

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PREKAST BETONARME YAPI ELEMANLARI İÇİN MOMENT AKTARAN
CIVATALI BİRLEŞİM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Mehmet ŞENTÜRK

**HAZİRAN 2020
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PREKAST BETONARME YAPI ELEMANLARI İÇİN MOMENT AKTARAN
CIVATALI BİRLEŞİM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

İnş. Yük. Müh. Mehmet ŞENTÜRK

ORCID : 0000 – 0001 – 6469 – 6383

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27/02/2020

Tezin Savunma Tarih : 17/06/2020

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Selim PUL

ORCID : 0000 – 0001 – 6469 – 6383

İkinci Danışman : Prof. Dr. Alper İLKİ

Trabzon 2020

ÖNSÖZ

Meslek hayatıma başladıktan sonra lisansüstü düzeyde eğitim almaya karar vermemdeki en büyük etkiye sahip olan ve sonra yüksek lisans danışmanım ve doktora eş danışmanım olarak hayatımda büyük bir öneme sahip olan Prof. Dr. Alper İLKİ'ye ve doktora eğitimim sırasında mesleki bilgisi ve tecrübesiyle eğitimime desteğini ve zamanını veren ve Prof. Dr. Selim PUL'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, meslek hayatıma bilgileriyle ışık tutan tüm hocalarım, tecrübeleriyle yol gösteren büyüklerim ve mesai arkadaşlarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Şevkli lisans öğrencilerimizin katkılarıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmaların büyük önem arz ettiği bu çalışmaya emek veren bütün arkadaşlarıma sağladıkları samimi ve nitelikli iş gücünden dolayı ayrı ayrı teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde yer alan hocalarım sayın Prof. Dr. Genççağa PÜRÇEK ve üzerimde lisans öğretimimden beri emeği bulunan Prof. Dr. Metin HÜSEM'e yaptıkları rehberlikten dolayı teşekkür ederim. Ayrıca, doktora tez jüriliği görevini kabul eden pek kıymetli hocalarım Prof. Dr. Şevket ÖZDEN ve Doç. Dr. Ufuk YAZGAN'a teşekkür ederim.

Doktora çalışması kapsamında, özellikle deneysel, çalışmaların yapılmasına maddi olanak sağlayan, proje desteği sağlayan TÜBİTAK'a, tez çalışması kapsamında geliştirilen ve kabul edilen patent ve faydalı modelin başvurusunda yardımlarını esirgemeyen KTÜ Teknoloji Transfer Ofisi'ne teşekkür ederim. Doktora tez çalışmam kapsamında bana yurtdışı araştırma olanağı sunan "Yüksek Öğrenim Kurumu (YÖK)"e ve görevlendirmemi gerçekleştiren KTÜ Rektörlüğü'ne minnetlerimi sunuyorum.

Doktora eğitimim kapsamında Sheffield Üniversitesi'nde araştırmalar gerçekleştirmem maksadıyla davet eden Dr. Iman HAJIRASOULIHA'ya ve bu süreçteki gelişimim için bana sağladığı imkanlar ve akıl hocalığı için Prof. Dr. Kypros PILAKOUTAS'a teşekkür ederim.

Son olarak, annem, babam, eşim ve eşimin ailesi başta olmak üzere, ailem ve tüm dostlarıma bugünlere erişmem için bana verdikleri desteklerden dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Mehmet ŞENTÜRK

Trabzon, 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum ‘‘Prekast Betonarme Yapı Elemanları İçin Moment Aktaran Cıvatalı Birleşim Sistemi Geliştirilmesi’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanlarım Prof. Dr. Selim PUL ve Prof. Dr. Alper İLKİ'nin 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. 17/06/2020

Mehmet şENTÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
TABLolar DİZİNİ	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Prekast Birleşimler	4
1.2.1. Islak Birleşimler	4
1.2.2. Kuru birleşimler	5
1.3. Konu ile İlgili Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar	6
1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	21
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	25
2.1. Deneysel Çalışmalar.....	25
2.1.1. Ön Çalışma Detayları ve Elde Edilen Bulgular	26
2.1.2. Malzeme Detayları	30
2.1.2.1. Perçin Başlı Donatı Üretimi	30

2.1.2.2.	Donatı	34
2.1.2.3.	Beton	34
2.1.2.4.	Cıvata ve Somunlar	36
2.1.2.5.	Levhalar.....	38
2.1.3.	Temel – Kolon Birleşimi Numuneleri ve Deney Düzeneği	38
2.1.3.1.	Deney Numuneleri Detayları	38
2.1.3.2.	Deney Düzeneği Detayları	46
2.1.4.	Kolon – Kiriş Birleşimi Numuneleri ve Deney Düzeneği	51
2.1.4.1.	Deney Numuneleri detayları	51
2.1.4.2.	Deney Düzeneği Detayları	56
2.1.5.	Kiriş – Kiriş Birleşimi Numuneleri ve Deney Düzeneği	59
2.1.5.1.	Deney Numuneleri Detayları	59
2.1.5.2.	Deney Düzeneği Detayları	64
2.2.	Analitik Çalışmalar	67
2.2.1.	Malzeme Modellenmesi	68
2.2.1.1.	Beton	68
2.2.1.2.	Donatı Çeliği	73
2.2.1.3.	Birleşim Levhası Çeliği.....	74
2.2.2.	Analiz Modeli Yaklaşımı	75
2.2.2.1.	Temel – Kolon Numunesi Analiz Modeli	75
2.2.2.2.	Kolon – Kiriş Numunesi Analiz Modeli	78
2.2.2.3.	Kiriş – Kiriş Numunesi Analiz Modeli	80

3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	82
3.1.	Deney Sonuçları	82
3.1.1.	Temel – Kolon Birleşimi Deney Sonuçları	85
3.1.1.1.	Kuvvetli Eksen Temel – Kolon Deney Numuneleri	85
3.1.1.1.1.	Monolitik Numune	85
3.1.1.1.2.	Prekast Numune	91
3.1.1.2.	Zayıf Eksen Temel – Kolon Deney Numuneleri.....	96
3.1.1.2.1.	Monolitik Numune	96
3.1.1.2.2.	Prekast Numune	101
3.1.1.3.	Temel – Kolon Birleşimi Numuneleri Karşılaştırılması	106
3.1.2.	Kolon – Kiriş Birleşimi Deney Sonuçları	114
3.1.2.1.	Kiriş Boyu 1.0 m olan Kolon – Kiriş Numuneleri	115
3.1.2.1.1.	Monolitik Numune	115
3.1.2.1.2.	Prekast Numune	120
3.1.2.2.	Kiriş Boyu 2.0 m olan Kolon – Kiriş Numuneleri	124
3.1.2.2.1.	Monolitik Numune	124
3.1.2.2.2.	Prekast Numune	128
3.1.2.3.	Kolon – Kiriş Birleşimi Numuneleri Karşılaştırılması	133
3.1.3.	Kiriş – Kiriş Birleşimi Deney Sonuçları	140
3.1.3.1.	Açıklığı 2.0 m Olan Kiriş – Kiriş Birleşim Numuneleri	141
3.1.3.1.1.	Monolitik Numune	141
3.1.3.1.2.	Prekast Numune	143
3.1.3.2.	Açıklığı 4.0 m Olan Kiriş – Kiriş Birleşim Numuneleri	144

3.1.3.2.1. Monolitik Numune	144
3.1.3.2.2. Prekast Numune	145
3.1.3.3. Kiriş – Kiriş Birleşimi Numuneleri Karşılaştırılması	146
3.2. Analiz Sonuçları.....	149
3.2.1. Temel – Kolon Birleşim Numunesi Analiz Sonuçları	149
3.2.1. Kolon – Kiriş Birleşim Numunesi Analiz Sonuçları.....	152
3.2.2. Kiriş – Kiriş Birleşim Numunesi Analiz Sonuçları.....	154
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	156
5. KAYNAKLAR.....	159
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

PREKAST BETONARME YAPI ELEMANLARI İÇİN MOMENT AKTARAN
CIVATALI BİRLEŞİM SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Mehmet ŞENTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selim PUL

Eş Danışman: Prof. Dr. Alper İLKİ (İstanbul Teknik Üniversitesi)
2020, 161 sayfa

Bilindiği gibi, betonarme yapılar monolitik (yekpare) ya da prekast olarak inşa edilmektedirler. Monolitik betonarme yapıların taşıyıcı sistemin sürekli oluşu, dolayısıyla yapı elemanları arasındaki iç kuvvetlerin aktarımının mümkün olması gibi üstünlüklere karşın; uzun inşa süresi, malzeme ve işçilik kalitesinin denetim zorluğu, sökülemez oluşu gibi sakıncaları bulunmaktadır. Moment aktaran birleşimlere sahip prekast yapılar ise kuru ve ıslak birleşim tekniği ile inşa edilmektedir. Islak birleşimli prekast yapıların sökülmeleri mümkün değilken, kuru birleşimli prekast yapılar sökülebilirler. Günümüzde kuru birleşimli prekast yapıların birleşim sistemleri genellikle karmaşık geometrilere sahip olduğundan inşası zordur ve özel işçilikler (art germe, yerinde kaynaklama vb.) gerektirebilirler. Karmaşık geometri sebebiyle tasarımın da özel beceri gerektirdiği açıktır. Bunlara bağlı olarak, bu çalışmada basit bir geometriye sahip, montajı kolay ve yapısal davranışı monolitik yapının gibi olan bir “moment aktaran prekast birleşim sistemi” geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu birleşim sisteminin yenilikçi yönü, monolitik ve prekast yapıların tüm üstünlüklerine aynı anda sahip ancak, sakıncalarını barındırmayan prekast yapıların inşa edilmesine olanak sağlamasıdır. Böylece ön üretilmiş, yerinde monte edilebilen, monolitik yapılar kadar sünek, malzeme ve işçilik kalitesi yüksek, hasar görmesi halinde kolayca sökülüp yenisiyle değiştirilebilen, yapısal analizi monolitik yapılara benzer şekilde yapılabilen yeni ve pratik bir yöntem geliştirilmiştir.

Çalışmada, temel-kolon, kolon-kiriş, kiriş-kiriş birleşimleri için önerilen birleşim sistemleri deneysel ve analitik olarak incelenerek yapısal davranışlarının monolitik birleşimler ile olan benzerlikleri ortaya konulmuştur. Çalışma sonucunda, önerilen prekast birleşim sisteminin her üç birleşim tipi için de monolitik birleşimlerle rijitlik, dayanım ve süneklik açısından çok benzer davranış gösterdiği belirlenmiştir. Gelecekte hem eleman bazında hem de sistem bazında yapılacak deneysel ve analitik çalışmalar ile birleşim sisteminin optimize edilmesi ve uygulamada kullanıma sunulabilmesi mümkün görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Prekast yapı, monolitik betonarme, moment aktaran civatalı birleşim, tersinir tekrarlı yarı-statik deney, depreme dayanıklı yapı tasarımı

PhD Thesis

SUMMARY

DEVELOPING A BOLTED MOMENT CONNECTION SYSTEM FOR PRECAST
REINFORCED CONCRETE MEMBERS

Mehmet ŞENTÜRK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Programme
Supervisor: Prof. Dr. Selim PUL
Co-supervisor: Prof. Dr. Alper İLKİ (Istanbul Technical University)
2020, 161 Pages

As is known, reinforced concrete structures are built as cast-in-place or precast. Due to the monolithic form of cast-in-place structures, transferring internal forces can be easily transferred among structural members. However, they have disadvantages such as long construction duration, quality problem of material or labour and not being demountable. Precast structures are built by using two different way called dry connection (not demountable) and wet connections(demountable). At present, dry precast connection systems have complex geometries. Therefore, it is difficult to construct and they may require special workmanship (post-tensioning, welding). And the complex geometry leads complex structural behaviour. Thus, special design skills are needed. Accordingly, in this study, it is aimed to develop a precast connection system that has a simple geometry, which is easy to assemble and has a monolithic-like structural behaviour.

The innovative aspect of the proposed connection system is that it allows the construction of precast structures that have all the advantages of monolithic and precast structures at the same time. Thus, a new construction technique will be created. By using this technique; prefabricated, demountable structures can be built. Also, these structures can be as ductile as monolithic ones and members of this structures can be easily replaced when it is damaged. And they can be designed using monolithic design procedures. In the study, the proposed connection systems for foundation-column, column-beam, beam-beam connections were examined experimentally and analytically, and similarities of structural behaviour with monolithic connections were exhibited.

As a result of the study, it was determined that the proposed precast connection system exhibited very similar behaviour to monolithic connections with respect to rigidity, strength and ductility in all three connection types. With future experimental and analytical studies, it seems that it is possible to optimize the connections and initiate the application of this concept in construction industry.

Keywords: Precast structures, bolted moment connection, quasi-static test, seismic design, monolithic reinforced concrete, bolted moment connection, reversed cyclic quasi-static test

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. Mevcut güçlendirme ve onarım yöntemleri	1
Şekil 2. Sanayi tipi bir prekast yapı örneği	3
Şekil 3. Prekast ıslak birleşim detayı (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği- 2018).....	5
Şekil 4. Prekast elemanlar için kuru birleşim detayları; (a) Ardgermeli, (b) Kesit kaybı oluşan bulonlu birleşim (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018).....	6
Şekil 5. French vd. (1989) tarafından sunulan ilave çelik elemanları olan bulonlu bağlantı.....	6
Şekil 6. Cheok ve Lew (1991) tarafından sunulan birleşim tipi; (a) Monolitik birleşim, (b) Ardgermeli birleşim.....	7
Şekil 7. Cheok ve Stone (1994) tarafından sunulan prekast kolon – kiriş için hibrit birleşim	7
Şekil 8. Englekirk (1995) tarafından sunulan birleşim tipi; (a) Kolon – kiriş birleşim detayı, (b) Kolona ilave edilen sünek ankraj çubuk detayı	8
Şekil 9. Englekirk (1996) tarafından sunulan prekast birleşim	9
Şekil 10. Cheok vd. (1998) tarafından yapılan çalışmada karşılaştırmalı kat yer değiştirmeleri.....	9
Şekil 11. Alcocer vd. (2002) tarafından sunulan ıslak birleşim detayı	10
Şekil 12. Korkmaz ve Tankut (2005) tarafından yapılan birleşim sistemi detayı.....	11
Şekil 13. Ertaş vd. Prekast kolon – kiriş bağlantı çeşitleri; (a), (b), (c) Islak birleşimler; (d) Bulonlu	11
Şekil 14. Özden ve Ertaş (2007) çalışmasında sunulan yumuşak çelik donatı içeren ardgermeli hibrit birleşim sistemi detayları ve deney sonuçları	12
Şekil 15. Li vd. (2009) çalışmasında sunulan tipik prekast bağlantı detayı.....	13
Şekil 16. Metelli vd. (2011) tarafından sunulan birleşim tipi	14

Şekil 17. Vidjeapriya ve Jaya (2013); (a)Tek berkitme birleşimi, (b)Çift berkitme birleşimi	15
Şekil 18. Choi vd. (2013) çalışmasında sunulan çelik levhalı birleşim sistemi	15
Şekil 19. Ong vd. (2013) tarafından sunulan birleşim	16
Şekil 20. Parastesh vd. (2014) tarafından sunulan prekast kolon – kiriş birleşimi için kalıp ve kaynak işçiliği gerektirmeyen ıslak birleşim sistemi.....	17
Şekil 21. Yüksel vd. (2015); (a) Sanayi tipi yapılar için ıslak birleşim, (b) Konut tipi yapılar için ıslak birleşim, (c) Sanayi tipi yapı birleşimi deney sonuçları, (d) Konut tipi yapı birleşimi deney sonuçları	18
Şekil 22. Dal Lago vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada önerilen birleşim tipleri	19
Şekil 23. Xiao vd. (2016) çalışmasında sunulan ıslak birleşim detayı.....	20
Şekil 24. (a) Birleşim detayı, (b) deney numunesi birleşim bölgesi görünüşü	20
Şekil 25. Nzabonimpa ve Hong (2019) tarafından yapılan çalışmada önerilen birleşim.....	21
Şekil 26. Çalışma kapsamında incelenen birleşim tipleri	22
Şekil 27. Kolon yüzü levhası.....	27
Şekil 28. FEMA-461 (2007) yükleme protokolü	27
Şekil 29. Kolon-Kiriş birleşimi deney düzeneği	28
Şekil 30. Deney sonrası numune görünüşleri.....	28
Şekil 31. Kolon-kiriş birleşimi karşılaştırmalı deney sonuçları.....	29
Şekil 32. Deney sonra kiriş uç levhası görünüşü	29
Şekil 33. Birleşim levhaları ara yüzeyindeki denge durumu	30
Şekil 34. (a) Perçin başlı donatılar,(b) levha üzerindeki perçin başlı donatıya uygun delikler.....	30
Şekil 35. Perçin başlı donatı üretimi için tasarlanıp imal edilen hidrolik yükleme aparatı.....	31
Şekil 36. Nervürlü donatının aparata yerleştirilip sabitlenmesi	32
Şekil 37. Donatı ucunun ısıtılmasını takiben hidrolik güçle kalıba itilmesi	32

Şekil 38. Ucu perçin başı şekline getirilen nervürlü donatı	33
Şekil 39. Perçin başlı donatıya çekme deneyi uygulanışı ver donatının kopma şekli.....	33
Şekil 40. Çelik çekme deney sonuçları	34
Şekil 41. Monolitik ve prekast elemanların kür sırasındaki genel görünümü.....	35
Şekil 42. (a) Cıvata-Somun birlikte çekme aparatı ve (b) Cıvata çekme deneyi	36
Şekil 43. (a) Normal somunla deneyi (b) Yüksek dayanımlı somun deneyi.....	37
Şekil 44. Prekast eleman birleşim levhaları	38
Şekil 45. Temel – kolon birleşimi deney numunesi detayları (monolitik numune, ölçüler: cm).....	40
Şekil 46. Temel – kolon birleşimi deney numunesi donatı iskeleti (monolitik numuneler) ...	41
Şekil 47. Temel – kolon birleşim levhaları (Ölçüler: mm)	42
Şekil 48. Temel – kolon birleşim levhalarının görünümü.....	42
Şekil 49. Temel yüzü levhası için ankraj çubukları	43
Şekil 50. Ankraj ve cıvata bağlantı detayları	44
Şekil 51. Prekast elemanların birleşiminde kullanılan tork anahtarı.....	44
Şekil 52. Prekast numune parçaları birleştirilmeden önce: (a) Temeller, (b) Kolonlar	45
Şekil 53. Deney numuneleri görünüşleri; (a) monolitik numuneler, (b) prekast numuneler ...	46
Şekil 54. Temel – kolon birleşimi deney düzeneği	47
Şekil 55. Deney düzeneğinin yandan görünüşü ve LPDT yerleşimi şeması.....	48
Şekil 56. Donatı üzerine birim şekil değiştirme ölçerlerin (strain-gauge) yapıştırılması	49
Şekil 57. Kullanılan 5 mm boyunda birim şekil değiştirme ölçerler	49
Şekil 58. Kolondaki birim şekil değiştirme ölçerler ve yer değiştirme ölçerlerin yerleşim detayı	50
Şekil 59. Kolon – kiriş birleşimi deney numunesi detayları (1.0 m kirişli monolitik numune)	52

Şekil 60. Kolon – kiriş birleşimi deney numunesi donatı iskeleti.....	52
Şekil 61. Kolon – kiriş birleşim levhalarının detayları	53
Şekil 62. Kolon – kiriş birleşim levhalarının görünümü.....	54
Şekil 63. Kolon yüzü levhası için ankraj çubukları	54
Şekil 64. Prekast kolon ve kiriş numune parçaları birleştirilmeden önce	55
Şekil 65. Deney numuneleri görüşleri; (a) monolitik numuneler, (b) prekast numuneler ...	56
Şekil 66. Kolon-kiriş birleşimi deney düzeneği	57
Şekil 67. Deney düzeneği yandan görüşü ve LPDT yerleşimi şeması.....	58
Şekil 68. Kirişte birim şekil değiştirme ölçerler ve yer değiştirme ölçerlerin yerleşim detayı	58
Şekil 69. Açıklığı 2.0 m olan monolitik kiriş numunesi detayları	60
Şekil 70. Kiriş-kiriş birleşimi deney numunesi (a) donatı iskeleti (b) ek mesnet levhaları	60
Şekil 71. Kiriş – kiriş birleşim levhalarının detayı ve imalat sonrası görüşü.....	61
Şekil 72. Kiriş – kiriş birleşim detayı.....	62
Şekil 73. Kiriş – kiriş birleşimi numuneleri üretim sonrası görüşleri	62
Şekil 74. Kiriş – kiriş numuneleri birleştirilmeden önceki levha görüşleri	63
Şekil 75. Kiriş – kiriş numuneleri birleştirilme esnasında cıvataların torklanması (sıkılması) işlemi	63
Şekil 76. Kiriş – kiriş birleşim deney düzeneği 3 boyutlu çizimi (L=4.0 m uzun kirişler için)	64
Şekil 77. Kiriş – kiriş birleşim deney düzeneği 3 boyutlu çizimi (kısa kirişler için).....	65
Şekil 78. Monolitik numuneler için kullanılan birim şekil değiştirme ölçerlerin yerleri.....	66
Şekil 79. Prekast numuneler için kullanılan birim şekil değiştirme ölçerlerin yerleri.....	67
Şekil 80. Krätzig ve Pölling yaklaşımına göre betonun basınç altındaki davranışı	68
Şekil 81. Hesaplarda kullanılan b parametresi	70

Şekil 82. Krätzig ve Pölling yaklaşımına göre betonun çekme altındaki davranışı.....	71
Şekil 83. Geliştirilen beton malzeme modelinin basınç etkisi altındaki davranışı.....	72
Şekil 84. Geliştirilen beton malzeme modelinin çekme etkisi altındaki davranışı	72
Şekil 85. Donatı malzeme modeli ile yapılan donatı çekme analizi sonucu	74
Şekil 86. Monolitik temel-kolon birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünüşü; (b) Boyuna ve enine donatılar: (c) Donatı detayları (yakın görünüş)	76
Şekil 87. Prekast temel-kolon birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünümü; (b) Boyuna ve enine donatılar ve kolon uç levhası: (c) Boyuna donatı ile kolon uç levhası bağlantısı; (d) Kolon uç levhası; (e) Levhaların birbiri ile bağlantısı	77
Şekil 88. Monolitik kolon-kiriş birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünüşü ve etriye detayı; (b) Boyuna ve enine donatılar.....	78
Şekil 89. Prekast kolon-kiriş birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünümü; (b) Boyuna ve enine donatılar ve kiriş uç levhası: (c) Boyuna donatı ile kiriş uç levhası bağlantısı; (d) Kiriş uç levhası; (e) Levhaların birbiri ile bağlantısı.....	79
Şekil 90. Monolitik kiriş-kiriş birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünüşü ve etriye detayı; (b) Boyuna ve enine donatılar	80
Şekil 91. Prekast kiriş-kiriş birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünümü; (b) Boyuna ve enine donatılar ve kiriş uç levhası: (c) Boyuna donatı ile kiriş uç levhası bağlantısı; (d) Kiriş uç levhası; (e) Levhaların birbiri ile bağlantısı.....	81
Şekil 93. Çevrimsel yüklemde her bir çevrimde yutulan enerji hesabı	83
Şekil 94. Çevrimsel yüklemde yutulan enerjinin MATLAB ile hesabından bazı adımlar.....	83
Şekil 95. ASCE/SEI 41-17 yaklaşımına göre eğrilerin idealizasyonu	84
Şekil 96. Eğrilerinin idealizasyonu için geliştirilen yazılımın çıktı örneği.....	84
Şekil 97. Temel – kolon numuneleri için belirlenen yükleme protokolü (FEMA-461).....	85
Şekil 98. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney öncesi görünüşü.....	86
Şekil 99. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney sonucu.....	88

Şekil 100. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesinin deneyin son adımındaki görünüşü (%8 görelî ötelenme oranı).....	89
Şekil 101. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney sonrası görünüşleri.....	90
Şekil 102. Prekast kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney öncesi görünüşü .	91
Şekil 159. Açıklığı 4.0 m olan prekast kiriş – kiriş birleşim numunesi deney sonucu	145



TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 1. Beton karışım detayları	35
Tablo 2. Beton basınç dayanımları.....	36
Tablo 3. Cıvata çekme deneyi sonuçları.....	37
Tablo 4. Temel – kolon birleşimi için deney matrisi.....	39
Tablo 5. Kolon – kiriş deney numuneleri için deney detayları	51
Tablo 6. Kiriş – kiriş birleşim deney numuneleri detayları.....	59
Tablo 7. ABAQUS CDP malzeme modeli parametreleri.....	73
Tablo 8. Donatı çeliği malzeme parametreleri	74
Tablo 9. S235 çeliği malzeme parametreleri.....	74
Tablo 10. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon numunesi deneyde yapılan gözlemler	87
Tablo 11. Prekast kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deneyindeki gözlemler.....	92
Tablo 12. Monolitik zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesi deneyindeki gözlemler.....	97
Tablo 13. Prekast zayıf eksen temel – kolon birleşim deneyinde yapılan gözlemler.....	102
Tablo 14. FEMA356-2000 yönetmeliğine göre deprem performansı	112
Tablo 15. Temel-kolon numuneleri için hesaplanan yapısal parametreler.....	114
Tablo 16. Kiriş boyu 1.0 m olan monolitik kolon – kiriş numunesi deneyindeki gözlemler	117
Tablo 17. Kiriş boyu 1.0 m olan prekast kolon – kiriş numunesi deneyindeki gözlemler	121
Tablo 18. Kiriş boyu 2.0 m olan monolitik kolon – kiriş numunesi deneyindeki gözlemler	125
Tablo 19. Kiriş boyu 2.0 m olan prekast kolon – kiriş numunesi deneyindeki gözlemler	129
Tablo 20. ASCE 41-17 yönetmeliğine göre deprem performansı.....	139
Tablo 21. Kolon-kiriş numuneleri için hesaplanan yapısal parametreler.....	140
Tablo 22. Kiriş-kiriş numuneleri için hesaplanan yapısal parametreler	149

SEMBOLLER DİZİNİ

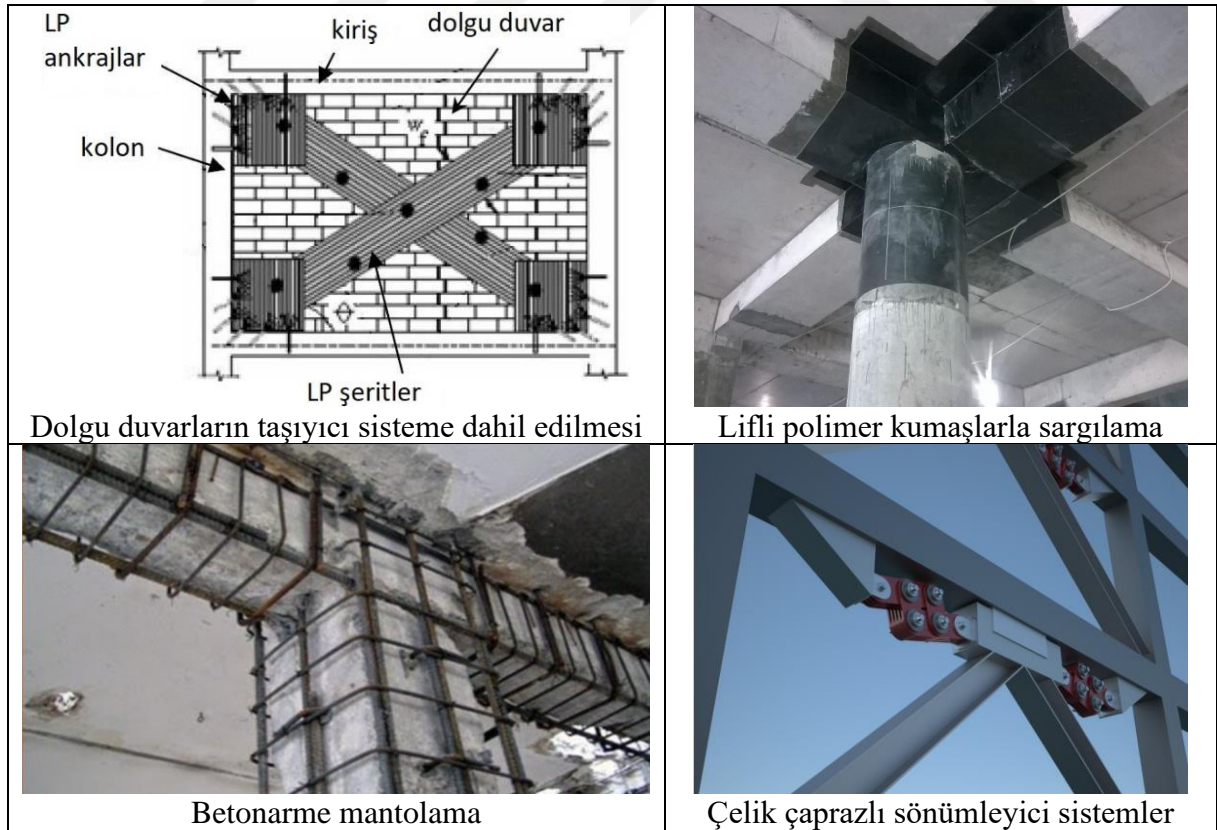
A_g	Kolonun brüt en kesit alanı
a	Eğrilik ölçümünde ölçüm eksenin beton yüzeyine uzaklığı
b	Beton malzemenin kalıcı hasar miktarı ile ilgili parametre
E_c	Betonun elastisite modülü (sekant modülü)
E_{ci}	Betonun başlangıç elastisite modülü (tanjant modülü)
f_{bo}/f_{co}	İki eksenli akma gerilmesinin tek eksenli akma gerilmesine oranı
f_{co}	Betonun standart silindir numune dayanımı
f_{ct}	Betonun çekme dayanımı
f_{cy}	Betonun basınç altındaki elastik sınırı gerilmesi
G_{cl}	Betonun basınç etkisi altında bölgesel ezilme enerjisi
G_f	Betonun kırılma enerjisi
h	Betonarme kesitin yükleme doğrultusundaki boyutu
K	Çekme meridyenindeki ikinci gerilme invariantı
K_e	Başlangıç rijitliği
L	Kiriş açıklığı
L_0	Eğrilik ölçüm aralığı
L_1	Eğrilik ölçümünde çekme bölgesindeki ölçüm miktarı
L_2	Eğrilik ölçümünde basınç bölgesindeki ölçüm miktarı
l_{eq}	Betonarme malzeme modeli için kullanılan eşdeğer eleman boyu
V_y	Akma yükü
V_u	Maksimum yük
α	Dayanıma ulaştıktan sonraki rijitlik azalma oranı
γ_c	Betonun basınç etkisi altındaki yumuşama davranışıyla ilgili katsayı

γ_t	Betonun çekme etkisi altındaki yumuşama davranışıyla ilgili katsayı
δ_y	Akma yer değiştirmesi
δ_u	Nihai yer değiştirme
ε	Betonun basınç altındaki birim Şekil değiştirme oranı
ε^T	Betonun çekme altındaki birim Şekil değiştirme oranı
ε_t	Betonun çekme dayanımına ulaştığı birim Şekil değiştirme oranı
ε_c	Betonun basınç dayanımına ulaştığı birim Şekil değiştirme oranı
θ_t	Toplam dönme
θ_e	Elastik dönme
θ_p	Plastik dönme
σ_1	Betonun elastik bölgedeki basınç gerilmesi
σ_1^T	Betonun elastik bölgedeki çekme gerilmesi
σ_2	Betonun sertleşme bölgesindeki basınç gerilmesi
σ_2^T	Betonun yumuşama bölgesindeki çekme gerilmesi
σ_3	Betonun yumuşama bölgesindeki basınç gerilmesi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünya nüfusunun artmasıyla barınma ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte kaynakların verimli kullanılması, geri dönüşüm, enerji verimliliği gibi konular son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Yapı sektöründe ise depreme dayanıklı yapı inşa edilmesine ek olarak, deprem öncesinde gerekli yapıların depreme karşı güçlendirilmesi veya deprem sonrası onarım ve güçlendirilmelerinin yapılması enerji verimliliği ve kaynakların verimli kullanılması açısından büyük önem arz etmektedir. Pampanin (2006) çalışmasında belirtildiği gibi çeşitli onarım ve güçlendirme yöntemleri üzerinde yıllar boyunca çalışılarak yönetmeliklere dahil edilmiştir. Bunlar, çerçevelerin çapraz elemanlarla tutulması, çerçeve elemanlarının sargılanması, dolgu duvarların taşıyıcı sisteme monte edilmesi, sismik taban izolasyonu, enerji sönmüleyici cihaz kullanımı ve lifli polimer gibi yüksek teknoloji ürünü malzemelerin kullanımı gibi yöntemler olarak sıralanabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Mevcut güçlendirme ve onarım yöntemleri

Mevcut yapıların deprem güvenliğinin araştırılması ve güçlendirilmesi başlı başına bir konu olmakla birlikte, yeniden yapım maliyetlerinin düşürülmesi ve avantajlarının artırılması güçlendirmeye ciddi bir alternatif olmaktadır. 2010 yılında 7.1 büyüklüğündeki Canterbury depreminde Yeni Zelanda'nın Christchurch şehrinde yer alan binaların büyük bir kısmı deprem yönetmeliklerinin ana felsefelerinden biri olan, "şiddetli depremlerde can güvenliğinin sağlanması amacı ile kalıcı yapısal hasar oluşumunun sınırlanması" ilkesi gereği ileri seviyede hasar almasına rağmen göçme gerçekleşmeyerek can kayıpları önlenmiştir (Pampanin, 2017). Ancak, aynı deprem sonrasında çoğu binanın ya teknik ya da ekonomik sebeplerden dolayı yıkılması gerektiği sonucuna da varılmıştır. Bu depremin Yeni Zelanda ekonomisine zararının 20 milyar Yeni Zelanda Doları olduğu ve bu değerın yaklaşık olarak gayri safi yurtiçi hasılının %20'si olduğu belirtilmiştir. İlgili yayında belirtilen bilgilere ek olarak, yazarın ilgili sunumda verdiği bilgilere göre, deprem sonrası binaların onarımının ve güçlendirilmesinin istenmemesinin en büyük sebeplerinden biri olarak bina sahiplerinin hasar aldığını gördüğü binaları güçlendirme yöntemleri yeterli olacak olsa bile kullanmak istememeleridir. Mühendisliğin ve insan psikolojisinin çatıştığı bu noktada akıllara iki çok önemli soru gelmektedir. Onarım ve güçlendirme yöntemleri mühendislik olarak yeterli olsalar da insan psikolojisi açısından yeterli midirler? Diğer ise, Pampanin (2017) çalışmasında sorulduğu üzere, yönetmeliklerde öngörülen hasar limitleri tekrar düşünölmeli midir? Yönetmeliklerde yapı tiplerine bağılı olarak öngörülen hasar sınırları ölkelerin barınma ihtiyacına ne kadar kaynak ayırabildiğıyle doğrudan ilgili bir husus olması sebebiyle bu sorunun mühendislik açısından değerlendirilmemesi gerektiğı düşünölmektedir. Bu aşamada, mühendislik çözümü olarak, onarım ve güçlendirme yöntemlerinin insan psikolojisiyle de uyumlu çalışmasını sağlamak ya da yeni inşa edilecek yapıların daha kolay onarılabilir, onarıldığında yenisinden farksız olacağı ve kullanıcılara güven veren yöntemler geliştirmek gerekmektedir.

Prekast yapı sistemleri betonarme yekpare yapı sistemlerine yenilikçi bir alternatif olarak görölmektedir (Englekirk, 2003). Prekast yapılarda fabrika gibi kontrollü ortamlarda üretilen yapı elemanları inşaat sahasında birleştirilerek yapı inşa edilmektedir. Bu sebeple çoğu zaman üretimde kalite kontrolü daha kolay olmaktadır. Ayrıca kullanılan birleşim yöntemine bağılı olarak yapıda hasar gören elemanların yenileriyle değıştirilmesi ve böylelikle hasarlı binanın onarımdan sonra yeni inşa edilmiş halinden neredeyse farksız olmaması sağlanabilir. Tüm bu üstünlüklerine rağmen, prekast yapılarda eleman birleşimlerinin halen karmaşık, imalat ve montajı zor ancak buna karşın yapısal performansının beklenen seviyede olmayışı gibi

zayıflıkları bulunmaktadır. Örneğin, çubuk elemanların kuru birleşimlerinde rijit sayılan bağlantılar ancak karmaşık detaylı birleşim sistemleriyle gerçekleştirilebilmektedir. Buna bağlı olarak, imalat zorluğu, yüksek maliyet, montaj sırasında ardgerme, kaynak vb. gibi zorluklara maruz kalınmaktadır. Kuru birleşimlere alternatif olarak, rijit birleşim gerçekleştirilmesi amacıyla ıslak birleşimler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak ıslak birleşimlerin hasarsız sökülmesi mümkün olmamaktadır. Prekast birleşimlerin çeşitleri ve literatürde yer alan birleşim tiplerine ilişkin bilgiler ilerleyen bölümlerde detaylı olarak sunulmaktadır.

Sökülebilirlik, kalite kontrolü, hızlı inşaa gibi üstünlükleri olmasına rağmen, halen monolitik yapılar kadar mimari özgürlük, yapım kolaylığı ve sektörel birikim sunamayan prekast yapı sistemleri, sanayi türü basit mimarili tek düze ve çok katlı olmayan yapılarda sıklıkla kullanılmakla birlikte, konut türü yapılarda pek tercih edilmemektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Sanayi tipi bir prekast yapı örneği

1.2. Prekast Birleşimler

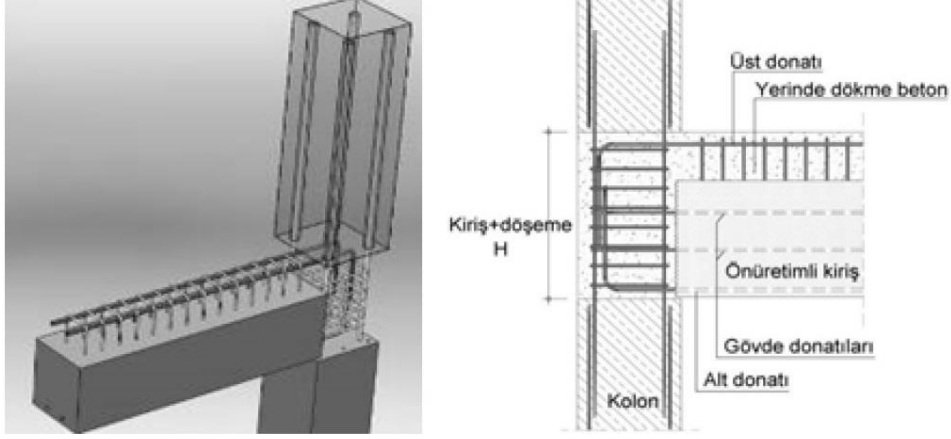
Betonarme yapıların tüm dünyada en yaygın olan yapım şekli, yerinde dökme monolitik (birdöküm) betonarme yapı inşasıdır. Bilindiği gibi, bina türü betonarme yapılar genellikle monolitik olduğundan, gerektiğinde elemanların sökülmesi ve tekrar birleştirilmesi mümkün değildir. Bu sebeple, deprem veya benzeri etkiler sonucunda hasar gören yapı elemanları ancak özel işçilik ve yüksek maliyet gerektiren yöntemler kullanılarak onarılıp güçlendirilebilmektedirler.

Monolitik betonarme yapıların inşasında kalıp, donatı ve betonlama işçiliği, beton kalitesinin kontrolü, beton kürü ve yapının denetimi gibi pek çok zorluk bulunmaktadır. Bu gibi zorluklardan dolayı bu yapıların projesine uygun inşa edilememesi ve dolayısıyla yapının kullanım (servis) yükleri veya deprem yükleri altında beklenen performansı gösterememesi riski mevcuttur. Ayrıca, monolitik betonarme yapıların inşası sırasında her bir dökümden sonra betonunun dayanımını kazanması için belli bir süre beklenmesi gerektiğinden inşa süresi uzamaktadır. Oysa fabrikasyon olarak üretilen prekast (prefabrike) betonarme yapı elemanları kullanılarak inşa edilen prekast yapılarda ise bu sakıncalar söz konusu değildir.

Ocak 2019'dan itibaren yürürlüğe girecek olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'e göre prekast yapılarda bağlantı tipleri mafsallı (moment aktarmayan) ve moment aktaran birleşimler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Moment aktaran birleşimler ise; ıslak ve kuru birleşimler olarak, aşağıda kısaca açıklanan, iki tipte inşa edilmektedir.

1.2.1. Islak Birleşimler

Bu tip birleşimlerde, ön üretim aşamasında birleşim bölgesinin tamamı ya da bir kısmı betonsuz bırakılıp şantiyede betonlanarak prekast elemanların montajı tamamlanmaktadır (Şekil 3). Bu teknikte, yeni dökülen betonun priz alması beklenmesi gerektiğinden, toplam yapım süresi kuru birleşimlere göre daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntemde yapı elemanlarının hasara uğraması halinde elemanın değiştirilmesi mümkün olamamaktadır. Bunlara ek olarak, ıslak birleşim ile inşa edilen prekast yapıların kalitesi ve performansı; birleşim bölgesindeki donatı ve kalıp işçiliği, yeni dökülen betonunun kalitesi, yerine yerleştirilmesi, kürü, soğuk derz oluşması gibi hususlarla doğrudan ilgilidir.



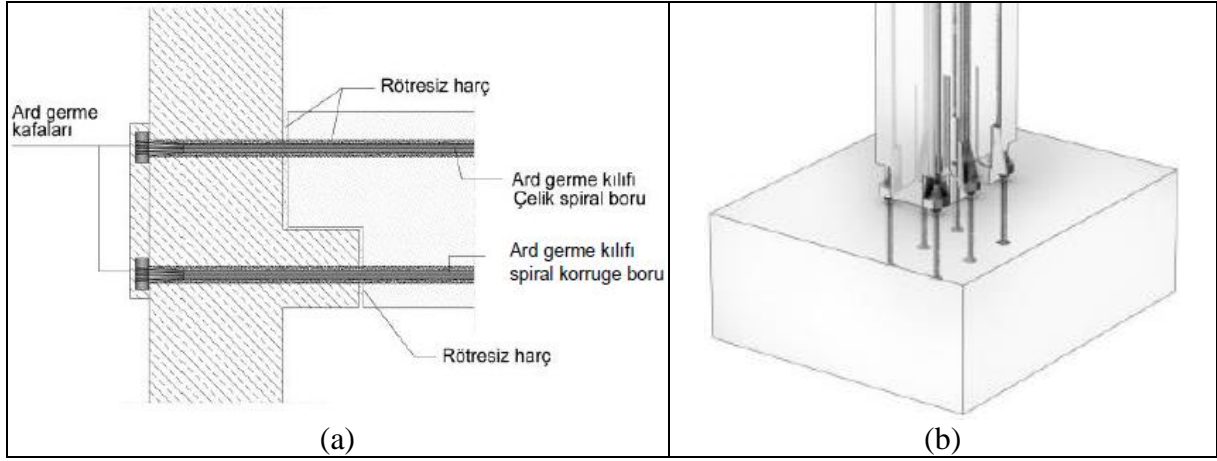
Şekil 3. Prekast ıslak birleşim detayı (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği- 2018)

1.2.2. Kuru birleşimler

Bu tip birleşimler şantiyede beton döküm işlemi gerektirmediği için ıslak birleşimlere göre çok daha hızlı inşa edilebilmektedirler. Kuru birleşimlerde, birleşim bölgesi için özel tasarlanmış bir birleşim detayı ile yapı elemanları arasında iç kuvvet aktarımı sağlanması hedeflenmektedir. Yaygın olarak kullanılan kuru birleşim tekniklerinden biri olan ardgermeli bağlantıya ait bir detay Şekil 4-a’da verilmektedir.

Bu tip bir kolon-kiriş birleşiminde, kirişin ucundan kolonun arka yüzüne kadar uzatılan ardgerme elemanları ile kolon ve kiriş arasında iç kuvvet aktarımı sağlanmaktadır. Bu birleşimde şantiye ortamında uygulanacak olan ardgerme ve rötresiz harç işlemi bağlantının kalitesini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, ardgerme çubukları kirişin yapısal davranışını değiştirerek “kuvvetli kolon-zayıf kiriş ilkesi” açısından da tehlike oluşturabilmektedir.

Yaygın olarak kullanılan diğer bir kuru birleşim tipi ise cıvatalı (bulonlu) bağlantıdır. Yapı elemanları arasında yük aktarımı için yüksek dayanımlı bulonların kullanıldığı bulonlu birleşim tekniklerinin iki önemli sakıncası bulunmaktadır. Bunlardan ilki, birleşim bölgesinde kesit kaybı oluşması (Şekil 4-b), diğeri ise kesite dahil edilen çelik elemanlardan dolayı yapısal davranışın değişmesi ve böylece o bölgedeki göçme modunun da değişmesidir. Örneğin, kolon alt ucuna eklenen ilave çubuk ya da profil, levha gibi çelik elemanlardan dolayı kolonun o kesitinde çekmeye çalışan malzeme miktarı artacak ve kesitte basınç kırılması oluşacaktır. Benzer olarak, kolon-kiriş birleşimi için kiriş uç bölgesine eklenen elemanlardan dolayı da kirişin mesnet bölgesinde gevrek göçme oluşabilir. İlave edilen elemanlardan dolayı kirişlerin, bağlandıkları kolonlardan daha yüksek eğilme kapasitesine sahip olmaları halinde kuvvetli kolon-zayıf kiriş ilkesi devre dışı kalarak binada kat mekanizmasıyla göçme meydana gelebilir.

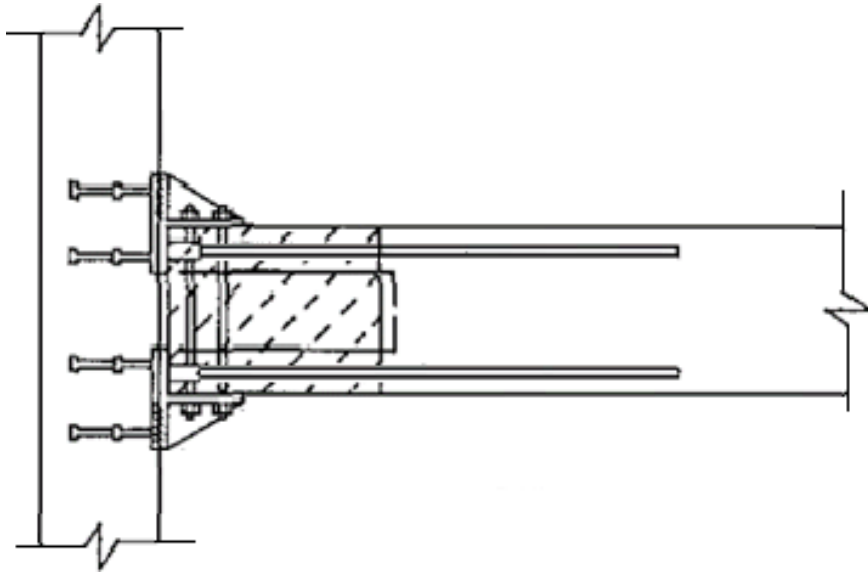


Şekil 4. Prekast elemanlar için kuru birleşim detayları; (a) Ardgermeli, (b) Kesit kaybı oluşan bulonlu birleşim (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018)

1.3. Konu ile İlgili Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar

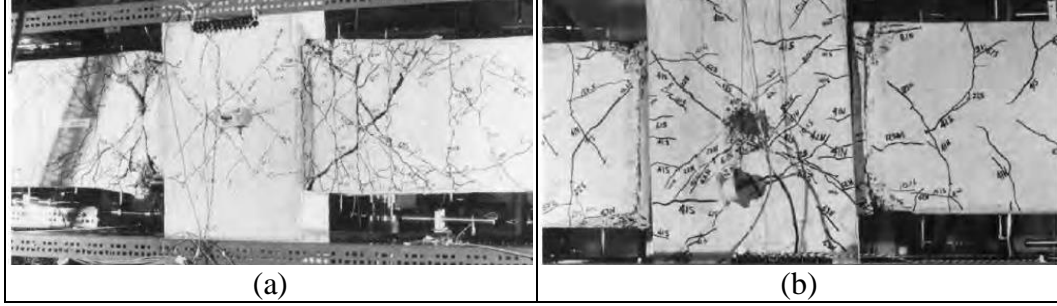
Teknik literatürde prekast yapı elemanları için moment aktaran ıslak ve kuru birleşimlerin incelendiği pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

French vd. (1989) tarafından yapılan çalışmada prekast kolon – kiriş birleşimi için üç farklı moment aktaran birleşim yöntemi deneysel olarak incelenmiştir (Şekil 5). Çalışma sonucunda, bulonlu bağlantı tipinin en yüksek performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık bu birleşim tipi, imalatı en zor birleşim olarak nitelendirilmiş, şantiye ortamında deliklerin hizalanmasında güçlük yaşanabileceği dile getirilmiştir.



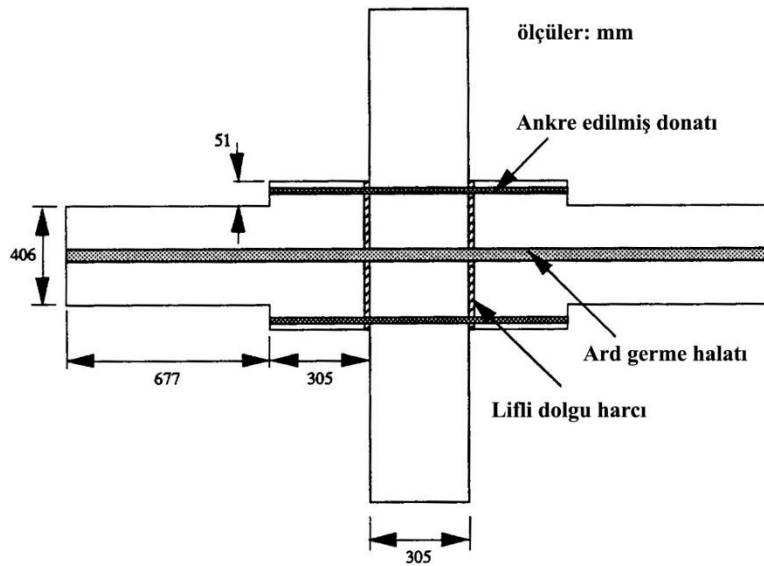
Şekil 5. French vd. (1989) tarafından sunulan ilave çelik elemanları olan bulonlu bağlantı

Cheok ve Lew (1991) tarafından gerçekleştirilen çalışmada prekast dört adet monolitik ve özdeş iki prekast ardgermeli kolon – kiriş birleşim numunesi 1/3 ölçekli olarak üretilmiş ve deneysel olarak incelenmiştir (Şekil 6). Deneyler sonucunda ardgermeli birleşimlerin monolitik birleşimler kadar dayanıma ve sünekliliğe sahip olduğu görülmüştür.



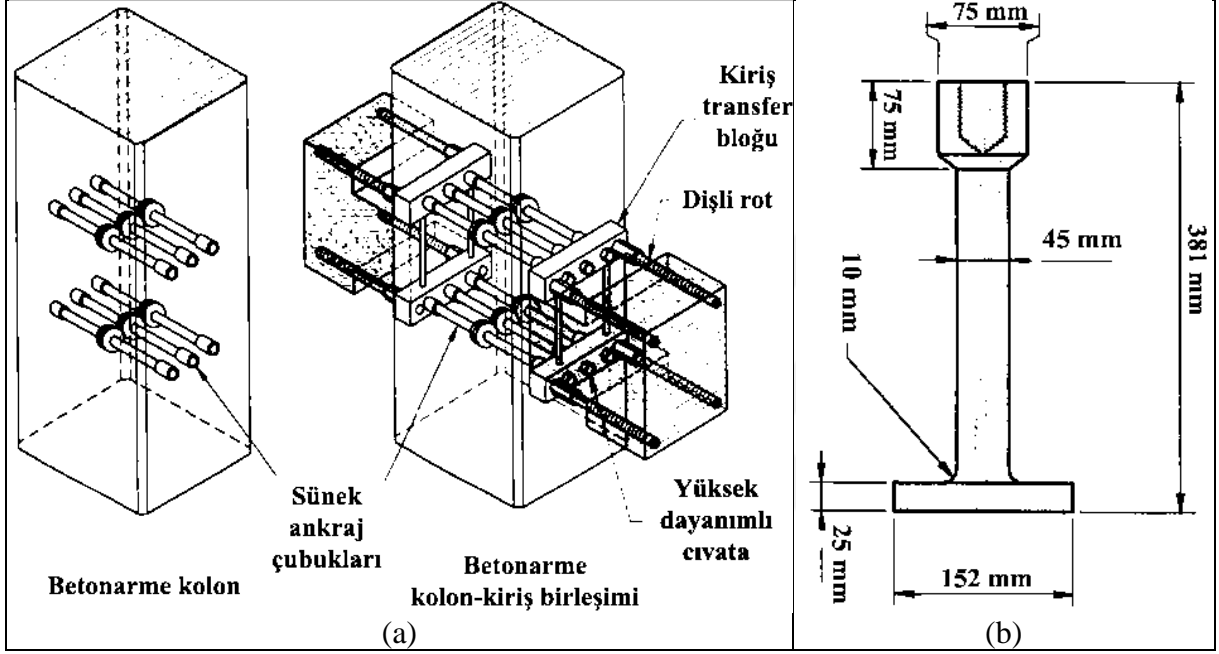
Şekil 6. Cheok ve Lew (1991) tarafından sunulan birleşim tipi; (a) Monolitik birleşim, (b) Ardgermeli birleşim

Cheok ve Stone (1994) tarafından gerçekleştirilen çalışmada 1:3 ölçekli prekast kolon – kiriş birleşim numuneleri çevrimsel yükler altında test edilmiştir. Çalışmanın amacı, yüksek deprem riski taşıyan bölgelerdeki moment aktaran birleşimlere sahip prekast yapılar için yönetmelik oluşturmaktır. Birleşim tipi olarak, yumuşak çelik ile ön gerilme uygulanan hibrit birleşim adı verilen bir bağlantı tipi kullanılmıştır (Şekil 7). Yumuşak çelik kullanılmasının amacınının, birleşimin enerji yutma kapasitesini arttırmak olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda, hibrit birleşimin aynı şartlardaki monolitik birleşimler ile pek çok açıdan denk ya da daha üstün performans gösterebileceği ifade edilmiştir.



Şekil 7. Cheok ve Stone (1994) tarafından sunulan prekast kolon – kiriş için hibrit birleşim

Englekirk (1995) tarafından yapılan çalışmada deprem bölgelerindeki prekast betonarme yapılar için geliştirilen sünek bir birleşim sistemi deneysel olarak incelenmiştir (Şekil 8). Bu birleşim sisteminde kolon içine yerleştirilen vida dişli ankraj çubuklarının başlarına kiriş uç bölgesindeki vidalı ankrajların transfer bloğu ve somunu ile bağlanıp gerdirilmesi sonucunda kolon-kiriş montajı tamamlanmaktadır. Deneysel çalışma sonucunda geliştirilen sistem ile yapının akmadan sonraki davranışının iyileştirilebildiği görülmüştür.



Şekil 8. Englekirk (1995) tarafından sunulan birleşim tipi; (a) Kolon – kiriş birleşim detayı, (b) Kolona ilave edilen sünek ankraj çubuk detayı

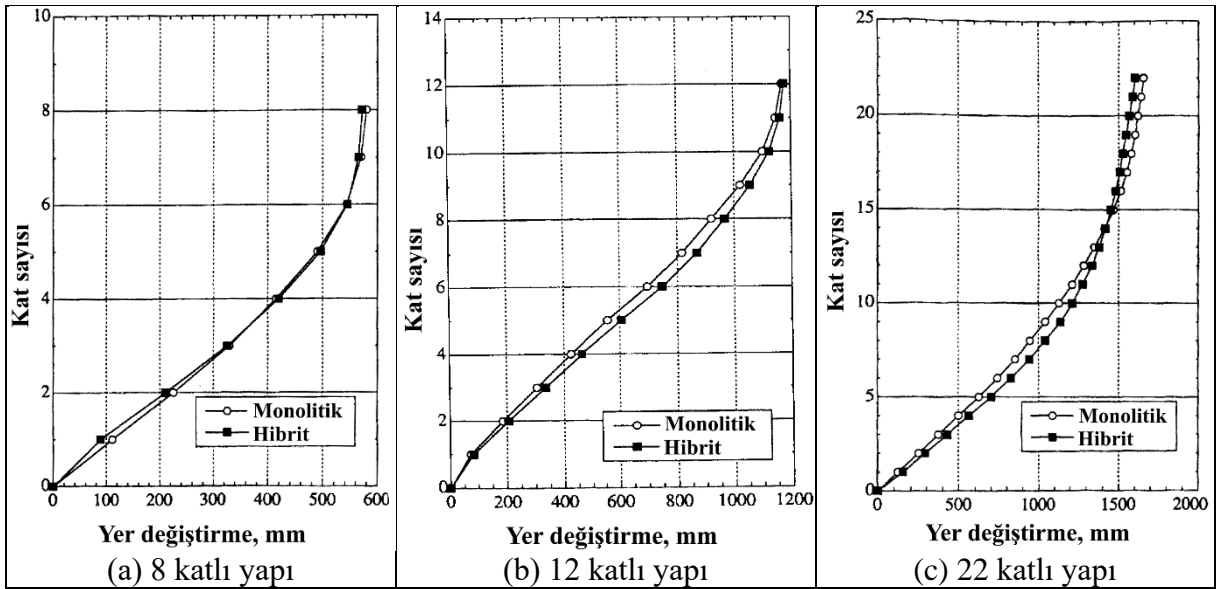
Restrepo vd. (1995) tarafından yapılan çalışmada prekast yapıların kenar çerçevelerinin kolon – kiriş ve kiriş – kiriş bağlantıları için kullanılan çeşitli ıslak birleşim tipleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada incelenen birleşim tiplerinden büyük kısmının Yeni Zelanda genel yapı tasarımı yönetmeliğine uygun davranış gösterdiği ve önerilen birleşim tipleri ile yerinde dökme monolitik betonarme yapılara benzer prekast yapılar üretilebileceği söylenmiştir. İncelenen kiriş – kiriş birleşimlerinin tasarımı sırasında kesitin enine şekil değiştirmelerinin (sargı donatısı ihtiyacının) dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir.

Englekirk (1996) tarafından yapılan çalışmada prekast yapılar için yenilikçi bir inşaat yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Englekirk (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışmanın devamı niteliğinde olan bu çalışmada, otopark amaçlı 4 katlı prekast bir yapı inşa edilmiştir. İnşaat sırasında bir temel – kolon birleşim montajının görünüşü Şekil 9’da verilmiştir. Burada, birleşimin yukarıda açıklanan “kesit kaybı olan bulonlu bağlantı” tipinde olduğu görülmektedir.



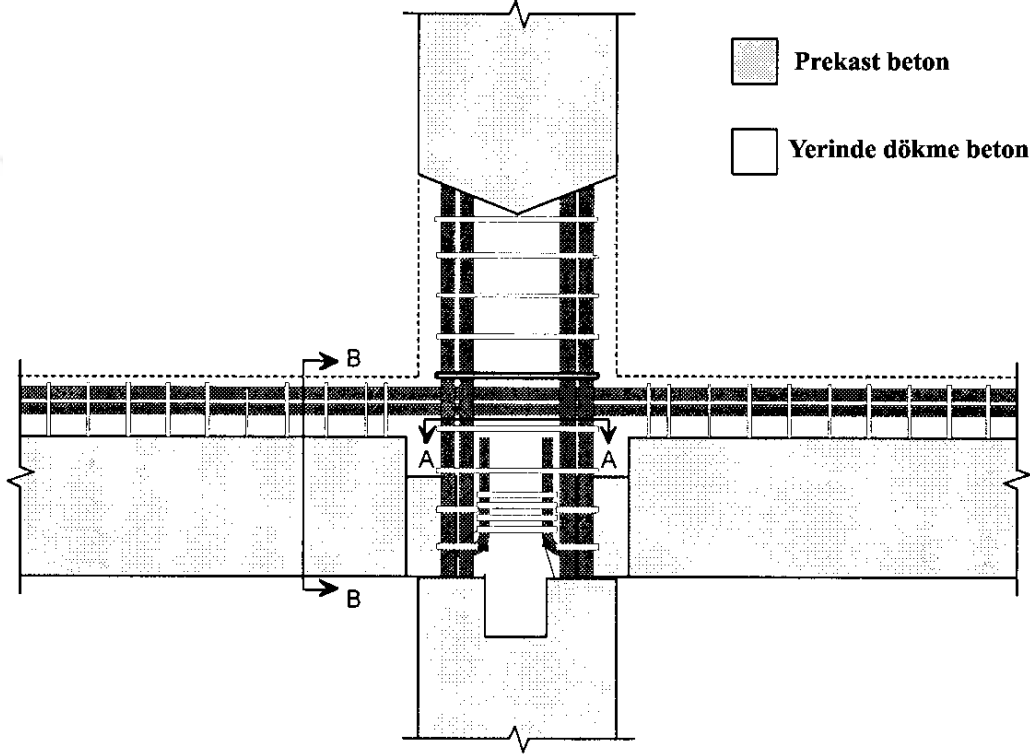
Şekil 9. Englekirk (1996) tarafından sunulan prekast birleşim

Cheok vd. (1998) tarafından gerçekleştirilen çalışma, Cheok ve Stone (1994)'un çalışmalarının devamı niteliğindedir. Bu çalışmada, hibrit kolon – kiriş birleşimlerine sahip prekast betonarme yapı performansı analitik olarak incelenmiştir. Önceki çalışmalara dayanarak hibrit birleşimin elastik ötesi davranış modeli üretilmiştir. Ardından; 4, 8, 12 ve 22 katlı 2 boyutlu çerçeve sistem modelleri ile hibrit kolon – kiriş birleşimine sahip prekast yapıların deprem davranışları çeşitli zemin koşulları ve deprem kayıtları için incelenmiştir. Çalışmada elde edilen karşılaştırmalı kat yatay ötelenme değerleri Şekil 10'da verilmiştir.



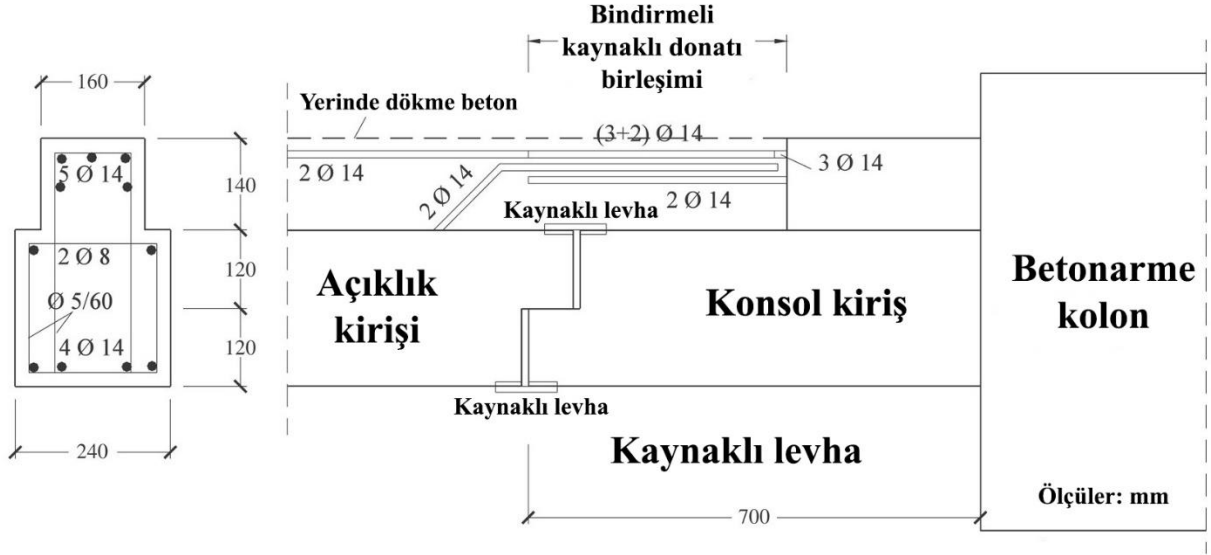
Şekil 10. Cheok vd. (1998) tarafından yapılan çalışmada karşılaştırmalı kat yer değiştirmeleri

Alcocer vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada iki adet tam ölçekli prekast kolon – kiriş ıslak birleşim numunesi üretilmiş, tek doğrultuda ve iki doğrultuda test edilmiştir (Şekil 11). Çalışma kapsamında kullanılan birleşim sisteminin en belirgin özelliği; yerinde dökümü yapılacak beton içerisinde kalacak olan kirişlerin sürekliliğini sağlamak için bir kirişten diğerine uzanan yumuşak çelik çubuklar içermesidir. Deney sonucunda uygulanan prekast ıslak birleşim detayının taşıma kapasitesinin eşdeğer monolitik sistem için hesaplanan dayanımın %80’i kadar olduğu görülmüştür.



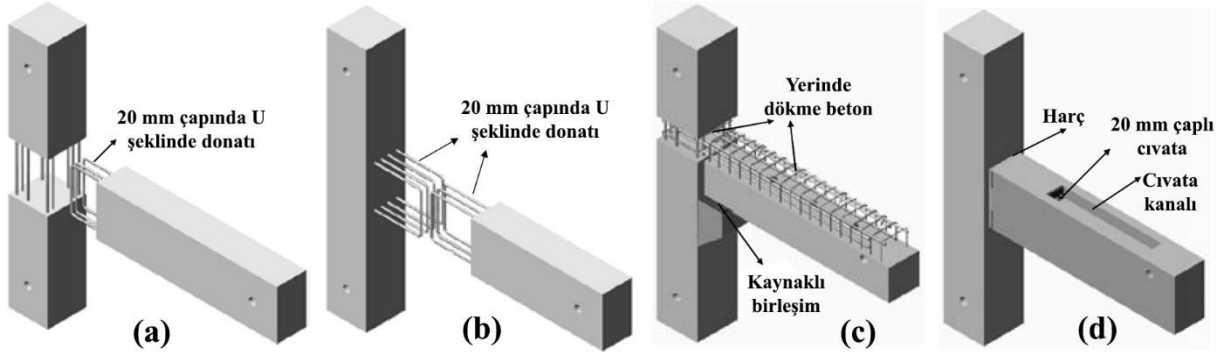
Şekil 11. Alcocer vd. (2002) tarafından sunulan ıslak birleşim detayı

Korkmaz ve Tankut (2005) tarafından yapılan çalışmada 6 prekast kiriş – kiriş birleşimi şiddetli deprem davranışını incelemek için çevrimsel tekrarlı yüklemeye altında test edilmiştir. Bu numunelerden ilki monolitik referans numunesi olarak, ikincisi ise bir prekast yapı firmasına ait özel üretim tipi olarak üretilmiştir (Şekil 12). Diğer prekast numuneler, firmaya ait üretim tipinin geliştirilmiş hali olarak üretilmiştir. Bütün numuneler 1:2.5 ölçeğinde özdeş olarak üretilmişlerdir. Çalışma sonucunda monolitik deney sonuçlarıyla yapılan karşılaştırmalara göre, firmanın üretmiş olduğu birleşim sisteminin dayanım ve süneklik yönünden yetersiz olduğu görülmüştür. Buna karşın, birleşim sisteminde yapılan iyileştirme ile monolitik birleşimin davranışına yaklaşmış olsa da hem dayanım hem de süneklik yönünden monolitik birleşim performansına sahip bir bağlantı geliştirilememiştir.



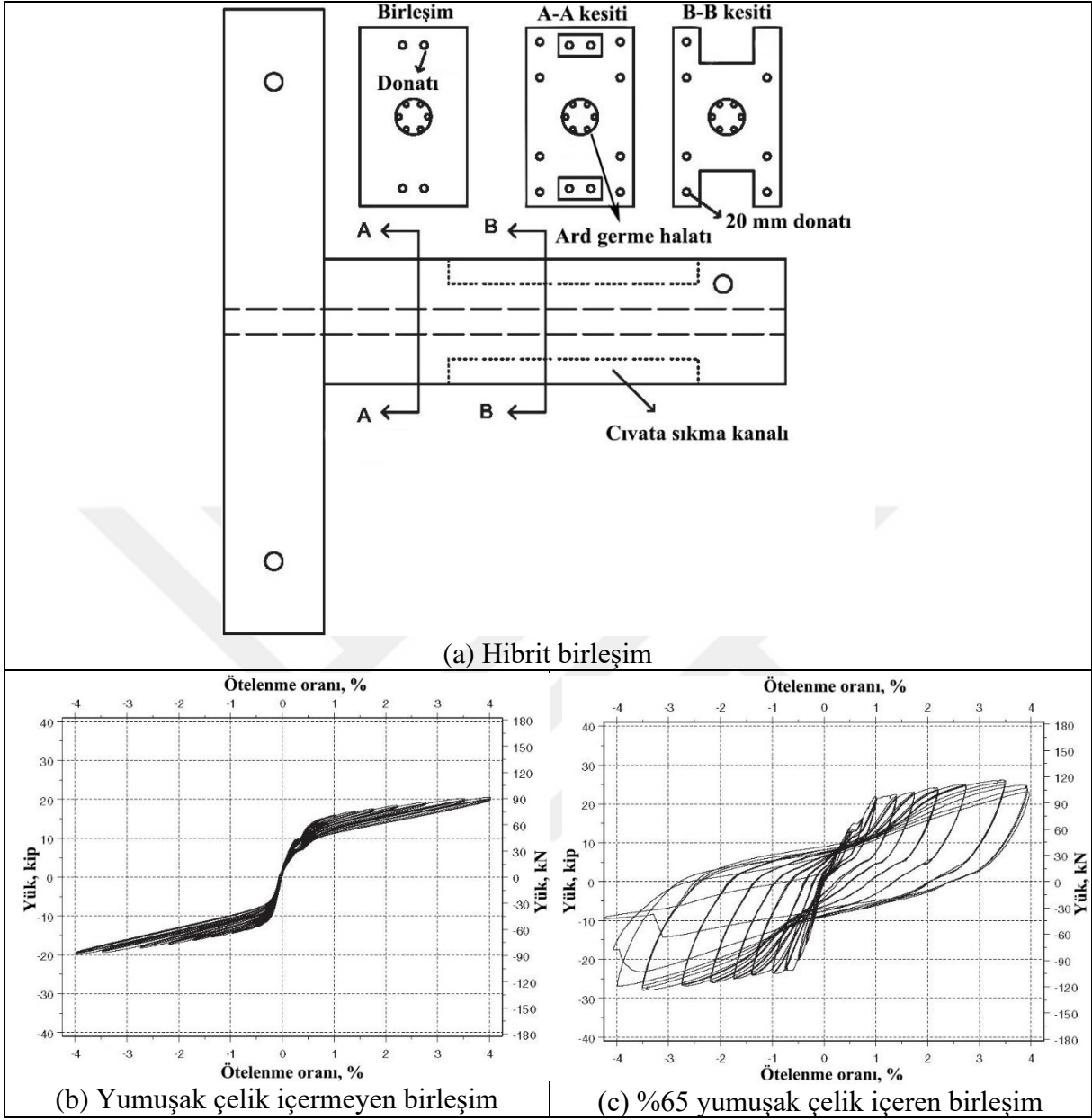
Şekil 12. Korkmaz ve Tankut (2005) tarafından yapılan birleşim sistemi detayı

Ertaş vd. (2006) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 4 farklı tipte moment aktaran sünek prekast birleşim sistemi incelenmiştir (Şekil 13). Çalışma sonucunda, ıslak birleşimlerin yüksek hassasiyette kalıp, beton ve kaynak işçiliği gerektirdiğini ve buna karşın cıvatalı birleşimin daha hızlı gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir. Ayrıca, cıvatalı birleşimlerdeki en büyük riskin, birleşim ara yüzünde kayma oluşabilmesi ihtimali olduğu dile getirilmiştir.



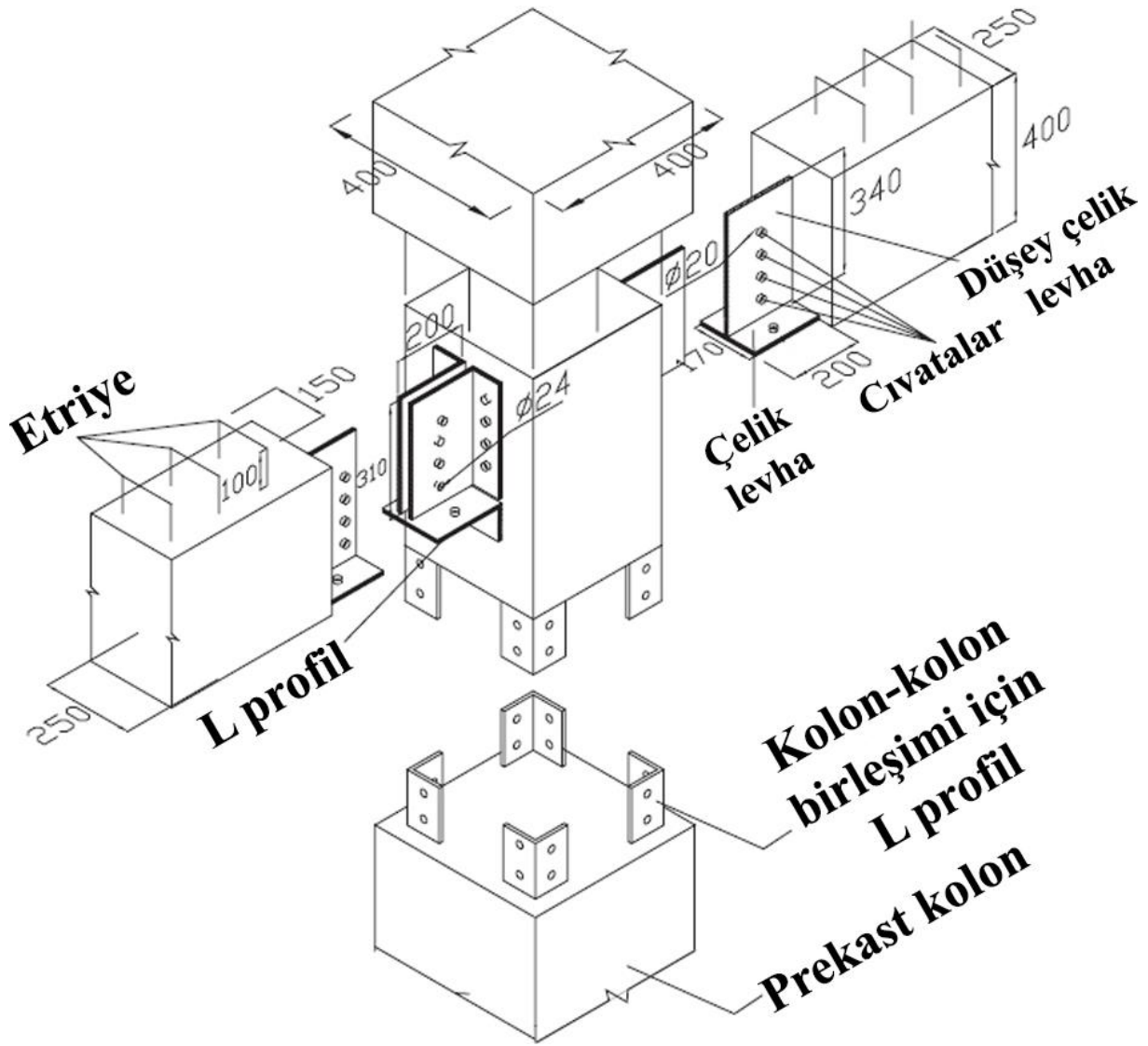
Şekil 13. Ertaş vd. Prekast kolon – kiriş bağlantı çeşitleri; (a), (b), (c) Islak birleşimler; (d) Bulonlu

Özden ve Ertaş (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada prekast kolon – kiriş birleşimi için %0-65 oranlarında yumuşak çelik içeren ardgermeli hibrit birleşim sistemleri incelenmiştir (Şekil 14-a). Çalışma sonucunda bütün birleşim sistemlerinin %4 ötelenme oranına ulaştığı ve yeterli dayanıma sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, dayanım ve enerji yutma kapasitesinin kesitte yer alan yumuşak çelik donatı miktarına doğrudan bağlı olduğu deney sonuçlarından görülmektedir (Şekil 14-b-c).



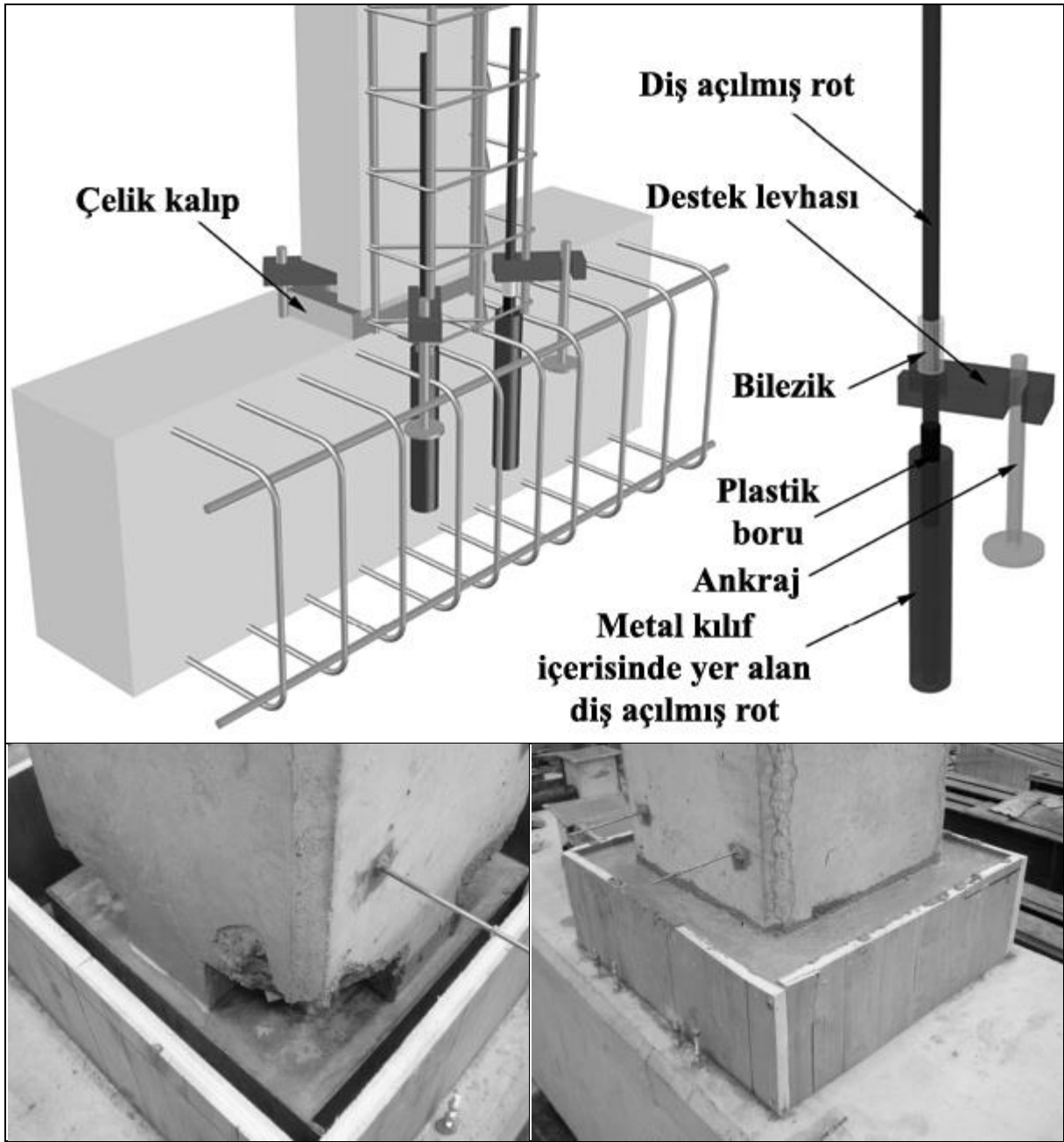
Şekil 14. Özden ve Ertaş (2007) çalışmasında sunulan yumuşak çelik donatı içeren ardgermeli hibrit birleşim sistemi detayları ve deney sonuçları

Li vd. (2009) prekast kolon ve kiriş elemanlar için, kısmen ıslak birleşim olarak değerlendirilebilecek, yeni bir birleşim şekli önermiştir. Çalışmada biri monolitik diğerleri prekast olmak üzere üretilen tam ölçekli 4 numune çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Ayrıca DIANA yazılımı kullanılarak sonlu eleman analizi de gerçekleştirilmiştir. İncelenen prekast birleşimin detayı Şekil 15’te verilmiştir. Deneysel çalışmada birleşim bölgesinde ani hasar gözlemlenmemiş, birleşimin göçmesi birleşim bölgesi hasarı ile gerçekleşmemiştir. Ek olarak, kolon – kiriş birleşiminin yeterince rijit ve sünek olduğu belirlenmiştir. Ancak kısmen ıslak birleşim olan bu birleşim tipi sökülebilir değildir.



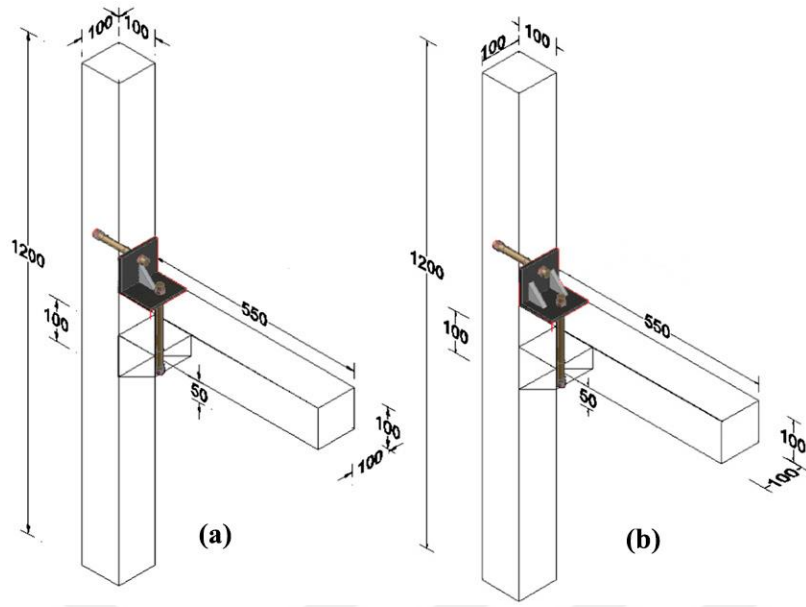
Şekil 15. Li vd. (2009) çalışmasında sunulan tipik prekast bağlantı detayı

Metelli vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada temel-kolon birleşimleri için çelik levha ve ankraj çubukların kullanıldığı bir ıslak birleşim sistemi önerilmiştir (Şekil 16). Önerilen birleşimde, ankraj çubukları ve destek levhalarıyla gerçekleştirilen birleşim, birleşim bölgesinin harç ile doldurulmasıyla gerçekleştirilmektedir. Çalışmada gerçekleştirilen deneyler sonucunda önerilen birleşim sisteminin dayanım, süneklik, stabilite ve enerji yutma kapasitesi açısından yeterli bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak, önerilen birleşim sisteminin göçme yaşanmadan %6'lık tepe ötelenme oranına ulaştığı belirtilmiştir.



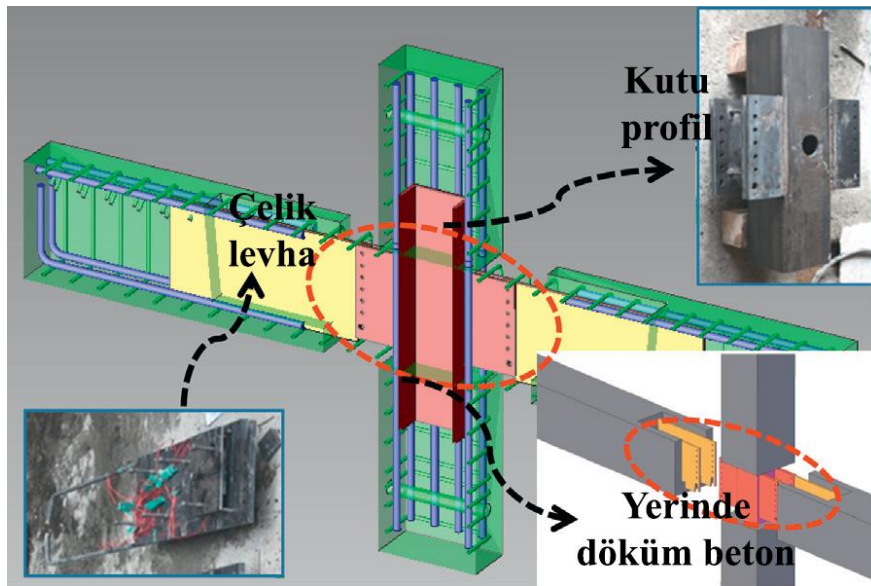
Şekil 16. Metelli vd. (2011) tarafından sunulan birleşim tipi

Vidjeapriya ve Jaya (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada iki basit birleşim sistemi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma için bir adet monolitik ve aynı dayanıma sahip tek ve çift berkitmeli olmak üzere iki adet prekast numune üretilmiş ve çevrimsel yükleme altında test edilmiştir (Şekil 17). Çalışma sonucunda prekast birleşimlerin monolitik birleşim kadar sünek davrandığı ancak daha düşük dayanıma sahip oldukları görülmüştür.

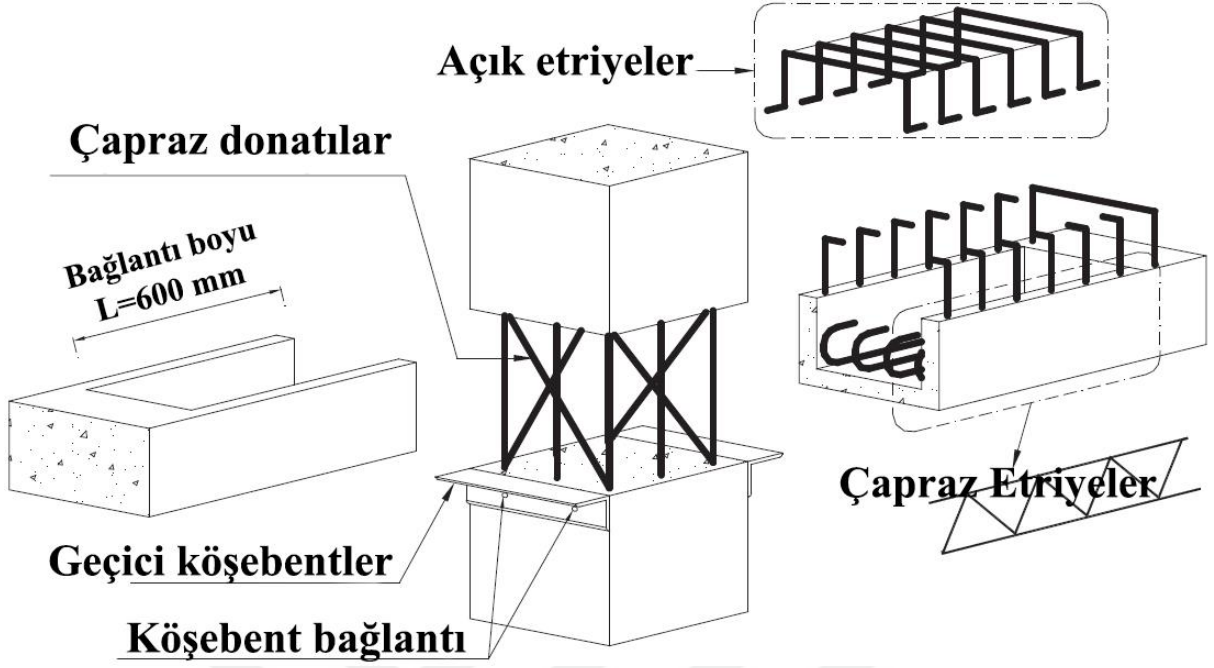


Şekil 17. Vidjeapriya ve Jaya (2013); (a) Tek berkitme birleşimi, (b) Çift berkitme birleşimi

Choi vd. (2013) çalışmalarında çelik levhalı ve yerinde döküm gerektiren bir birleşim sistemini deneysel olarak incelemişlerdir (Şekil 18). Bir monolitik referans numunesi ve 4 adet çelik levhalı prekast birleşim numunesi 1:2 ölçekli olarak üretilmiş ve çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Çalışma ile prekast birleşimlerin monolitik birleşimler kadar sünek davrandığı ve daha yüksek dayanım gösterebildiği sonucuna varılmıştır. Deney elemanları kapasite olarak benzer olsa da prekast numunelerde maksimum kapasiteye ulaştıktan sonra, referans monolitik numunenin aksine, ani dayanım düşüşü görülmüştür.

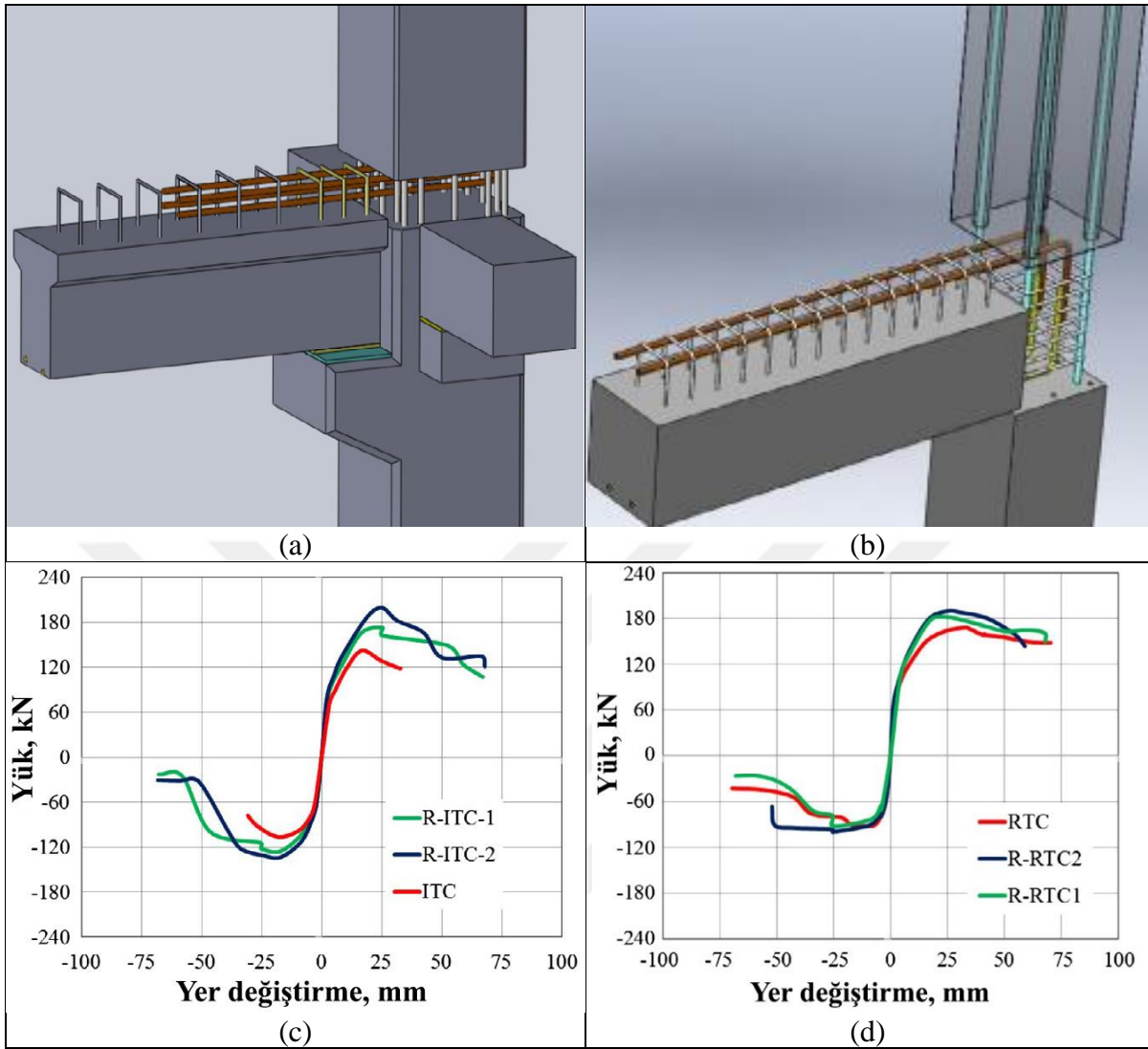


Şekil 18. Choi vd. (2013) çalışmasında sunulan çelik levhalı birleşim sistemi



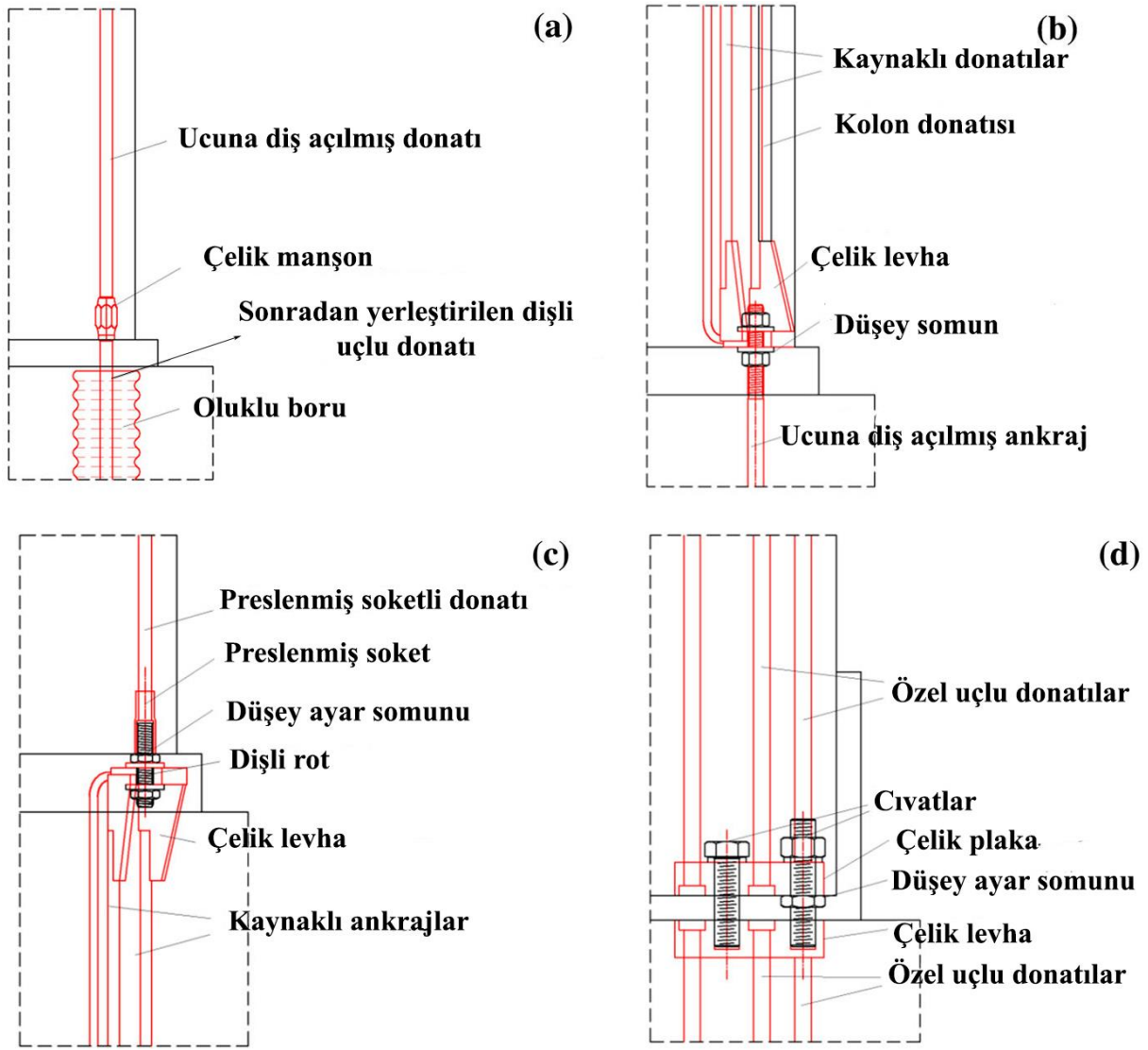
Şekil 20. Parastesh vd. (2014) tarafından sunulan prekast kolon – kiriş birleşimi için kalıp ve kaynak işçiliği gerektirmeyen ıslak birleşim sistemi

Yüksel vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada prekast yapıların birleşim bölgelerinin davranışlarının incelenmesi ve iyileştirilmesi için ıslak birleşimli prekast kolon – kiriş birleşim numuneleri çevrimsel yükleme altında test edilmişlerdir. Bu çalışmada ıslak birleşim tipleri sanayi tipi ve konut tipi yapılar için olmak üzere ikiye ayrılmıştır (Şekil 21-a-b). Bu tip bağlantılar ve bu çalışma kapsamında geliştirilen numuneler deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda geliştirilen tiplerin dayanımlarında mevcutlara göre önemli artış gözlemlenmiştir (Şekil 21-c-d). Ayrıca, sanayi tipi yapılar için uygulanan bağlantı tipinin geliştirilmesi ile süneklikte de önemli bir artış elde edilmiştir.



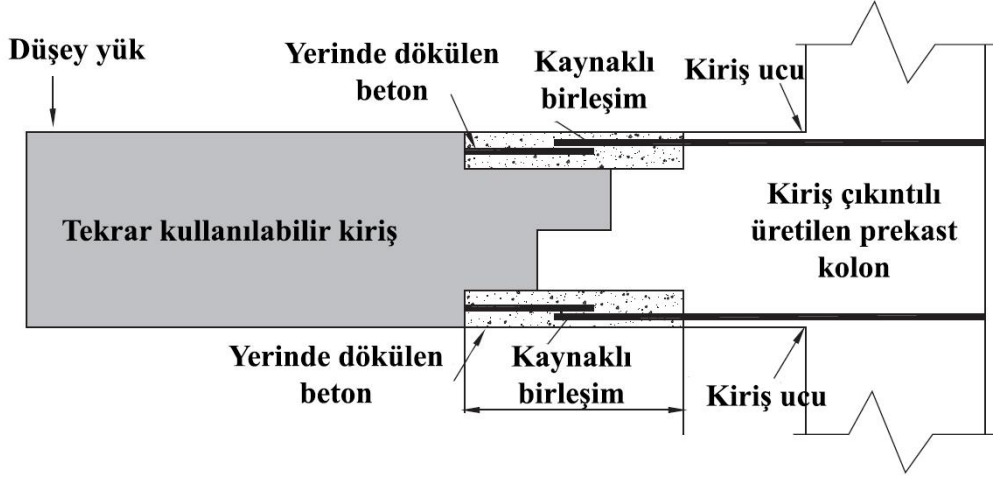
Şekil 21. Yüksel vd. (2015); (a) Sanayi tipi yapılar için ıslak birleşim, (b) Konut tipi yapılar için ıslak birleşim, (c) Sanayi tipi yapı birleşimi deney sonuçları, (d) Konut tipi yapı birleşimi deney sonuçları

Dal Lago vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada 4 farklı tipte kuru prekast birleşim deneysel olarak incelenmiştir (Şekil 22). Çalışmada, birleşim bölgesinin yapısal davranışının, birleşimde kullanılan bağlantı elemanlarının plastik mafsalları etkilemesi üzerine değişiklik gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, test edilen birleşim tiplerinin birbirinden çok farklı moment kapasitelerine sahip olduğu tespit edilmiştir.



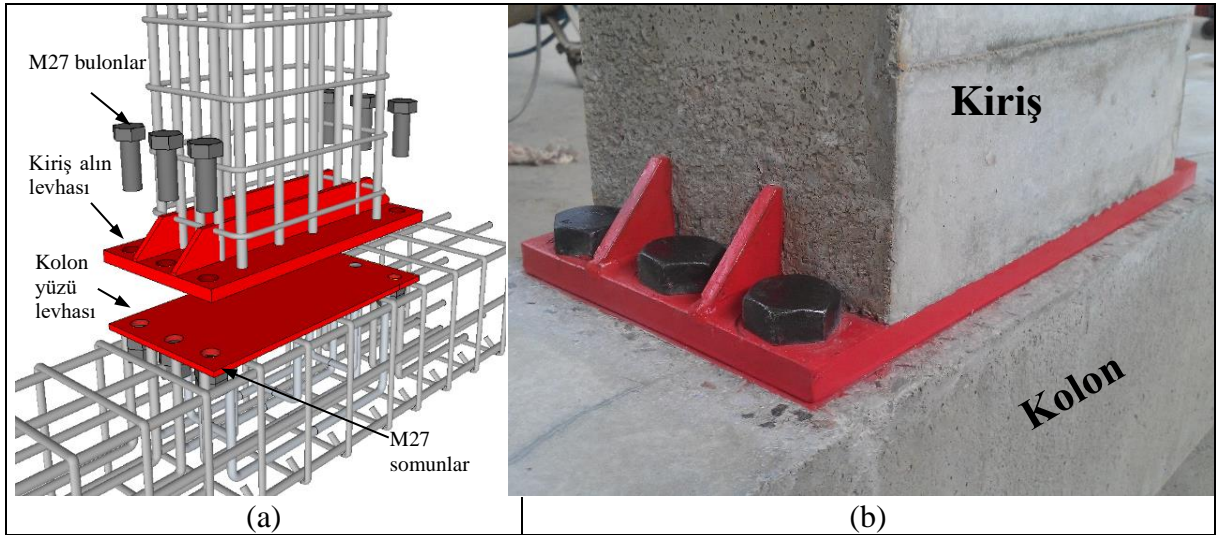
Şekil 22. Dal Lago vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada önerilen birleşim tipleri

Xiao vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada prekast kolon – kiriş birleşimleri için yeni bir ıslak birleşim sistemi önerilmiştir (Şekil 23). Çalışmada 5 adet tam ölçekli numune üretilmiş ve çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur. Deneylerde prekast ve monolitik birleşim numunelerinin çatlak mekanizması benzer olmuştur. Deney sonuçlarına göre önerilen birleşim sisteminin deprem bölgelerinden yapılacak binalar için yeterli süneklikte olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, yerinde dökme beton hacminin az olmasından dolayı kirişin sökülmesinin mümkün olduğu da belirtilmiştir. Ancak, sunulan birleşimde boyuna donatıların kaynakla birleştirilmesinin, kaynak bölgesindeki çeliği gevreklettiğinden dolayı, ani kırılma riski oluşturduğu ve dolayısıyla tekniğin özellikle deprem bölgelerinde kullanılmasının uygun olmayacağı da bir gerçektir.



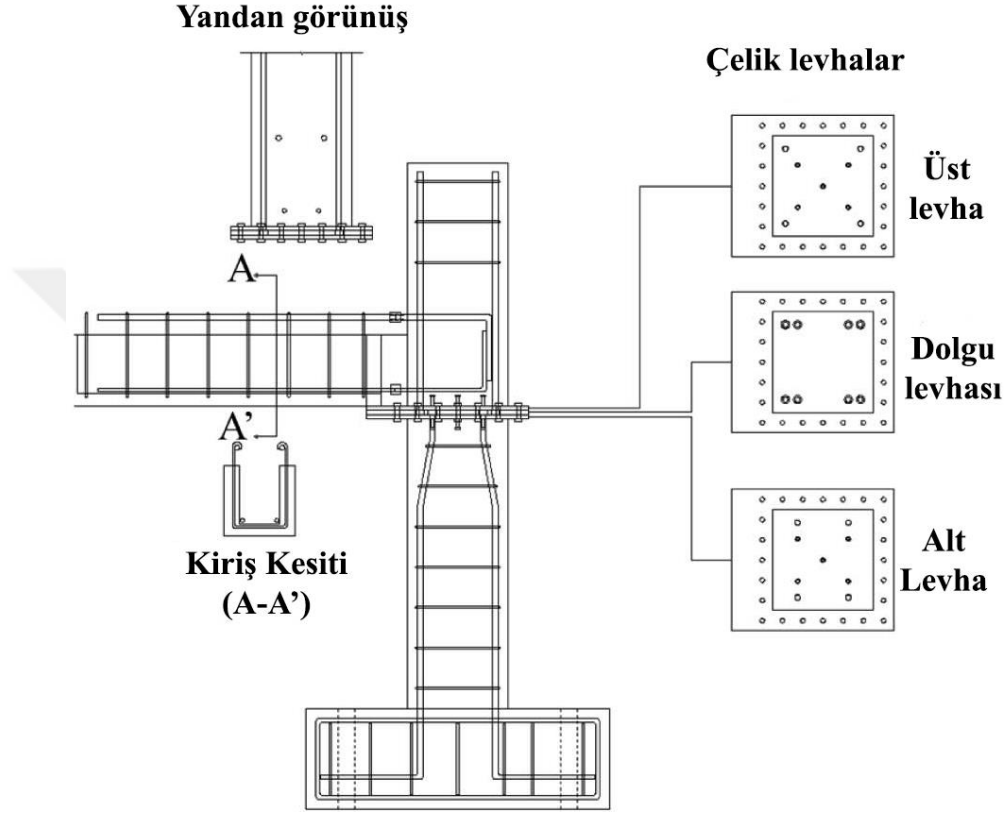
Şekil 23. Xiao vd. (2016) çalışmasında sunulan ıslak birleşim detayı

Pul ve Şentürk (2017) çalışmasında kolon-kiriş bağlantısı için levhalı ve cıvatalı bir birleşim sistemi önerilmiştir. Çalışma kapsamında biri monolitik referans ve diğeri prekast numune olmak üzere 2 adet tam ölçekli deney numunesi üretilmiş ve yarı statik çevrimsel yükleme etkisi altında test edilmiştir. Çalışmada, kolon yüzüne ankre edilen kolon yüzü levhası ile kiriş ucuna ankre edilen kiriş ucu levhası yüksek dayanımlı cıvatalarla bağlanarak kolon-kiriş birleşimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 24). Kolon yüzü levhası için kaynaklı ankraj çubukları kullanılırken, kiriş ucuna eklenen levhanın ankrajı için ise uçları perçin başı formuna getirilen kirisin boyuna donatıları kullanılmıştır. Levha üzerine perçin başlı donatılara uygun delikler açılarak bağlantı gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, önerilen birleşim sisteminin aynı boyut ve donatılara sahip monolitik numune ile oldukça benzer davranış gösterdiği görülmüştür.



Şekil 24. (a) Birleşim detayı, (b) deney numunesi birleşim bölgesi görünüşü

Nzabonimpa ve Hong (2019) tarafından yapılan çalışmada, metal plaka le gerçekleştirilen bir uç uca kolon-kolon bağlantı tipi önerilmiştir (Şekil 25). Önerilen bu birleşim sisteminde, kolonun boyuna donatılarının ucuna dış açılarak plakaya gömülü somunlara bağlanmaktadır. Ayrıca, kolonun merkezinde bağlantı plakasına kaynakla birleştirilmiş bir çelik profil yer almaktadır.



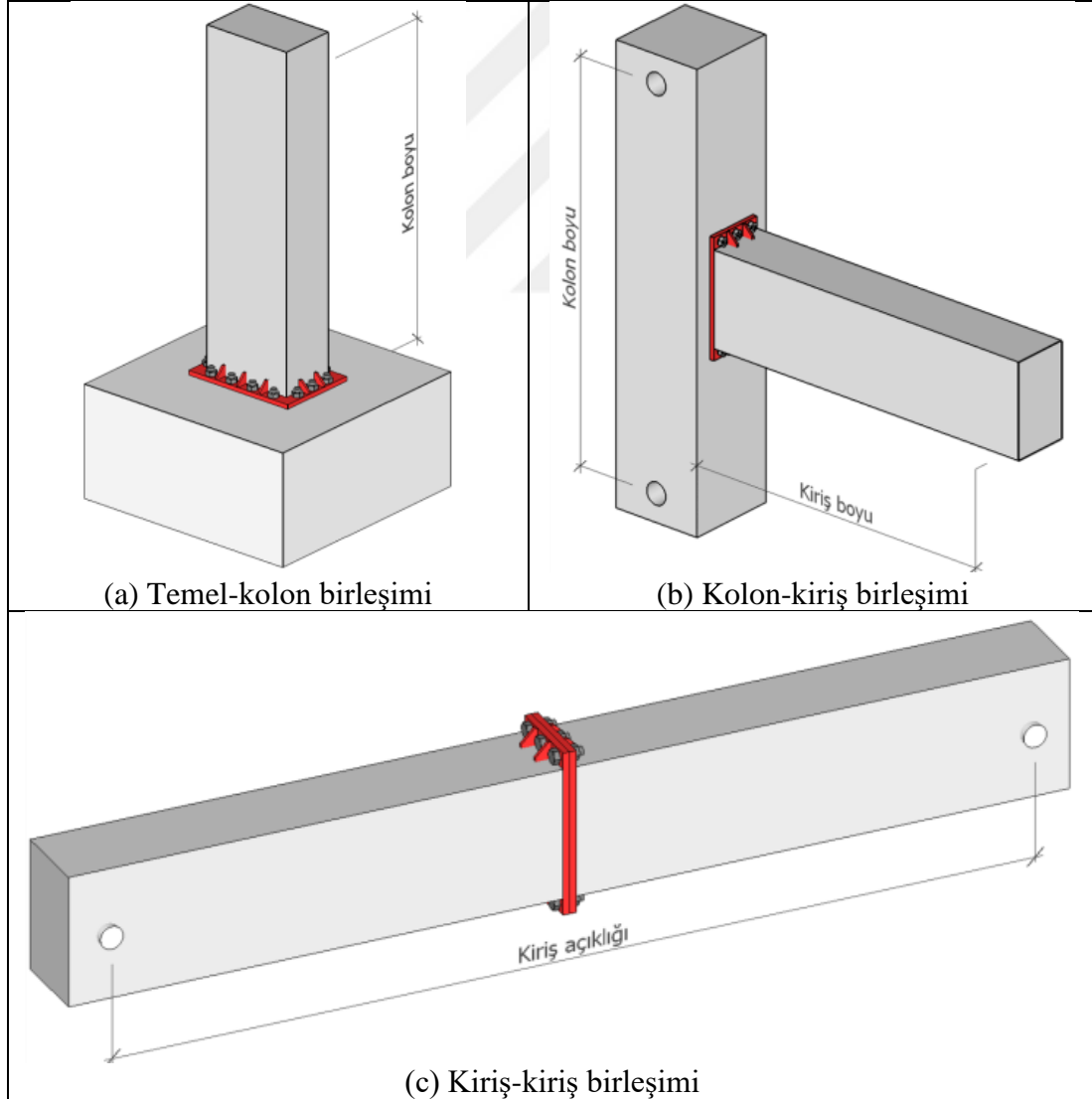
Şekil 25. Nzabonimpa ve Hong (2019) tarafından yapılan çalışmada önerilen birleşim

1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu doktora çalışmasının amacı, prekast kuru birleşimlerin sökülebilirlik, hızlı inşa gibi üstünlüklerine ek olarak, prekast betonarme yapı elemanlarının birleşim bölgelerindeki yük ve yük etkilerinin güvenle iletimini sağlayacak, monolitik yapıların bağlantı noktalarına benzer performans gösteren, moment aktaran bir cıvatalı birleşim sistemi geliştirmektir. Geliştirilen birleşim sisteminde prekast elemanların birleşimi için çelik levhalar ve yüksek dayanımlı cıvatalar kullanılmakta olup, bu birleşim araçları elastik bölgelerinde kalacak şekilde tasarlanmıştır. Böylelikle, birleşim bölgesinin elastik ötesi davranışını ihmal edilebilir seviyede etkilemektedir. Buna bağlı olarak, önerilen birleşim sistemi yapısal davranış açısından monolitik betonarme birleşim sistemleri ile oldukça benzer davranış göstermektedir. Bu sayede,

birleşimde yer alan çubuk elemanların rijitlikleri, kapasiteleri, göçme şekil değiştirme oranları gibi özellikleri monolitik ile oldukça benzer olduğundan bu birleşim sistemine sahip bir yapının yapısal analizinde mevcut analiz yöntemleri kullanılabilir. Ayrıca, önerilen birleşim sisteminin davranışı monolitik yapı birleşimlerine oldukça benzer olması dolayısıyla, yapının depreme dayanıklı tasarımı aşamasında öngörülen deprem performansının (kesintisiz kullanım (KK), göçmenin önlenmesi (GÖ) v.b. performans düzeyleri gibi) sağlanması da mümkündür.

Çalışma kapsamında, konut veya sanayi türü bir yapının inşası için gerekli olabilecek ve farklı iç kuvvetlere maruz olan temel-kolon, kolon-kiriş ve kiriş-kiriş birleşim bölgeleri için olmak üzere üç farklı birleşim tipi üzerine 1:1 ölçekli deneyler yapılması öngörülmüştür (Şekil 26). Bunların yanı sıra, önerilen birleşim sisteminin yapısal davranışının analitik olarak da incelenebilmesi amacıyla bir sonlu eleman analiz yaklaşımı geliştirilmiştir.



Şekil 26. Çalışma kapsamında incelenen birleşim tipleri

Temel-kolon birleşim numuneleri ile normal kuvvet, kesme kuvveti ve eğilme etkileri altında birleşimler için geliştirilen prekast birleşim sistemi deneysel olarak test edilmiştir. Temel-kolon birleşim numuneleri toplamda dört adet üretilmiş olup bunlardan iki tanesi kolonun eğilmede kuvvetli ekseninde yüklenmek üzere üretilen bir monolitik ve bir prekast numunedir. Diğer çift ise kolonun eğilmede zayıf ekseninde yüklenmek üzere üretilen bir monolitik ve bir prekast numunedir. Üretilen numune çiftleri geometri ve donatı detayı açısından birbirine denk olarak üretilmiştir. Temel-kolon birleşim deneylerinde aksenel yükleme için kolonun dönmesiyle birlikte dönebilen mafsallı bir yükleme çerçevesi kullanılmıştır. Aksenel yükleme sisteminin mafsalları kolonun potansiyel mafsal bölgesi ile aynı eksende olacak konumlandırılmıştır. Aksenel yük deney başlangıcında dinamik etki oluşturmayacak bir şekilde yatay yüklemeye önce ön görülen seviyeye getirilmiştir ve deney boyunca sabit tutulmuştur. Çevrimsel yatay yüklemeler bilgisayar kontrollü hidrolik aktüatör ile yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin potansiyel plastik mafsal bölgesinde (temel-kolon birleşim arayüzünden itibaren kolon kesitinin yatay yüklemeye paralel olan boyutu “h” olmak üzere, 0-1.5h arası) eğrilik ölçümü amacıyla bu bölgeyi 3 eşit parçaya bölen ölçüm düzeneği kullanılmıştır. Bunların yanı sıra, temel-kolon arayüzünde oluşabilecek açılmaları ölçmek amacıyla kolonun yüklemeye dik her iki yüzüne açılma ölçüm düzeneği yerleştirilmiştir. Ayrıca, kolonun görelî ötelenmelerinin hesaplanabilmesi amacıyla temelin kaymasını ölçmek için yükleme doğrultusunda kayma ölçümleri de gerçekleştirilmiştir.

Kolon-kiriş birleşimleri ile kesme kuvveti ve moment etkisi altındaki birleşimleri incelemek amaçlanmıştır. Birleşime gelen kesme kuvveti ve moment arasındaki oranın farklı olduğu durumları incelemek açısından iki farklı kiriş boyu kullanılması düşünülmüştür. Bu sebeple toplamda dört tane üretilen kolon-kiriş birleşim numunelerinin iki tanesi 1.0 m kiriş boyuna sahipken, diğer iki numune 2.0 m kiriş boyuna sahiptir. Böylelikle, kiriş boyu 1.0 m olan numunelerde kesme kuvveti etkisinin fazla olması, kiriş boyu 2.0 m olan numunelerde ise moment etkilerinin daha fazla olması hedeflenmiştir. Kolon-kiriş birleşim deneylerinde kolon yatay duracak şekilde konumlandırılmıştır. Bunun sebebi, deney sırasında kolonun aksenel yükünün ve kiriş ucuna uygulanacak olan yatay yükün uygulanmasını kolaylaştırmak ve güvenlik açısından daha az riskli bir deney düzeneği kurmaktır. Kolona uygulanan aksenel yük deney başlangıcında dinamik etki oluşturmayacak bir şekilde yatay yüklemeye önce ön görülen seviyeye getirilmiştir ve deney boyunca sabit tutulmuştur. Çevrimsel yatay yüklemeler temel-kolon birleşim deneylerinde olduğu gibi bilgisayar kontrollü hidrolik aktüatör ile yer

değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde, kirişin potansiyel plastik mafsallık bölgesinde eğrilik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Eğrilik ölçümü kolon-kiriş birleşim arayüzünden başlayarak 1.5h yüksekliğini 3 eşit parçaya bölecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Burada, h kiriş kesitinin yükleme doğrultusundaki boyutunu göstermektedir. Yine temel-kolon birleşimlerine benzer olarak, kirişin görelî ötelenmesinin hesaplanabilmesi amacıyla kolon-kiriş birleşim bölgesinin yükleme doğrultusundaki ötelenmesinin ölçülmesi amacıyla kayma ölçümü alınmıştır.

Kiriş-kiriş birleşimi numuneleri ile iki farklı durum incelenmek istenmiştir. Bunlardan ilki, salt moment etkisi altındaki uç uca birleşimlerin davranışdır. Bu sebeple açıklığı 4.0 m olan bir monolitik numune ve bir prekast kiriş-kiriş birleşim numunesi üretilmiştir. Açıklığı 4.0 m olan bu kirişler 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutularak birleşim bölgesinde iç kuvvet olarak sadece moment etkisi olması sağlanmıştır. Diğer bir kiriş-kiriş birleşimi numune çifti ise 2.0 m açıklığa sahip 1 monolitik numune ve 1 prekast birleşim numunesidir. Boyu 2.0 m olan kiriş-kiriş birleşim numuneleri 3 noktalı eğilme deneyine tabi tutularak birleşim bölgesinde yüksek kesme kuvveti ve moment etkisi olması sağlanmıştır. Önerilen birleşim sisteminin deprem bölgelerinde yapılacak binalar için de kullanılması öngörüldüğü için, kiriş-kiriş birleşim numuneleri de çevrimsel yüklemeye tabi tutulmuştur.

Deneyisel çalışmalar ile her bir birleşim tipi için test edilen numune çiftlerinin yapısal davranışlarının benzer olduğunu göstermek ve varsa davranış farklılıklarının sebeplerini ortaya koymak ve gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunmak hedeflenmiştir.

Deneyisel çalışmaların yanı sıra, önerilen birleşim sistemlerinin analitik olarak incelenmesine yardımcı olması açısından bir doğrusal olmayan bir sonlu eleman analiz yöntemi geliştirilmesi hedeflenmiştir. Geliştirilen bu analiz yönteminde, beton ve çelik malzemelerin doğrusal olmayan davranışları malzeme deneylerinden de yararlanılarak detaylı olarak elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, beton, donatı ve birleşim araçları (çelik levha, cıvata, perçin başlı donatı) arasındaki etkileşimler de gerçeğe en yakın şekilde modele dahil edilmiştir. Geliştirilen analiz yaklaşımı ile önerilen prekast birleşim yöntemi ve aynı zamanda monolitik betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışlarının deneysel çalışmalarda elde edilen davranışlara benzer şekilde elde edilmesi amaçlanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, prekast yapılar için moment aktaran bir birleşim sistemi önerilmiştir. Bu birleşim sisteminin davranışı monolitik elemanlarla karşılaştırmalı olarak, deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Bu bölümde, gerçekleştirilen deneysel ve analitik çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

2.1. Deneysel Çalışmalar

Doktora çalışması kapsamında önerilen prekast birleşim tekniği ile ilgili deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi için öncelikle prekast deney numunelerinde kullanılacak olan birleşim araçlarının detayları tasarlanmıştır. Daha sonra deney düzeneklerinin tasarımı yapılarak üretimleri gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin ve düzeneklerinin üretiminden sonra deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, prekast çerçeve tipi bir yapının inşası için gerekli olabilecek tüm birleşimlerin deneysel olarak incelenebilmesi adına; temel – kolon birleşimi, kolon – kiriş birleşimi, kiriş – kiriş birleşimi olmak üzere üç farklı tip birleşim tipi seçilmiştir.

Temel – kolon birleşiminin test edilmesi ile kolonun yatay yükler etkisi altında her iki ekseninde (kuvvetli ve zayıf) momente maruz olması hali ayrı ayrı incelenmiştir. Böylelikle, birleşimin deprem etkisi altındaki davranışı hakkında fikir sahibi olmak hedeflenmiştir. Temel – kolon birleşiminde, bir kütle beton (temel) yüzüne ankre edilmiş levha ile çubuk eleman (kolon) ucuna ankre edilmiş levhanın birleştirilmesi suretiyle gerçekleştirilen birleşimin eksenel yük, kesme kuvveti ve eğilme momenti etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.

Kolon – kiriş birleşiminin test edilmesi ile önerilen prekast birleşim tekniğinin yapısal davranış üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca önerilen birleşim yönteminin, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018’de verilen kapasite tasarımı (kolonların kirişlerden daha güçlü olması) yaklaşımına uygun olup olmadığı test edilmiştir. Kolon – kiriş birleşiminde, bir çubuk elemanın (kiriş) ucuna ankre edilen levha ile bir çubuk elemanın (kolon) ortasında bir yüzüne ankre edilmiş levhanın birleştirilmesiyle gerçekleştirilen birleşimin kesme kuvveti ve eğilme momenti etkisi altındaki davranışı incelenmiştir.

Kiriş – kiriş birleşiminin test edilmesinde ise, benzer şekilde, levhalar aracılığı ile uç uca birleştirilen çerçeve elemanlarının davranışı incelenmiştir. Prekast yapı inşası sırasında büyük açıklıkların geçilmesi için kullanılacak uzun kirişlerin iki ya da üç parça olması gerekebileceği için uç uca birleşim yöntemi gerekli olabileceğine kanaat getirilmiştir. Ayrıca çok katlı bir prekast yapının kolonlarının her katta ya da her iki katta bir uç uca birleştirilmesine gerek duyulabilir. Bu sebeple uç uca birleşimi de içeren prekast birleşim deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deney numunelerinin tasarımında, doktora çalışmasının tez önerisi aşamasında gerçekleştirilmiş olan bazı ön çalışmalardan yararlanılmıştır. Bu ön çalışmalarda kolon – kiriş birleşimleri için moment aktaran ve yapısal davranışı birleşime benzeyen yeni bir birleşim tekniği geliştirilmiş. Geliştirilen bu birleşim tekniğine ait faydalı model ve patent başvuruları 2016 yılında Türk Patent ve Marka Kurumu'na yapılmış ve Ekim 2017'de “Çelik Levha-Perçin Başlı Ankraj Çubuğu Birleşim Sistemi” adıyla “TR 2016 13807 Y” numaralı “Faydalı Model” ve Kasım 2018'de “Prefabrik Betonarme Yapı Elemanlarında Moment Aktaran Cıvatalı Birleşim Sistemi” adıyla “TR 2016 11171 B” numaralı “İncelemesiz Patent” belgeleri alınmıştır. Geliştirilen birleşim tekniğinin daha farklı prekast elemanların birleşimindeki performansını deneysel ve analitik olarak test edebilmek amacıyla ve doktora çalışmasının gerçekleştirilmesi amacıyla “TÜBİTAK 1005-Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler” programı kapsamında desteklenen 117M346 numaralı proje 2019 yılında başarıyla tamamlanmıştır.

2.1.1. Ön Çalışma Detayları ve Elde Edilen Bulgular

Pul ve Şentürk (2017) çalışması kapsamında gerçekleştirilen ön çalışmalarda iki adet tam ölçekli deney numunesi tasarlanıp üretilerek test edilmiştir. Birleşimin gerçekleştirilmesinde çelik levhalar ve yüksek dayanımlı bulonlar kullanılmıştır. Gerçekleştirilen prekast birleşimin detayları ve yakın görünümü Şekil 24'te verilmiştir.

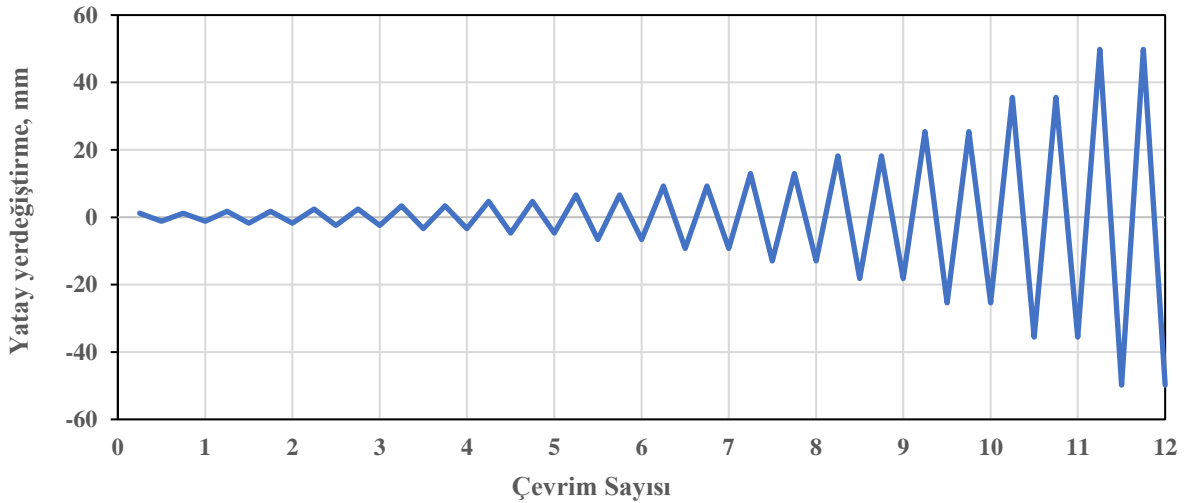
Kolon yüzünde yer alan plakanın betona ankrajı için nervürlü ankraj donatıları kullanılmıştır. Bu ankraj donatıları birleşimden gelen çekme kuvvetinin aktarılacağı levha yüzünde bulunan somunlara ve levhaya kaynaklı olarak birleştirilmiştir (Şekil 27).



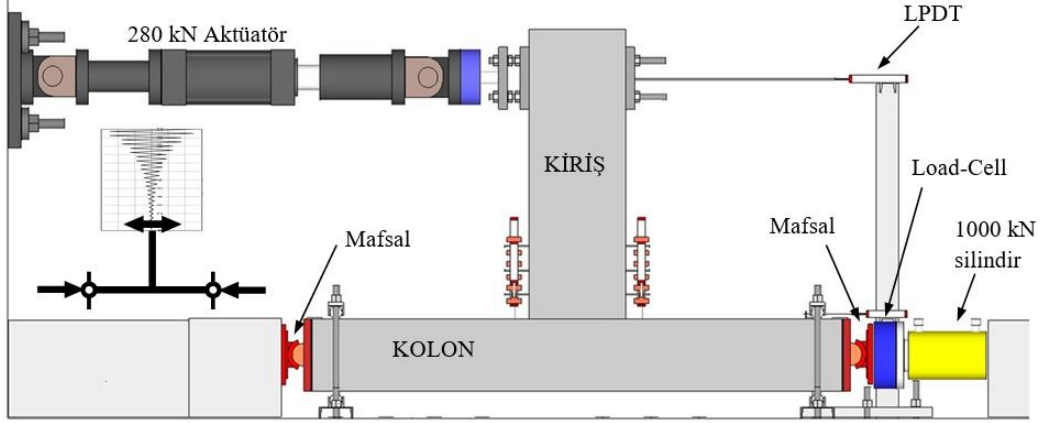
Şekil 27. Kolon yüzü levhası

Kiriş ucunda yer alan levhanın ankrajı için ek ankraj donatısı kullanmanın betonarme davranışı değiştirmesi kaçınılmaz olacağından, bu ankrajın kirişin mevcut boyuna donatılarını kullanmak suretiyle gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Kiriş boyuna donatılarının levhaya kaynaklı olarak birleştirilmesi durumunda donatının kaynaklama bölgesinde gevrekleşeceğinden dolayı hasarın o bölgede başlayacağı düşünüldüğünden kaynaklı birleşim kullanılmamıştır. Bunun yerine “TR 2016 13807 Y” numaralı faydalı modelde önerilen ve detayları ileride verilen perçin başlı donatı-levha birleşimi kullanılmıştır.

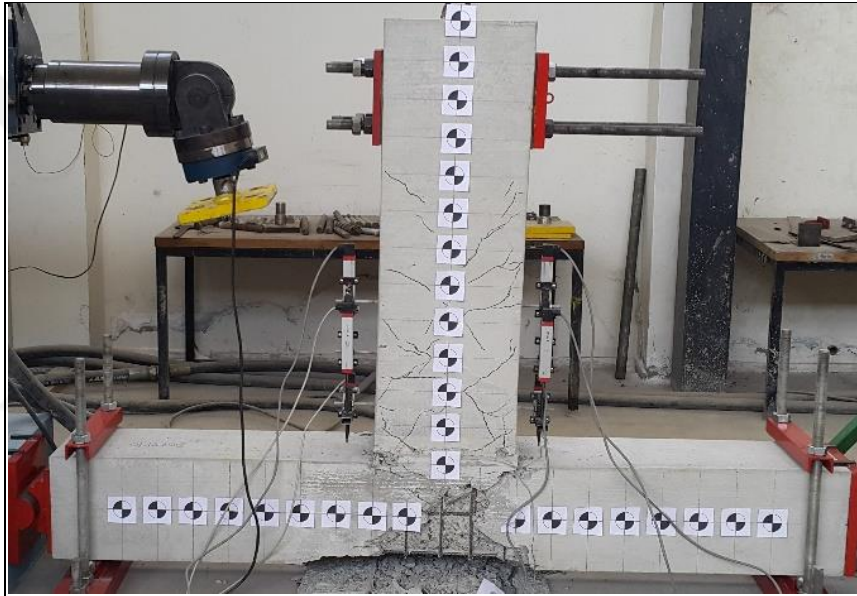
Ön çalışmalar sırasında gerçekleştirilen deneyler için prekast kolon-kiriş elemanlar ve referans numune olması için aynı ölçü ve donatıya sahip monolitik betonarme deney elemanları üretilmiştir. Deneylerde kolona sabit aksenal yük, kirişe ise yarı statik (quasi-static) tersinir artan tepe yer değiştirmesi uygulanmıştır. Tepe yer değiştirmesi için FEMA-461 (2007)’de verilen çift tekrarlı yükleme protokolü uygulanmıştır (Şekil 28). Kolon-kiriş birleşimi deney düzeneği Şekil 29’da deneyler sonrası görünüşler Şekil 30’da deney sonuçları ise Şekil 31’de verilmiştir.



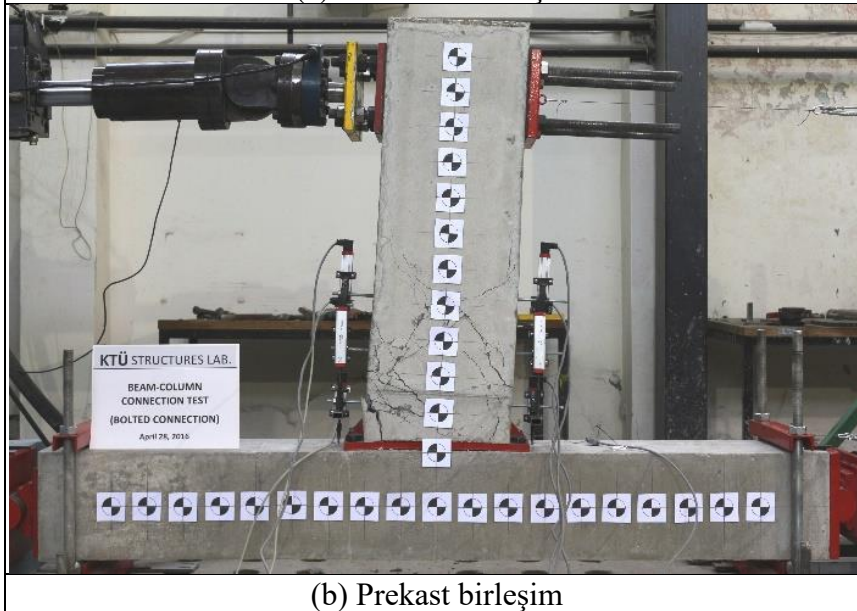
Şekil 28. FEMA-461 (2007) yükleme protokolü



Şekil 29. Kolon-Kiriş birleşimi deney düzeneği

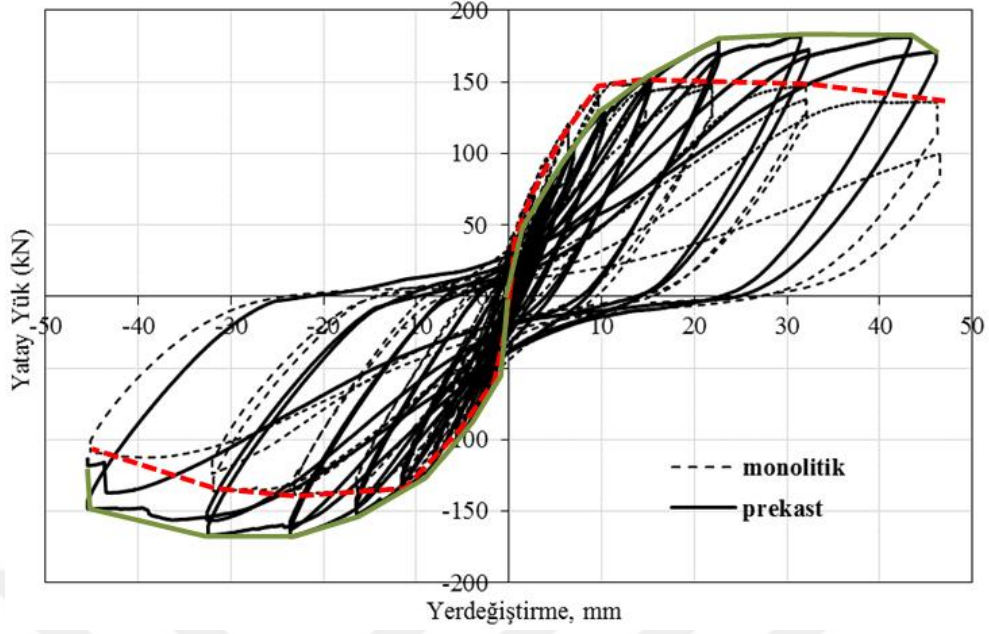


(a) Monolitik birleşim



(b) Prekast birleşim

Şekil 30. Deney sonrası numune görünüşleri



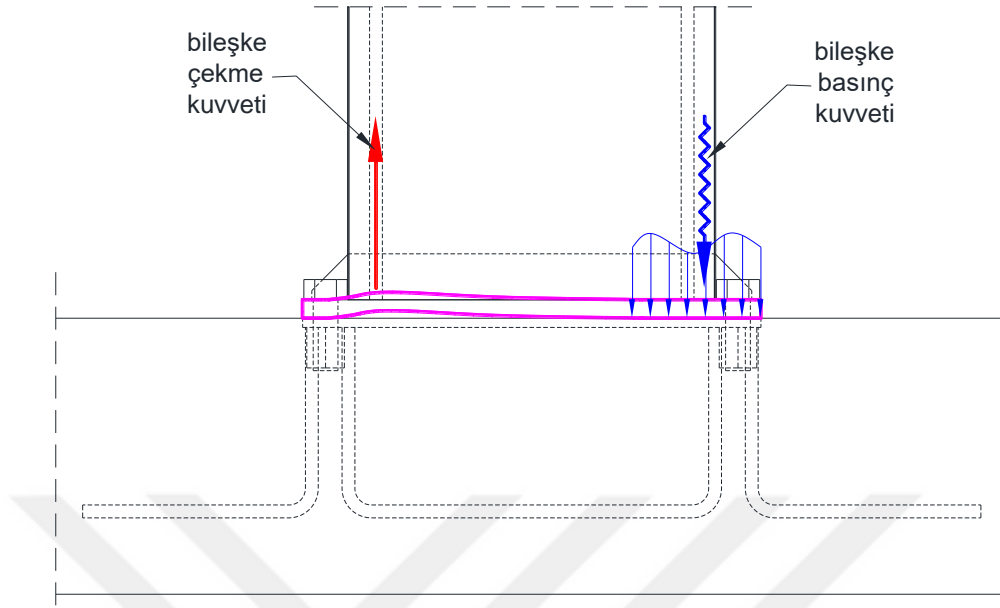
Şekil 31. Kolon-kiriş birleşimi karşılaştırmalı deney sonuçları

Ön çalışmalar sonucunda monolitik ve prekast numune davranışlarının benzer olduğu tespit edilmiştir. Önerilen birleşim sisteminin kolon – kiriş ara yüzündeki tüm kuvvetleri aktardığı tespit edilmiştir.

Prekast numune üzerinde gerçekleştirilen deney sonrasında kolon yüzünde yer alan levhanın kalıcı şekil değiştirme yapmadığı ancak kiriş uç levhasında kalıcı bir şekil değiştirme olduğu görülmüştür (Şekil 32). Ayrıca, kolon yüzü levhası ile kiriş uç levhası ara yüzeyindeki moment aktarımı esnasındaki dengesinin Şekil 33'te gösterildiği gibi olduğu sonucuna varılmıştır. Burada kiriş uç levhasının en çok zorlanan kısmının perçin başlı donatıların bağlandığı bölge olduğu ve berkitme (rijitleştirme) ihtiyacının en çok bu bölgede olduğu görülmektedir.



Şekil 32. Deney sonra kiriş uç levhası görünüşü

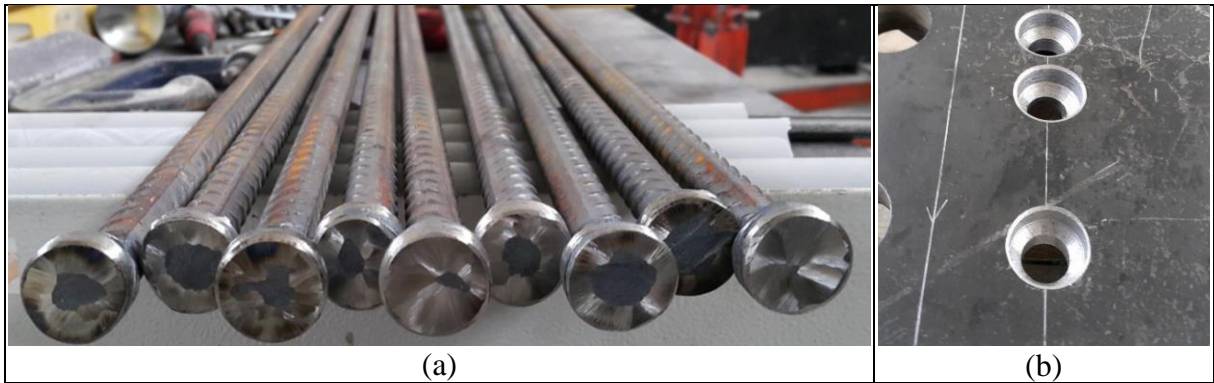


Şekil 33. Birleşim levhaları ara yüzündeki denge durumu

2.1.2. Malzeme Detayları

2.1.2.1. Perçin Başlı Donatı Üretimi

Bu sistemde uç bölgesi ısıl işlemlerle şişirilerek perçin ya da çivi başı şekline getirilmiş donatıların ankraj levhasında açılan aynı ölçüye sahip yuvalara yerleşip tutunarak mekanik ankrajı gerçekleştirmesi söz konusudur. Perçin başlı donatılar ve levha üzerinde yer alan deliklerin görünüşü Şekil 34’te verilmiştir.



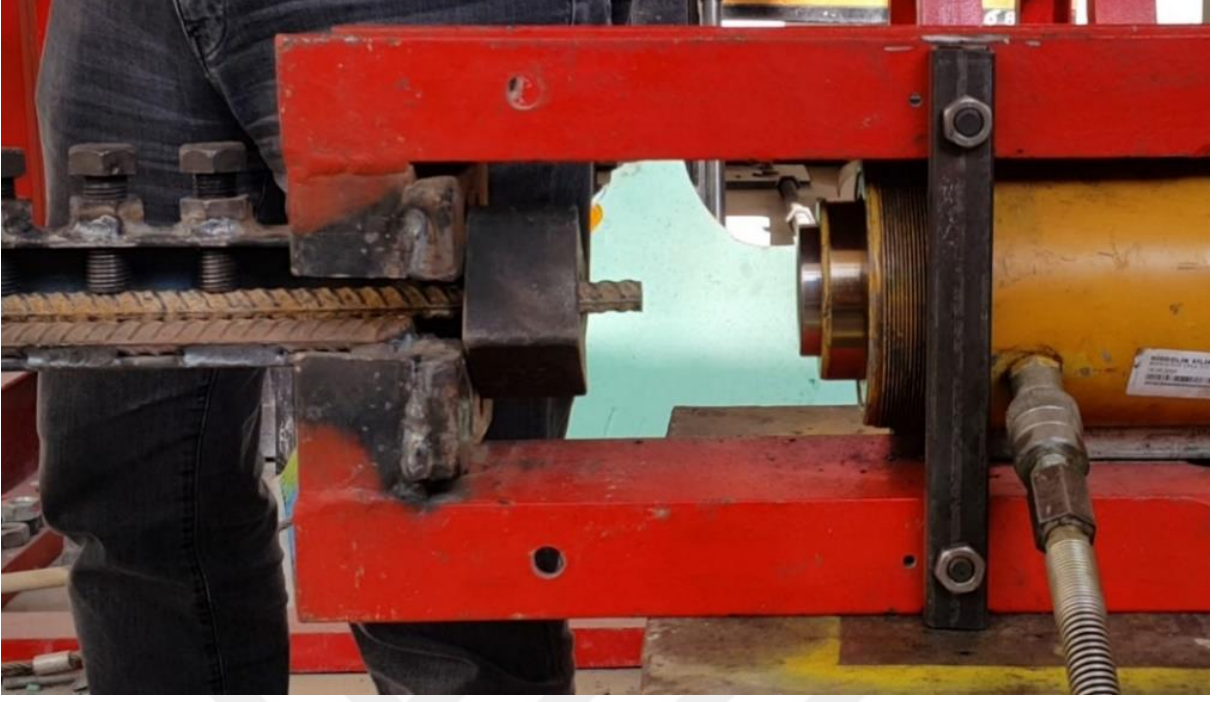
Şekil 34. (a) Perçin başlı donatılar, (b) levha üzerindeki perçin başlı donatıya uygun delikler

Nervürlü betonarme donatılarının ($\phi 14$) birer ucu, tarafımızdan tasarlanıp imal edilen bir hidrolik yükleme aparatı yardımı ile çelik kalıp içine itilip şişirmek suretiyle perçin başı formuna getirilmiştir. Hidrolik yükleme aparatı, donatı sabitlemeye yarayan mengene kısmı ve donatı başını ezmeye yarayan hidrolik silindirin yer aldığı çelik çerçeve kısmından oluşmaktadır (Şekil 35).

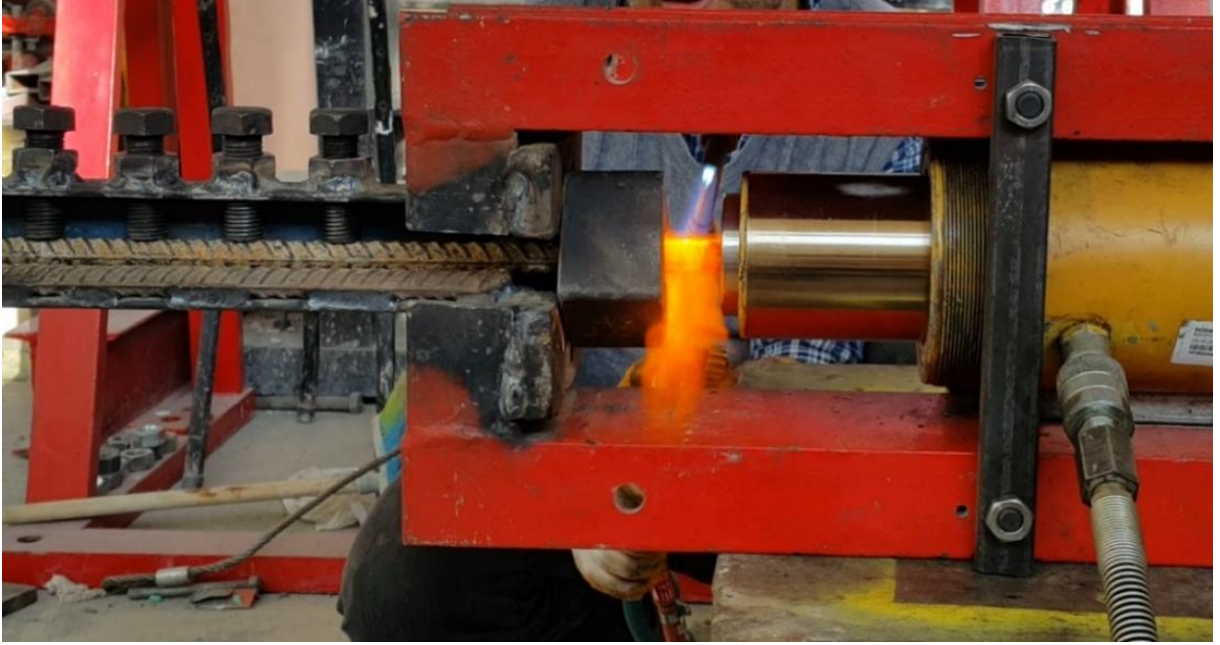


Şekil 35. Perçin başlı donatı üretimi için tasarlanıp imal edilen hidrolik yükleme aparatı

Perçin başlı donatı üretimi için nervürlü donatı çubuğu ilk olarak ucunda kalıp içini doldurmaya yetecek hacmi sağlayacak fazlalık boy bırakılacak şekilde aparatın cıvatalı olarak tasarlanan mengenesine sabitlenmekte ve perçin baş formu deliğe sahip çelik kalıp, donatının ucuna yerleştirilmektedir (Şekil 36). Ardından donatı ucu şaloma alevi yardımıyla sarı renge gelinceye kadar ısıtılmaktadır. Çelik böylece dövülebilir sıcaklığa eriştikten sonra hidrolik silindir yardımıyla donatı ucundaki fazlalık kısmı kalıp içine dolacak şekilde ezilerek şişirme işlemi tamamlanmaktadır (Şekil 37). Ardından perçin başlı donatı kalıptan çıkarılmaktadır. Kalıptan çıkarılmış perçin başlı donatı görünüşü Şekil 38’de verilmiştir. Dövme esnasında çeliğin kalıp içerisinde iyice sıkışması için donatı ucundaki pay fazla bırakılmaktadır. Bu sebeple perçin baş istenilenden 3-4 mm daha yüksek olmaktadır. Bu fazlalık kısım levha ile birleştirildiğinde taşlanarak alınmaktadır. Böylelikle levha yüzü ile perçin başlı donatı yüzü hassas bir şekilde levha ile aynı seviyeye getirilebilmektedir.



Şekil 36. Nervürlü donatının aparata yerleştirilip sabitlenmesi



Şekil 37. Donatı ucunun ısıtılmasını takiben hidrolik güçle kalıba itilmesi



Şekil 38. Ucu perçin başı şekline getirilen nervürlü donatı

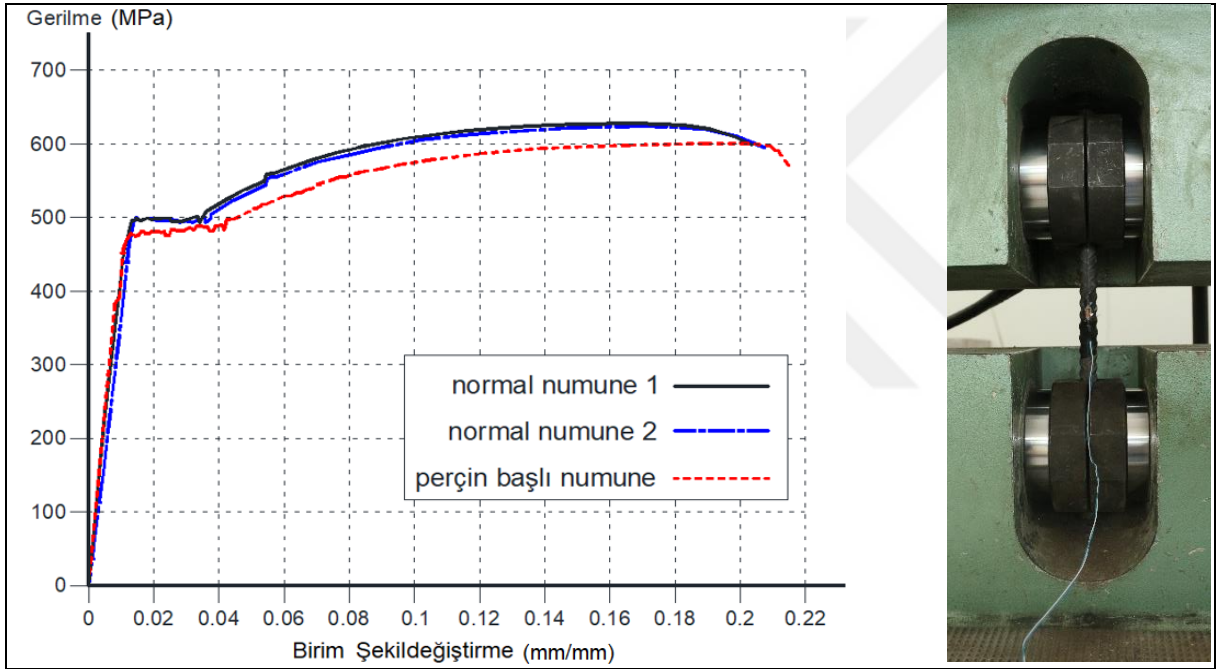
Bu işlem sonrasında kendiliğinden soğumaya bırakılan perçin başlı donatılara çekme testi uygulanmıştır. Universal deney aleti kullanılarak gerçekleştirilen bu deneyler sonucunda perçin başlı donatıların normal donatı davranışı gösterdiği ve hasarın ısıtma işlemi uygulanmış kısımda gerçekleşmediği tespit edilmiştir (Şekil 39). Bu deneyler sonucunda, gerçekleştirilen perçin baş uygulamasının levha ankrajında güvenle kullanılabilmesi kanaatine varılmıştır.



Şekil 39. Perçin başlı donatıya çekme deneyi uygulanışı ve donatının kopma şekli

2.1.2.2. Donatı

Numune üretimlerinde kullanılan tüm donatılar aynı tedarikçiden, bir defada sağlanmıştır. Aynı balyadan alındıklarından, donatılar arasında olabilecek dayanım farkı en aza indirilmiştir. Donatı numuneleri üzerinde Universal deney aletinde gerçekleştirilen çekme deneyi sonuçları Şekil 40'ta verilmiştir. Deneyleerde ortalama akma gerilmesi 491 MPa, ortalama maksimum gerilme ise 618 MPa olarak belirlenmiştir. Perçin başlı donatılarda ise akma gerilmesi 471 MPa ve maksimum gerilme 598 MPa olarak belirlenmiştir. Donatı çekme deney eğrilerinde başlangıç rijitliğinin düşük olmasının, universal deney aleti çenelerinin çekme başlangıcında bir miktar kaydırma yapması nedeniyle ortaya çıktığı söylenebilir.



Şekil 40. Çelik çekme deney sonuçları

2.1.2.3. Beton

Numune üretimlerinde iki sefer beton döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma planı ve koşulları gereği, öncelikle kiriş – kiriş birleşim numunelerinin betonu dökülmüştür. Daha sonra temel – kolon numuneleri ve kolon – kiriş numunelerinin betonlama işlemi tek seferde gerçekleştirilmiştir. Her iki seferde de aynı tedarikçiden temin edilen aynı hazır beton karışımı kullanılmıştır. Monolitik ve prekast numuneler dökümünden sonra 7 gün çelik kalıplarında bekletilmiş ve bu sırada açıkta kalan kısımları örtülerek sürekli ıslak tutulmuştur. Numunelerin

ortalama 23 ± 3 °C sıcaklığa ve $\%75\pm 10$ bağıl neme sahip laboratuvar ortamında kür durumlarını gösteren genel bir görünüş Şekil 41’de verilmektedir. Kullanılan beton karışım detayı

Tablo 1’de verilmiştir. Beton dökümü sırasında alınan 150 mm’lik küp numuneler deney numuneleriyle benzer kür şartlarında bekletilerek eleman deney gününde basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Her iki beton dökümüne ait 28 günlük ve ortalama 90 gün sonraki deney günü basınç dayanımları Tablo 2’de verilmiştir. Betonun standart silindir dayanımının hesaplanması için küp dayanımları 1.25’e bölünmüştür.



Şekil 41. Monolitik ve prekast elemanların kür sırasındaki genel görünümü

Tablo 1. Beton karışım detayları

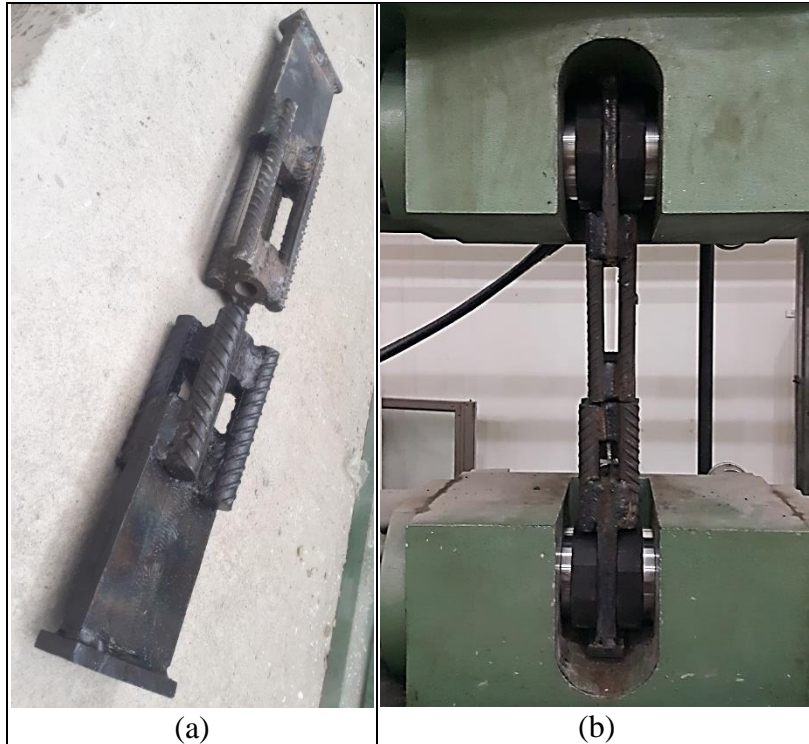
Dmax mm	Su/Çimento Oranı	Çimento kg/m ³	Toplam Su (Doyma suyu dahil) kg/m ³	Toplam Agrega kg/m ³	Hiper Akışkanlaştırıcı kg/m ³
22	0.5	285	170	2000	3.4 (%1.4)

Tablo 2. Beton basınç dayanımları

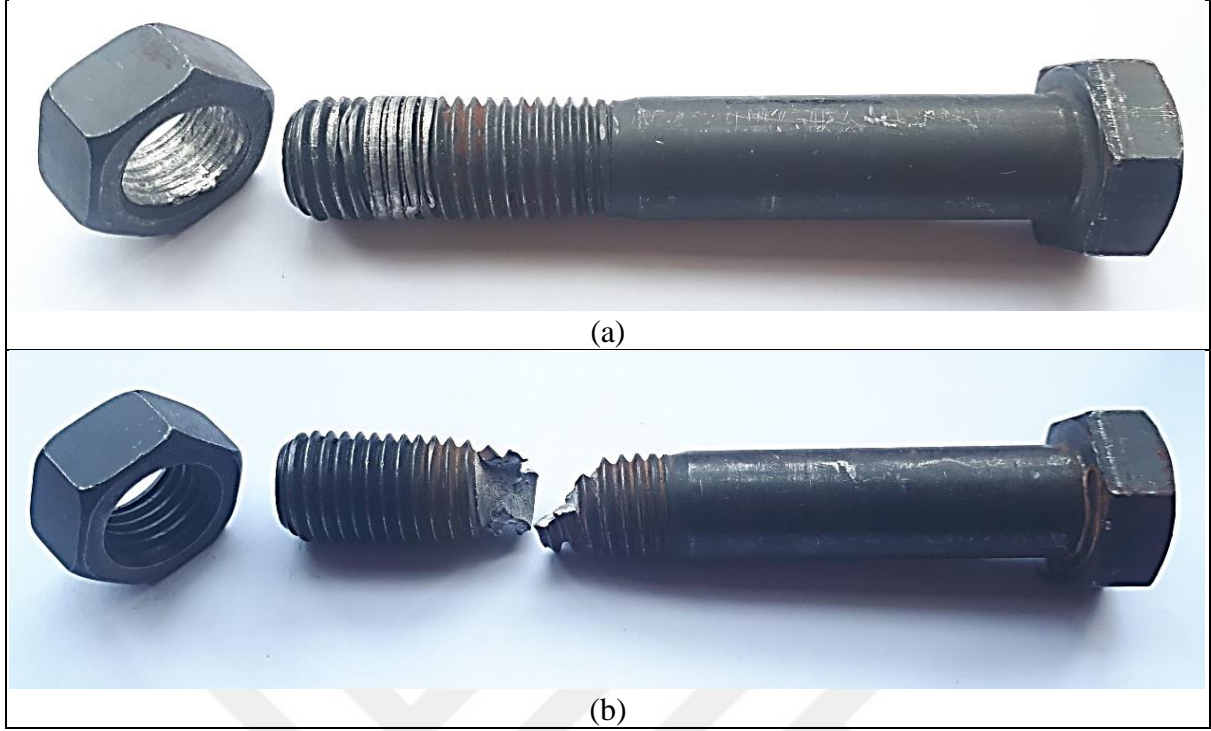
	Üretilen numuneler	28 günlük 150 mm küp dayanımı (MPa)	Deney günü 150 mm küp dayanımı (MPa)	Deney günü 150 mm silindir dayanımı (MPa)
1. döküm	4 adet kiriş – kiriş birleşim numunesi	39.9	50.4	40.3
2. döküm	8 adet temel – kolon ve kolon – kiriş birleşim numunesi	42.2	53.4	42.7

2.1.2.4. Cıvata ve Somunlar

Prekast birleşimlerde M20 anma çapında ve 10.9 kalitede cıvata-somun kullanılmış ve aksel çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Üzerine somun takılmış cıvata-somun takımını birlikte çekebilmek için iki parçalı cıvata çekme aparatı tasarlanarak üretilmiştir (Şekil 42-a). Aparat universal deney aletinin çeneleri arasına yerleştirilerek deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 42-b). Normal dayanımlı somun kullanılması durumunda göçme somun dişlerinin kesilerek sıyrılması ile gerçekleşmiş, buna karşın yüksek dayanımlı somun kullanıldığında ise göçme, beklendiği gibi, cıvatanın diş dibi kesitinden kopması şeklinde oluşmuştur. Normal ve yüksek dayanımlı somunlarla yapılan çekme deneyleri sonrası görünüşler Şekil 43'te verilmiştir.



Şekil 42. (a) Cıvata-Somun birlikte çekme aparatı ve (b) Cıvata çekme deneyi



Şekil 43. (a) Normal somunla deneyi (b) Yüksek dayanımlı somun deneyi

Cıvata-somun takımlarının çekme deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Cıvata kopma gerilmesi hesabı için M20 cıvatanın çekirdek alanı 220 mm^2 olarak kabul edilmiştir.

Tablo 3. Cıvata çekme deneyi sonuçları

Cıvata-Somun Takımı	Kopma Yüğü (kN)	10.9 Kalite Cıvatanın Teorik Akma Gerilmesi (MPa)	Cıvata Kopma Gerilmesi (MPa)	Göçme Modu
M20 cıvata + normal somun	233	900	-	Somunun dış sıyırması (kesilmesi)
M20 cıvata + yüksek dayanımlı somun	268	900	1218	Cıvatanın dış dibinden kopması
M20 cıvata + yüksek dayanımlı somun	283	900	1286	Cıvatanın dış dibinden kopması

2.1.2.5. Levhalar

Prekast elemanların birleşimini sağlamak için kullanılan uç levhalarının üretiminde ST37 (S235) kalitede 20 mm ve 10 mm kalınlıkta çelik levhalar kullanılmıştır. Levhaların tüm kaynakları profesyonel kalitede gaz altı tekniğiyle gerçekleştirilmiştir. Ürettirilen birleşim levhalarının topluca görünümü Şekil 44’te verilmektedir.



Şekil 44. Prekast eleman birleşim levhaları

2.1.3. Temel – Kolon Birleşimi Numuneleri ve Deney Düzenegi

2.1.3.1. Deney Numuneleri Detayları

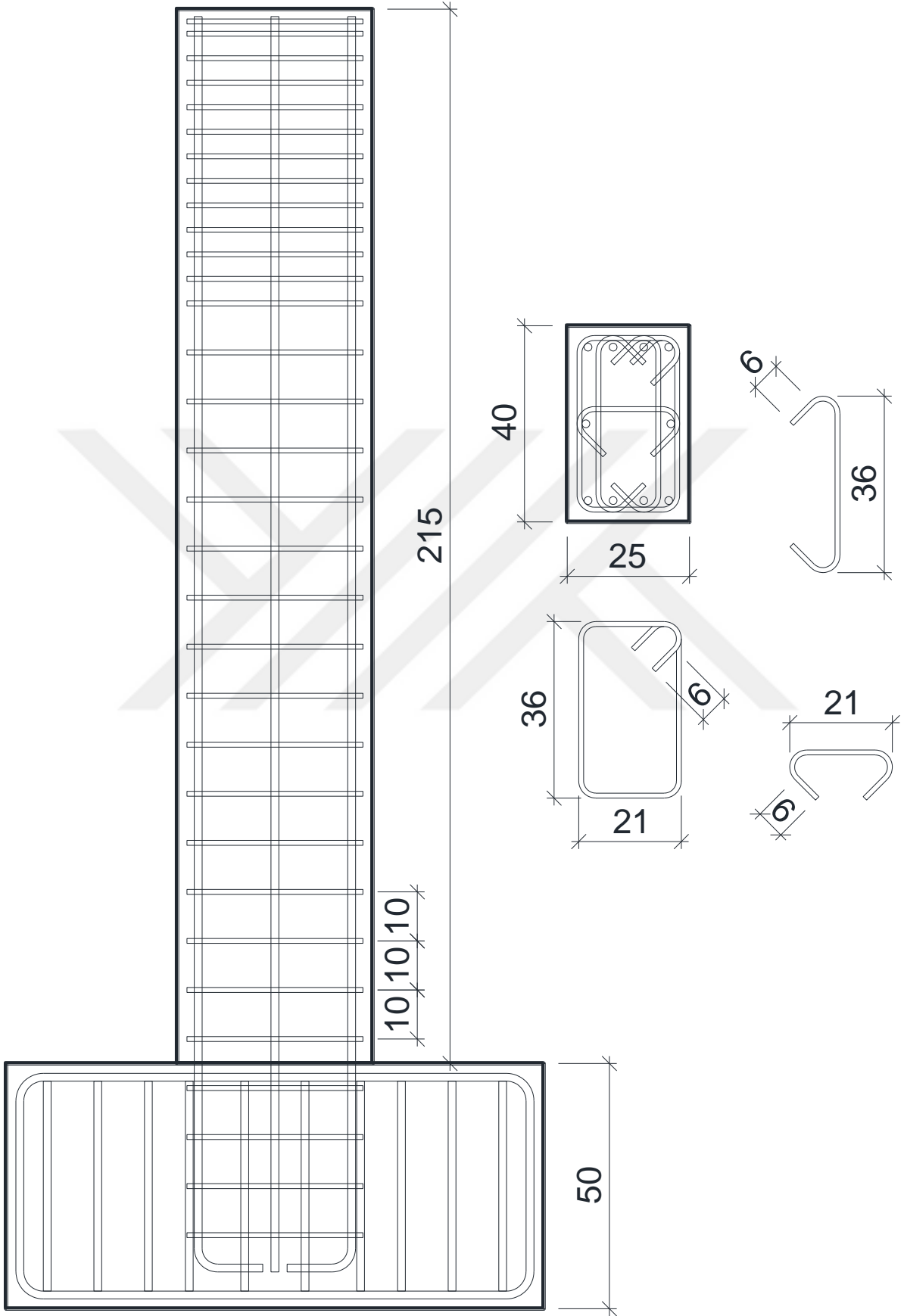
Prekast temel – kolon birleşim sistemi deneyleri için referans monolitik, diğer ikisi ise prekast olmak üzere toplam dört adet 1:1 ölçekli konsol kolon deney numunesi üretilmiştir. Üretilen numuneler uygulamada daha çok tercih edilmesi sebebiyle dikdörtgen kesitli olarak seçilmiştir. Ayrıca dikdörtgen kesit seçimi ile birleşim sisteminin kuvvetli ve zayıf eksen

doğrultusundaki davranışlarını incelemek mümkün olmuştur. Temel – kolon birleşim numunelerine ait detaylar aşağıdaki Tablo 4’te verilmiştir. Burada f_{co} betonun standart silindir dayanımını, A_g ise kolonun net enkesit alanını göstermektedir.

Temel boyutları 50x70x110 cm olarak seçilmiştir. Temel donatıları iki doğrultuda kapalı etriye tipi olacak şekilde 16 mm çapında donatıya sahiptir. Bu donatılar her iki doğrultuda yaklaşık 10 cm aralıkla yerleştirilmiştir. Kolon boyuna donatılarında bindirmeli ek yapılmamıştır. Donatılar temelden kolon ucuna kadar tek parça olarak devam ettirilmiştir. Kolon enine donatıları 1 etriye ve 3 çirozdan oluşacak şekilde ve tüm boyuna donatıların karşılıklı enine donatı ile birbirine bağlamak üzere düzenlenmiştir. Enine donatı aralığı 100 mm olarak seçilmiştir. Yüklemenin etkiyeceği kolon üst bölgesinde enine donatı aralığı lokal hasarın önüne geçilmek istendiği için 50 mm’ye düşürülmüştür. Enine donatı temel içerisinde de devam etmektedir. Deney numunesi detayları Şekil 45’te, örülen donatı iskeleti görünümü ise Şekil 46’da verilmiştir.

Tablo 4. Temel – kolon birleşimi için deney matrisi

Numune Adı	Birleşim Tipi	KOLON					
		Yükleme Doğrultusu	En kesit (cm)	Yükleme Boyu (cm)	Eksenel Yük Düzeyi	Boyuna Donatı (Oranı)	Enine Donatı
FC-Mon-SA	Monolitik	Kuvvetli Eksen	25 x 40	200	$0.15 f_{co} A_g$	10Ø16 (%2)	Ø8 /100
FC-Mon-WA	Monolitik	Zayıf Eksen	25 x 40	200	$0.15 f_{co} A_g$	10Ø16 (%2)	Ø8 /100
FC-Pre-SA	Prekast	Kuvvetli Eksen	25 x 40	200	$0.15 f_{co} A_g$	10Ø16 (%2)	Ø8 /100
FC-Pre-WA	Prekast	Zayıf Eksen	25 x 40	200	$0.15 f_{co} A_g$	10Ø16 (%2)	Ø8 /100



Şekil 45. Temel – kolon birleşimi deney numunesi detayları (monolitik numune, ölçüler: cm)

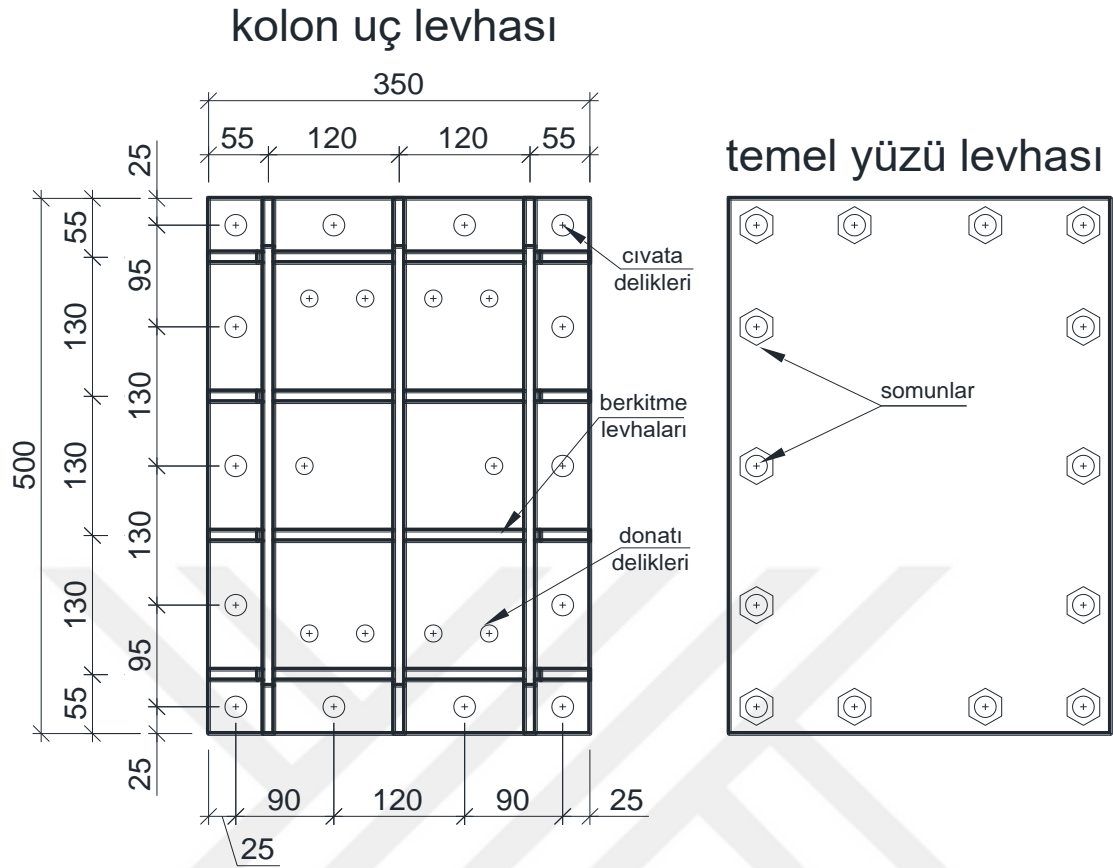


Şekil 46. Temel – kolon birleşimi deney numunesi donatı iskeleti (monolitik numuneler)

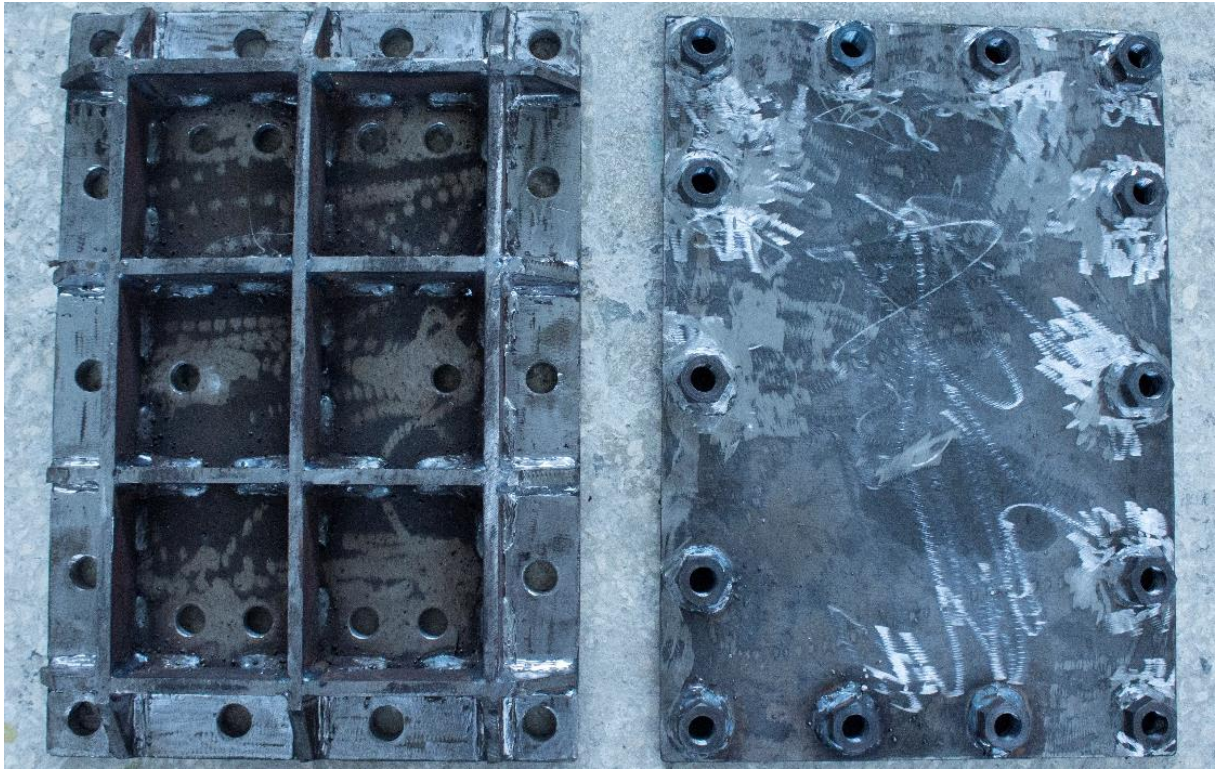
Doktora çalışması kapsamında gerçekleştirilen temel – kolon birleşimi deneylerinde kullanılacak olan prekast birleşim levhaları, ön çalışmadan elde edilen çıktılardan yola çıkarak tasarlanmıştır.

Temel yüzeyine ankre edilecek levhada eğilme beklenmediği için bu levhanın kalınlığı 10 mm olarak seçilmiştir. Kolon alt ucunda yer alacak levhanın kalınlığı perçin başlı donatının davranışını etkileyeceği için ön çalışmadaki levha kalınlığı olan 20 mm seçilmiştir. Perçin başlı donatının ve bağlı olacağı levhanın geometrisinin optimize edilmesi gelecekte yapılacak çalışmalarda planlanmaktadır.

Kolon alt ucunda iki farklı yönden gelebilecek yatay kuvvetlerden dolayı her iki eksen de moment oluşabileceği için levhalar dört kenarında da cıvata olacak şekilde düzenlenmiştir. Ayrıca her iki doğrultuda 10 mm kalınlığında 50 mm yüksekliğinde berkitme levhaları eklenmiştir. Cıvata aralıkları ve berkitme (güçlendirme) levhalarının ara mesafeleri levhada yerel şekil değiştirmeler oluşmaması için her iki doğrultuda da birbirine yakın tutulmuştur. Temel – kolon birleşimi için kullanılan levha detayları Şekil 47’de verilmiştir. Ayrıca temel – kolon birleşimi levhalarının üretimden sonraki görünüşleri Şekil 48’de verilmiştir.



Şekil 47. Temel – kolon birleşim levhaları (Ölçüler: mm)



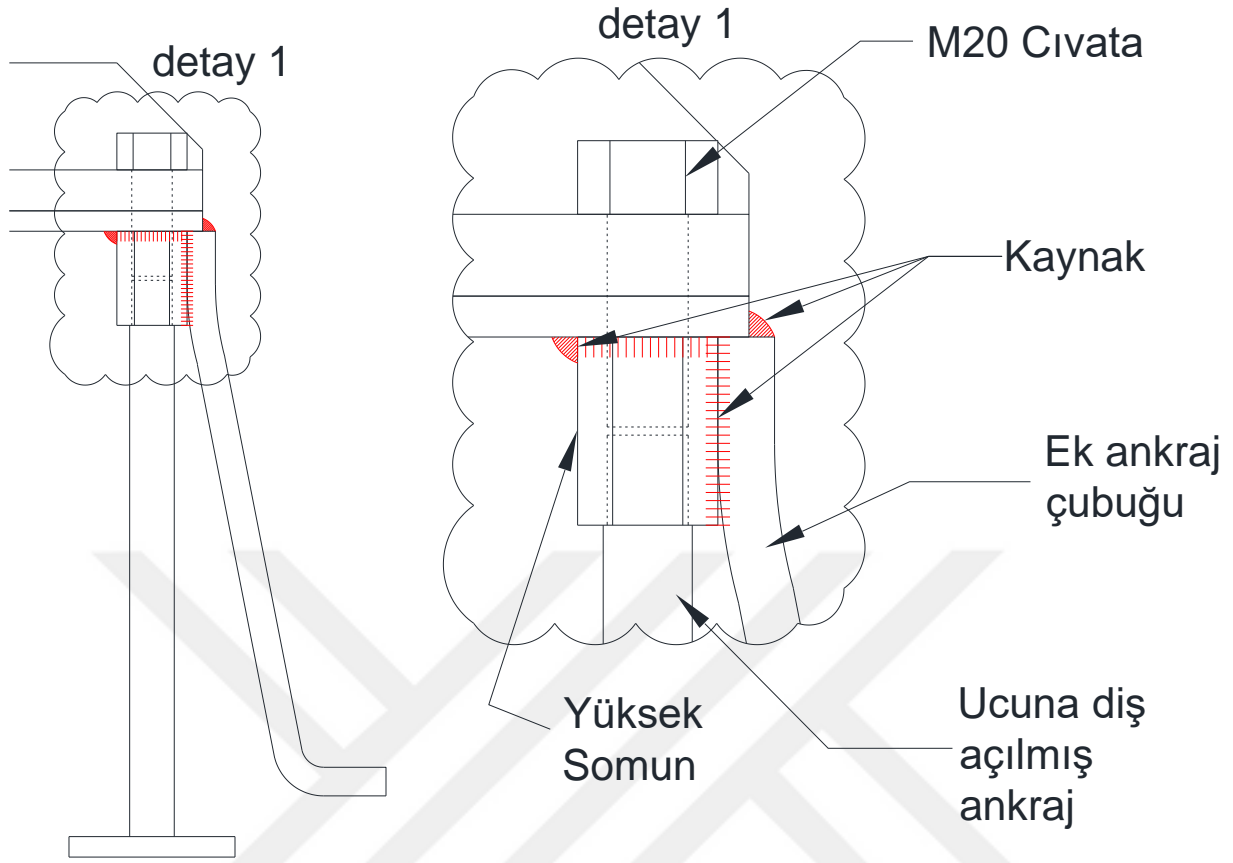
Şekil 48. Temel – kolon birleşim levhalarının görünümü

Kolon boyuna donatılarının kolon uç levhasına bağlantısı için ön çalışmada geliştirilen perçin başlı donatılar kullanılmıştır. Temel yüzüne ankre edilecek levha için cıvatalara bağlı dış açılmış donatılar ve ek olarak cıvatalara kaynatılmış donatılar kullanılmıştır. Temel yüzü levhasının ankraj çubukları takıldıktan sonraki görünüşü Şekil 49’da verilmiştir.



Şekil 49. Temel yüzü levhası için ankraj çubukları

Ucuna M20 vida dişi çekilen nervürlü donatı ankrajlar kolon yüzü levhasının alt kısmında yer alan yüksek somunun yarısına kadar gelmektedir. Yüksek somunun diğer yarısına ise kolon uç levhasının bağlantısı için kullanılan M20 cıvata bağlanmaktadır. Yüksek somun ile levhanın birleşimi kaynaklı olarak gerçekleştirilmiştir. Ek ankraj çubuğu olarak nervürlü donatıdan yapılan ankraj somunun dışına kaynaklı olarak birleştirilmiştir. Ankraj ve cıvata bağlantı detayları Şekil 50’de verilmiştir.



Şekil 50. Ankraj ve cıvata bağlantı detayları

Prekast numunelerin cıvataları 100-600Nm kapasiteli tork anahtarı (Şekil 51) yardımıyla ön gerilmeli olarak kontrollü bir şekilde sıkılmıştır. Uygulanan ön gerilme değeri, üretici firmaların tavsiye ettiği tork tablolarından M20-10.9 kalite cıvatada kuru sıkma için önerilen 580 Nm torkla sıkılmıştır.



Şekil 51. Prekast elemanların birleşiminde kullanılan tork anahtarı

Prekast deney numunesine ait temel ve kolon parçalarının ayrı ayrı görünüşleri Şekil 52’de, monolitik ve prekast Temel-Kolon deney numunelerinin deneye hazır haldeki görünüşleri ise Şekil 53’te verilmiştir.



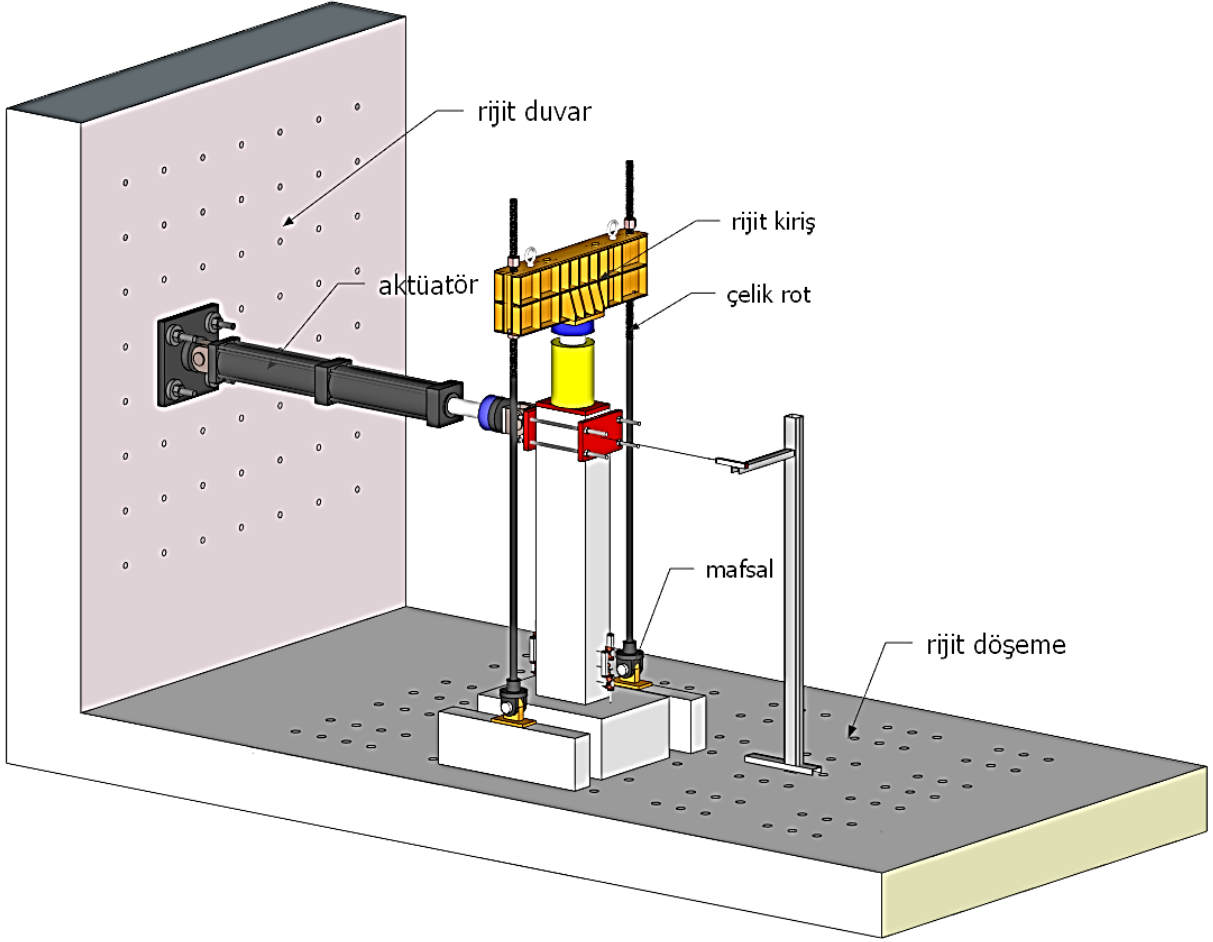
Şekil 52. Prekast numune parçaları birleştirilmeden önce: (a) Temeller, (b) Kolonlar



Şekil 53. Deney numuneleri görünüşleri; (a) monolitik numuneler, (b) prekast numuneler

2.1.3.2. Deney Düzeneği Detayları

Temel – kolon birleşim deneyleri için tasarlanan konsol kolon numuneleri sabit aksenal yük ve tersinir tepe yer değiştirmesi etkisi altında test edilmiştir. Deney düzeneği literatürde çokça rastlanan konsol kolon deney düzeneklerinden yararlanılarak tasarlanmıştır. Deney düzeneği için Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında yer alan rijit delikli döşeme ve duvar kullanılmıştır. Deney düzeneğinin perspektif çizimi Şekil 54’te verilmiştir.



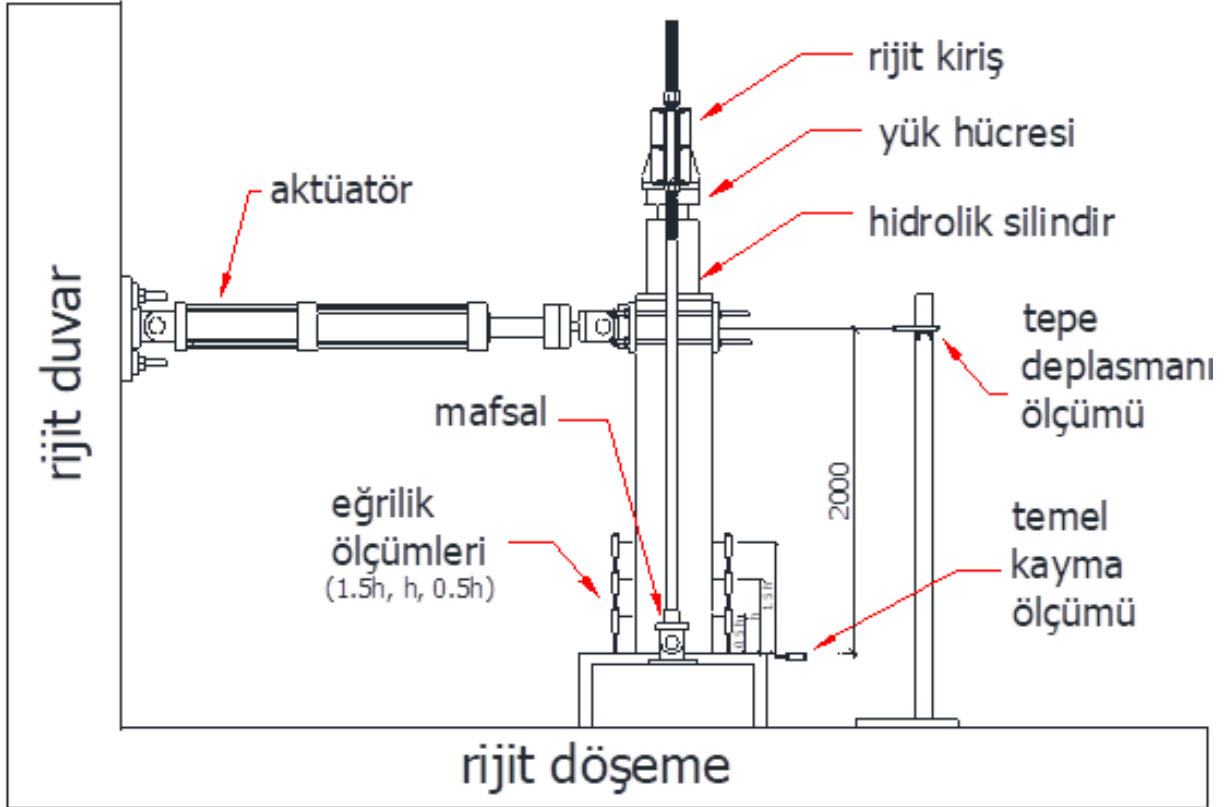
Şekil 54. Temel – kolon birleşimi deney düzeneği

Eksenel yük uygulanması için alt ucu mafsallı çelik rotlara bağlı rijit yük transfer kirişi kullanılmıştır. Kiriş ile kolon ucu arasına yükleme için hidrolik silindir ve yük ölçümü için yük hücresi yerleştirilmiştir. Yatay yük uygulaması için rijit duvara bağlı bilgisayar kontrollü 500 kN yük ve ± 250 mm yer değiştirme kapasitesine sahip servo-hidrolik aktüatör kullanılmıştır. Yatay yük ölçümü için aktüatör ucuna bağlı olan yük 500 kN kapasiteli hücresi kullanılmıştır.

Kolonun yatay yükleme mesafesi temel üstünden itibaren 2000 mm olarak seçilmiştir. Yatay yükleme sonucu oluşan tepe yer değiştirmesi ölçümü için yükleme seviyesinden lineer potansiyometrik yer değiştirme ölçer (Potansiyometrik cetvel, LPDT) kullanılarak yer değiştirme ölçümü yapılmıştır. Ayrıca temel üst seviyesinde temelin kayması ölçülmüştür. Bu sayede kolon üst ucunun temel üst seviyesine bağlı görece ötelenmesini hesaplamak amaçlanmıştır.

Plastik hasarın beklendiği kolon alt bölgesinde eğrilik ölçümü yapılmıştır. Eğrilik ölçümü için de belli düzende yerleştirilen 100 mm kapasiteli yaylı LPDT'ler kullanılmıştır. Eğrilik ölçümü için kolon numunenin yatay yükleme doğrultusuna dik karşılıklı iki yüzüne üç farklı seviyede, üzerine LPDT bağlanacak olan ölçüm rotları monte edilmiştir. Ayrıca temel – kolon ara yüzündeki levhalar arasındaki açılmaların ölçülmesi için kolonun en alt seviyesine açılma ölçümü rotları eklenmiştir.

Eğrilik ölçümü rotları, yükleme doğrultusundaki kesit boyutunu h kabul ederek, temel yüzünden itibaren 0.5h, 1.0h ve 1.5h yüksekliklere yerleştirilmiştir. Örneğin, kuvvetli eksen doğrultusundan yükleme yapılması durumunda eğrilik ölçümleri $h=400$ mm alınarak; 200 mm, 400 mm ve 600 mm seviyelerinden yapılmıştır. Eğrilik ölçümü için yerleştirilen potansiyometrik cetvellerin eksenini kolon yüzünden 100 mm uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Açılma ölçümü için yerleştirilen rotlar temel yüzeyinden 2.5 cm yüksekte ve kolon yüzüne 40 mm mesafede bulunmaktadır. Deney düzeneğinin yandan görünüşü ve tepe yer değiştirmesi, eğrilik ve temel kaymasının kontrolü ölçümleri için LPDT yerleşimi şeması Şekil 55'te verilmiştir.

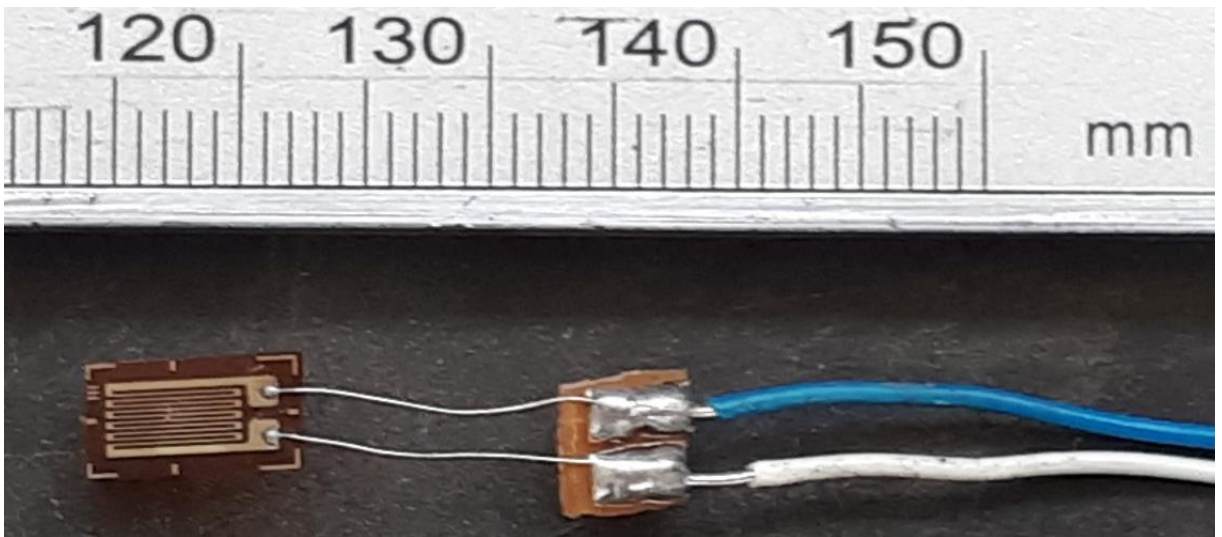


Şekil 55. Deney düzeneğinin yandan görünüşü ve LPDT yerleşimi şeması

Boyuna donatılardaki şekil değiştirme oranlarının ölçülmesi için potansiyel plastik mafsal bölgesinde kolonun bir yüzündeki boyuna donatılardan biri üzerine şekil değiştirme ölçerler (strain-gauge) yapıştırılmıştır. İlk şekil değiştirme ölçer temel yüzünden 0.25h yüksekte olacak şekilde konumlandırılmış, diğerleri de aralarında 0.5h mesafe olacak şekilde yerleştirilmiştir. Donatı üzerine usulüne uygun bir şekilde yapıştırılan 5.0 mm boyundaki 120 Ohm direnç değerindeki birim şekil değiştirme ölçerler betonlama sırasında herhangi bir zarar görmemeleri için özel macun ve bantlarla sargılanmıştır (Şekil 56). Kullanılan 5 mm boyundaki birim şekil değiştirme ölçerlerden bir görünüm Şekil 57’de verilmektedir.

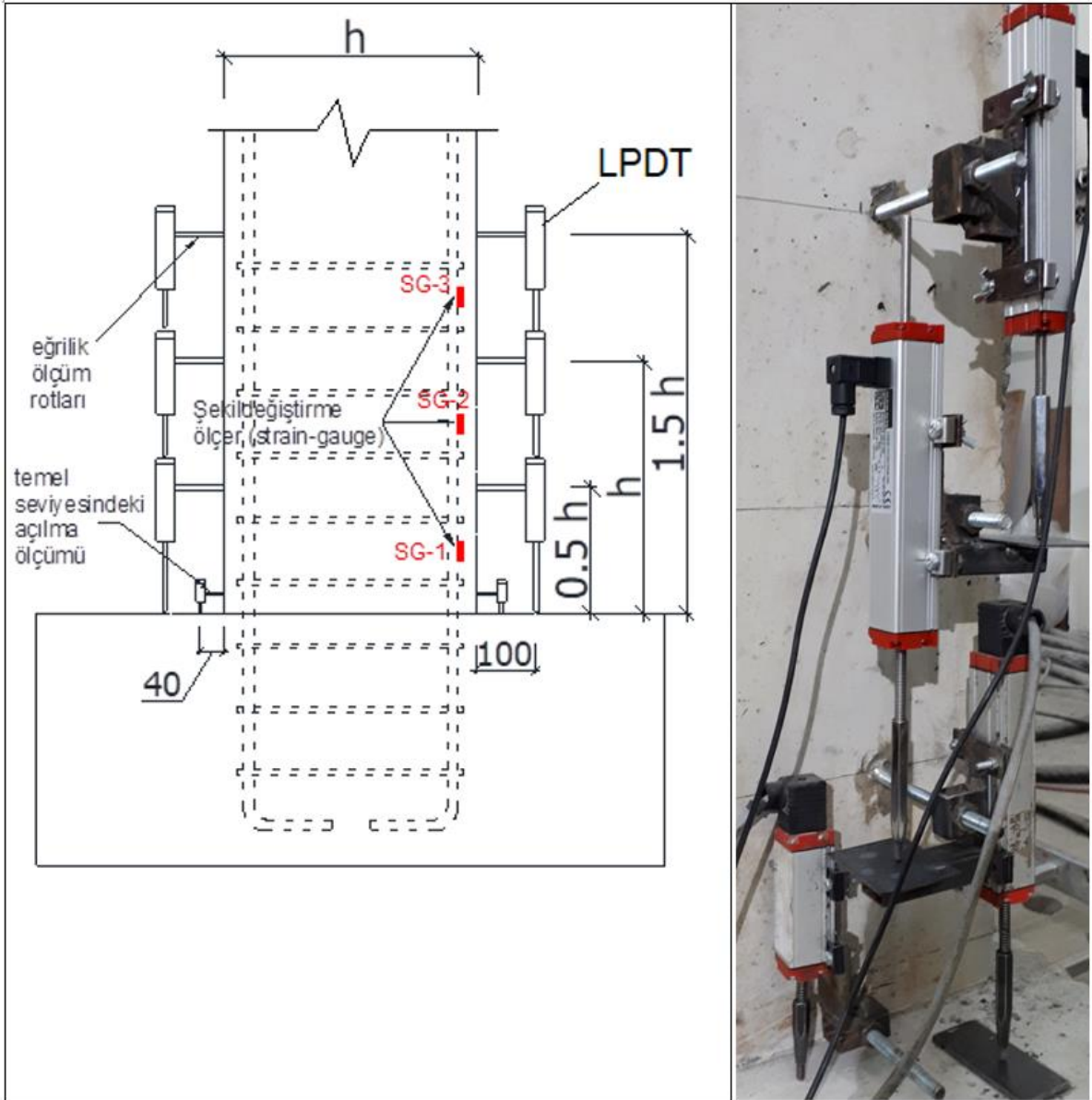


Şekil 56. Donatı üzerine birim şekil değiştirme ölçerlerin (strain-gauge) yapıştırılması



Şekil 57. Kullanılan 5 mm boyunda birim şekil değiştirme ölçerler

Şekil değiştirme ölçerler aşağıdan yukarı doğru SG-1, SG-2 ve SG-3 olarak isimlendirilmiştir. Şekil değiştirme ölçerler, eğrilik ölçümü ve temel – kolon arası açılma ölçümü ile ilgili detaylar Şekil 58’de verilmiştir.



Şekil 58. Kolondaki birim şekil değiştirme ölçerler ve yer değiştirme ölçerlerin yerleşim detayı

2.1.4. Kolon – Kiriş Birleşimi Numuneleri ve Deney Düzenegi

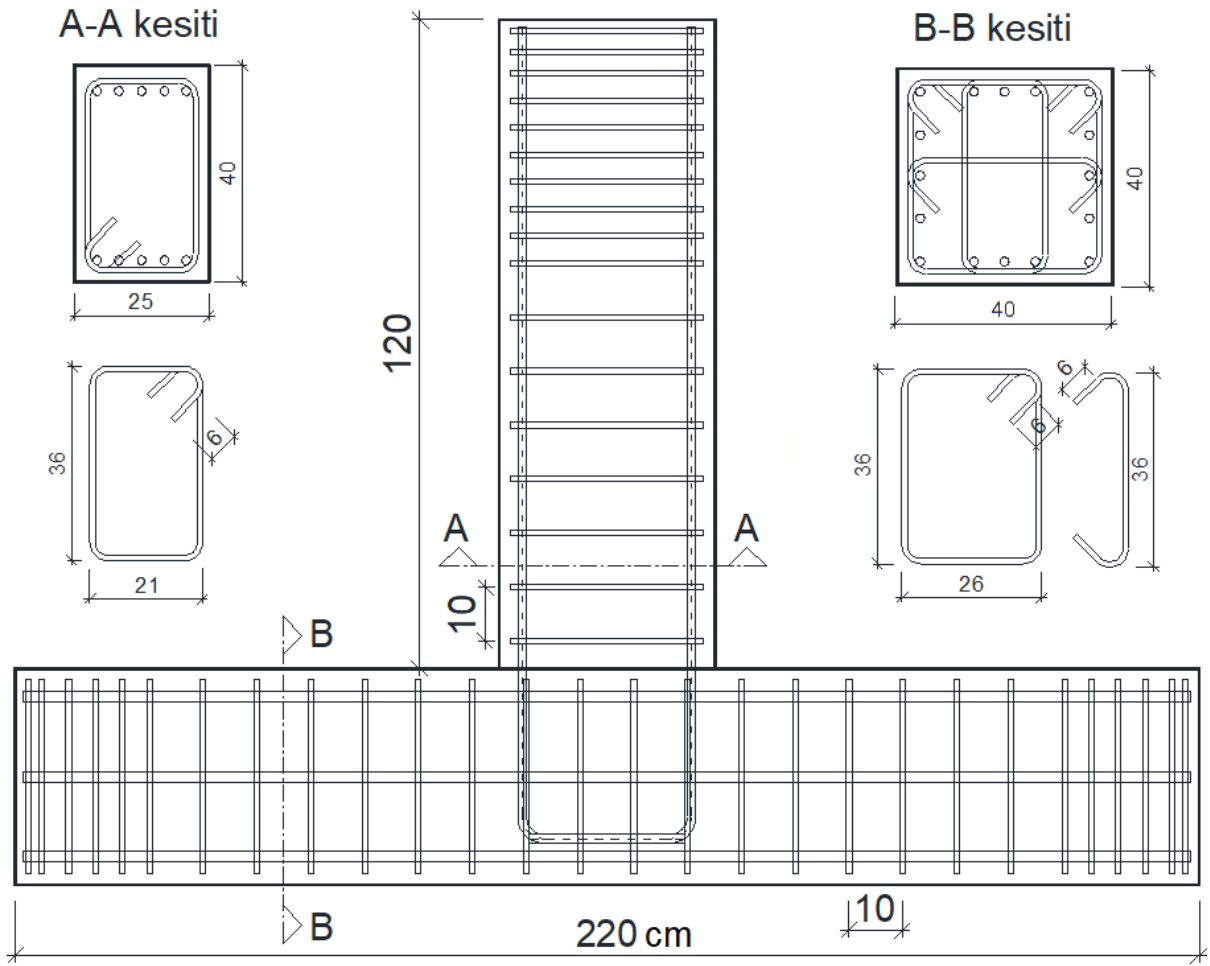
2.1.4.1. Deney Numuneleri detayları

Kolon – kiriş birleşim deneyleri için ikisi referans monolitik, diğer ikisi ise prekast olmak üzere toplam dört adet 1:1 ölçekli deney numunesi üretilmiştir. Önerilen prekast birleşimin farklı moment – kesme kuvveti oranına sahip birleşim bölgelerindeki davranışının incelenmesi için kiriş boyları 1.0 m ve 2.0 m olacak şekilde iki farklı kiriş boyu tercih edilmiştir. Kolon – kiriş birleşim numunelerine ait detaylar Tablo 5’te verilmiştir.

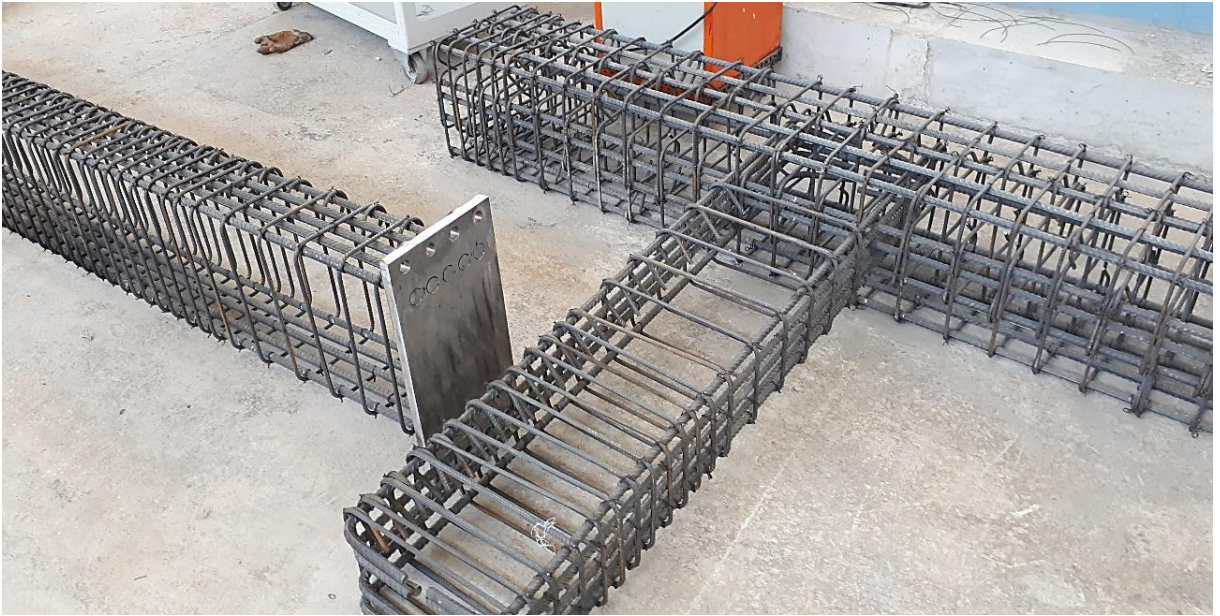
Tablo 5. Kolon – kiriş deney numuneleri için deney detayları

Numune Adı	Birleşim Tipi	KOLON					KİRİŞ			
		Kesit (cm)	Eksenel Yük düzeyi	Boy (cm)	Boyuna Donatı (Oranı)	Enine Donatı	Kesit (cm)	Boy (cm)	Boyuna Donatı (Oranı)	Enine Donatı
CB-Mon-1m	Monolitik	40x40	0.1 $f_{co} A_g$	200	16Ø16 (%2)	Ø8/100	25x40	100	10Ø16 (%2)	Ø8/100
CB-Mon-2m	Monolitik	40x40	0.1 $f_{co} A_g$	200	16Ø16 (%2)	Ø8/100	25x40	200	10Ø16 (%2)	Ø8/100
CB-Pre-1m	Prekast	40x40	0.1 $f_{co} A_g$	200	16Ø16 (%2)	Ø8/100	25x40	100	10Ø16 (%2)	Ø8/100
CB-Pre-2m	Prekast	40x40	0.1 $f_{co} A_g$	200	16Ø16 (%2)	Ø8/100	25x40	200	10Ø16 (%2)	Ø8/100

Deneyde yükleme protokolü tersinir tekrarlı olduğundan, kirişlerin donatıları simetrik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Kirişlerde tek (iki kollu) etriye kullanılmıştır. Kolonda ise çift (dört kollu) etriye ve bir çiroz kullanılmıştır. Etriye aralıkları kolonda ve kirişte 100 mm olarak seçilmiştir. Yükleme yapılabileceği kiriş üst bölgesinde ve kolon uç bölgelerinde etriyeler sıklaştırılmıştır. Yatay yükleme mesafesi kolon yüzünden 100 cm olan kısa kirişli numunede kiriş boyu 120 cm olarak düzenlenmiştir. Yükleme mesafesi 200 cm olan numunede ise kiriş boyu 220 cm olarak düzenlenmiştir. Deney numunesi detayları Şekil 59’da örülen donatı iskeleti görünümü ise Şekil 60’te verilmiştir.



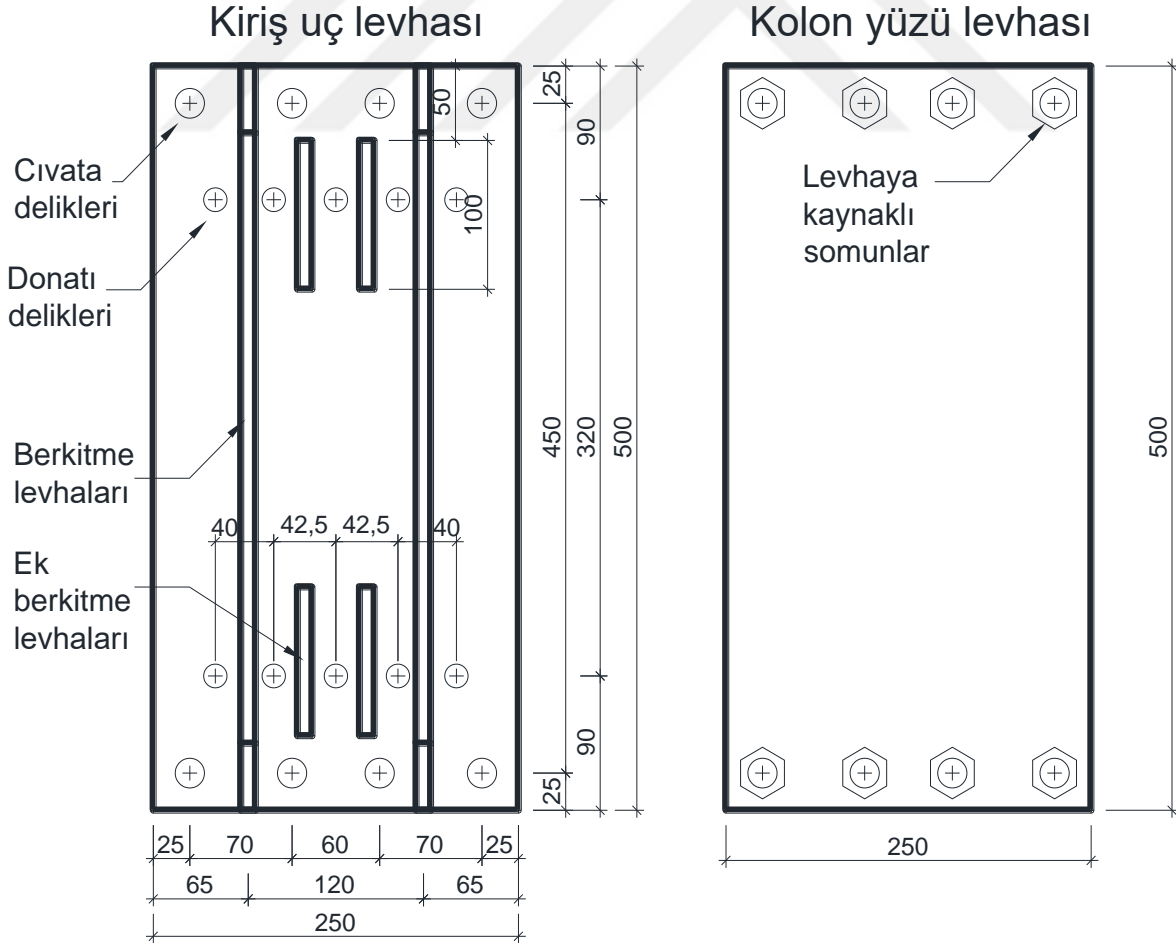
Şekil 59. Kolon – kiriş birleşimi deney numunesi detayları (1.0 m kirişli monolitik numune)



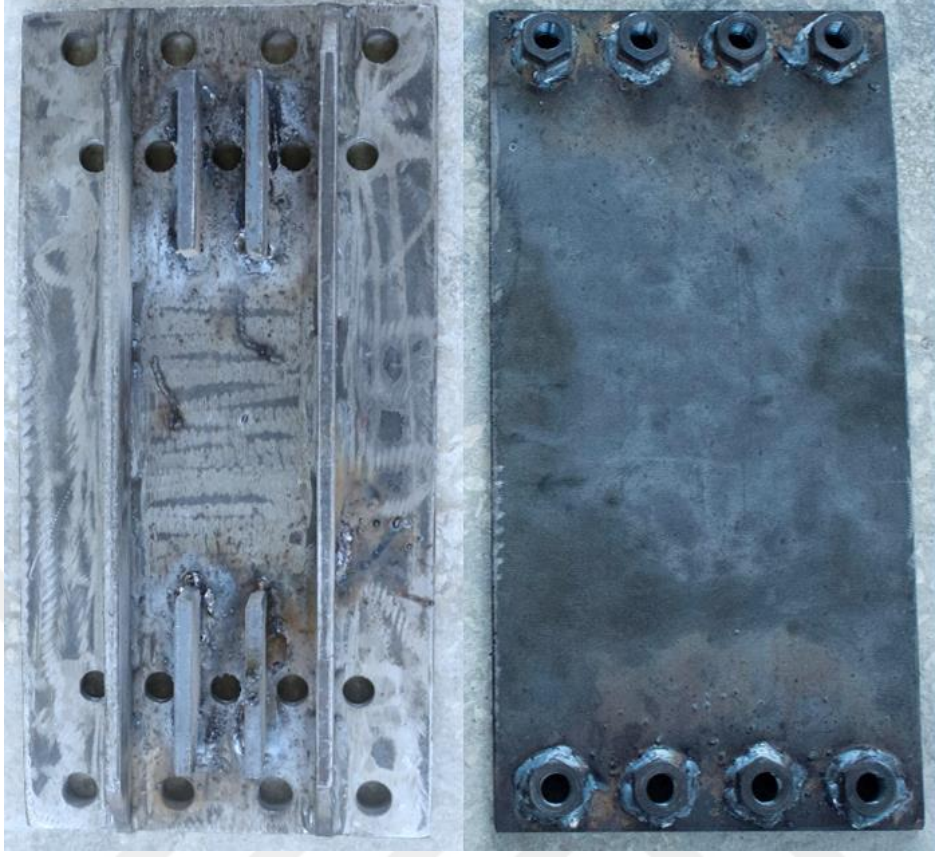
Şekil 60. Kolon – kiriş birleşimi deney numunesi donatı iskeleti

Prekast kolon – kiriş numunelerinin birleşim levhaları, ön çalışmadan elde edilen sonuç ve gözlemlerden yola çıkarak tasarlanmıştır.

Kolon yüzüne ankre edilecek levhada eğilme beklenmediği için bu levhanın kalınlığı 10 mm olarak seçilmiştir. Kiriş alt ucunda yer alacak levhanın kalınlığı perçin başlı donatının davranışını etkileyeceği için ön çalışmadaki levha kalınlığı olan 20 mm seçilmiştir. Ayrıca eğilme doğrultusunda 10 mm kalınlığında ve 50 mm yüksekliğinde berkitme levhaları eklenmiştir. Kiriş uç levhası tek doğrultuda eğilmeye maruz kalacağı için tek yönde berkitme levhası kullanılmıştır. Yine aynı sebepten dolayı levha, iki kenarında cıvatalar olacak şekilde tasarlanmıştır. Berkitmeler, cıvata çapları ve cıvata aralıkları ön çalışmalarda edinilen tecrübelerle göre belirlenmiştir. Ön çalışmada perçin başlı donatı deliklerinin o kesiti çok zayıflattığı ve o kesitin en çok zorlanan kesit olduğu sonucuna varıldığı için bu bölgeye ek berkitme levhaları dahil edilmiştir. Kolon – kiriş birleşimi için kullanılan levha detayları Şekil 61’de verilmiştir. Ayrıca kolon – kiriş birleşim levhalarının üretimden sonraki görünüşleri ise Şekil 62’de verilmiştir.



Şekil 61. Kolon – kiriş birleşim levhalarının detayları



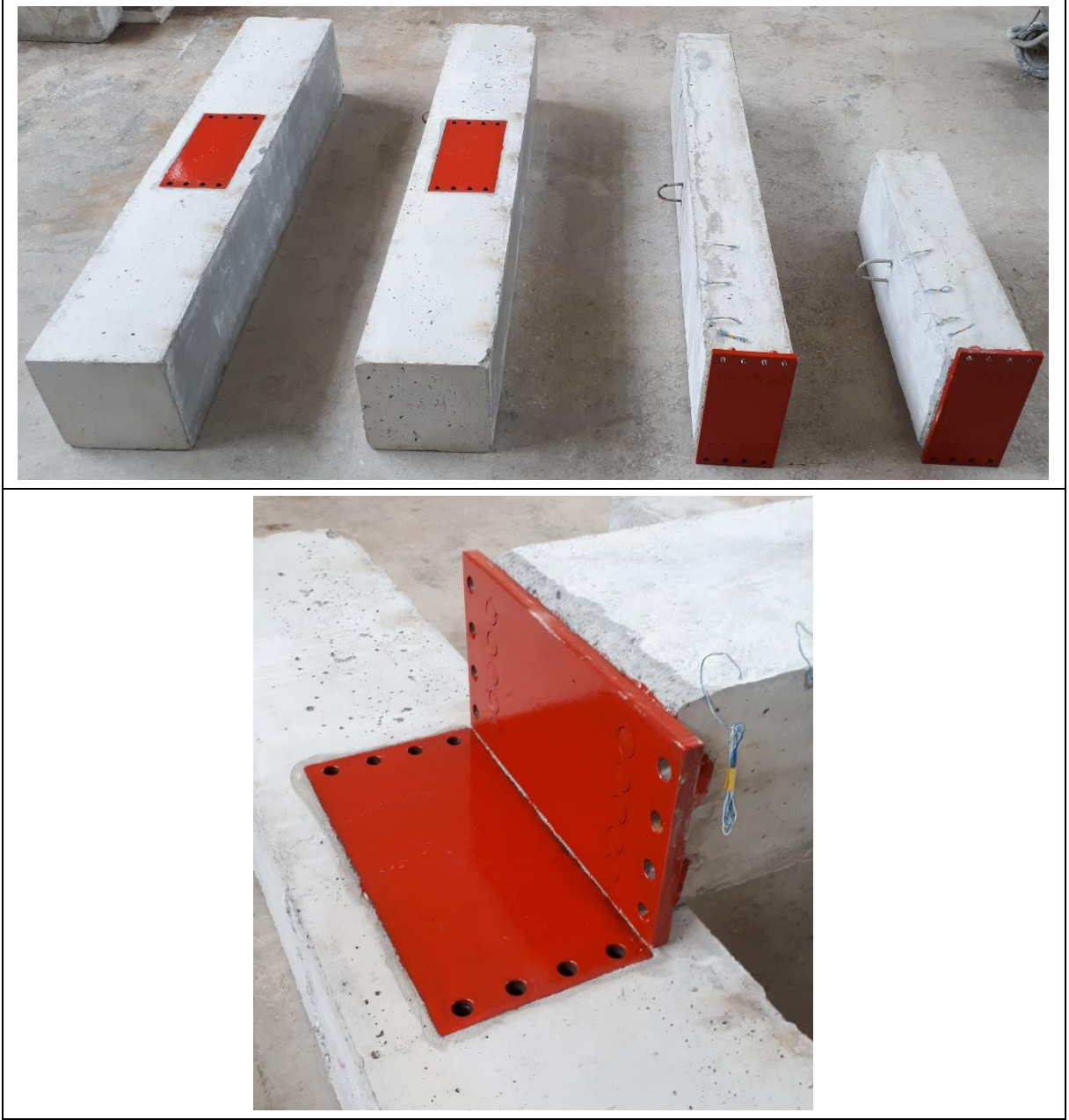
Şekil 62. Kolon – kiriş birleşim levhalarının görünümü

Kiriş boyuna donatı ile kiriş uç levhasının birleşimi perçin başlı donatılar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kolon yüzü levhasının ankrajı için levha üzerinde yer alan yüksek somunlara bağlanan ucuna M20 diş açılmış nervürlü donatılar ve ek ankraj çubukları kullanılmıştır. Kolon yüzü levhasının ankraj çubukları Şekil 63'te verilmiştir.



Şekil 63. Kolon yüzü levhası için ankraj çubukları

Ucuna M20 vida dişi açılmış ankraj çubukları levha yüzünde yer alan yüksek somunların yarısına kadar gelmektedir. Diğer yarısına ise kiriş uç levhasının bağlantısı için kullanılan cıvatalar gelmektedir. Ayrıca ankrajın güçlendirilmesi için ek ankraj çubukları yüksek somunların yanlarına kaynaklı olarak birleştirilmiştir. Ankraj ve cıvata bağlantı detayı daha önce Şekil 50’de verilmişti. Prekast deney numunelerine ait kolon ve kiriş parçalarının ayrı ayrı görünüşleri Şekil 64’te, monolitik ve prekast Kolon-kiriş deney numunelerinin deney öncesi görünüşleri ise Şekil 65’te verilmiştir.



Şekil 64. Prekast kolon ve kiriş numune parçaları birleştirilmeden önce

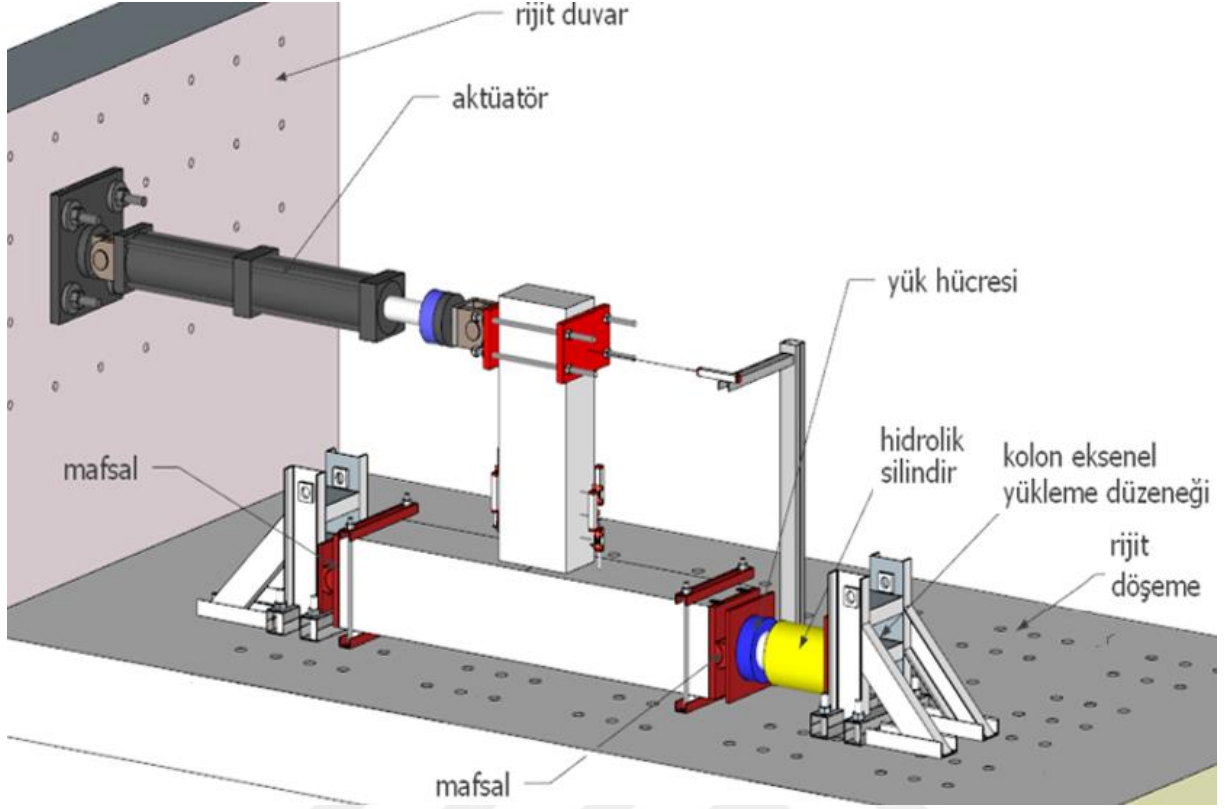


Şekil 65. Deney numuneleri görünüşleri; (a) monolitik numuneler, (b) prekast numuneler

2.1.4.2. Deney Düzeneği Detayları

Kolon – kiriş birleşim testleri için kolonun sabit aksenal yük etkisi altında olduğu ve kirişin yatay yer değiştirme etkisi altında olduğu bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzeneğinin 3 boyutlu çizimi Şekil 66’da verilmiştir.

Kolona aksenal yük uygulanması için rijit döşemeye sabit dayanaklar yerleştirilmiştir. Kolon uçlarının dönme serbestliğine sahip olması için yükleme doğrultusunda dönmeye müsaade eden mafsallar kullanılmıştır. Kolon uç kısımları düşey doğrultuda tutulması için rijit döşemeye rotlar yardımıyla bağlanmıştır. Kolon aksenal yükü için hidrolik silindir ve el pompası kullanılmıştır. Aksenal yük ölçümü için hidrolik silindir önüne yük hücresi koyulmuştur. Rijit duvara bağlı bilgisayar kontrollü aktüatör yardımıyla kiriş tepesine yer değiştirme uygulanmıştır. Uygulanan yatay yükün ölçümü için aktüatörün ucunda yer alan yük hücresinden faydalanılmıştır.

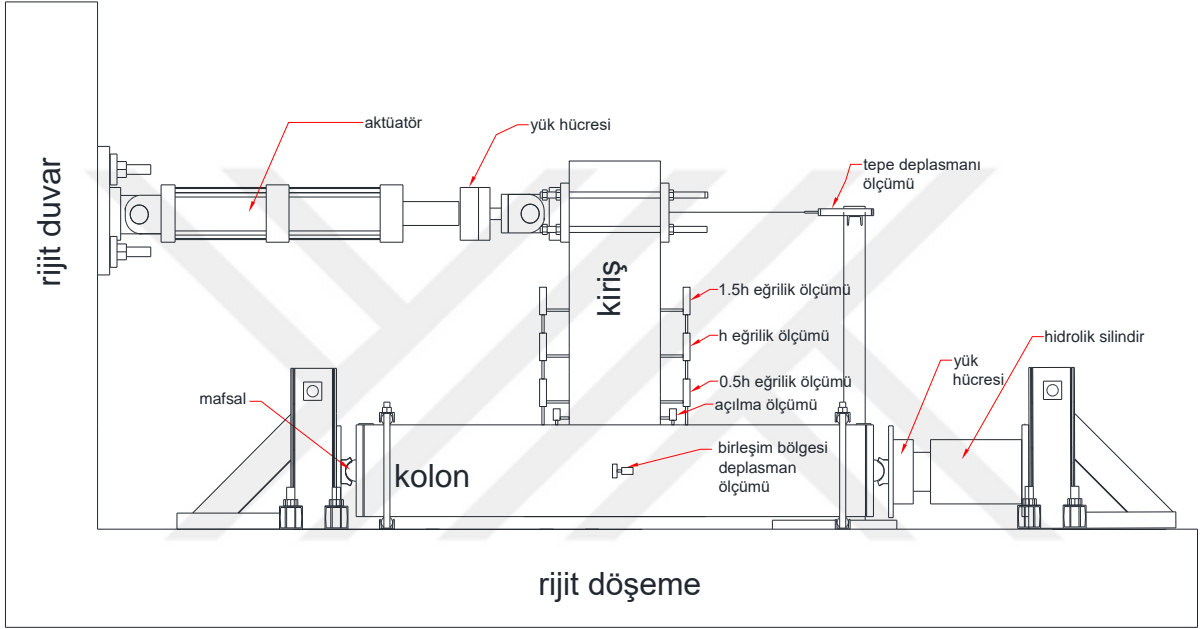


Şekil 66. Kolon-kiriş birleşimi deney düzeneği

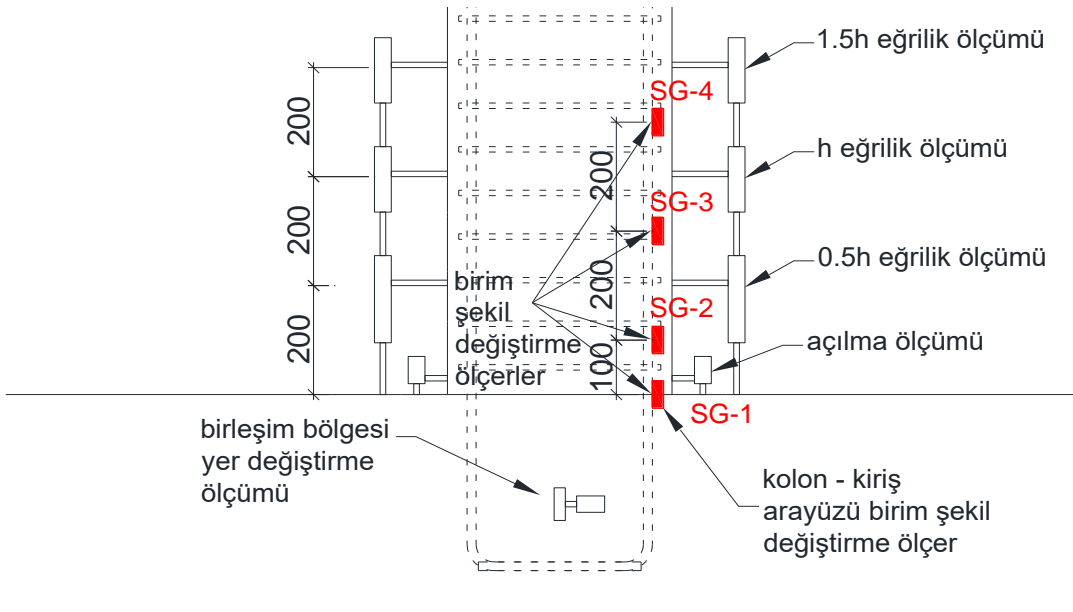
Deney sırasında lineer potansiyometrik yer değiştirme ölçerler (LPDT) yardımıyla yer değiştirmeler ölçülmüştür. Kirişin yatay yükleme noktası hizasından yatay yer değiştirmesi ölçülmüştür. Ayrıca, kolonun orta noktasından (birleşim bölgesinden) de yükleme doğrultusunda yer değiştirme ölçüm alınmıştır. Bu sayede kiriş ucunun birleşim bölgesine göre bağıl yer değiştirmesini hesaplamak hedeflenmiştir.

Kirişin potansiyel plastik mafsal bölgesinden eğrilik ölçümü yapılmıştır. Eğrilik ölçümü için numunenin karşılıklı iki yüzüne üç farklı seviyede ölçüm rotları monte edilmiştir. Eğrilik ölçümü rotları, yükleme yönüne göre kesit yüksekliğini h kabul ederek, $0.5h$, h ve $1.5h$ yüksekliklere yerleştirilmiştir. Ayrıca kolon – kiriş ara yüzündeki açılmaların ölçülmesi için kirişin en alt seviyesine açılma ölçümü rotları eklenmiştir. Eğrilik ölçümü için yerleştirilen potansiyometrik cetvellerin eksenini kiriş yüzünden 100 mm uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Açılma ölçümü için yerleştirilen rotlar temel yüzeyinden 2.5 cm yüksekte ve kolon yüzüne 40 mm mesafede bulunmaktadır. Kiriş yükleme boyu 1.0 m olan numune için deney düzeneğinin yandan görünüşü Şekil 67’de verilmiştir. Kiriş yüksekliği 2.0 m olan numunede aktüatör ve tepe yer değiştirmesi ölçüm düzeneği 1.0 m yükseltilmektedir. Diğer ölçümler aynı kalmaktadır.

Boyuna donatılardaki birim şekil değiştirme oranlarının ölçülmesi için potansiyel plastik mafsal bölgesinde kirişin bir yüzündeki boyuna donatılardan bir tanesi üzerine birim şekil değiştirme ölçerler yapıştırılmıştır. Birim şekil değiştirme ölçerler, eğrilik ölçümü ve kolon – kiriş arası açılma ölçümü ile ilgili detaylar Şekil 68’de verilmiştir. Prekast numunelerde kolon – kiriş ara yüzünde olması gereken birim şekil değiştirme ölçer (strain-gauge) kiriş donatısının mümkün olan en alt kısmına yapıştırılmıştır. Birim şekil değiştirme ölçerler en alttan yukarı doğru SG-1, SG-2, SG-3 ve SG-4 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 67. Deney düzeneği yandan görünüşü ve LPDT yerleşimi şeması



Şekil 68. Kirişte birim şekil değiştirme ölçerler ve yer değiştirme ölçerlerin yerleşim detayı

2.1.5. Kiriş – Kiriş Birleşimi Numuneleri ve Deney Düzenegi

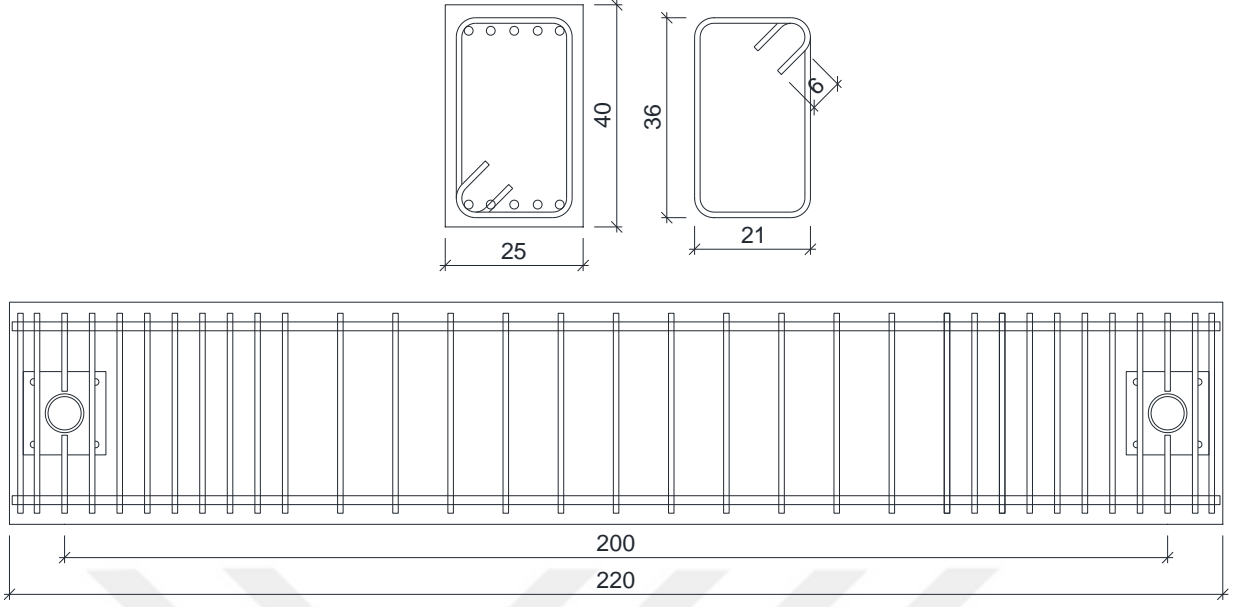
2.1.5.1. Deney Numuneleri Detayları

Kiriş – kiriş birleşim deneyleri için dört adet 1:1 ölçekli deney numuneleri üretilmiştir. Bu numunelerden iki tanesi monolitik, diğer ikisi ise prekast olarak üretilmiştir. Kiriş – kiriş birleşim deneyleri, önerilen prekast birleşimin uç uca birleşim yapılması durumundaki davranışının incelenmesi için gerçekleştirilmiştir. Üretilen kiriş numuneleri 2 farklı boyda olacak şekilde tasarlanmıştır. Kısa olan kirişlerin toplam açıklığı (mesnetten mesnete) 2m, uzun olan kirişlerin ise 4m olarak seçilmiştir. Kısa olan kirişler 3 noktalı eğilme deneyine maruz bırakılmıştır. Böylelikle prekast uç uca birleşimin yüksek kesme kuvveti ve eğilme momenti etkisi altındaki davranışı incelenmek istenmiştir. Uzun olan kirişler 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Böylelikle prekast uç uca birleşimin kesme kuvveti olmaması durumunda sadece eğilme momenti etkisi altındaki davranışı incelenmek istenmiştir. Kiriş – kiriş birleşim numunelerine ait detaylar Tablo 6’da verilmiştir.

Deney numunelerinde boyuna donatı olarak 16 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Etriyeler 8 mm çapında nervürlü donatılardan yapılmıştır. Kiriş kesitinde tek etriye bulunmaktadır. Etriye aralıkları açıklıkta 100 mm olacak şekilde düzenlenmiştir. Mesnete yakın bölgelerde beklenmeyen bir hasar oluşmaması için bu bölgelerde etriye sıklaştırması 50 mm aralıklı olarak yapılmıştır. Kirişin mesnet bölgesinde dönebilen mesnet teşkil edilebilmesi için bu bölgelerde içi özel işlemlili 60 mm çapında çelik borular kullanılmıştır. Mesnet bölgesinde olası bir kesme hasarının önüne geçilmek için her bölgeye çift levha eklenmiştir. Mesnette yer alan borular levhaların içinden geçecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu borulara uygun miller o borulardan geçirilerek mafsallı mesnet teşkil edilmiştir. Deney numunesi detayları, örülen donatı iskeleti görünümü ve mesnette ilave olarak kullanılan levhaların görünüşü sırasıyla Şekil 69 ve Şekil 70’te verilmiştir.

Tablo 6. Kiriş – kiriş birleşim deney numuneleri detayları

Numune adı	Birleşim Tipi	Kesit (cm)	Kiriş açıklığı (cm)	Boyuna Donatı (Oranı)	Enine Donatı
BB-Mono-4m	Monolitik	25 x 40	400	10Ø16 (%2)	Ø8 /100
BB-Mono-2m	Monolitik	25 x 40	200	10Ø16 (%2)	Ø8 /100
BB-Pre-4m	Prekast	25 x 40	200 + 200	10Ø16 (%2)	Ø8 /100
BB-Pre-2m	Prekast	25 x 40	100 + 100	10Ø16 (%2)	Ø8 /100

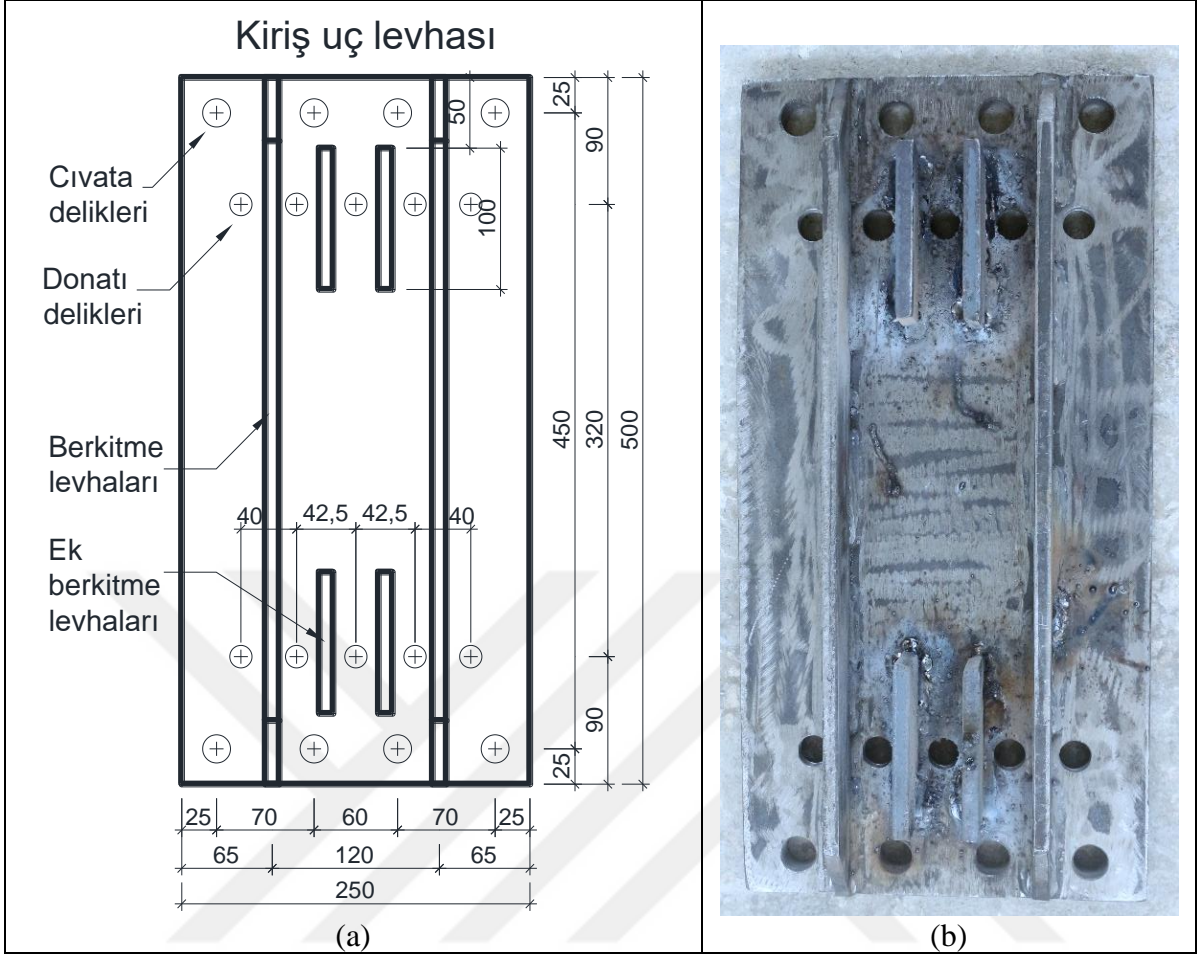


Şekil 69. Açıklığı 2.0 m olan monolitik kiriş numunesi detayları



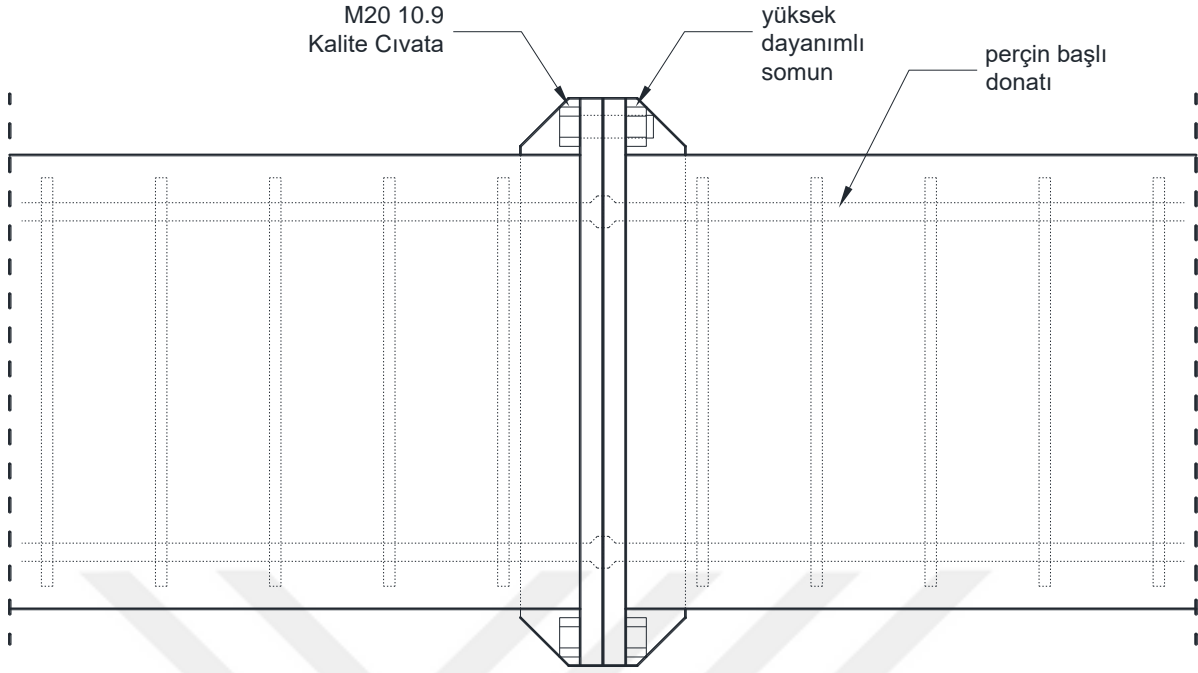
Şekil 70. Kiriş-kiriş birleşimi deney numunesi (a) donatı iskeleti (b) ek mesnet levhaları

Doktora çalışması kapsamında gerçekleştirilen kiriş – kiriş birleşim deneylerindeki prekast birleşimler kolon – kiriş birleşim levhalarına göre tasarlanmıştır. Kolon – kiriş birleşiminde kullanılan kiriş uç levhası uç uca birleşim için kullanılmıştır. Cıvata delikleri denk getirilerek cıvata ve somun kullanılarak birleşim gerçekleştirilmiştir. Kiriş uç levhası detayı ve imalat sonrası görünüşü Şekil 71’de verilmiştir.



Şekil 71. Kiriş – kiriş birleşim levhalarının detayı ve imalat sonrası görünüşü

Kiriş boyuna donatılarının levha ile bağlantısı için ön çalışmada geliştirilen perçin başlı donatılar kullanılmıştır. Prekast kirişlerin uç uca birleştirilmesi için M20-10.9 kalite yüksek dayanımlı cıvatalar ve somunlar kullanılmıştır. Kiriş – kiriş birleşim detayı Şekil 72’de verilmiştir. Kiriş – kiriş birleşim numunelerinin üretim sonrası görünüşleri Şekil 73’te, kirişlerin birleştirilmeden önceki levhalarının yakın görünüşü Şekil 74’te verilmiştir. Birleştirilme esnasında tork anahtarı yardımıyla cıvata sıkma işleminden bir görünüm ise Şekil 75’de verilmiştir. Ön gerilme değeri üretici firmaların tavsiye ettikleri tork tablolarından alınmıştır. M20-10.9 kalite cıvatalar, diğer birleşimlerdeki gibi, kuru sıkma için önerilen 580 Nm torkla sıkılmıştır.



Şekil 72. Kiriş – kiriş birleşim detayı



Şekil 73. Kiriş – kiriş birleşimi numuneleri üretim sonrası görüşleri



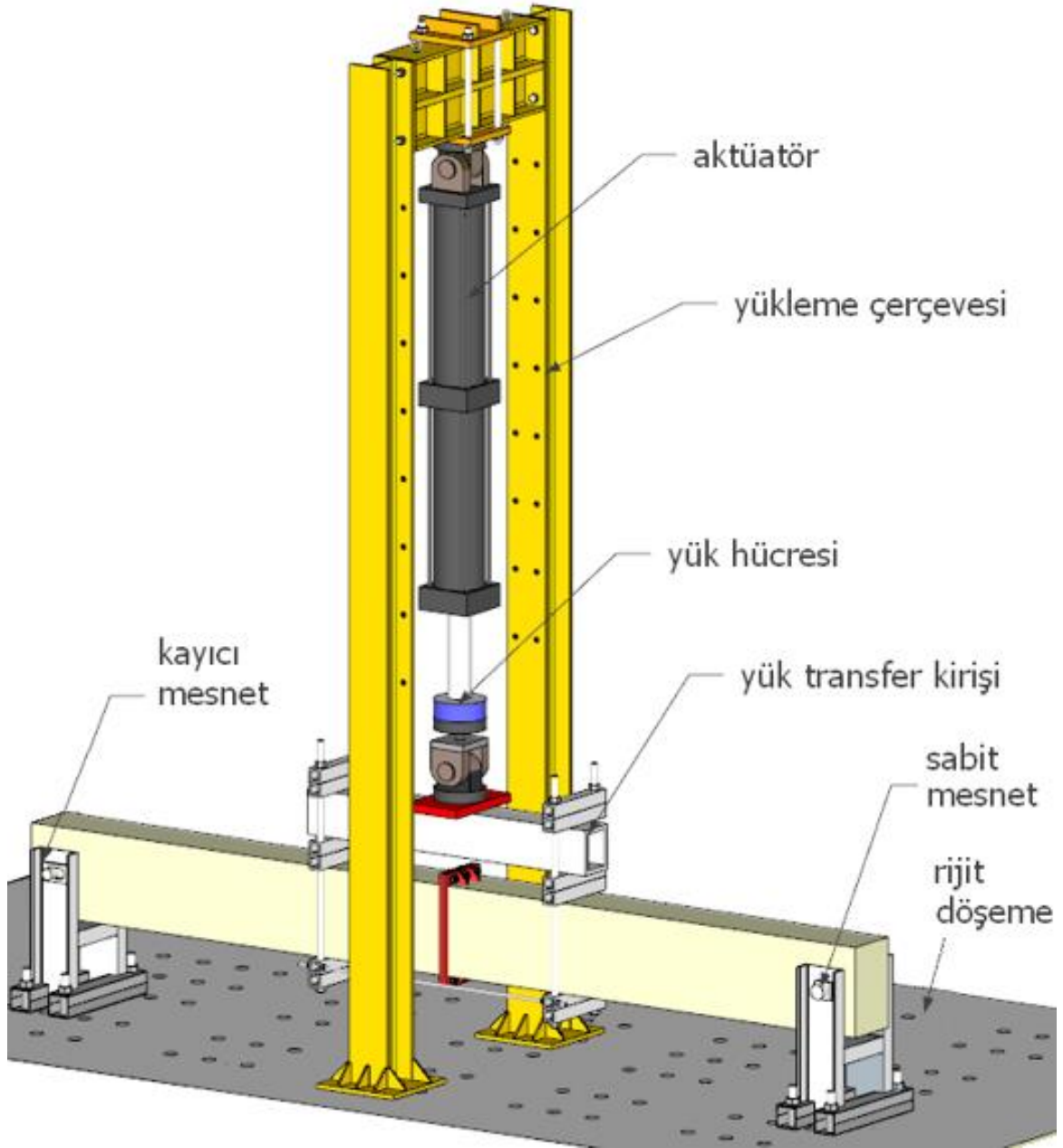
Şekil 74. Kiriş – kiriş numuneleri birleştirilmeden önceki levha görünüşleri



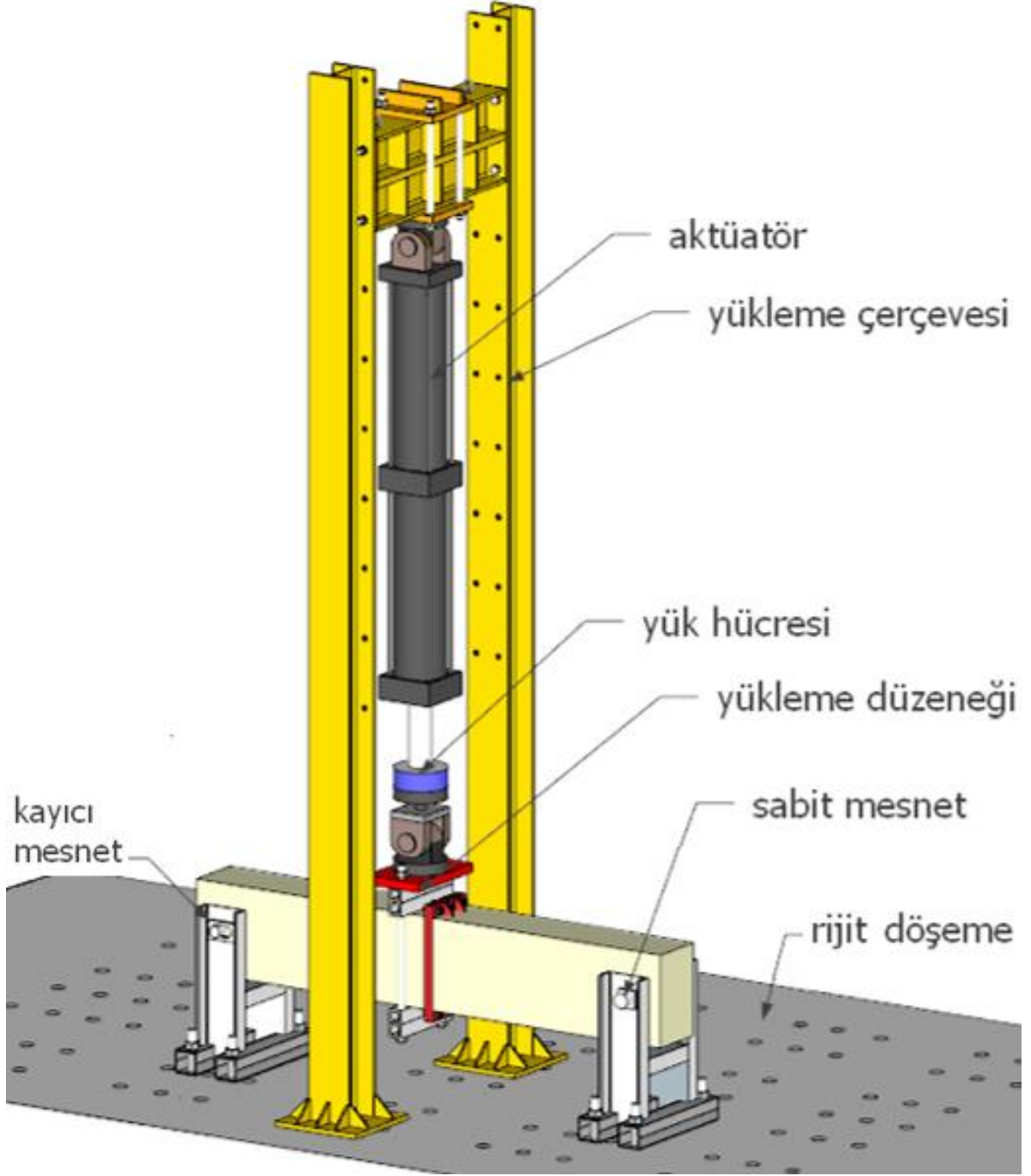
Şekil 75. Kiriş – kiriş numuneleri birleştirilme esnasında cıvataların torklanması (sıkılması) işlemi

2.1.5.2. Deney Düzeneği Detayları

Farklı boylardaki kiriş – kiriş birleşim deneyleri için iki farklı deney düzeneği tasarlanmıştır. Kısa ($L=2.0$ m) kirişlerin için 3 noktalı eğilme deney düzeneği, uzun ($L=4.0$ m) kirişler için ise 4 noktalı eğilme düzeneği tasarlanmıştır. Her iki tip deneyde de yükleme tersinir tekrarlı artan şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği laboratuvardaki rijit delikli döşemeye sabitlenerek kullanılmıştır. Deney düzeneğinin 3 boyutlu çizimi uzun kirişler ve kısa kirişler için Şekil 76 ve Şekil 77’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 76. Kiriş – kiriş birleşim deney düzeneği 3 boyutlu çizimi ($L=4.0$ m uzun kirişler için)

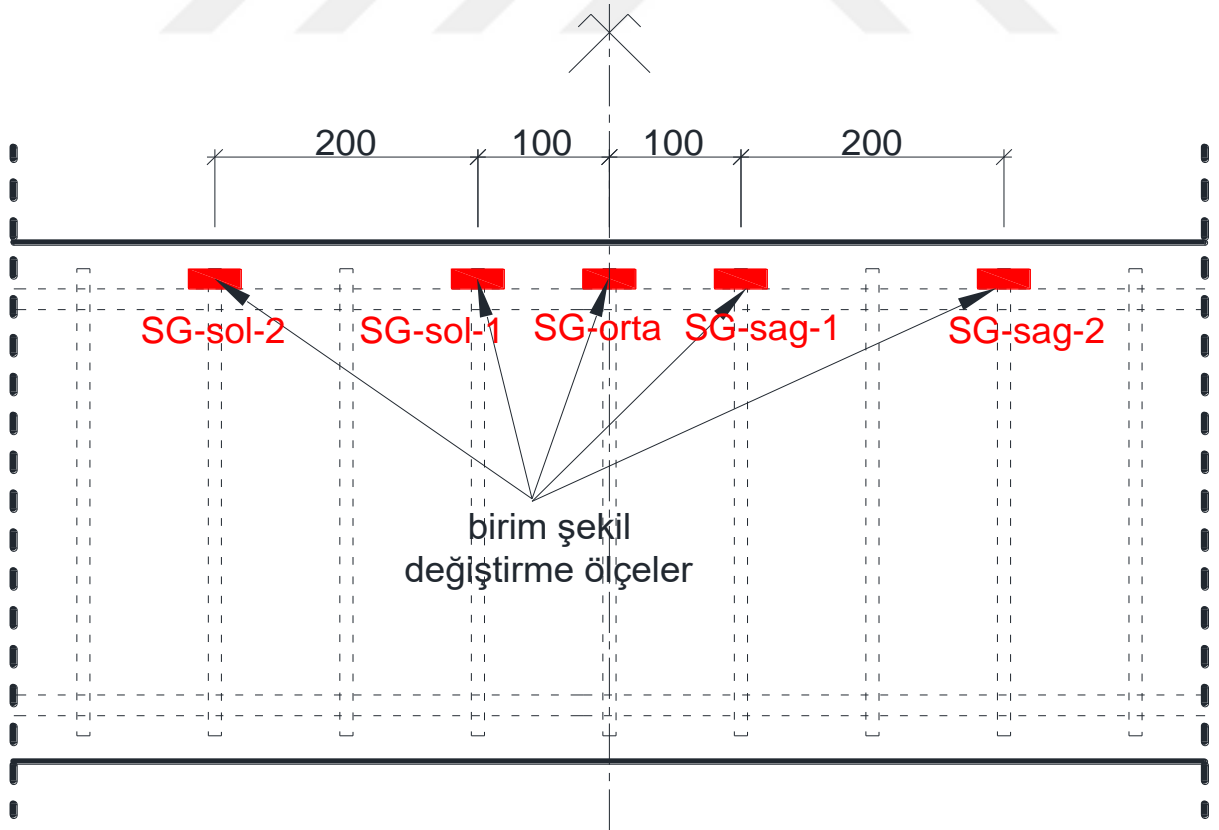


Şekil 77. Kiriş – kiriş birleşim deney düzeneği 3 boyutlu çizimi (kısa kirişler için)

Uzun kirişlerin 4 noktalı eğilme deneyinde yükleme simetrik yapılmıştır. Kısa kirişlerin deneyinde ise yükleme asimetrik yapılmıştır. Yük, kiriş orta noktasının 12 cm dışına uygulanmıştır. Bunun sebebi, prekast kısa kirişte birleşim araçlarının kesme kuvveti süreksizliği olan kesitte kalmasını önlemektir. Böylelikle prekast birleşim yüksek kesme kuvveti ve yüksek moment etkisi altında test edilmiştir.

Kiriş – kiriş numunelerinde boyuna donatılardaki şekil değiştirme oranlarının ölçülmesi için kirişin bir yüzündeki bir boyuna donatıya birim şekil değiştirme ölçerler yapıştırılmıştır. Monolitik numunelerde numune ortasında levha olmadığı için bir adet birim şekil değiştirme ölçer yapıştırılmıştır. Ancak prekast birleşim numunelerinde ortada levha bulunduğu için levhanın her iki yanındaki donatıların levhaya en yakın kısımlarına birer adet şekil değiştirme ölçer yapıştırılmıştır. Monolitik ve prekast numuneler için kullanılan birim şekil değiştirme ölçerlerin yerlerini gösteren çizimler Şekil 78 ve Şekil 79’da sırasıyla verilmiştir. Monolitik numunelerde 5 adet birim şekil değiştirme ölçer kullanılmıştır. Ortada yer alan SG-orta, solda yer alanlara SG-sol-1 ve SG-sol-2, sağda yer alanlara ise SG-sag-1 ve SG-sag-2 adı verilmiştir. Prekast numunelerde 6 adet birim şekil değiştirme ölçer kullanılmıştır. Ortada yer ikisine SG-orta-sol ve SG-orta-sag ismi verilmiştir. Solda yer alanlara SG-sol-1 ve SG-sol-2, sağda yer alanlara ise SG-sag-1 ve SG-sag-2 adı verilmiştir.

Kiriş deneyleri sırasında aktüatör ucunda yer alan yük hücresi ile yük ölçümü yapılmıştır. Ayrıca kiriş orta noktalarının düşey yer değiştirmesi ortalaması alınmak üzere her iki yüzünden ölçülmüştür. Bunların yanı sıra, kiriş orta noktasının mesnetlere göre göreli yer değiştirmesinin elde edilmesi için mesnetlerdeki düşey yer değiştirmeler ölçülmüştür.

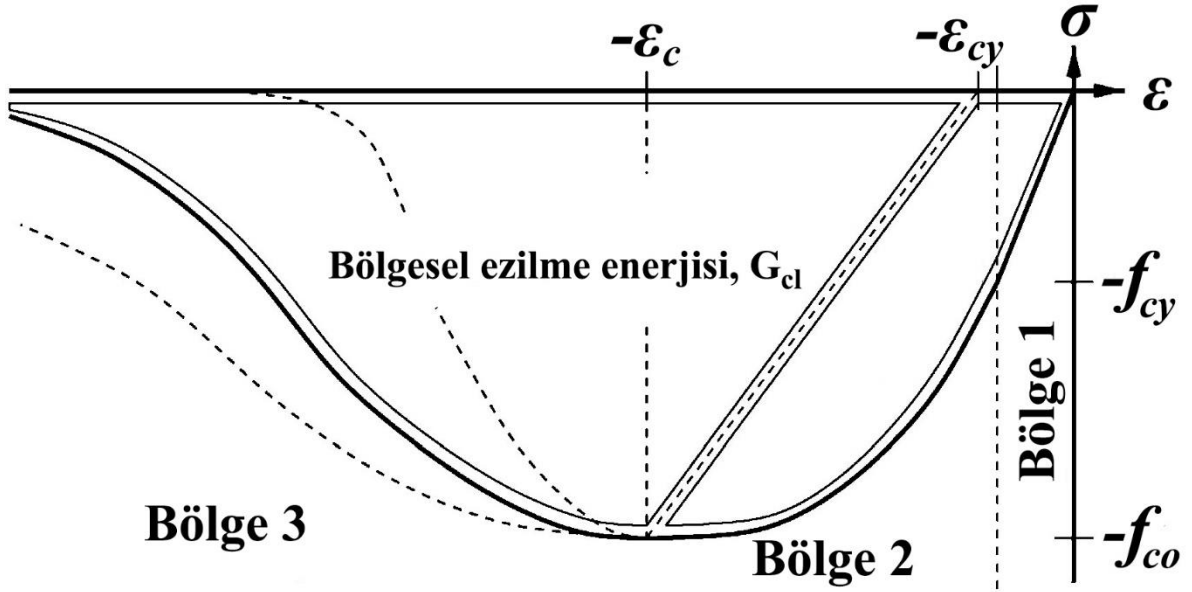


Şekil 78. Monolitik numuneler için kullanılan birim şekil değiştirme ölçerlerin yerleri

2.2.1. Malzeme Modellenmesi

2.2.1.1. Beton

Sonlu eleman analizlerinde kullanılan beton malzeme modelinin geliştirilmesi için Krätzig ve Pölling (2004) tarafından betonarme elemanların modellenmesi için önerilen elasto-plastik hasar modeli kullanılmıştır. Bu model, betonun hem basınç hem de çekme etkileri altındaki davranışının modellenebilmesi için olabildiğince az sayıda parametrenin dikkate alınmasını hedeflemiştir. Bu model, betonun basınç altındaki davranışını tanımlamak için betonun basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisini üç bölgeye ayırmaktadır (Şekil 80).



Şekil 80. Krätzig ve Pölling yaklaşımına göre betonun basınç altındaki davranışı

Bölge 1 (elastik bölge), davranışın tamamen lineer kabul edildiği bölgedir. Bu bölgedeki davranış, malzemenin başlangıç rijitliği ve poisson oranı ile modellenmektedir. Bu bölgenin sınırı, başlangıç hasarı gerilme değeri (f_{cy}) olarak tanımlanmaktadır. Bu gerilme değeri beton basınç dayanımı (f_{co}) değerinin üçte biri olarak dikkate alınması önerilmiştir. Bu bölgenin davranışı aşağıdaki Denklem 1 ile verilmiştir. Burada; σ_1 bölge 1'deki basınç gerilmesini, E_{ci} başlangıç elastisite modülünü (tanjant modülü) ve ϵ is birim şekil değiştirme oranını göstermektedir.

$$\sigma_1(\epsilon) = E_{ci}\epsilon \quad (1)$$

Bölge 2’de (Sertleşme), gerilme değeri, basınç dayanımı (f_{co}) değerine kadar artmaya devam etmektedir. Eğrinin eğimi, basınç gerilmesi değerine ulaştığı zaman sıfır olmaktadır. Bu bölgenin davranışı Denklem 2 ile tanımlanmaktadır. Bu denklemde; σ_2 bölge 2’deki gerilme değerini, E_{ci} başlangıç elastisite modülünü, f_{co} betonun basınç dayanımı değerini, ε_c basınç dayanımına ulaşılan noktadaki birim şekil değiştirme oranını göstermektedir. Ayrıca, betonun başlangıç elastisite modülünün, betonun sekant modülüne bağlı olarak hesaplanabilmesi için Denklem 2 ile verilen ifade önerilmiştir. Burada, yukarıda verilen sembollere ek olarak, E_c betonun sekant modülünü göstermektedir.

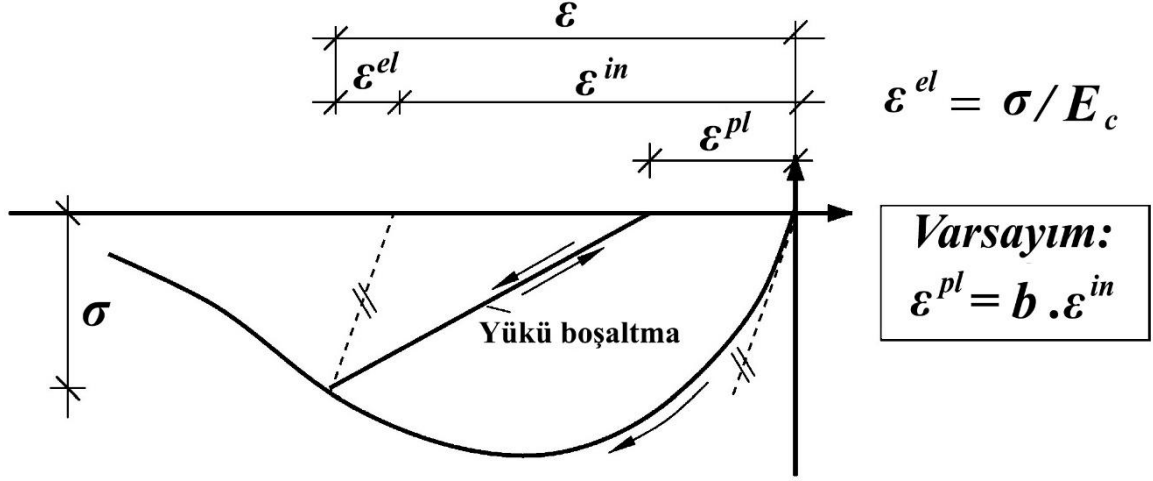
$$\sigma_2(\varepsilon) = \frac{E_{ci} \frac{\varepsilon}{f_{co}} + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)}{1 - \left(E_{ci} \frac{\varepsilon_c}{f_{co}} - 2\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)} \quad (2)$$

$$E_{ci} = \frac{1}{2E_c} \left(\frac{f_{co}}{\varepsilon_c}\right)^2 - \frac{f_{co}}{\varepsilon_c} + \frac{3}{2}E_c \quad (3)$$

Bölge 3 (yumuşama) ise, betonun basınç dayanımına (f_{co}) ulaştıktan sonrası olarak tanımlanmaktadır. Bu bölgedeki davranış betonun kırılma enerjisine bağlı olarak belirlenmektedir. Bu bölgenin hesaplanmasında Denklem 4 kullanılmaktadır. Bu denklemde yer alan E_c , f_{co} ve ε_c sembolleri yukarıda tanımlanmıştır. Bunların yanı sıra, γ_c parametresinin hesaplanması için Denklem 5 kullanılmaktadır. Bu denklemde yer alan b parametresi Şekil 81’de tanımlanan malzemenin kalıcı hasar alması ile ilgili özelliğini, l_{eq} sonlu elemanı analizi durumunda sonlu elemanların ortalama boyutu olarak dikkate alınabilen eşdeğer boyunu ve G_{cl} bölgesel ezilme enerjisini göstermektedir. Vonk (1992) çalışmasında, bölgesel ezilme enerjisinin ortalama dayanıma sahip betonlar için 10-25 kN/m mertebelerinde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Krätzig ve Pölling (2004) çalışması bölgesel ezilme enerjisinin betonun kırılma enerjisinin 200-500 katı olarak dikkate alınabileceğini belirtmektedir.

$$\sigma_3(\varepsilon) = \frac{1}{\frac{2 + \gamma_c f_{co} \varepsilon_c}{2f_c} + \gamma_c \varepsilon + \frac{\gamma_c}{2\varepsilon_c} \varepsilon^2} \quad \gamma_c > 0 \quad (4)$$

$$\gamma_c = \frac{\pi^2 f_{co} \varepsilon_c}{2 \left[\frac{G_{cl}}{l_{eq}} - \frac{1}{2} f_{co} \left(\varepsilon_c (1 - b) + b \frac{f_{co}}{E_c} \right) \right]^2} \quad (5)$$



Şekil 81. Hesaplarda kullanılan b parametresi

Betonun çekme etkisi altındaki davranışı Krätzig ve Pölling (2004) çalışmasında 2 bölge ile tanımlanmıştır (Şekil 82).

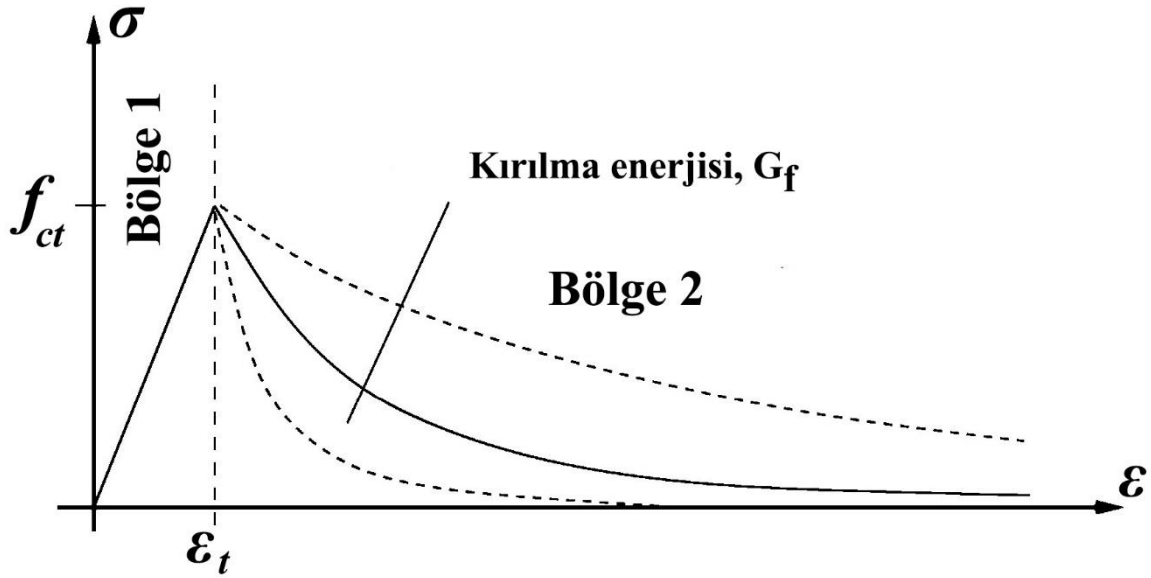
Bölge 1 (Elastik), betonun çekme gerilmesi altındaki çatlama gerilmesine kadar olan bölüm olarak tanımlanmaktadır. Bu bölgede, davranış elastik olarak kabul edilmektedir. Denklem 6 bu bölgenin davranışını ifade etmektedir. Burada, σ_1^T bölge 1'deki çekme gerilmesini, E_{ci} başlangıç elastisite modülünü ve ε^T birim şekil değiştirme oranını göstermektedir.

$$\sigma_1^T(\varepsilon^T) = E_{ci} \varepsilon^T \quad (6)$$

Bölge 2 (Yumuşama), betonun çekme gerilmesi altındaki çatlamasından sonraki kısım olarak tanımlanmaktadır. Bu bölgenin modellenmesinde Denklem 7'de verilen üstel fonksiyon kullanılmaktadır. Burada, σ_2^T betonun bölge 2'deki çekme gerilmesi değerini, f_{ct} betonun çekme dayanımını ve ε_t betonun çekme gerilmesine ulaştığı andaki birim şekil değiştirme oranını göstermektedir. Denklem 8, γ_t parametresinin hesabını göstermektedir. Burada, G_f betonun kırılma enerjisini, l_{eq} eşdeğer boyu, f_{ct} betonun çekme dayanımını E_c betonun sekant modülünü göstermektedir.

$$\sigma_2^T(\varepsilon^T) = f_{ct} e^{(\varepsilon_t - \varepsilon^T) / \gamma_t} \quad (7)$$

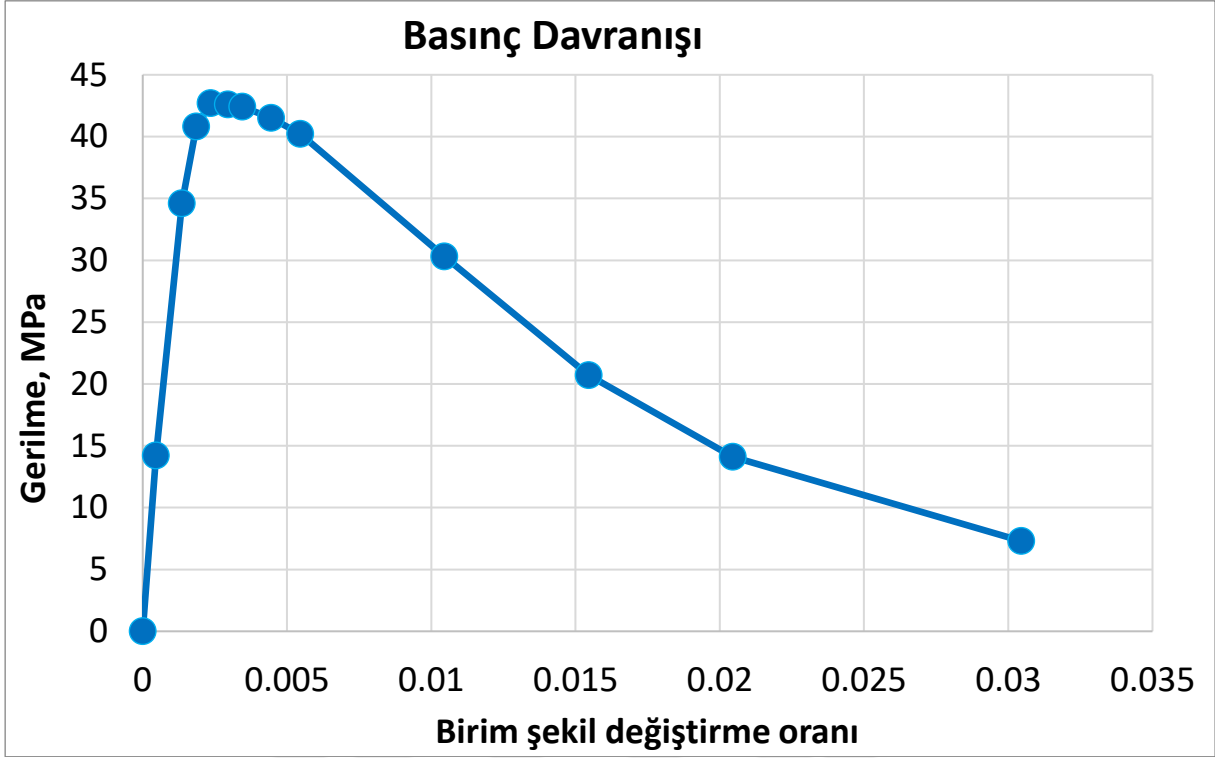
$$\gamma_t = \frac{G_f}{l_{eq} f_{ct}} - \frac{1}{2} \frac{f_{ct}}{E_c} \quad (8)$$



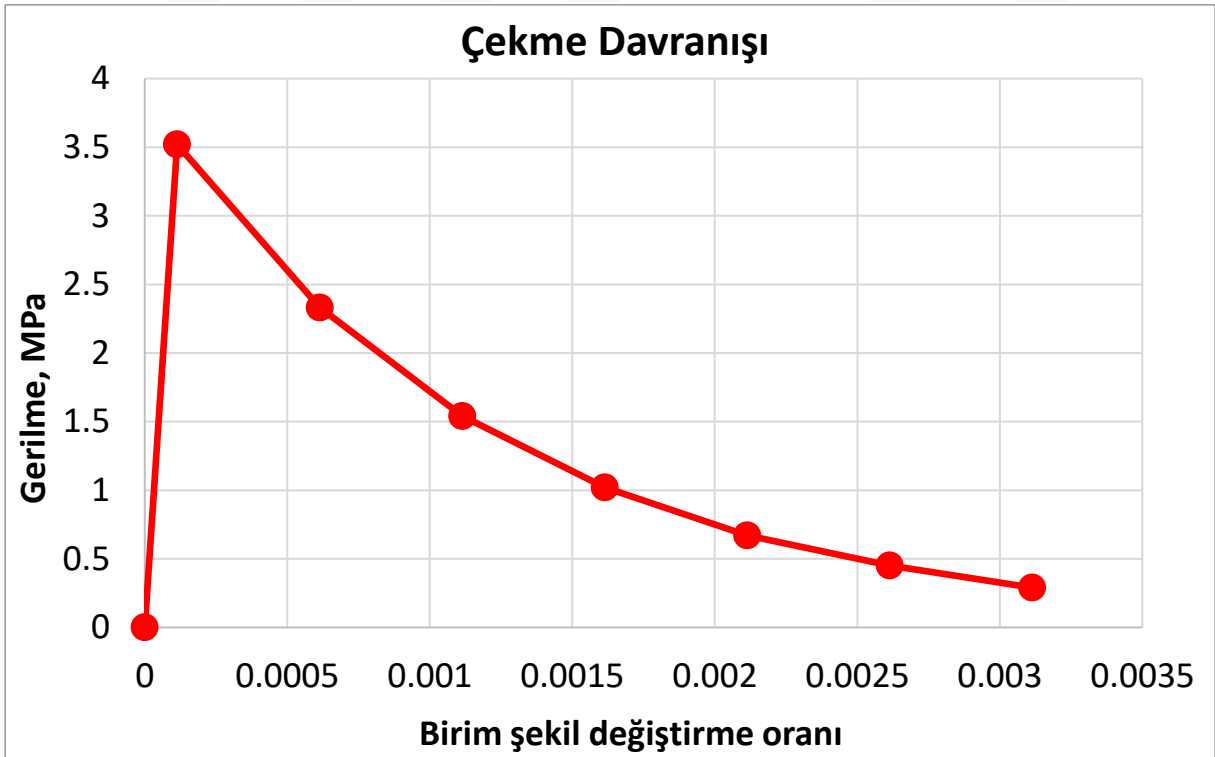
Şekil 82. Krätzig ve Pölling yaklaşımına göre betonun çekme altındaki davranışı

Yukarıda anlatılan beton malzeme modelleme yaklaşımı kullanılarak, tez kapsamında yapılacak analitik çalışmalarda kullanılmak üzere bir beton malzeme modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan beton malzeme modeline ait basınç ve çekme etkisi altındaki davranış Şekil 83 ve Şekil 84'te sırasıyla verilmiştir. Malzeme modelinin oluşturulması için gereken parametrelerden beton dayanımı, deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen malzeme deneylerinden alınmıştır. Buna bağlı olarak, bu malzeme deneylerinden elde edilen ortalama beton standart silindir dayanımı 41.7 MPa olarak dikkate alınmıştır. Bunun haricinde, beton çekme dayanımı, beton başlangıç elastisite modülü veya kırılma enerjisi gibi parametrelerin hesabı için CEB-FIP Model Code 1999 yönetmeliğinden yararlanılmıştır. Model parametreleri deneysel sonuçlar kullanılarak kalibre edilmiştir.

Geliştirilen beton modeli, çalışma kapsamında kullanılan sonlu eleman analiz yazılımı olan ABAQUS programında yer alan "Concrete Damage Plasticity (CDP)" beton malzeme modeli ile birlikte kullanılmıştır. CDP malzeme modeli, betonun aksenal basınç ve çekme etkisi altındaki davranışını esas almaktadır. Bu malzeme modeli, birim şekil değiştirme oranına bağlı olarak kalıcı hasarın da modellenmesine imkan tanımaktadır. Hasar, davranışa rijitlik azalması olarak yansıtılmaktadır. Hesaplarda kullanılan hasarı dikkate alan beton malzemesine ait parametreler Tablo 7'de verilmiştir.



Şekil 83. Geliştirilen beton malzeme modelinin basınç etkisi altındaki davranışı



Şekil 84. Geliştirilen beton malzeme modelinin çekme etkisi altındaki davranışı

Tablo 7. ABAQUS CDP malzeme modeli parametreleri

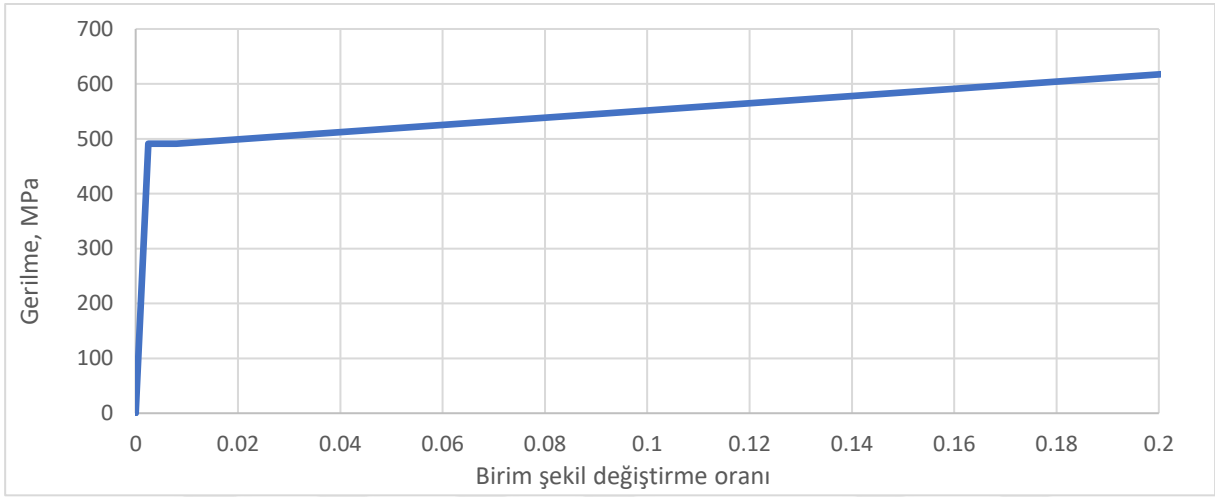
Dilation Angle		Eccentricity		f _{bo} /f _{co}	K	Viscosity Parameter	
36		0.1		1.16	0.667	0.0001	
Compressive Behavior		Compressive Damage		Tensile Behavior		Tensile Damage	
Yield Stress (MPa)	Inelastic Strain	Damage Parameter	Inelastic Strain	Yield Stress (MPa)	Cracking Strain	Damage Parameter	Cracking Strain
14.2	0	0	0	3.52	0	0	0
34.6	0.0009	0.1	0.0009	2.33	0.0005	0.44	0.0005
40.8	0.0014	0.15	0.0014	1.54	0.001	0.68	0.001
42.7	0.0019	0.2	0.0019	1.02	0.0015	0.82	0.0015
42.6	0.0025	0.25	0.0025	0.67	0.002	0.9	0.002
42.4	0.003	0.29	0.003	0.45	0.0025	0.94	0.0025
41.5	0.004	0.37	0.004	0.29	0.003	0.97	0.003
40.2	0.005	0.44	0.005				
30.3	0.01	0.68	0.01				
20.7	0.015	0.82	0.015				
14.1	0.02	0.9	0.02				
7.3	0.03	0.97	0.03				
Density (tonne/mm ³)		Young's Modulus (MPa)			Poisson Ratio		
2.4 x 10 ⁻⁹		31000			0.2		

2.2.1.2. Donatı Çeliği

S420 sınıfı donatı çeliğinin modellenmesinde, ABAQUS sonlu eleman yazılımında bulunan "plastic" modeli dikkate alınmıştır. Donatıya ait malzeme modeli oluştururken donatı çekme deneylerinden elde edilen ortalama akma gerilmesi 491 MPa ve kopma gerilmesi 618 MPa değeri dikkate alınmıştır. Malzeme davranışı; elastik kısım, akma platosu ve pekleşme bölgesi olmak üzere 3 doğrulu olacak şekilde tanımlanmıştır. Elastisite modülü 200000 MPa ve kopma uzama oranı %10 olarak dikkate alınmıştır. Donatı çeliği için belirlenen malzeme parametreleri Tablo 8'de verilmiştir. Belirlenen malzeme modeli ile yapılan donatı çekme analizi sonucu Şekil 85'te verilmiştir.

Tablo 8. Donatı çeliği malzeme parametreleri

Density (tonne/mm ³)	Elastic Parameters		Plastic Parameters	
	Young's Modulus (MPa)	Poisson Ratio	Yield Stress (Mpa)	Plastic Strain
7.8 x 10 ⁻⁹	200000	0.3	491	0
			491	0.0055
			598	0.1980



Şekil 85. Donatı malzeme modeli ile yapılan donatı çekme analizi sonucu

2.2.1.3. Birleşim Levhası Çeliği

Analizlerde modellenecek birleşim levhalarının malzeme modeli için S235 çeliği malzeme özelliklerine bağlı olarak ABAQUS sonlu eleman yazılımında yer alan “Plastic” modeli kullanılmıştır. Levhalarda pekleşme beklenmediği için modelin basitleştirilmesi için levha çeliği modeli iki doğrulu olarak tanımlanmıştır. S235 çeliği akma gerilmesi 235 MPa, elastisite modülü 200000 MPa ve kopma uzama oranı %20 olarak kabul edilmiştir. S235 çeliği için belirlenen malzeme parametreleri Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. S235 çeliği malzeme parametreleri

Density (tonne/mm ³)	Elastic Parameters		Plastic Parameters	
	Young's Modulus (MPa)	Poisson Ratio	Yield Stress (Mpa)	Plastic Strain
7.8 x 10 ⁻⁹	200000	0.3	235	0
			235	0.1988

2.2.2. Analiz Modeli Yaklaşımı

Tez kapsamında yapılan sonlu eleman analizler 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Analiz modellerinde kullanılacak geometrilerin oluşturulması için 3 boyutlu çizim programlarından faydalanılmıştır. Beton ve levha geometrileri 3 boyutlu katı cisim olarak, boyuna ve enine donatılar ise 1 boyutlu çizgisel elemanlar olarak tasarlanmıştır.

Analiz süresinin azaltılması için deneylerde yapılan gözlemlere bağlı olarak modelde bazı basitleştirmeler yapılmıştır. Modelde hasar beklenmeyen, ya da hasarın ihmal edilebilecek seviyede olduğu kısımlar elastik malzeme ile modellenmiştir. Buna bağlı olarak sadece potansiyel hasar bölgesindeki beton kısımlar yukarıda bahsedilen lineer olmayan beton modeli ile modellenmiştir.

Beton ve levha gibi 3 boyutlu olarak tanımlanan geometriler için 3 boyutlu sonlu elemanlar kullanılmıştır. Bu sonlu elemanlar, ABAQUS yazılımında C3D8R olarak isimlendirilmektedir ve 8 noktalı ve 6 yüzlü olup her bir noktası 3 doğrultuda ötelenme serbestliğine sahiptir.

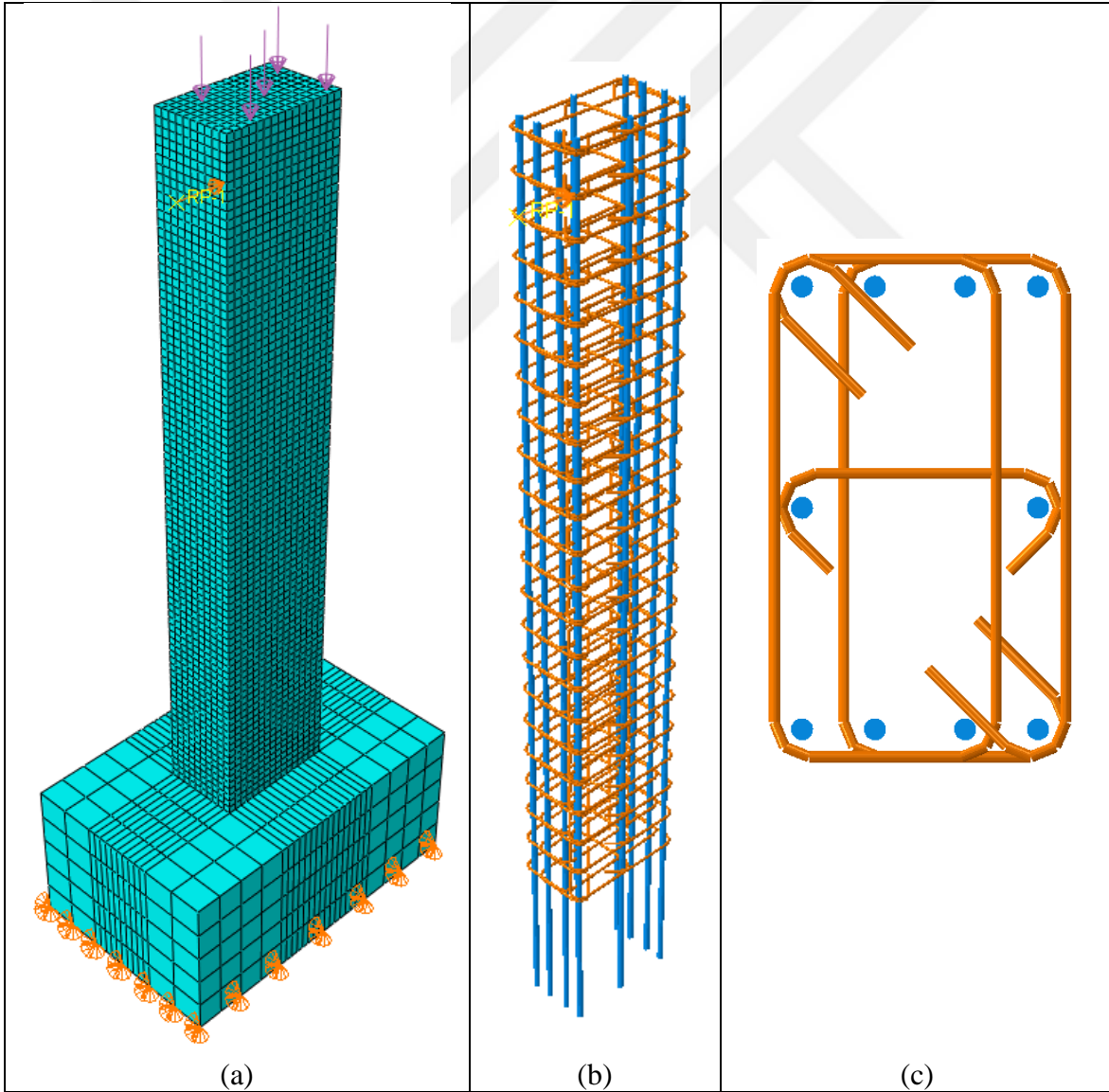
Boyuna ve enine donatılar ABAQUS yazılımında B31 olarak isimlendirilen, her ucunda 3 ötelenme, 3 dönme serbestliği ile 6 serbestlik olan ve toplamda 12 serbestlikli kiriş sonlu eleman ile modellenmiştir. Donatılar ile beton arasındaki aderans için gömülü eleman (embedded region) yaklaşımı kullanılmıştır.

2.2.2.1. Temel – Kolon Numunesi Analiz Modeli

Temel-kolon birleşim modeli deneysel çalışmalarda kullanılan geometri ve donatı düzenine uygun bir şekilde ABAQUS yazılımında modellenmiştir. Monolitik temel-kolon birleşimine ait analiz modelinin genel görünüşü Şekil 86-a'da verilmiştir. Yapılan hassasiyet analizleri sonucunda sonlu eleman boyutu 25 mm olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, analiz süresinin azaltılması amacıyla temel elemanında sonlu eleman boyutu nispeten daha büyük seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda temelde hasar gözlemlenmediği için analiz modelinde temel elemanlara lineer malzeme özellikleri atanmıştır. Yine aynı nedenle, analiz süresinin azaltılması amacıyla temel betonu içerisinde yer alan donatılar modele dahil edilmemiştir. Analiz modelinde kullanılan donatıların görünüşü Şekil 86-b'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kolonun yük uygulanacak olan üst uç kısmında istenmeyen hasarların önlenmesi

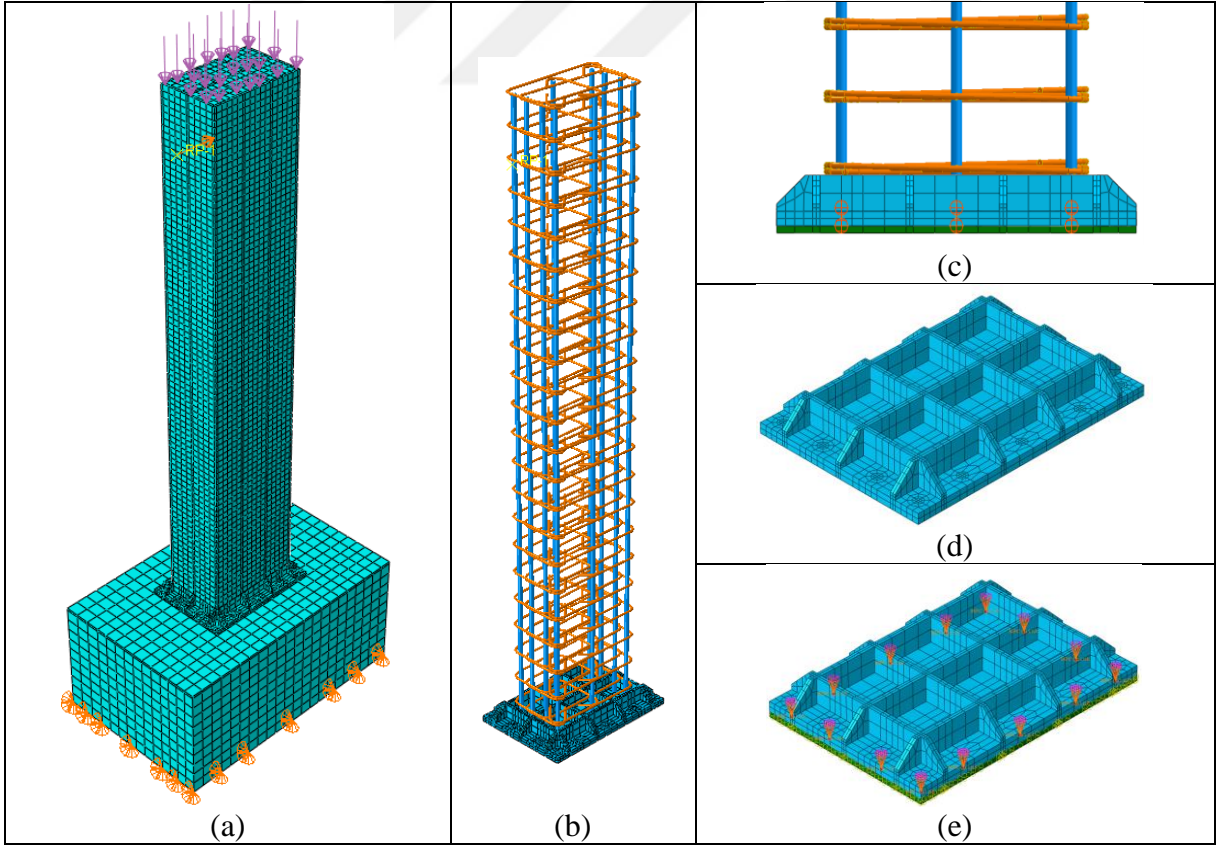
için yapılan etriye sıklaştırması modellemede yapılmamıştır. Bunun yerine, kolon uç bölgesi lineer malzeme özellikleriyle modellenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan boyuna donatıların alt uçlarındaki gönye detayı, temelin lineer olarak modellenmiş olmasından dolayı analiz modeline eklenmemiştir. Analiz modelindeki etriyeler deneysel çalışmada kullanılan etriye geometrisine bire bir uygun şekilde modellenmiştir. Analiz modelinde yer alan etriye ve boyuna donatı yerleşimleri Şekil 86-c’de görülmektedir.

Analiz modelinde sınır şartı olarak, temel alt yüzündeki noktaların hem ötelenmeleri hem de dönmeleri tutulmuştur. Eksenel yük kolon üst yüzeyine yayılı yük olarak girilmiştir. Yatay yüklemeye benzer olarak, deneyde uygulanan yatay yüklemeye benzer olarak, kolon yan yüzünde yük uygulama plakası boyutlarındaki bir yüzeye yer değiştirme olarak uygulanmıştır.



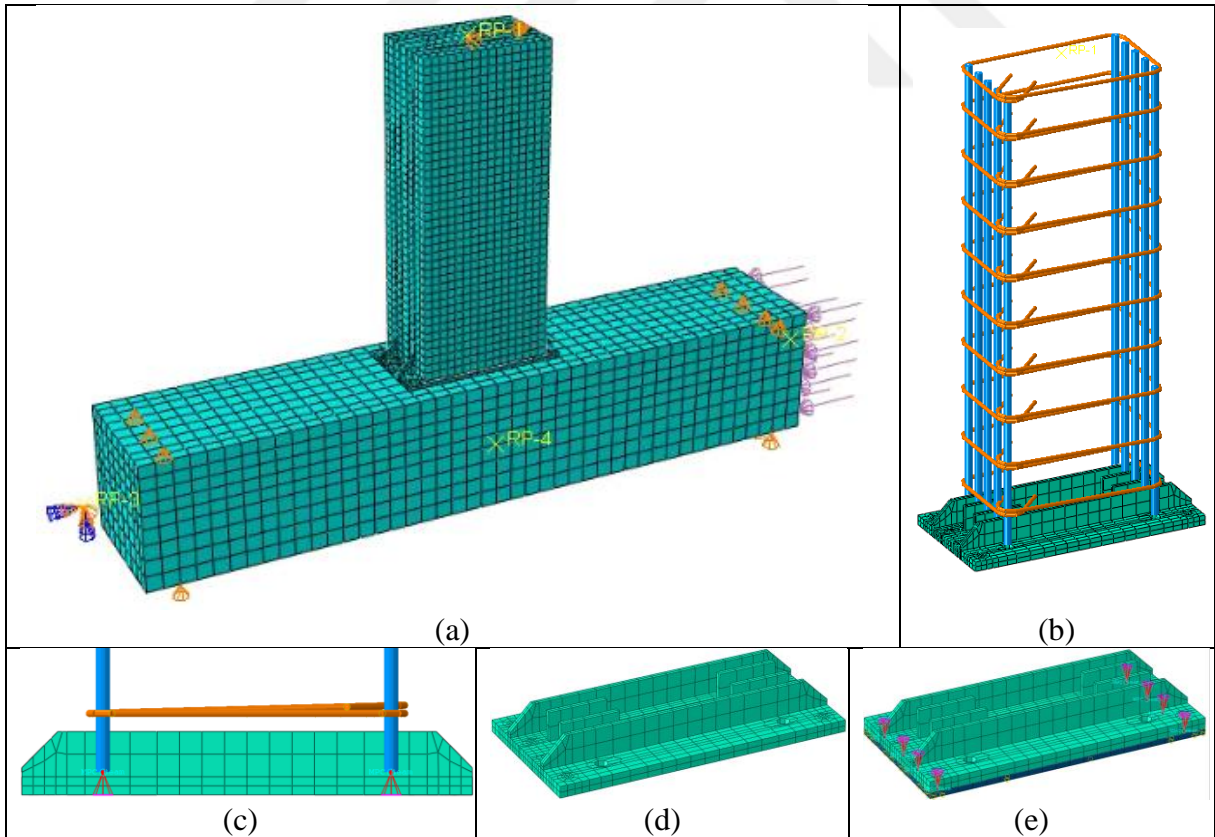
Şekil 86. Monolitik temel-kolon birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünüşü; (b) Boyuna ve enine donatılar; (c) Donatı detayları (yakın görünüş)

Prekast temel-kolon birleşimine ait analiz modelinin genel görünüşü Şekil 87-a'da verilmiştir. Kolon, temel ve donatılar için malzeme atanması, sonlu eleman boyutları, sınır şartları ve yükleme monolitik modelde olduğu şekilde yapılmıştır. Monolitik modelden farklı olarak, boyuna donatılar levha ile birleştirilmiştir (Şekil 87-b). Boyuna donatıların kolon uç levhası ile bağlantısı için her bir donatı ucu ile levhada bu uca karşılık gelen nokta arasında boyuna donatı ile aynı rijitliğe sahip birer yay tanımlanmıştır (Şekil 87-c). Kolon uç levhası ve bu levhanın temel yüzü levhasıyla bağlantısı Şekil 87-d ve Şekil 87-e'de sırayla verilmiştir. Deneysel çalışmalarda temel yüzü levhası ile temel betonu arasında açılma gözlemlenmediği için bu iki eleman arasında tam yapışma tanımlanmıştır. Ayrıca analiz modelinde, analiz süresinin azaltılması için levhaların birbiri ile bağlantısında kullanılan civatalar yerine rijit kiriş elemanlar (MPC beam connector) tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalarda civatalarda gevşeme ve civataların bulunduğu kısımlarda levhalar arasında açılma gözlemlenmediği için civatalar yerine rijit kiriş elemanlar atanmasının analiz sonuçlarını ihmal edilebilir bir seviyede etkileyeceği düşünülmüştür.



Şekil 87. Prekast temel-kolon birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünümü; (b) Boyuna ve enine donatılar ve kolon uç levhası; (c) Boyuna donatı ile kolon uç levhası bağlantısı; (d) Kolon uç levhası; (e) Levhaların birbiri ile bağlantısı

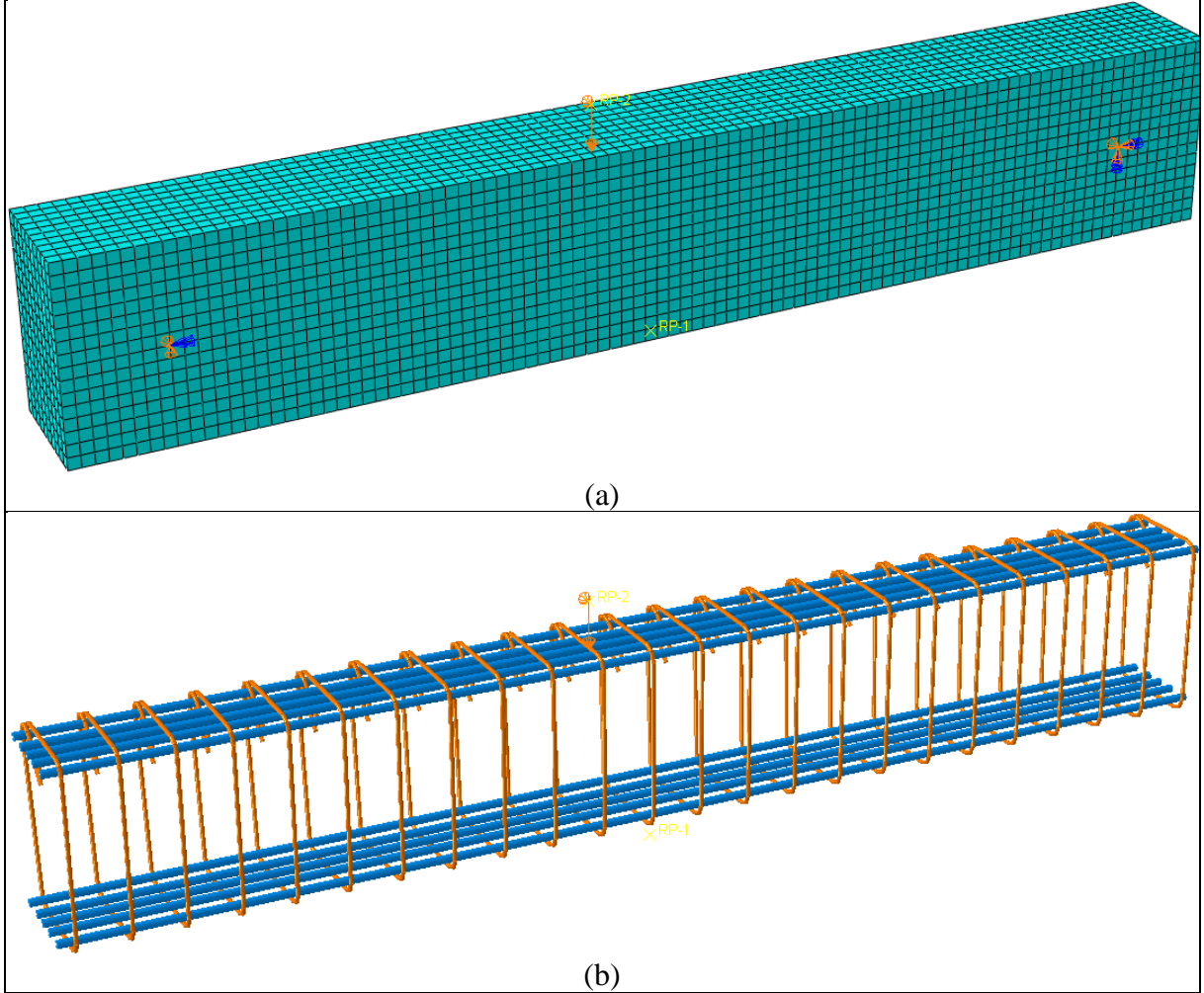
Prekast kolon-kiriş birleşimine ait analiz modelinin genel görünüşü Şekil 89-a'da verilmiştir. Kolon, kiriş ve donatılar için malzeme atanması, sonlu eleman boyutları, sınır şartları ve yükleme monolitik modelde olduğu şekilde yapılmıştır. Monolitik modelden farklı olarak, boyuna donatılar levha ile birleştirilmiştir (Şekil 89-b). Boyuna donatıların kiriş uç levhası ile bağlantısı için her bir donatı ucu ile levhada bu uca karşılık gelen nokta arasında boyuna donatı ile aynı rijitliğe sahip birer yay tanımlanmıştır (Şekil 89-c). Kiriş uç levhası ve bu levhanın kolon yüzü levhasıyla bağlantısı Şekil 89-d ve Şekil 89-e'de sırayla verilmiştir. Deneysel kolon yüzü levhası ile kolon betonu arasında açılma gözlemlenmediği için bu iki eleman arasında tam yapışma tanımlanmıştır. Ayrıca analiz modelinde, analiz süresinin azaltılması için levhaların birbiri ile bağlantısında kullanılan civatalar yerine rijit kiriş elemanlar (MPC beam connector) tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalarda civatalarda gevşeme ve civataların bulunduğu kısımlarda levhalar arasında açılma gözlemlenmediği için civatalar yerine rijit kiriş elemanlar atanmasının analiz sonuçlarını ihmal edilebilir bir seviyede etkileyeceği düşünülmüştür.



Şekil 89. Prekast kolon-kiriş birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünümü; (b) Boyuna ve enine donatılar ve kiriş uç levhası; (c) Boyuna donatı ile kiriş uç levhası bağlantısı; (d) Kiriş uç levhası; (e) Levhaların birbiri ile bağlantısı

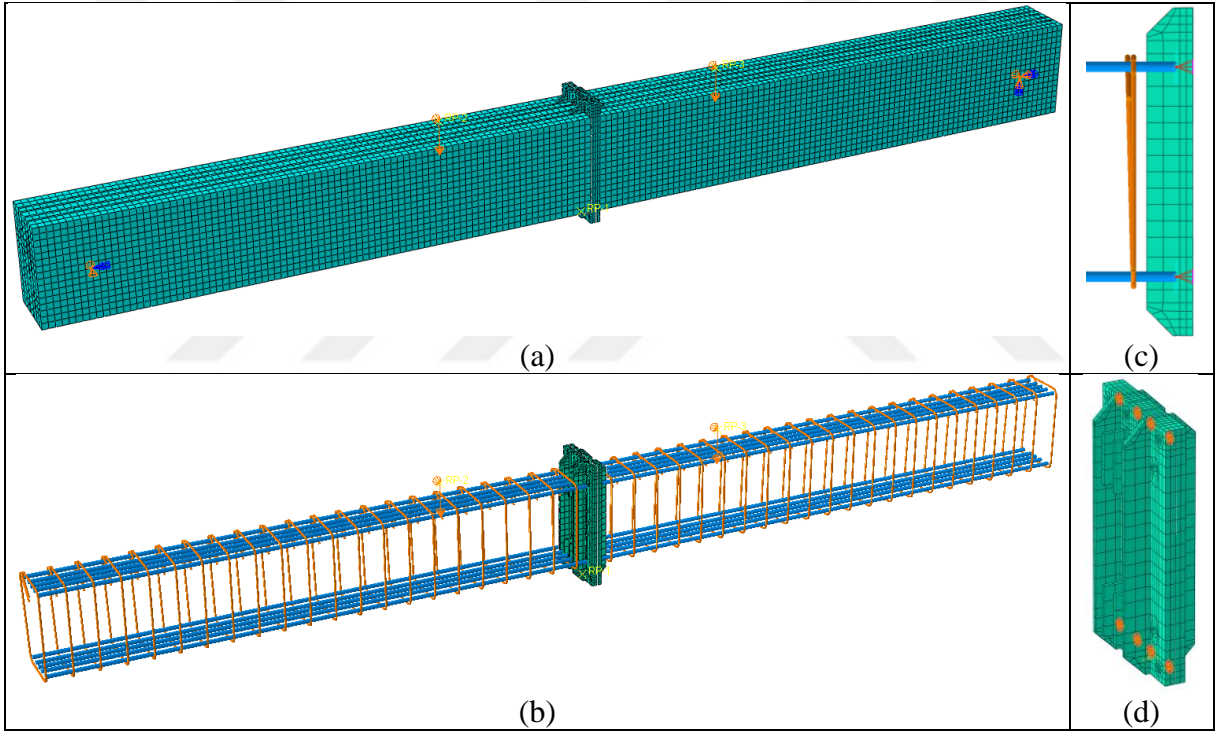
2.2.2.3. Kiriş – Kiriş Numunesi Analiz Modeli

Kiriş-kiriş birleşim modeli deneysel çalışmalarda kullanılan geometri ve donatı düzenine uygun bir şekilde ABAQUS yazılımında modellenmiştir. Monolitik kiriş-kiriş birleşimine ait analiz modelinin genel görünüşü Şekil 90-a'da verilmiştir. Yapılan hassasiyet analizleri sonucunda sonlu eleman boyutu 25 mm olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kirişin mesnet bölgelerinde hasar görülmediği için analiz modelinde bu bölgeler için lineer malzeme özellikleri kullanılmıştır. Analiz modelinde kullanılan donatıların görünüşü Şekil 90-b'de verilmiştir. Analiz modelindeki etriyeler deneysel çalışmada kullanılan etriye geometrisine bire bir uygun şekilde modellenmiştir. Analiz modelinde kirişe deneysel çalışmalarda yük uygulanan noktadan düşey yer değiştirme uygulanmıştır.



Şekil 90. Monolitik kiriş-kiriş birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünüşü ve etriye detayı; (b) Boyuna ve enine donatılar

Prekast kiriş-kiriş birleşimine ait analiz modelinin genel görünüşü Şekil 91-a'da verilmiştir. Kiriş ve donatılar için malzeme atanması, sonlu eleman boyutları, sınır şartları ve yükleme monolitik modelde olduğu şekilde yapılmıştır. Monolitik modelden farklı olarak, boyuna donatılar levha ile birleştirilmiştir (Şekil 91-b). Boyuna donatıların kiriş uç levhası ile bağlantısı için her bir donatı ucu ile levhada bu uca karşılık gelen nokta arasında rijit kiriş elemanlar (MPC beam connector) tanımlanmıştır (Şekil 91-c). Kiriş uç levhaları arasında yük aktarımının sağlanması için kontak tanımlanmıştır. Ayrıca analiz modelinde, analiz süresinin azaltılması için levhaların birbiri ile bağlantısında kullanılan civatalar yerine rijit kiriş elemanlar (MPC beam connector) tanımlanmıştır (Şekil 91-d).



Şekil 91. Prekast kiriş-kiriş birleşimi modeli detayları; (a) Analiz modeli genel görünümü; (b) Boyuna ve enine donatılar ve kiriş uç levhası; (c) Boyuna donatı ile kiriş uç levhası bağlantısı; (d) Kiriş uç levhası; (e) Levhaların birbiri ile bağlantısı

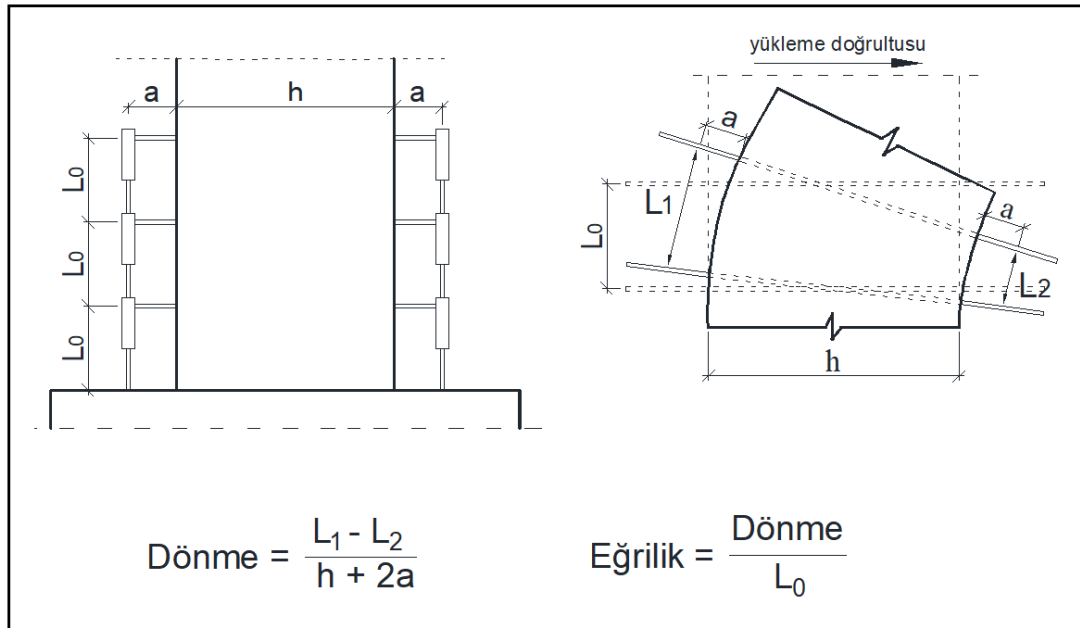
3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Deney Sonuçları

Deney elemanlarına uygulanacak yer değiştirme için FEMA-461’de verilen çift tekrarlı, tersinir tekrarlı artan yarı-statik yükleme protokolü kullanılmıştır. Kullanılan bu protokolde her bir çevrim iki defa gerçekleştirilmektedir. Her bir çevrim sonunda yer değiştirme genliği %40 artırılmaktadır. Belirlenen nihai yer değiştirme değeri 1.4 değerine bölünerek bir önceki adımın değeri bulunmaktadır. FEMA-461 en az 6 adımlı yükleme protokolünün uygulanmasını önermektedir. Bununla birlikte aynı protokolde en küçük yükleme adımındaki ötelenme oranının 0.0015’ten az olması istenmektedir.

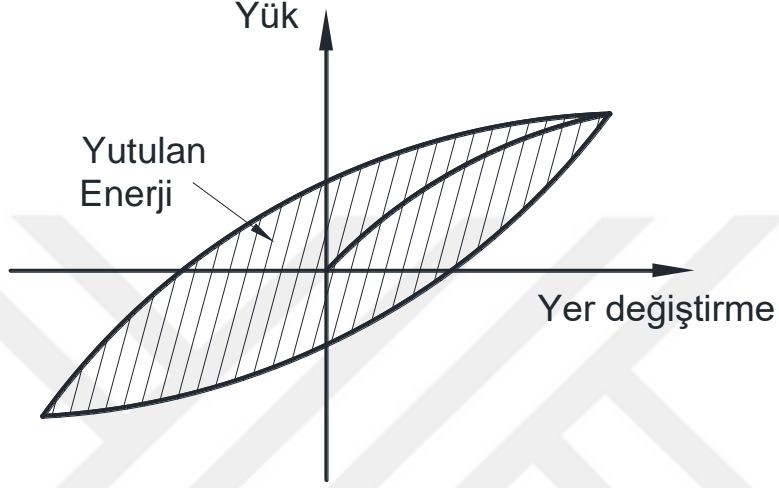
Numunenin taşıma kapasitesinde en az %15’lik düşüş görüldüğünde deney sonlandırılmıştır. Hedeflenen yer değiştirme değerinde yük taşıma kapasitesinde düşüş olmadığı takdirde son adımın yer değiştirme değeri %40 artırılarak yükleme devam ettirilmiştir.

Deney numunelerinin potansiyel plastik mafsal bölgelerinde kullanılan ölçüm rotları yardımıyla numunelerin eğrilikleri hesaplanmıştır. Eğrilik rotlarının pozisyonları ve eğrilik hesabı Şekil 92’de gösterilmiştir.

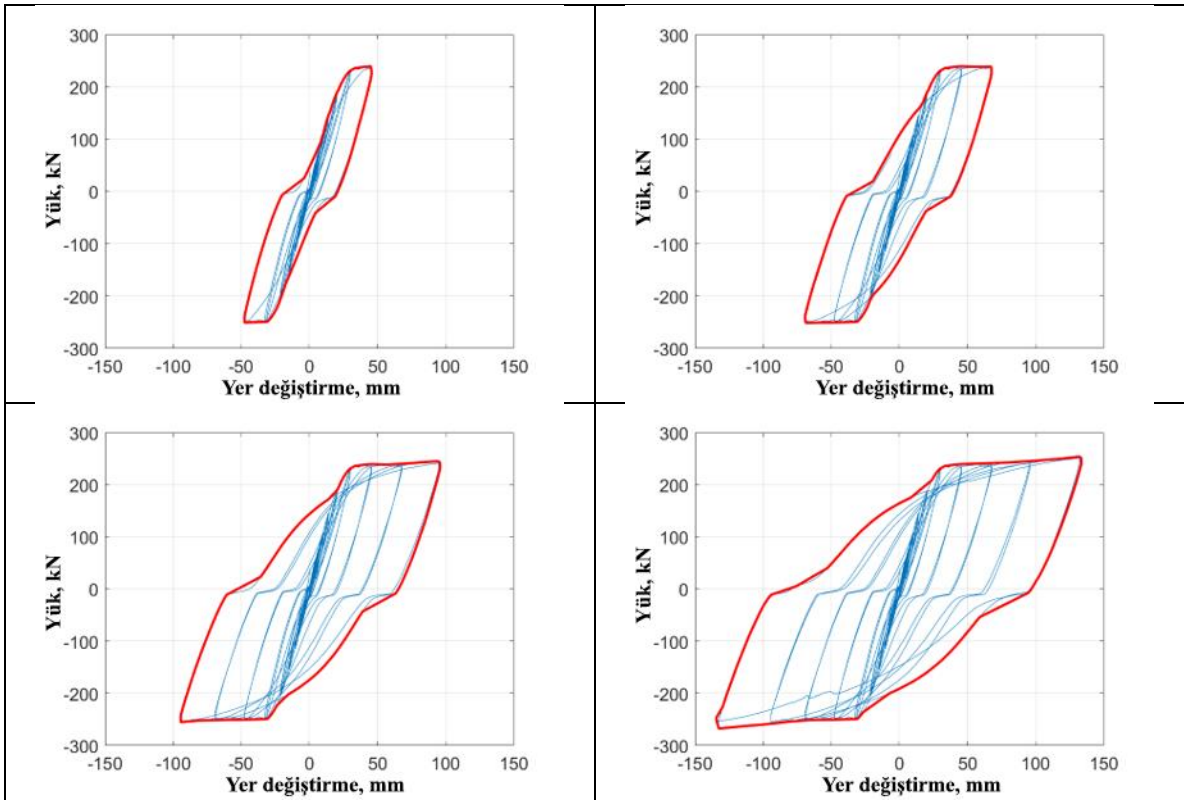


Şekil 92. Eğrilik rotlarının pozisyonları ve eğrilik hesabı

Deney sonuçlarına bağlı olarak, çevrimsel yükleme sırasında yutulan enerjinin hesaplanması için çevrimsel eğrinin kapattığı alan Şekil 93'te gösterildiği şekliyle hesaplanmıştır. Eğrilerin kapattıkları alanın hesaplanması için MATLAB programlama dili kullanılarak bu çalışma kapsamında geliştirilen bir yazılımdan faydalanılmıştır. Bu sayede deneylerde elde edilen yük – yer değiştirme eğrisinin her bir çevrimi için eğrinin kapattığı alan hesaplanmıştır. Örnek olarak, hesaplamaların bazı adımları Şekil 94'te görülmektedir.

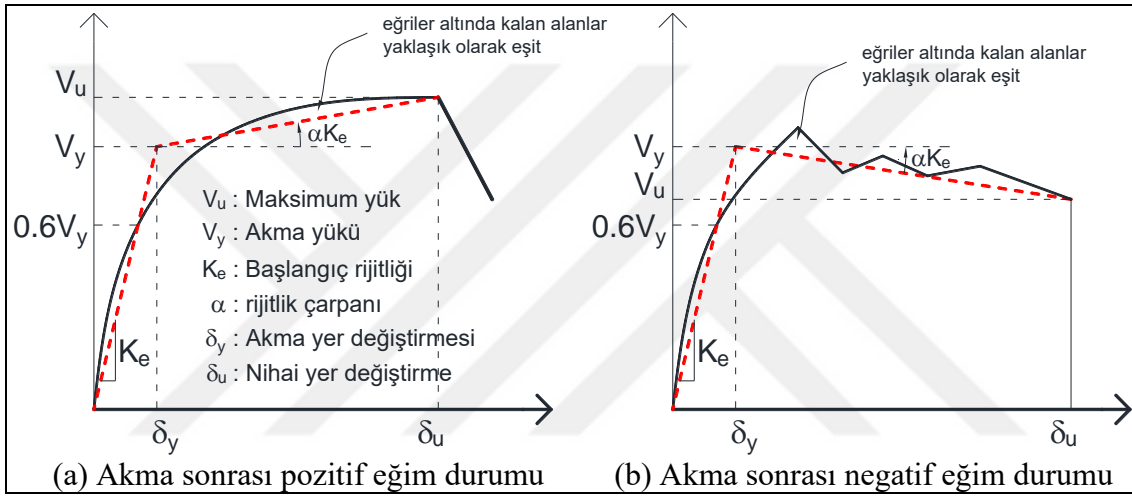


Şekil 93. Çevrimsel yüklemeye her bir çevrimde yutulan enerji hesabı

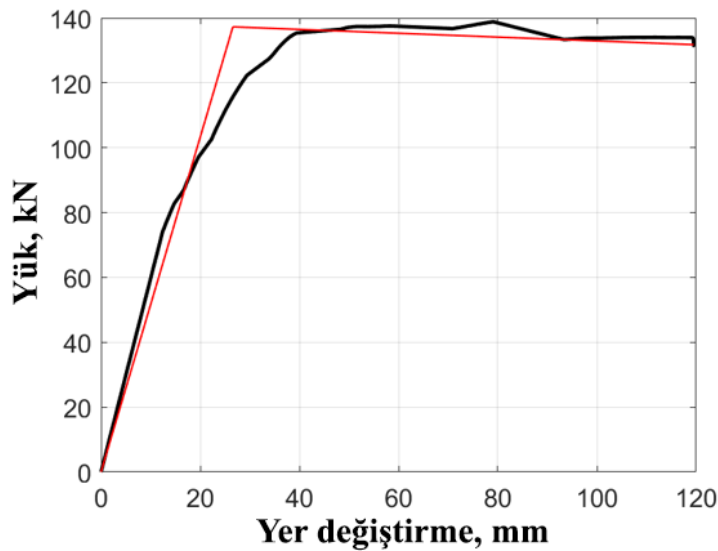


Şekil 94. Çevrimsel yüklemeye yutulan enerjinin MATLAB ile hesabından bazı adımlar

Deneylerde elde edilen yük – yer değiştirme ilişkilerine bağlı olarak suneğliğin hesaplanması için ASCE/SEI 41-17 yönetmeliğinde verilen idealizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, gerçek eğri ile idealize edilmiş eğrilerin altında kalan alanların yaklaşık olarak eşitlenmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, gerçek eğri ile idealize edilmiş eğrinin akma yükünün maksimum %60 seviyesinde keşişmesi gerektiği belirtilmiştir (şekil 95). Bu idealizasyon işlemi sonucunda deneylerde elde edilen çevrimsel eğrilerin zarfı, 2 doğrulu olacak şekilde idealize edilmiştir. İdealizasyon işleminin gerçekleştirilmesi amacıyla, yine bu çalışma kapsamında MATLAB programlama dilinde geliştirilen, bir yazılım kullanılmıştır. Bu yazılım ile gerçekleştirilen örnek bir idealizasyon işlemi şekil 96’da verilmiştir.



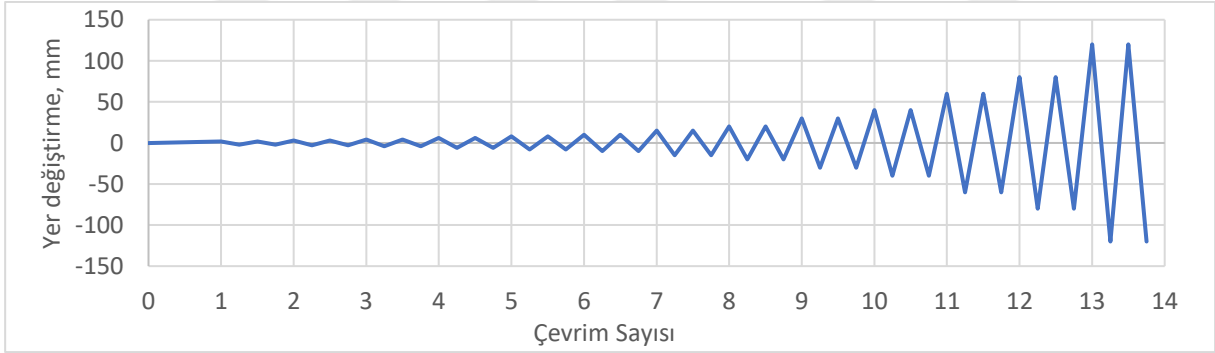
şekil 95. ASCE/SEI 41-17 yaklaşımına göre eğrilerin idealizasyonu



şekil 96. Eğrilerinin idealizasyonu için geliştirilen yazılımın çıktı rneği

3.1.1. Temel – Kolon Birleşimi Deney Sonuçları

Temel – kolon birleşim deneyleri, yer değiştirme kontrollü olarak, kolon sabit eksenel yük etkisi altındayken kolon tepe noktasına tersinir artan yatay tepe yer değiştirmesi uygulanması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında kolona eksenel yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %15'i kadar sabit eksenel yük uygulanmıştır. Kolona uygulanacak eksenel yükün hesaplanmasında $0.15 \cdot f_{co} \cdot A_g$ ifadesi kullanılmıştır. Burada f_{co} betonun standart silindir dayanımını, A_g ise kolonun toplam kesit alanını (Brüt kesit) göstermektedir. Buna bağlı olarak kolona deneyler sırasında yaklaşık 600 kN sabit eksenel yük uygulanmıştır. Temel – kolon numuneleri için hedef yer değiştirme %6 ötelenme oranına karşılık gelen 120 mm olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak temel – kolon birleşim deney numuneleri için FEMA-461'e göre oluşturulan yükleme protokolü Şekil 97'de verilmiştir. Deneyler sonucunda oluşturulan grafiklerde aktüatör ile uygulanan yük yatay yük olarak dikkate alınmıştır. Deneyin sonlandırılma kriteri olarak da uygulanan yatay yük kapasitesinin maksimum değerinin %80'ine düşmesi ve boyuna donatıların burkulması olarak dikkate alınmıştır.

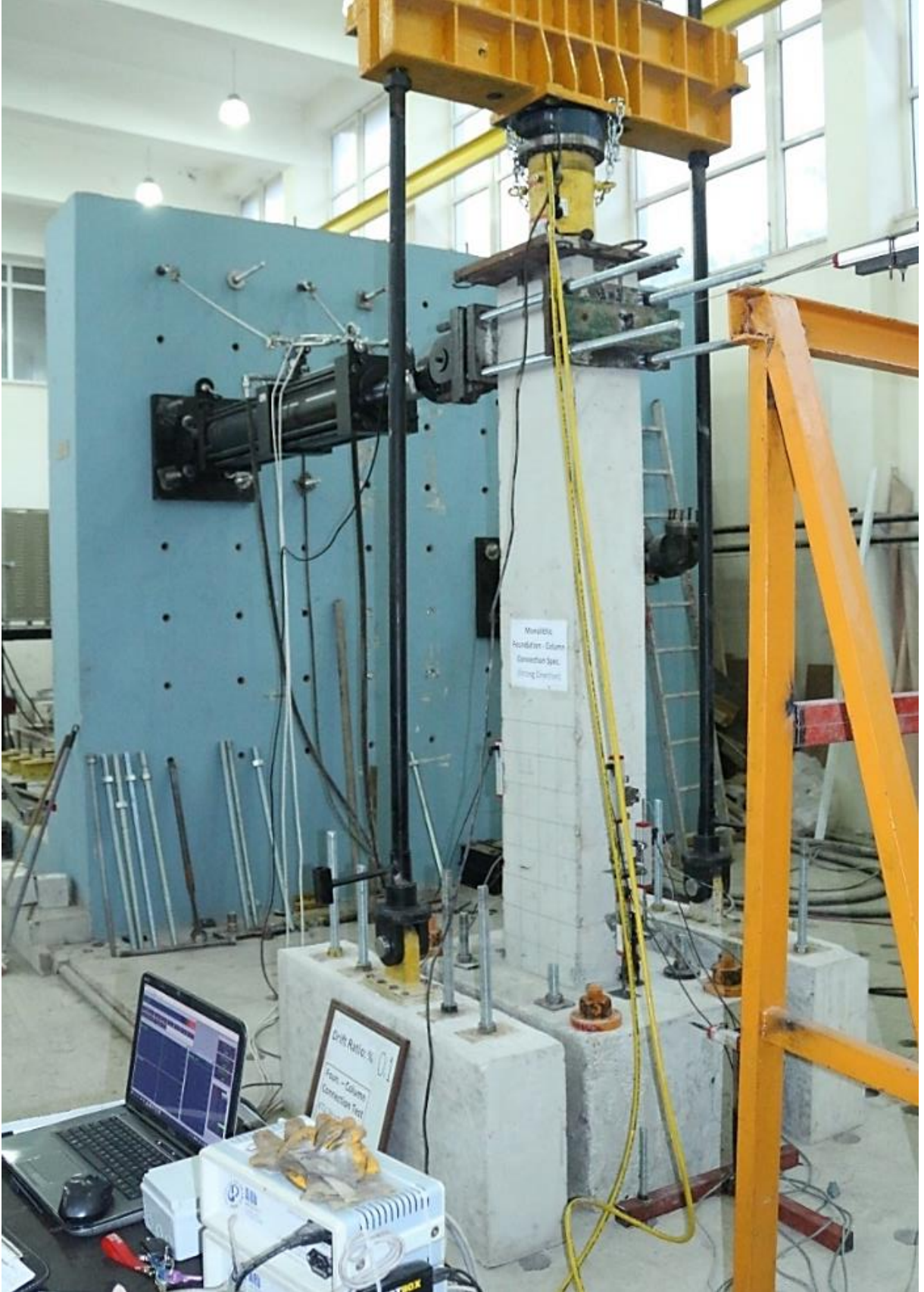


Şekil 97. Temel – kolon numuneleri için belirlenen yükleme protokolü (FEMA-461)

3.1.1.1. Kuvvetli Eksen Temel – Kolon Deney Numuneleri

3.1.1.1.1. Monolitik Numune

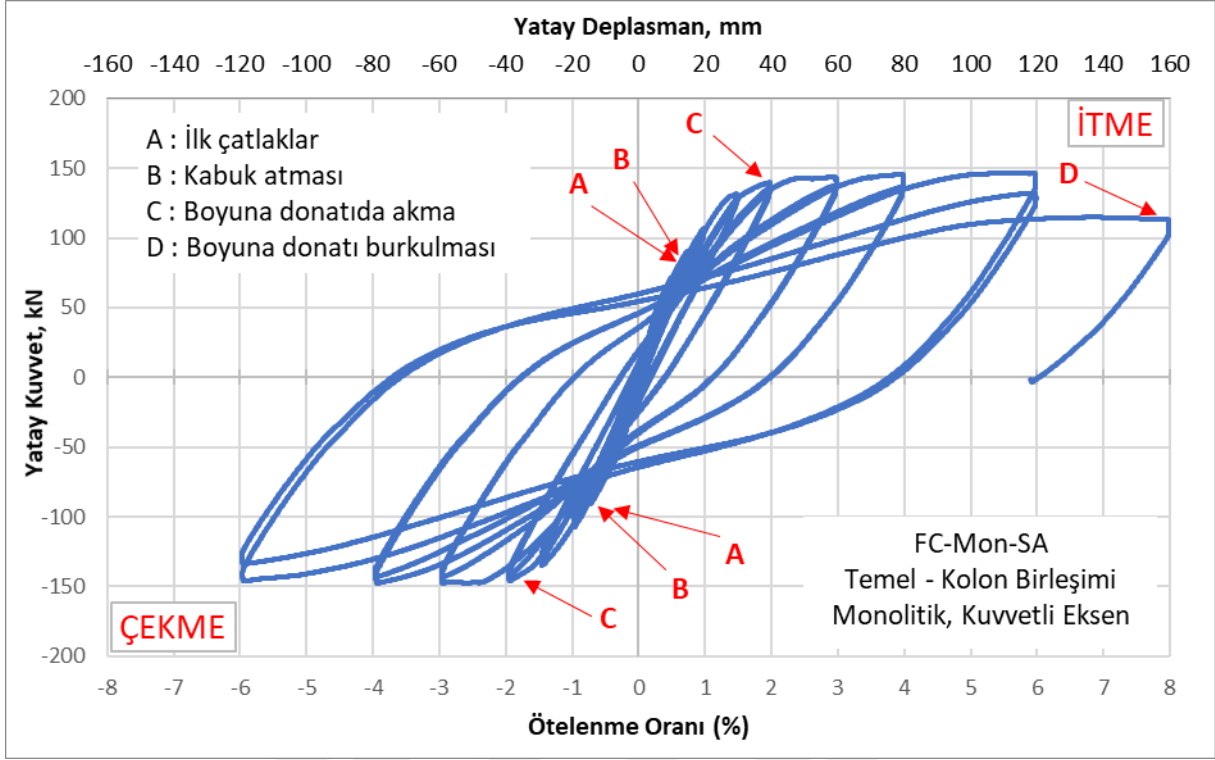
Numunenin deney öncesi görünüş Şekil 98'de verilmiştir. Deney sırasında yapılan gözlemler yükleme adımlarına bağlı olarak Tablo 10'da verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 99'da verilmiştir. Ayrıca, deney numunesinin deney öncesi ve sonrası görünüşleri Şekil 100 ve Şekil 101'de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 98. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney öncesi görünüşü

Tablo 10. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon numunesi deneyde yapılan gözlemler

Çevrim Numarası	Ötelenme Oranı (%)	Tepe Konumu (mm)	Açıklama
1	0.1	2	
		-2	
		2	
		-2	
2	0.15	3	
		-3	
		3	
		-3	
3	0.2	4	
		-4	
		4	
		-4	
4	0.3	6	
		-6	
		6	
		-6	
5	0.4	8	İtme yönünde ilk çatlaklar oluştu
		-8	Çekme yönünde ilk çatlaklar oluştu, SG-3 akma değerine ulaştı
		8	
		-8	SG-2 akma değerine ulaştı
6	0.5	10	
		-10	
		10	
		-10	
7	0.75	15	
		-15	
		15	
		-15	
8	1	20	Çatlaklar ortalama 0.1 mm genişliğine ulaştı
		-20	SG-1 akma değerine ulaştı.
		20	
		-20	
9	1.5	30	Temel – kolon ara yüzeyinde 0.2 mm çatlak oluştu
		-30	
		30	
		-30	
10	2	40	Kabuk betonu atması başladı
		-40	
		40	Beton yüzeyindeki çatlaklar 1 mm'ye ulaştı
		-40	
11	3	60	Kabuk döküldü, beton yüzeyindeki çatlaklar 1.5 mm'ye ulaştı
		-60	Betonda ezilmeler görüldü
		60	
		-60	
12	4	80	
		-80	
		80	
		-80	
13	6	120	
		-120	Sağ yüzdeki açılma ölçüm cihazı yerinden oynadı. Ölçüm sağlıklı.
		120	
		-120	Belirgin yük düşüşü olmadığı için yer değiştirme değeri %40 artırıldı.
14	8	160	Boyuna donatı burkulması ile belirgin yük düşüşü yaşandı. Kalıcı yer değiştirme değeri 118 mm



Şekil 99. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney sonucu



Şekil 100. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesinin deneyin son adımındaki görünüşü (%8 görelî ötelenme oranı)



Şekil 101. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney sonrası görünüşleri

3.1.1.1.2. Prekast Numune

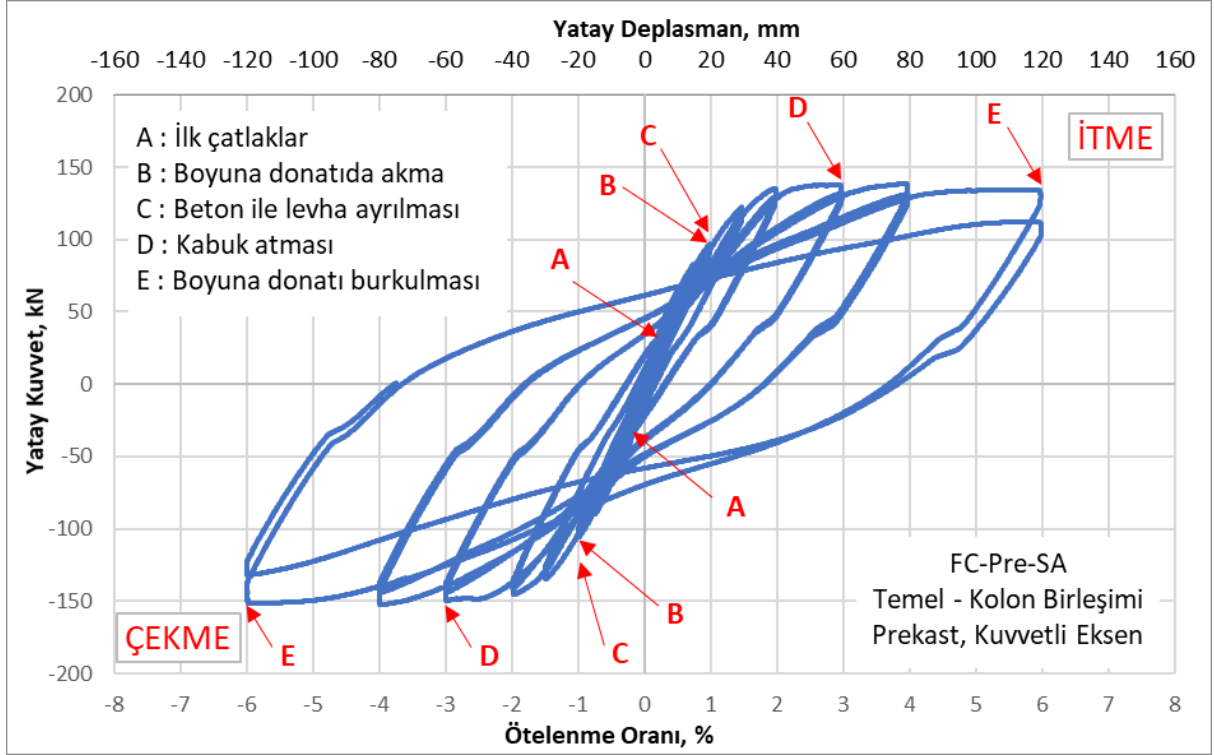
Numunenin deney öncesi görünüş Şekil 102’de verilmiştir. Deney sırasında yapılan gözlemler yükleme adımlarına bağlı olarak Tablo 11’de verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 103’te verilmiştir. Deney numunesinin son adımdaki karşıdan görünüşü ve deney sonrası yakın görünüşleri Şekil 104 ve Şekil 105’de sırasıyla verilmiştir.



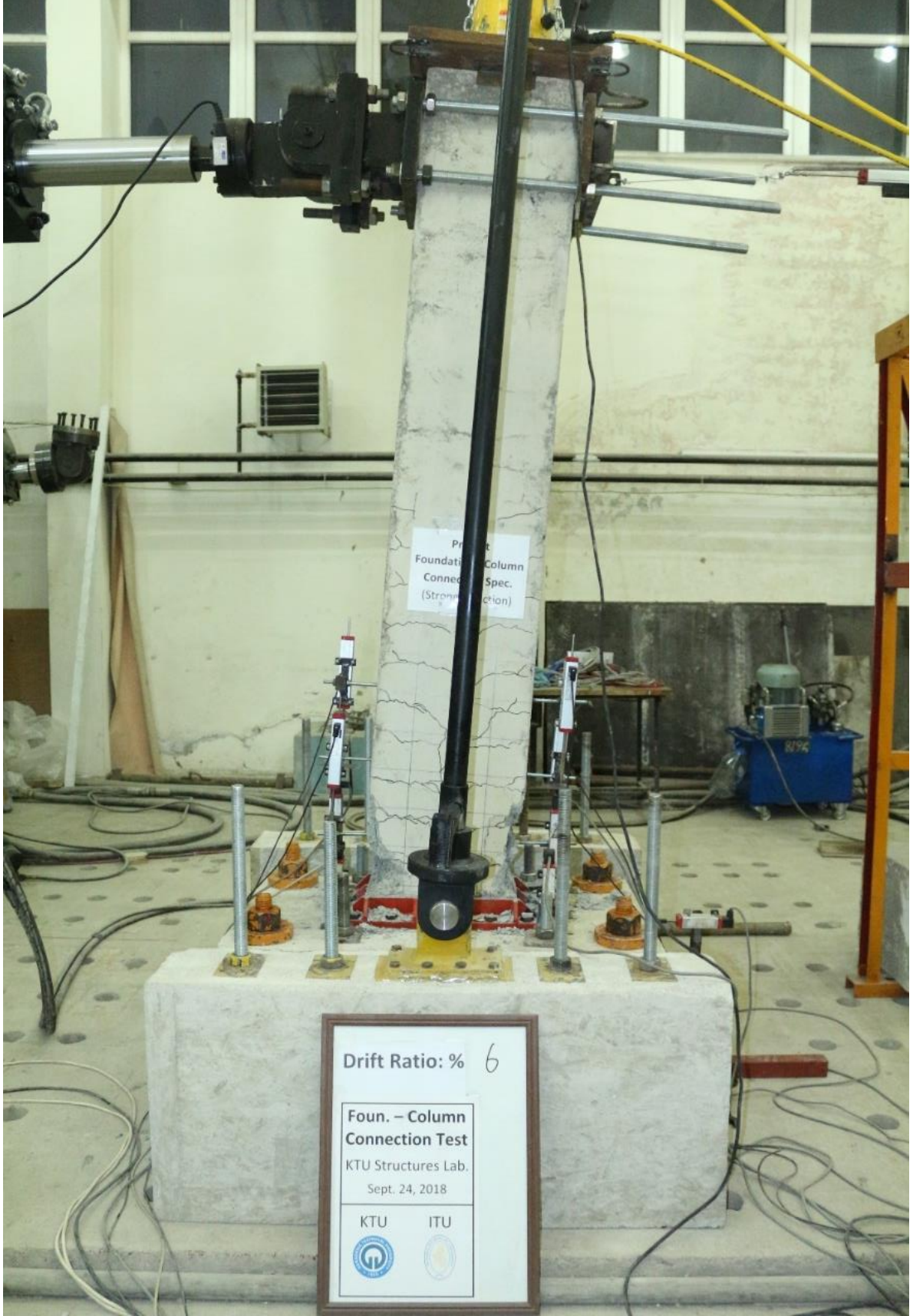
Şekil 102. Prekast kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney öncesi görünüşü

Tablo 11. Prekast kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deneyindeki gözlemler

Çevrim Numarası	Ötelenme Oranı (%)	Tepe Konumu (mm)	Açıklama
	0	0	
1	0.1	2	
		-2	
		2	
		-2	
2	0.15	3	
		-3	
		3	
		-3	
3	0.2	4	Kılcal çatlaklar başladı
		-4	Kılcal çatlaklar başladı
		4	
		-4	
4	0.3	6	
		-6	
		6	
		-6	
5	0.4	8	
		-8	
		8	
		-8	
6	0.5	10	
		-10	
		10	
		-10	
7	0.75	15	
		-15	
		15	
		-15	
8	1	20	SG-2 akma değerine ulaştı
		-20	
		20	Beton levha arası ayrılma başlangıcı
		-20	
9	1.5	30	SG-3 akma değerine ulaştı
		-30	
		30	
		-30	
10	2	40	SG-1 akma değerine ulaştı
		-40	Beton ve levha arası açılma 2 mm'ye ulaştı
		40	Beton yüzeyindeki çatlaklar 2.5 mm'ye ulaştı
		-40	
11	3	60	Kabuk döküldü, beton yüzeyindeki çatlaklar 3.5 mm'ye ulaştı
		-60	
		60	
		-60	
12	4	80	
		-80	
		80	
		-80	
13	6	120	Boyuna donatı burkulma başlangıcı
		-120	
		120	
		-120	Belirgin yük düşüşü ile deney durduruldu. Kalıcı yer değiştirme 75 mm



Şekil 103. Prekast kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney sonucu



Şekil 104. Prekast kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesinin deneyin son adımındaki görünüşü (%6 görece ötelenme oranı)



(a) Deney bölgesi karşıdan görünüşü



(b) Deney bölgesi sağdan görünüşü



(c) Deney bölgesi soldan görünüşü

Şekil 105. Prekast kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney sonrası görünüşleri

3.1.1.2. Zayıf Eksen Temel – Kolon Deney Numuneleri

3.1.1.2.1. Monolitik Numune

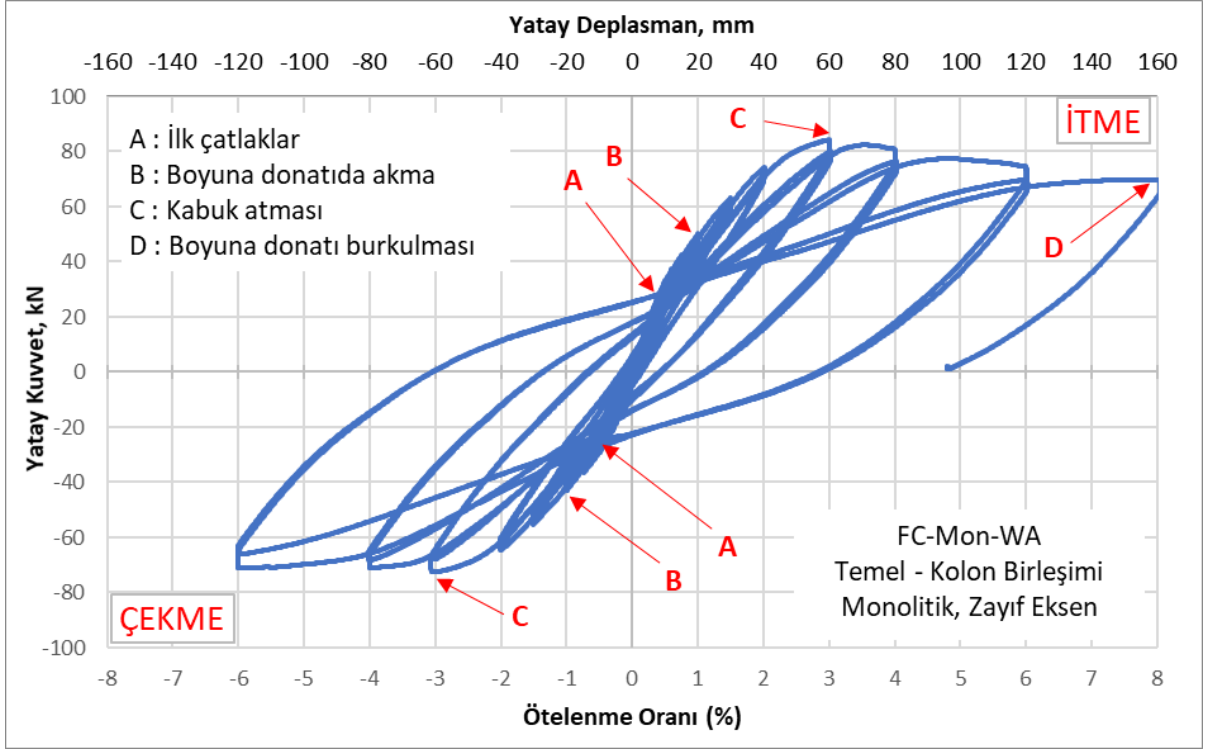
Numunenin deney öncesi görünüş Şekil 106’da verilmiştir. Deney sırasında yapılan gözlemler yükleme adımlarına bağlı olarak Tablo 12’de verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 107’de verilmiştir. Deney numunesinin son adımdaki karşıdan görünüşü ve deney sonrası yakın görünüşleri Şekil 108 ve Şekil 109’da sırasıyla verilmiştir.



Şekil 106. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi deney öncesi görünüşü

Tablo 12. Monolitik zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesi deneyindeki gözlemler

Çevrim Numarası	Ötelenme Oranı (%)	Tepe Konumu (mm)	Açıklama
	0	0	
1	0.1	2	
		-2	
		2	
		-2	
2	0.15	3	
		-3	
		3	
		-3	
3	0.2	4	
		-4	
		4	
		-4	
4	0.3	6	
		-6	İlk kılcak çatlak
		6	
		-6	
5	0.4	8	
		-8	
		8	
		-8	
6	0.5	10	
		-10	
		10	
		-10	
7	0.75	15	
		-15	
		15	
		-15	
8	1	20	Çatlaklar ortalama 0.1 mm genişliğine ulaştı
		-20	SG-2 akma değerine ulaştı
		20	
		-20	
9	1.5	30	
		-30	SG-1 ve SG-3 akma değerine ulaştı
		30	
		-30	
10	2	40	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.2 mm'ye ulaştı
		-40	
		40	
		-40	
11	3	60	
		-60	Kabuk dökülmeye başladı
		60	
		-60	
12	4	80	Kabuk döküldü
		-80	
		80	
		-80	
13	6	120	
		-120	
		120	
		-120	Belirgin yük düşüşü olmadığı için yer değiştirme değeri %40 arttırılıp deneye devam edildi.
14	8	160	Boyuna donatı burkulması ile belirgin yük düşüşü yaşandı. Kalıcı yer değiştirme değeri 120 mm



Şekil 107. Monolitik zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesi deney sonucu



Şekil 108. Monolitik zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesinin deneyin son adımındaki görünüşü (%8 görece ötelenme oranı)



(a) Deney bölgesi karşıdan görünüşü



(b) Deney bölgesi sağdan görünüşü

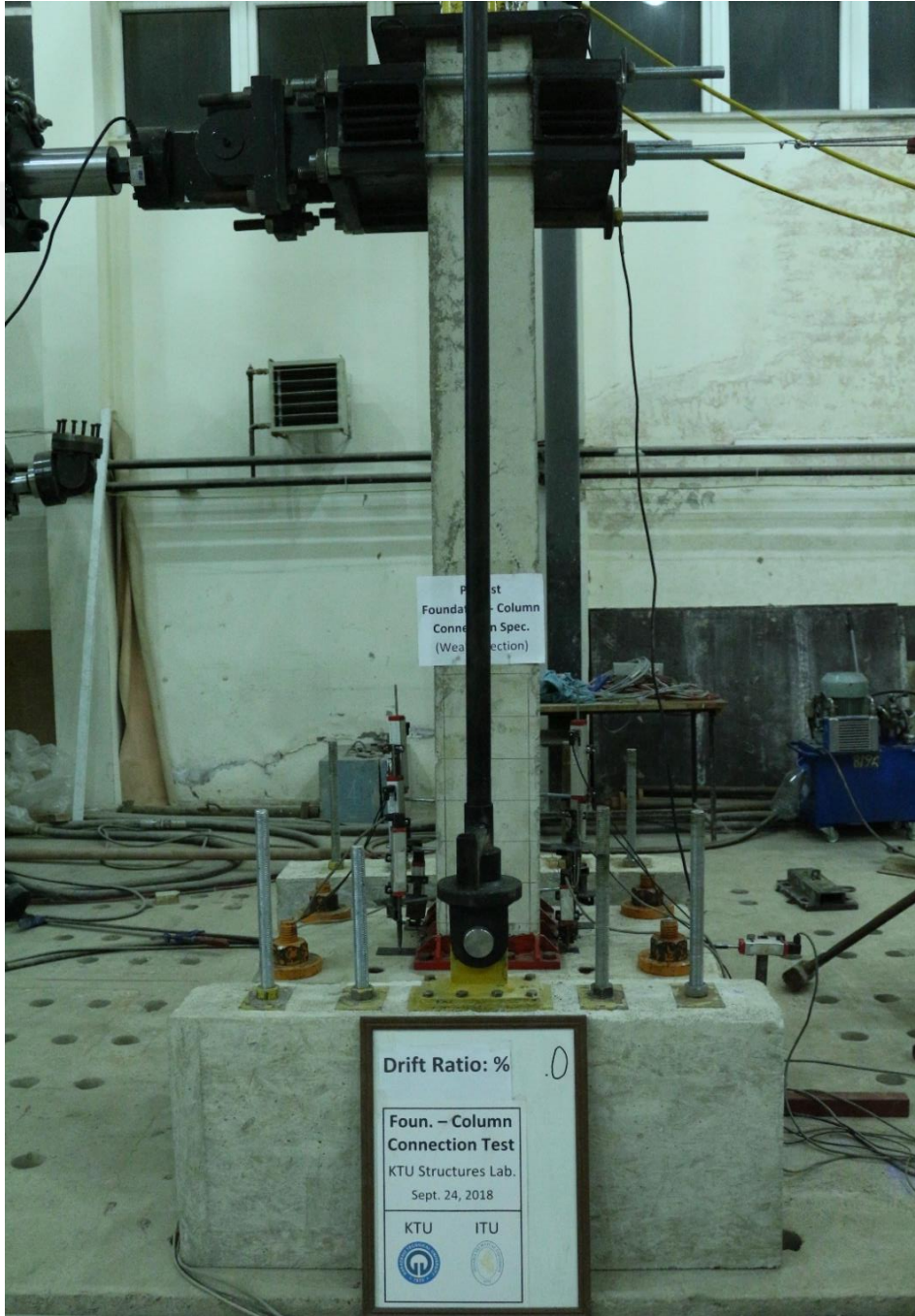


(c) Deney bölgesi soldan görünüşü

Şekil 109. Monolitik zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesi deney sonrası yakın görünüşleri

3.1.1.2.2. Prekast Numune

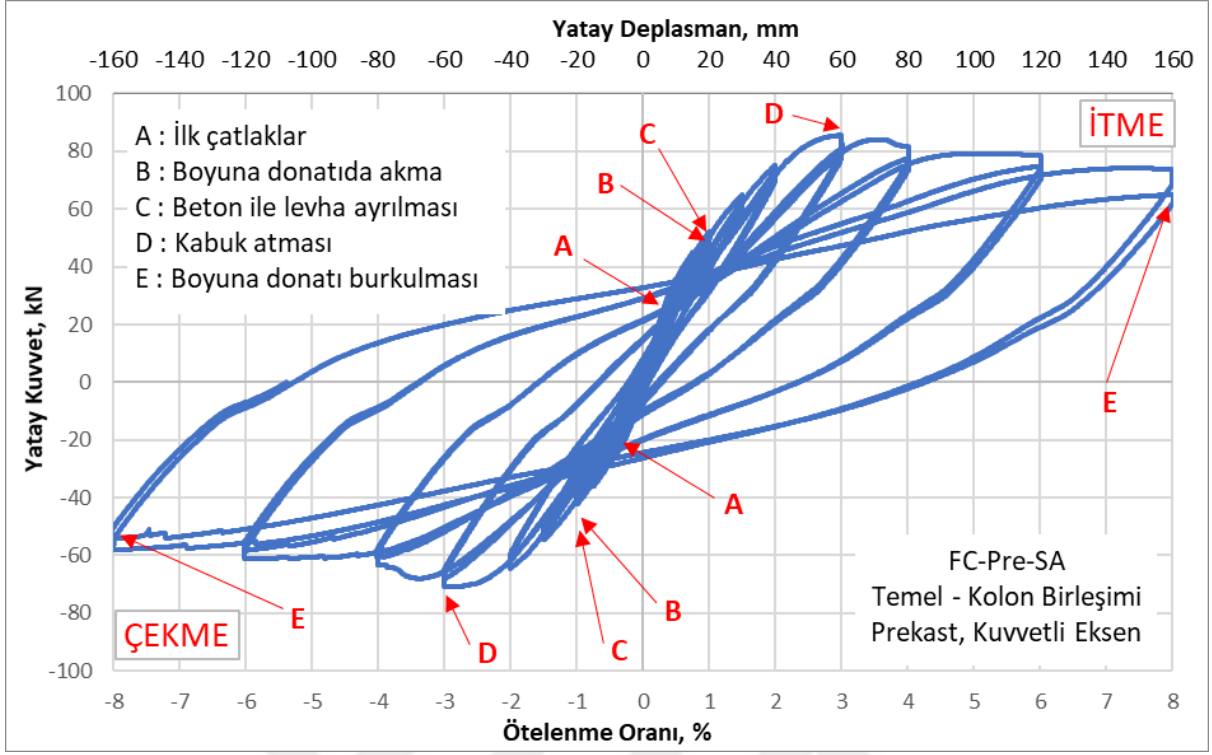
Numunenin deney öncesi görünüş Şekil 110’da verilmiştir. Deney sırasında yapılan gözlemler yükleme adımlarına bağlı olarak Tablo 13’te verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 111’de verilmiştir. Deney numunesinin son adımdaki karşıdan görünüşü ve deney sonrası yakın görünüşleri Şekil 112 ve Şekil 113’te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 110. Prekast zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesi deney öncesi görünüşü

Tablo 13. Prekast zayıf eksen temel – kolon birleşim deneyinde yapılan gözlemler

Çevrim Numarası	Ötelenme Oranı (%)	Tepe Konumu (mm)	Açıklama
	0	0	SG-3 arızalı
1	0.1	2	
		-2	
		2	
		-2	
2	0.15	3	
		-3	
		3	
		-3	
3	0.2	4	
		-4	
		4	
		-4	
4	0.3	6	
		-6	
		6	
		-6	
5	0.4	8	Kılcal çatlaklar başladı
		-8	Kılcal çatlaklar başladı
		8	
		-8	
6	0.5	10	
		-10	
		10	
		-10	
7	0.75	15	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.1 mm mertebesinde
		-15	
		15	
		-15	
8	1	20	
		-20	
		20	SG-1 akma seviyesine ulaştı. Beton levha arası ayrılma başlangıcı
		-20	SG-2 akma seviyesine ulaştı
9	1.5	30	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.2 mm mertebesinde
		-30	
		30	
		-30	
10	2	40	
		-40	
		40	
		-40	
11	3	60	Kabuk dökülme başlangıcı, beton yüzeyindeki çatlaklar 0.75 mm'ye ulaştı
		-60	
		60	
		-60	
12	4	80	Kabuk döküldü
		-80	
		80	
		-80	
13	6	120	
		-120	
		120	
		-120	
14	8	160	
		-160	
		160	
		-160	Boyuna donatı burkulma Belirgin yük düşüşü ile deney durduruldu. Kalıcı yer değiştirme 109 mm



Şekil 111. Prekast zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesi deney sonucu



Şekil 112. Prekast zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesi deneyin son adımındaki görünüşü (%8 görece ötelenme oranı)



(a) Deney bölgesi karşıdan görünüşü



(b) Deney bölgesi sağdan görünüşü

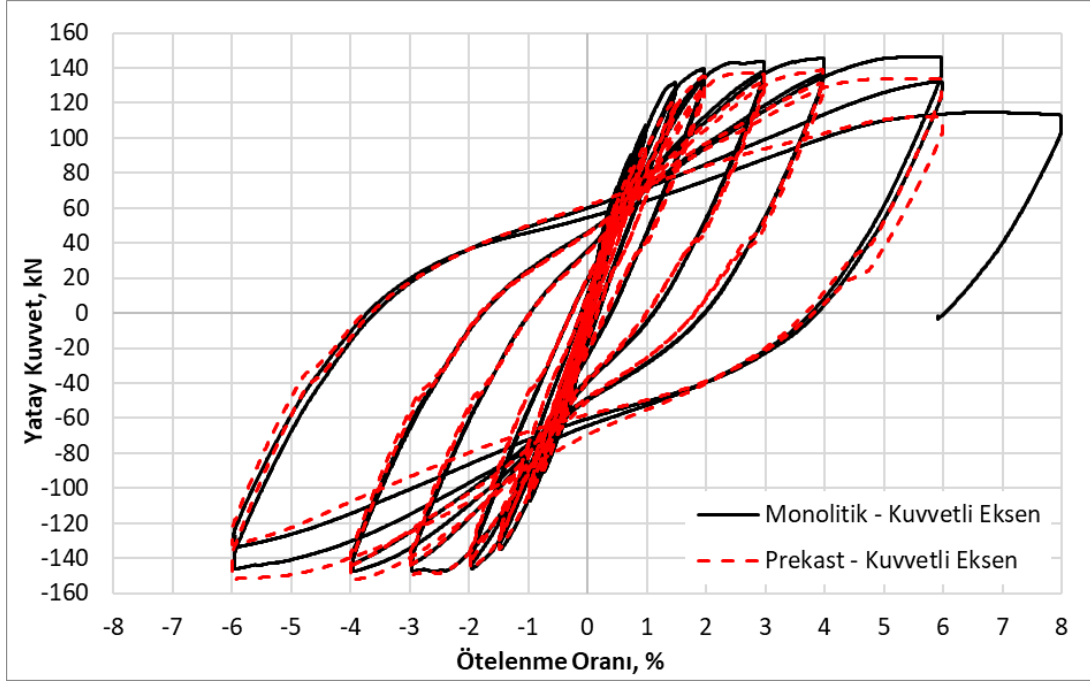


(c) Deney bölgesi soldan görünüşü

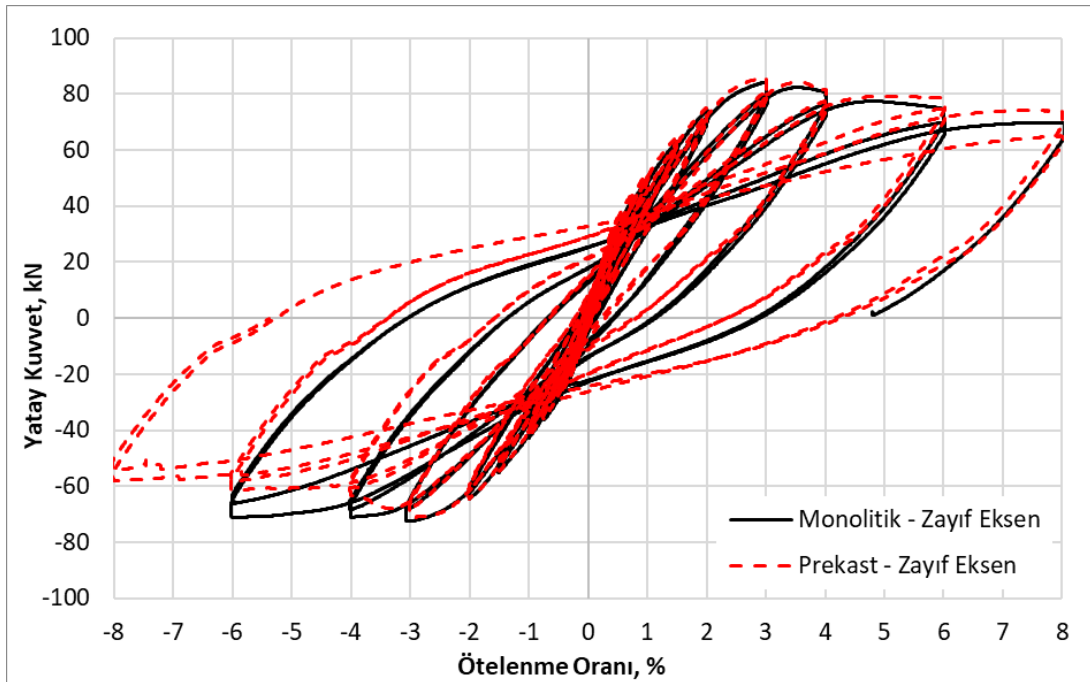
Şekil 113. Prekast zayıf eksen temel – kolon birleşiminin deney sonrası görünüşleri

3.1.1.3. Temel – Kolon Birleşimi Numuneleri Karşılaştırılması

Kuvvetli eksen ve zayıf eksen temel – kolon birleşim numuneleri karşılaştırmalı deney sonuçları Şekil 114 ve Şekil 115’te sırayla verilmiştir. Zayıf ve kuvvetli eksende yüklenen numunelerin deney sonrası genel görünüşleri Şekil 116 ve Şekil 117’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 114. Kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numuneleri karşılaştırmalı deney sonuçları



Şekil 115. Zayıf eksen temel – kolon birleşim numuneleri karşılaştırmalı deney sonuçları



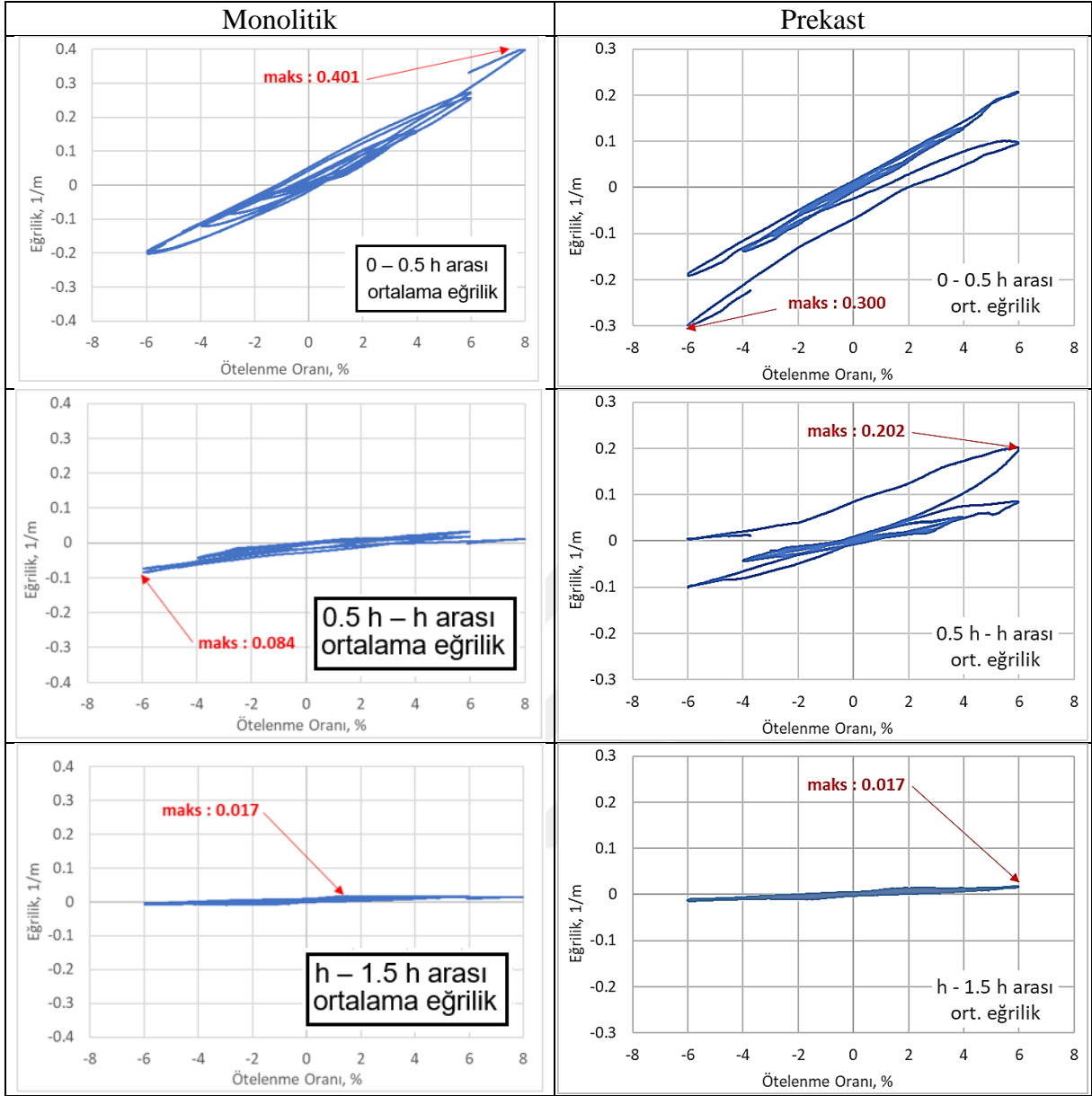
Şekil 116. Monolitik ve prekast zayıf eksen numunelerin deney sonrası genel görünüşleri



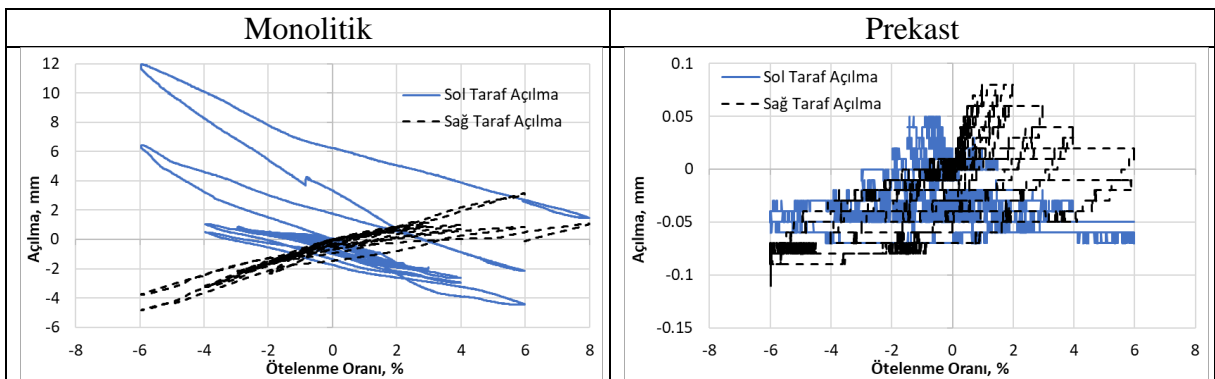
Şekil 117. Monolitik ve prekast güçlü eksen numunelerin deney sonrası genel görüntüleri

Kuvvetli ekseninde yüklenen temel-kolon numuneleri için deney sonuçlarından hesaplanan eğrilik değerleri ve temel-kolon ara yüzündeki açılma ölçümleri Şekil 118 ve Şekil 119'da sırasıyla verilmiştir. Kolonun 0-0.5h arası kısmında eğrilik değerinin monolitik numunede daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, 0.5h-h arası kısmında prekast numunede eğrilik monolitiğe göre yaklaşık 2.5 kat fazla olduğu görülmektedir. Buna karşın, h-1.5h kısımlarında ise eğrilik değerleri hem monolitik hem de prekast numunede ihmal edilebilir seviyede kalmıştır. Eğrilik sonuçlardan, önerilen prekast birleşim sisteminin hasarı kolon boyunca yaymaya yardımcı olduğu yorumu yapılabilir. Monolitik numunede yapılan ara yüz açılması ölçümünde açılma değeri 4 mm mertebesine erişirken, basınç etkisi altında ezilme ise 12 mm olarak ölçülmüştür. Buna karşın, prekast numunede temel-kolon ara yüzünde yapılan açılma ölçümünde monolitik numuneye nazaran çok küçük değerler ölçülmüştür. Bu da ön gerilmeli olarak sıkılan cıvataların deney esnasında gevşemediğini ve temel yüzü levhası ile kolon uç levhası arasında açılmaların ihmal edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir.

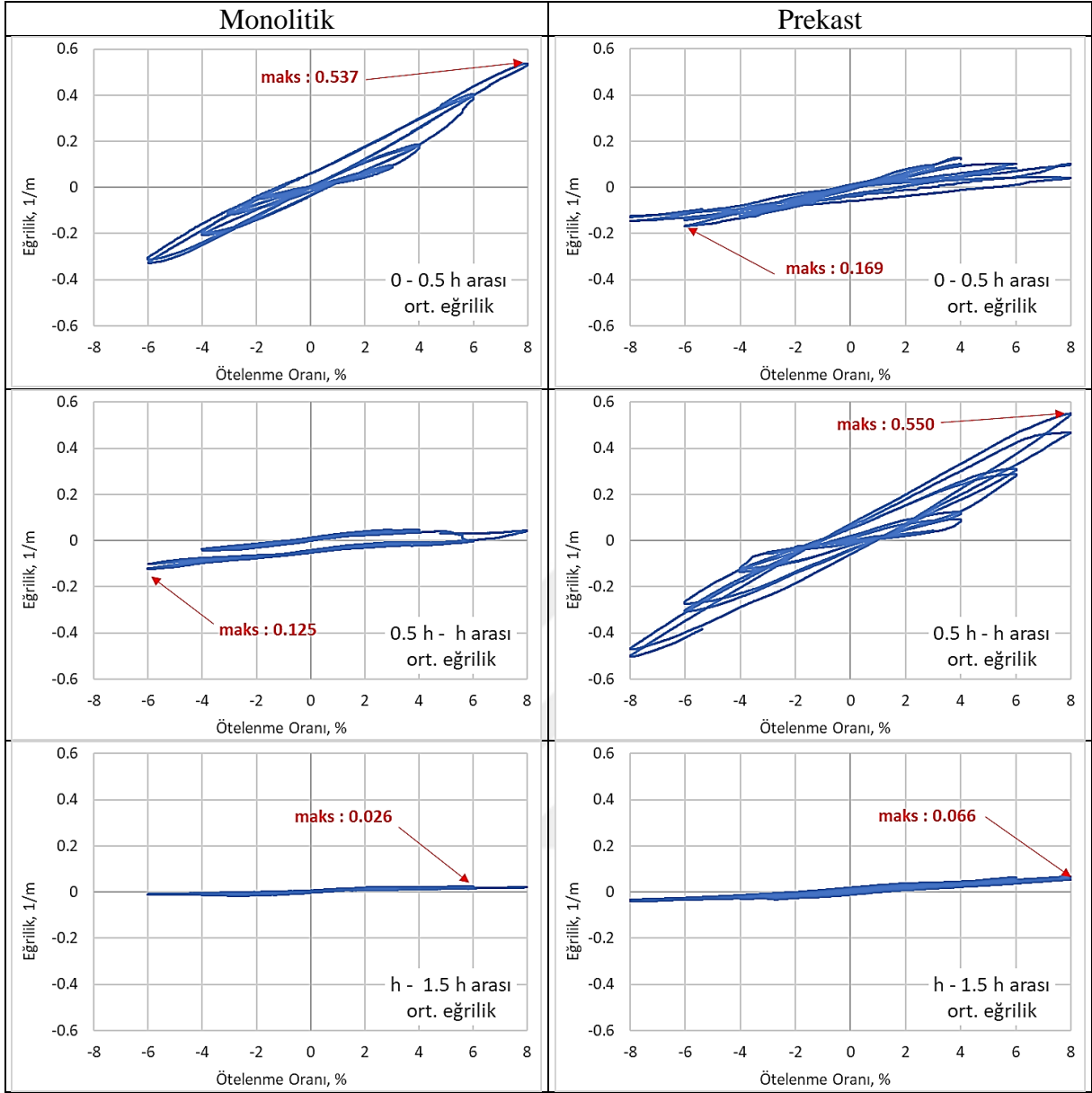
Zayıf ekseninde yüklenen temel-kolon numuneleri için deney sonuçlarından hesaplanan eğrilik değerleri ve temel-kolon ara yüzündeki açılma ölçümleri Şekil 120 ve Şekil 121'de sırasıyla verilmiştir. Monolitik numunede eğrilik çoğunlukla 0-0.5h arasında gerçekleştiği gözlemlenirken, prekast numunede 0.5h-h arasındaki eğrilik 0-0.5h arasına oranla daha fazla eğilme yaptığı tespit edilmiştir. Zayıf eksen numunelerindeki yükleme doğrultusundaki boyutun (h) küçük olması ve kolon uç levhasının o bölgeyi rijitleştirmesi olduğu düşünülmektedir. Açılma ölçümlerinde monolitik numunede en fazla açılmanın 4 mm ve en fazla kısılmanın (ezilmenin) 2 mm olduğu görülmektedir. Prekast numunede ise kuvvetli eksen numunesine benzer olarak açılma ölçümünün ihmal edilebilir mertebelerde kaldığı söylenebilir. Yine aynı şekilde, zayıf eksen prekast numunesinde de ön gerilmeli (torklanmış) cıvataların gevşemediği ve levhalar arası açılmaların ihmal edilebilir seviyelerde olduğu sonucuna varılabilir.



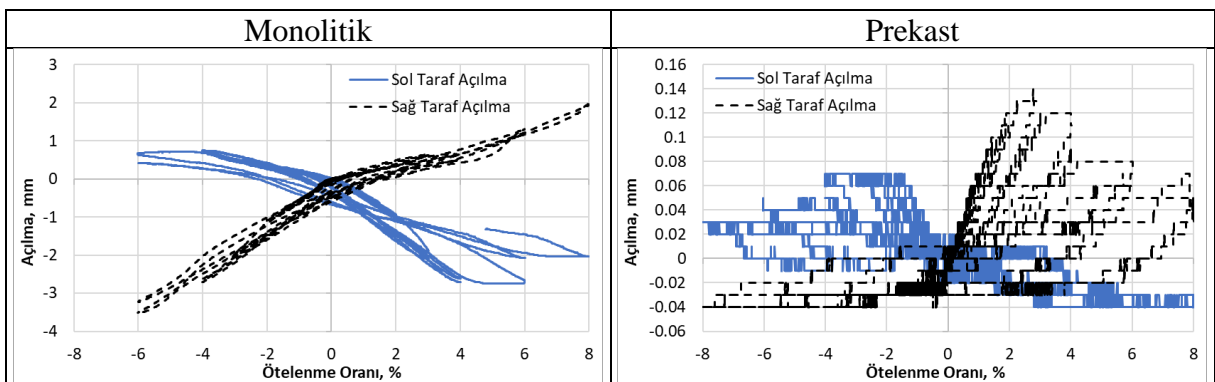
Şekil 118. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi eğrilikleri



Şekil 119. Monolitik kuvvetli eksen temel – kolon birleşim numunesi temel – kolon ara yüzündeki açılmalar



Şekil 120. Monolitik zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesi eğrilikleri



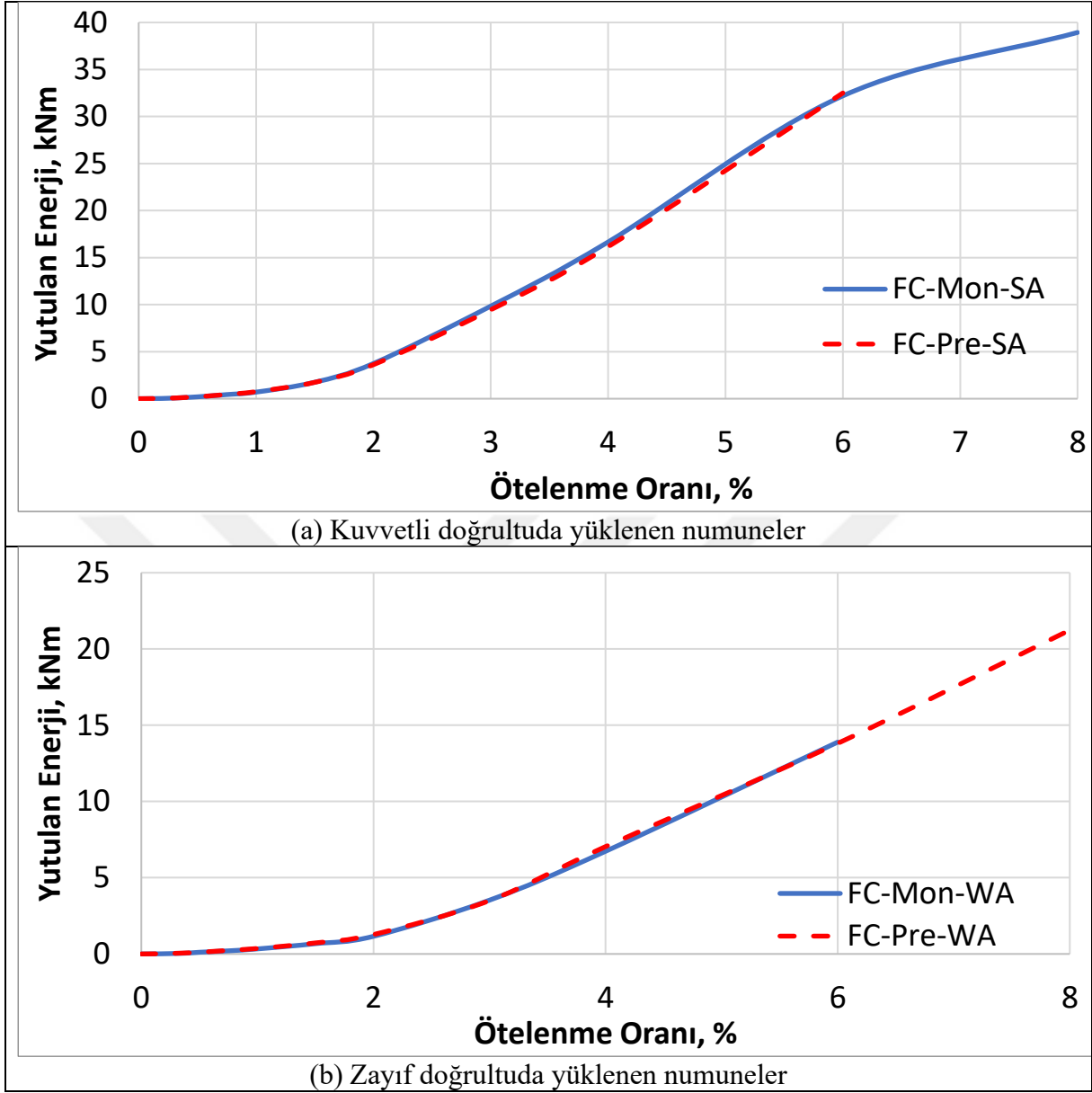
Şekil 121. Monolitik zayıf eksen temel – kolon birleşim numunesi temel – kolon ara yüzündeki açılmalar

Deneylerden elde edilen yük – yer değiştirme eğrilerine bağlı olarak deney numunelerinin deprem performans seviyeleri, plastik dönmeleri esas alan FEMA 356-2000 yönetmeliğine göre belirlenmiştir. Tablo 14’te her bir deprem performans seviyesine karşılık gelen plastik dönme oranlarını ve numunelerin deprem performans seviyeleri görülmektedir. Deney numunelerinin plastik dönmelerini bulurken numunelerin ötelenme oranları toplam dönme (θ_t), boyuna donatının akma anındaki ötelenme oranı ise elastik dönme θ_e olarak kabul edilmiştir. Plastik dönme ise toplam dönme oranından elastik dönmenin çıkarılması ($\theta_p = \theta_t - \theta_e$) ile hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlere göre, bütün kolon numuneleri ‘‘Göçme ncesi Performans Düzeyi’’ne ulaşmıştır.

Tablo 14. FEMA356-2000 yönetmeliğine göre deprem performansı

Numune Adı	Elastic Dönme, θ_e	Plastik Dönme Limitleri			Göçme anındaki toplam dönme, θ_t	Plastik Dönme, θ_p	Deprem performans düzeyi
		Hemen kullanım (HK)	Can güvenliği (CG)	Göçme ncesi (G)			
FC-Mon-SA	0.005	0.005	0.015	0.02	0.08	0.075	G
FC-Pre-SA	0.010				0.06	0.050	G
FC-Mon-WA	0.010				0.08	0.070	G
FC-Pre-WA	0.010				0.08	0.070	G

DeneySEL çevrimsel yükleme sonuçlarına bağlı olarak her bir ötelenme oranı için hesaplanan enerji yutma miktarları Şekil 122’de verilmiştir. Sonuçlara göre, monolitik ve prekast numunelerin benzer seviyede enerji yuttukları görülmüştür.



Şekil 122. (a) Kuvvetli ekseninde yüklenen temel-kolon numunelerinin enerji yutma miktarları; (b) Zayıf ekseninde yüklenen temel-kolon numunelerinin enerji yutma oranları

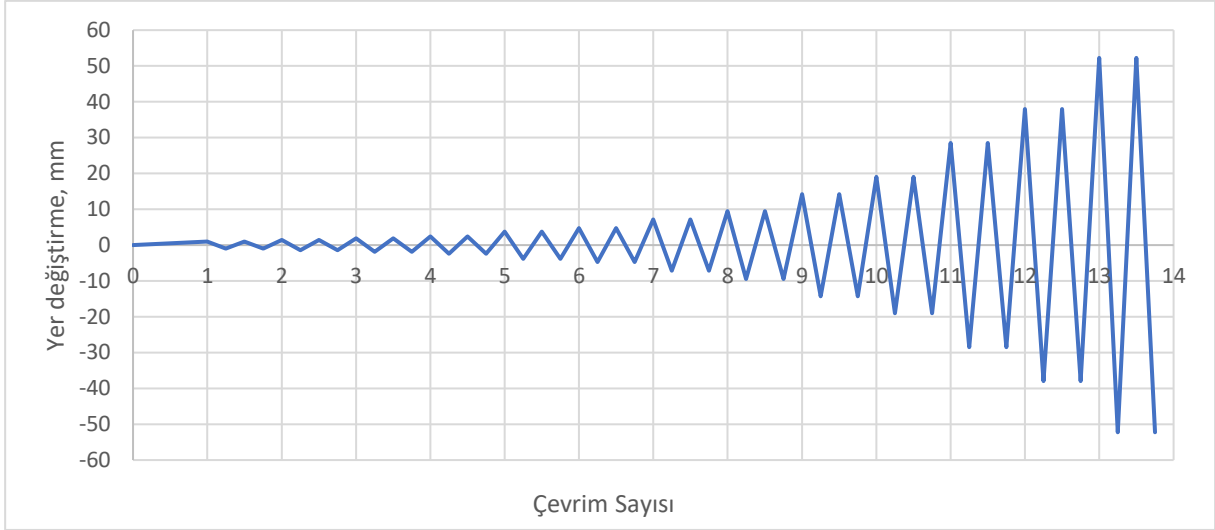
Temel-kolon numuneleri için hesaplanan idealize edilmiş eğriden elde edilen maksimum eğilme momenti, akma yer değiştirmesi, nihai yer değiştirme ve süneklik oranı Tablo 15’de verilmiştir. Genel olarak, monolitik ve prekast numunelerin benzer seviyede süneklik gösterdiği görülmektedir. Kuvvetli ekseninde yüklenen numunelerin aynı nihai yer değiştirmeye sahip olmalarına rağmen prekast numunenin %10 civarında daha az süneklik göstermesi, farklı nihai ve akma yerdeğiştirme değerlerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır. Sonuçlara bakıldığında, geliştirilen prekast birleşim sisteminin deprem bölgelerinde kullanılabilirliği söylenebilir.

Tablo 15. Temel-kolon numuneleri için hesaplanan yapısal parametreler

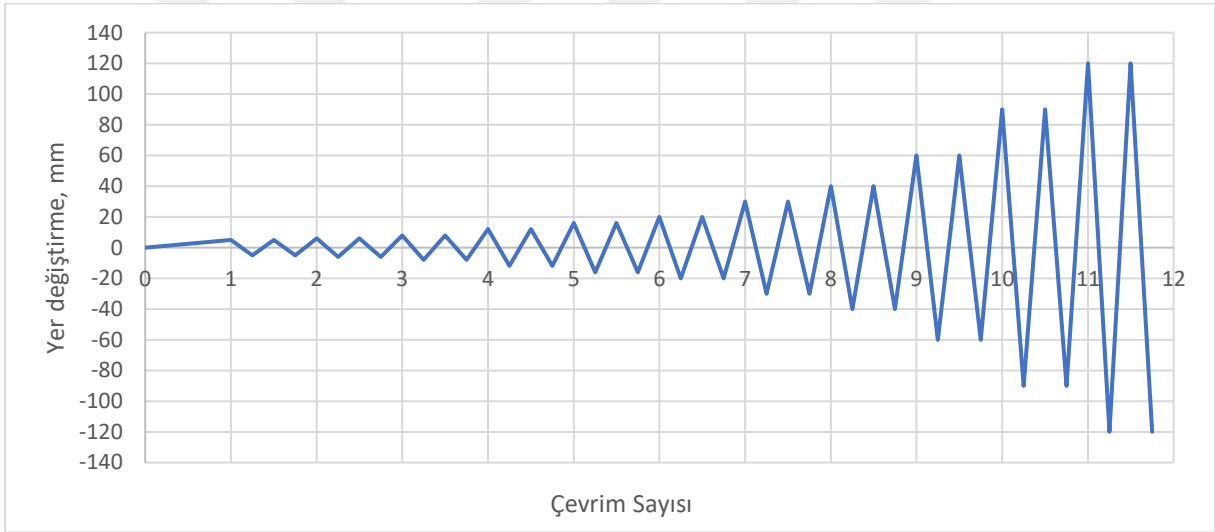
Numune adı	Maksimum eğilme momenti, kNm	Akma yer değıştirmesi, mm	Nihai yer değıştirme, mm	Süneklik oranı	Göçme modu
FC-Mon-SA	295.2	26.40	160	6.06	Plastik mafsal bölgesinde eğilme hasarını takip eden boyuna donatı burkulması
FC-Pre-SA	305.2	22.00	120	5.45	Plastik mafsal bölgesinde eğilme hasarını takip eden boyuna donatı burkulması
FC-Mon-WA	168.4	31.50	160	5.08	Plastik mafsal bölgesinde eğilme hasarını takip eden boyuna donatı burkulması
FC-Pre-WA	171.1	27.00	160	5.93	Plastik mafsal bölgesinde eğilme hasarını takip eden boyuna donatı burkulması

3.1.2. Kolon – Kiriş Birleşimi Deney Sonuçları

Kolon – kiriş birleşim deneyleri, kolon sabit eksenel yük etkisi altındayken kiriş tepe noktasına tersinir artan yatay tepe yer değıştirmesi uygulanarak yer değıştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında kolona eksenel yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %10'u kadar sabit eksenel yük uygulanmıştır. Kolona uygulanacak eksenel yükün hesaplanmasında $0.1 \cdot f_{co} \cdot A_g$ ifadesi kullanılmıştır. Burada f_{co} betonun standart silindir dayanımını, A_g ise kolonun toplam kesit alanını (Brüt kesit) göstermektedir. Buna bağlı olarak kolona deneyler sırasında yaklaşık 640 kN sabit eksenel yük uygulanmıştır. Kolon – kiriş numuneleri için hedef yer değıştirme değeri, kiriş uzunluğu 1.0 m olan kirişler için %5.5 ötelenme oranına karşılık gelen 52 mm olarak, kiriş uzunluğu 2.0 m olan numuneler için ise %6 ötelenme oranına denk gelen 120 mm olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak kiriş boyu 1.0 m ve 2.0 m olan kolon – kiriş birleşim deney numuneleri için oluşturulan yükleme protokolleri Şekil 123 ve Şekil 124'te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 123. Kiriş boyu 1.0 m olan kolon – kiriş birleşim numuneleri için y¼kleme protokol¼

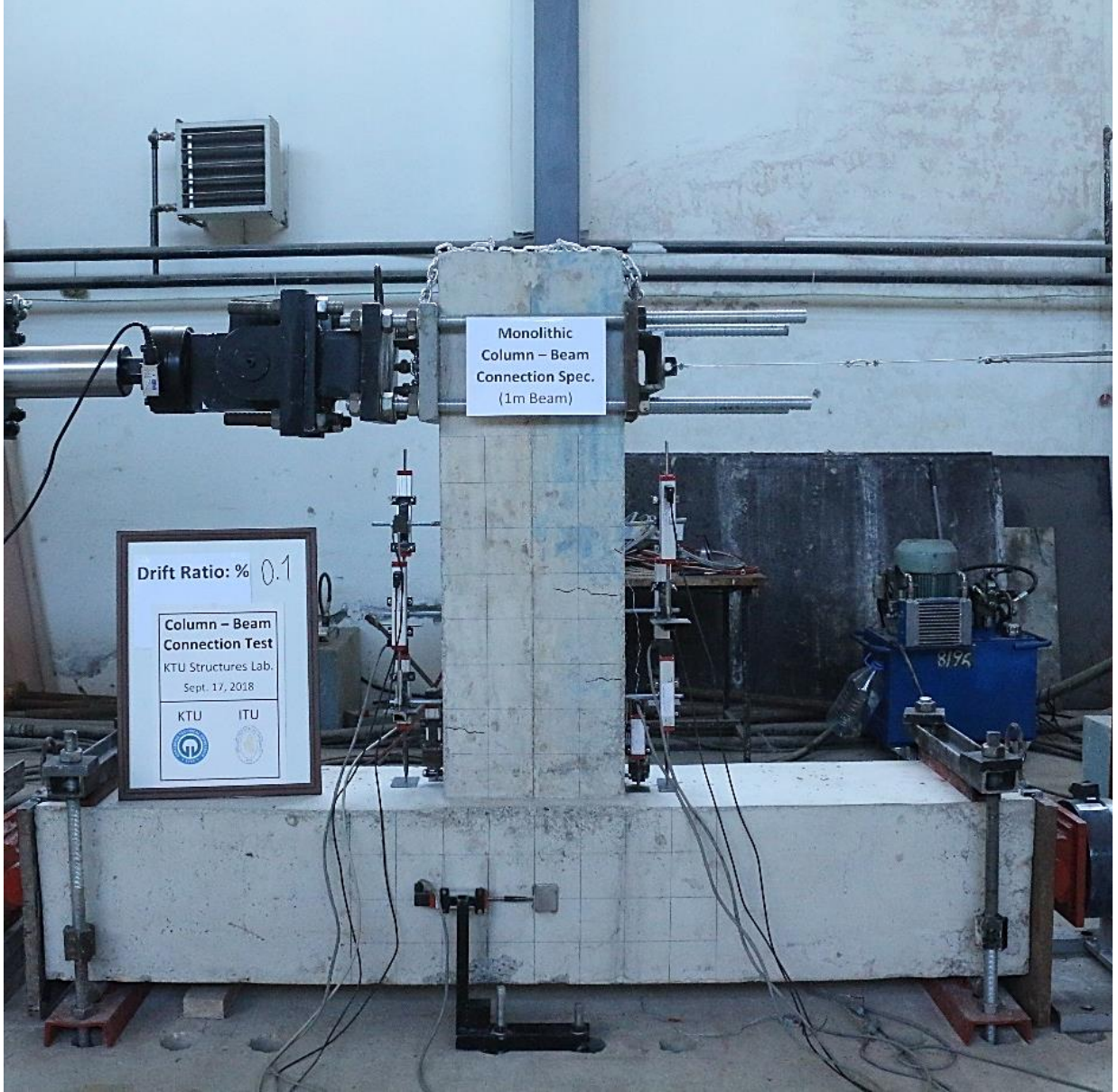


Şekil 124. Kiriş boyu 2.0 m olan kolon – kiriş birleşim numuneleri için y¼kleme protokol¼

3.1.2.1. Kiriş Boyu 1.0 m olan Kolon – Kiriş Numuneleri

3.1.2.1.1. Monolitik Numune

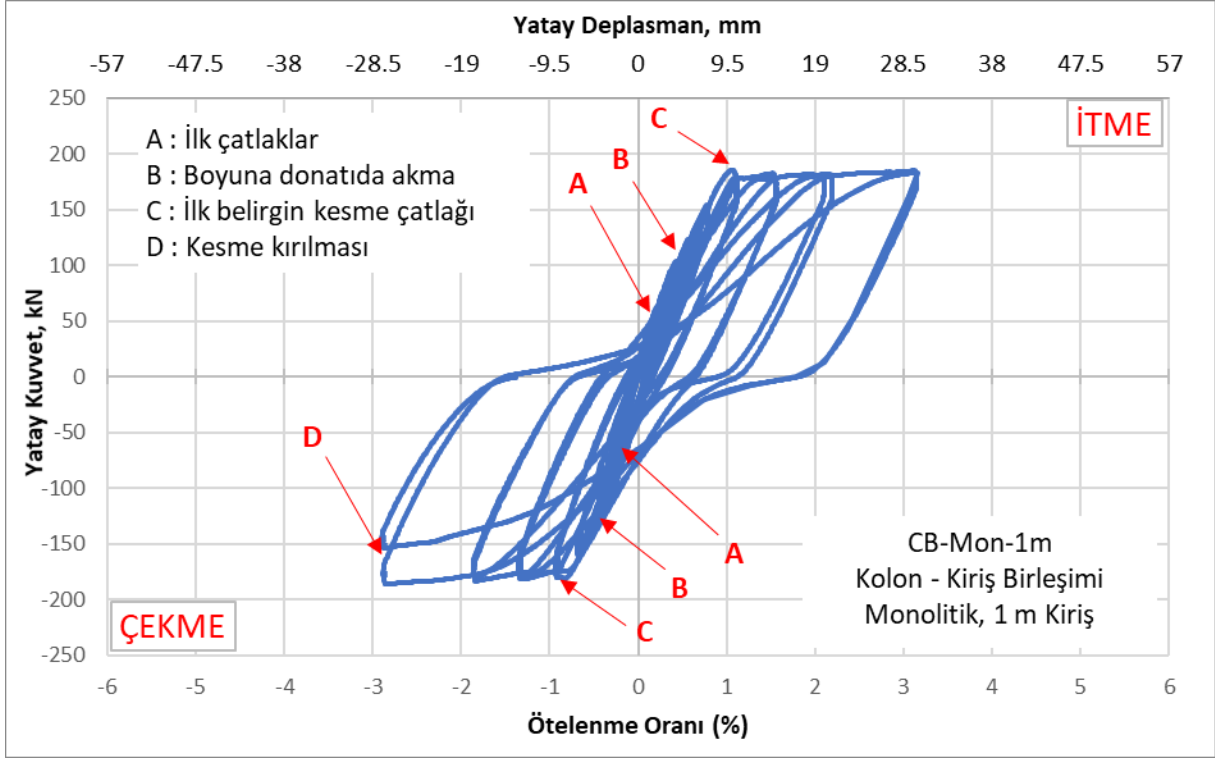
Numunenin deney öncesi görünüş Şekil 125'te verilmiştir. Deney sırasında yapılan gözlemler y¼kleme adımlarına bağlı olarak Tablo 16'da verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 126'de verilmiştir. Deney numunesinin son adımdaki karşıdan görünüş¼ ve deney sonrası yakın görünüşleri Şekil 127 ve Şekil 128'de sırasıyla verilmiştir.



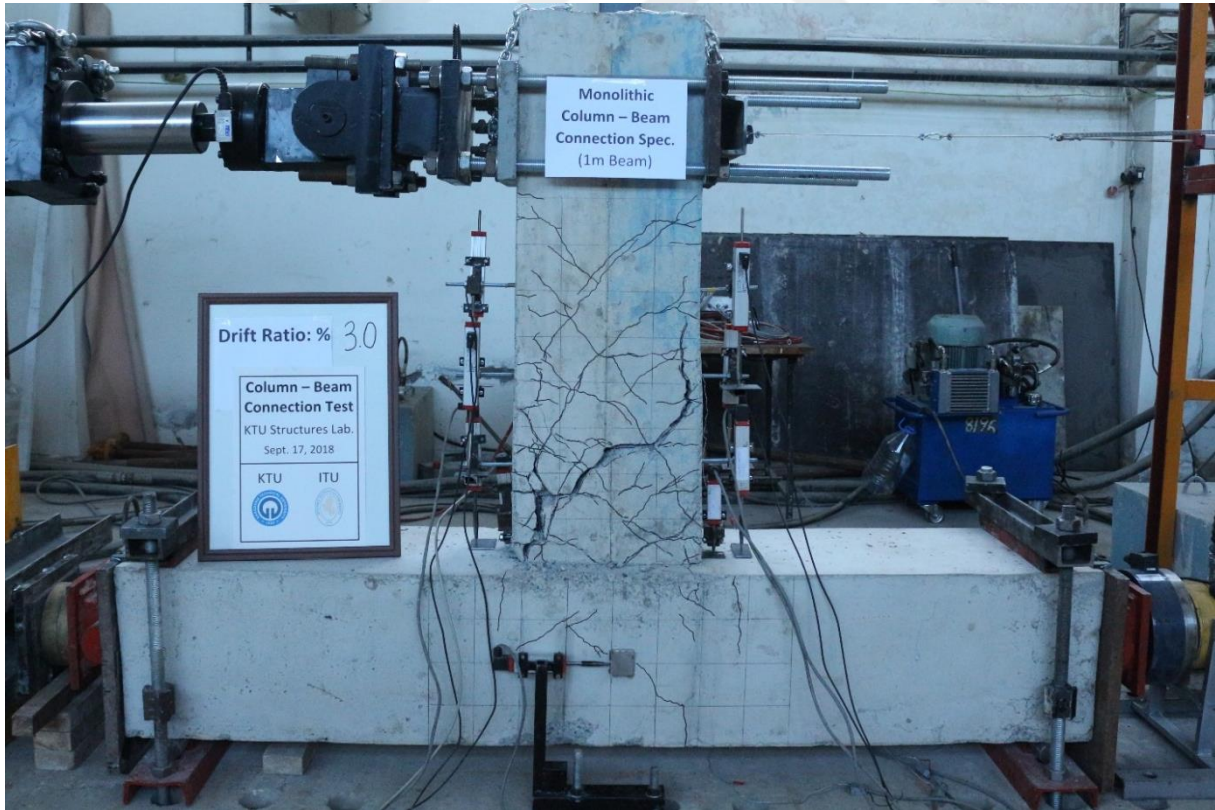
Şekil 125. Kiriş boyu 1.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi deney öncesi görünüşü

Tablo 16. Kiriş boyu 1.0 m olan monolitik kolon – kiriş numunesi deneyindeki gözlemler

Çevrim Numarası	Ötelenme Oranı (%)	Tepe Konumu (mm)	Açıklama
	0	0	
1	0.1	1.0	
		-1.0	
		1.0	Kılcal çatlaklar başladı
		-1.0	Kılcal çatlaklar başladı
2	0.15	1.4	
		-1.4	
		1.4	
		-1.4	
3	0.2	1.9	
		-1.9	
		1.9	
		-1.9	
4	0.25	2.4	
		-2.4	
		2.4	
		-2.4	
5	0.4	4	
		-4	SG-1 akma değerine ulaştı.
		4	
		-4	
6	0.5	5	
		-5	
		5	
		-5	
7	0.75	7	
		-7	SG-2, SG-3 akma değerine ulaştı
		7	Kolon – kiriş ara yüzeyinde açılma 0.1 mm mertebesinde
		-7	
8	1	10	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.3 mm mertebesinde
		-10	Kolon – kiriş ara yüzeyinde açılma 0.3 mm mertebesinde, SG-4 akma değerine ulaştı
		10	
		-10	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.5 mm mertebesinde (kesme çatlağı)
9	1.5	14	Kolon – kiriş ara yüzeyindeki açılma 3 mm mertebesinde
		-14	Beton yüzeyindeki çatlaklar 1 mm mertebesinde (kesme çatlağı)
		14	
		-14	
10	2	19	Kolon – kiriş ara yüzeyinde açılma 5 mm'den fazla
		-19	
		19	Beton yüzeyindeki çatlaklar 2 mm mertebesinde (kesme çatlağı)
		-19	
11	3	29	
		-29	Beton yüzeyindeki çatlaklar 7 mm mertebesinde (kesme çatlağı)
		29	
		-29	Kesme hasarı ile yük düşüşü, Kalıcı yer değiştirme 15 mm
12	4	38	
		-38	
		38	
		-38	
13	5.5	52	
		-52	
		52	
		-52	



Şekil 126. Kiriş boyu 1.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi deney sonucu



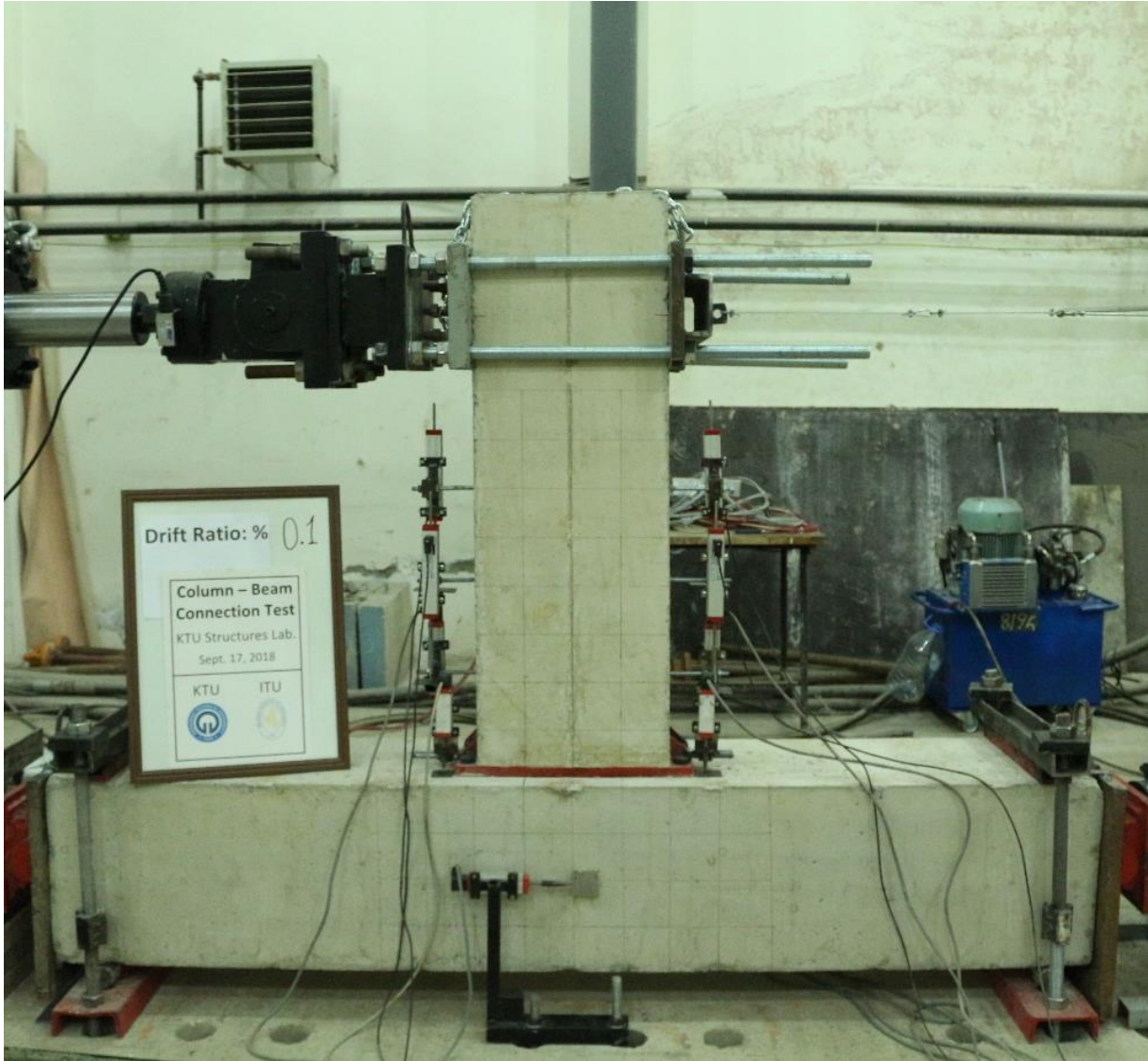
Şekil 127. Kiriş boyu 1.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi deney son adımındaki görünüşü (%3 göreceli ötelenme oranı)



Şekil 128. Kiriş boyu 1.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi deney sonrası yakın görünüşleri

3.1.2.1.2. Prekast Numune

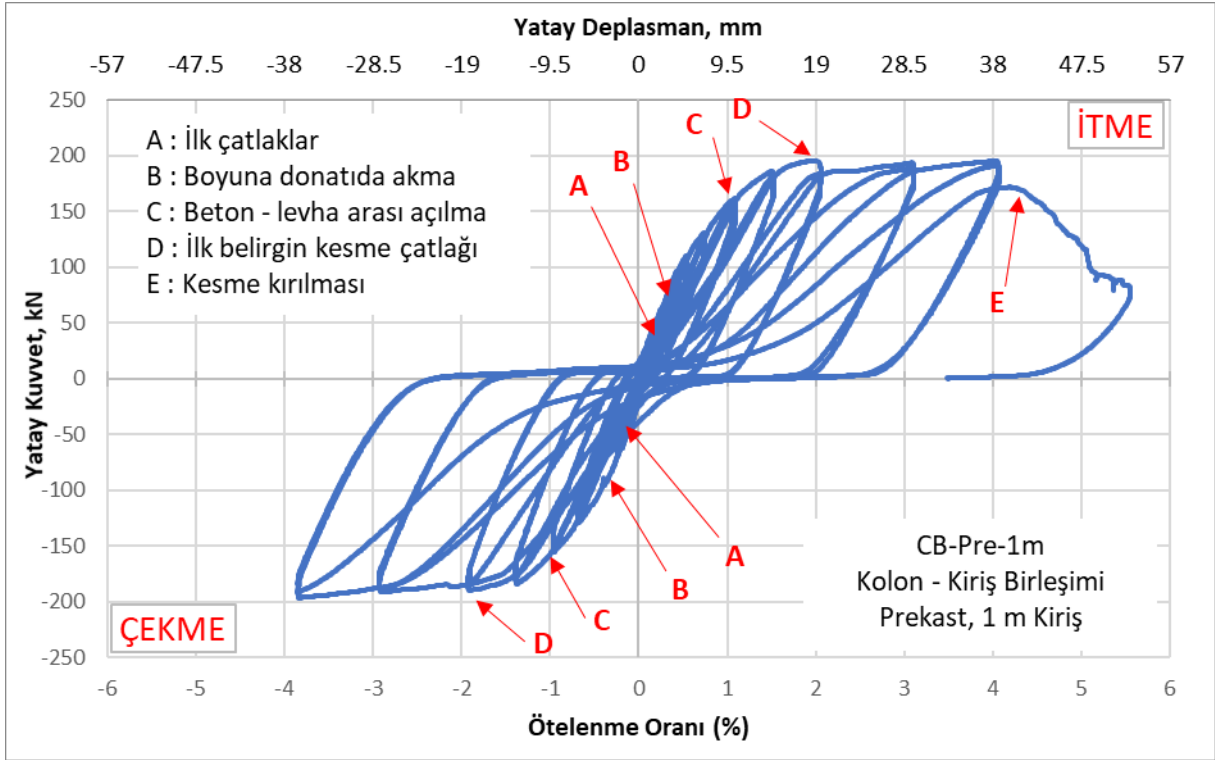
Numunenin deney öncesi görünüş Şekil 129’da verilmiştir. Deney sırasında yapılan gözlemler yükleme adımlarına bağlı olarak Tablo 17’de verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 130’da verilmiştir. Deney numunesinin son adımdaki karşıdan görünüşü ve deney sonrası yakın görünüşleri Şekil 131 ve Şekil 132’de sırasıyla verilmiştir.



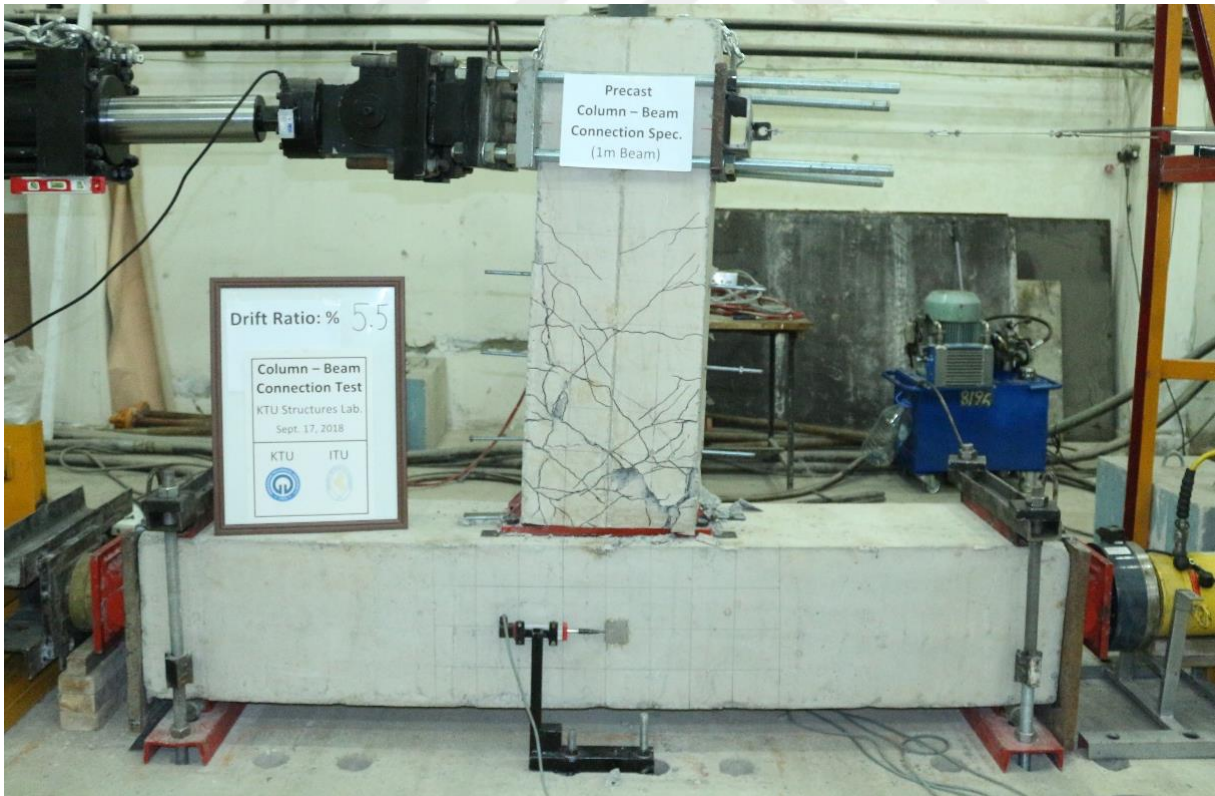
Şekil 129. Prekast 1.0 m kirişli kolon – kiriş birleşim numunesi deney öncesi görünüşü

Tablo 17. Kiriş boyu 1.0 m olan prekast kolon – kiriş numunesi deneyindeki gözlemler

Çevrim Numarası	Ötelenme Oranı (%)	Tepe Konumu (mm)	Açıklama
	0	0	SG-3 arızalı
1	0.1	1.0	
		-1.0	
		1.0	Kılcal çatlaklar başladı
		-1.0	Kılcal çatlaklar başladı
2	0.15	1.4	
		-1.4	
		1.4	
		-1.4	
3	0.2	1.9	
		-1.9	
		1.9	
		-1.9	
4	0.25	2.4	SG-1 akma değerine ulaştı.
		-2.4	
		2.4	
		-2.4	
5	0.4	4	
		-4	
		4	
		-4	
6	0.5	5	
		-5	
		5	
		-5	
7	0.75	7	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.1 mm mertebesinde
		-7	
		7	
		-7	
8	1	10	SG-2 akma değerine ulaştı, Levha – beton arası açılma başlangıcı
		-10	Levha – beton arası açılma başlangıcı
		10	
		-10	Levha – beton arası açılma 1 mm mertebesinde
9	1.5	14	SG-4 akma değerine ulaştı. Levha – beton arası açılma 1.5 mm mertebesinde
		-14	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.4 mm mertebesinde
		14	
		-14	
10	2	19	Levha – beton arası açılma 3.5 mm mertebesinde, betonda 1 mm kesme çatlağı
		-19	
		19	
		-19	
11	3	29	Levha – beton arası açılma 4 mm mertebesinde, betonda 2 mm kesme çatlağı
		-29	
		29	
		-29	Levha üstü kabuk atması
12	4	38	
		-38	
		38	
		-38	
13	5.5	52	Kesme hasarı ile yük düşüşü, Kalıcı yer değiştirme 15 mm
		-52	
		52	
		-52	



Şekil 130. Kiriş boyu 1.0 m olan prekast kolon – kiriş birleşim numunesi deney sonucu



Şekil 131. Kiriş boyu 1.0 m olan prekast kolon – kiriş birleşim numunesi deney son adımındaki görünüşü (%5.5 görelî ötelenme oranı)



(a) Deney bölgesi karşıdan görünüşü



(b) Deney bölgesi sağdan görünüşü



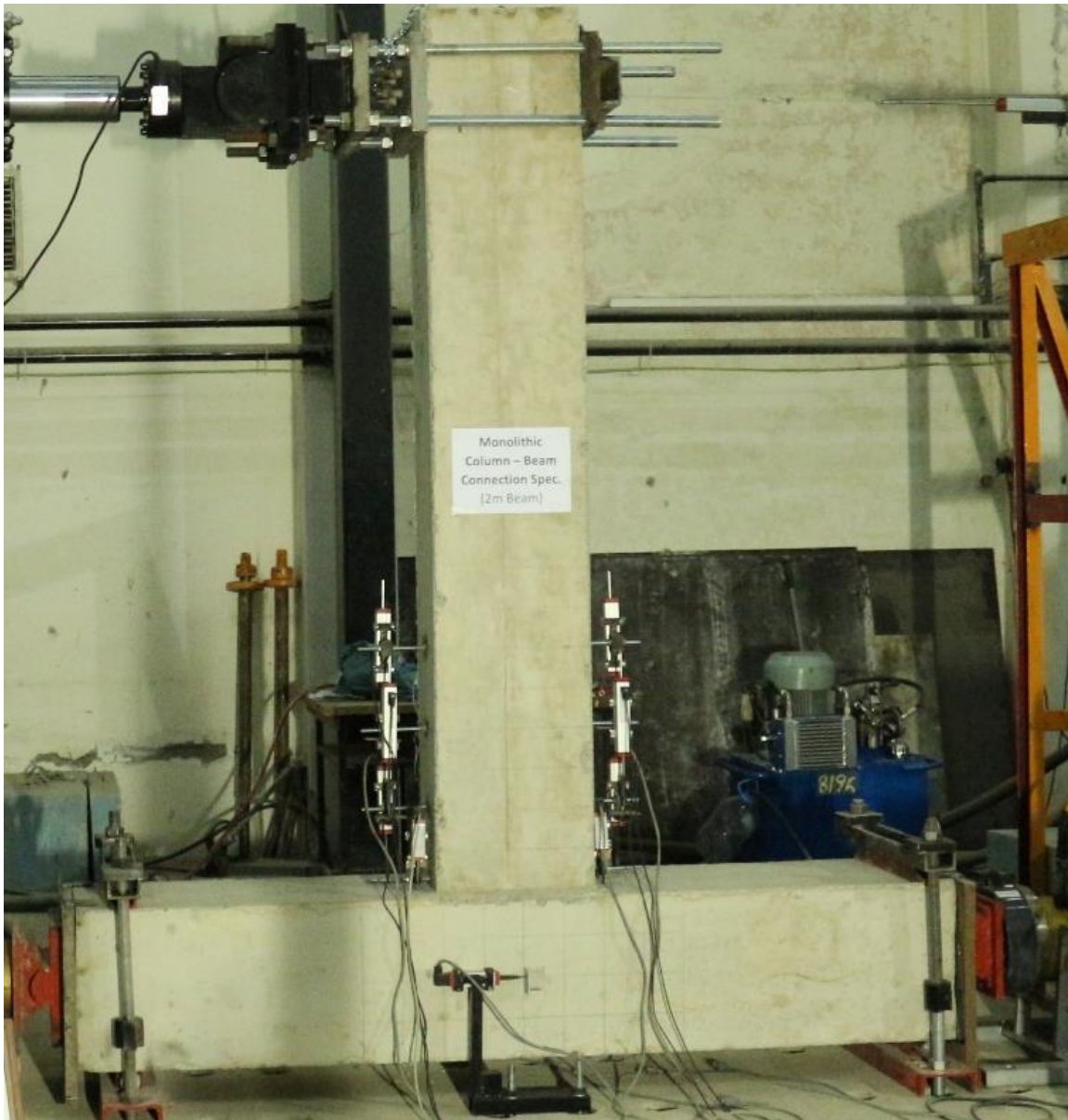
(c) Deney bölgesi soldan görünüşü

Şekil 132. Kiriş boyu 1.0 m olan prekast kolon – kiriş birleşim numunesi deney sonrası yakın görünüşleri

3.1.2.2. Kiriş Boyu 2.0 m olan Kolon – Kiriş Numuneleri

3.1.2.2.1. Monolitik Numune

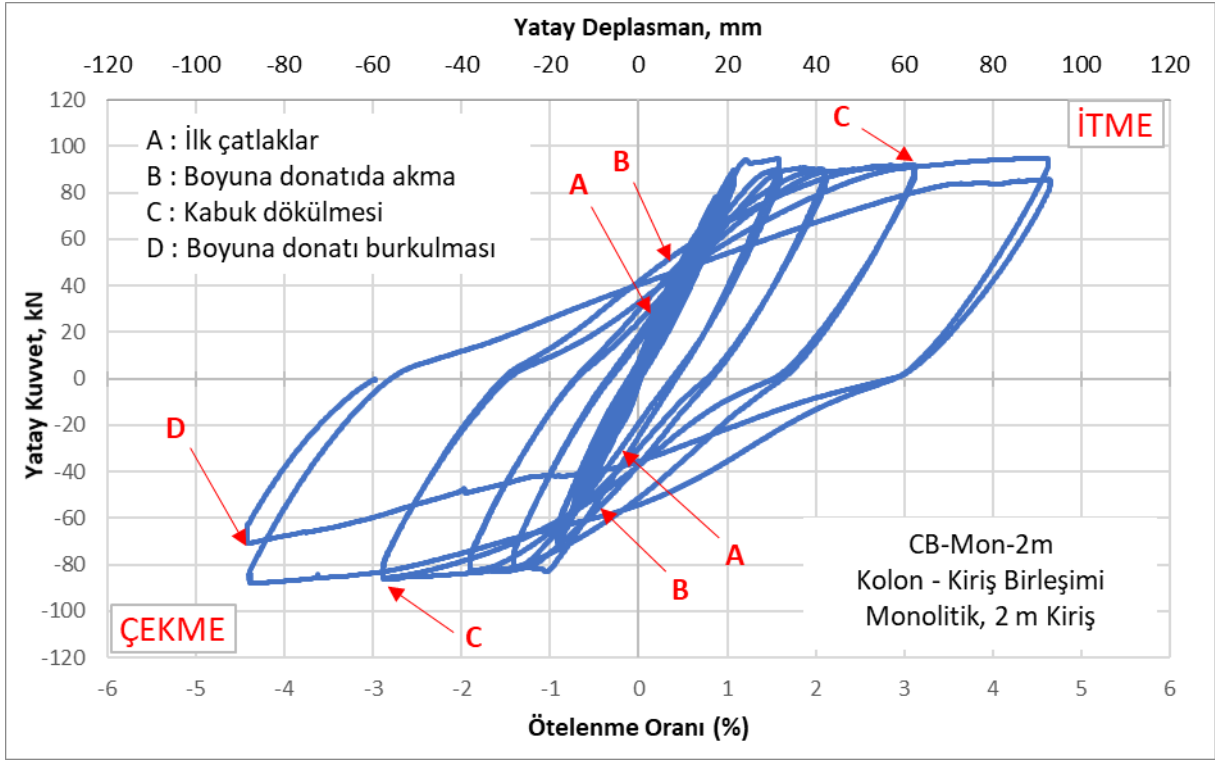
Numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 133'te verilmiştir. Deney sırasında yapılan gözlemler yükleme adımlarına bağlı olarak Tablo 18'de verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 134'te verilmiştir. Deney numunesinin son adımdaki karşıdan görünüşü ve deney sonrası yakın görünüşleri Şekil 135 ve Şekil 136'da sırasıyla verilmiştir.



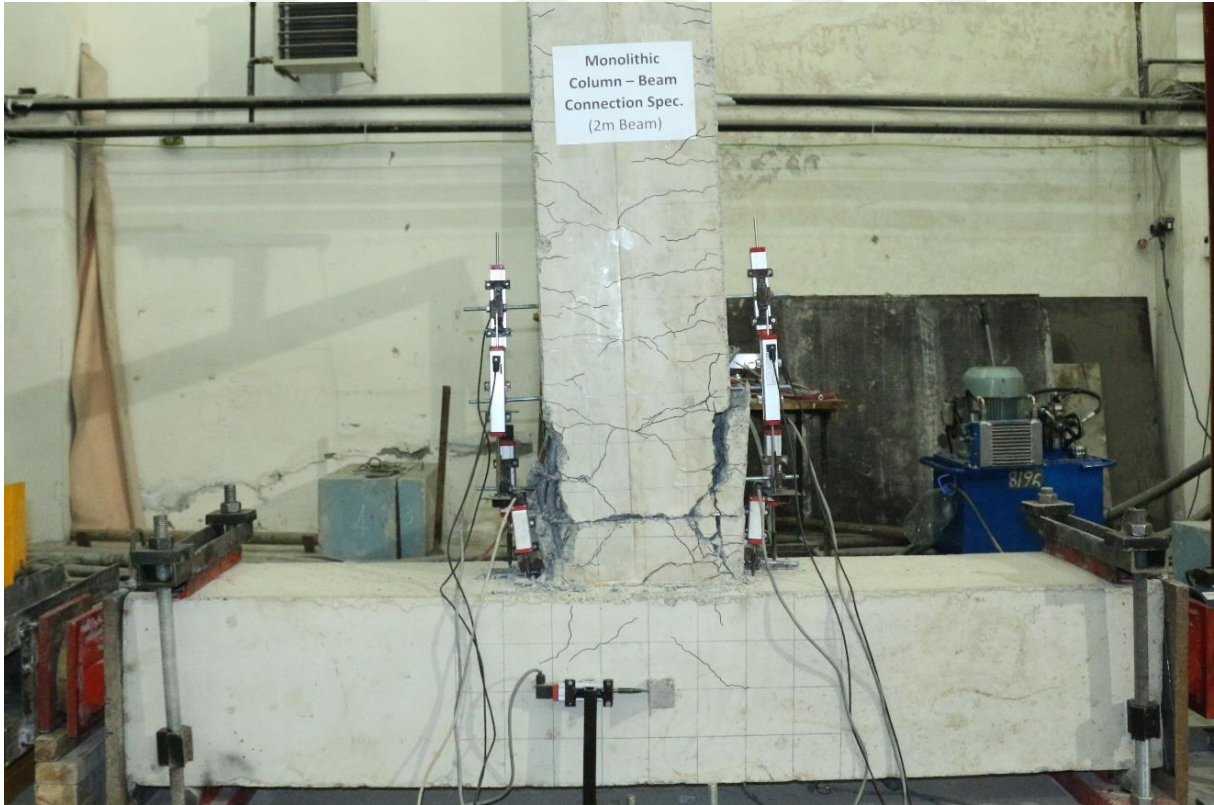
Şekil 133. Kiriş boyu 2.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi deney öncesi görünüşü

Tablo 18. Kiriş boyu 2.0 m olan monolitik kolon – kiriş numunesi deneyindeki gözlemler

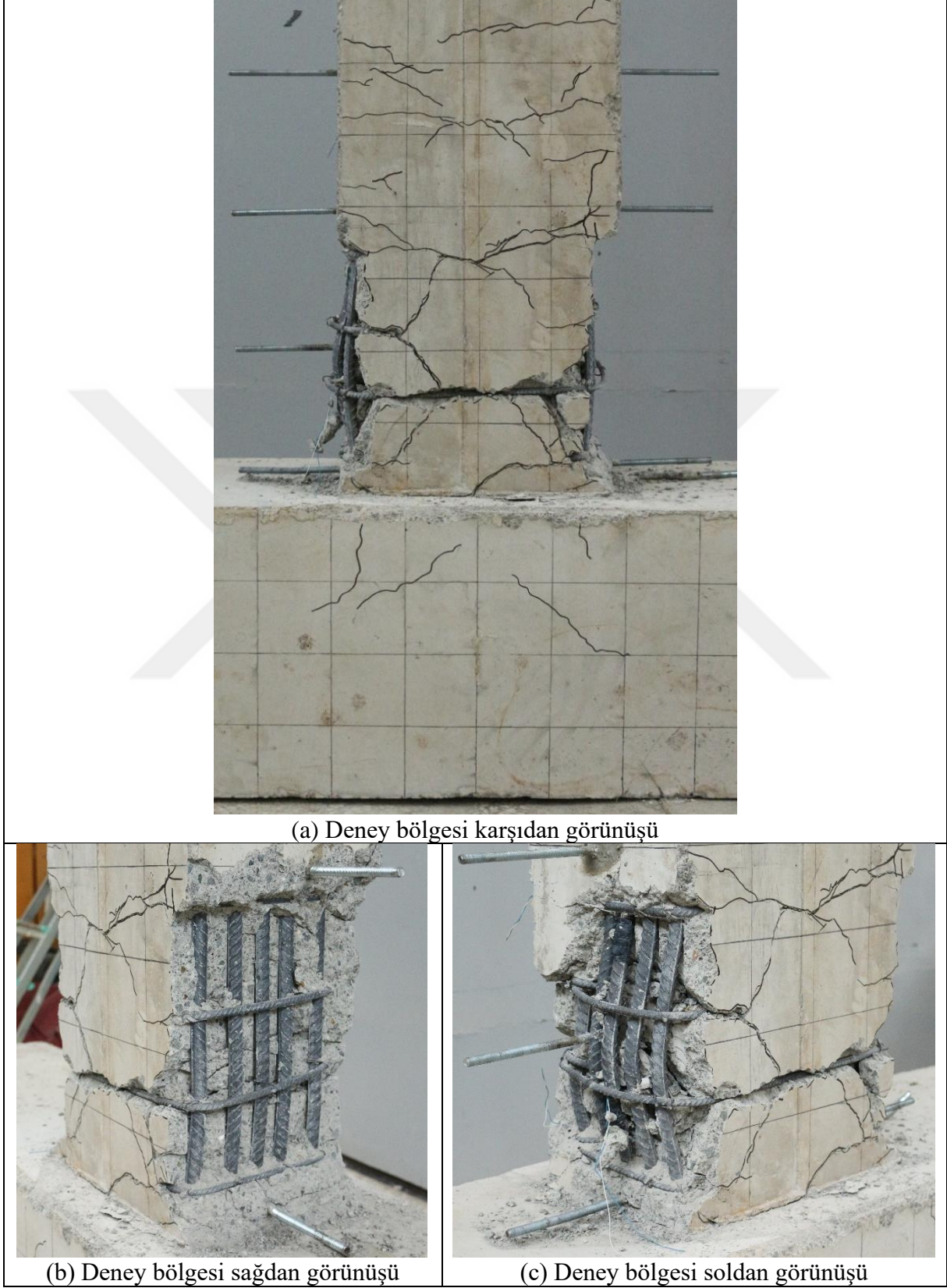
Çevrim Numarası	Ötelenme Oranı (%)	Tepe Konumu (mm)	Açıklama
	0	0	
1	0.25	5	
		-5	
		5	
		-5	Kılcal çatlaklar başladı
2	0.3	6	
		-6	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.1 mm mertebesinde
		6	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.1 mm mertebesinde
		-6	
3	0.4	8	
		-8	SG-1 akma değerine ulaştı
		8	
		-8	
4	0.6	12	
		-12	
		12	
		-12	
5	0.8	16	
		-16	SG-2, SG-3 ve SG-4 akma değerine ulaştı
		16	
		-16	
6	1	20	
		-20	
		20	
		-20	
7	1.5	30	
		-30	
		30	
		-30	
8	2	40	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.2 mm mertebesinde
		-40	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.4 mm mertebesinde
		40	
		-40	Kolon – kiriş ara yüzeyinde açılma 2 mm mertebesinde
9	3	60	
		-60	Beton yüzeyindeki çatlaklar 2 mm mertebesinde
		60	Kabuk betonunda dökülme başlangıcı
		-60	Boyuna çatlaklar oluştu
10	4.5	90	Kabuk betonunda belirgin dökülmeler
		-90	Sol açılma ölçüm cihazı yerinden oynadı
		90	Sağ açılma ölçüm cihazı yerinden oynadı
		-90	Boyuna donatı burkulmasıyla yük düşüşü. Kalıcı yer değiştirme 60 mm
11	6	120	
		-120	
		120	
		-120	



Şekil 134. Kiriş boyu 2.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi deney sonucu



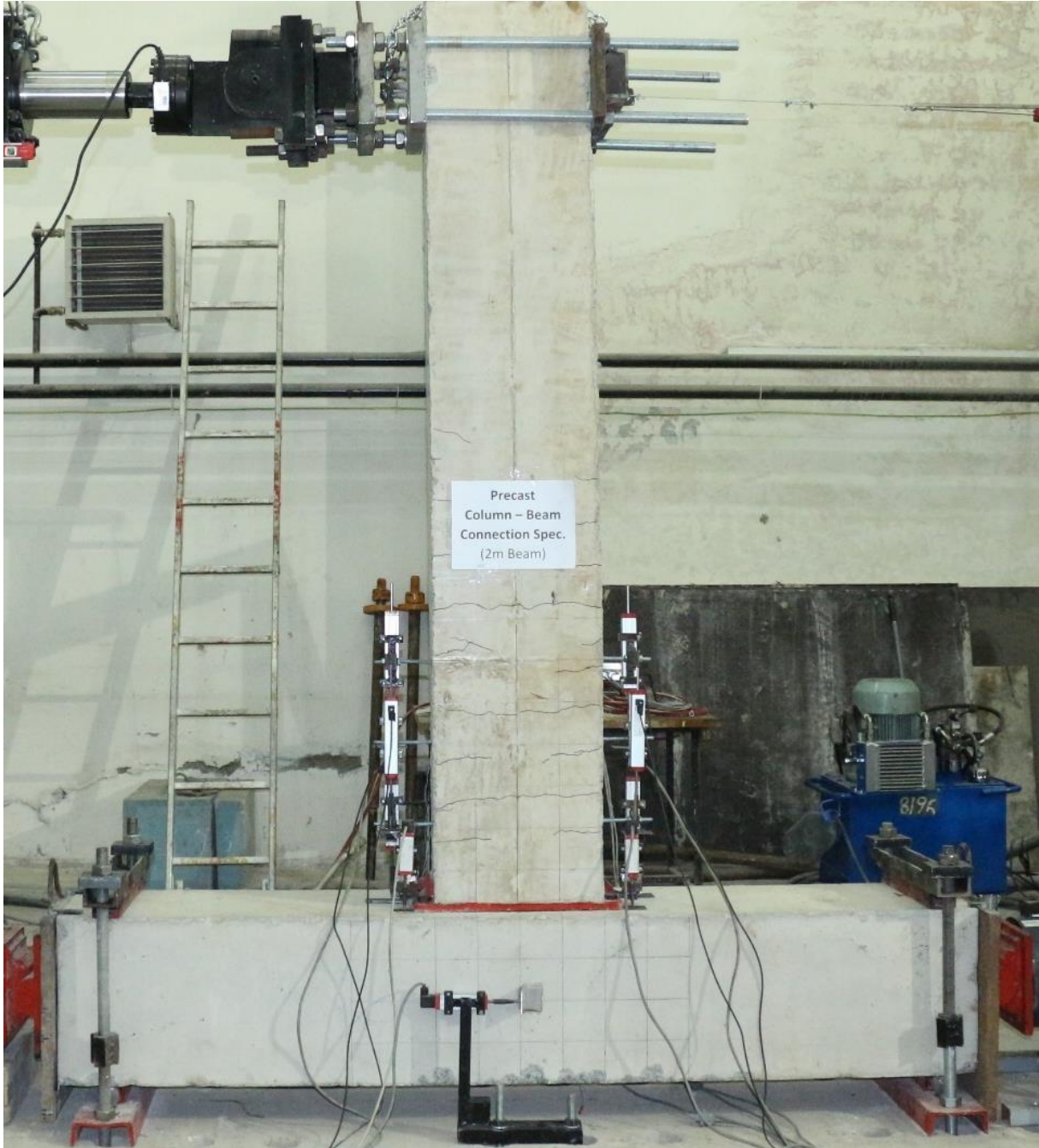
Şekil 135. Kiriş boyu 2.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi deney son adımındaki görünüşü (%4.5 görelî ötelenme oranı)



Şekil 136. Kiriş boyu 2.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi deney sonrası yakın görünüşleri

3.1.2.2.2. Prekast Numune

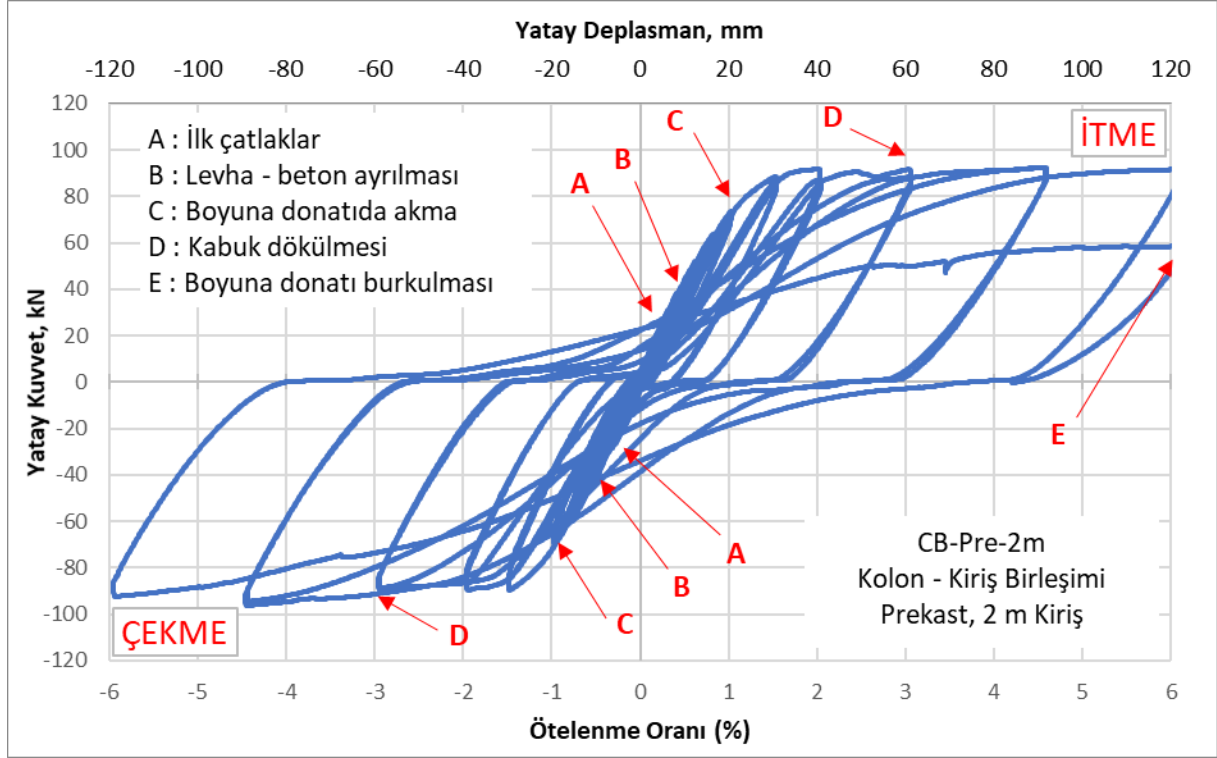
Numunenin deney öncesi görünüş Şekil 137’de verilmiştir. Deney sırasında yapılan gözlemler yükleme adımlarına bağlı olarak Tablo 19’de verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 138’de verilmiştir. Deney numunesinin son adımdaki karşıdan görünüşü ve deney sonrası yakın görünüşleri Şekil 139 ve Şekil 140’da sırasıyla verilmiştir.



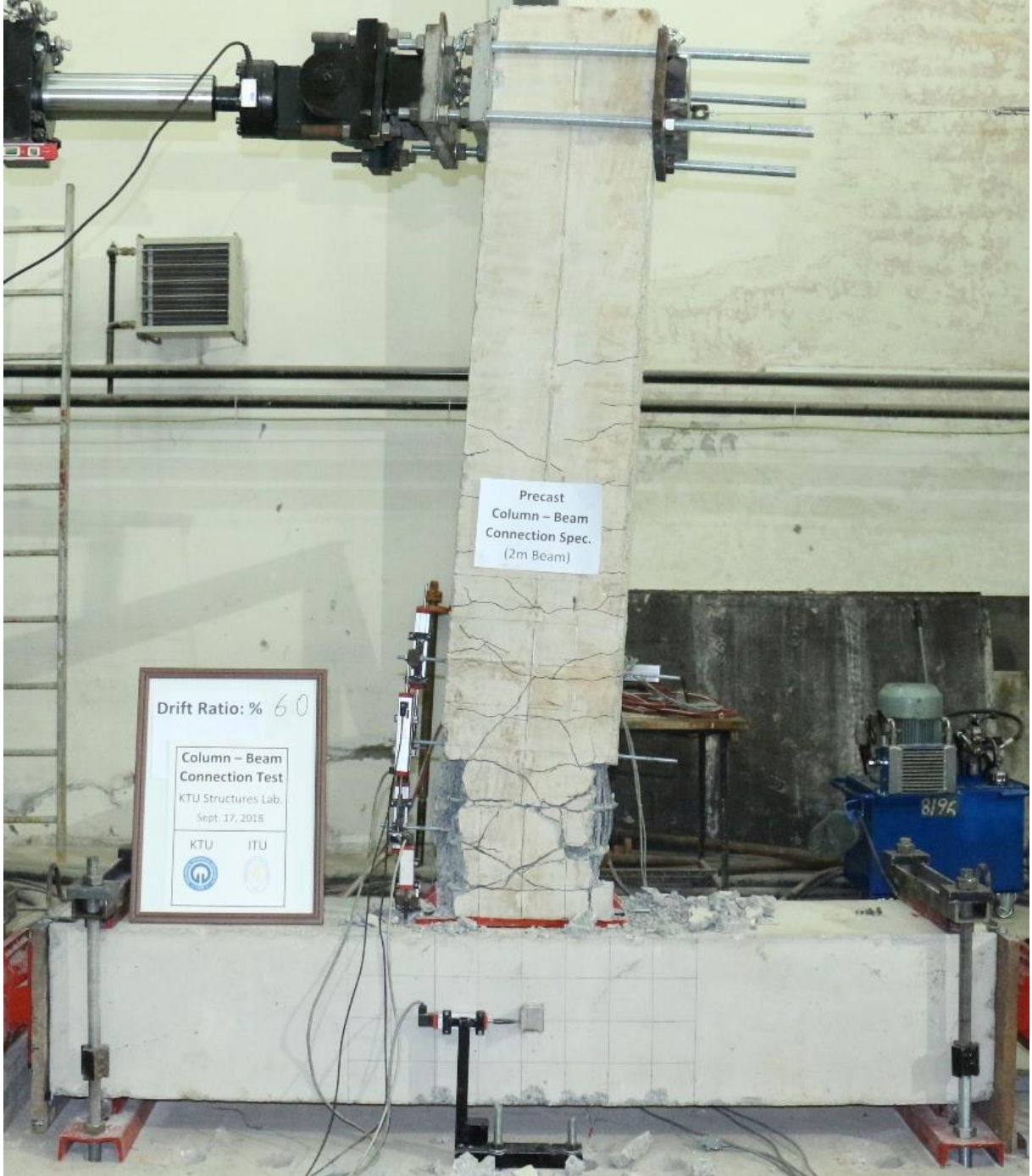
Şekil 137. Kiriş boyu 2.0 m olan prekast kolon – kiriş birleşim numunesi deney öncesi görünüşü

Tablo 19. Kiriş boyu 2.0 m olan prekast kolon – kiriş numunesi deneyindeki gözlemler

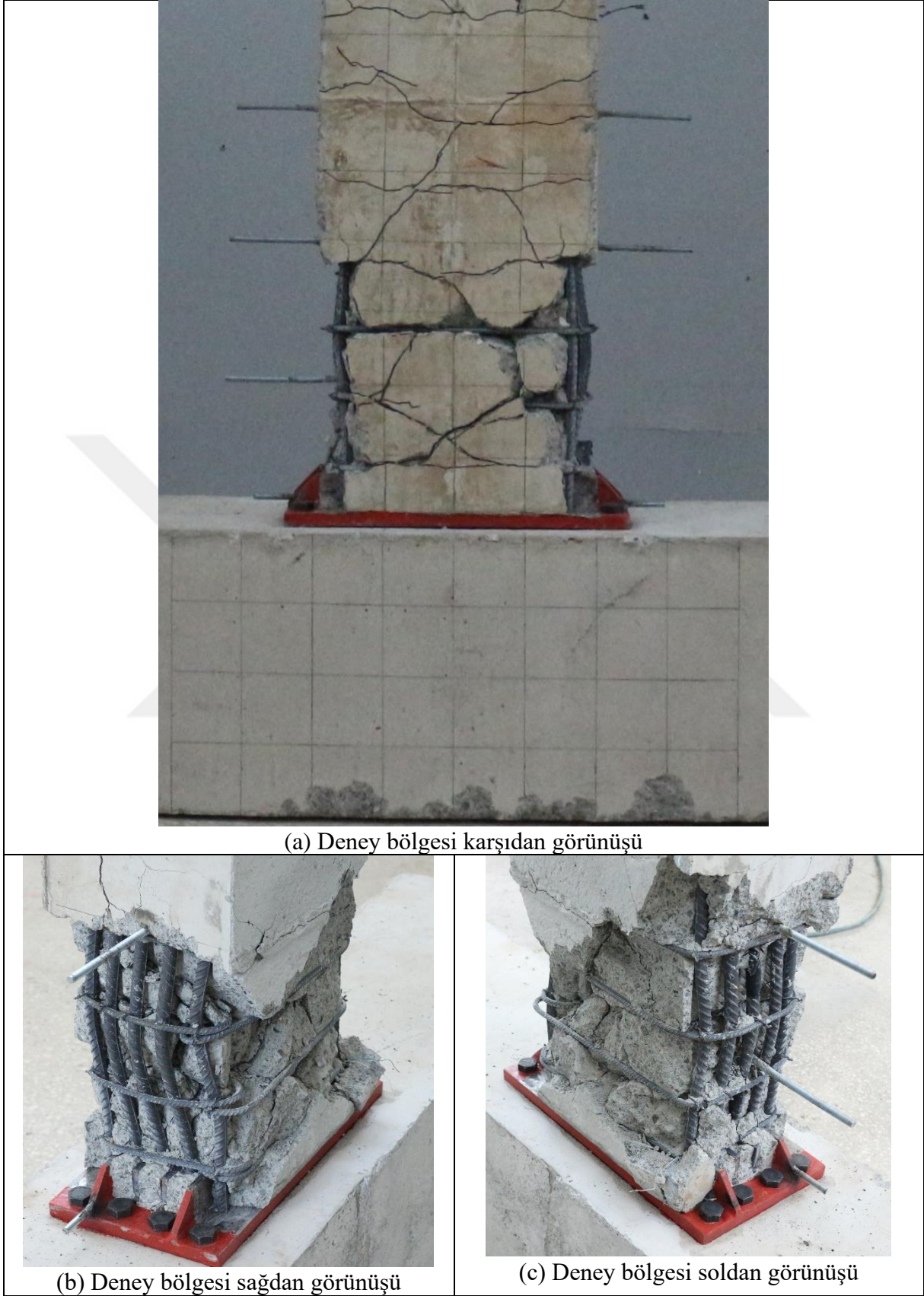
Çevrim Numarası	Ötelenme Oranı (%)	Tepe Konumu (mm)	Açıklama
	0	0	
1	0.25	5	
		-5	
		5	Kılcal çatlaklar başladı
		-5	Kılcal çatlaklar başladı
2	0.3	6	
		-6	
		6	
		-6	
3	0.4	8	
		-8	
		8	Levha beton arası açılma
		-8	
4	0.6	12	
		-12	
		12	
		-12	
5	0.8	16	Betonda çatlaklar 0.1 mm mertebesinde
		-16	
		16	Levha beton arası ayrılma 1 mm mertebesinde
		-16	
6	1	20	SG-2 ve SG-3 akma değerine ulaştı
		-20	
		20	
		-20	
7	1.5	30	Levha beton arası ayrılma 2 mm mertebesinde, Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.3 mm mertebesinde, SG-4 akma değerine ulaştı
		-30	SG-1 akma değerine ulaştı
		30	
		-30	
8	2	40	Levha beton arası açılma 4 mm mertebesinde
		-40	
		40	
		-40	Beton yüzeyindeki çatlaklar 0.5 mm mertebesinde
9	3	60	Kabuk betonunda dökülmeler (levha kenarı)
		-60	Kabukta belirgin dökülme
		60	
		-60	
10	4.5	90	Levha beton arası açılma 5 mm mertebesinde, betondaki çatlaklar 3 mm
		-90	
		90	
		-90	
11	6	120	Kabukta belirgin dökülmeler, boyuna donatı burkulma başlangıcı
		-120	
		120	Boyuna donatı burkulması ile belirgin yük düşüşü, kalıcı yer değiştirme 86 mm
		-120	



Şekil 138. Kiriş boyu 2.0 m olan prekast kolon – kiriş birleşim numunesi deney sonucu



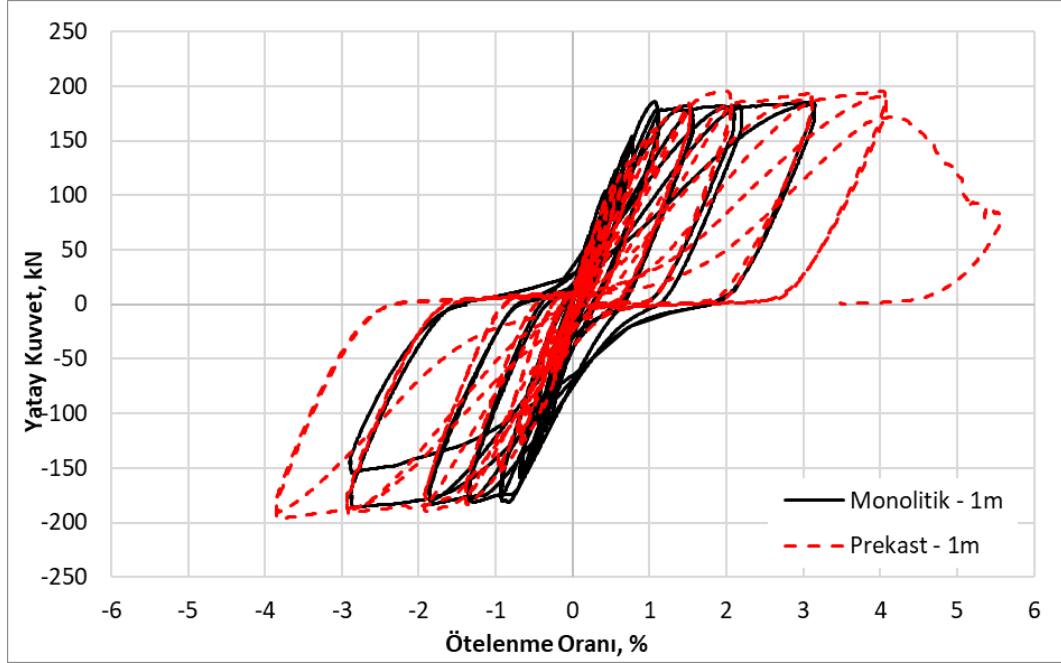
Şekil 139. Kiriş boyu 2.0 m olan prekast kolon – kiriş birleşim numunesi deney son adımındaki görünüşü (%6 görece ötelenme oranı)



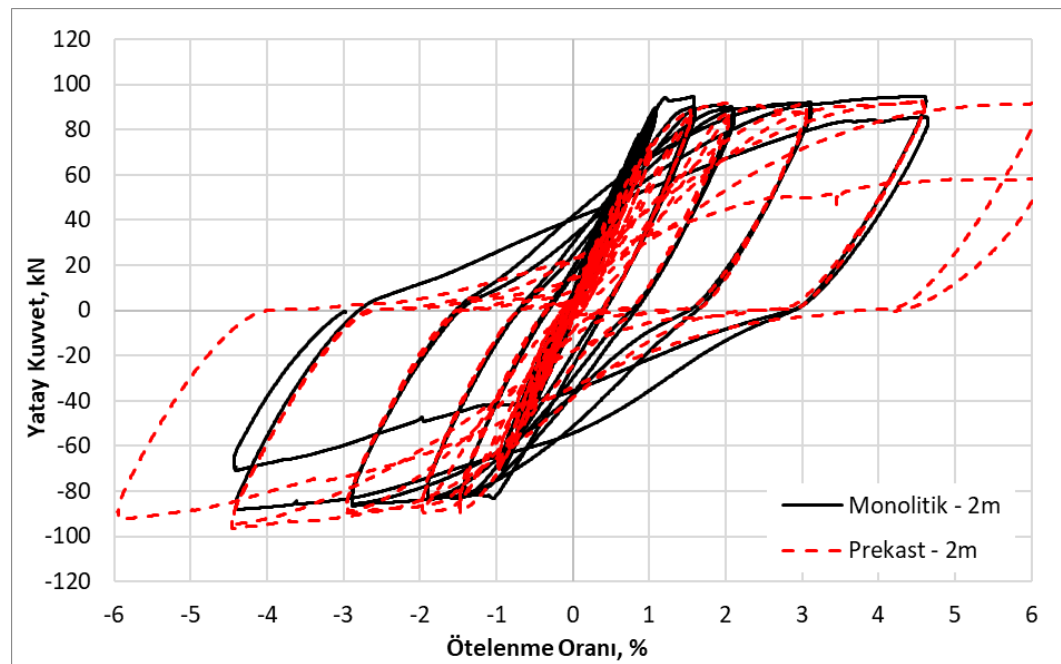
Şekil 140. Kiriş boyu 2.0 m olan prekast kolon – kiriş birleşim numunesi deney sonrası yakın görünüşleri

3.1.2.3. Kolon – Kiriş Birleşimi Numuneleri Karşılaştırılması

Kiriş boyu 1.0 m ve 2.0 m olan kolon – kiriş birleşim numuneleri karşılaştırmalı deney sonuçları Şekil 141 ve Şekil 142’de verilmiştir. Ayrıca, kiriş boyu 1.0 m ve 2.0 m olan deney numunelerinin deney sonrası genel görünüşleri Şekil 143 ve Şekil 144’te verilmiştir.



Şekil 141. Kiriş boyu 1.0 m olan kolon – kiriş numuneleri karşılaştırmalı deney sonuçları



Şekil 142. Kiriş boyu 2.0 m olan kolon – kiriş numuneleri karşılaştırmalı deney sonuçları



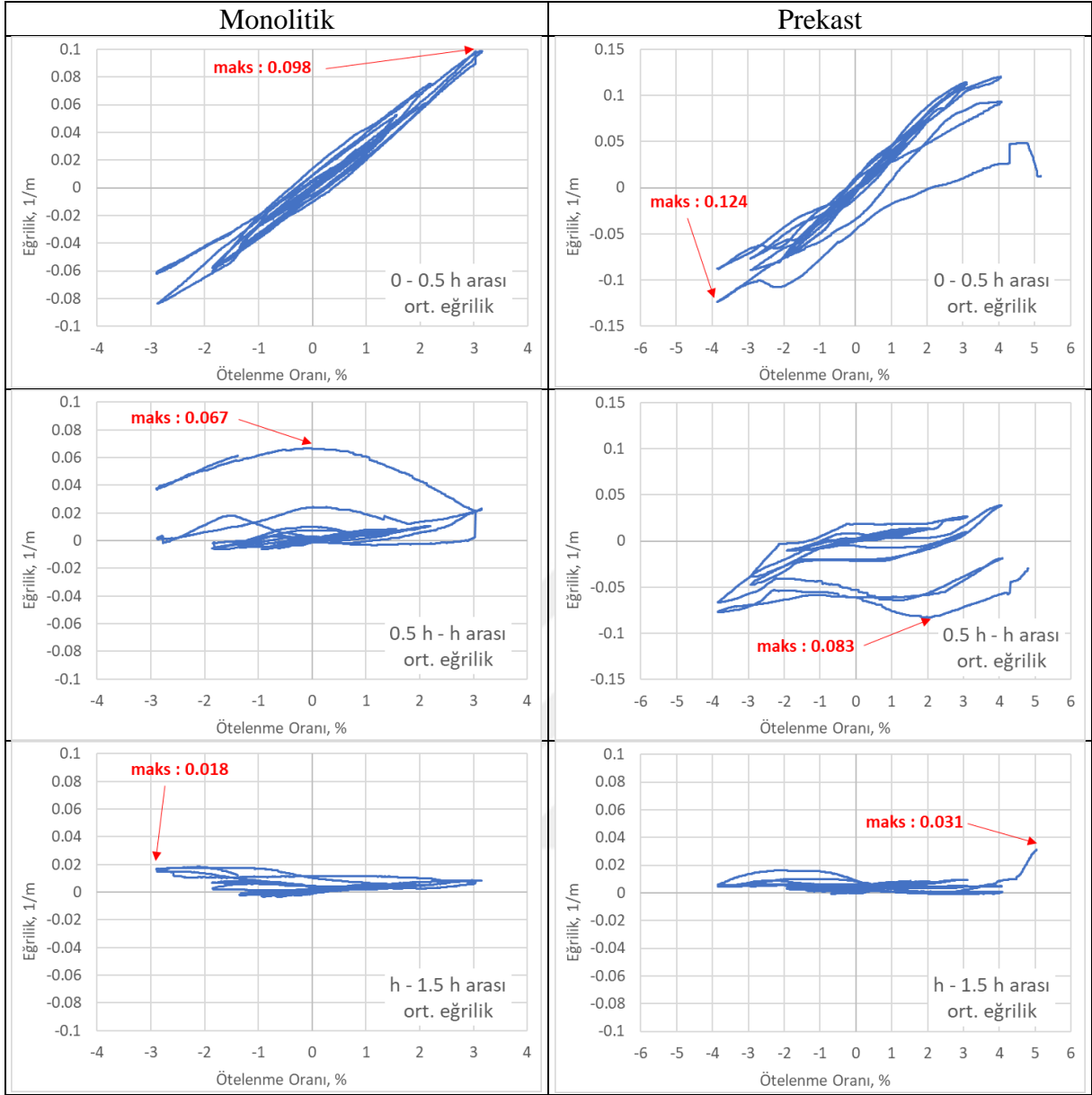
Şekil 143. Monolitik ve prekast numunelerin deney sonrası genel görünüşleri



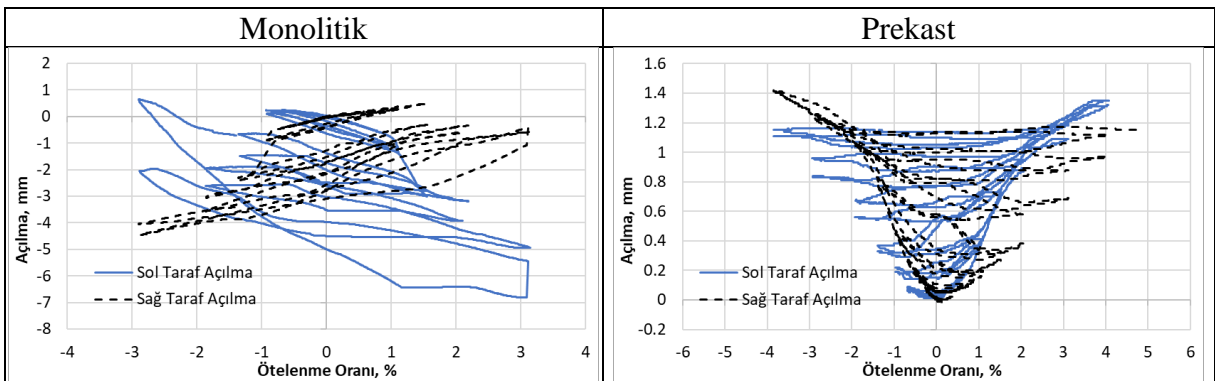
Şekil 144. Monolitik ve prekast numunelerin deney sonrası genel görünüşleri

Kiriş boyu 1.0 m olan kolon-kiriş birleşim numuneleri için deney sonuçlarından hesaplanan eğrilik değerleri ve temel-kolon ara yüzündeki açılma ölçümleri Şekil 145 ve Şekil 146'da sırasıyla verilmiştir. Prekast numunede elde edilen maksimum değerlerin monolitik numuneye göre yaklaşık %25 daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin prekast numunede birleşim bölgesinde yer alan ankraj donatılarının o bölgeyi daha rijit yapması ve dolayısıyla kirişte kolona nazaran daha fazla eğilmesi olduğu düşünülmektedir. Kolon-kiriş ara yüzünde yapılan açılma ölçümlerinde monolitik numunede 7 mm açılma görülürken, ezilme sonucu kapanmalar ihmal edilebilir seviyelerde olmuştur. Prekast numunede ise ölçülen açılma ve kapanma değerleri ihmal edilebilir seviyede olmuştur. Bu durum göstermektedir ki, ön gerilmeli olarak sıkılan cıvatalar deney sırasında gevşememiş ve dolayısıyla açılma veya kapanma durumu yaşanmamıştır.

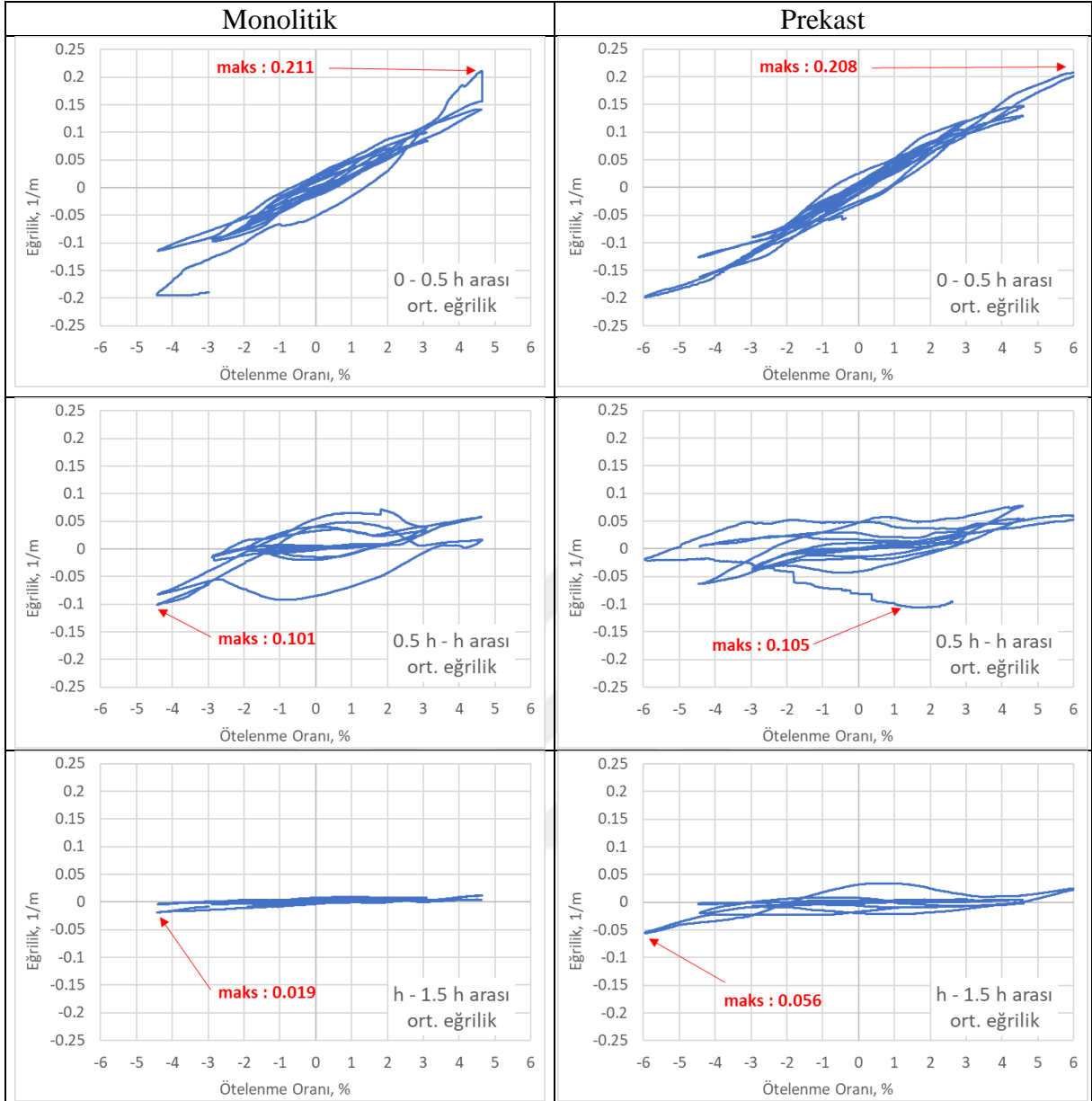
Kiriş boyu 2.0 m olan kolon-kiriş birleşim numuneleri için deney sonuçlarından hesaplanan eğrilik değerleri ve temel-kolon ara yüzündeki açılma ölçümleri Şekil 147 ve Şekil 148'de sırasıyla verilmiştir. Kirişin 0-0.5h ve 0.5h-h bölgelerinde ölçülen eğrilik değerleri monolitik ve prekast numunede oldukça benzer olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak kiriş boyunun uzamasından dolayı davranış üzerinde eğilme etkisinin daha fazla olduğu düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, h-1.5h bölgesinde ölçülen eğrilik değerlerinin prekast numunede daha fazla olduğu görülmektedir. Buradan, önerilen prekast birleşim sisteminin hasarı kiriş boyunca yaydığı sonucu çıkarılabilir. Ölçülen açılma değerlerinin kiriş boyu 1.0 m olan numuneye göre monolitik numunede daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum kiriş boyunun artmasıyla davranışın eğilme baskın hale gelmesi olarak açıklanabilir. Monolitik numunede açılma değeri 7 mm, basınç bölgesinde oluşan ezilmelerden dolayı oluşan kısaltmaların 10 mm civarında olduğu görülmüştür. Buna karşın prekast numunede açılmaların ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak, ön gerilmeli olarak sıkılan cıvataların deney sırasında gevşemediği ve dolayısıyla açılma veya kapanma yaşanmadığı sonucuna varılabilir.



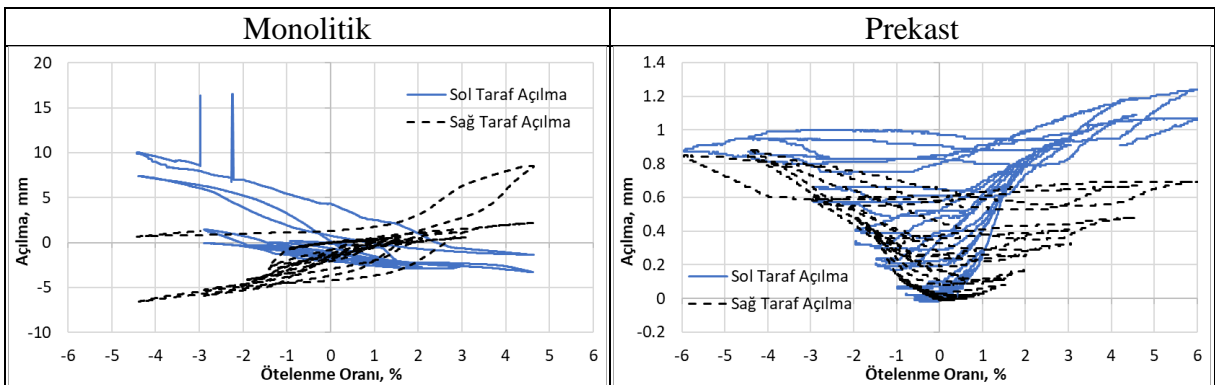
Şekil 145. Kiriş boyu 1.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi eğrilikleri



Şekil 146. Kiriş boyu 1.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi kolon - kiriş ara yüzündeki açılmalar



Şekil 147. Kiriş boyu 2.0 m olan monolitik kolon – kiriş birleşim numunesi eğrilikleri



Şekil 148. Kiriş boyu 2.0 m olan prekast kolon – kiriş birleşim numunesi kolon - kiriş ara yüzündeki açılmalar

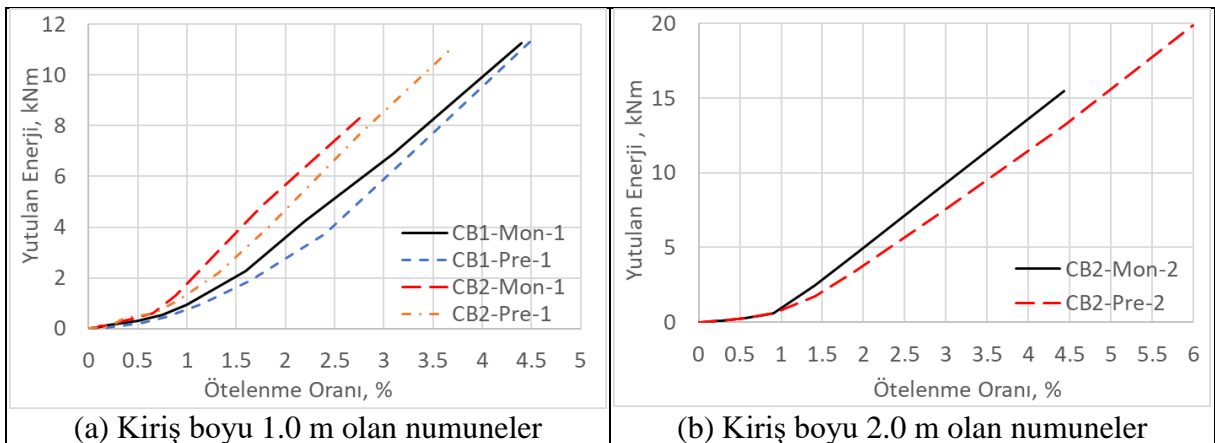
ACI-318-14 yönetmeliğine göre, kolon-kiriş birleşimleri %3.5 ötelenme oranına en fazla %25 dayanım kaybıyla erişmelidir. CB-Mon-1m numunesi hariç bütün numuneler bu kurala uymaktadır.

Tablo 20 kolon-kiriş birleşim numunelerinin ASCE 41-17 yönetmeliğine göre deprem performans düzeylerini göstermektedir. Burada plastik dönmelerin hesabından temel-kolon birleşim numuneleri için kullanılan hesap yaklaşımı uygulanmıştır. Buna göre, CB-Mon-2m numunesi hariç bütün numuneler “Göçme Öncesi Performans Düzeyi”ne ulaşmıştır.

Tablo 20. ASCE 41-17 yönetmeliğine göre deprem performansı

Numune	Elastik Dönme, θ_e	Plastik Dönme Sınırları			Nihai Toplam Dönme, θ_t	Plastik Dönme, θ_p	Deprem Performans Düzeyi
		Hemen Kullanım (HK)	Can Güvenliği (CG)	Göçmenin Önlenmesi (GÖ)			
CB2-Mon-1	0.005	0.0005	0.0010	0.0023	0.030	0.025	GÖ
CB2-Pre-1	0.010				0.040	0.030	GÖ
CB2-Mon-2	0.005	0.0010	0.0020	0.0050	0.045	0.040	CG
CB2-Pre-2	0.010				0.060	0.050	GÖ

Deneysel çevrimsel yükleme sonuçlarına bağlı olarak her bir ötelenme oranı için hesaplanan enerji yutma miktarları Şekil 149’da verilmiştir. Sonuçlara göre, monolitik ve prekast numunelerin benzer seviyede enerji yuttukları görülmüştür.



Şekil 149. (a) Kiriş boyu 1.0 m olan kolon-kiriş numunelerin enerji yutma miktarları; (b) Kiriş boyu 2.0 m olan kolon-kiriş numunelerin enerji yutma miktarları;

Kolon-kiriş birleşim numuneleri için hesaplanan idealize edilmiş eğrilerden elde edilen maksimum eğilme momenti, akma yer değiştirmesi, nihai yer değiştirme ve süneklik oranı Tablo 21’de verilmiştir. Genel olarak, prekast numunelerin monolitik monolitik numunelerden daha yüksek süneklik gösterdiği görülmüştür. Sonuçlara bakıldığında, geliştirilen prekast birleşim sisteminin deprem bölgelerinde inşa edilecek binalar için uygun olduğu yorumu yapılabilir.

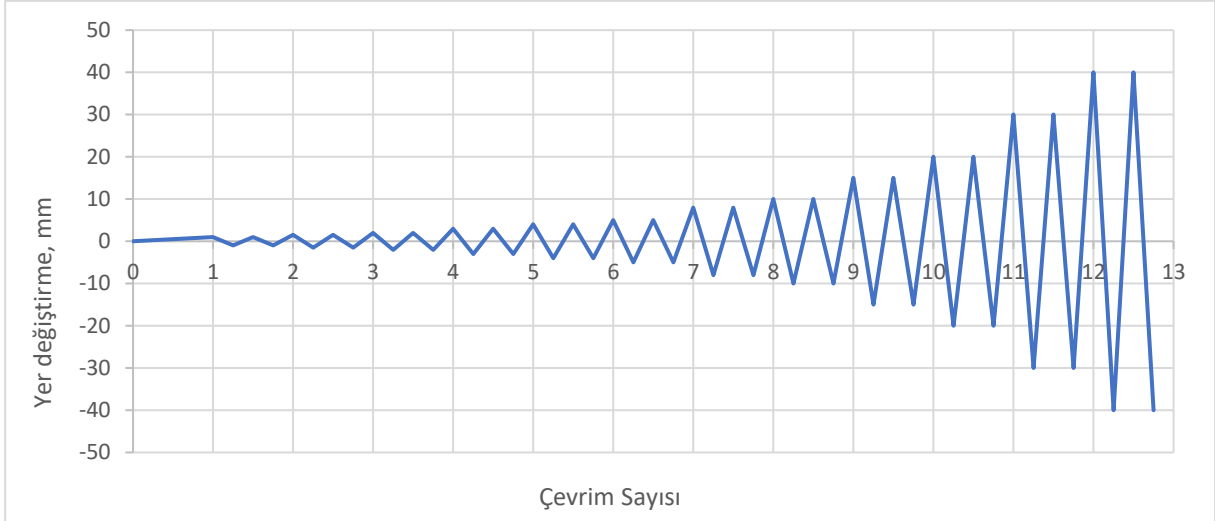
Tablo 21. Kolon-kiriş numuneleri için hesaplanan yapısal parametreler

Numune adı	Maksimum eğilme momenti, kNm	Akma yer değiştirmesi, mm	Nihai yer değiştirme, mm	Süneklik oranı	Göçme modu
CB-Mon-1m	176.6	7.8	29.7	3.8	Plastik mafsal bölgesinde eğilme hasarını takiben kesme hasarı
CB-Pre-1m	185.4	8.2	38.4	4.7	Plastik mafsal bölgesinde eğilme hasarını takiben kesme hasarı
CB-Mon-2m	189.8	18.0	92.2	4.9	Plastik mafsal bölgesinde eğilme hasarını takip eden boyuna donatı burkulması
CB-Pre-2m	185.1	22.3	121.5	5.4	Plastik mafsal bölgesinde eğilme hasarını takip eden boyuna donatı burkulması

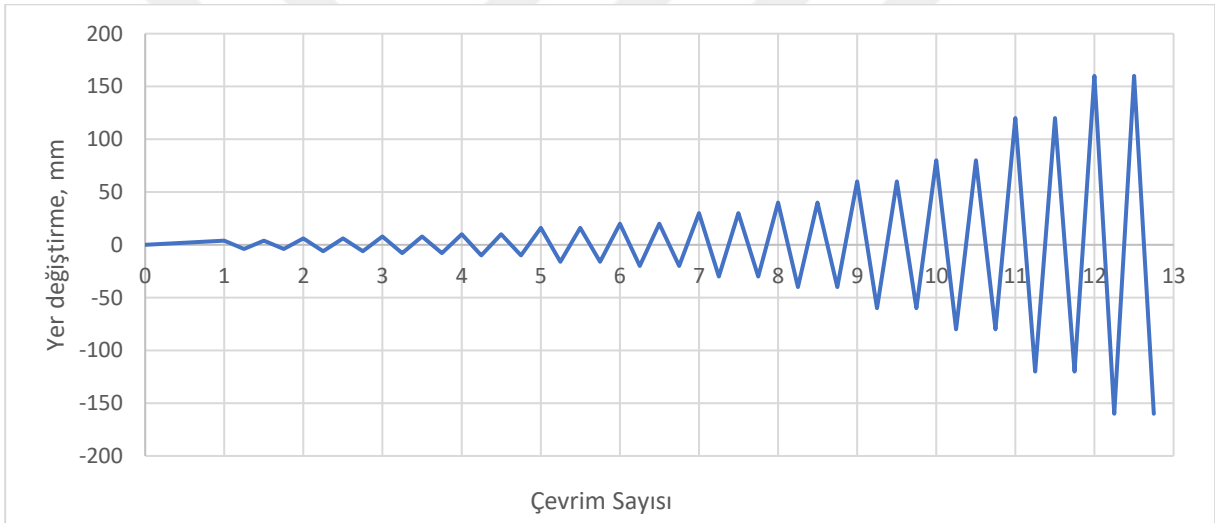
3.1.3. Kiriş – Kiriş Birleşimi Deney Sonuçları

Kiriş – kiriş birleşim deneyleri, açıklığı 2.0 m olan kirişler için 3 noktalı, açıklığı 4.0 m olan kirişler için 4 noktalı eğilme deneyi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Yüklemeler tersinir tekrarlı olarak FEMA-461’de verilen yükleme protokolüne göre yapılmıştır.

Kiriş – kiriş numuneleri için hedef yer değiştirme değeri, açıklığı 2.0 m olan kirişler için %2 çökme oranına denk gelen 40 mm, açıklığı 4.0 m olan kirişler için ise %4 çökme değerine denk gelen 160 mm olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak açıklığı 2.0 m ve 4.0 m olan kiriş – kiriş birleşim numuneleri için oluşturulan yükleme protokolleri Şekil 150 ve Şekil 151’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 150. Açıklığı 2.0 m olan Kiriş – Kiriş birleşim numuneleri için yükleme protokolü



Şekil 151. Açıklığı 4.0 m olan Kiriş – Kiriş birleşim numuneleri için yükleme protokolü

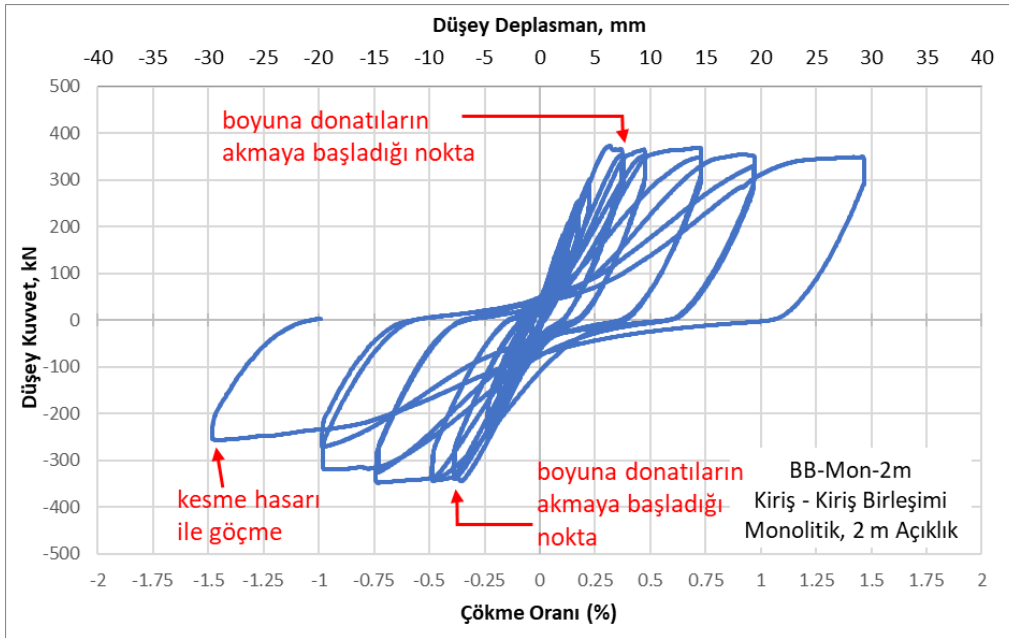
3.1.3.1. Açıklığı 2.0 m Olan Kiriş – Kiriş Birleşim Numuneleri

3.1.3.1.1. Monolitik Numune

Numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 152’de verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 153’te verilmiştir.



Şekil 152. Açıklığı 2.0 m olan monolitik kiriş – kiriş birleşim numunesi deney öncesi görünüşü



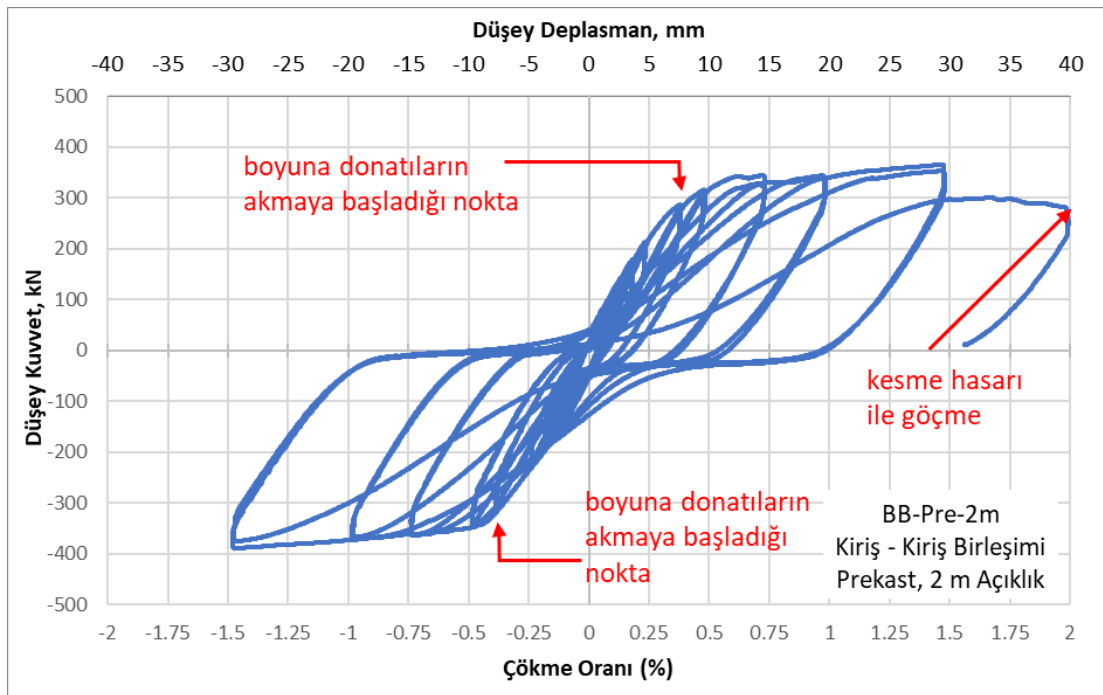
Şekil 153. Açıklığı 2.0 m olan monolitik kiriş – kiriş birleşim numunesi deney sonucu

3.1.3.1.2. Prekast Numune

Numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 154’te verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 155’te verilmiştir.



Şekil 154. Açıklığı 2.0 m olan prekast kiriş – kiriş birleşim numunesi deney öncesi görünüşü



Şekil 155. Açıklığı 2.0 m olan prekast kiriş – kiriş birleşim numunesi deney sonucu

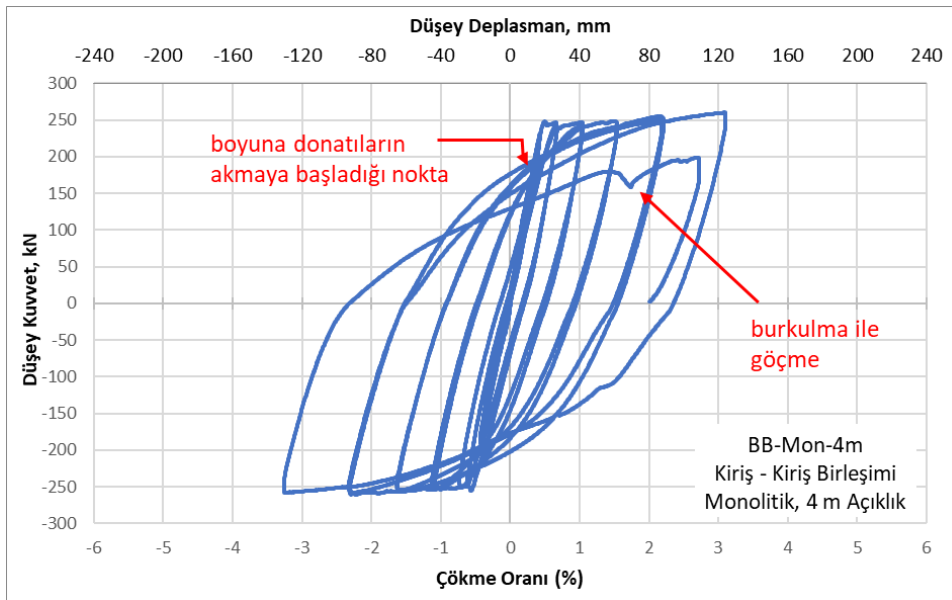
3.1.3.2. Açıklığı 4.0 m Olan Kiriş – Kiriş Birleşim Numuneleri

3.1.3.2.1. Monolitik Numune

Numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 156’da verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 157’de verilmiştir.



Şekil 156. Açıklığı 4.0 m olan monolitik kiriş – kiriş birleşim numunesi deney öncesi görünüşü



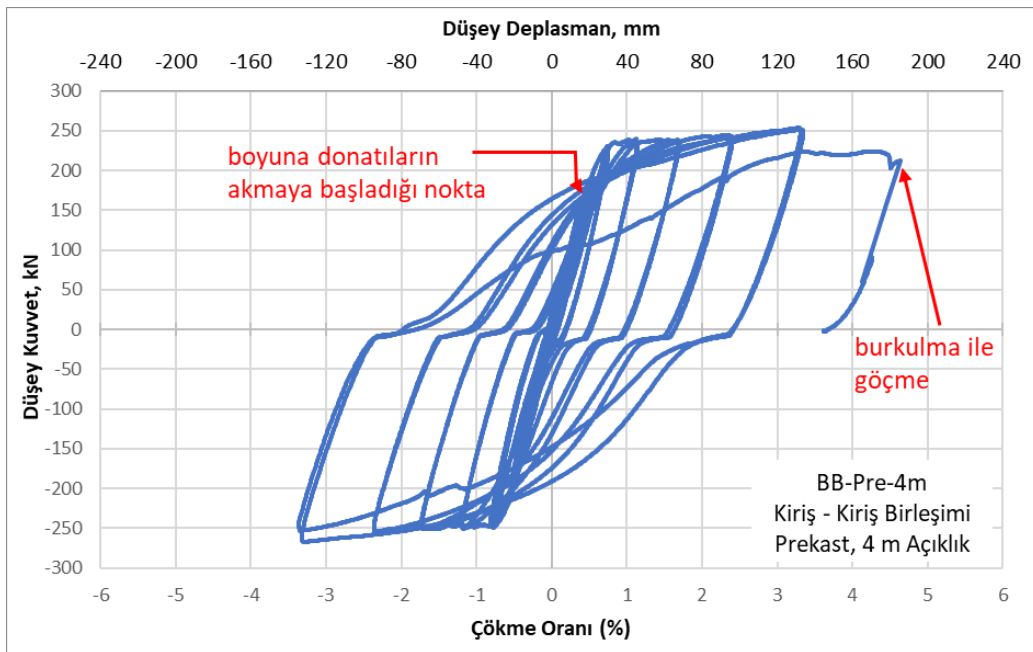
Şekil 157. Açıklığı 4.0 m olan monolitik kiriş – kiriş birleşim numunesi deney sonucu

3.1.3.2.2. Prekast Numune

Numunenin deney öncesi görünüşü Şekil 158’de verilmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük – yer değiştirme eğrisi Şekil 159’da verilmiştir.



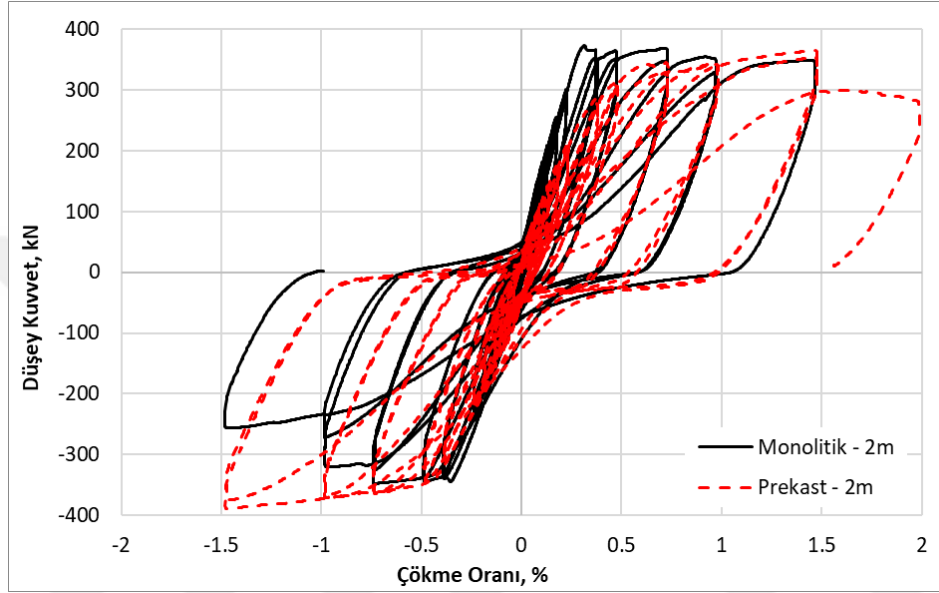
Şekil 158. Açıklığı 4.0 m olan prekast kiriş – kiriş birleşim numunesi deney öncesi görünüşü



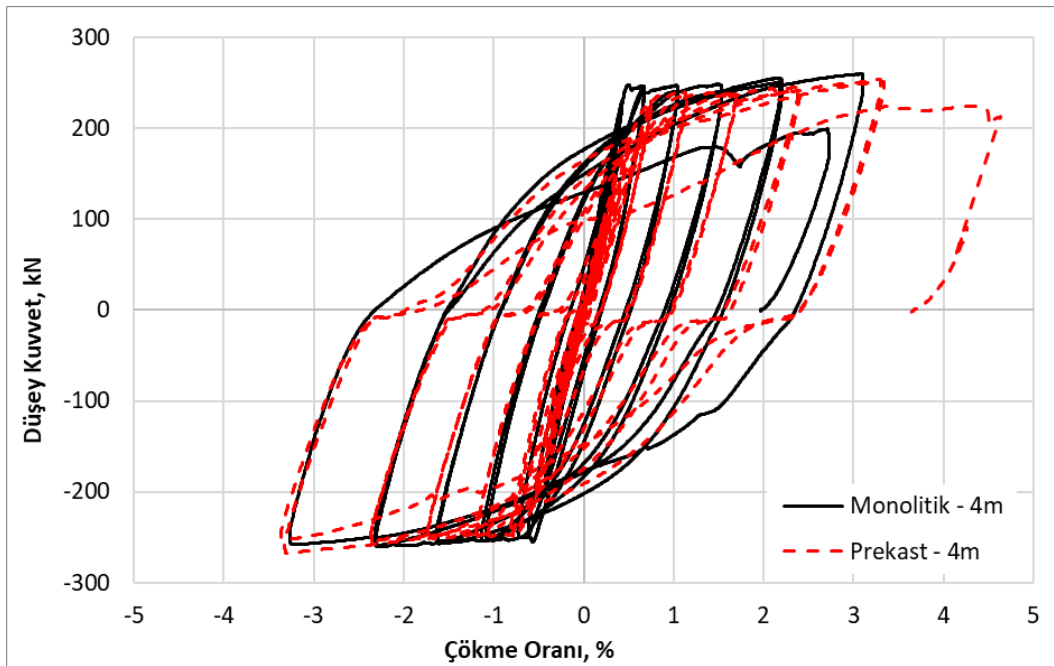
Şekil 159. Açıklığı 4.0 m olan prekast kiriş – kiriş birleşim numunesi deney sonucu

3.1.3.3. Kiriş – Kiriş Birleşimi Numuneleri Karşılaştırılması

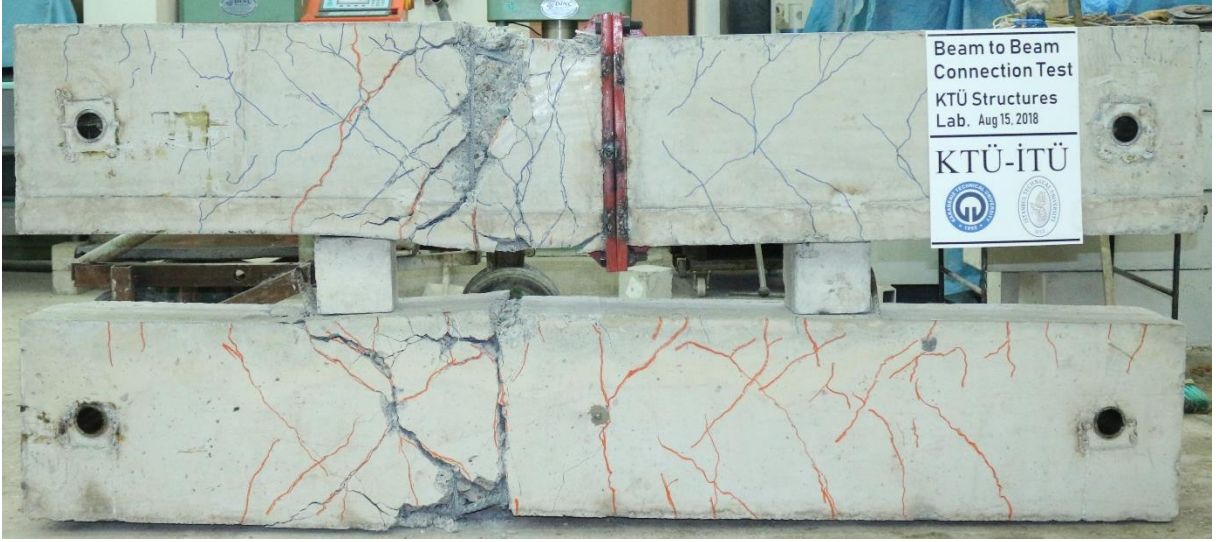
Açıklığı 2.0 m ve 4.0 olan kiriş – kiriş birleşim numunelerinin karşılaştırmalı deney sonuçları Şekil 160 ve Şekil 161’de verilmiştir. Ayrıca, deney sonrası genel görünüşleri 2.0 m ve 4.0 olan kiriş numuneleri için Şekil 162 ve Şekil 163’te sırasıyla verilmiştir. Boyu 4.0 m olan kirişlerin yakından görünüşleri ise Şekil 164’te verilmiştir.



Şekil 160. Açıklığı 2.0 m olan kiriş – kiriş birleşim numuneleri karşılaştırmalı deney sonucu



Şekil 161. Açıklığı 4.0 m olan kiriş – kiriş birleşim numuneleri karşılaştırmalı deney sonucu



Şekil 162. Açıklığı 2.0 m olan kiriş – kiriş birleşim numuneleri deney sonrası genel görünüşleri

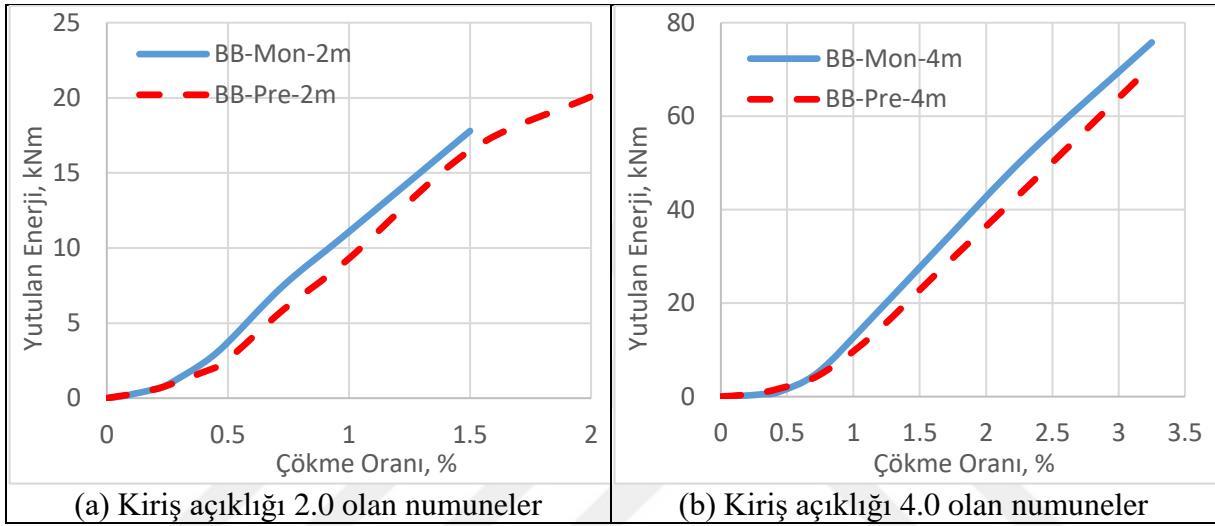


Şekil 163. Açıklığı 4.0 m olan kiriş – kiriş birleşim numuneleri deney sonrası genel görünüşleri



Şekil 164. Açıklığı 4.0 m olan kiriş – kiriş birleşim numuneleri deney sonrası yakın görünüşleri

Deneysel çevrimsel yükleme sonuçlarına bağlı olarak her bir çökme oranı için hesaplanan enerji yutma miktarları Şekil 165’te verilmiştir. Sonuçlara göre, prekast numunelerin monolitik numuneye göre yaklaşık %7 daha az enerji yuttuğu belirlenmiştir. Ancak, açıklığı 2.0 olan prekast numunenin monolitik numuneye göre daha yüksek bir çökme oranına kadar devam etmesinden dolayı nihai çökme oranı dikkate alındığında numunenin daha fazla enerji yuttuğu görülmektedir.



Şekil 165. (a) Kiriş açıklığı 2.0 olan numuneler için enerji yutma oranları (b) Kiriş açıklığı 4.0 olan numuneler için enerji yutma oranları

Kiriş-kiriş numuneleri için hesaplanan idealize edilmiş eğriden elde edilen maksimum eğilme momenti, akma yer değiştirmesi, nihai yer değiştirme ve süneklik oranı Tablo 22’de verilmiştir. Sonuçlara göre, prekast numuneler monolitik numunelerden biraz daha fazla moment kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Açıklığı 2.0 m olan numunelerde prekast ve monolitik numuneler aynı çökme oranlarına ulaşmış olmalarına rağmen idealize edilmiş eğrilerdeki akma yer değiştirmelerinin farklı olması sebebiyle farklı süneklik oranlarına sahiptirler. Açıklığı 4.0 olan kirişlerde prekast numune yaklaşık %7 daha fazla yer değiştirme yapmış olmasına rağmen, yukarıda açıklanan sebepten dolayı monolitik numuneden daha az süneklik oranına sahiptir. Sonuçlara bakıldığında, geliştirilen kiriş-kiriş prekast birleşim sisteminin deprem bölgelerinde kullanılabileceği sonucuna varılabilmektedir.

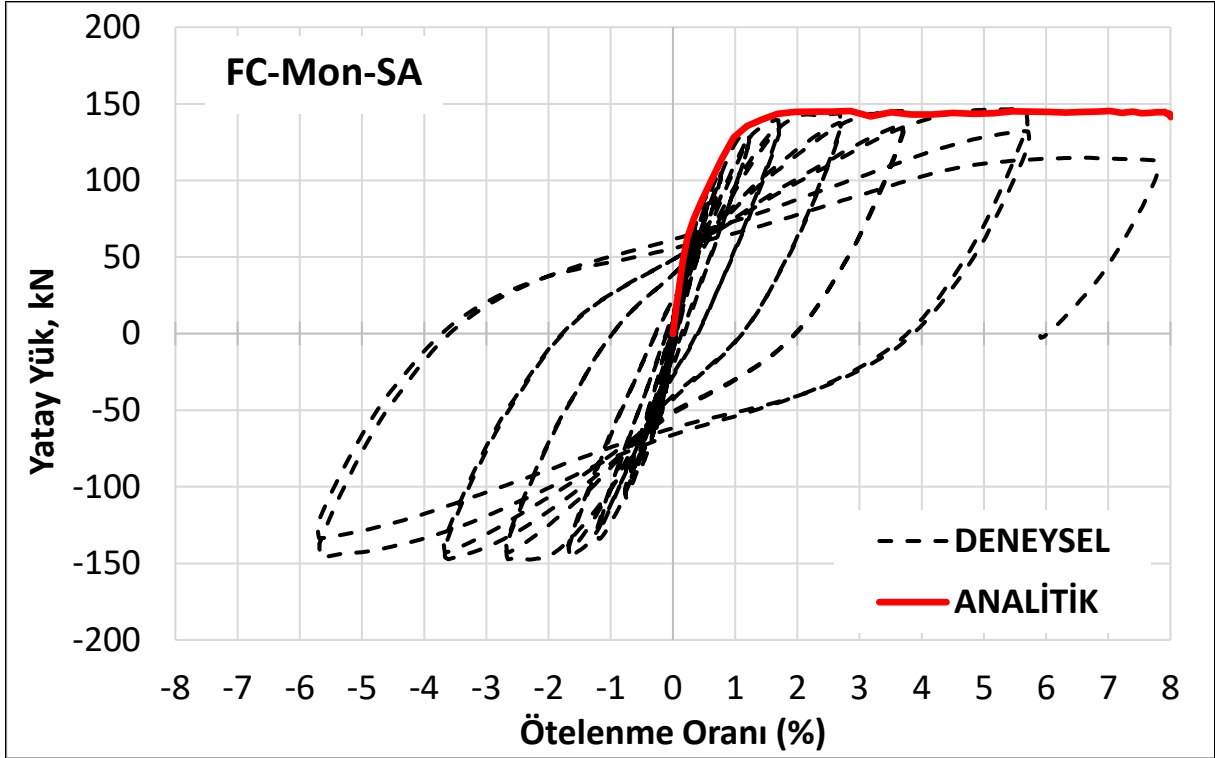
Tablo 22. Kiriş-kiriş numuneleri için hesaplanan yapısal parametreler

Numune adı	Maksimum eğilme momenti, kNm	Akma yer değiştirmesi, mm	Nihai yer değiştirme, mm	Süneklik oranı	Göçme modu
BB-Mon-2m	372.6	4.69	29.35	6.26	Kiriş yükleme bölgesinde kesme hasarı
BB-Pre-2m	388.9	6.66	29.54	4.43	Kiriş yükleme bölgesinde kesme hasarı
BB-Mon-4m	260.5	16.09	124.21	7.72	Kiriş orta bölgesinde eğilme hasarı
BB-Pre-4m	267.3	22.62	133.48	5.90	Kiriş orta bölgesinde eğilme hasarı

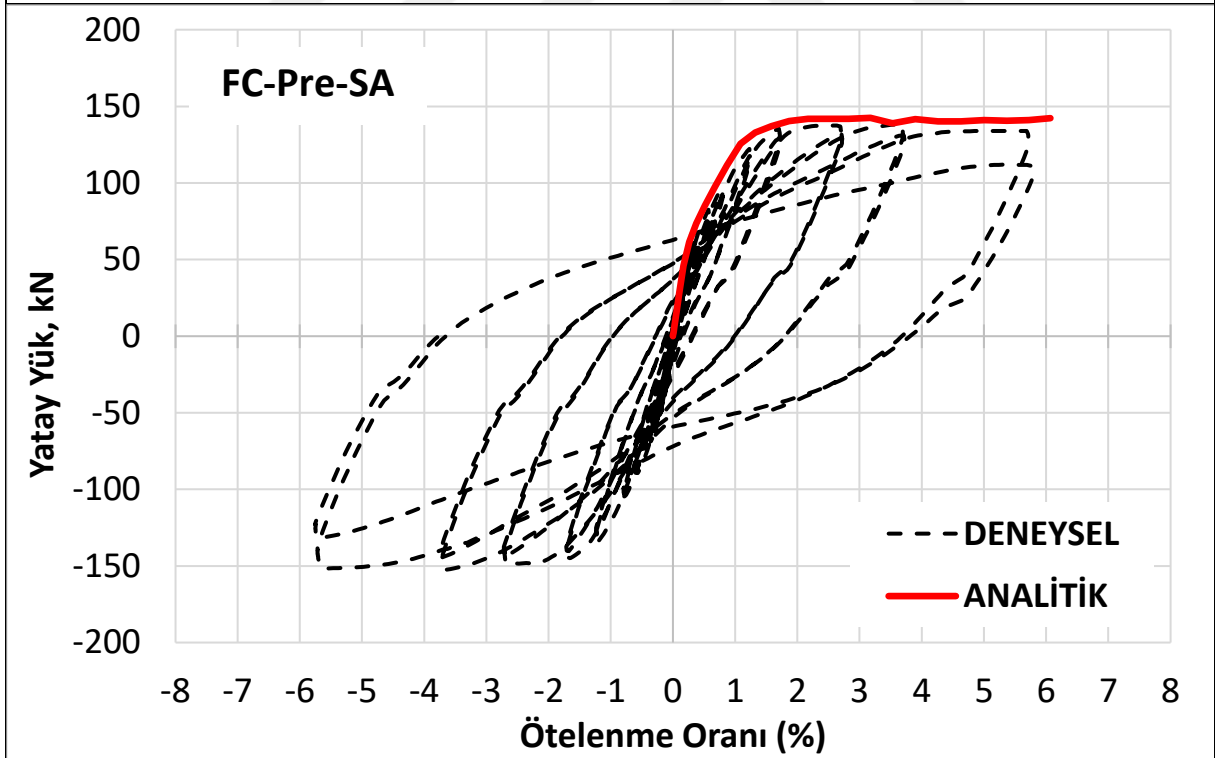
3.2. Analiz Sonuçları

3.2.1. Temel – Kolon Birleşim Numunesi Analiz Sonuçları

Deneyel olarak test edilen numunelerin analiz modelleri ile karşılaştırmalı sonuçları kuvvetli eksen ve zayıf eksen yüklenen numuneler için Şekil 166 ve Şekil 167’de sırasıyla verilmiştir. Geliştirilen analiz modeli ile elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

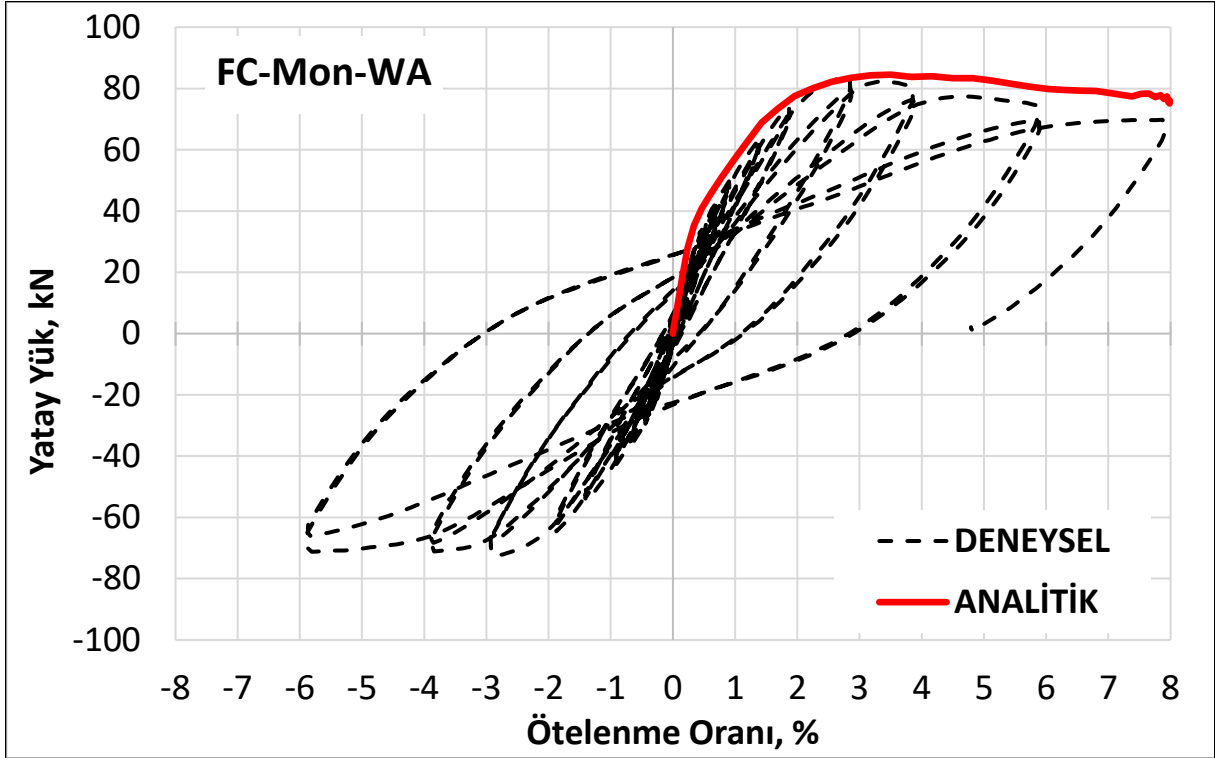


(a) FC-Mon-25x40-SA karşılaştırmalı sonuçlar

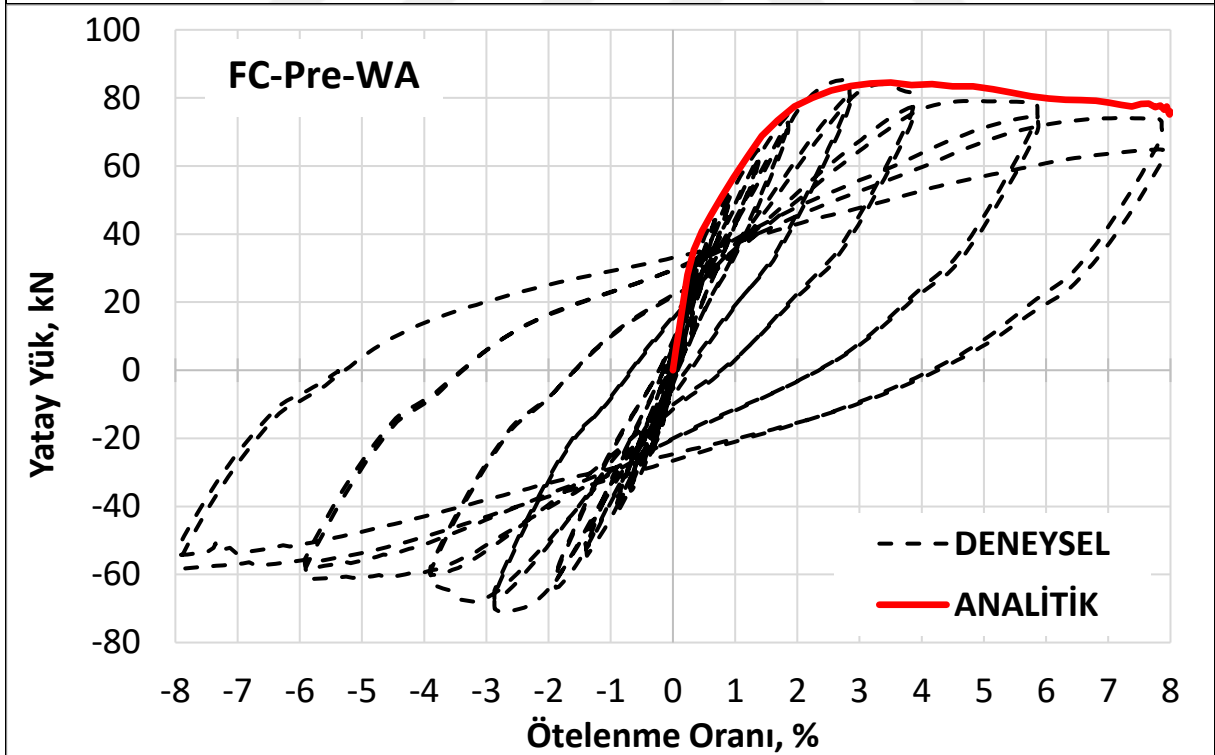


(b) FC-Pre-25x40-SA karşılaştırmalı sonuçlar

Şekil 166. Kuvvetli eksende yüklenen temel – kolon birleşimi analiz ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



(a) FC-Mon-25x40-WA karşılaştırmalı sonuçlar

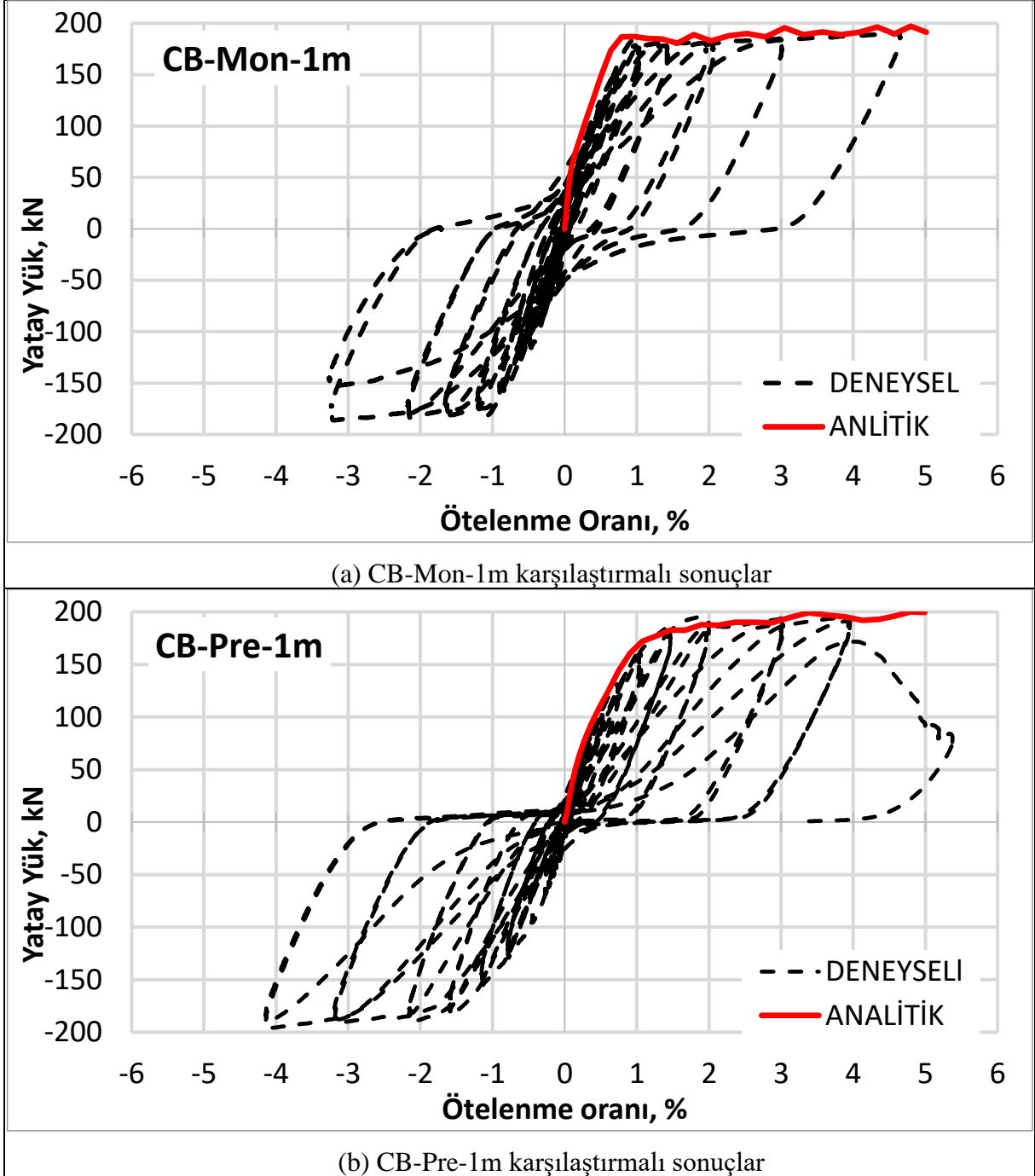


(b) FC-Pre-25x40-WA karşılaştırmalı sonuçlar

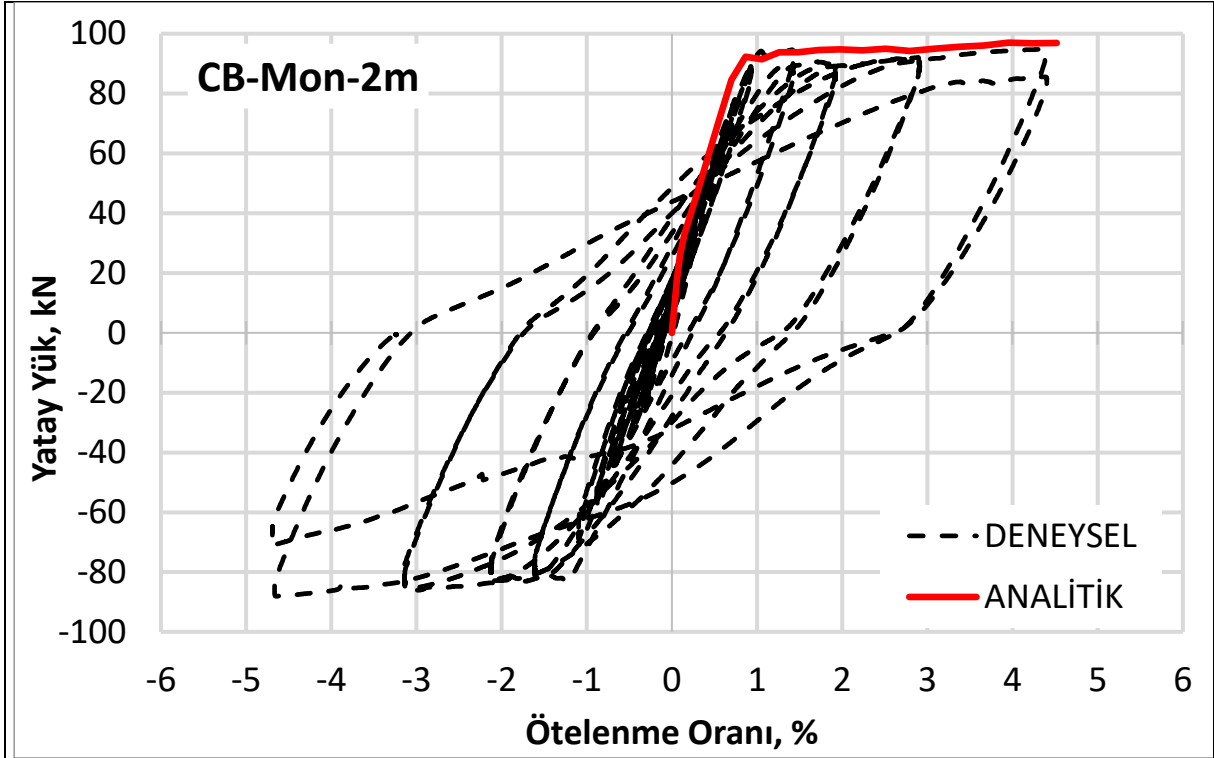
Şekil 167. Zayıf ekseninde yüklenen temel – kolon birleşimi analiz ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

3.2.1. Kolon – Kiriş Birleşim Numunesi Analiz Sonuçları

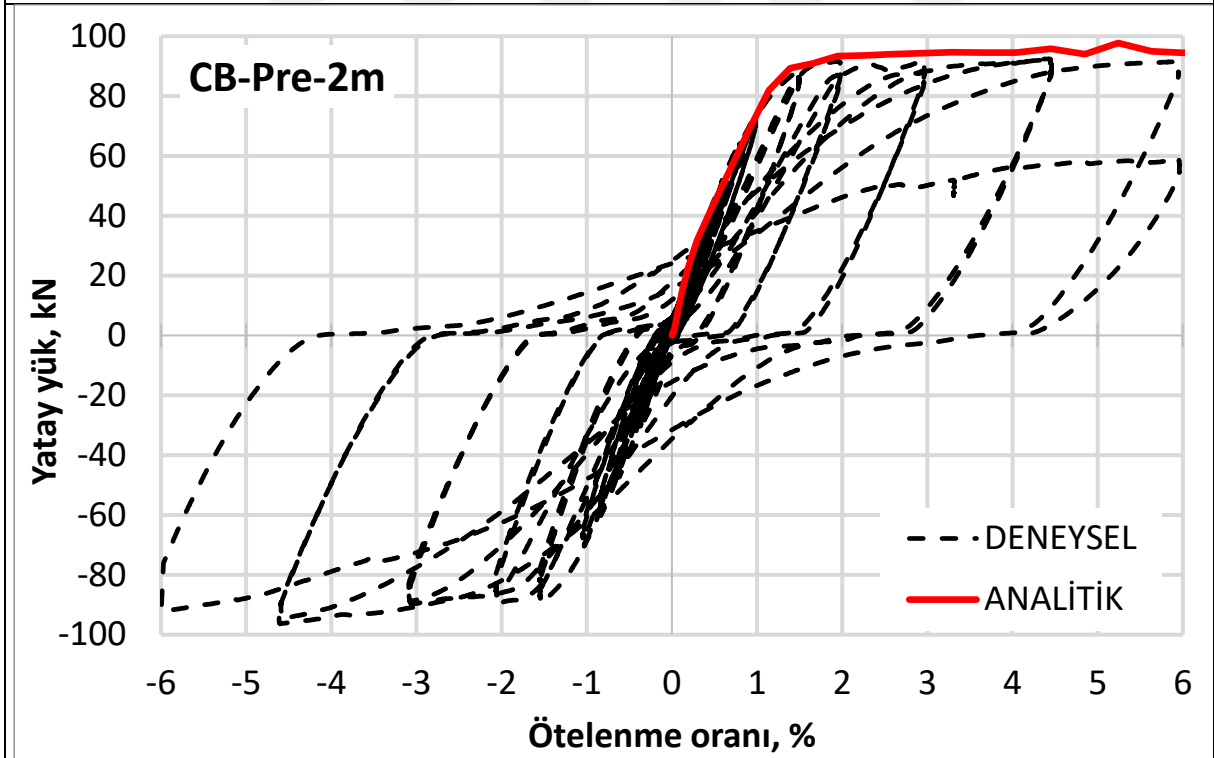
Deneysel olarak test edilen numunelerin analiz modelleri ile karşılaştırmalı sonuçları kiriş boyu 1.0 m ve 2.0 m olan numuneler için Şekil 168 ve Şekil 169’da sırasıyla verilmiştir. Geliştirilen analiz modeli ile elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 168. Kiriş boyu 1.0 m olan kolon – kiriş birleşimi analiz ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



(a) CB-Mon-2m karşılaştırmalı sonuçlar

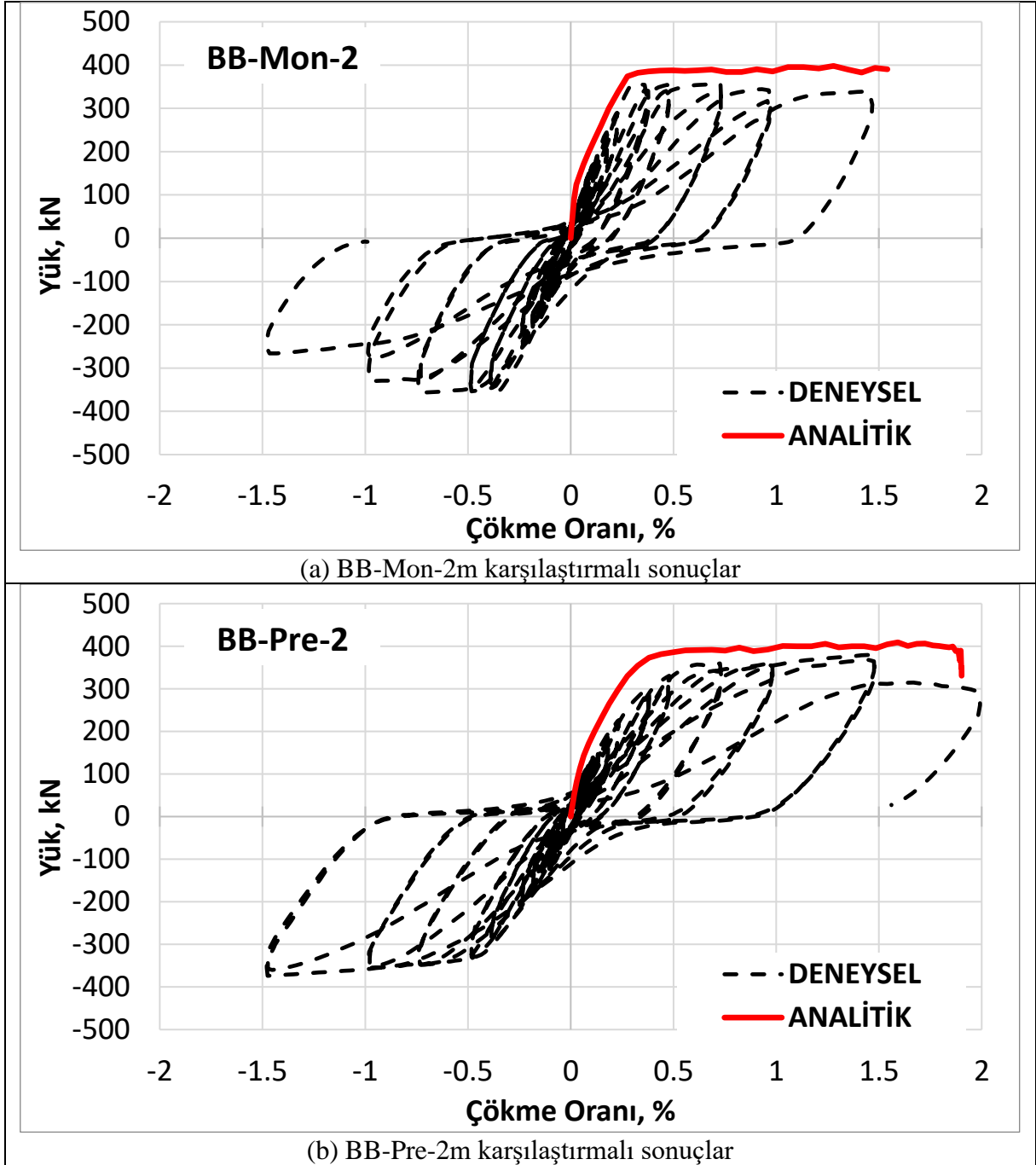


(b) CB-Pre-2m karşılaştırmalı sonuçlar

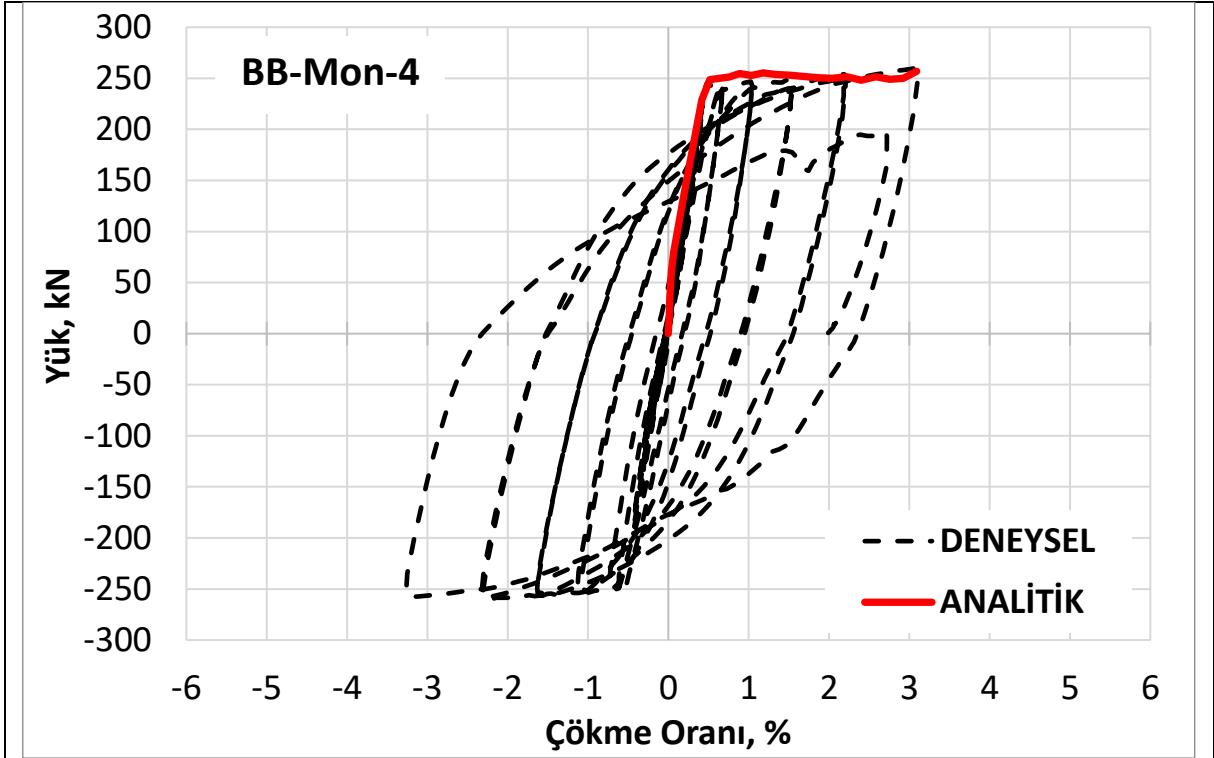
Şekil 169. Kiriş boyu 1.0 m olan kolon – kiriş birleşimi analiz ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

3.2.2. Kiriş – Kiriş Birleşim Numunesi Analiz Sonuçları

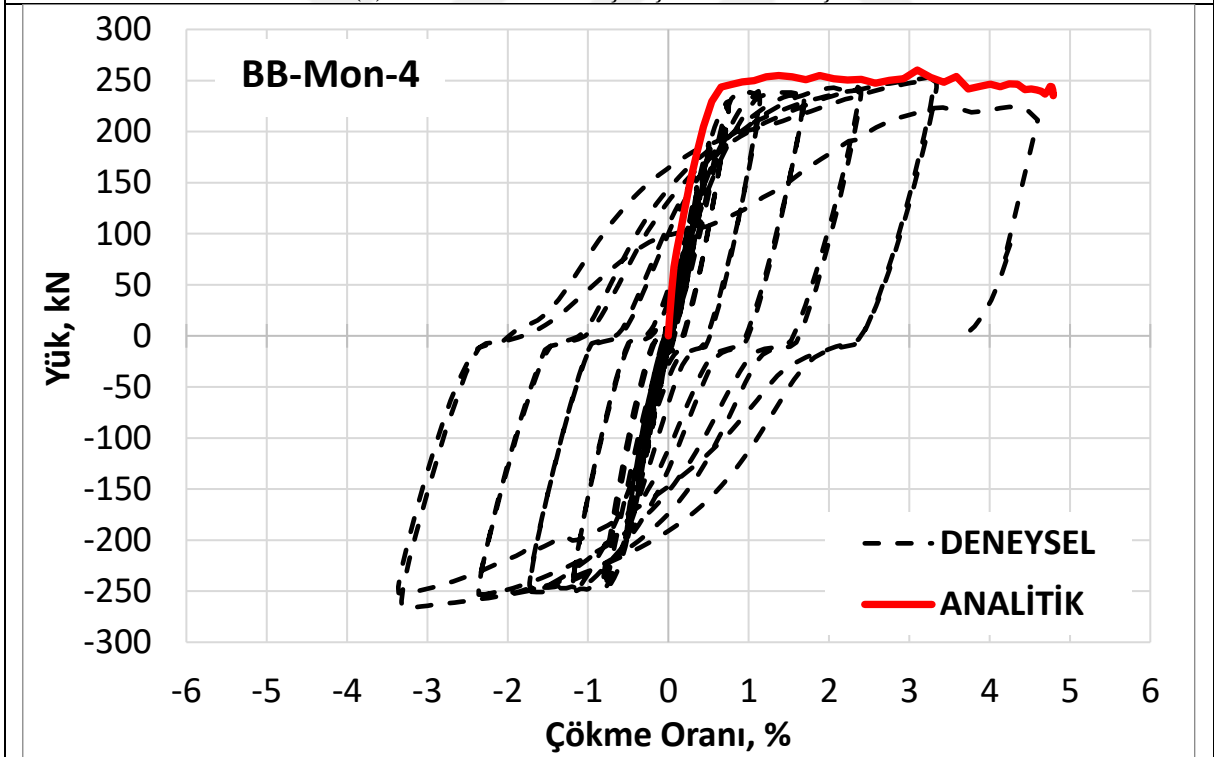
Deneysel olarak test edilen numunelerin analiz modelleri ile karşılaştırmalı sonuçları açıklığı 2.0 m ve 4.0 m olan numuneler için Şekil 170 ve Şekil 171’de sırasıyla verilmiştir. Geliştirilen analiz modeli ile elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 170. Açıklığı 2.0 m olan kiriş – kiriş birleşimi analiz ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



(a) BB-Mon-4m karşılaştırmalı sonuçlar



(b) BB-Pre-4m karşılaştırmalı sonuçlar

Şekil 171. Açıklığı 4.0 m olan kiriş – kiriş birleşimi analiz ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, prekast betonarme yapı elemanları için önerilen moment aktaran cıvatalı birleşim sistemi deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında; temel – kolon, kolon – kiriş ve kiriş – kiriş birleşimleri dikkate alınmıştır. Her bir birleşim tipi için 4'er adet tam ölçekli deney numunesi üretilerek toplamda 12 adet deney gerçekleştirilmiştir. Analitik çalışmalar kapsamında, deneysel olarak incelenen numuneler için bir analiz modeli yaklaşımı geliştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen davranış eğrileri, deney sonrası fotoğrafları ve karşılaştırmalı deney ve analiz sonuçları önceki bölümlerde aktarılmıştır. Çalışmada edinilen bulgulara bağlı olarak elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmaktadır.

- Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, incelenen temel – kolon, kolon – kiriş ve kiriş – kiriş birleşimleri için önerilen prekast birleşim sisteminin olması istendiği gibi genel olarak monolitik birleşimlerle oldukça benzer davranış gösterdiği belirlenmiştir.
- Deneysel çalışmalarda prekast ve monolitik numunelerin göçme modlarının aynı olduğu ve hasar şekillerinin de birbirine çok benzediği görülmüştür.
- Deney elemanları üzerinde gerçekleştirilen eğrilik ölçümlerinden, monolitik numunelerde plastik hasar birleşim bölgesine daha yakın olduğu görülmüştür. Örneğin monolitik temel – kolon birleşimi numunelerinden monolitik olanlarda hasarın çoğunlukla 0-0.5h yüksekliğine yayıldığı ve 0.5h-h ile h-1.5h bölgelerinde çok daha az eğrilik oluştuğu görülmüştür. Buna karşın prekast numunelerde 0-0.5h bölgesindeki eğrilik ile 0.5h-h arası eğrilik değerlerinin benzer mertebelerde olduğu görülmektedir. Buradan, önerilen prekast birleşim yönteminin plastik hasarın daha yükseğe yayılmasını sağladığı sonucuna varılmıştır. Böylelikle enerji yutulması ve dolayısıyla malzemenin daha verimli kullanılmasına katkı sağlandığı söylenebilir.
- Önerilen birleşim sisteminde kullanılan ve ısıtma işlemi için başı formu verilen donatıların göçme modunu değiştirmediği hem donatılar üzerinde yapılan çekme deneylerinde hem de gerçekleştirilen tam ölçekli eleman deneyleri sonuçlarıyla belirlenmiştir.

- Deneysel çalışmalar kapsamında incelenen temel-kolon, kolon-kiriş ve kiriş-kiriş birleşimlerinin çerçeve türü bir yapının inşası için gerekli tüm birleşim tiplerini içerdiği düşünülmektedir. Örneğin, kiriş-kiriş birleşim elemanları aslında uç uca birleşimi temsil etmektedir ve kolon-kolon birleşiminin yaşayabileceği en elverişsiz durumları da incelemektedir. Şöyle ki, salt eğilme etkisinde denenen 4.0 m uzunluğa sahip 4 noktalı eğilme deneyine tabii tutulan deneylere göre, uç uca birleşimde önerilen birleşim sistemi beklendiği şekilde davranmaktadır. Eksenel yük olması halinde eğilme etkisi azalacağı ve kesitteki basınç bölgesi büyüyeceği için kesitin daha az zorlanacağı söylenebilir. Diğer bir durum ise, boyu 2.0 m olan ve yüksek kesme kuvveti etkisi altında denenen kiriş-kiriş birleşim numuneleridir. Bu durumda ise uç uca birleşmesi istenen elemanların yüksek kesme kuvvetine maruz kalması hali ele alınmıştır. Eksenel yük olması hali eğilme etkilerini her durumda azaltacağı için ve yine eksenel yükün levhalar arası sürtünme kuvvetini artırması sebebiyle olumlu etki sağlayacağından dolayı, önerilen birleşim sistemi yüksek kesme kuvveti, eğilme momenti ve eksenel kuvvete maruz kesitlerdeki uç uca birleşimlerde de gerekli performansı gösterebileceği söylenebilir. Ayrıca, uç uca birleşimlerin yeri tasarım sırasında amaca uygun bir şekilde momentin ya da kesme kuvvetinin sıfıra yakın olduğu kesitlere denk getirilebilir.
- Ön gerilmeli olarak sıkılan cıvataların yüklenme sırasında ihmal edilebilir seviyede şekil değiştirme yaptığı birleşim ara yüzünde yapılan ölçümler sayesinde tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak, cıvataların tasarlandığı üzere elastik bölgede kaldıkları belirlenmiştir. Monolitik numunelerin birleşim ara yüzünde gözle görülebilir seviyede açılmalar gözlenirken, prekast numunelerin birleşim levhaları arasındaki açılma değerleri ihmal edilebilir seviyelerde kalmıştır. Plastik hasarın prekast numunelerde daha yükseğe yayılmasının sebebinin bu duruma bağlı olarak geliştiği düşünülmektedir.
- Geliştirilen sonlu eleman hesap yaklaşımı ile gerçekleştirilen analiz sonuçları ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların başlangıç rijitliği, kapasite ve kapasite sonrası davranış açısından oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak, betonun kırılma davranışının malzeme modeline ve analize tam anlamıyla yansıtılamaması nedeniyle analiz modeli göçme anını tespit etmekte yetersiz kalmıştır. Ayrıca, betonun kabuk atması ve donatı burkulmasının modele dahil edilmemesinden dolayı deneysel çalışmalarda görülen kabuk atmasını takiben ortaya çıkan boyuna donatı burkulması göçme modunun yakalanamamasına sebep olmuştur. Göçme anının da tespit

edilebileceği bir malzeme ve analiz modeli geliştirmek adına beton malzemesi üzerine kapsamlı deneysel ve analitik çalışmalar yapılması gerektiği düşünülmektedir.

- Geliştirilen analiz yaklaşımıyla modellenen numunelerin davranışlarının eğilme etkin olması halinde daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer bir deyişle, modellenen numunenin kesme etkileri altında olduğu durumlarda (göçmenin betonun çekme/çatlama dayanımıyla gerçekleşmesi halinde) malzeme modeli betonun heterojen yapısından kaynaklanan belirsizliklerini modellemekte yetersiz kalmaktadır. Bu konuyla ilgili olarak beton malzemesinin çekme ve kesme etkisindeki davranışıyla ilgili kapsamlı deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmesi gerektiği düşünülmektedir.
- Analiz modelleme yaklaşımında, betonun kabuk atması, boyuna donatının burkulması, beton ile donatı arasındaki ankraj sıyrılması gibi durumların modele dahil edilmesinin analiz sonuçlarının geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ancak, modeldeki karmaşıklıklardan dolayı belirsizlikler artacağından, bu modelleme tekniklerinin uzun çalışmalar sonrası geliştirilmesi gerektiği de açıktır.
- Önerilen birleşim sisteminin uygulandığı bölgedeki davranışı değiştirmemesi ve aynı kesite sahip monolitik birleşim ile benzer performans göstermesinden dolayı monolitik olarak tasarlanan çerçeve türü bir yapının uygun yerlerine sadece cıvata ve levha tasarımı yapılarak önerilen birleşim sisteminin uygulanabileceği düşünülmektedir.
- Prekast elemanlarda mevcut betonarme donatılarının ucuna perçin baş formu verilerek aynı zamanda ankraj donatısı olarak başarıyla kullanılabilmesi görülmüştür.

Özetle, bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve analitik çalışmalarla önerilen moment aktaran cıvatalı prekast birleşim sisteminin, aynı boyut ve donatılara sahip monolitik referans numuneleriyle aynı sayılabilecek davranışa sahip olduğu belirlenmiştir. Böylece, önerilen prekast birleşim sisteminin deprem bölgelerinde inşa edilecek yapılarda kullanılmasının uygun olduğu söylenebilir.

Burada verilen tüm sonuçların çalışmaya konu olan sınırlı sayıda deney elemanlarına ve deney koşullarına ait olduğu, daha kesin kanaate varabilmek için bu birleşim sisteminin kullanıldığı iki ve üç boyutlu çerçeve sistemleri üzerinde yarı-statik ve dinamik deneylerin yapılmasının da yararlı olacağı açıktır.

5. KAYNAKLAR

- Alcocer, S., Carranza, R., ve Perez, D., 2000. Behaviour of a precast concrete beam-column connection. In *Memorias, 12th World Conference of Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
- Cheok, G.S., ve Lew, H.S., 1991. Performance of precast concrete beam-to-column connections subject to cyclic loading, *PCI Journal*, 363, 56-67.
- Cheok, G.S., Stone, W.C., ve Kunnath, S.K., 1998. Seismic response of precast concrete frames with hybrid connections, *ACI Structural Journal*, 95, 527-539.
- Cheok, G., Stone, W., ve Lew, H., 1994. Performance of 1/3-scale model precast concrete beam-column connections subjected to cyclic inelastic loads—Report No. 4. NISTIR 5436, National Institute of Standards and Technology NIST.
- Choi, H. K., Choi, Y. C., ve Choi, C.S., 2013. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections. *Engineering Structures*, 56, 1820-1835.
- Dal Lago, B., Toniolo, G. and Tornaghi, M.L., 2016. Influence of different mechanical column-foundation connection devices on the seismic behaviour of precast structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(12), pp.3485-3508.
- Englekirk, R. E., 1995. Development and testing of a ductile connector for assembling precast concrete beams and columns, *PCI journal*, 402, 36-51.
- Englekirk, R. E., 1996. An innovative design solution for precast prestressed concrete buildings in high seismic zones, *PCI journal*, 414, 44-53.
- Englekirk, R. E., 2003. *Seismic design of reinforced and precast concrete buildings*. John Wiley ve Sons.
- Ertas, O., ve Ozden, S., 2007. Behavior of Unbonded, Post-Tensioned, Precast Concrete Connections with Different Percentages of Mild Steel Reinforcement, *PCI Journal*.
- FEMA-461, 2007. *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*, Federal Emergency Management Agency, Washington, USA.
- French, C. W., Hafner, M., ve Jayashankar, V., 1989. Connections between precast elements-failure within connection region, *Journal of Structural Engineering*, 11512, 3171-3192.

- Krätzig, W.B., ve Pölling, R., 2004. An elasto-plastic damage model for reinforced concrete with minimum number of material parameters. *Computers ve structures*, 82(15-16), pp.1201-1215.
- Korkmaz, H. H., ve Tankut, T., 2005. Performance of a precast concrete beam-to-beam connection subject to reversed cyclic loading, *Engineering Structures*, 279, 1392-1407.
- Li, B., Kulkarni, S. A., ve Leong, C. L., 2009. Seismic performance of precast hybrid-steel concrete connections. *Journal of Earthquake Engineering*, 135, 667-689.
- Metelli, G., Beschi, C. ve Riva, P., 2011. Cyclic behaviour of a column to foundation joint for concrete precast structures. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 15(9), pp.1297-1318.
- Nzabonimpa, J.D., ve Hong, W.K., 2018. Structural performance of detachable precast composite column joints with mechanical metal plates. *Engineering Structures*, 160, pp.366-382.
- Pampanin, S., 2006. Controversial aspects in seismic assessment and retrofit of structures in modern times. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 39(2), 120-133.
- Pampanin, S., 2017. Towards the practical implementation of performance-based assessment and retrofit strategies for RC buildings: challenges and solutions. Keynote Lecture, SMAR2017.
- Parastesh, H., Hajirasouliha, I., ve Ramezani, R., 2014. A new ductile moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: an experimental investigation, *Engineering Structures*, 70, 144-157.
- Pul, S., ve Şentürk, M., 2017. A Bolted Moment Connection Model for Precast Column-Beam Joint. In *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural and Environmental Engineering, ICSENM (Vol. 129, p. 2017)*.
- Restrepo, J.I., Park, R., ve Buchanan, A.H., 1995. Tests on connections of earthquake resisting precast reinforced concrete perimeter frames of buildings, *PCI journal*, 404, 44-61.
- Ong, K.C.G., Lin, Z.S., Chandra, L.R., Tam, C.T., ve Dai Pang, S., 2013. Experimental investigation of a DfD moment-resisting beam-column connection, *Engineering Structures*, 56, 1676-1683.
- Ozturan, T., Ozden, S., ve Ertas, O., 2006. Ductile connections in precast concrete moment resisting frames. *concrete construction, PCI Journal*, 9, 11.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, AFAD, Ankara, TÜRKİYE.

- Xiao, J., Ding, T., ve Zhang, Q. 2017. Structural behavior of a new moment-resisting DfD concrete connection, *Engineering Structures*, 132, 1-13.
- Vidjeapriya, R., ve Jaya, K.P., 2012. Experimental study on two simple mechanical precast beam-column connections under reverse cyclic loading, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 274, 402-414.
- Yuksel, E., Karadogan, H.F., Bal, İ.E., Ilki, A., Bal, A., ve Inci, P., 2015. Seismic behavior of two exterior beam-column connections made of normal-strength concrete developed for precast construction, *Engineering Structures*, 99, 157-172.



ÖZGEÇMİŞ

Mehmet ŞENTÜRK, 1987 yılında Samsun’da doğdu. İlköğretimini 1993-2001 yılları arasında Milli Eğitim Vakfı İlköğretim Okulu’nda, lise eğitimini ise 2001-2004 yılları arasında Samsun Cumhuriyet Lisesi’nde tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 2010 yılında mezun olduktan sonra bir süre özel sektörde mühendis olarak çalıştı. Yüksek lisans eğitimine 2013 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, Deprem Mühendisliği programında başladı. Yüksek lisans çalışması sırasında Prof. Dr. Alper İLKİ yönetimindeki “LP Kompozitler ile Kesit Boy-En Oranı Üç Olan Betonarme Dikdörtgen Kolonların Deprem Davranışının İyileştirilmesi” başlıklı yüksek lisans tezini 2015 yılının Ocak ayında savunarak başarıyla mezun olmuştur. Doktora eğitimine 2015 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, Deprem Mühendisliği programında başladı. Bu sırada Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’na Araştırma Görevlisi olarak atandığı için aynı Anabilim Dalına yatay geçiş yaparak doktora eğitimine burada devam etti. Doktora eğitimi sırasında doktora çalışmasıyla ilgili tescillenmiş 1 adet faydalı modeli ve 1 adet patenti bulunmaktadır. Bunun yanı sıra, doktora çalışması dışındaki bir konuda da 1 adet patent başvurusu halen inceleme aşamasındadır. Doktora çalışmalarının gerçekleştirilmesi için “TÜBİTAK 1005–Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler Araştırma Destek Programı” kapsamında alınan ve başarıyla sonuçlandırılan projede araştırmacı olarak görev aldı. YÖK-YUDAB burs programı kapsamında doktora sırası yurtdışı araştırma bursu kazanarak 1 yıl süreyle İngiltere’deki Sheffield Üniversitesi’nde araştırmalar gerçekleştirdi. Mehmet ŞENTÜRK ileri seviyede İngilizce bilmektedir. Halen Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.