

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAFİF ÇELİK-BETON KOMPOZİT KİRİŞLER İÇİN KISMEN
YALITILMIŞ KAYMA BAĞLANTISI TASARIMI VE DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih CEBİR

ARALIK 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HAFİF ÇELİK-BETON KOMPOZİT KİRİŞLER İÇİN KISMEN
YALITILMIŞ KAYMA BAĞLANTISI TASARIMI VE DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Fatih CEBİR

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 / 11 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 16 / 12 / 2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serhat DEMİR

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Hafif Çelik-Beton Kompozit Kirişler İçin Kısmen Yalıtılmış Kayma Bağlantısı Tasarımı ve Deneysel Olarak İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca gerek deneysel gerek teorik çalışmalarda bana önemli katkılar sağlayan; akademik bilgi ve tecrübelerinden yararlanma fırsatı sunduğu gibi örnek davranışlarıyla da her zaman rehberlik eden, birlikte çalışmaktan büyük onur ve mutluluk duyduğum değerli danışman hocam Doç. Dr. Serhat DEMİR'e, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemediği için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca sevgisi, sabrı ve desteğiyle her zaman yanımda olan, kararlarımı destekleyerek beni bugünlere taşıyan canım anneme; zor zamanlarımda yanımda olarak desteği ve verdiği güçle her an yanımda hissettiğim sevgili kardeşim Halil İbrahim CEBİR’e; her koşulda yanımda olduğunu hissettiren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli dayım Recep AKBABA’ya tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Fatih CEBİR

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Hafif Çelik-Beton Kompozit Kirişler İçin Kısmen Yalıtılmış Kayma Bağlantısı Tasarımı ve Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Serhat DEMİR’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak hareket ettiğimi ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/12/2024

Fatih CEBİR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kompozit Yapılar	2
1.3. Kayma Bağlantı Elemanı.....	4
1.4. Konu ile İlgili Yapılmış Bazı Çalışmalar	5
1.5. Amaç ve Kapsam.....	11
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	13
2.1. Kısmen İzole Edilmiş Kayma Bağlantı Elemanı.....	13
2.2. Ön Sayısal Çalışmalar	16
2.2.1. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması ve Analiz	16
2.2.2. Analiz Sonuçları.....	20
2.3. Deneysel Çalışmalar.....	22
2.3.1. Birinci Aşama Deneysel Çalışmalar	22
2.3.2. İkinci Aşama Deneysel Çalışmalar	35
2.3.3. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	48
3. BULGULAR VE İRDELEMELER.....	51
3.1. Giriş.....	51
3.2. İtme Testi.....	51
3.2.1. İtme Yüğü Taşıma Kapasitesi	52
3.2.2. Hasar Dağılımı	54
3.2.3. Süneklik ve Rijitlik	64
3.3. Eğilme Testi	65

3.3.1. Moment-Sehim Davranışı ve Göçme Durumu	66
3.3.2. Numunelerin Rijitlikleri.....	70
3.3.3. Döşeme-Kiriş Arayüz Kayması ve İtme Deneyleri ile İlişkilendirilmesi	71
3.3.4. Kiriş Orta Açıklık Enkesitinde Birim Şekildeğiştirme Değişimi.....	73
4. SONUÇLAR.....	75
5. ÖNERİLER.....	78
6. KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

HAFİF ÇELİK-BETON KOMPOZİT KİRİŞLER İÇİN KISMEN YALITILMIŞ KAYMA BAĞLANTISI TASARIMI VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Fatih CEBİR

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Serhat DEMİR
2024, 82 Sayfa

Çelik-beton kompozit kirişlerde, çelik profilin çekme dayanımı ve betonun basınç dayanımının etkin bir şekilde kullanılabilmesi için bağlantı elemanları kritik bir rol oynar. Geleneksel olarak, bağlantı elemanları kiriş başlığına birleştirilmektedir. Ancak bu yöntem, ağır çelik profiller için uygun olsa da, hafif çelik kirişlerde et kalınlığının çok az olması nedeniyle hasarın bağlantı elemanında değil, kiriş başlığında yoğunlaşmasına yol açmaktadır. Bu tez çalışmasında, literatürde ilk kez bağlantı elemanının kiriş başlığı yerine kiriş gövdesine birleştirildiği yenilikçi bir kayma bağlantısı tasarlanmış ve performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca bağlantı elemanı betondan kısmen izole edilerek serbestçe eğilebilmesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, tam ölçekli numuneler üzerinde itme ve eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar uygulamada yaygın olarak kullanılan cıvatalı kayma bağlantıları ile karşılaştırılmıştır. İtme testleri neticesinde, hasarın tamamı önerilen bağlantı elemanında yoğunlaşmış ve hafif çelik kirişte hasar meydana gelmemiştir. Eğilme testleri, önerilen bağlantı elemanının kompozit kirişin eğilme kapasitesine olumlu katkılar sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Hafif Çelik, Kompozit Kiriş, Kayma Bağlantısı, İtme Testi, Eğilme Testi

Master Thesis

SUMMARY

DESIGN AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PARTIALLY ISOLATED SHEAR CONNECTORS FOR COLD-FORMED STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS

Fatih CEBİR

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Serhat DEMİR
2024, 82 Pages

In steel-concrete composite beams, shear connectors play a critical role in effectively utilizing the tensile strength of the steel profile and the compressive strength of the concrete. Traditionally, shear connectors are attached to the beam flange. However, while this method is suitable for heavy steel profiles, it leads to damage concentration in the beam flange rather than the shear connector due to the very thin web in cold formed steel beams. In this thesis, for the first time in the literature, an innovative shear connector was designed where the connection element is attached to the beam web instead of the beam flange, and its performance was experimentally evaluated. Additionally, the shear connector has been partially isolated from the concrete, allowing it to bend freely. Experimental studies included push-out and bending tests on full-scale specimens, and the results were compared with commonly used bolted shear connectors in practice. The push-out test results revealed that all the damage concentrated in the proposed shear connector, with no damage occurring in the cold formed steel beam. The bending tests showed that the proposed shear connector positively contributed to the flexural capacity of the composite beam.

Key Words: Cold Formed Steel, Composite Beam, Shear Connector, Push-Out Test, Bending Test

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Hafif çelik yapı	2
Şekil 2. Çelik beton kompozit döşeme uygulaması	3
Şekil 3. Kesme çivisi.....	5
Şekil 4. Deney düzeneği ve deney sonu görüntüsü.....	6
Şekil 5. Bağlantı elemanı detayı ve deney sonu görüntüsü	7
Şekil 6. Deney düzeneği ve deney sonu görüntüsü.....	8
Şekil 7. Bağlantı elemanı detayı ve deney sonu görüntüsü	8
Şekil 8. Analiz ve deney sonu görüntüsü.....	9
Şekil 9. Deney düzeneği ve deney sonu görüntüsü.....	10
Şekil 10. Bağlantı elemanı detayı ve deney sonu görüntüsü	11
Şekil 11. Kompozit kirişte yeni bağlantı elemanı.....	15
Şekil 12. Yeni bağlantı elemanı birleşim detayı	16
Şekil 13. C3D8R solid elemanı ile modellenmiş bir kayma bağlantı elemanı	18
Şekil 14. Sonlu eleman analizlerinde kabul edilen sınır şartları.....	18
Şekil 15. G5, G7 ve G10 isimli sayısal modeller.....	19
Şekil 16. Birim şekildeğiştirme değişimi incelenen çelik şerit yüksekliği	20
Şekil 17. 15 mm'lik yatay yerdeğiştirme neticesinde çelik şerit yüksekliği boyunca meydana gelen birim şekildeğiştirme.....	21
Şekil 18. Hafif çelik kiriş boyutları (C200-1.5-15-60)	24
Şekil 19. PO-B deney elemanlarında kiriş bağlantı detayı	24
Şekil 20. PO-B deney elemanlarında cıvatalı kayma bağlantı elemanı- kiriş birleşim detayı	25
Şekil 21. Döşeme birleşimi tamamlanmış PO-B deney elemanlarının şematik görünümü.....	25
Şekil 22. PO-B deney elemanlarının imalat aşamaları	25
Şekil 23. PO-PL-ISO deney elemanlarında kiriş ve plaka bağlantı detayı.....	26
Şekil 24. PO-PL-ISO deney elemanının betondan kısmen izole edilmesi ve donatılar vasıtası ile yük aktarımının sağlanması	26
Şekil 25. Döşeme birleşimi tamamlanmış PO-PL-ISO deney elemanlarının şematik görünümü	27
Şekil 26. PO-PL-ISO deney elemanı imalat aşamaları.....	27
Şekil 27. PO-PL deney elemanı birleşim aşamaları.....	28

Şekil 28.	1.5 mm sacların bükülüp C enkesitli profil haline getirilmesi.....	29
Şekil 29.	C kesitli hafif çelik profillerin birleşimi	29
Şekil 30.	Cıvatalı kayma bağlantı elemanının kiriş başlığına montajı.....	30
Şekil 31.	Plaka bağlantı elemanı	31
Şekil 32.	Beton dökümüne hazır hale getirilmiş PO-PL elemanı	31
Şekil 33.	U şekilli 0.5 mm kalınlığında sac kapak.....	32
Şekil 34.	Beton dökümüne hazır hale getirilmiş PO-PL-ISO elemanı	32
Şekil 35.	Kalıbın hazırlanması ve beton dökümü	33
Şekil 36.	Üretimi tamamlanmış itme deney elemanları	33
Şekil 37.	İtme deney düzeneği	34
Şekil 38.	Statik itme deneyi yükleme protokolü	35
Şekil 39.	BE-R deney elemanı detayı	37
Şekil 40.	BE-B-12 deney elemanı detayı.....	39
Şekil 41.	BE-PL- ISO deney elemanı detayı	41
Şekil 42.	Eğilme deney elemanlarının üretimine ait bazı görseller	43
Şekil 43.	Dört nokta eğilme deney düzeneğinin şematik görünümü (Ölçüler cm'dir)	45
Şekil 44.	Kiriş orta açıklığındaki SG yerleşim düzeni.....	46
Şekil 45.	Eğilme deney düzeneğinin detaylı görünümü	47
Şekil 46.	Monotonik çekme deneyinde kullanılan numunelerin geometrik özellikleri	48
Şekil 47.	Beton basınç deneyine ait görseller	50
Şekil 48.	İtme Yüğü- Kayma grafiğinin değerlendirilmesinde kullanılan parametreler [Eurocode 4, 2004]	51
Şekil 49.	İtme Yüğü – Kayma grafikleri.....	53
Şekil 50.	PO-B-8 elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar.....	55
Şekil 51.	PO-B-8’de hasar dağılımı	56
Şekil 52.	PO-B-10 elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar.....	57
Şekil 53.	PO-B-10’da hasar dağılımı	58
Şekil 54.	PO-B-12 elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar.....	59
Şekil 55.	PO-B-12’de hasar dağılımı	60
Şekil 56.	PO-PL elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar.....	61
Şekil 57.	PO-PL’de hasar dağılımı	62
Şekil 58.	PO-PL-ISO elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar	63
Şekil 59.	PO-PL-ISO’da hasar dağılımı.....	64

Şekil 60.	Moment- Orta Açıklık Sehim grafikleri	66
Şekil 61.	BE-R numunesindeki hasarlar	67
Şekil 62.	BE-B-12 numunesindeki hasarlar	68
Şekil 63.	BE-PL-ISO numunesindeki ilk tepe noktasına ulaşılan kadar meydana gelen hasarlar	69
Şekil 64.	BE-PL-ISO numunesinde ikinci tepe noktasında oluşan hasarlar	70
Şekil 65.	Numunelerin hesaplanmış rijitlikleri ile ölçülmüş davranışları arasındaki ilişki	71
Şekil 66.	Döşeme-kiriş arayüz kayma grafikleri.....	72
Şekil 67.	Döşeme-kiriş arayüz kaymasının itme deneyleri ile ilişkisi	73
Şekil 68.	Kiriş orta açıklık kesitinde birim şekildeğiştirme değişimi	74



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan kayma bağlantı elemanlarının boyutları.....	17
Tablo 2. İtme Deney Elemanlarının Özellikleri.....	23
Tablo 3. Eğilme Deney Elemanlarının Özellikleri.....	36
Tablo 4. Monotonik çekme deneyinden elde edilen ortalama sonuçlar.....	48
Tablo 5. Bağlantı cıvatalarının karakteristik özellikleri.....	49
Tablo 6. Çekme deneylerinde elde edilen ortalama değerler.....	49
Tablo 7. Beton malzemelerin karışım oranları (1 m ³).....	50
Tablo 8. İtme testi sonuçları.....	54
Tablo 9. Eğilme deneyi sonuçları	67

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ε	: Birim şekildeğiştirme
σ	: Gerilme
E	: Elastisite Modülü
kN	: Kilonewton
MPa	: Megapascal
GPa	: Gigapascal
m	: Metre
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
mm/dk	: Milimetre/dakika
$\varnothing$	: Çap
PEEQ	: Plastik şekildeğiştirme
P_u	: Maksimum itme yükü
δ_{peak}	: Maksimum itme yükü anındaki kayma miktarı
δ_u	: Maksimum itme yükünün %10 azaldığı andaki kayma miktarı
K_i	: Başlangıç rijitliği
K_{sc}	: Azaltılmış rijitlik
M	: Moment
Δ	: Sehim
M_u	: Maksimum moment
Δ_{peak}	: Maksimum momente ulaşıldığı andaki sehim
I_{eff}	: Kısmi kompozit kesitin etkili atalet momenti
I_{LB}	: Alt sınır atalet momenti

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde teknolojik ilerlemeler modern yaşamın her alanında hız kazanmış, inşaat sektöründe de zaman ve maliyet tasarrufunu sağlarken sürdürülebilir çözümler geliştirmeye odaklanmıştır. Teknolojik gelişmelerle birlikte, inşaat sektöründe hızla artan sürdürülebilirlik ve verimlilik talepleri, hafif çelik yapıların daha çok tercih edilmesini sağlamıştır. Hafif çelik yapılar, düşük ağırlık, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve çevre dostu özellikleri nedeniyle inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1). Bu yapıların en önemli avantajları, inşaat süresinin kısalması ve maliyetlerin azalmasıdır (Wehbe vd., 2013).

Bu avantajlar, hafif çelik kesitlerin tercih edilmesini ve zamanla gelişmelerin hız kazanmasını sağlamıştır. 1990'lardan itibaren hafif çelik elemanların kullanımında önemli ilerlemeler ve geniş çaplı uygulamalar kaydedilmiştir, özellikle ticari ve konut yapılarında bu elemanlar daha sık kullanılmaya başlanmıştır (Hancock, 2003). Bu tür yapı bileşenleri genellikle kiriş, kolon, duvar paneli ve döşeme olarak kullanılmakta ve geniş uygulama alanlarıyla inşaat sektöründe yaygın bir çözüm haline gelmiştir. Hafif çelik profiller, sıcak haddelenmiş profillere kıyasla yapının ağırlığını önemli ölçüde azaltır. Yapısal hafiflik, inşaat maliyetlerinin düşmesini sağlarken, nakliye ve montaj giderlerinde de kayda değer bir azalma meydana getirir (Zeynalian, 2015; Zeynalian vd., 2018).

Yapısal ağırlığın azaltılması, aynı zamanda depreme karşı direnci artırarak bu yapıların özellikle deprem riski yüksek bölgelerde cazip bir seçenek haline gelmesini sağlamaktadır. Hafif çelik yapılar, depreme dayanıklı olmaları nedeniyle bu yapılar özellikle riskli bölgelerde tercih edilir hale gelmiştir. Türkiye’de sanayi merkezlerinin neredeyse tamamının aktif deprem bölgelerinde yer alması ve nüfusun büyük çoğunluğunun deprem tehdidi altında bulunması, hafif çelik yapı sistemlerinin önemini daha da ön plana çıkarmaktadır. Hafif çelik profiller, yapısal ağırlıklarının düşük olması nedeniyle deprem riski yüksek bölgelerde tercih edilmekte ve uygun şekilde inşa edildiklerinde iyi performans göstermektedir (Karamanoğlu & Ulay, 2017).

Bu sistemler, özellikle deprem sonrası yeniden yapılanma süreçlerinde gösterdikleri başarılı performans sayesinde, farklı yapı türlerinde daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır.

1999 Gölçük, 2011 Van, 2020 Elâzığ ve 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra bu yapılar daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu yapılar depreme dayanıklılıkları, estetik özellikleri ve yüksek yalıtım değerleri ile ön plana çıkmış ve kullanım alanları genişlemiştir.

Bununla birlikte, hafif çelik yapılar doğru tasarlanmaması durumunda, bu avantajlar risk unsurlarına dönüşebilir ve ciddi hasarlar meydana gelebilir. Bu nedenle, hafif çelik yapıların depreme uygun tasarlanması kritik bir önem taşımaktadır.



Şekil 1. Hafif çelik yapı (URL-1)

1.2. Kompozit Yapılar

İnşaat sektörü, maliyetleri düşürmek ve yapısal verimliliği artırmak amacıyla kesit kapasitesini artırmaya yönelik çeşitli yenilikçi çözümler geliştirmektedir. Bu çözümlerden biri, farklı malzemelerin avantajlarını birleştirerek dezavantajlarını minimize etmektir. Bu yaklaşımın temelinde, iki veya daha fazla malzemenin bir arada çalışarak tek bir malzeme gibi davranmasını sağlamak yer almakta olup, bu süreç "kompozit etki" olarak tanımlanır. Kompozit yapılar, uzun yıllardır inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan bir yapı sistemidir ve özellikle 1920'li yıllardan itibaren çelik-beton kompozit yapılar (Şekil 2), dayanıklılık ve ekonomik faydaları nedeniyle tercih edilmeye başlanmıştır (Pavlović vd., 2013).



Şekil 2. Çelik beton kompozit döşeme uygulaması (URL-2)

Çelik-beton kompozit yapıların temel avantajları, malzeme ekonomisi, hızlı kurulum süresi, yüksek dayanıklılık ve uzun ömürlü performans olarak sıralanabilir. Zamanla, bu sistemlerin verimliliğini daha da artırmak ve yapısal ağırlığı azaltmak amacıyla sıcak haddelenmiş çelik yerine hafif çelik kullanımına yönelim artmıştır. Hafif çelik, sıcak haddelenmiş çeliğe kıyasla daha hafif ve ekonomik olmasıyla öne çıkar (Bamaga vd., 2019). Bu nedenle, hafif çelik-beton kompozit sistemler özellikle düşük katlı konutlar, ticari yapılar ve hafif sanayi binalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif çelik kesitlerin kompozit yapılarda kullanılması, malzeme tüketimini azaltarak sürdürülebilir yapıların inşasına olanak tanımakta ve inşaat sektörüne yeni bir soluk getirmektedir (Wehbe vd., 2013; Rahnavard vd., 2022).

Hafif çelik kirişler ile betonarme döşemelerden oluşan kompozit sistemler, yapıların yük taşıma kapasitesini artırarak rijitlik ve dayanım açısından önemli avantajlar sağlar. Betonun yüksek basınç dayanımı ile çeliğin çekme dayanımı bir araya geldiğinde, bu sistemlerin yapısal performansı iyileşir (Jianguo vd., 1999). Özellikle burkulma riski taşıyan hafif çelik sistemler için betonarme döşeme, çelik kesitlere yanal stabilite sağlayarak burkulma direncini artırır (Zeynalian vd., 2013; Xingyou vd., 2016). Hafif çelik profiller, burkulmaya karşı duyarlılık gösterdiğinden, betonarme döşeme ile oluşturulan bağlantı, bu sorunu önemli ölçüde azaltır ve yapısal bütünlüğü muhafaza eder.

Bu etkileşim sayesinde, çelik kesit burkulma riskine karşı korunurken, beton da basınç altında etkin bir şekilde görev yapar. Ancak, mevcut yönetmelikler, hafif çelik-beton

kompozit yapıların tasarımı konusunda yetersiz kalmaktadır (AISI, 2007). Bu eksiklik, kompozit yapıların daha verimli ve güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi için kapsamlı araştırmalara ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır.

1.3. Kayma Bağlantı Elemanı

Günümüz inşaat mühendisliğinde hafif çelik ve beton kombinasyonu, sağladığı yüksek dayanım ve düşük ağırlık avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Bu iki malzemenin birlikte verimli çalışabilmesi, kayma bağlantı elemanlarının doğru kullanımıyla mümkündür. Kayma bağlantı elemanları, kompozit yapılarda malzemeler arasındaki kayma kuvvetlerini aktaran mekanik elemanlardır (Hosseinpour vd., 2018). Yapıların bütünlüğünü ve güvenliğini sağlamada kritik bir rol oynayan bu elemanların performansı, yapıların uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır.

Yaygın olarak kullanılan bağlantılar arasında, sıcak haddelenmiş çelik-beton kompozit yapılar için uygun olan kesme çivileri bulunmaktadır (Şekil 3). Ancak, hafif çelik elemanlar kaynak işlemi sırasında geometrik deformasyon ve kalıcı gerilme oluşumuna eğilimlidirler (Hanaor, 2000). Bu nedenle, hafif çelik elemanları ve betonarme döşemenin birlikte tek bir yapı bileşeni olarak performans göstermesi için cıvatalı bağlantılar gibi alternatif bağlantı türleri tercih edilmelidir (Alhajri vd., 2016; Kyvelou vd., 2017).

Bununla birlikte, bağlantı elemanları doğru seçilmediğinde veya montaj sırasında hatalar yapıldığında, betonarme döşemede çatlaklar ve hafif çelik kirişte deformasyon gibi hasarlar meydana gelir (Hosseinpour vd., 2022). Bu hasarlar, kayma kuvvetlerinin yeterince etkin bir şekilde aktarılmaması ve bağlantı elemanlarının yerel gerilmelere karşı zayıf kalması durumunda daha belirgin hale gelir. Özellikle, betonarme döşemenin çevresinde lokal ezilme ve çatlaklar oluşabilirken, hafif çelik kirişlerde burkulma ya da kalıcı şekil değişiklikleri görülebilir. Bu tip hasarlar, yapıların performansını olumsuz etkileyerek uzun vadede dayanıklılığın azalmasına neden olabilir.

Bu nedenle, hafif çelik-beton kompozit sistemler için yeni kayma bağlantılarının geliştirilmesi gerekmektedir (Bezerra vd., 2018; Salih vd., 2019).



Şekil 3. Kesme çivisi (URL-3)

1.4. Konu ile İlgili Yapılmış Bazı Çalışmalar

Literatürde kayma bağlantı elemanları üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında, büyük çoğunluğunun bu elemanların dayanımını, rijitliğini ve sünekliğini belirlemeye yönelik olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda, bağlantı elemanlarının betonarme döşemede ve hafif çelik kirişte meydana getirdiği hasarlar da incelenmiştir. Geleneksel olarak kullanılan cıvatalı bağlantı elemanlarının çeşitli özellikleri değiştirilerek çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar referans alınarak farklı tasarımlarda yeni bağlantı elemanları geliştirilmiştir. Geliştirilen bu bağlantı elemanları, itme ve eğilme testleri ile deneysel olarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Bu bölümde, kayma bağlantı elemanlarını inceleyen çalışmalara yer verilmektedir.

Irwan ve arkadaşları (2009) tarafından yapılan çalışmada, hafif çelik ve beton birleşimlerinde kayma kuvvetini artırmayı amaçlayan yeni bir yöntem incelenmiştir. Bu yöntemde, üçgen biçimli bükülmüş çıkıntılar kullanılarak 68 numune üzerinde itme testleri uygulanmıştır. Deneylerde, beton dayanımının 25 MPa ile 60 MPa arasında, çelik kalınlıklarının ise 1.9 mm ile 2.4 mm arasında değiştiği farklı kombinasyonlar incelenmiştir. Ayrıca, 30°, 45° ve 60° açılı üçgen çıkıntılarla bu parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, üçgen bükümlü çıkıntılarının kullanıldığı birleşimlerin, yalnızca çelik ve beton arasındaki aderansa dayalı birleşimlere kıyasla %91 ila %135 oranında daha yüksek kayma kapasitesi sunduğunu göstermektedir. Kayma kapasitesinin, beton dayanımı ve çelik

kalınlığındaki artışa bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Özellikle 60° açılı üçgen çıkıntılarının, diğer açılara kıyasla daha yüksek taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, üçgen bükümlü çıkıntılarının kayma kuvveti aktarımını iyileştirerek birleşim elemanlarının dayanımını artıran etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4. Deney düzeneği ve deney sonu görüntüsü (Irwan vd., 2009)

Irwan ve arkadaşları (2011), hafif çelik kirişlerde kullanılan kendinden bükümlü üçgen bağlantı elemanlarının performansını incelemiştir. 15 kiriş numunesiyle yapılan dört nokta eğilme testlerinde, farklı kalınlıklardaki hafif çelik profilleri ve beton dayanımları kullanılmıştır. Sonuçlar, üçgen bağlantı elemanlarının kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek eğilme kapasitesi ve rijitlik sağladığını göstermiştir. Üçgen elemanlar %18, düz elemanlar %9,6 kapasite artışı sunmuştur. 2.4 mm kalınlığındaki profiller beton ezilmesine, 1.9 mm profiller ise ani kırılmaya neden olmuştur. 60° açılı ve büyük boyutlu üçgen elemanların daha yüksek performans sergilediği belirlenmiştir. Bu çalışma, üçgen bağlantı elemanlarının hafif çelik-beton kompozit kirişlerin performansını artırdığını ortaya koymuştur.

Bamaga ve arkadaşları (2019), hafif çelik ve beton kompozit kirişler için üç yeni kayma bağlantı elemanı geliştirmiş ve performanslarını incelemiştir. Çalışmada, Eurocode 4 standartlarına göre itme testleri yapılmış ve bağlantı elemanlarının dayanım kapasiteleri ile süneklikleri değerlendirilmiştir. Tek köşebent, çift köşebent ve sıcak haddelenmiş plaka kayma bağlantı elemanları test edilmiştir. Tek köşebentler yüksek süneklik gösterirken, çift köşebentler daha yüksek dayanım kapasitesine sahip olmuştur. Sıcak haddelenmiş plaka bağlantı elemanları ise hem yüksek dayanım kapasitesi hem de süneklik ile öne çıkmıştır. Sonuçlar, kayma bağlantı elemanlarının deformasyon kapasitelerinin ve betonun ezilmesinin dayanım kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Hosseinpour ve arkadaşları (2021), hafif çelik ve beton kompozit kirişlerde U şekilli kayma bağlantı elemanlarının performansını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, on adet tam ölçekli kiriş üzerinde itme testi yapılmış ve U şekilli kayma bağlantı elemanlarının nihai yük kapasitesi, süneklik ve rijitlikleri değerlendirilmiştir. Deneylerde, 4.8 mm ve 6.3 mm vida çapları ile 1 mm ve 2 mm kalınlığındaki hafif çelik kirişler kullanılmıştır. Sonuçlar, vida çapının artırılmasının yük kapasitesini artırdığını göstermiştir; 1 mm kalınlığındaki numunelerde yük kapasitesi %25, 2 mm kalınlığındaki numunelerde ise %40 oranında artmıştır. Ayrıca, enine yönlendirilmiş kayma bağlantı elemanları, boyuna yönlendirilmiş olanlara göre daha iyi performans göstermiştir. Çalışma, U şekilli kayma bağlantı elemanlarının hafif çelik ve beton kompozit kirişlerde etkili bir çözüm sunduğunu ve yapısal performansı artırdığını ortaya koymuştur.

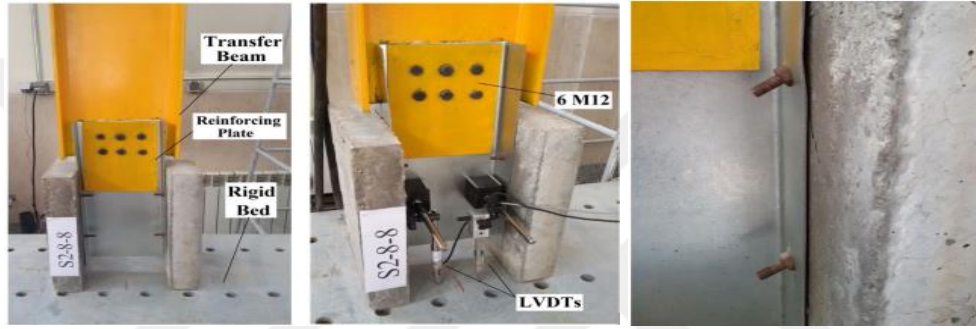


Şekil 5. Bağlantı elemanı detayı ve deney sonu görüntüsü (Hosseinpour vd., 2021)

Hosseinpour ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan bu araştırmada, kompozit hafif çelik kirişlerde cıvatalı kayma bağlantılarının davranışı incelenmiştir. Çalışmada, 15 numune üzerinde itme testi gerçekleştirilmiş ve kesit kalınlığı, cıvata boyutu ve dayanımı gibi üç ana parametre değerlendirilmiştir. Deneylerde 8 mm, 10 mm ve 12 mm çapında, 5.6 ve 8.8 sınıfı cıvatalar kullanılmıştır. 1 mm kalınlığındaki kesitlerde nihai yük, 6.2 ile 8.6 kN arasında, 2 mm kalınlığındaki kesitlerde ise 15.6 ile 26.8 kN arasında değişmiştir. 1 mm kesitlerde yaygın hasar şekilleri cıvata çevresinde ezilme ve başlık burkulması iken; 2 mm kesitlerde beton çatlamları gözlemlenmiştir. Cıvata çapları arttıkça kayma kapasitesi de artmıştır. Eurocode 4 değerlendirmesinde, cıvatalı kayma bağlantılarının yeterince sünek olduğu ve kompozit yapılar için uygun olabileceği belirlenmiştir.

Hosseinpour ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan bu çalışmada, kompozit hafif çelik kirişlerde cıvatalı kayma bağlantılarının sayısal davranışı incelenmiştir. Bu çalışma, yazarların daha önce deneysel olarak inceledikleri bağlantıların davranışını sayısal modellerle desteklemiştir. Hafif çelik kalınlığı, beton dayanımı, cıvata çapı ve cıvatanın

beton içindeki yüksekliği gibi parametrelerin etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, düşük kalınlıktaki kesitlerde en yaygın hasar şeklinin cıvata çevresinde ezilme olduğunu; kalın kesitlerde ise beton çatlamları ve kayma bağlantılarında hasar meydana geldiğini göstermiştir. Cıvata çapı arttıkça kayma kapasitesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, cıvatanın beton içindeki yüksekliğinin artması, kalın kesitli hafif çelik elemanlarda kayma bağlantılarının performansını artırmıştır. Sayısal modeller, deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir. Sonuç olarak, cıvatalı kayma bağlantılarının kompozit hafif çelik kirişlerde etkili bir alternatif olduğu ve Eurocode 4 kapsamında yeterince sünek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6. Deney düzeneği ve deney sonu görüntüsü (Hosseinpour vd., 2022)

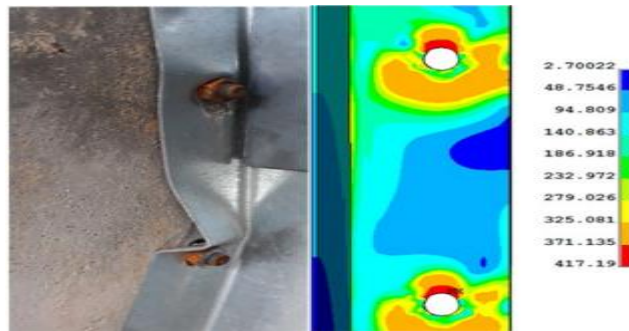
Rahnavard vd. (2023), hafif çelik ile düşük yoğunluklu beton kompozit kirişlerin yapısal davranışını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir. Bu çalışmada, dört tam ölçekli kiriş üzerinde eğilme testi yapılmış ve kirişlerin yük taşıma kapasitesi, deformasyon ve hasar modları analiz edilmiştir. Deneylerde Eurocode 4 ve AISC 360 standartları kullanılmıştır. Kirişler, kullanılan cıvata sayısı (20 veya 40) ve alt başlıkların ek bir kanal profili ile güçlendirilmiş olması açısından farklılık göstermiştir. Hem deneysel sonuçlar hem de sayısal modellemeler, daha fazla cıvataya ve ek kanal profiline sahip kirişlerin daha yüksek yük taşıma kapasitesine ve daha az deformasyona sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 7. Bağlantı elemanı detayı ve deney sonu görüntüsü (Rahnavard vd., 2023)

Divya ve arkadaşları (2023), hafif çelik ve beton kompozit kirişler için yenilikçi kayma bağlantı elemanlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Çalışmanın amacı, kaynak gerektirmeyen ve hafif çelik kesitler için uygun yüksek kapasiteli esnek kayma bağlantıları geliştirmektir. Eurocode 4'e göre yapılan itme testlerinde, yamuk, altıgen ve prefabrike bağlantı elemanlarının davranışları değerlendirilmiştir. Yamuk ve altıgen bağlantı elemanları akıllı vidalarla bağlanmışken, prefabrike elemanlar fabrikada önceden üretilmiş olup sahada ek montaj gerektirmemektedir. Bu bağlantı elemanlarının kayma kapasitesi, kayma modülü, başlangıç rijitliği, yük-kayma ilişkisi, süneklik ve enerji emme kapasitesi analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, prefabrike bağlantının en yüksek kayma kapasitesi ve enerji emme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Yamuk ve altıgen bağlantı elemanları ise daha düşük kapasitelere sahip olmasına rağmen belirgin süneklik göstermiştir. Çalışma, prefabrike kayma bağlantı elemanlarının hafif çelik-beton kompozit kirişlerin performansını artırmak için etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur.

Shakarami ve arkadaşları (2023) tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, kompozit kirişlerde önerilmeli cıvataların kayma bağlantı elemanı olarak kullanımı sayısal analizlerle incelenmiştir. Çalışmada, cıvata çapı, dayanımı, hafif çelik elemanların kalınlığı ve dayanımı ile cıvatanın ön gerilme kuvvetinin etkileri araştırılmıştır. Deneylerde 8 mm, 10 mm ve 12 mm çapında, 5.6 ve 8.8 sınıfı çelik cıvatalar kullanılmıştır. Hafif çelik elemanların kalınlıkları ise 1 mm ve 2 mm olarak belirlenmiştir. Bulgular, ince (1 mm) hafif çelik kesitlerinde en sık hasarın cıvata çevresinde ezilme, kalın (2 mm) kesitlerde ise beton çatlamları ve kayma bağlantılarında hasar olduğunu göstermiştir. Cıvata çapı arttıkça kayma kapasitesinin de arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, ön gerilme kuvvetinin artırılması, kayma bağlantılarının performansını önemli ölçüde geliştirmiştir.



Şekil 8. Analiz ve deney sonu görüntüsü (Shakarami vd., 2023)

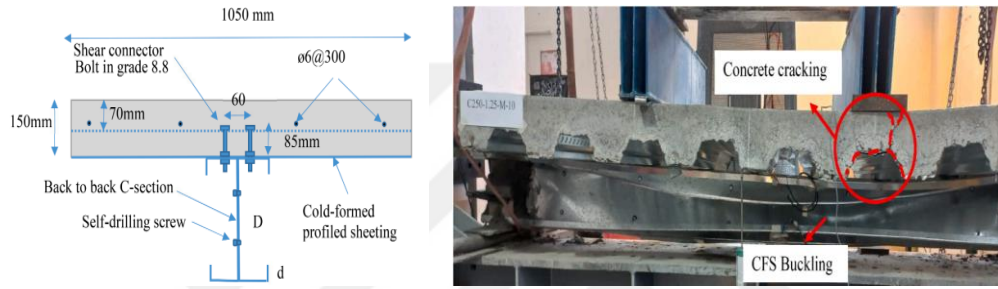
Ataei ve arkadaşları (2023) tarafından gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada, hafif çelik ve beton kompozit kirişlerde kullanılan yenilikçi cıvatalı kayma bağlantı elemanlarının yapısal performansı incelenmiştir. Çalışmada, 15 farklı numune üzerinde itme testleri gerçekleştirilmiştir. Cıvata çapı ve dayanımı (6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm; 8.8 ve 12.9 çelik sınıfları), hafif çelik kalınlığı (0.7 mm, 1.3 mm, 2 mm) ve cıvatanın beton içindeki yüksekliği gibi parametrelerin kayma kapasitesi ve süneklik üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, daha kalın hafif çelik kesitlerine sahip numunelerin üstün rijitlik, mukavemet ve süneklik gösterdiğini; daha ince kesitlerde ise deformasyon nedeniyle performans kaybı yaşandığını göstermiştir. Ayrıca, önerilen kompozit bağlantıların gerektiğinde kolayca sökülüp tekrar kullanılabileceği belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, 3D sonlu eleman modeli kullanılarak yapılan sayısal analizlerle uyumlu bulunmuştur. Bu çalışma, mevcut tasarım düzenlemelerinin (EC4, AISC ve AISI) yenilikçi cıvatalı kayma bağlantılarının nihai yük kapasitesini tahmin etmede yetersiz kaldığını ve daha doğru tahminler sağlayan basit formüller önerdiğini ortaya koymuştur.



Şekil 9. Deney düzeneği ve deney sonu görüntüsü (Ataei vd., 2023)

Karimipناه ve arkadaşları (2024), hafif çelik ve beton kompozit kirişlerde cıvatalı kayma bağlantı elemanlarının kullanıldığı yenilikçi ve sökülebilir bir sistemin performansını incelemiştir. Deneysel çalışmada, dört tam ölçekli kompozit kiriş numunesi kullanılmıştır. Numuneler, çelik kesit yüksekliği (180 mm ve 250 mm), çelik kalınlığı (1.25 mm ve 2.00 mm) ve kayma bağlantı çapı (10 mm ve 12 mm) parametreleriyle farklılaştırılmıştır. Sayısal çalışmada ise, betonun basınç dayanımı (20-40 MPa), betonarme döşeme kalınlığı (50-130 mm), çelik kesit yüksekliği ve kalitesi, çelik levha kalınlığı (0.70-1.50 mm) ve kayma bağlantı sayısı ve çapı (0-6 cıvata, 12 mm) incelenmiştir. Sonuçlar, betonun basınç

dayanımının 30 MPa'ya kadar artırılmasının nihai yük kapasitesini artırdığını; ancak bu değerden sonra etkisinin olmadığını göstermiştir. Betonarme döşeme kalınlığının artması, nihai yük kapasitesini %80 oranında artırmıştır. Daha yüksek ve kalın çelik kesitler, kirişlerin kapasitesini ve rijitliğini artırmıştır. Trapez sac kullanımı, kirişlerin eğilme davranışını %15 iyileştirmiştir. Kayma bağlantılarının sayısı ve çapı arttıkça, kayma bağlantılarının etkisi de artmıştır. Bu çalışma, trapez sacların inşaat süresini ve maliyetlerini azaltarak kirişlerin performansını artırabileceğini ve yeni kayma bağlantı elemanlarının etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.



Şekil 10. Bağlantı elemanı detayı ve deney sonu görüntüsü (Karimipanah vd., 2024)

1.5. Amaç ve Kapsam

Hafif çelik-beton kompozit kirişlerde kullanılan bağlantı elemanlarının deneysel davranışları üzerine bugüne kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, hafif çelik-beton kompozit kiriş sistemlerinin yapısal performansını artıracak yeni bir mekanik kayma bağlantısının geliştirilmesidir. Mekanik kayma bağlantıları, bu kompozit sistemlerin dayanımı, rijitliği, sünekliği ve kullanılabilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde mevcut bağlantı elemanları incelendiğinde, tamamının betonarme döşemeye gömülü olduğu görülmektedir. Bu durum, bağlantı elemanlarının betonarme döşeme içinde serbestçe şekil değiştirememesi, kirişte ve döşemede hasara yol açması ile sonuçlanmaktadır. Bu tezde ise, yeni tasarlanan bağlantı elemanının betonarme döşemeden kısmen izole edilmesi ile yük altında serbestçe eğilmesi ve bu sayede yüksek enerji sönümü sağlayarak, taşıma gücü sınır durumunda dahi kiriş ve döşemede meydana gelmesi beklenen hasarları engellemesi hedeflenmektedir.

Bu kapsamda yaygın olarak kullanılan cıvatalı bağlantı elemanı ile yeni tasarlanan kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanının performansı, itme ve eğilme testleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. İtme testleri için 5 adet hafif çelik-beton kompozit numune

hazırlanmıştır. Cıvatalı numunelerde 8, 10 ve 12 mm çapında cıvatalar kullanılmış, kısmen yalıtılmış bağlantı elemanlarının birinde bağlantı doğrudan uygulanmış, diğesinde ise betondan izole edilerek kapaklı bir sistem kullanılmıştır.

Eğilme testlerinde ise 3 adet tam ölçekli kiriş numunesi kullanılmıştır. Bir numune bağlantı elemanı içermeyen referans numunesi olarak seçilmiştir. Diğere numunelerden biri 12 mm çapında cıvatalı bağlantı elemanı ile, diğeri ise yalıtılmış plaka bağlantı elemanı ile üretilmiştir.

Bu testler sonucunda elde edilen veriler, cıvatalı ve kısmen yalıtılmış bağlantı elemanlarının yapısal performansları karşılaştırılmıştır. Yeni tasarlanan bağlantı elemanının hafif elik-beton kompozit kirişlerde dayanım ve etkinlik açısından performansı değerdendirilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

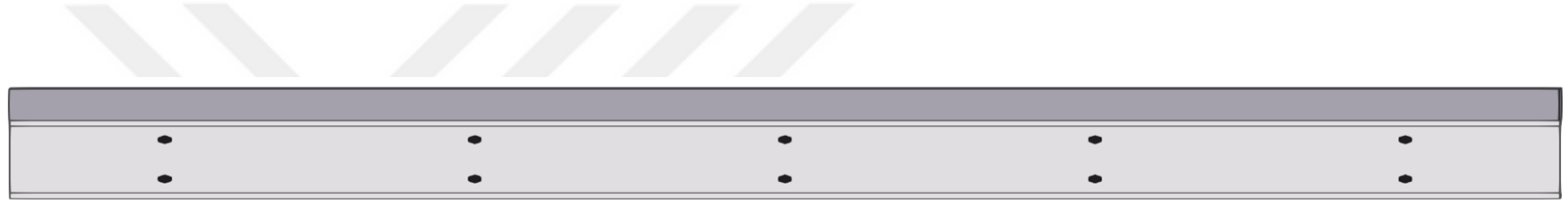
2.1. Kısmen İzole Edilmiş Kayma Bağlantı Elemanı

Bugüne kadar kompozit kirişlerde betonarme döşeme ve kiriş arasında yük aktarımını sağlamak için birçok kayma bağlantı elemanı geliştirilmiştir. Bu bağlantı elemanlarının tasarımında, uygulamayı kolaylaştırmaya ve/veya davranışı iyileştirmeye odaklanılmıştır. Bu çalışmalar incelendiğinde, farklı geometrik özelliklere sahip bağlantı elemanlarının tasarımının, hem bağlantı sünekliğini artırarak döşeme ve kirişteki hasarı azaltmak ve/veya geciktirmek hem de yük taşıma kapasitesini artırmak amacıyla yapıldığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmalarda her ne kadar farklı geometriye sahip bağlantı elemanları tasarlanmış olsa da bağlantı elemanı betonarme döşemeye gömülü olduğu için serbestçe şekil değiştirememekte ve kompozit döşeme sisteminin davranışında gözlemlenen farklılık tasarım aşamasında hedeflenen davranışı tam olarak yansıtamamaktadır. Bu nedenle, bağlantı elemanının hedeflenen davranışı sergileyebilmesi için betonarme döşemeden kısmen yalıtımı sağlanarak bağımsız olarak şekil değiştirebilmesi gerekmektedir.

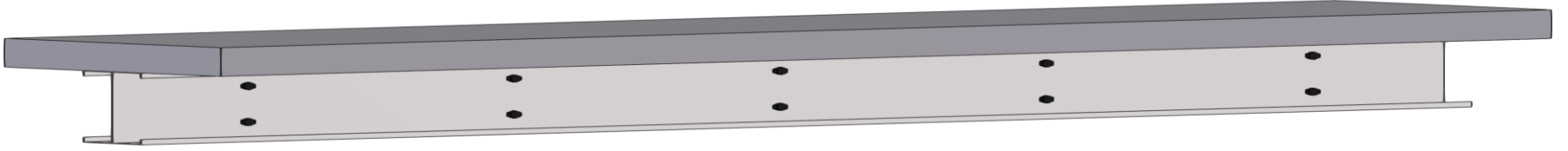
Bu tez kapsamında betonarme döşemeden kısmen yalıtılmış yeni bir kayma bağlantı elemanı tasarlanmıştır (Şekil 11 ve 12). Kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanı betonarme döşeme içinden kiriş alt başlığına kadar uzanan ve kiriş boyunca sürekli devam eden bir çelik plakadan meydana gelmektedir. Gövdelerinden birleştirilen C-enkesitli hafif çelik kirişlerin arasına monte edilen bu plakanın beton içinde kalan kısmı eğilme davranışı göstermek üzere, ızgara şeklinde tasarlanmıştır. Bu davranışın sağlanabilmesi için aralarında trapez boşluklar bulunan çelik şeritler iki yüzünden çelik saç arasına alınarak betonarme döşemeden izole edilmekte ve bu sayede beton dökümü esnasında çelik şeritler arasındaki trapez boşluklara beton girmesi engellenmektedir. Çelik şeritlerin hemen üstünde bırakılan deliklerden ise donatılar geçirilerek betonarme döşeme ile plakanın birleşimi sağlanmakta ve yük aktarımı gerçekleşmektedir. Eğilme momenti etkisinde kompozit sistemde meydana gelecek sehim, betonarme döşeme ve çelik kirişin birbirine göre bağıl hareket yapmasına neden olur. Bu bağıl hareket sırasında ara yüzeyde oluşan kayma kuvvetleri, betondan yalıtılmış çelik şeritlerin eğilerek sünek davranış göstermesini sağlayacaktır. Ayrıca, bağlantı elemanının hafif çelik kirişin gövdesine birleştirilmiş olması

sayesinde, literatürdeki bağlantı elemanlarının aksine, ara yüzeydeki kayma kuvveti hafif çelik kirişin gövdesine aktarılabilecektir.

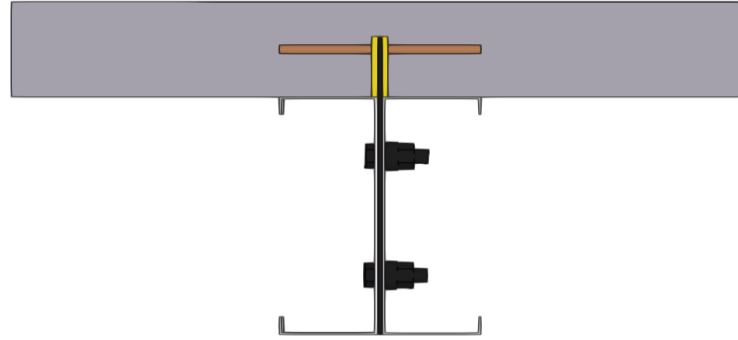




Ön Görünüş

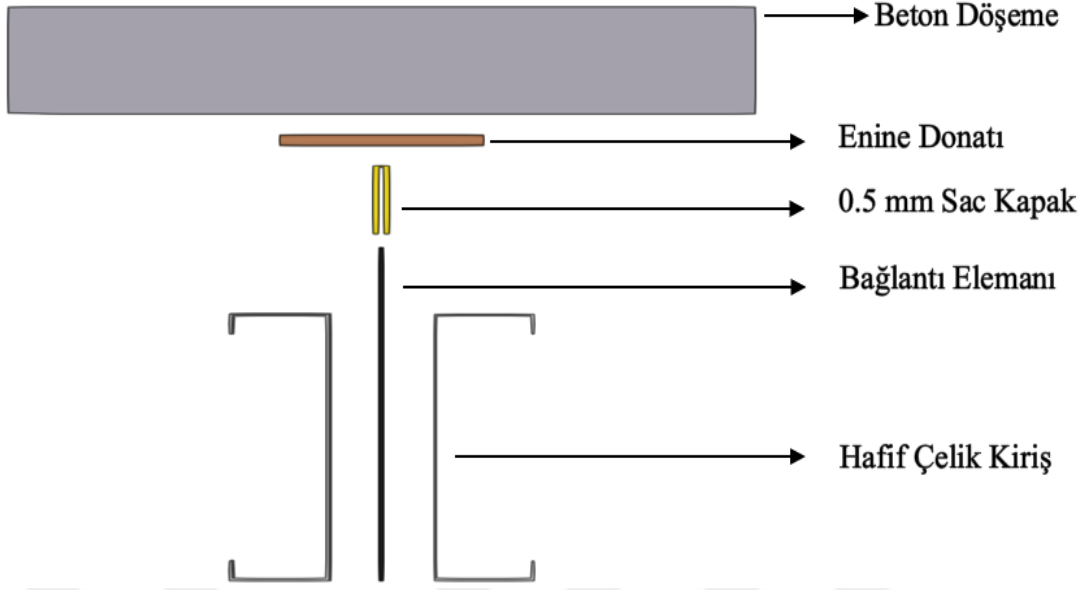


İzometrik görünüş



Yan görünüş

Şekil 11. Kompozit kirişte yeni bağlantı elemanı



Şekil 12. Yeni bağlantı elemanı birleşim detayı

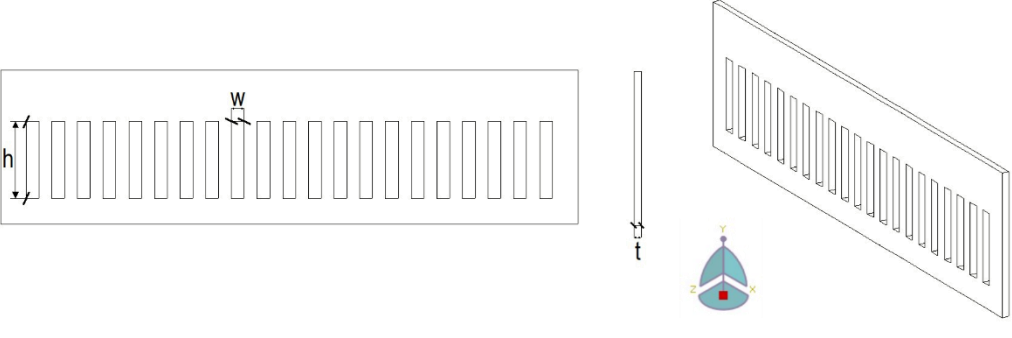
2.2. Ön Sayısal Çalışmalar

Kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanını oluşturan çelik şeritlerin eğilme etkisinde sünek davranış göstermesi hedeflenmektedir. Bu nedenle çelik şerit boyutlarının ön çalışmalarla belirlenmesi ve erken göçmenin engellenerek sünek davranışın sağlanması gerekmektedir. Bu bölümde, çelik şerit boyutlarının belirlenmesi için gerçekleştirilen ön sayısal çalışmalar anlatılmaktadır.

2.2.1. Sonlu Eleman Modellerinin Oluşturulması ve Analiz

Betonarme döşeme içinde kalacak çelik şeritlerin yükseklik ve genişlikleri davranışlarını etkileyen en önemli iki parametredir. Döşeme kalınlığının sınırlı olması sebebiyle şerit yüksekliği 30 mm sabit alınarak 5, 7 ve 10 mm'lik şerit genişliklerine sahip 3 adet kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanı Abaqus sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiş ve çelik şerit yüksekliği boyunca birim şekildeğiştirme değişimleri incelenmiştir. Sonlu eleman modellemesi yapılan kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanlarının özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

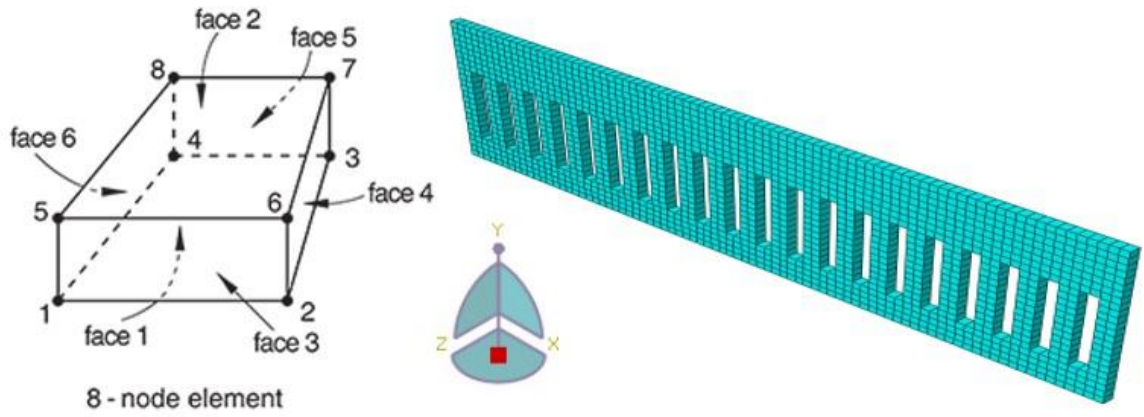
Tablo 1. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan kayma bağlantı elemanlarının boyutları



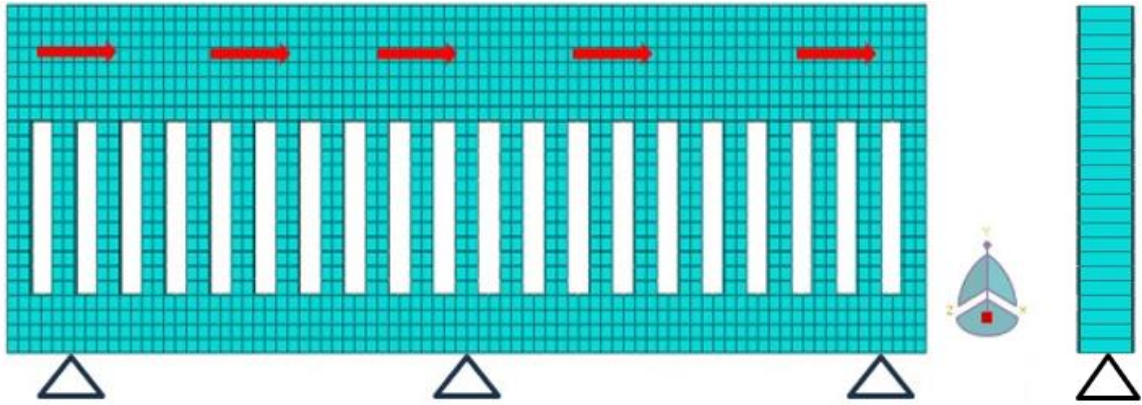
Sayısal model	Çelik Şerit (mm)		
	Net yükseklik, (h)	Genişlik, (w)	Et kalınlığı, (t)
G5	30	5	3
G7		7	
G10		10	

Kayma bağlantı elemanlarının modellenmesinde program bünyesinde bulunan C3D8R solid eleman tipi kullanılmıştır. Bu eleman tipi büyük yerdeğiştirme ve elastik olmayan şekildeğiştirme yapması beklenen cisimlerin modellenmesinde kullanılan sekiz düğüm noktalı katı elemandır (Şekil 13). Malzeme modeli olarak çeliğin pekleşme özelliğini de dikkate alan isotropic hardening modeli kullanılmıştır. Elastisite modülü 200 GPa, akma dayanımı 235 MPa ve poisson oranı 0.3 olarak dikkate alınmıştır.

Analiz sonuçlarını etkileyecek bir diğer önemli husus ise sınır şartlarıdır. Deneysel davranışı simüle etmek üzere, bağlantı elemanı alt yüzeyinin yerdeğiştirmesi her üç doğrultuda da engellenmiştir. Bağlantı elemanı üst bölgesinde ise, enine donatıların geçeceği deliklerin merkezinden geçen doğru parçası üzerinde bulunan düğüm noktaları seçilmiş ve bu noktalardan yatay yönde (x) yükleme yapılmıştır. Yükleme yapılan düğüm noktalarının “z” ekseninde dönmesi serbest bırakılmış, düzlem dışı hareketi ise engellenmiştir (Şekil 14). Analizlerde kullanılan modellere ait görseller Şekil 15’te verilmiştir.

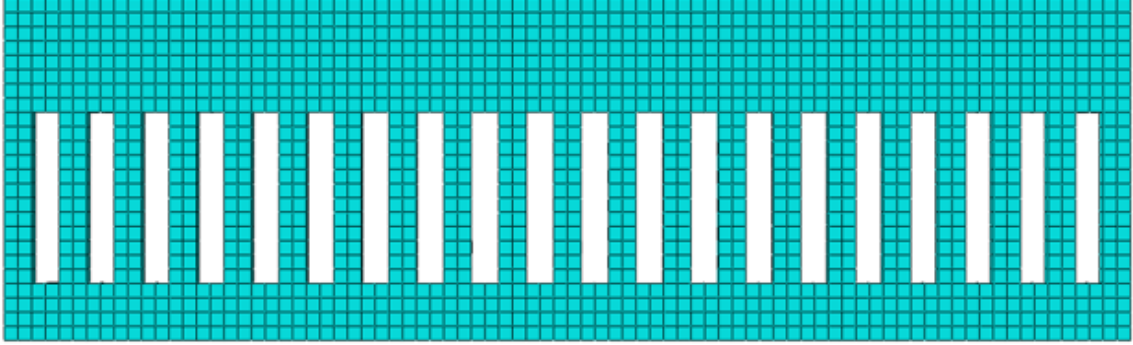


Şekil 13. C3D8R solid elemanı ile modellenmiş bir kayma bağlantı elemanı

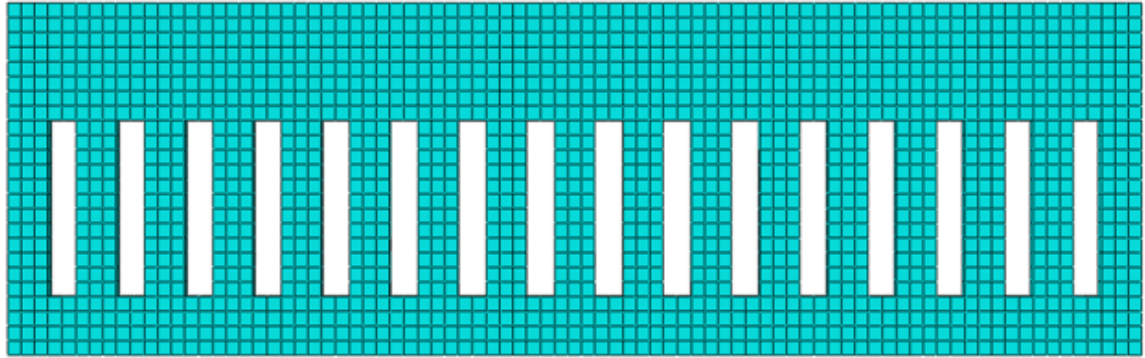


Şekil 14. Sonlu eleman analizlerinde kabul edilen sınır şartları

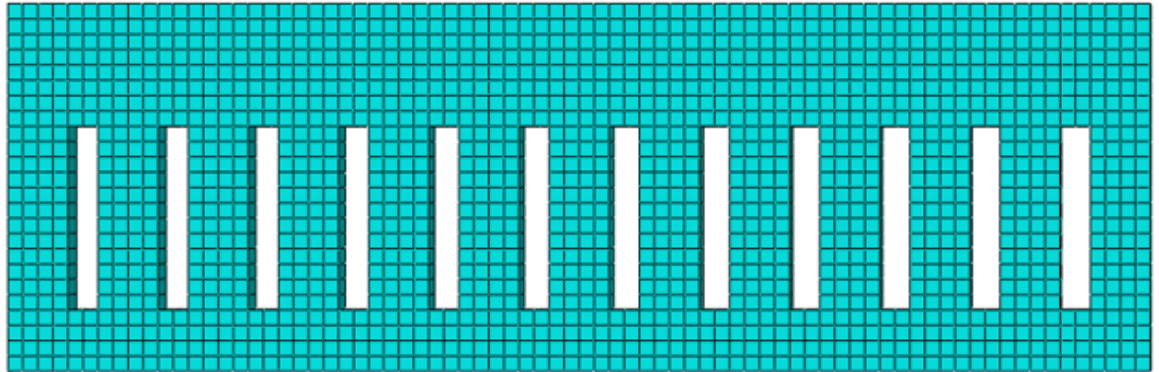
5 mm



7 mm



10 mm

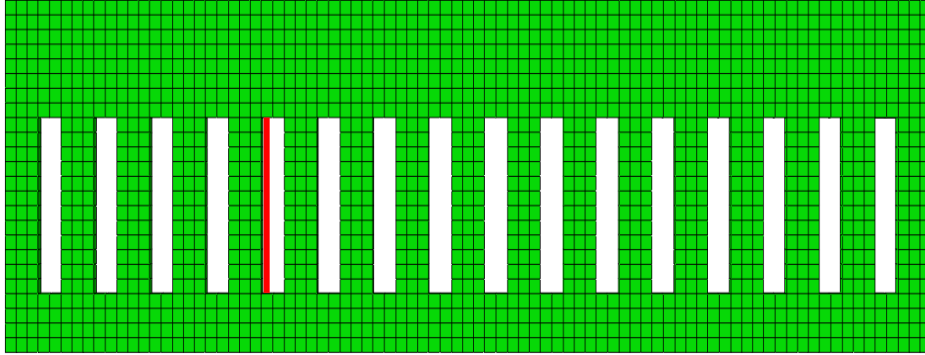


Şekil 15. G5, G7 ve G10 isimli sayısal modeller

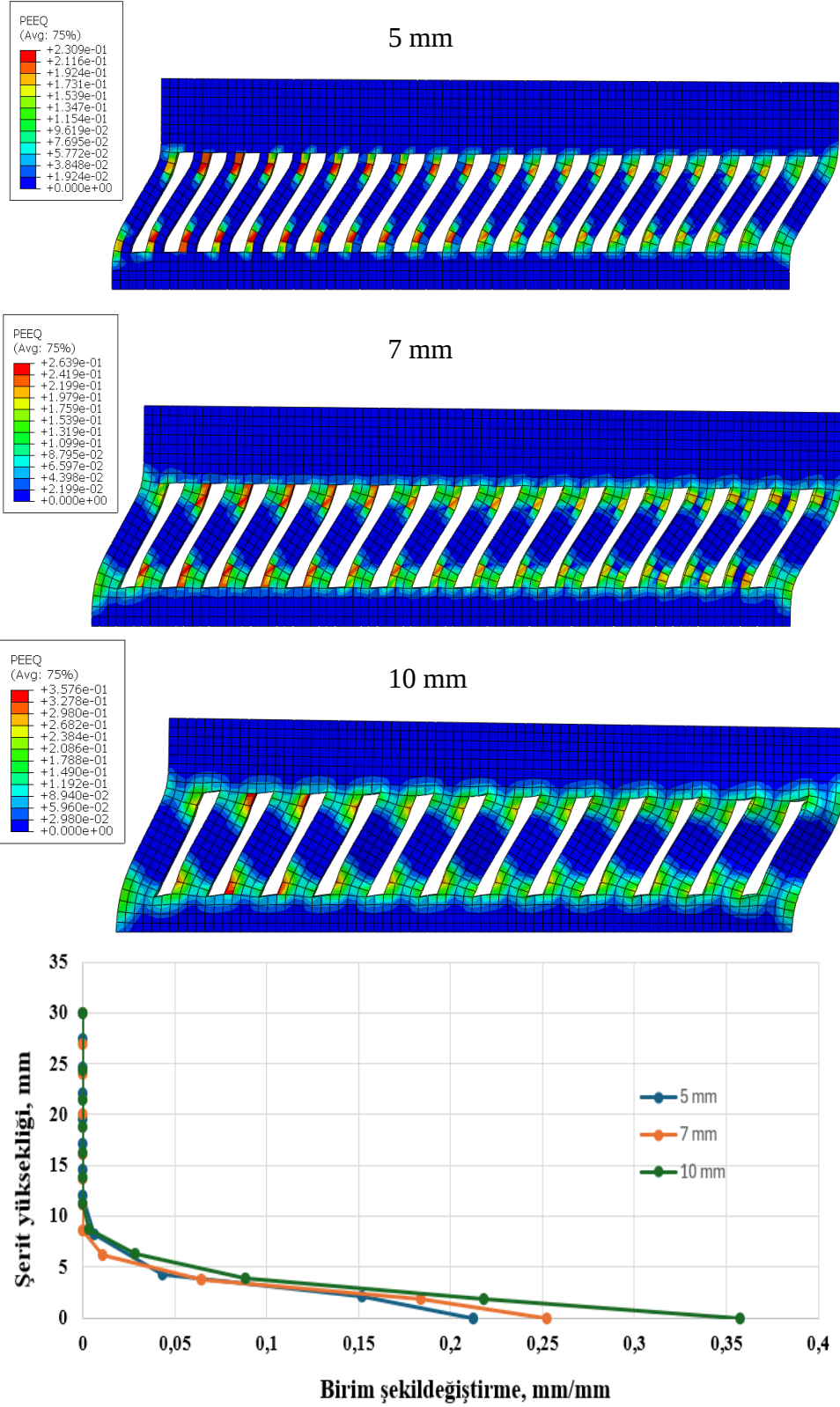
Oluşturulan sonlu eleman modelleri üzerinde yerdeğiştirme kontrollü statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Program analizlerde, Newton-Raphson yöntemini kullanmakta ve uygulanan yükü yakınsama sağlanana kadar alt adımlara bölerek toplam hesap yapmaktadır.

2.2.2. Analiz Sonuçları

Sonlu eleman analizlerinde her bir modele Şekil 14'te gösterildiği noktalardan y doğrultusunda toplam 15 mm'lik yatay yerdeğiştirme uygulanmıştır. Analiz sonucunda her bir model için Şekil 16'da gösterilen çelik şeridin yüksekliği boyunca meydana gelen birim şekildeğiştirme değişimleri elde edilmiş ve Şekil 17'de gösterilmiştir. Buna 15 mm'lik yatay yerdeğiştirme neticesinde G5, G7 ve G10 modellerindeki çelik şeritlerin alt uçlarındaki maksimum birim uzama sırasıyla 0.19, 0.24 ve 0.35'tir. Bu sonuçlardan şerit genişliğinin 7 veya 10 mm olması durumunda şerit alt uçlarının küçük yerdeğiştirme değerlerinde dahi kopma birim uzamasına ulaşacakları ve dolayısıyla, bağlantı elemanının yerdeğiştirme sünekliliğini artırmak için, deneylerde 5 mm genişliğinde çelik şeritlerin kullanılmasının uygun olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 16. Birim şekildeğiştirme değişimi incelenen çelik şerit yüksekliği



Şekil 17. 15 mm'lik yatay yerdegıştırme neticesinde çelik şerit yüksekliği boyunca meydana gelen birim şekildegıştırme

2.3. Deneysel Çalışmalar

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, geliştirilen kayma bağlantı elemanlarının performansları yalnızca statik itme deneyler ile belirlenmiştir. Bu tez kapsamında ise, kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanının deneysel performansı tam ölçekli numuneler üzerinde gerçekleştirilen iki aşamalı testler ile belirlenmiştir. Birinci aşamada, farklı bağlantı elemanlarına sahip hafif çelik kiriş ve betonarme döşeme parçasından oluşan numuneler üzerinde statik itme deneyleri gerçekleştirilerek bağlantı elemanlarının kayma yükü – yerdeğiştirme ilişkileri elde edilmiş ve hasar durumları incelenmiştir. İkinci aşamada ise 4.5 m uzunluğundaki kompozit kirişler üzerinde dört noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilerek bağlantı elemanlarının kompozit sistemin eğilme davranışına etkileri araştırılmıştır. Böylelikle, geliştirilen bağlantı elemanının performansı hem eleman bazında hem de sistem bazında bütüncül olarak değerlendirilebilmiştir. Her iki aşamada da kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanının performansı uygulamada yaygın olarak kullanılan cıvatalı kayma bağlantı elemanları ile karşılaştırılmıştır.

2.3.1. Birinci Aşama Deneysel Çalışmalar

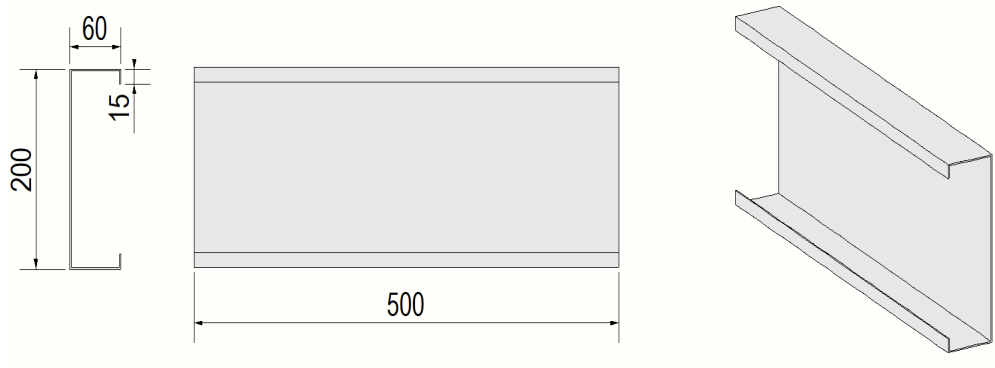
- İtme Deney Elemanları ve Özellikleri

Statik itme deneyleri kapsamında 5 adet deney elemanı tasarlanmış olup özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu deney elemanlarından 3 tanesi farklı çaplarda cıvatalı kayma bağlantı elemanlarına, 2 tanesi ise bu tez kapsamında önerilen kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanına sahiptir. Cıvatalı kayma bağlantı elemanı kompozit kirişlerde yaygın olarak kullanılan bir bağlantı türü olup bu çalışmada referans deney elemanı olarak dikkate alınmıştır.

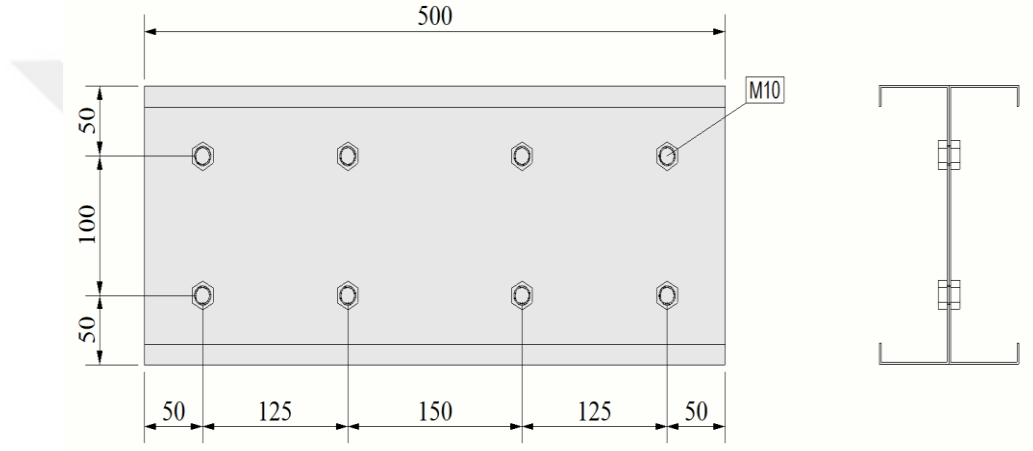
Tablo 2. İtme Deney Elemanlarının Özellikleri

Deney Elemanı	Bağlantı Türü	Bağlantı Elemanı Boyutları (mm)			C-Enkesitli Hafif Çelik Kiriş Boyutları (mm)				Betonarme Döşeme Boyutları (mm)		
		Çap	Kalınlık	Serbest Boy	Başlık Genişliği	Gövde Yüksekliği	Kenar Berkitme Boyu	Et Kalınlığı	Genişlik	Uzunluk	Kalınlık
PO-B-8	Cıvata	M8	-	60	60	200	15	1.5	450	500	80
PO-B-10		M10									
PO-B-12		M12									
PO-PL-ISO	Kısmen İzole Plaka	-	3	30							
PO-PL	Gömülü Plaka										

Eurocode 4 bölüm B.2.2'ye göre tasarlanan itme deney elemanları hafif çelik kiriş, betonarme döşeme ve bağlantı elemanından meydana gelen kompozit kiriş parçalarıdır. Hafif çelik kiriş olarak, gövdelerinden birleştirilmiş 2 adet 500 mm uzunluğunda C200-1.5-15-60 profili kullanılmış olup enkesit özellikleri TBDY-2018 Bölüm 10' a göre belirlenmiştir (Şekil 18). Şekil 19'da gösterildiği gibi hafif çelik profiller M10 cıvatalar ile gövdelerinden birleştirilmiş ve her iki doğrultuda simetrik bir kiriş enkesiti elde edilmiştir. Bu cıvatalar arasındaki mesafeler AISI S100 ve EN 1993-1-3 yönetmeliklerinde belirtilen koşullara uygundur.

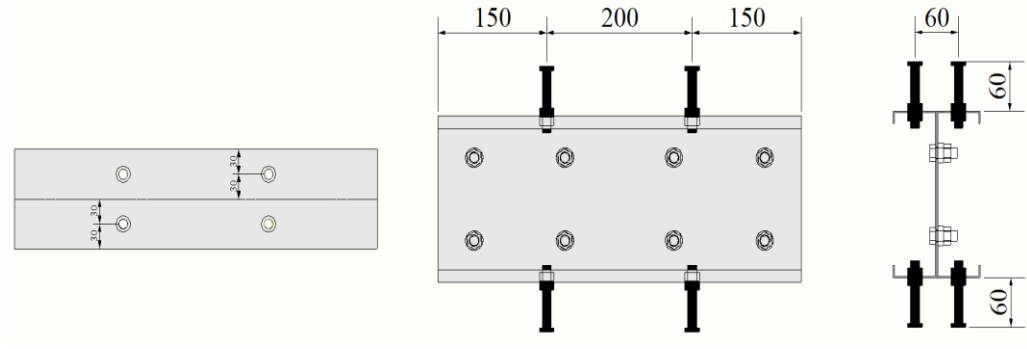


Şekil 18. Hafif çelik kiriş boyutları (C200-1.5-15-60)

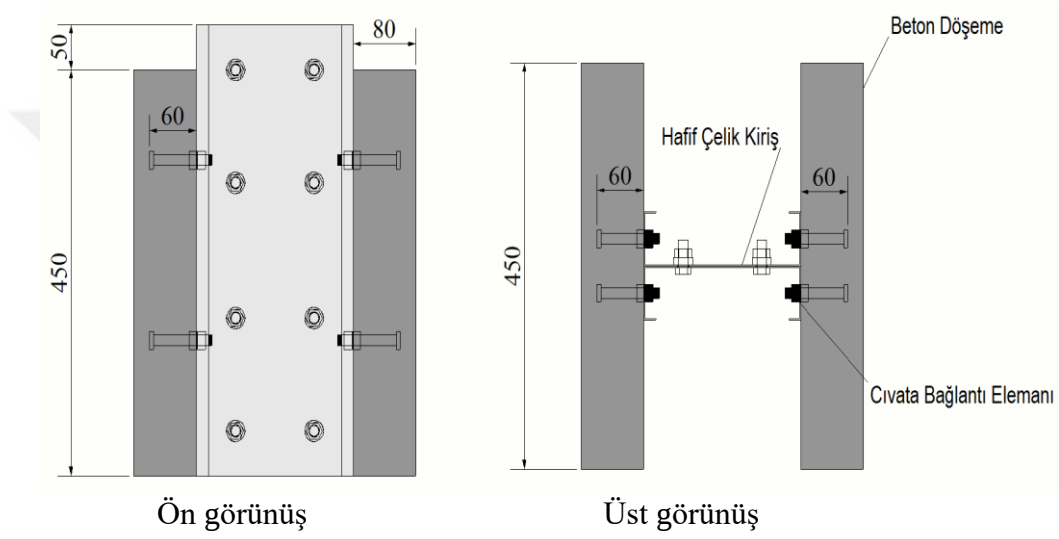


Şekil 19. PO-B deney elemanlarında kiriş bağlantı detayı

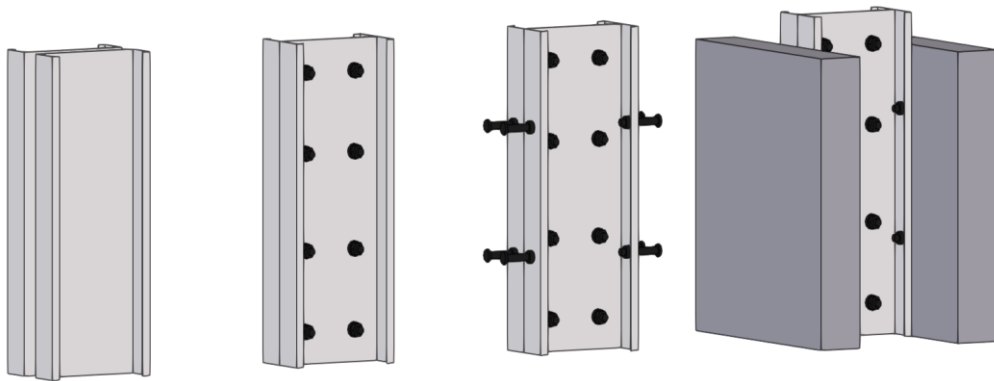
PO-B-8, PO-B-10 ve PO-B-12 isimli deney elemanlarında kayma bağlantı elemanı olarak sırasıyla M8, M10 ve M12 cıvatalar kullanılmıştır. Kiriş parçasının boyuna eksenine doğrultusunda yerleştirilen cıvatalı bağlantı elemanlarının merkezleri arasındaki mesafe 200 mm olup AISC 360-16 yönetmeliğinde tanımlanan minimum (cıvata çapının 6 katı) ve maksimum (914 mm) aralık koşuluna uygundur. Kiriş başlıklarına çift sıra yerleştirilen cıvataların merkezleri arasındaki mesafe 60 mm'dir. Bu mesafe AISC 360-16'da belirtilen "cıvata çapının en az 4 katı" koşulunu sağlamaktadır. AISC 360-16 yönetmeliğine göre, cıvata boyu en az cıvata çapının 4 katı olmalıdır. Buna göre PO-B elemanlarındaki bağlantı elemanlarının boyu kiriş üst başlığından itibaren 60 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 20). İtme deney elemanlarında, hafif çelik kirişin her iki başlığında 80 mm kalınlığında betonarme döşeme mevcuttur (Şekil 21). Böylece, cıvatalı kayma bağlantı elemanı üzerinde 20 mm beton örtüsü bırakılmıştır (AISC 360-16, 2016). Şekil 22'de PO-B deney elemanlarının imalat aşamaları verilmiştir.



Şekil 20. PO-B deney elemanlarında cıvatalı kayma bağlantı elemanı- kiriş birleşim detayı



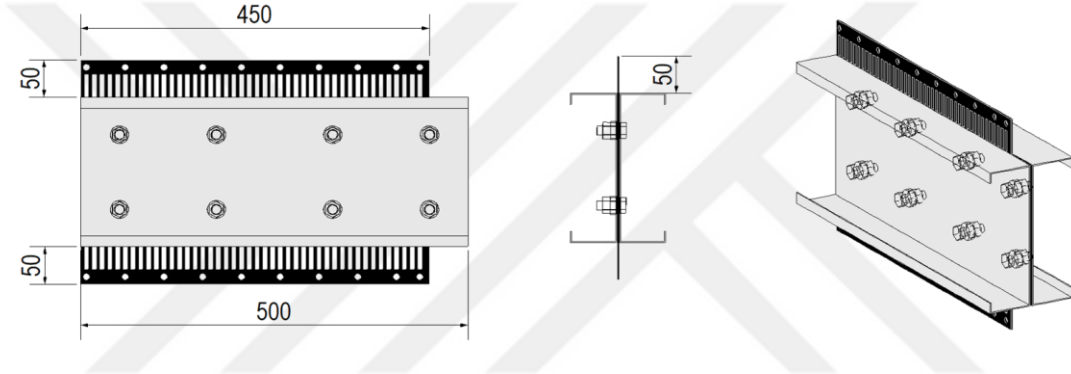
Şekil 21. Döşeme birleşimi tamamlanmış PO-B deney elemanlarının şematik görünümü



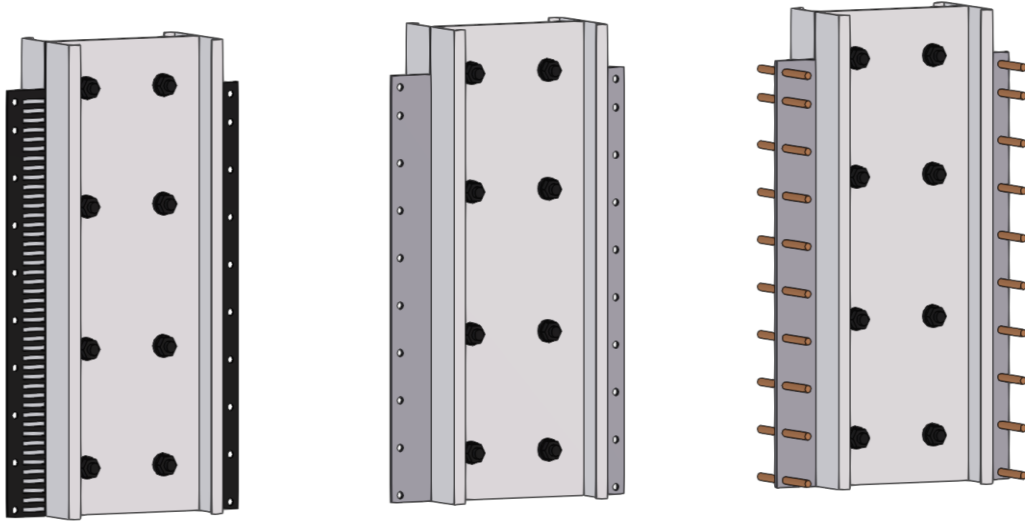
Şekil 22. PO-B deney elemanlarının imalat aşamaları

PO-PL-ISO deney elemanı, çalışma kapsamında tasarlanan kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanını temsil etmektedir. 3 mm kalınlığındaki bağlantı elemanı, C enkesitli hafif çelik profillerin arasına yerleştirilmiş ve M10 cıvatalarla birleşim sağlanmıştır. Bağlantı

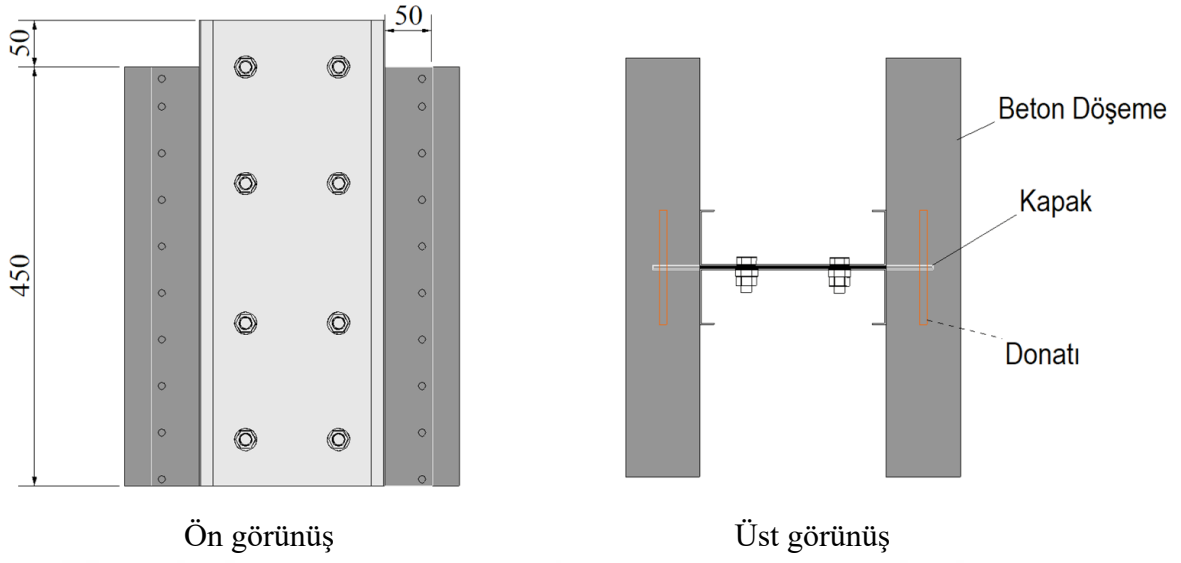
elemanının genişliği, betonarme döşeme ile birleşimi sağlamak üzere, C kesitli profilin alt ve üst başlığından 50 mm dışarı çıkacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 23). Betonarme döşemenin içinde kalacak 50 mm uzunluğundaki plaka parçası 0.5 mm kalınlığında ve U şeklindeki çelik sac içine alınarak betonarme döşemeden kısmen yalıtılmıştır. Böylelikle beton dökümü esnasında çelik şeritlerin arasındaki trapez boşluklara beton girmesi engellenmiştir. Kayma kuvvetlerinin betonarme döşemeden bağlantı elemanına aktarılabilmesi için ise bağlantı elemanı serbest uçlarında 50 mm ara ile bırakılan 9 mm çapındaki deliklerden donatılar geçirilerek betonarme döşeme ile birleşim sağlanmıştır (Şekil 24 ve 25). Şekil 26’da PO-PL-ISO deney elemanının imalat aşamaları verilmiştir.



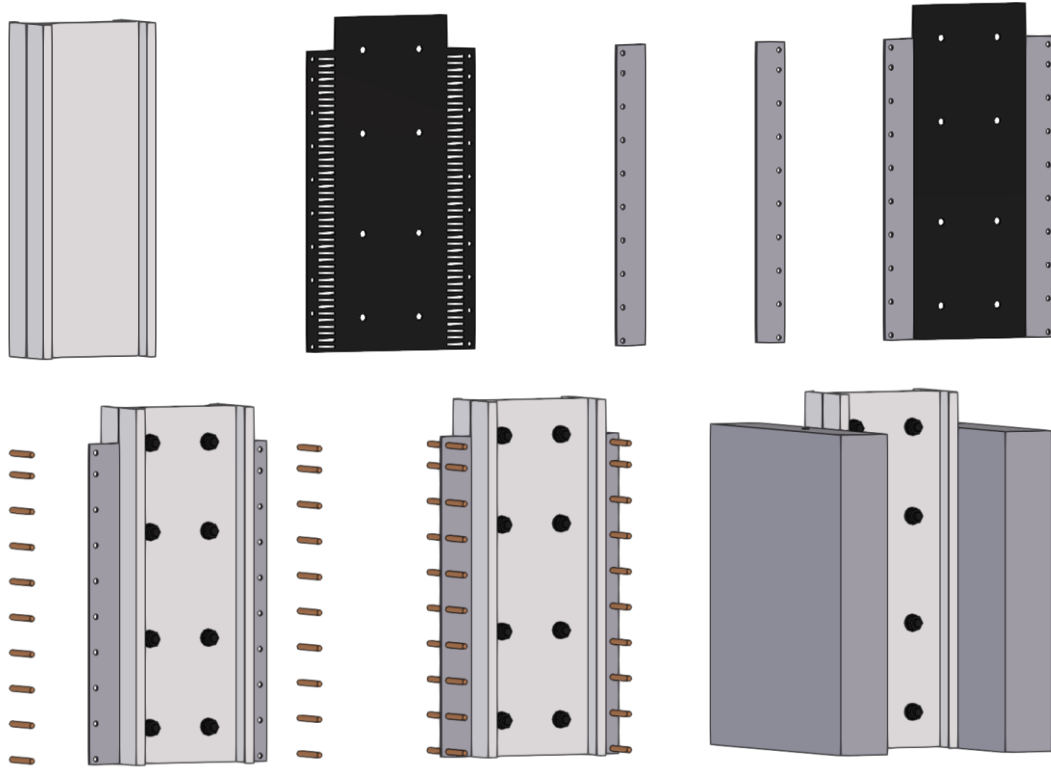
Şekil 23. PO-PL-ISO deney elemanlarında kiriş ve plaka bağlantı detayı



Şekil 24. PO-PL-ISO deney elemanının betondan kısmen izole edilmesi ve donatılar vasıtası ile yük aktarımının sağlanması



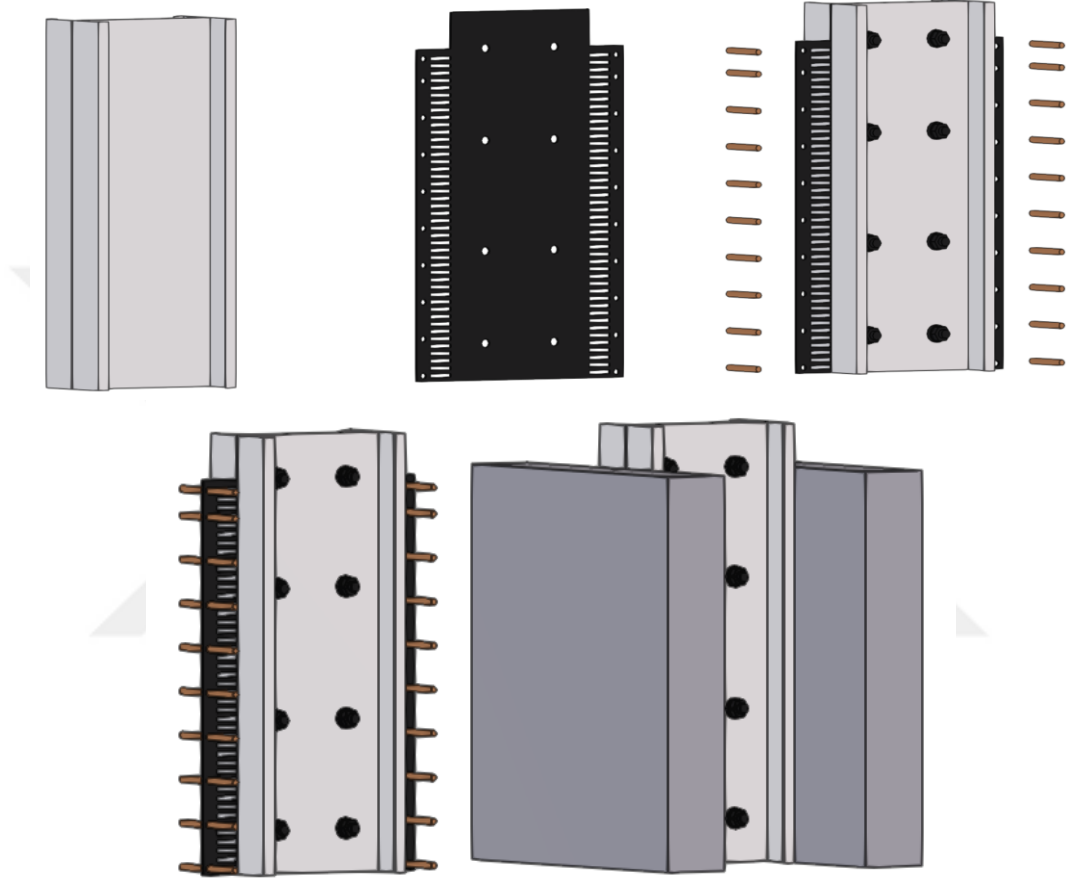
Şekil 25. Döşeme birleşimi tamamlanmış PO-PL-ISO deney elemanlarının şematik görünümü



Şekil 26. PO-PL-ISO deney elemanı imalat aşamaları

PO-PL deney elemanında, PO-PL-ISO deney elemanından farklı olarak, kayma kuvvetini aktaracak 50 mm uzunluğundaki bağlantı plakası parçası betonarme döşemeden

izole edilmemiştir. Diğer bir ifadeyle, kayma kuvvetine direnecek çelik şeritler betonarme döşemeye tam gömülüdür. PO-PL ve PO-PL-ISO deney elemanlarının sonuçları karşılaştırılarak yapılan kısmi izolasyonun etkisi belirlenecektir. Şekil 27’de PO-PL deney elemanının imalat aşamaları verilmiştir.



Şekil 27. PO-PL deney elemanı birleşim aşamaları

- İtme Deney Elemanlarının Üretimi

İtme deney elemanlarının üretim aşamaları, deneysel çalışmalarda istenilen performans kriterlerini karşılamak amacıyla dikkatle uygulanmıştır. Üretim süreci, kullanılan malzemelerin özelliklerine ve belirlenen boyutlara uygun olarak belirli adımlarla gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalar, hafif çelik kirişlerin hazırlanmasından beton dökümüne kadar sistematik bir şekilde uygulanmıştır.

İlk aşamada, 1.5 mm kalınlığındaki çelik sac, 500 mm uzunluğunda kesilerek sac işleme makinesinde bükülüp C200-1.5-15-60 kesitli hafif çelik profiller imal edilmiştir.

(Şekil 28). C enkesitli hafif çelik profillerin gövdelerine, M10 cıvata çapına uygun delikler açılmış ve bu profiller gövdelerinden sırt sırta birleştirilerek kirişler elde edilmiştir (Şekil 29).



Şekil 28. 1.5 mm sacların bükülüp C enkesitli profil haline getirilmesi



Şekil 29. C kesitli hafif çelik profillerin birleşimi

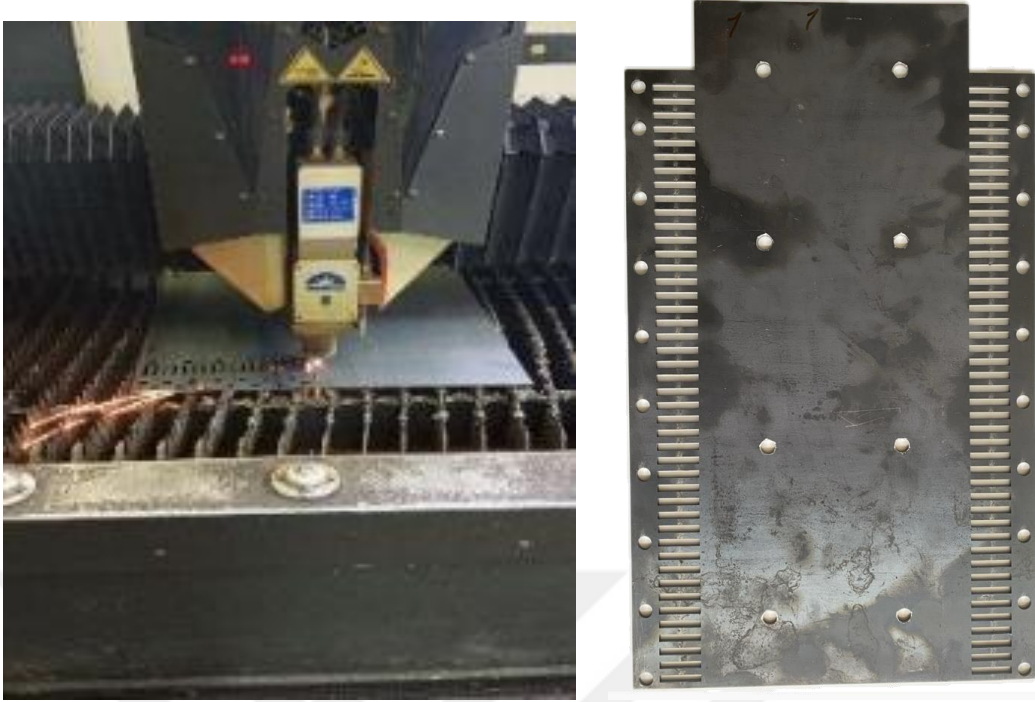
Cıvatalı kayma bağlantı elemanlarının montajı için hafif çelik kirişlerin başlıklarında delikler açılmıştır. Delik çapı, kayma bağlantı elemanı olarak kullanılacak M8, M10 ve M12 cıvataların boyutlarına göre ayarlanmıştır. Cıvataların kiriş başlıklarına montajı tamamlanarak PO-B elemanları beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (Şekil 30).

PO-PL ve PO-PL-ISO elemanlarının plaka bağlantı elemanları 3 mm et kalınlığındaki çelik levhalardan lazer kesim yöntemi ile üretilmiştir (Şekil 31). Daha sonra bu bağlantı elemanları C enkesitli profillerin arasına alınmış ve gövdelerindeki montaj deliklerinden geçirilen M10 cıvatalar ile birleşim tamamlanmıştır. Son olarak bağlantı plakası serbest

uçlarında bırakılan montaj deliklerinde Ø8 çapında enine donatılar geçirilerek PO-PL deney elemanı beton dökümüne hazır hale gelmiştir (Şekil32). PO-PL-ISO elemanında, PO-PL elemanından farklı olarak, elik şeritler arasındaki trapez boşluklara beton girmesini engellemek amacıyla 0.5 mm kalınlığında sacdan U şeklinde bir kapak üretilmiştir. Bu kapak, plakanın boyutlarına uygun olarak kesilmiş ve lazer kesim yöntemi ile üzerinde donatının geçebileceği delikler açılmıştır (Şekil 33). Daha sonra kayma bağlantı elemanındaki elik şeritler U şekilli sac kapak ile yalıtımı yapılmış ve beton dōşeme ile birleşimini sağlamak üzere Ø8 mm çapında enine donatılar yerlerine yerleştirilerek PO-PL-ISO elemanı beton dökümüne hazır hale gelmiştir (Şekil 34).



Şekil 30. Cıvatalı kayma bağlantı elemanının kiriş başlığına montajı



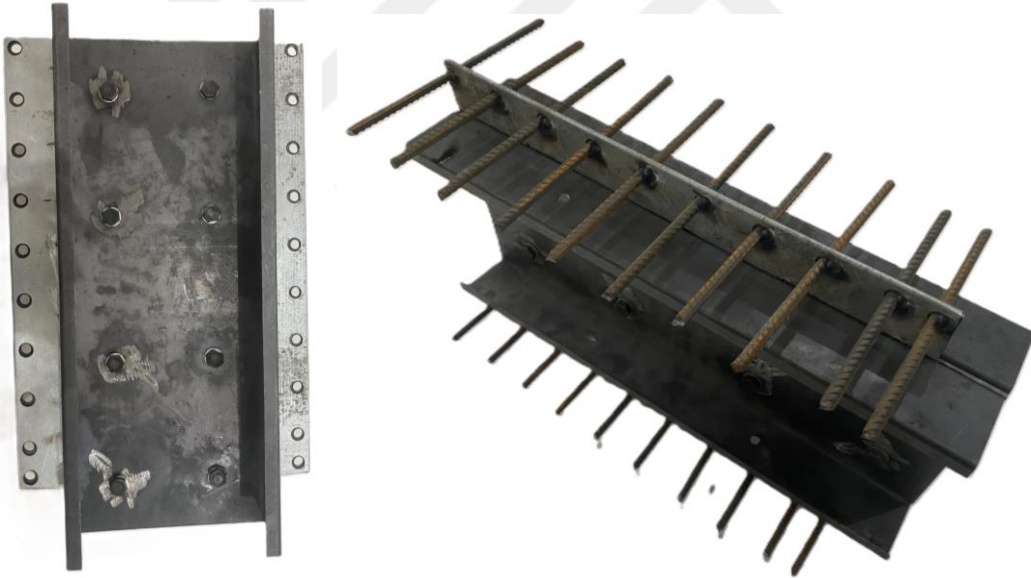
Şekil 31. Plaka bağlantı elemanı



Şekil 32. Beton dökümüne hazır hale getirilmiş PO-PL elemanı



Şekil 33. U şekilli 0.5 mm kalınlığında sac kapak

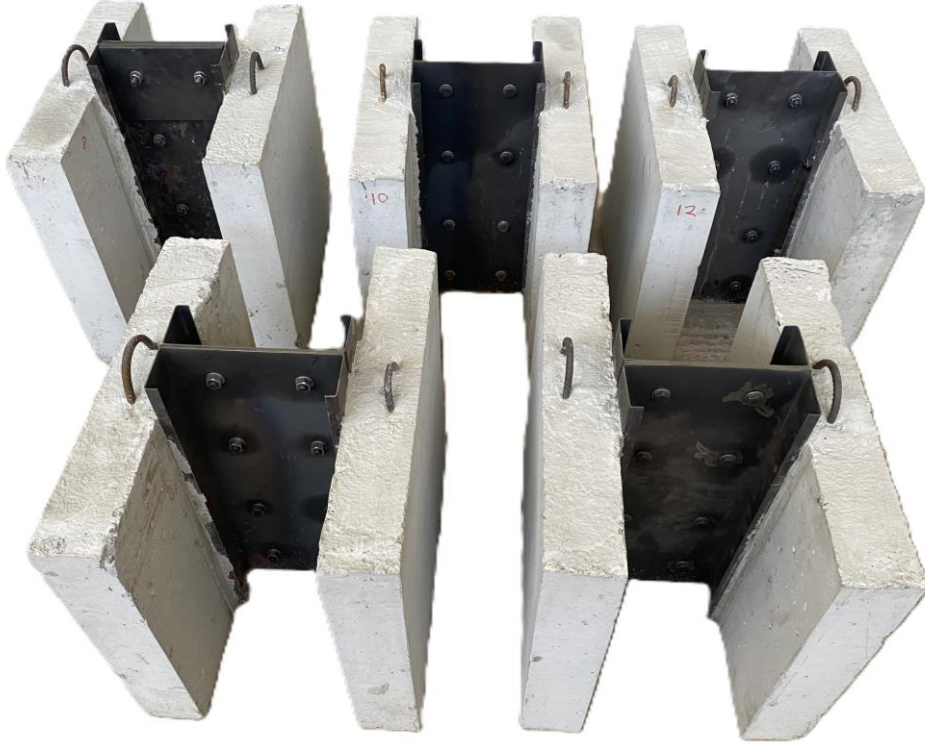


Şekil 34. Beton dökümüne hazır hale getirilmiş PO-PL-ISO elemanı

Beton dökümüne hazır hale gelen itme deney elemanları hazırlanan kalıplara yerleştirilmiştir. Döşeme donatısı olarak her iki yönde 150 mm aralık ile Ø8 mm çapında donatı kullanılmıştır. Beton döküm işleminden önce betonun kalıba yapışmasını engellemek için kalıp iç yüzeyleri yağlanmıştır ve akabinde beton döküm işlemi tamamlanmıştır (Şekil 35). Üretimi tamamlanan itme deney elemanları Şekil 36’da verilmiştir.



Şekil 35. Kalıbın hazırlanması ve beton dökümü

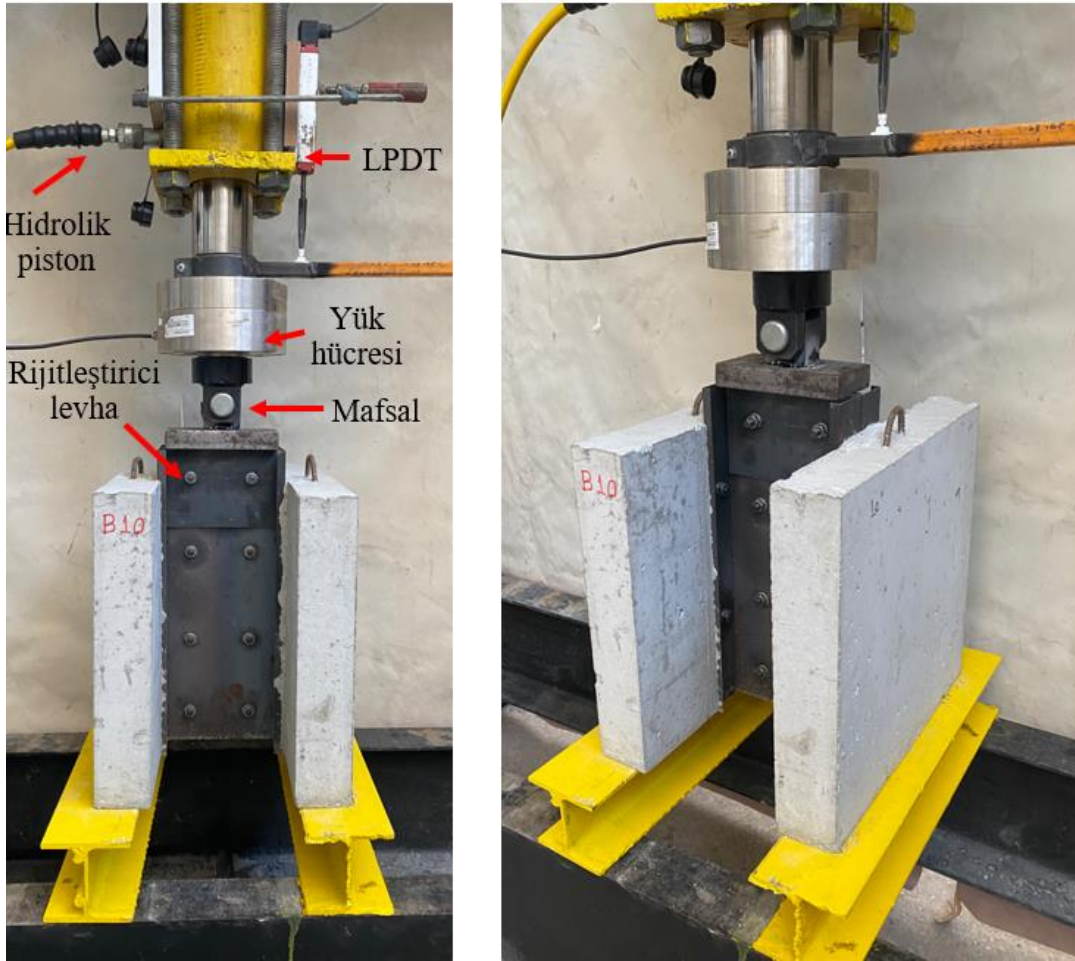


Şekil 36. Üretimi tamamlanmış itme deney elemanları

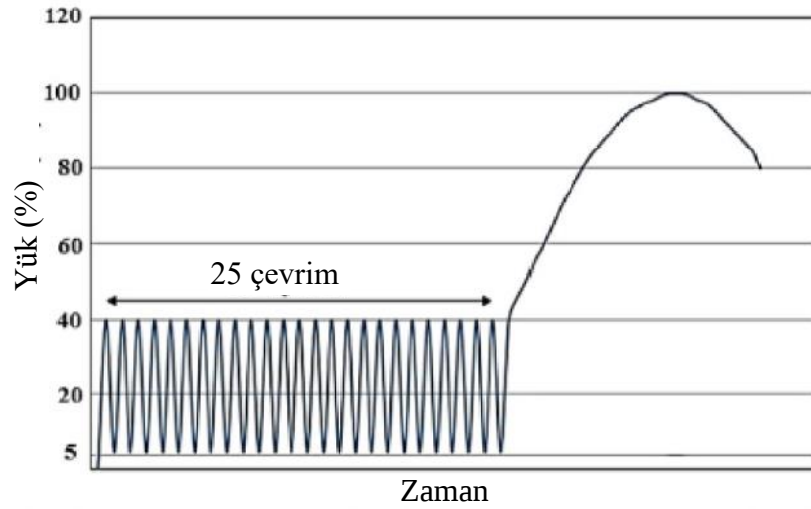
- İtme Deney Düzeneği ve Ölçüm Sistemi

Statik itme deneyleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan yükleme çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Deney

elemanları C enkesitli hafif çelik kirişin iki başlığında da bulunan betonarme döşemeler vasıtasıyla, Şekil 37’de görülen sarı renkli çelik mesnetlere serbestçe oturmaktadır. Deney elemanları, başlıklarında bulunan betonarme döşemeler sayesinde düşey doğrultuda kendi içinde dengededir. C enkesit hafif çelik kiriş, üst ucundan 1000 kN kapasiteli hidrolik piston vasıtasıyla itme yüküne maruz bırakılacak ve betonarme döşemelere göre düşey doğrultuda rölatif yerdeğiştirme yapacaktır. Deneyler sırasında, hafif çelik kirişin yüke maruz kalan üst ucu 8 mm kalınlığında çelik levhalar ile iki taraftan sıkıştırılarak yük aktarımı sırasında oluşabilecek yerel hasarlar önlenmiştir. Benzer şekilde, betonarme döşemelerin altında bulunan sarı renkli çelik mesnetler arasındaki mesafe, kirişlerin düşeyde serbestçe hareket etmesine izin verecek yeterliliktedir. Deneyler sırasında, pistonun ucuna yerleştirilen 600 kN kapasiteli yük hücresi (Loadcell) ve doğrusal potansiyometrik cetvel (LPDT) ile yük ve yerdeğiştirme ölçümleri yapılmıştır. Bilgisayar ortamına aktarılmış ve kaydedilmiştir. Statik itme deneylerinde Şekil 38’de verilen yükleme protokolü uygulanmıştır.



Şekil 37. İtme deney düzeneği



Şekil 38. Statik itme deneyi yükleme protokolü (Eurocode 4, 2004)

2.3.2. İkinci Aşama Deneysel Çalışmalar

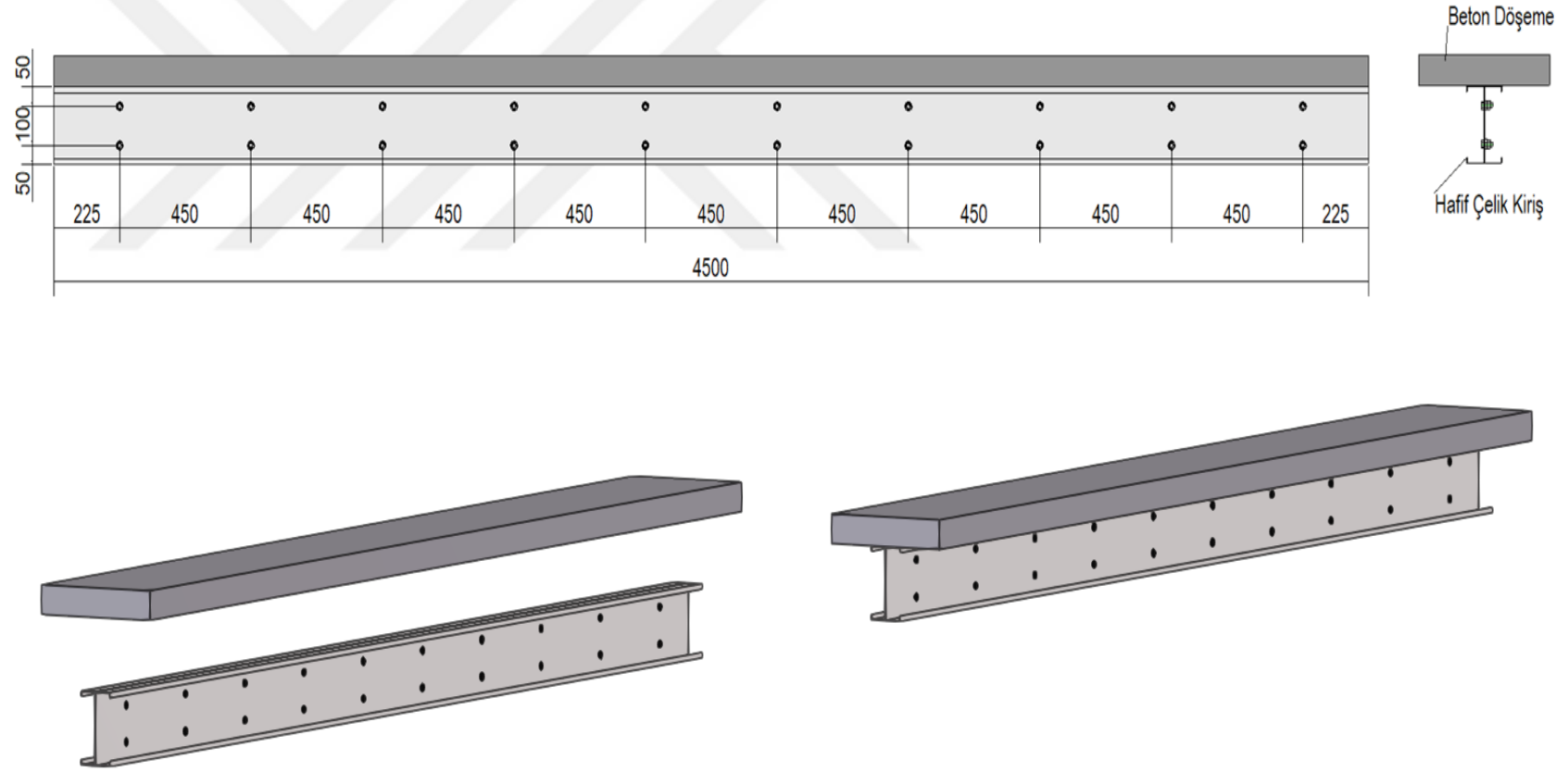
- Eğilme Deney Elemanları ve Özellikleri

Eğilme deneyleri kapsamında 4.5 m uzunluğunda tam ölçekli 3 adet deney elemanı tasarlanmış olup özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. Eğilme deney elemanlarında kullanılan hafif çelik kiriş ve betonarme döşemenin enkesit ve malzeme özellikleri Bölüm 2.3.1’de anlatılan itme deney elemanları ile aynıdır. Kirişi oluşturan C enkesitli hafif çelik profiller gövdelerinden M10 çapındaki cıvatalarla birleştirilmiştir. Cıvatalar arasındaki boyuna mesafe 450 mm, enine mesafe ise 100 mm’dir. Döşeme kalınlıkları 80 mm’dir. Döşeme donatısı olarak her iki yönde 150 mm aralık ile Ø8 mm çapında donatı kullanılmıştır.

Tablo 3. Eğilme Deney Elemanlarının Özellikleri

Deney Elemanı	Bağlantı Türü	Bağlantı Elemanı Boyutları (mm)			C-Enkesitli Hafif Çelik Kiriş Boyutları (mm)				Betonarme Döşeme Boyutları (mm)		
		Çap	Kalınlık	Serbest boy	Başlık Genişliği	Gövde Yüksekliği	Kenar Berkitme Boyu	Et Kalınlığı	Genişlik	Uzunluk	Kalınlık
BE-R	-	-	-	-	60	200	15	1.5	450	4500	80
BE-B-12	Cıvata	M12	-	60							
BE-PL-ISO	Kısmen İzole Plaka	-	3	30							

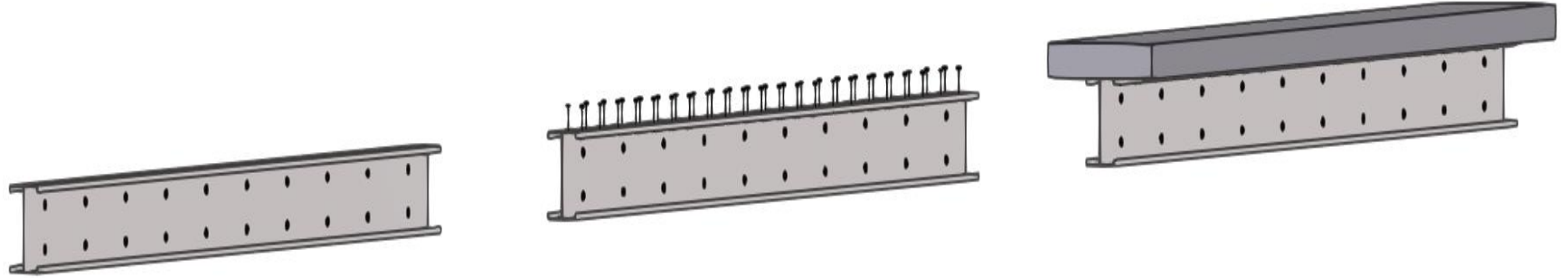
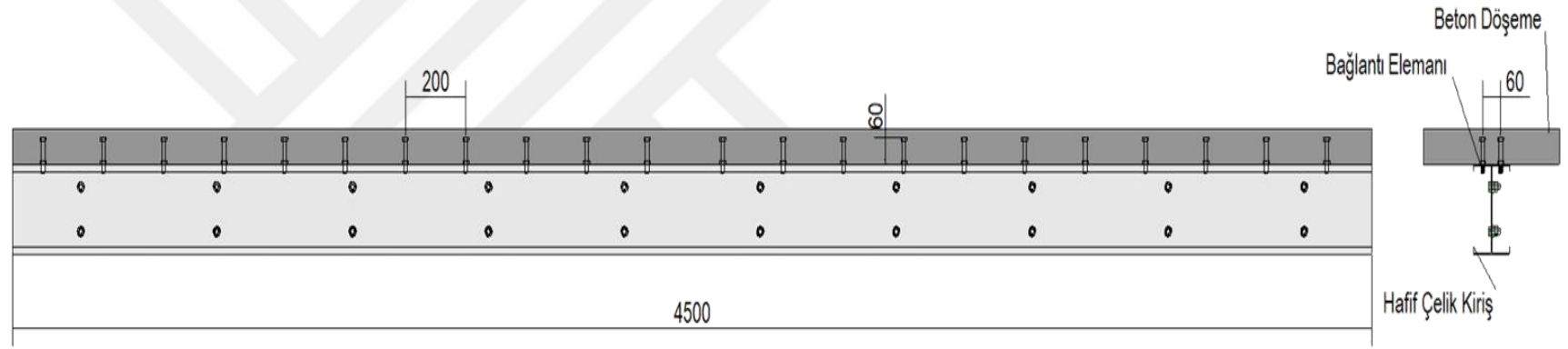
BE-R isimli deney elemanında betonarme döşeme ile hafif çelik kiriş birbirinden bağımsız olup aralarında kayma bağlantı elemanı bulunmamaktadır. BE-R elemanının boyutları ve birleşim detayları Şekil 39’da verilmiştir. Bu deney elemanından elde edilecek sonuçlar, diğer deney elemanlarındaki kompozit etkinin belirlenmesinde referans alınacaktır.



Şekil 39. BE-R deney elemanı detayı

BE-B-12 isimli deney elemanında kayma bağlantı elemanı olarak kiriş üst başlığında M12 cıvata kullanılmıştır. 4.5 m uzunluğundaki kirişin boyuna eksenine doğrultusunda yerleştirilen cıvatalı bağlantı elemanlarının merkezleri arasındaki mesafe 200 mm'dir. Kiriş üst başlığına çift sıra yerleştirilen cıvataların merkezleri arasındaki mesafe 60 mm'dir. Cıvatalı bağlantı elemanlarının boyu kiriş üst başlığından itibaren 60 mm'dir. Betonarme döşeme 80 mm kalınlığında olup bağlantı elemanı üzerinde 20 mm beton örtüsü bırakılmıştır (Şekil 40).

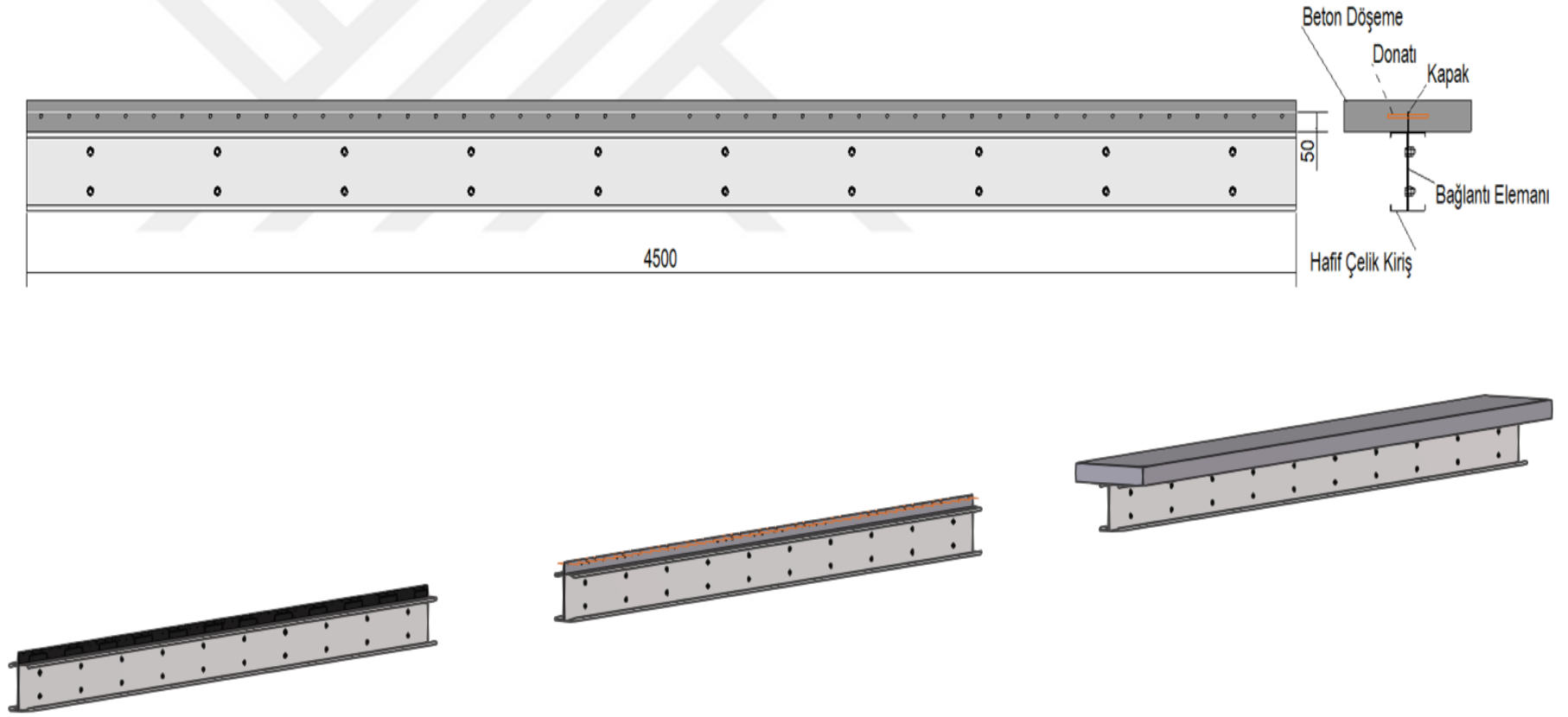




Şekil 40. BE-B-12 deney elemanı detayı

BE-PL-ISO deney elemanı, çalışma kapsamında tasarlanan kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanına sahiptir. 3 mm kalınlığındaki bağlantı elemanı, C enkesitli hafif çelik profillerin arasına yerleştirilmiş ve M10 cıvatalarla birleşim sağlanmıştır. Bağlantı elemanının genişliği, betonarme döşeme ile birleşimi sağlamak üzere, C kesitli profilin üst başlığından 50 mm dışarı çıkacak şekilde tasarlanmıştır. Betonarme döşemenin içinde kalacak 50 mm uzunluğundaki bağlantı elemanı parçası, detayları Bölüm 2.3.1’de verilen 0.5 mm kalınlığında ve U şeklindeki çelik sac ile betonarme döşemeden kısmen yalıtılmıştır. Kayma kuvvetlerinin betonarme döşemeden bağlantı elemanına aktarılabilmesi için ise bağlantı elemanı serbest uçlarında 200 mm ara ile bırakılan 9 mm çapındaki deliklerden donatılar geçirilerek betonarme döşeme ile birleşim sağlanmıştır (Şekil 41).





Şekil 41. BE-PL- ISO deney elemanı detayı

- Eğilme Deney Elemanlarının Üretimi

Eğilme deney elemanlarının üretim süreci, genel olarak itme deney elemanlarıyla benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. Beton döküm işleminin rahat yapılabilmesi için, döşeme altta kalacak şekilde kalıplar hazırlanmıştır. Kayma bağlantı elemanı montajı tamamlanan 4.5 m uzunluğundaki kirişler döşeme kalıbının üzerine yerleştirilerek sabitlenmiştir. Kalıplar yağlanmış, donatılar yerleştirildikten sonra beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Beton dökümünün ardından döşemeler kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Eğilme deney elemanlarının üretim sürecine ait bazı görseller Şekil 42’de verilmiştir.





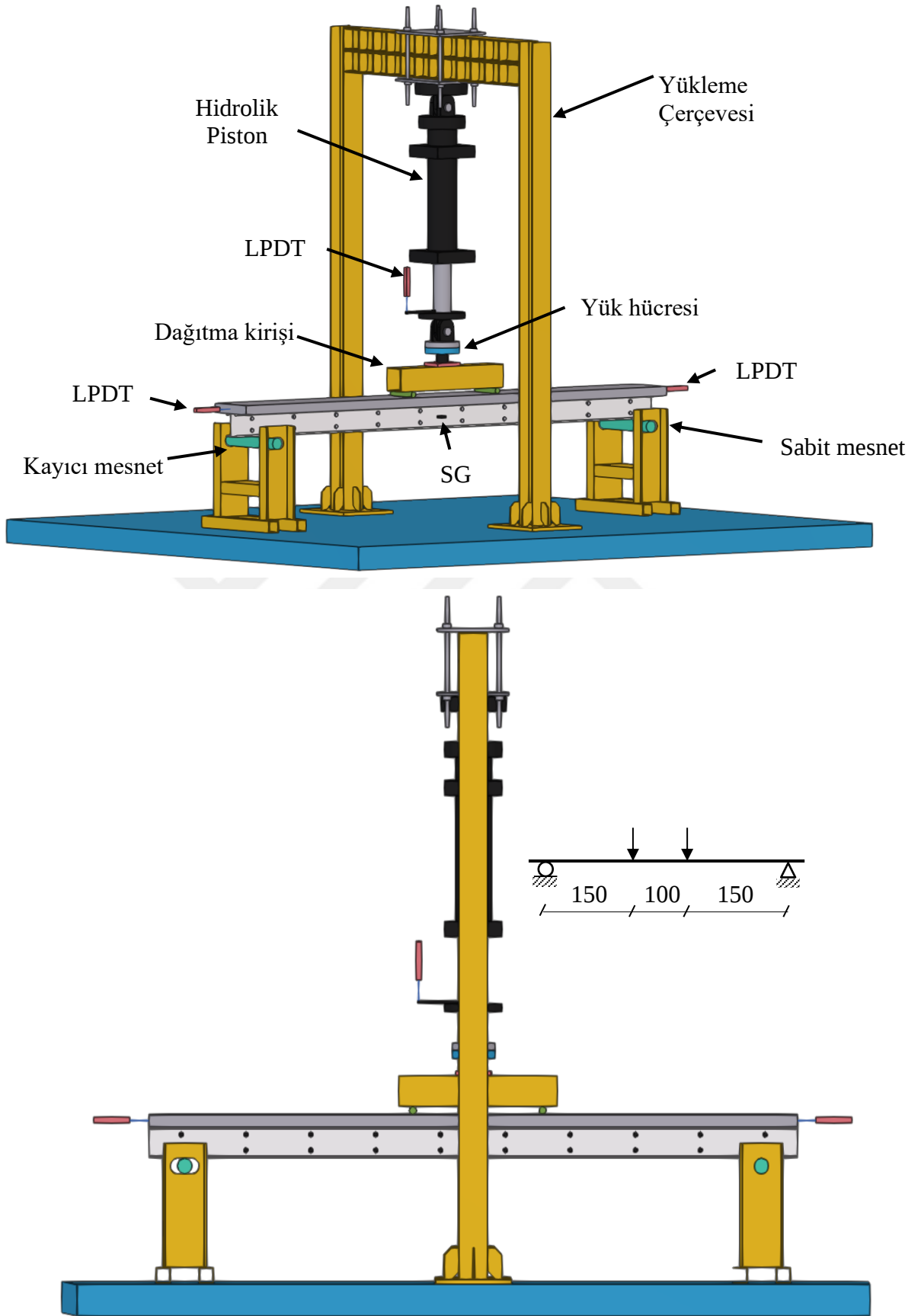
Şekil 42. Eğilme deney elemanlarının üretimine ait bazı görseller

- Eğilme Deney Düzeneği ve Ölçüm Sistemi

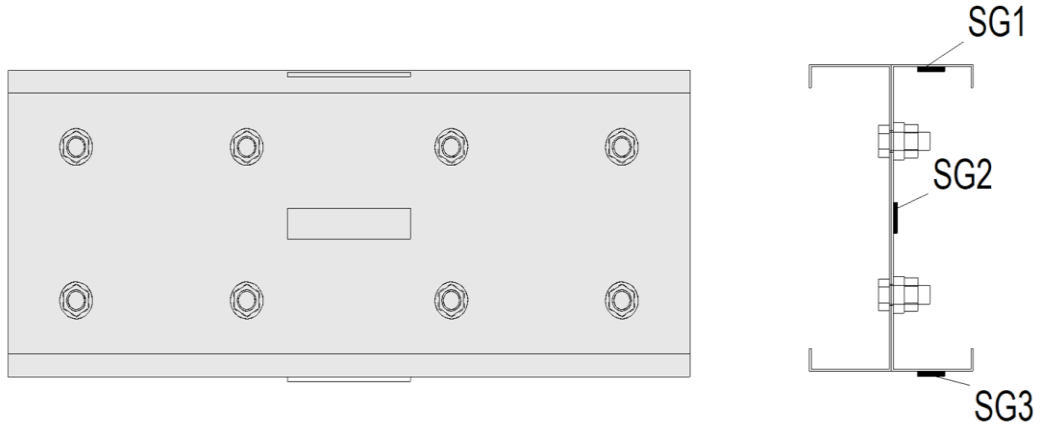
Eğilme deneyleri, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan dört nokta eğilme deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 43). Deney

düzenegi yükleme çerçevesi, bu çerçeveye düşey olarak mesnetlenmiş 300 kN yükleme kapasiteli hidrolik piston, yük dağıtma kirişi ve basit mesnetlerden meydana gelmektedir. Mesnetler arası net mesafe 400 cm, dağıtma kirişi yükleme açıklığı ise 100 cm'dir.

Düzeneg'e yerleştirilen deney elemanları, bir ucundan yükleme çerçevesine sabitlenmiş hidrolik piston ve dağıtma kirişi vasıtasıyla düşey yüke maruz bırakılmıştır. Pistonun ucuna yerleştirilen bir adet 500 t kapasiteli yük hücresi ve 200 mm açılma kapasitesine sahip LPDT vasıtası ile düşey yük ve yerdeğiştirme deneyler süresince ölçölmüştür. Hafif çelik kiriş ile betonarme döşeme arasındaki bağıl yerdeğiştirme (kayma), kiriş'e sol ve sağı uçlarından mesnetlenen 50 mm açılma kapasitesine sahip LPDT'ler vasıtasıyla ölçölmüştür. Deney sırasında hafif çelik kirişlerin alt başlık, üst başlık ve orta kesitindeki birim şekildeğiştirmeleri ölçmek amacıyla 90 mm uzunluğunda FLA tipi birim şekildeğiştirme ölçerler (SG) Şekil 44' deki plana göre kiriş orta açıklığına yerleştirilmiştir. Deneyler boyunca elde edilen veriler altı kanallı CODA Ai8b veri toplama sistemi ile kayıt altına alınmıştır. Eğilme düzeneg'ine ait detaylı görseller Şekil 45'te verilmiştir.



Şekil 43. Dört nokta eğilme deney düzeneğinin şematik görünümü (Ölçüler cm'dir)



Şekil 44. Kiriş orta açıklığındaki SG yerleşim düzeni



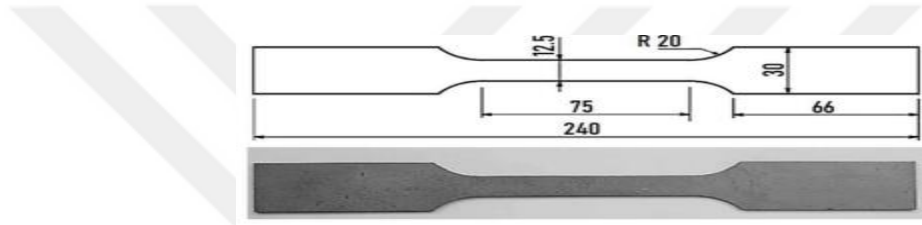


Şekil 45. Eğilme deney düzeneğinin detaylı görünümü

2.3.3. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

- C- Kesitli Hafif Çelik Malzeme Özellikleri

Deneylerde kullanılan profil numuneleri TS EN 10346 (2015) 'e göre akma dayanımı minimum 320 MPa olan 1.5 mm kalınlığında S320GD+Z kalite sınıfında sıcak daldırma yöntemiyle üretilmiş galvanize çelik saclardan imal edilmiştir. Çelik sacların mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için TS EN ISO 6892-1 (2016) de verilen ölçülere uygun kupon numuneler hazırlanmıştır. Aynı standartta göre numuneler üzerinde çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Kupon numunelerin geometrik özellikleri Şekil 46' da deneylerden elde edilen ortalama veriler Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 46. Monotonik çekme deneyinde kullanılan numunelerin geometrik özellikleri (Öztürk, 2021)

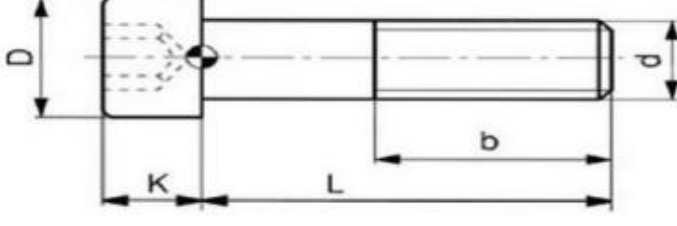
Tablo 4. Monotonik çekme deneyinden elde edilen ortalama sonuçlar (Öztürk, 2021)

Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastisite Modülü (GPa)
334	443	28.7	184.03

- Kayma Bağlantı Elemanlarının Malzeme Özellikleri

Deneyisel çalışmalarda cıvata ve plaka olmak üzere iki tür bağlantı elemanı kullanılmıştır. Cıvatalı bağlantı elemanlarında, 8.8 kalitesinde, karakteristik özellikleri Tablo 5'te verilen cıvatalar tercih edilmiştir.

Tablo 5. Bağlantı cıvatalarının karakteristik özellikleri

						
Çap, d (mm)	Anahtar ağzı, D (mm)	Kafa kalınlığı, K (mm)	Cıvata boyu, L (mm)	Diş boyu, b (mm)	Karakteristik akma dayanımı (MPa)	Karakteristik çekme dayanımı (MPa)
M8	13	5.3	80	26	640	800
M10	17	6.4		32		
M12	19	7.5		38		

Plaka, EN 1993-1-1 (2014) standardına uygun olarak, minimum 235 MPa akma gerilmesine sahip ve 3.0 mm kalınlığında S235JRH (1.0039) kalite çelik sacdan üretilmiştir. TS EN ISO 6892-1 (2016) standartlarında belirtilen boyutlara göre su jetiyle kesilen üç kupon numune üzerinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı ve Malzeme laboratuvarında çekme testleri yapılmıştır. Testler, ilgili standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup, elde edilen ortalama sonuçlar Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Çekme deneylerinde elde edilen ortalama değerler

Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
20	3	287,55	353,95	25,1

- Betonun Malzeme Özellikleri

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 [67]'de ön üretimli betonarme elemanlarda en düşük C30/37 kalitesinde beton kullanılabilir. Bu nedenle, deney elemanlarının beton plakları C30/37 kalitesinde üretilmesi planlanmıştır.

Tablo 7. Beton malzemelerin karışım oranları (1 m³)

Çimento tipi	Çimento miktarı (kg)	S/Ç Oranı	Agrega (kg)	Su (kg)	Katkı Maddesi (kg)
Cem II 32.5 N	350	0.50	1834	175	3.5

Tablo 7’de verilen karışım oranları kullanılarak üretilen beton malzemelerden 6 adet silindir numune alınarak 28 gün boyunca, standart küre bırakılmıştır. Bu süre sonunda kür havuzundan çıkartılan numuneler üzerinde, 2500 kN kapasiteli, bilgisayar kontrollü, sabit hızla yükleme yapabilen bir deney aleti kullanılarak basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 47. Beton basınç deneyine ait görseller

Beton malzemelerin basınç dayanımlarının ortalaması 38.8 MPa olarak tespit edilmiştir ve hedeflenen düzeyde olduğu belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

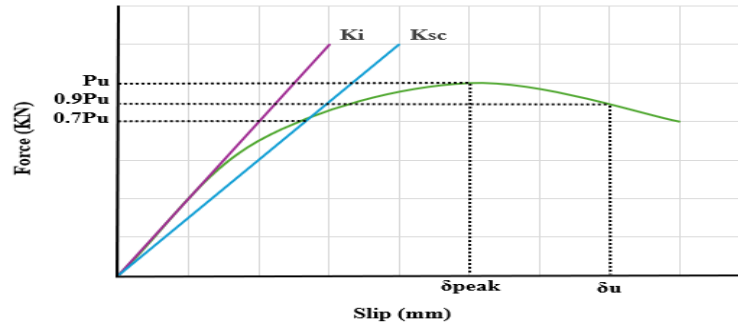
3.1. Giriş

Bu bölümde, hafif çelik kiriş-beton döşemeden oluşan ve 2 farklı mekanik kayma bağlantısına sahip kompozit numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular ve irdelemeler sunulmaktadır.

3.2. İtme Testi

İtme deneylerinde toplam 5 adet tam ölçekli numune test edilmiştir. Deneylerde Şekil 38’de verilen yükleme protokolü uygulanmış olup, ilk 25 çevrim yük kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çevrimler tamamlandıktan sonra, maksimum yükte %20 azalma meydana gelene kadar 1mm/dk yerdeğiştirme hızı ile deneylere devam edilmiştir. İtme deney elemanlarında kirişlerin iki başlığında da beton döşeme olduğu için, deneylerden elde edilen itme yükü değerleri ikiye bölünerek sunulmuştur.

İtme testi sonuçlarının değerlendirilebilmesi için Eurocode 4’te tanımlanan ve Şekil 48’de verilen parametreler kullanılmıştır. Burada, P_u maksimum itme yükünü, δ_{peak} maksimum itme yüküne ulaşıldığı andaki kayma yerdeğiştirmesini, δ_u maksimum itme yükünün %10 azaldığı andaki ($0.9P_u$) nihai yerdeğiştirmeyi, K_i bağlantı elemanlarının başlangıç rijitliğini, K_{sc} ise bağlantı elemanlarının kullanılabilirlik sınır durumu anındaki azaltılmış rijitliğini ifade etmektedir ve $0.7P_u$ anına göre sekant rijitliği olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 48. İtme Yüğü- Kayma grafiğinin değerlendirilmesinde kullanılan parametreler [Eurocode 4, 2004]

3.2.1. İtme Yüğü Taşıma Kapasitesi

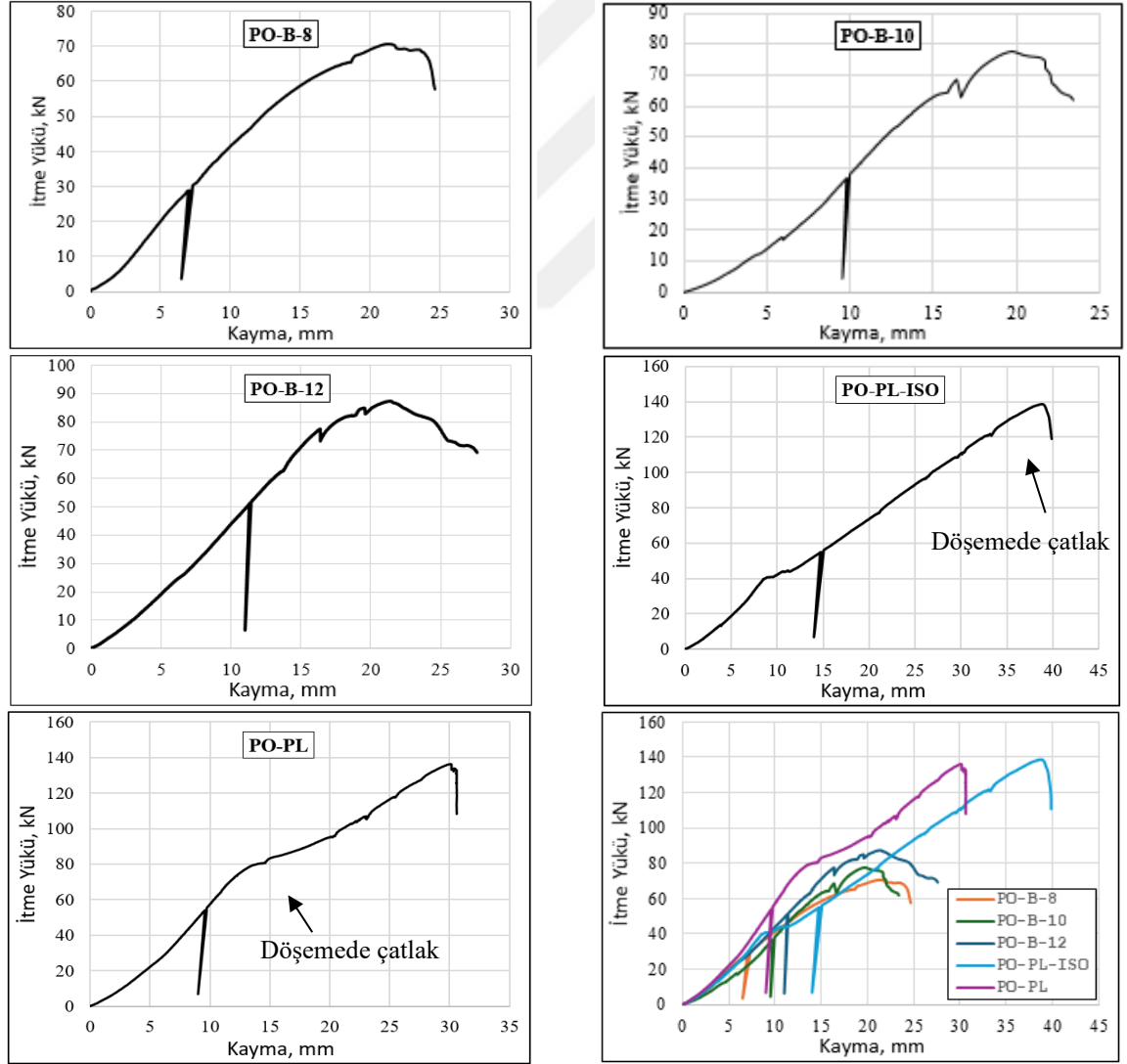
İtme deneylerinden elde edilen itme yüğü – kayma grafikleri Şekil 49’da, bu grafiklerden elde edilen sonuçlar ise Tablo 8’de verilmiştir.

Cıvatalı kayma bağlantı elemanlarına sahip PO-B-8, PO-B-10 ve PO-B-12 numunelerinin ulaştığı maksimum itme yüğü (P_u) sırasıyla 70.7, 77.7 ve 87.4 kN olarak elde edilmiştir. Maksimum itme yüğü anındaki kayma miktarı (δ_{peak}) ise sırasıyla 21.2 19.7 ve 21.4 mm olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, birbirine göre oldukça farklı eğilme rijitliklerine sahip numunelerin maksimum itme yüküne ulaşıldığı andaki kayma miktarları arasında kayda değer bir fark bulunmamaktadır. Benzer bir durum maksimum itme yüğü içinde geçerlidir. İtme yüğü taşıma kapasiteleri karşılaştırıldığında, PO-B-12 numunesinin PO-B-8 ve PO-B-10’ a göre sırasıyla %23.6 ve %12.5, PO-B-10 numunesinin ise PO-B-8’e göre %10 daha fazla yük taşıdığı anlaşılmaktadır. Ancak, farklı cıvata çaplarına sahip kayma bağlantı elemanlarının itme yüğü taşıma kapasiteleri arasındaki bu farklar ile cıvata boyutları arasında bir ilişki kurmak mümkün değildir. Bunun nedeni itme testleri esnasında hasarın cıvatalı kayma bağlantı elemanlarından ziyade hafif çelik kiriş başlıklarında yoğunlaşmasıdır. Bu durum Bölüm 3.2.2’de detaylı olarak anlatılmaktadır.

PO-PL-ISO ve PO-PL numunelerinin itme yüğü – kayma grafikleri incelendiğinde, cıvatalı kayma elemanlarından farklı olarak, belirgin bir akma bölgesi oluştuğu görülmektedir (Şekil 49). PO-PL-ISO ve PO-PL numunelerindeki kayma bağlantı elemanlarında yaklaşık olarak sırasıyla 40 kN ve 80 kN yük seviyelerinde akma meydana gelmiştir. PO-PL numunesi betona tam gömülü olduğu için PO-PL-ISO ya göre akma dayanımında %100’e yakın bir artış olmuştur. Bu artışın tamamı çelik şeritler arasındaki trapez boşlukların beton ile dolu olması ve bu nedenle çelik şeritlerin eğilmesinin beton tarafından engellenmesi ve yükün birlikte taşınmasından kaynaklanmıştır. Yatay yerdeğiştirme nedeniyle eğilmeye zorlanan çelik şeritler akma anından sonra döşeme düzlemine dik doğrultuda çekme etkilerine maruz kalmaya başlamış ve bu nedenle her iki deney elemanında da itme yüğü – kayma grafiklerinde önemli bir yük artışı meydana gelmiştir. PO-PL-ISO ve PO-PL numunelerinin ulaştığı maksimum itme yüğü sırasıyla 138.8 ve 136.2 kN ’dur. Maksimum itme yüğü anındaki kayma miktarı (δ_{peak}) ise sırasıyla 38.8 ve 30.1 mm olarak elde edilmiştir. PO-PL-ISO ve PO-PL numunelerinin itme yüğü taşıma kapasiteleri yaklaşık aynı olsa da PO-PL-ISO numunesindeki kayma bağlantı

elemanlarının betondan yalıtılmış olması bu numunenin PO-PL'ye kıyasla %28.9 daha fazla yerdeğiştirme yapmasını sağlamıştır.

Cıvatalı ve plakalı kayma bağlantı elemanına sahip numuneler karşılaştırıldığında ise plakalı kayma bağlantısına sahip numunelerin yük ve yerdeğiştirme performanslarındaki üstünlükleri dikkat çekmektedir. PO-PL-ISO numunesinin itme yükü taşıma kapasitesi PO-B-8, PO-B-10 ve PO-B-12'ye göre sırasıyla %96.3, %78.6 ve %58.8, bu andaki yerdeğiştirme kapasitesi ise %83.0, %96.7 ve %81.3 daha büyüktür. Benzer şekilde, PO-PL numunesinin de itme yükü taşıma kapasitesi PO-B-8, PO-B-10 ve PO-B-12'ye göre sırasıyla %92.6, %75.3 ve %55.8, bu andaki yerdeğiştirme kapasitesi ise %42.0, %52.8 ve %40.7 daha büyüktür.



Şekil 49. İtme Yüğü – Kayma grafikleri

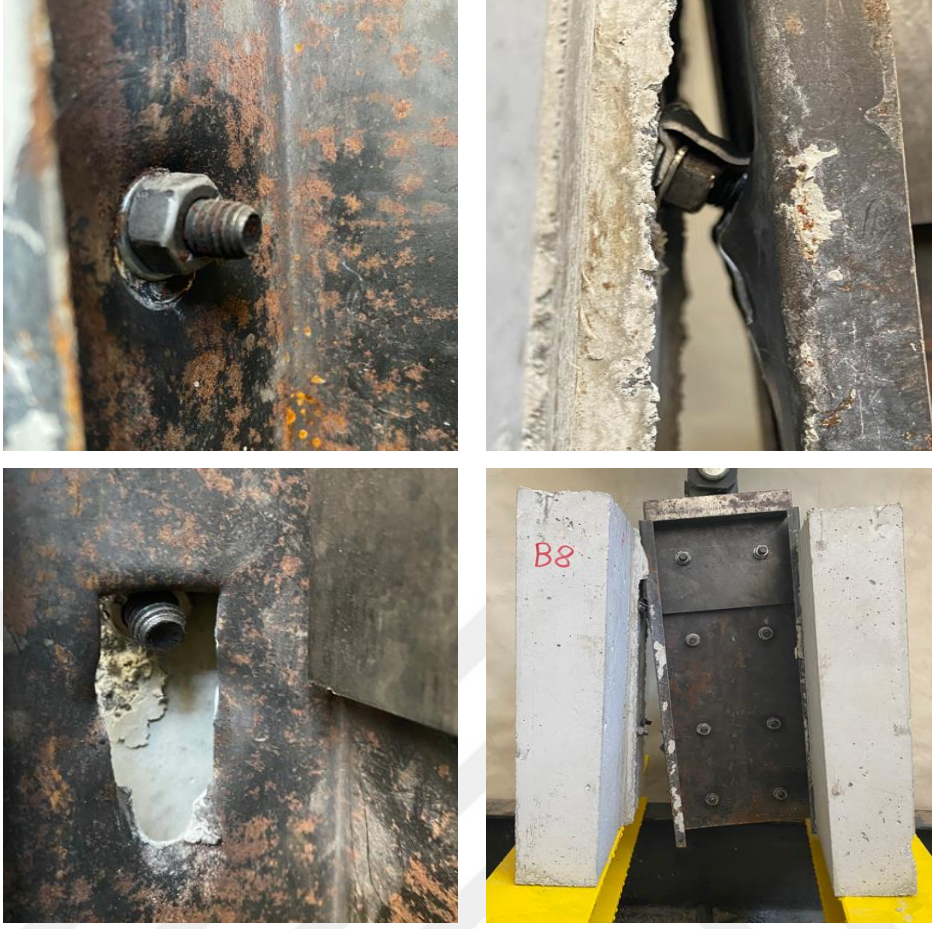
Tablo 8. İtme testi sonuçları

Deney Elemanı	P_u (kN)	δ_{peak} (mm)	δ_u (mm)	K_i (kN/mm)	K_{sc} (kN/mm)	Hasar Tipi
PO-B-8	70.7	21.2	24.4	4.0	4.1	-Cıvata eğilme ve kopma -Kiriş başlığında yırtılma ve gme
PO-B-10	77.7	19.7	22.0	3.8	4.2	-Cıvata eğilme -Betonda kılcal atlak -Kiriş başlığında yırtılma ve gme
PO-B-12	87.4	21.4	24.8	4.1	4.6	-Betonda kılcal atlak -Kiriş başlığında yırtılma ve göçme
PO-PL-ISO	138.8	38.8	39.6	4.7	3.7	-Bağlantı elemanında eğilme -Betonda atlak ve göçme
PO-PL	136.2	30.1	30.6	5.9	4.5	-Bağlantı elemanında eğilme -Betonda atlak ve göçme

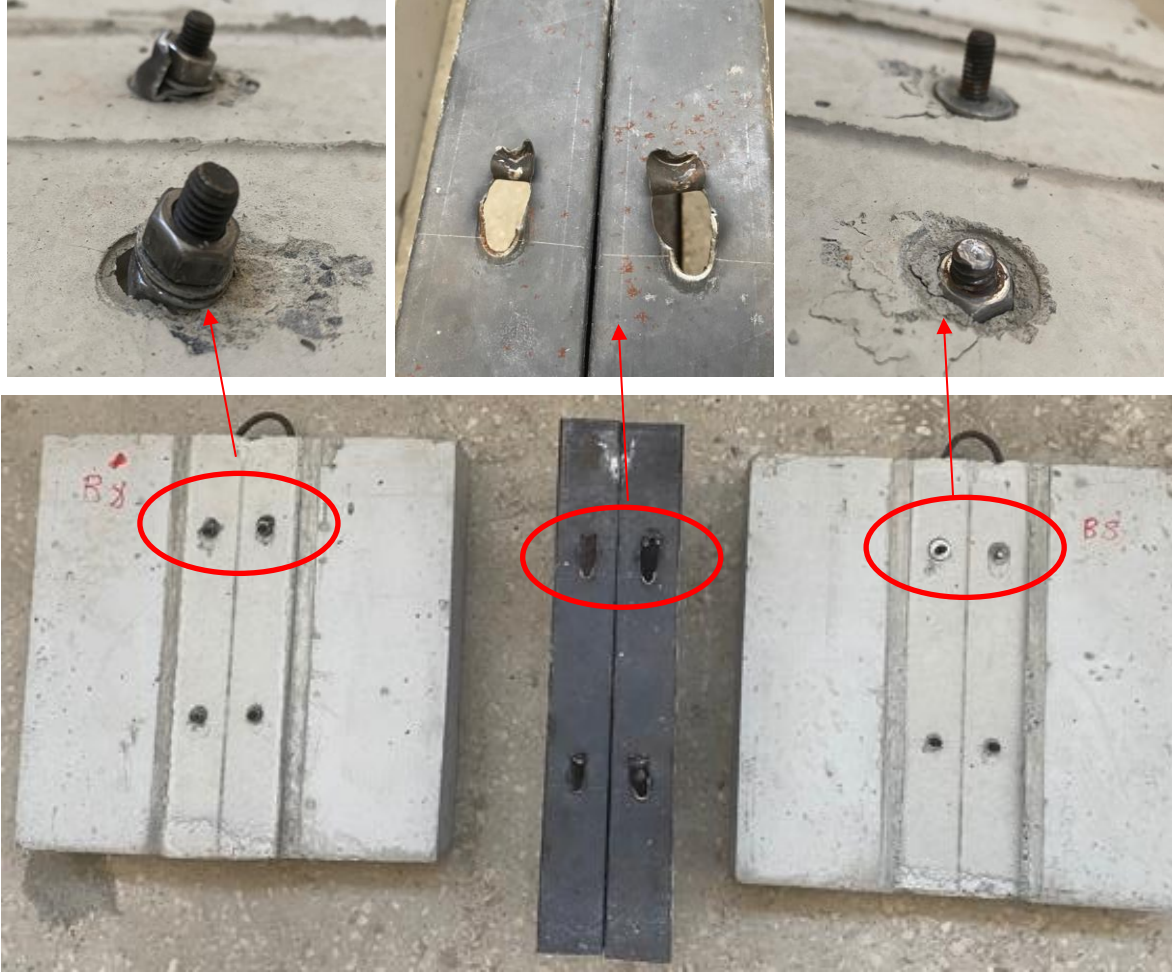
3.2.2. Hasar Dağılımı

İtme testleri sırasında ve sonrasında deney elemanlarındaki hasar türleri ve dağılımları incelenmiştir. Gözlemlenen hasarlar kayma bağlantı elemanı türüne göre oldukça farklılık göstermektedir.

İtme deneyinin ilk aşamalarında PO-B-8 elemanındaki cıvatalarda eğilme ve delik kenarlarında ezilme meydana gelmeye başlamıştır. İlerleyen yk seviyelerinde cıvatalardaki eğilme artmaya başlamış ve bazı cıvatalar kopmuştur. Delik kenarlarındaki ezilmeler artmaya başladıkça kiriş başlığında yırtılmalar meydana gelmiş ve cıvatalı bağlantı elemanı ile kiriş arasındaki bağ kaybolmuştur. Sonuç olarak beton döşeme hafif elik kiriş başlığından ayrılmış ve deney sonlandırılmıştır (şekil 50). Numunedeki hasar dağılımı şekil 51’de verilmiştir. Bu deney elemanında hasar hafif elik kiriş başlığı ve cıvatalarda yoğunlaşmış, betonda herhangi bir çatlak görülmemiştir.



Şekil 50. PO-B-8 elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar

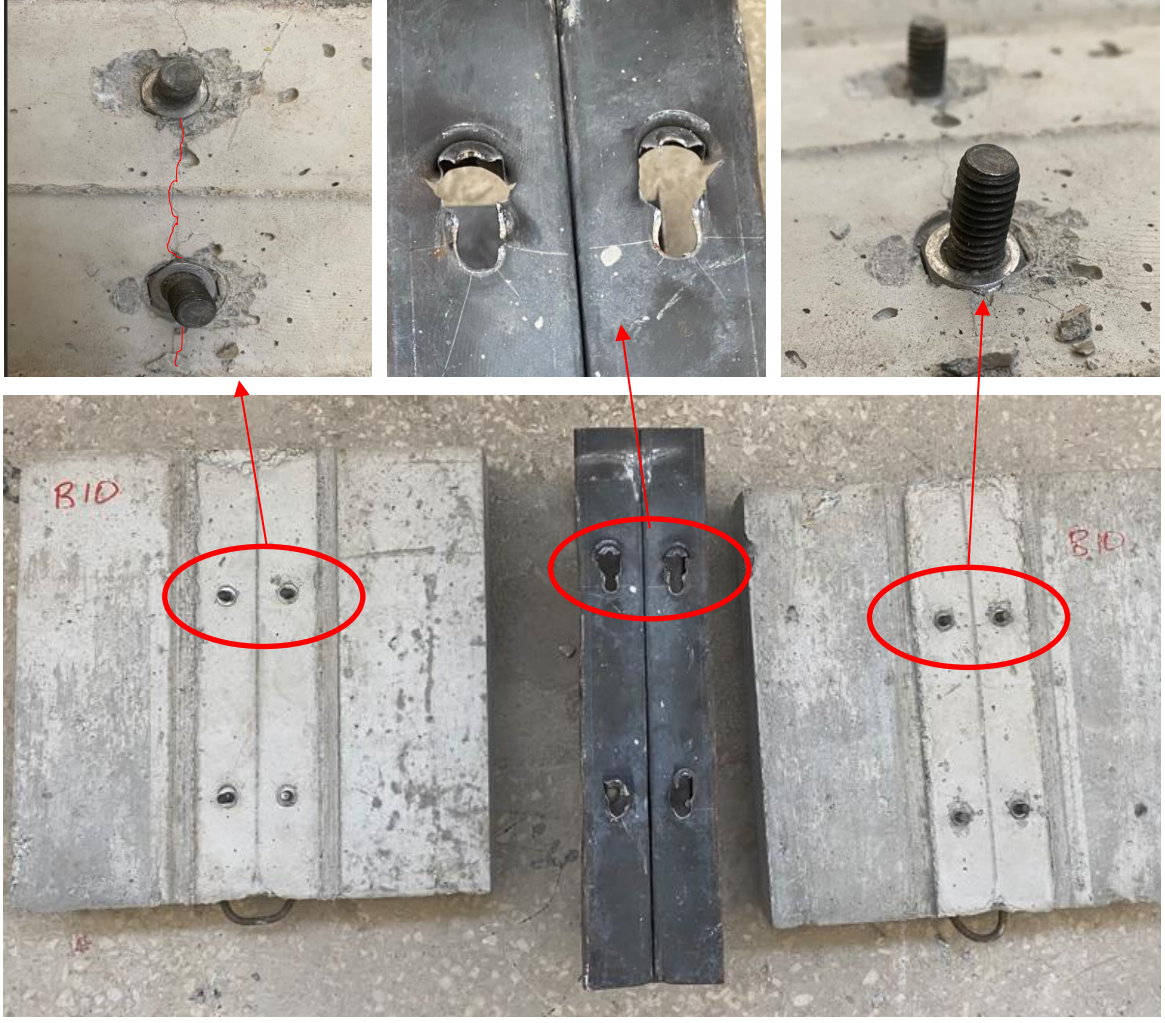


Şekil 51. PO-B-8’de hasar dağılımı

İtme deneyinin ilk aşamalarında PO-B-10 elemanındaki cıvatalarda eğilme gözlemlenmemiş yalnızca delik kenarlarında ezilme meydana gelmeye başlamıştır. Artan yük ve kayma değerleri ile cıvatalarda bir miktar eğilme meydana gelmiştir. Ancak cıvatalardaki eğilme hasarı PO-B-8’e göre çok daha azdır. Delik kenarlarındaki ezilmeler artmaya başladıkça kiriş başlığında yırtılmalar meydana gelmiş ve cıvatalı bağlantı elemanı ile kiriş arasındaki bağ kaybolmuştur. Sonuç olarak beton döşeme hafif çelik kiriş başlığından ayrılmış ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 52). Numunedeki hasar dağılımı Şekil 53’te verilmiştir. Bu deney elemanında da hasar hafif çelik kiriş başlığı ve cıvatalarda yoğunlaşırken, beton döşemede de çatlaklar gözlemlenmiştir.



Şekil 52. PO-B-10 elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar



Şekil 53. PO-B-10'da hasar dağılımı

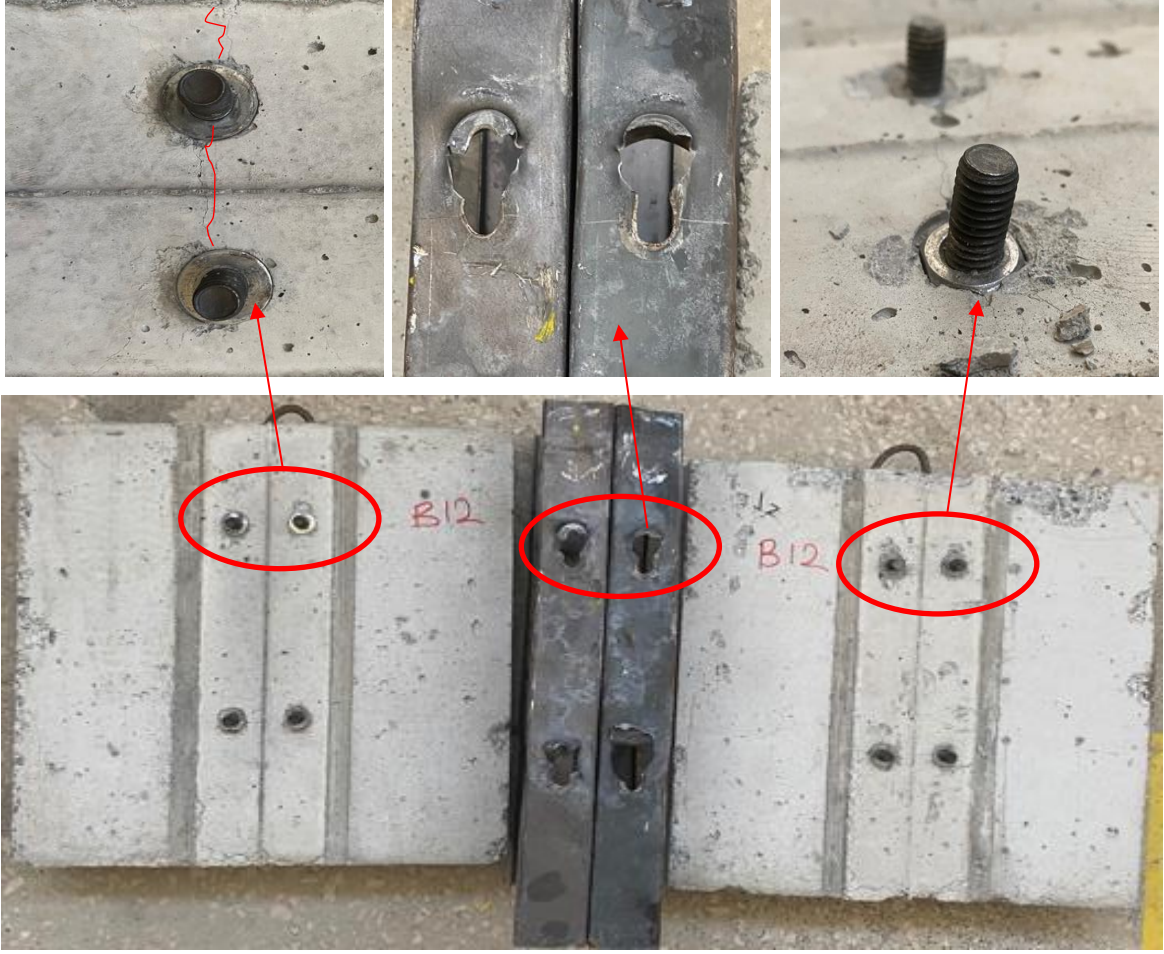
Deneyin ilk aşamalarında PO-B-12 elemanındaki hasarlar yalnızca cıvata deliklerinde ezilmeler şeklinde ortaya çıkmaya başlamıştır. Artan yük ve kayma değerleri ile delik kenarlarındaki ezilmeler artmaya başlamış ve kiriş başlığında yırtılmalar meydana gelerek cıvatalı bağlantı elemanı ile kiriş arasındaki bağ kaybolmuştur. İtme deneyleri boyunca PO-B-12 elemanındaki cıvatalarda belirgin bir eğilme gözlemlenmemiştir. Sonuç olarak beton döşeme hafif çelik kiriş başlığından ayrılmış ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 54). Numunedeki hasar dağılımı Şekil 55'te verilmiştir. Bu deney elemanında hasar hafif çelik kiriş başlığı yoğunlaşırken cıvatalar hasar görmemiştir. Ayrıca beton döşemede çatlaklar oluşmuştur.

Cıvatalı kayma bağlantı elemanlarına sahip numunelerin itme yükü etkisindeki davranışları literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslandığında, hafif çelik kiriş başlık kenarlarındaki dudakların davranışa önemli katkıları olduğu görülmüştür. Örneğin dudaksız

profillerin kullanıldığı Hosseinpour vd. (2021), Shakarami vd. (2023), Hosseinpour vd. (2023) çalışmalarında başlık levhalarında lokal burkulmalar meydana gelmiş ve davranışa bu hasar şekli hâkim olmuştur. Halbuki, bu çalışmada olduğu gibi, hafif çelik kiriş başlıklarının dudaklı imal edilmesi ile başlık levhalarının serbest uçları rijitleştirilerek lokal burkulmalar engellenmiş ve hasar türü değişmiştir.



Şekil 54. PO-B-12 elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar

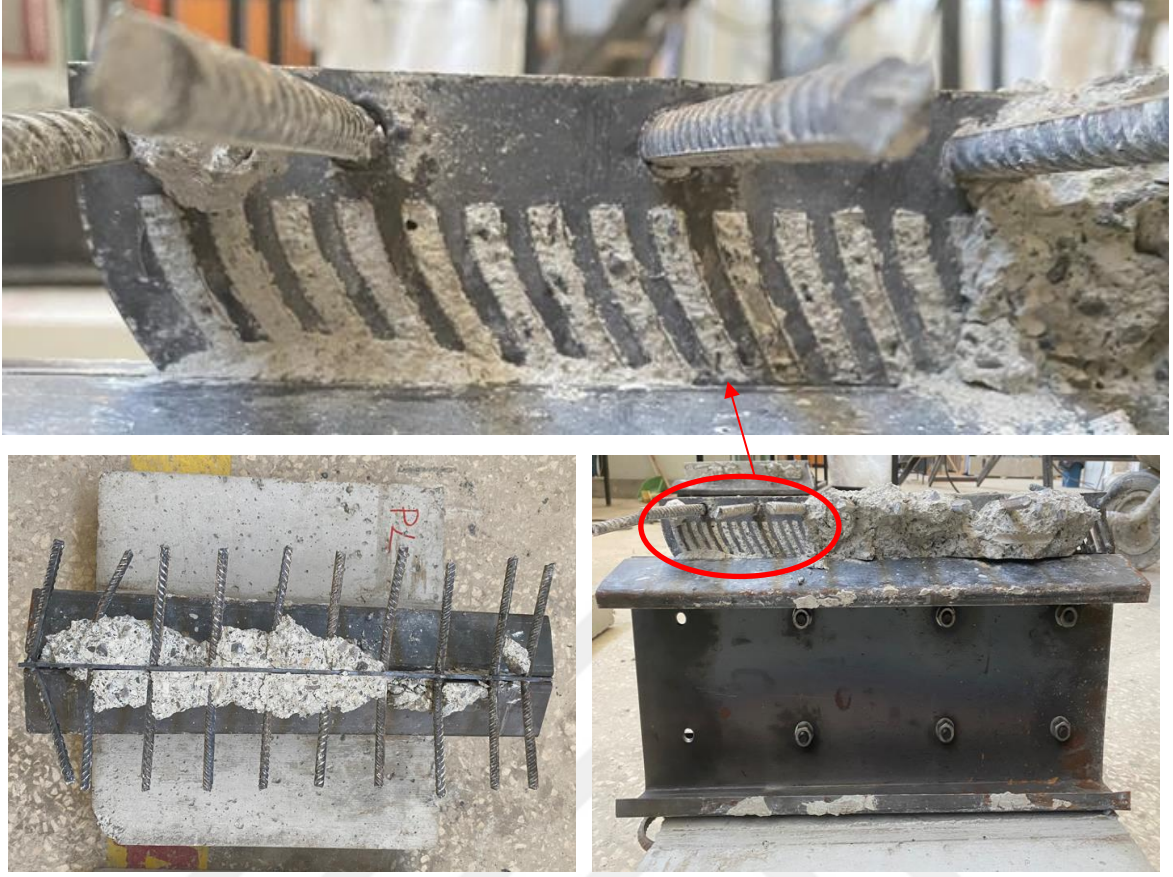


Şekil 55. PO-B-12’de hasar dağılımı

Plakalı kayma bağlantısı betona gömülü olan PO-PL numunesinde akma dayanımına ulaşılan kadar herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Çelik şeritlerin betona gömülü olması sebebiyle akma anından hemen sonra beton döşemede kayma yönüne paralel doğrultuda kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlakların boyu ve kalınlığı artan yük ve kayma değerlerine bağlı olarak artmaya başlamıştır. Nihai durumda hafif çelik kirişte hiçbir hasar meydana gelmemiş ancak beton döşeme bir anda parçalanarak deney sona ermiştir (Şekil 56). Numunedeki hasar dağılımı Şekil 57’de verilmiştir. Görüldüğü gibi beton döşeme göçene kadar bağlantı plakası eğilmeye zorlanmıştır. Ancak çelik şeritler arasındaki trapez boşlukların beton ile dolu olması nedeniyle çelik şeritler eğilirken beton döşemeyi çatlatmıştır. Plakalı kayma bağlantı elemanının kiriş başlıkları yerine kiriş gövdesine monte edilmiş olması sayesinde hafif çelik kirişte hiçbir hasar meydana gelmemiştir.



Şekil 56. PO-PL elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar



Şekil 57. PO-PL’de hasar dağılımı

Betondan kısmen yalıtılmış kayma bağlantısına sahip PO-PL-ISO numunesinde, akma dayanımına ulaşana kadar herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Maksimum yük kapasitesine yaklaşırken beton döşemede çatlaklar oluşmaya başlamış, artan yük ve kayma değerleriyle birlikte bu çatlakların boyu ve kalınlığı da artmıştır. Deneyin nihai aşamasında hafif çelik kirişte herhangi bir hasar meydana gelmezken, beton döşeme aniden parçalanarak deney sona ermiştir (Şekil 58). Numunedeki hasar dağılımı Şekil 59’da gösterilmiştir. Beton döşeme göçene kadar bağlantı plakası eğilmeye zorlanmış, ancak çelik şeritlerin betondan yalıtımı sağlandığı için maksimum yük kapasitesine kadar beton döşemede ciddi bir hasar oluşmamıştır. Ayrıca, plakalı kayma bağlantı elemanlarının kiriş başlıkları yerine kiriş gövdesine monte edilmesi sayesinde hafif çelik kirişte herhangi bir hasar gözlenmemiştir.



Şekil 58. PO-PL-ISO elemanında deney esnasında meydana gelen hasarlar



Şekil 59. PO-PL-ISO’da hasar dağılımı

3.2.3. Süneklik ve Rijitlik

Tablo 8’de verilen δ_u değeri maksimum itme yükünün %10 azaldığı andaki ($0.9P_u$) kayma miktarıdır. Eurocode 4 kayma bağlantı elemanlarının sünekliklerini belirlemek için δ_u değerini kullanmakta ve karakteristik kayma kapasitesi ($\delta_{uk} = 0.9\delta_u$) 6 mm’den büyük olan kayma bağlantı elemanlarını sünek olarak sınıflandırmaktadır. Buna göre itme deney elemanlarının tamamı sünek olarak sınıflandırılabilir. Ancak, itme deney elemanlarındaki hasar durumları incelendiğinde (Şekil 50-55), cıvatalı kayma bağlantı elemanlarına sahip deney elemanlarında hasarın cıvatalarda değil hafif çelik kiriş başlığında yoğunlaştığı görülmektedir. Benzer sonuç literatürdeki farklı çalışmalarda da elde edilmiş ve Eurocode 4’te verilen süneklik sınıflandırma kriteri kullanılmıştır (Hosseinpour vd., 2022; Shakarami vd., 2023). Ancak, kompozit döşemenin kayma kapasitesine cıvatanın şekildeğiştirmesiyle değil, başlık levhasının şekildeğiştirmesiyle ulaşılmış olması nedeniyle, kayma bağlantı elemanının sünek olarak sınıflandırılması doğru bir yaklaşım değildir. PO-B-8, PO-B-10 ve

PO-B-12 elemanlarından elde edilen δ_u değeri de (sırasıyla 24.4, 22.0 ve 24.8) kayma kapasiteleri arasında anlamlı bir ilişki olmadığını göstermektedir. Öte yandan, Eurocode 4'te verilen bu süneklik kriteri kiriş başlık kalınlığı kayma bağlantı elemanının kaynakla birleşimine uygun olan kompozit döşemeler içindir.

Plakalı kayma bağlantı elemanlarına sahip PO-PL-ISO ve PO-PL elemanlarında ise hasarın tamamı çelik şeritlerde yoğunlaşmıştır. PO-PL-ISO ve PO-PL deney elemanlarında δ_u değeri sırasıyla 39.6 ve 30.6 mm'dir. Her iki deney elemanı da oldukça sünek davranış sergilemiştir. Kayma bağlantı elemanının beton döşemeden kısmen yalıtılması sayesinde PO-PL-ISO PO-PL'ye göre %29.4 daha fazla kayma yapmış ve daha sünek davranmıştır. Bu deney elemanlarında kayma bağlantı elemanlarının kiriş gövdesine monte edilmesi sayesinde hasarın tamamı kayma bağlantı elemanında yoğunlaşmıştır. Bu nedenle Eurocode 4'teki süneklik yaklaşımının kullanılması uygun olmaktadır.

PO-B-8, PO-B-10 ve PO-B-12 elemanlarından elde edilen başlangıç rijitliği (K_i) değerleri sırasıyla ve 4.0, 3.8 ve 4.1 mm; azaltılmış rijitlik değerleri (K_{sc}) ise sırasıyla 4.1, 4.2 ve 4.6 mm'dir. Süneklik konusunda yapılan değerlendirmelere paralel olarak, elde edilen rijitlik değerlerinin cıvatalı kayma bağlantı elemanlarının eğilme rijitliği ile ilişkili olmadığı, davranışa başlık levhasının hâkim olduğu anlaşılmaktadır. İtme yükü neticesinde 1.5 mm kalınlığındaki başlık levhasında önce delik kenarları ezilmiş daha sonra levhada yırtılma meydana gelmeye başlamıştır. Bu nedenle elde edilen itme-yerdeğiştirme grafiğine cıvatalı kayma bağlantı elemanlarının etkisi oldukça sınırlı kalmıştır.

PO-PL-ISO ve PO-PL elemanlarından elde edilen başlangıç rijitliği (K_i) değerleri ise sırasıyla 4.7 ve 5.9 mm; azaltılmış rijitlik değerleri (K_{sc}) ise sırasıyla 3.7 ve 4.5 mm'dir. Bu bağlantı elemanlarında hafif çelik kirişte hasar meydana gelmediği için elde edilen rijitlik değerleri doğrudan kayma bağlantı elemanlarının performansı ile ilişkilendirilebilir. Beklenildiği gibi, PO-PL elemanındaki çelik şeritler arasındaki trapez boşlukların betonla dolu dolması nedeniyle kayma bağlantı elemanlarının K_i ve K_{sc} değerleri PO-PL-ISO ya göre sırasıyla %25.5 ve %21.6 daha büyüktür.

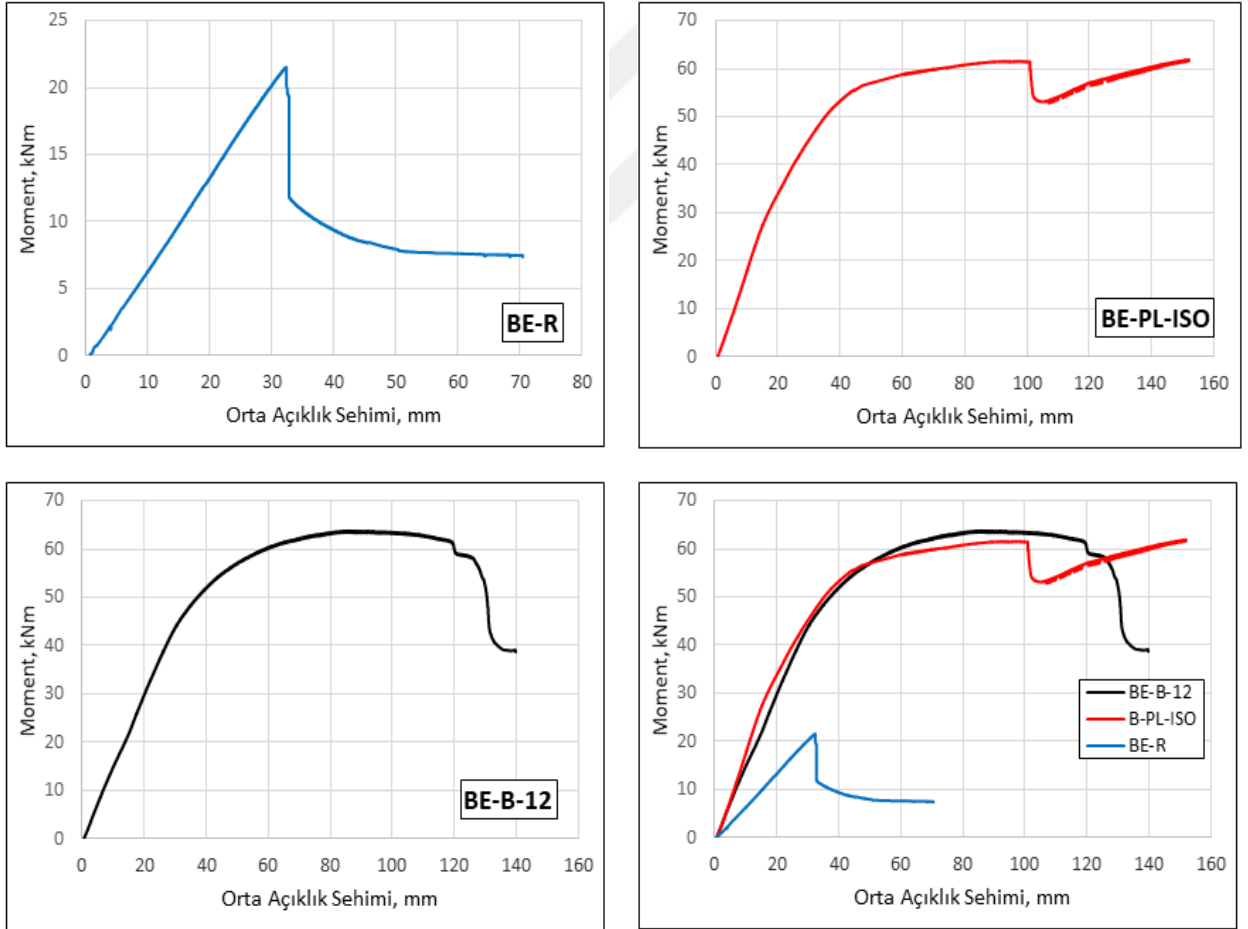
3.3. Eğilme Testi

Eğilme deneylerinde toplam 3 adet 4.5 m uzunluğunda tam ölçekli numune test edilmiştir. Burada BE-R beton döşeme ile çelik kiriş arasında kayma bağlantısı olmayan deney elemanını, BE-B-12 12 mm çapında cıvatalı kayma bağlantısına sahip deney

elemanını ve BE-PL-ISO kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanına sahip deney elemanını temsil etmektedir.

3.3.1. Moment-Sehim Davranışı ve Göçme Durumu

Eğilme deneylerinde okunan yük değerleri momente çevrilerek moment – orta açıklık sehim grafikleri elde edilmiş ve Şekil 60'ta verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen sonuçlar ise Tablo 9'da özetlenmiştir. Bu tabloda M_u maksimum momenti, Δ_{peak} maksimum momente ulaşıldığı andaki sehim, δ_{sol} ve $\delta_{sağ}$ maksimum momente ulaşıldığı anda sırasıyla sol ve sağ uçtaki kaymayı, δ_{sol} maksimum momente ulaşıldığı anda sol ve sağ uçtaki kaymanın ortalamasını, K_i bağlantı elemanlarının başlangıç rijitliğini, K_{sc} ise bağlantı elemanlarının kullanılabilirlik sınır durumu anındaki azaltılmış rijitliğini ifade etmektedir.



Şekil 60. Moment- Orta Açıklık Sehim grafikleri

Tablo 9. Eğilme deneyi sonuçları

Deney Elemanı	M_u (kNm)	Δ_{peak} (mm)	δ_{sol} (mm)	$\delta_{sağ}$ (mm)	δ_{ort} (mm)	K_i (kN/mm)	K_{sc} (kN/mm)
BE-R	21.1	32.3	2.3	3.5	2.9	0.6	0.6
BE-B-12	63.8	86	2.8	1.85	2.3	1.5	1.5
BE-B-ISO	61.7	100.9	5.0	13.7	9.4	1.8	1.6

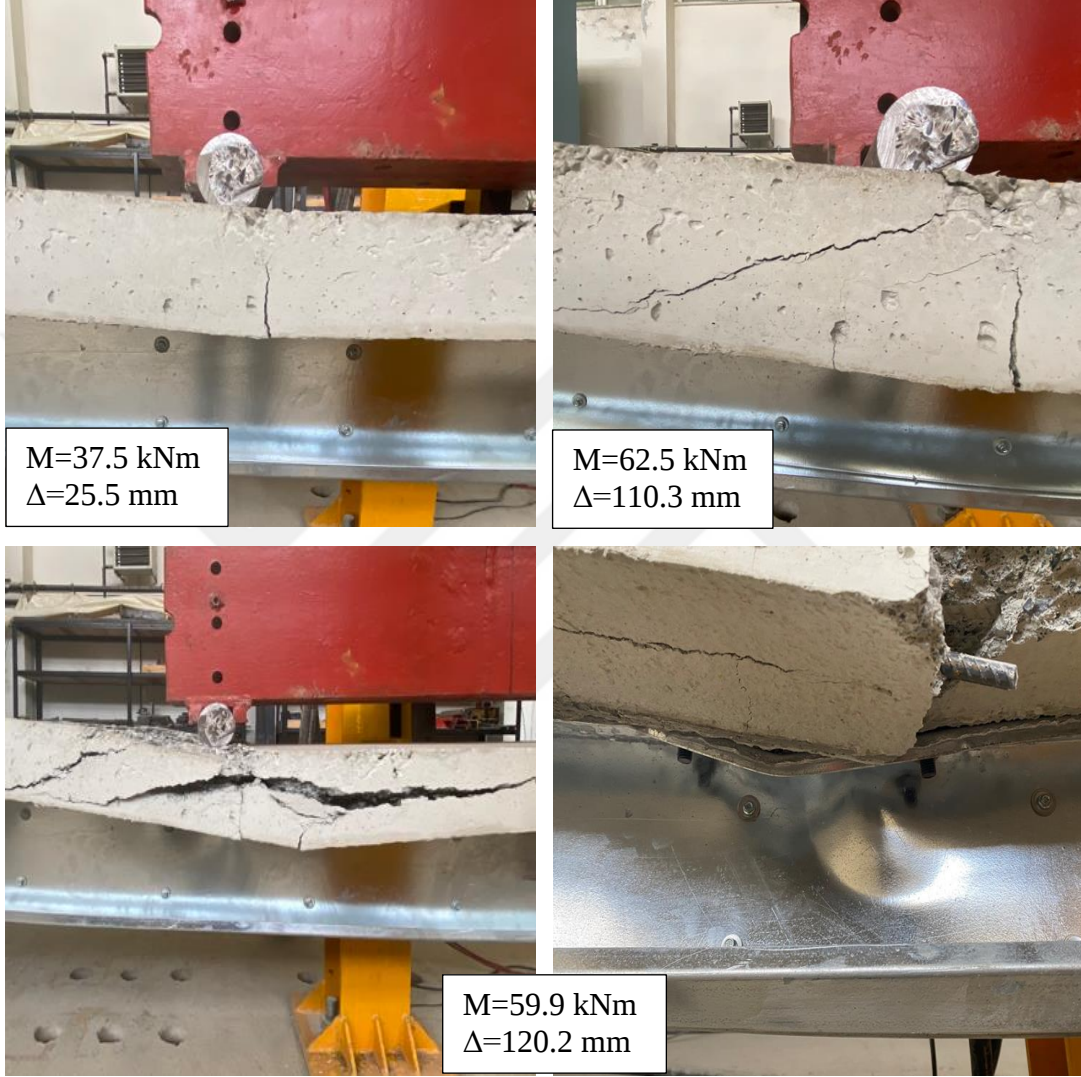
Beton döşeme ile hafif çelik kiriş arasında kayma bağlantısı bulunmayan BE-R numunesi 32.3 mm'lik sehim seviyesinde 21.1 kNm'lik maksimum momente ulaşmıştır. Maksimum momente ulaşmadan hemen önce beton döşemede yükün uygulandığı noktanın altında kılcal bir çatlak meydana gelmiştir. Bunu takiben yaklaşık olarak kiriş orta açıklığında yanal burkulma meydana gelerek deney elemanı yük taşıma kapasitesini aniden kaybetmiştir (Şekil 61).



Şekil 61. BE-R numunesindeki hasarlar

BE-B-12 numunesinde 25.5 mm'lik sehim ve 37.5 kNm'lik moment seviyesinde yükün uygulandığı noktaların altında ilk kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Moment ve sehim arttıkça bu çatlakların genişlikleri de artmıştır. BE-R-12 numunesi 86 mm'lik sehim seviyesinde 63.8 kNm'luk maksimum moment kapasitesine ulaşmıştır. Yaklaşık olarak 120 mm'lik sehim ve 61.4 kNm'lik moment seviyesinde beton döşemenin sol açıklığında kesme

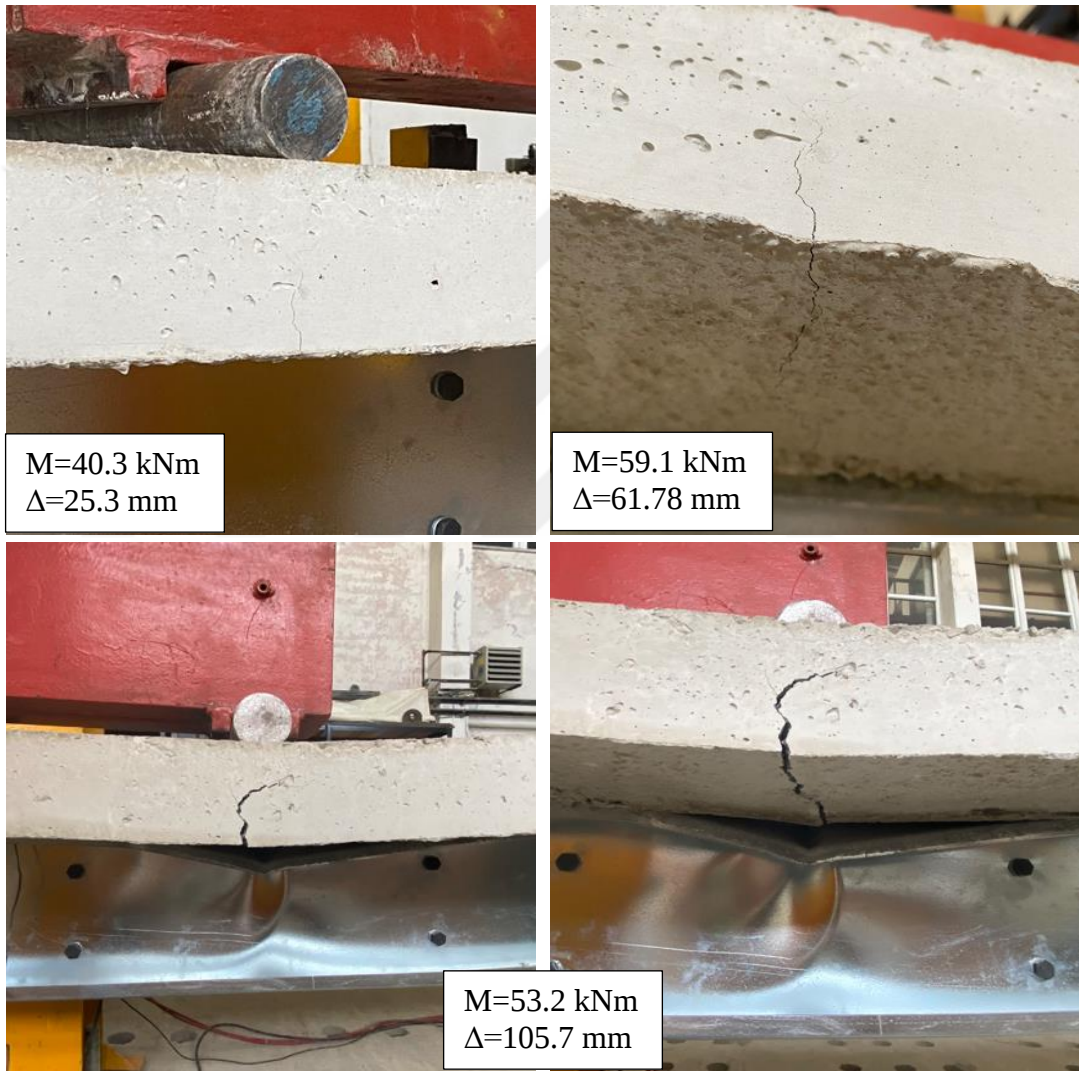
çatlakları oluşmuştur. Hemen ardından kiriş üst başlık ve gövdesinde lokal burkulma, döşemede ise ağır hasar meydana gelerek deney elemanı taşıma gücünü kaybetmiştir (Şekil 62).



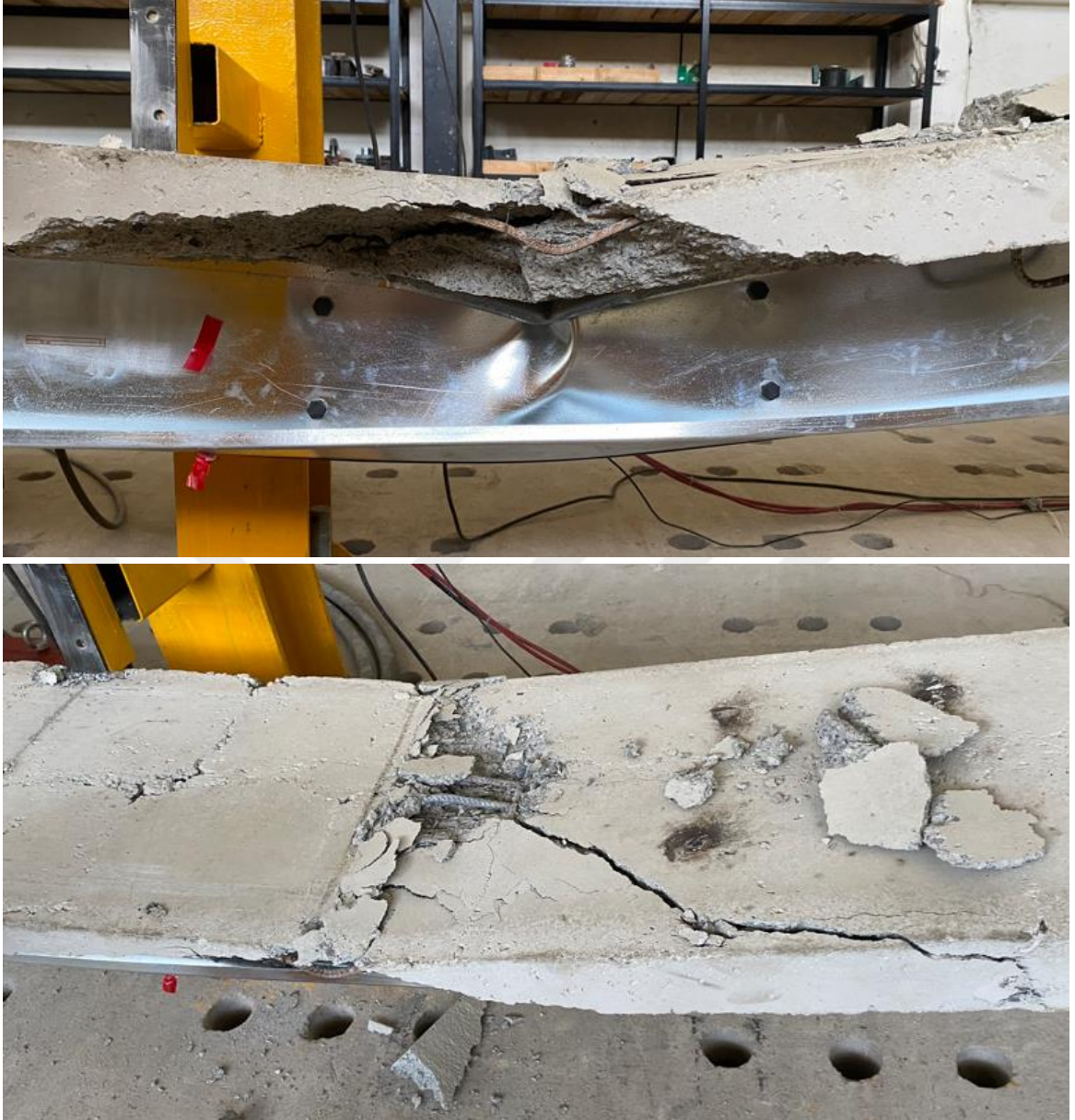
Şekil 62. BE-B-12 numunesindeki hasarlar

BE-PL-ISO numunesinde, BE-B-12 ile benzer şekilde, 25.3 mm'lik sehim ve 40.3 kNm'lik moment seviyesinde yükün uygulandığı noktaların altında ilk kılcal çatlaklar meydana gelmiştir. Moment ve sehim arttıkça bu çatlakların genişlikleri de artmıştır (Şekil 63). BE-PL-ISO numunesi 100.9 mm'lik sehim seviyesinde 61.7 kNm'lik maksimum moment kapasitesine ulaşmıştır. BE-PL-ISO numunesinin maksimum momente ulaşmasından hemen sonra beton döşemenin sağ açıklığında geniş çatlaklar ve kiriş üst başlık ve gövdesinde lokal burkulmaların meydana gelmesiyle moment taşıma kapasitesi

aniden 52.86 kNm'ye düşmüştür. Beton döşeme ile hafif kiriş arasındaki kayma yükünün kiriş başlığı yerine kısmen yalıtılmış kayma bağlantıları ile kiriş gövdesine aktarılıyor olması sayesinde, moment taşıma kapasitesi tekrar artmaya başlayarak 151.78 mm'lik sehimde ve 61.79 kNm'ye ulaşmıştır. Bu seviyede beton basınç bloğunda ezilme ve döşeme boyuna donatısında burkulma meydana gelerek deney elemanı taşıma gücünü kaybetmiştir (Şekil 64).



Şekil 63. BE-PL-ISO numunesindeki ilk tepe noktasına ulaşılan kadar meydana gelen hasarlar

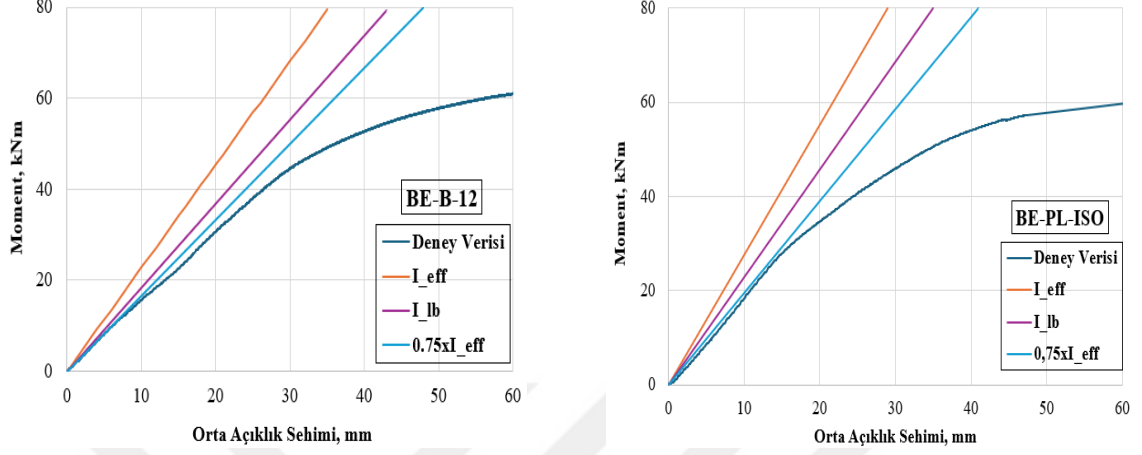


Şekil 64. BE-PL-ISO numunesinde ikinci tepe noktasında oluşan hasarlar

3.3.2. Numunelerin Rijitlikleri

AISC (2010) yönetmeliği kapsamında hesaplanan kesit atalet momenti değerleri, kiriş numunelerinin doğrusal elastik bölgede sergilediği moment-sehim davranışlarını tahmin etmek amacıyla kullanılmıştır. Hesaplanan doğrusal moment-sehim eğrileri ile deneysel olarak ölçülen moment-sehim eğrileri arasındaki karşılaştırma Şekil 65'te sunulmaktadır. Analizin daha anlaşılır olması için, yalnızca ölçülen moment-sehim eğrilerinin başlangıç kısımları gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, I_{eff} ve I_{LB} değerleriyle hesaplanan rijitlikler, test edilen iki kompozit kiriş için deneysel olarak ölçülen rijitliklerin üzerinde yer

almaktadır. Ayrıca, I_{eff} kullanılarak hesaplanan rijitlikler, I_{LB} ile hesaplanan değerlere kıyasla %12 ila %16 oranında daha yüksek bulunmuştur.



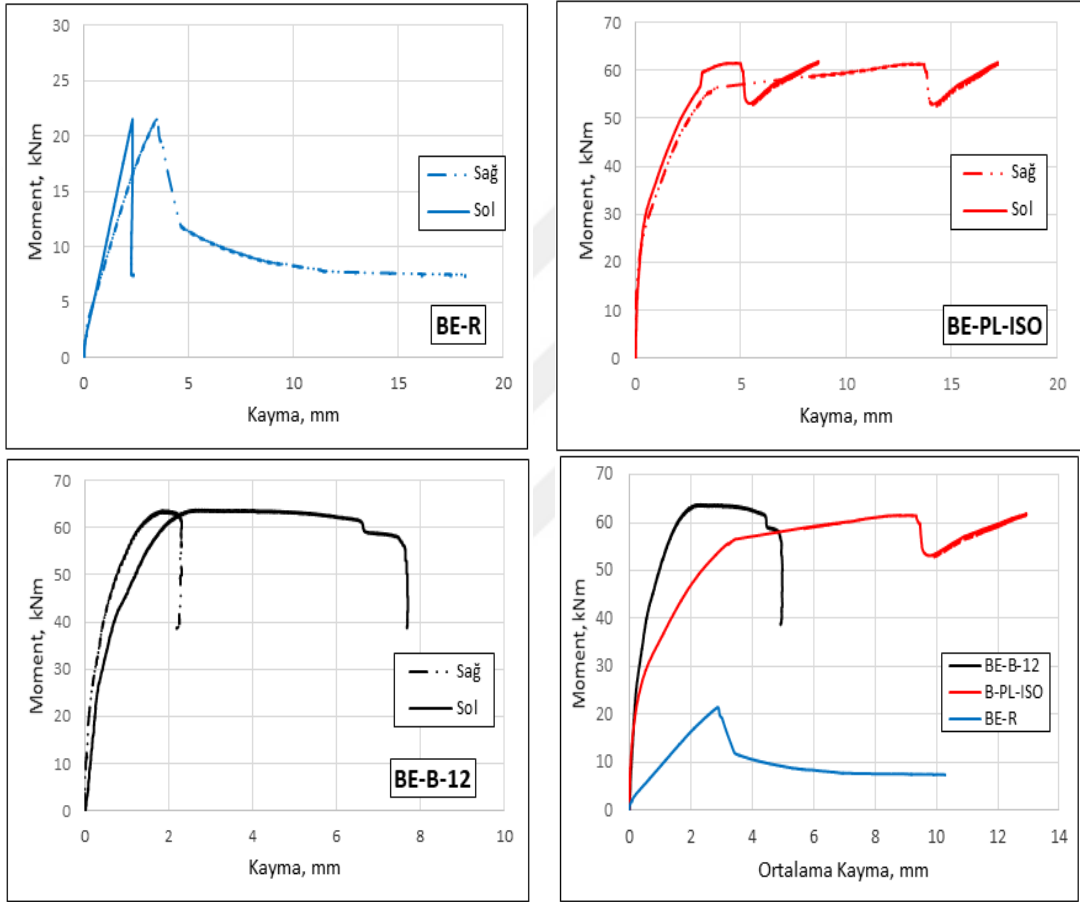
Şekil 65. Numunelerin hesaplanmış rijitlikleri ile ölçülmüş davranışları arasındaki ilişki

AISC (2010) yönetmeliği, doğrusal elastik teoriye (örneğin, tam kompozit kiriş için I_{tr}) göre hesaplanan atalet momentinin, kompozit kirişlerin rijitliğini olduğundan fazla tahmin ettiğini ve servis yükleri altındaki sehimlerin daha doğru tahmin edilebilmesi için bu değer %25 oranında azaltılmasını önerdiğini belirtmektedir. Tam kompozit numuneler (BE-B-12 ve BE-PL-ISO) için Şekil 65'te gösterilen eğriler, atalet momentinin $0.75 \times I_{eff}$ olarak alınması durumunda hesaplanan elastik sehim değerlerinin ölçülen değerlerle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Atalet momentini tam I_{eff} yerine $0.75 \times I_{eff}$ olarak kabul etmek, kısmi kompozit numunelerde de deneysel ölçümlerle tutarlı sonuçlar sağlamaktadır.

3.3.3. Döşeme-Kiriş Arayüz Kayması ve İtme Deneyleri ile İlişkilendirilmesi

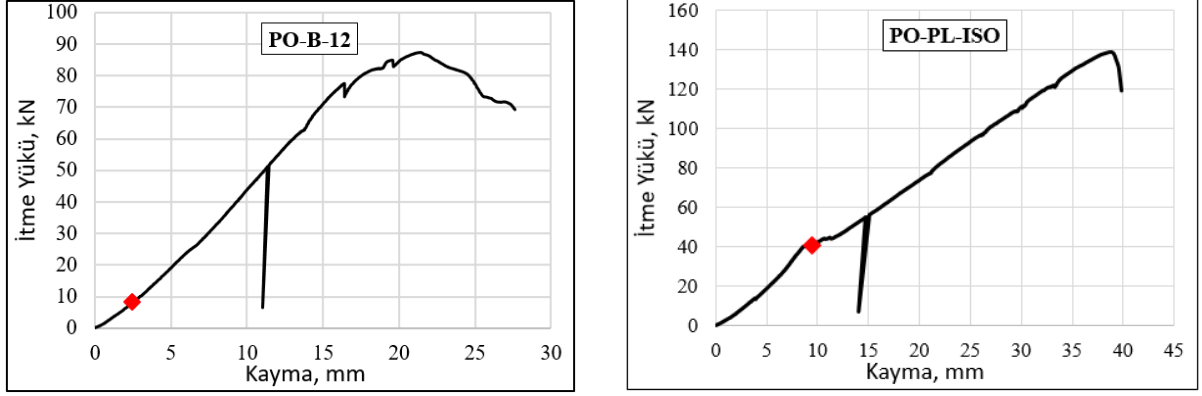
Eğilme deneyleri sırasında kompozit kirişlerin iki ucunda ölçülen hafif çelik kiriş ve beton döşeme arasındaki kayma değişimleri Şekil 66'da verilmiştir. Deneylerin başında bütün numunelerin her iki ucundaki kayma değerleri birbirine yakın ölçülmüştür. Beton döşemede çatlakların oluşmaya başlaması ile hasarlar numunelerin sol ya da sağ açıklığında yoğunlaşmaya başlamıştır. Bu andan itibaren arayüzdeki kayma da hasarın yoğunlaştığı tarafta daha fazla artmaya başlamıştır. Deney sonunda bütün numunelerin bir ucunda büyük miktarda kayma meydana gelirken, diğer uçta daha küçük kaymalar gerçekleşmiştir. BE-R, BE-B-12 ve BE-PL-ISO numuneleri için maksimum moment anında elde edilen ortalama

kayma değerleri ($\delta_{ort} = (\delta_{sağ} + \delta_{sol}) / 2$) sırasıyla 2.9, 2.3 ve 9.4 mm olarak elde edilmiştir. Görüldüğü gibi BE-B-12 elemanı BE-PL-ISO'ya göre çok daha küçük bir kayma değerinde maksimum moment kapasitesine ulaşmıştır. Bu durum BE-B-12 döşemesinde daha erken ve daha yaygın çatlak oluşumunu da açıklamaktadır. Başka bir deyişle, BE-PL-ISO numunesinde hasar beton döşeme yerine kısmen yalıtılmış kayma elemanında yoğunlaşmıştır.



Şekil 66. Döşeme-kiriş arayüz kayma grafikleri

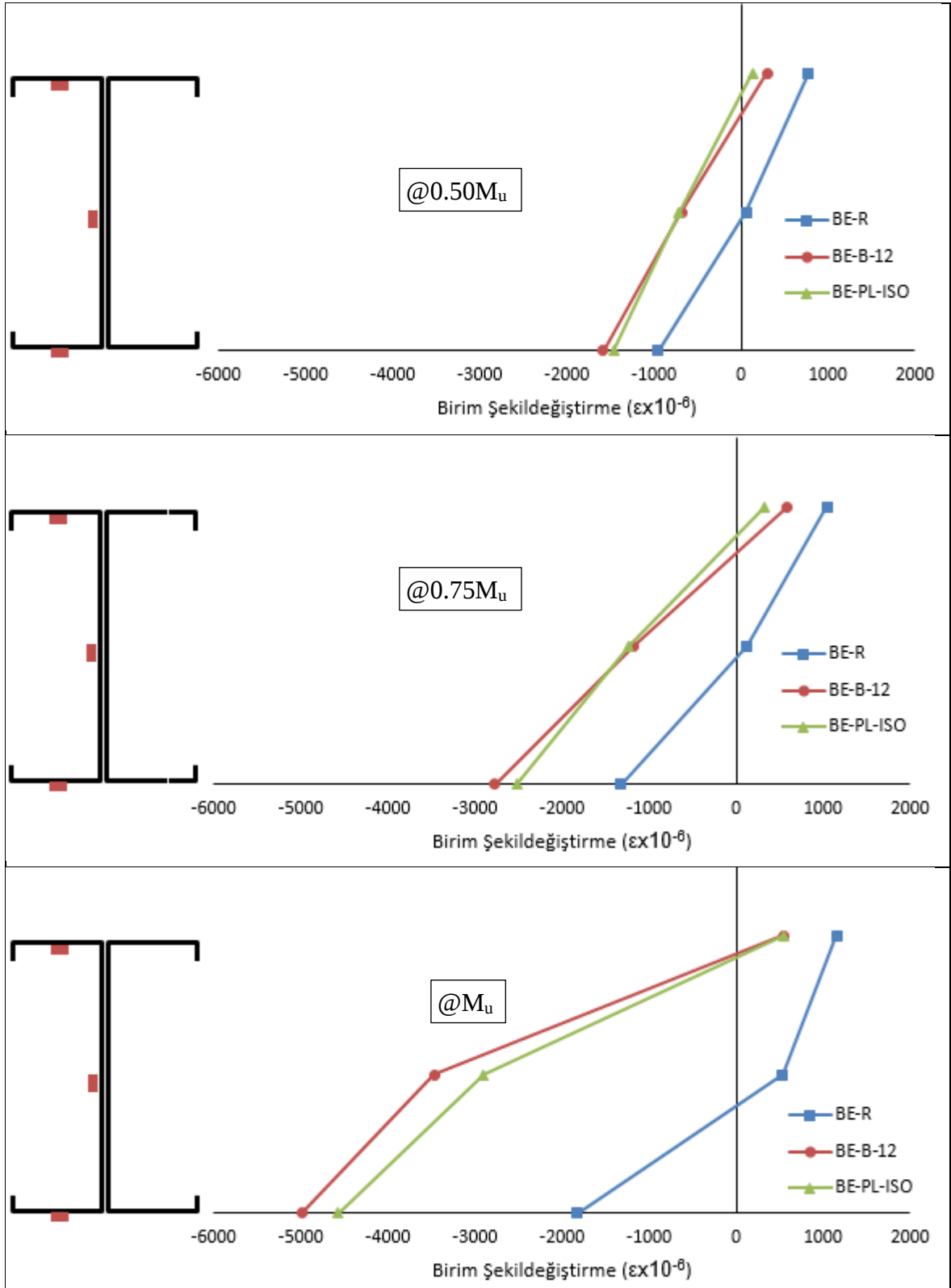
Döşeme-kiriş arayüz kayması ile itme deneylerinden elde edilen sonuçları ilişkilendirmek üzere maksimum moment anında meydana gelen ortalama kayma değerleri itme yükü-kayma grafikleri üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 67). Bu grafikten BE-PL-ISO elemanının maksimum momente ulaştığı anda kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanlarının da akma dayanımına ulaştığı anlaşılmaktadır. Öte yandan, BE-B-12 elemanının maksimum momente ulaştığı anda cıvatalı kayma bağlantı elemanlarının henüz kapasitesinin çok altında olduğu görülmektedir.



Şekil 67. Döşeme-kiriş arayüz kaymasının itme deneyleri ile ilişkisi

3.3.4. Kiriş Orta Açıklık Enkesitinde Birim Şekildeğiştirme Değişimi

Eğilme deney elemanlarının orta açıklık kesitlerinde ölçülen birim şekildeğiştirme değerlerinin kiriş yüksekliği boyunca değişimi $0.50M_u$, $0.75M_u$ ve M_u anı için Şekil 68’de verilmiştir. BE-R elemanındaki birim şekildeğiştirme değerleri incelendiğinde, beton döşeme ile kiriş arasında yük aktarımı olmadığı için, tarafsız eksenin maksimum moment anına kadar kiriş ağırlık merkezine yakın olduğu görülmektedir. Kiriş alt ve üst başlığındaki birim şekildeğiştirme değerleri birbirine oldukça yakında olup elastik düzeydedir. Maksimum moment anında ise kiriş alt başlığı akma birim uzamasına ($\epsilon=2000 \times 10^{-6}$) ulaşmıştır. Şekil 68’den BE-B-12 ve BE-PL-ISO elemanlarındaki kirişler $0.50M_u$ anına kadar elastik kaldığı anlaşılmaktadır. $0.75M_u$ anında her iki deney elemanının da alt başlığındaki birim uzama plastik seviyede iken üst başlıklardaki birim kısalmalar oldukça küçüktür. Maksimum moment (M_u) anında ise alt başlıktaki birim uzamaların daha da arttığı, kesitin ortasındaki birim uzamalarında plastik aşamaya geçtiği, üst başlıktaki birim kısalmanın ise hala elastik seviyede kaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, Şekil 68’den eğilme deneyleri boyunca BE-B-12 ve BE-PL-ISO elemanlarında tarafsız eksenin üst başlığa çok yakın olduğu ve kiriş kesitinin çok büyük bölümünün çekme etkisinde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 68. Kiriş orta açıklık kesitinde birim şekildeğiştirme değişimi

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, hafif çelik-beton kompozit kirişler için yeni bir mekanik kayma bağlantısı tasarlanmış ve performansı deneysel olarak incelenmiştir. Tasarlanan bağlantı elemanının performansı, uygulamada yaygın olarak kullanılan cıvatalı kayma bağlantı elemanları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, itme ve eğilme testleri olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen bulgular ve gözlemler doğrultusunda varılan sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

İtme deneyleri:

- 8 mm çapında cıvatalı kayma bağlantı elemanı kullanılması durumunda hasarlar önce bağlantı elemanında eğilme şeklinde, daha sonra hafif çelik kiriş başlığındaki cıvata deliği kenarında ezilme ve yırtılma şeklinde ortaya çıkmakta ve sonuç olarak göçmeye kiriş başlığı neden olmaktadır.
- 8 mm çapından büyük cıvatalı kayma bağlantı elemanları kullanılması durumunda ise hasarın tamamı hafif çelik kiriş başlığında yoğunlaşmakta ve bağlantı elemanında hasar meydana gelmemektedir. Davranışa kiriş başlığının hâkim olması nedeniyle, elde edilen itme yükü, kayma ve rijitlik değerleri arasında kayda değer bir fark meydana gelmemektedir. Bu nedenle elde edilen sayısal veriler ile bağlantı elemanı boyutları arasında ilişki kurmak mümkün değildir.
- Önerilen kayma bağlantı elemanı ile sistemin itme yükü taşıma kapasitesi ve sünekliği, cıvatalı kayma bağlantı elemanlarına göre, önemli oranda artmıştır.
- Önerilen kayma bağlantı elemanının kiriş başlığı yerine kiriş gövdesine birleştirilmiş olması sayesinde, itme deneyleri boyunca hafif çelik kirişte hasar meydana gelmemiştir. Beklendiği gibi, hasarın tamamı önerilen kayma bağlantı elemanında yoğunlaşmıştır.
- Önerilen kayma bağlantı elemanlarına ait itme yükü – kayma grafiklerinde belirgin akma bölgesi görülmektedir.
- Önerilen kayma bağlantı elemanının betondan kısmen izole edilmesi beton döşemede çatlak oluşumunu geciktirmiş ve sünekliği artırmıştır. Ancak itme yükü taşıma kapasitesi değişmemiştir.

- Cıvatalı kayma bağlantı elemanları kullanılması durumunda itme yükü taşıma kapasitesine hafif çelik kiriş başlığının yırtılması ile ulaşılrken, önerilen kayma bağlantı elemanının kullanılması durumunda beton döşemenin parçalanması ile ulaşılmaktadır.

Eğilme Deneyleri:

- Bağlantı elemanı bulunmayan deney elemanının sonuçları ile kıyaslandığında, kayma bağlantı elemanlarının kompozit kirişlerin davranışlarını çok büyük oranda değiştirdiği anlaşılmaktadır.
- BE-B-12 ve BE-PL-ISO elemanlarının moment, sehim ve rijitlik değerleri birbirine oldukça yakındır.
- BE-B-12 ve BE-PL-ISO elemanlarında göçme kiriş başlığının lokal olarak burkulması ile meydana gelmiştir. BE-B-12’de kayma bağlantı elemanlarının kiriş başlığına birleştirilmiş olması ile lokal burkulma BE-PL-ISO’ya göre daha geç meydana gelmiştir. Bu durum önerilen bağlantı elemanının olumsuz özelliklerinden birisidir.
- Kiriş başlığında lokal burkulma olduktan sonra BE-B-12 yük taşıma kapasitesini tamamen kaybederken BE-PL-ISO’da sınırlı bir kapasite kaybı olmuştur. Ancak daha sonra BE-PL-ISO’nun yük taşıma kapasitesi tekrar artmaya başlayarak ikinci kez pik noktasına ulaşmıştır.
- Kısmen yalıtılmış kayma bağlantısı kullanılan deney elemanında beton-kiriş arayüz kayması cıvatalı kayma bağlantısı kullanılan deney elemanına göre daha fazladır.
- Deney elemanları maksimum moment kapasitesine ulaştığı anki arayüz kaymaları ile itme yükü-kayma grafikleri ilişkilendirildiğinde kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanlarının akma dayanımını aştıkları görülmektedir. Cıvatalı elemanının ise henüz kapasitesinin çok altında olduğu görülmektedir. Ancak, cıvatalı kayma bağlantı elemanları üzerinde yapılan itme deneylerinde davranışa kiriş başlığının hâkim olması nedeniyle itme yükü-kayma grafikleri ile moment-sehim grafiklerinin ilişkilendirilmesi mümkün görünmemektedir.
- Kiriş orta açıklık kesiti boyunca meydana gelen birim şekildeğiştirmelere göre, BE-R elemanında tarafsız eksen kiriş ağırlık merkezine yakınken, BE-B-12 ve BE-PL-ISO elemanlarında kiriş üst başlığına kaymıştır. Böylelikle hafif çelik kiriş

enkesiti çok büyük oranda çekme gerilmelerine, beton döşeme ise basınç gerilmelerine direnmiştir.

- AISC (2010) yönetmeliğinde belirtilen etkili atalet momenti (I_{eff}) değerleri $0.75 \times I_{eff}$ olarak alındığında, hesaplanan rijitliklerin deneysel olarak elde edilen davranışlarla kabul edilebilir bir uyum gösterdiği görülmüştür.



5. ÖNERİLER

Yüksek Lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, hafif çelik-beton kompozit kirişler için kısmen yalıtılmış kayma bağlantısı deneysel incelenmiştir. Bu tez konusu ile çalışma yapmak isteyen araştırmacılara ve uygulayıcılara aktarılacak istenen öneriler aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- İtme deneylerinde görüldüğü gibi, hafif çelik-beton kompozit kirişlerde 8 mm çapından büyük cıvatalı kayma bağlantı elemanlarının kullanılması durumunda hasar kiriş başlığında yoğunlaşmaktadır. Bu durumda Eurocode 4'te kayma bağlantı elemanları için verilen değerlendirme yaklaşımlarının hafif çelik kirişler için kullanılması mümkün olmamaktadır.
- Yeni bağlantı elemanlarının tasarımında yalnızca itme deneyi yapılması bağlantı elemanı performansının belirlenmesi açısından yeterli değildir. Bu çalışmada önerilen kısmen yalıtılmış kayma bağlantı elemanı, itme deneylerinde diğer cıvatalı bağlantı elemanına göre üstün bir performans sergilemiş olsa da eğilme deneylerinde böyle bir fark meydana gelmemiştir.

6. KAYNAKLAR

Abaqus/CAE User's Manual, version 6.14-2, USA, 2014.

Alhajri, T. M., Tahir, M. M., Azimi, M., Mirza, J., Lawan, M. M., Alenezi, K. K., & Ragaee, M. B. (2016). Behavior of pre-cast U-shaped composite beam integrating cold-formed steel with ferro-cement slab. *Thin-Walled Structures*, 102, 18–29.

American Institute of Steel Construction. (2010). ANSI/AISC 360-10: Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, IL.

American Institute of Steel Construction. (2016). ANSI/AISC 360-16: Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, IL.

American Iron and Steel Institute. (2012). AISI-S100: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Washington, DC.

Ataei, A., Mahmoudy, S. A., Zeynalian, M., Chiniforush, A. A., & Ngo, T. D. (2023). Experimental study of innovative bolted shear connectors in demountable cold-formed steel–concrete composite beams. *Thin-Walled Structures*, 192, Article 111116.

Bamaga, S. O., Tahir, M. M., Tan, C. S., Shek, P. N., & Aghlara, R. (2019). Push-out tests on three innovative shear connectors for composite cold-formed steel concrete beams. *Construction and Building Materials*, 223, 288–298.

Bamaga, S. O., Zafar, A., Kim, B., & Nguyen, K. T. (2019). Push-out tests on three innovative shear connectors for composite cold-formed steel concrete beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 161, 110-123.

Bezerra, L. M., Oliveira, D. R., Rocha, J. J. S., & Santiago, R. S. (2018). V-shaped shear connector for composite steel-concrete beam. *Journal of Constructional Steel Research*, 145, 227–238.

Divya, M., Kumar, R. S., George, P., Jayabalan, P., Tsavdaridis, K. D., & Bahrudeen, A. (2023). Development of novel shear connectors for cold-formed steel concrete composite beams. *Construction and Building Materials*, 387, Article 131644.

European Committee for Standardization. (2004). EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4 - Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels.

European Committee for Standardization. (2006). EN 1993-1-3:2006 Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-3: General Rules - Supplementary Rules for Cold-Formed Members and Sheeting. Brussels.

European Committee for Standardization. (2014). EN 1993-1-1:2014 Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Brussels.

- Hanaor, A. (2000). Tests of composite beams with cold-formed sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 54(1), 57–89.
- Hancock, G. J. (2003). Cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 59(4), 473–487.
- Hosseinpour, E., & Abbasnia, R. (2018). Push-out test on the web opening shear connectors in composite beam: Experimental and analytical study. *Journal of Constructional Steel Research*, 144, 221–236.
- Hosseinpour, M., Zeynalian, M., Ataei, A., & Daei, M. (2021). An experimental study on structural performance of U-shaped shear connector in composite cold-formed steel floor joists. *Engineering Structures*, 249, Article 113379.
- Hosseinpour, M., Zeynalian, M., Ataei, A., & Daei, M. (2021). Push-out tests on bolted shear connectors in composite cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*, 164, Article 107831.
- Hosseinpour, M., Zeynalian, M., Daei, M., & Ataei, A. (2022). Numerical study on behavior of bolted shear connector used in composite cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*, 177, Article 109377.
- Hosseinpour, M., Zeynalian, M., Daei, M., & Ataei, A. (2022). Numerical study on behavior of bolted shear connector used in composite cold-formed steel beams. *Thin-Walled Structures*, 177, Article 109377.
- Irwan, J. M., Hanizah, A. H., & Azmi, I. (2009). Test of shear transfer enhancement in symmetric cold-formed steel–concrete composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(12), 2087–2098.
- Irwan, J. M., Hanizah, A. H., Azmi, I., & Koh, H. B. (2011). Large-scale test of symmetric cold-formed steel (CFS)–concrete composite beams with BTTST enhancement. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(5), 720–726.
- Jianguo, N., & Zhiwu, Y. (1999). Research and practice of composite steel-concrete beams in China. *China Civil Engineering Journal*, 32(2), 3–8.
- Karamanoğlu, M., & Ulay, G. (2017). Deprem riski yüksek bölgelerde iç mekân düzenlemelerinin incelenmesi (Tosya örneği). *Journal of Forestry Faculty*, 17(1), 186–193.
- Karimipannah, A., Zeynalian, M., & Ataei, A. (2024). A numerical study on a novel demountable cold-formed steel composite beam with profiled steel sheeting. *Thin-Walled Structures*, 199, Article 111812.
- Kyvelou, P., Gardner, L., & Nethercot, D. A. (2017). Testing and analysis of composite cold-formed steel and wood-based flooring systems. *Journal of Structural Engineering*, 143(11), Article 04017146.

- Öztürk, F. (2021). Sigma Kesitli Hafif Çelik Profillerin Eksenel ve Eksantrik Yükleme Altındaki Davranışlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Trabzon.
- Pavlović, M., Marković, Z., Veljković, M., & Buđevac, D. (2013). Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests. *Journal of Constructional Steel Research*, 88, 134–149.
- Rahnavard, R., Craveiro, H. D., Lopes, M., Simões, R. A., Laím, L., & Rebelo, C. (2022). Concrete-filled cold-formed steel (CF-CFS) built-up columns under compression: Test and design. *Thin-Walled Structures*, 177, Article 109603.
- Rahnavard, R., Craveiro, H. D., Simões, R. A., Laím, L., & Santiago, A. (2023). Test and design of built-up cold-formed steel-lightweight concrete (CFS-LWC) composite beams. *Thin-Walled Structures*, 193, Article 111211.
- Salih, M. N. A., Tahir, M. M., Mohammad, S., & Ahmad, Y. (2019). Behavior of boxed cold-formed steel as composite beam with rebar as shear connector. In H. Rodrigues & A. Elnashai (Eds.), *Proceedings of the 2nd GeoMEast International Congress and Exhibition on Sustainable Civil Infrastructures* (pp. 324–332). Springer.
- Shakarami, M., Zeynalian, M., & Ataei, A. (2023). Numerical study of the behavior of friction-grip bolted shear connectors in composite beams with cold-formed steel sections. *Thin-Walled Structures*, 184, Article 110539.
- TS EN 10346, 2016. Sıcak daldırmayla sürekli olarak kaplanmış çelik yassı mamuller- Teknik teslim şartları.
- TS EN ISO 6892-1., 2016. Metalik malzemeler- Çekme deneyi- Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY (2018). Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- URL-1. (2024, Kasım 11). Doğa Tepe Çelik Yapı: <https://dogatepecelikyapi.com/wp-content/uploads/2024/01/36-1.jpg> adresinden alınmıştır.
- URL-2.(2024,Kasım11).Döşeme:<https://mimdap.org/wp-content/uploads/haber/11Mart2010/Doseme.jpg> adresinden alınmıştır.
- RL-3. (2024, Kasım 11). Stud Çivisi: https://www.studcivifiatlari.com/images/galeri/th_stud-civisi-19-jpg-stud-civileri.jpg adresinden alınmıştır.
- Wehbe, N., Bahmani, P., & Wehbe, A. (2013). Behavior of concrete/cold-formed steel composite beams: Experimental development of a novel structural system. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 51–59.
- Xingyou, L., Hongxing, L., & Hanbin, G. (2016). Effective width method for distortional buckling strength prediction of cold-formed lipped channel sections. *Thin-Walled Structures*, 107, 401–411.

- Zeynalian, M. (2015). Numerical study on seismic performance of cold-formed steel sheathed shear walls. *Advances in Structural Engineering*, 18(11), 1819–1828.
- Zeynalian, M., & Ronagh, H. R. (2013). Experimental study on seismic performance of strap-braced cold-formed steel shear walls. *Advances in Structural Engineering*, 16(2), 245–257.
- Zeynalian, M., Bolkhari, S., & Rafeei, P. (2018). Structural performance of cold-formed steel trusses used in electric power substations. *Journal of Constructional Steel Research*, 147, 53–61.



ÖZGEÇMİŞ

Fatih CEBİR, 2019 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. Aynı yıl, Sakarya Üniversitesi Yapı Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Yüksek lisans sürecinde, yurt içi ve yurt dışı projelerinde çelik proje mühendisliği yaparak statik projelerin hazırlanması, imalat süreçlerinin planlanması ve montaj aşamalarında görev almıştır.

2023 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak göreve başlamış ve yüksek lisans eğitimine burada devam etmiştir. Hâlen Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.