., 2010. Testing and Modeling of Reinforced Concrete Coupling Beams, Doctor of Philosophy, University of California, Los Angeles, USA.
- Oh, S., H., Choi, K., Y., Kim, H. ve Kang, C., H., 2012. Experimental Validation on Dynamic Response of RC Shear Wall Systems Coupled with Hybrid Energy Dissipative Devices, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 24-28 September, Lisbon.
- Park, W., S. ve Yun, H., D., 2005. Seismic Behaviour of Steel Coupling Beams Linking Reinforced Concrete Shear Walls, *Engineering Structures*, 27, 1024-1039.
- Paulay, T., 1969. The Coupling of Reinforced Concrete Shear Walls, Proceedings, Fourth World Conference on Earthquake Engineering, 75-90.
- Paulay, T., 1970. An Elasto-Plastic Analysis of Coupled Shear Walls, *ACI Journal*, 67, 11, 915-922.
- Paulay, T., 1971. Coupling Beams of Reinforced Concrete Shear Walls, *Journal of the Structural Division*, ASCE, 97, 3 843-862.
- Paulay, T. ve Binney, J., R., 1974. Diagonally Reinforced Coupling Beams of Shear Walls, International Concrete Abstracts Portal, ACI, 42, 579-598.
- Paulay, T. ve Taylor R., G., 1981. Slab Coupling of Earthquake-Resisting Shear Walls, *ACI Journal*, 130-140.
- Paulay, T., 1986. The Design of Ductile Reinforced Concrete Structural Walls for Earthquake Resistance, *Earthquake Spectra*, 2, 4, 783-823.
- Saatcioglu, M., Derecho, A., T., Corley, W., G. ve Scanlon, A., 1981. Coupled walls in earthquake-resistant building: Parametric investigation and design procedure,

Report to the National Science Foundation, Construction Technology Laboratories, Portland Cement Association, Skokie, .

- Saatçioğlu, M., Derecho, A., T. ve Corley, W., G., 1987. Parametric Study of Earthquake-Resistant Coupled Walls, Journal of Structural Engineering, 113, 1 141-157.
- Santhakumar, A., R., 1974. Ductility of Coupled Shear Walls, Ph. D. Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, .
- Sesli, H., Coşđun, S., İ. ve Hüsem, M., 2016. A Numerical Investigation of Cyclic Behavior of Coupled Wall Systems, ICENS 2<sup>nd</sup> International Conference on Engineering and Natural Science, 24-28 May, Sarajevo, Bosnia- Herzegovina.
- Shahrooz, B., M., Remmetter, M., E. ve Qin, F., 1993. Seismic Design and Performance of Composite Coupled Walls, ASCE Journal of the Structural Division, 11, 119, 2858-2896.
- Su, R., K., L. ve Zhu, Y., 2005. Experimental and Numerical Studies of External Steel Plate Strengthened Reinforced Concrete Cupling Beams, Engineering Structures, 27, 1537-1550.
- Su, R., K., L., Lam, W., Y. ve Pam, H., J., 2007. Experimental Study of Plate-Reinforced Composite Deep Coupling Beams, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 18, 235-257.
- Subedi, N., K., Vardy, A., E. ve Kubota, N., 1986. Reinforced concrete deep beams-some test results, Magazine of Concrete Research, ICE Virtual Library, 38, 137, 206-219.
- Subedi, N., K., 1988. Reinforced concrete deep beams: A method of analysis, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, ICE, 87, 2, 1-30.
- Subedi, N., K., 1989. Reinforced Concrete Beams with Plate Reinforcement for Shear, Proceedings-Institution of Civil Engineers, 87, 2, 377-399.
- Subedi, N., K., 1991. RC-Coupled Shear Wall Structures I: Analysis of Coupling Beams, Journal of Structural Engineering, 117, 3, 667-680.
- Subedi, N., K., 1991. RC-Coupled Shear Wall Structures II: Ultimate Strength Calculations, Journal of Structural Engineering, 117, 3, 681-698.
- Suen, P., C., 2012. Steel-Plate Encased Concrete Coupling Beams, Ph. D. Thesis, The Hong Kong University, Hong Kong.
- Tassios, T., P., Moretti, M. ve Bezas, A., 1996. The Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Coupling Beams of Shear Walls”, ACI Structural Journal, 93, 6, 711-719.
- TDBY, 2018. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Türkiye.

- Thomsen, H. ve Wallace, J., W., 2004. Displacement-Based Design of Slender Reinforced Concrete Structural Walls-Experimental Verification, Journal of Structural Engineering, 130, 4, 618-630.
- Tsai, K., C., Chen, H., W., Hong, C., P., ve Su, Y., F.. 1993. Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction, Earthquake Spectra, 9, 505-528.
- Wallace, J., W. ve Moehle, J., P., 1992. Ductility and detailing requirements of bearing Wall buildings, Journal of Structural Engineering, 121, 1 75-87.
- Wallace, J., W., Massone, L., M., Bonelli, P., Dragovich, J., Lagos, R., Lüders, C. ve Moehle, J., 2012. Damage and Implications for Seismic Design of RC Structural Wall Buildings, Earthquake Spectra, 28, S1, 281-299.
- Whittaker, A., Bertero, V., Thompson, C. ve Alonso, J.. 1991. Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices, Earthquake Spectra, 7, 563-604.
- Wu, C., X., Zhou, Y., Tong, J., G., Han, J., J., 2012. Study on the seismic performance of X-added damping and stiffness energy dissipation device, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 24-28 September, Lisbon.
- Zhang, G., Zhao, Z., Z. ve Qian, J., R., 2008. Seismic Performance and Shear Resisting Capacity of Steel Plate Reinforced Concrete Coupling Beams, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Ocaik, Beijing, China.

## ÖZGEÇMİŞ

**Hasan SESLİ**, 1988 yılında Artvin iline bağlı Arhavi ilçesinde doğdu. İlköğretimi, 1994-1998 yılları arasında Fatih Sultan Mehmet İlköğretim Okulu'nda devam ettikten sonra 1998-2002 yılları arasında Atatürk İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Ortaöğretimi ise, 2002-2005 yılları arasında Arhavi Lisesi'nde okul dördüncüsü olarak tamamladı. Mezun olduğu yıl girdiği Öğrenci Seçme Sınavı'nda gösterdiği başarı neticesinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimi almaya hak kazandı. 2005-2006 yılları arasında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde İngilizce hazırlık eğitimi aldı. Lisans eğitimini 2010 yılında bölüm birincisi olarak tamamladı ve aynı yıl içerisinde Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. Daha sonra, Şubat 2011'de Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atandı. 2013 yılında 'Zemin Sınır Şartlarının Yapı-Zemin Etkileşim Sistemlerinin Dinamik Davranışına Etkisi' başlıklı yüksek lisans tezini tamamladı. Aynı yıl doktora eğitimine başladı ve TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Programı tarafından 2211/A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında burs ile ödüllendirildi. Evli ve 1 çocuk babası olan SESLİ, İngilizce bilmekte ve halen Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda görevine devam etmektedir.