Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:2 (2023) 975-987

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

An investigation of strain hardening factor for link beams made of European H- and I-shapes

Haluk Emre Alçiçek*, Cüneyt Vatansever
Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, İstanbul Technical University, 34469 Sarıyer, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Strain hardening factor for short, intermediate and long links
- Finite element model of link beams
- Finite element analyses under quasi-static cyclic loading

Keywords:

- Link beams
- Strain hardening factor
- Finite element analysis
- Cyclic loading

Article Info:

Research Article
Received: 16.02.2022
Accepted: 23.04.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1074538

Correspondence:

Author: Haluk Emre Alçiçek
e-mail: alcicek@itu.edu.tr
phone: +90 533 294 3216

Graphical/Tabular Abstract

In steel eccentrically braced frames (EBF), plastic deformations are confined to link beams under strong earthquake ground motions and seismic energy is dissipated through yielding of link beams. For an EBF, the capacity design principle requires that connections, columns, braces, and beam segments outside of the link be designed to remain essentially elastic while the link beams fully yield and strain harden during the design earthquake. For the design of all structural components other than link beams, the required strengths must be obtained with the combination of the factored gravity forces plus the forces produced by the adjusted shear strength of the link that contains the effect of strain hardening, using the load combinations including the overstrength seismic load. Strain hardening factors which are considered to obtain overstrength factor are specified in TBSC (Turkey Building Seismic Code) 2018 for the structural components outside of the link. Analysis results given in the Figure A indicate that the strain hardening factor of 1.25 which are specified in TBSC 2018 is unconservative for link beams.

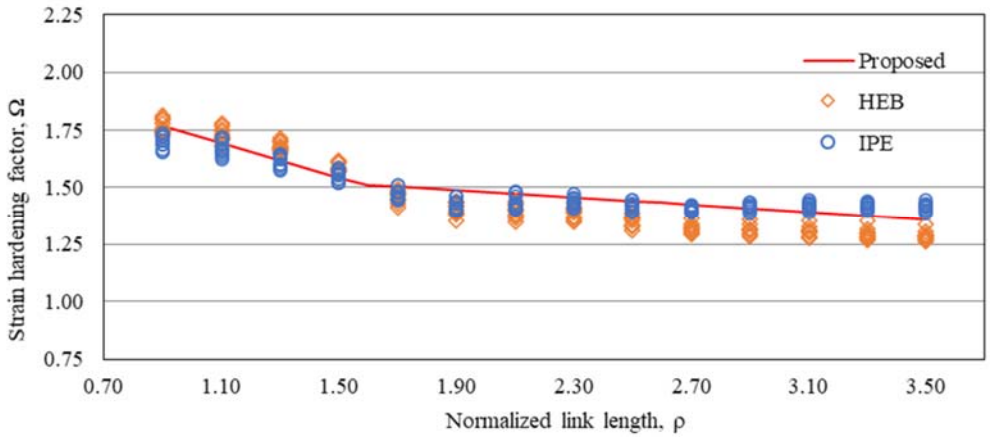


Figure A. Strain hardening factors for IPE and HEB steel shapes

Purpose:
The aim of this study is to provide comprehensive investigation on the strain hardening factor for a wide range of link beams made of European H- and I- shapes (IPE and HEB) profiles. A total of 280 finite element analyses have been conducted under quasi-static cyclic loading and the strain hardening factors for short, intermediate and long link beams have been studied.

Theory and Methods:
A reference link beam specimen consisting of IPE200 was tested under quasi-static cyclic loading. Finite element model of the link beam was developed and verified based on the test results. A number of 280 link beam models were analyzed under quasi-static cyclic loading and strain hardening factors were investigated.

Results and Conclusion:
Results obtained from the numerical investigation show that strain hardening factor of 1.25 which are specified in TBSC 2018 is unconservative for link beams. It is found that strain hardening factor straightly depends on normalized link lengths. Equations to predict the strain hardening factor were developed and proposed based on the normalized link length.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:2 (2023) 975-987

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

H- ve I- enkesitli Avrupa profillerinden teşkil edilen bağ kirişlerinde pekleşme katsayısının incelenmesi

Haluk Emre Alçiçek*, Cüneyt Vatansever
İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469 Sarıyer İstanbul, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Kısa, orta ve uzun bağ kirişlerinde pekleşme katsayıları
- Bağ kirişi sonlu eleman modelleri
- Tekrarlı tersinir (çevrimsel) yükleme altında sonlu eleman analizleri

Makale Bilgileri
Araştırma Makalesi
Geliş: 16.02.2022
Kabul: 23.04.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.1074538

Anahtar Kelimeler:
Bağ kirişleri,
pekleşme katsayısı,
sonlu eleman analizi,
çevrimsel yükleme

ÖZ

Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler (DMÇÇÇ), deprem etkisinde plastik şekil değiştirmelerin sadece bağ kirişlerinde oluştuğu ve yapı sistemine etkiyen deprem enerjisinin akmaya ulaşan bağ kirişlerinin dönme deformasyonları ile sönümlendiği yatay yük taşıyıcı sistemlerdir. DMÇÇÇ sistemlerde birleşimler, kolonlar, çaprazlar ve bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümleri pekleşme etkilerinin de dikkate alındığı, bağ kirişinin plastikleşmesine neden olan yükleme durumu altında hesaplanan tasarım kuvvetlerini karşılayacak şekilde boyutlandırılmaktadır. Bağ kirişi dışındaki elemanların tamamen elastik kalmasının sağlanması amacıyla tasarım dayanımlarının, deprem etkileri altında hesaplanan iç kuvvetlerin tasarım büyütme katsayısı ile büyütülerek yük birleşimlerinde kullanılması ile elde edilmesi gerekmektedir. Tasarım büyütme katsayılarının hesabında esas alınan pekleşme etkileri, TBDY 2018'de tanımlanan pekleşme katsayıları ile dikkate alınmaktadır. Çalışma kapsamında Avrupa tipi I-enkesitli (dar başlıklı / IPE) ve H-enkesitli (geniş başlıklı / HEB) çelik profiller ile teşkil edilen bağ kirişleri için pekleşme katsayısının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda 280 adet bağ kirişinin doğrusal olmayan sonlu eleman modelleri tekrarlı tersinir (çevrimsel) yükleme altında analiz edilerek, kısa, orta ve uzun bağ kirişleri için pekleşme katsayıları elde edilmiştir. Elde edilen katsayılar değerlendirildiğinde, TBDY 2018 kapsamında 1,25 olarak belirtilen pekleşme katsayısının yeterli olmadığı değerlendirilmiş, kısa, orta ve uzun bağ kirişleri için normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğuna bağlı pekleşme katsayıları önerilmiştir.

An investigation of strain hardening factor for link beams made of European H- and I-shapes

HIGHLIGHTS

- Strain hardening factor for short, intermediate and long links
- Finite element model of link beams
- Finite element analyses under quasi-static cyclic loading

Article Info
Research Article
Received: 16.02.2022
Accepted: 23.04.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.1074538

Keywords:
Link beams,
strain hardening factor,
finite element analysis,
cyclic loading

ABSTRACT

In steel eccentrically braced frames (EBF), plastic deformations are confined to link beams under strong earthquake ground motions and seismic energy is dissipated through yielding of link beams. For an EBF, the capacity design principle requires that connections, columns, braces, and beam segments outside of the link be designed to remain essentially elastic while the link beams fully yield and strain harden during the design earthquake. For the design of all structural components other than link beams, the required strengths must be obtained with the combination of the factored gravity forces plus the forces produced by the adjusted shear strength of the link that contains the effect of strain hardening, using the load combinations including the overstrength seismic load. Strain hardening factors which are considered to obtain overstrength factor are specified in TBSC (Turkey Building Seismic Code) 2018 for the structural components outside of the link. The aim of this study is to provide comprehensive study on the strain hardening factor for a wide range of link beams made of European H- and I- shapes (IPE and HEB) profiles. A total of 280 finite element analyses have been conducted under quasi-static cyclic loading and the strain hardening factors for short, intermediate and long link beams have been studied. Results show that strain hardening factor of 1.25 is unconservative for link beams. Therefore, strain hardening factors for short, intermediate and long links, were also proposed based on the normalized link length.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *alcicek@itu.edu.tr, cuneyt.vatansever@ itu.edu.tr / Tel: +90 533 294 3216

1. Giriş (Introduction)

Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveli (DMÇÇÇ'li) sistemler yatay yüklerin taşınmasında tercih edilen en etkin taşıyıcı sistemlerden birisidir [1]. DMÇÇÇ'lerde çaprazlar kirişlere bağ kirişi oluşturacak şekilde dışmerkez olarak bağlanmaktadır. DMÇÇÇ'lerin tasarımı, her bir çapraz elemanın en az bir ucunda bağ kirişi bulunacak şekilde yapılmaktadır [2].

Moment aktaran çelik çerçeve (MAÇÇ) sistemlerin en önemli özelliklerinden biri yüksek süneklige sahip olmalarıdır [3]. Merkezi çaprazlı çelik çerçeveli (MÇÇÇ'li) sistemlerin karakteristik özelliklerinden biri de yüksek yatay rijitliğe sahip olmalarıdır [4]. MAÇÇ'lerin sağladığı yüksek süneklik ve MÇÇÇ'lerin sahip olduğu yüksek yatay rijitlik özellikleri DMÇÇÇ'ler ile tek bir taşıyıcı sistemde toplanmaktadır [1, 5]. Bu sistemlerde bağ kirişlerinin kesme, eğilme, eğilme ve kesmenin ortak etkisinde plastikleşmesi ile yüksek seviyede enerji sönümleme kapasitesi elde edilmektedir [5]. DMÇÇÇ'lerin yatay yükler altında davranışı, uzun bağ kirişi teşkil edilmesi halinde, moment aktaran çelik çerçeve davranışına, kısa bağ kirişi oluşturulması durumunda merkezi çaprazlı çelik çerçeve davranışına yaklaşmaktadır.

Bağ kirişlerinin plastik davranışları, normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğu, ρ olmak üzere, bağ kirişi uzunluklarının belirli $\rho M_p/V_p$ değerlerine göre karşılaştırılması yapılarak tanımlanmaktadır. Bağ kirişi uzunluğunun $1{,}6M_p/V_p$ değerinden az olması halinde, kesme etkisi altında plastik şekildeğiştirme meydana gelmektedir ve bu uzunluğa sahip bağ kirişlerine "kısa bağ kirişi" adı verilmektedir. Bağ kirişi uzunluğunun $2{,}6M_p/V_p$ değerinden daha büyük olması halinde bağ kirişinde eğilme etkisi altında plastik şekildeğiştirme meydana gelmekte ve bu durumda bağ kirişi "uzun bağ kirişi" olarak tanımlanmaktadır. Bağ kirişi uzunluğunun $1{,}6M_p/V_p$ ile $2{,}6M_p/V_p$ değerleri arasında bulunması halinde ise, eğilme – kesme etkileşimi ile plastik şekildeğiştirme oluşmaktadır, bu bağ kirişlerine de "orta uzunlukta bağ kirişi" adı verilmektedir.

Yapı sisteminin taşıyıcılığını kaybetmemesi amacıyla, bağ kirişinin plastik deformasyonu sırasında, çaprazların, kolonların, bağ kirişi dışında kalan kiriş bölümlerinin (çevre elemanların) ve bunların birleşimlerinin elastik düzeyde kalması beklenmektedir [1]. Dolayısıyla, bu elemanların ve birleşimlerinin tasarımında pekleşme etkilerinin de dikkate alındığı, bağ kirişinin plastikleşmesine neden olan yükleme durumlarının dikkate alınması gerekmektedir. Arttırılmış yüklerin hesabında kullanılması gereken bağ kirişinin maksimum kesme kuvveti dayanımı Eş. 1 ile verilmektedir [6].

$$V_{maks} = \Omega R_y V_n \quad (1)$$

Eş. 1'de V_{maks}, bağ kirişi maksimum kesme kuvveti dayanımını, Ω, pekleşme katsayısını, R_y, beklenen (olası) akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranını, V_n, bağ kirişi karakteristik kesme kuvveti dayanımını temsil etmektedir.

Roeder ve Popov [1] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada kesme etkisinde plastikleşen bağ kirişlerine sahip iki adet DMÇÇÇ test edilmiş ve çalışma sonucuna göre çevre elemanların elastik kalmasını sağlayacak pekleşme katsayısının kısa bağ kirişleri için 1,50 olarak dikkate alınması önerilmiştir. Engelhardt ve Popov [5] Amerikan tipi geniş başlıklı profillerden imal edilen uzun bağ kirişlerinde pekleşme katsayısının 1,20 ile 1,30 arasında bulunduğunu belirtmişlerdir. Itani vd. [7] yapma enkesitli kısa bağ kirişleri için pekleşme katsayısını 1,80 olarak bulmuşlardır. Okazaki ve Engelhardt [8] A992 malzemesinden imal edilmiş bağ kirişlerinin çevrimsel yükleme altında davranışlarını incelemiş ve pekleşme katsayılarını ρ<1,7 için 1,41, ρ>1,70 için ise 1,20 olarak elde etmişlerdir. Mohebkhah ve Chegeni [9] S235 malzemeden imal edilen Avrupa tipi IPE270 enkesitli kısa, orta ve uzun bağ kirişlerini incelemişlerdir. Çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilen doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri sonucunda pekleşme katsayılarının kısa, orta ve uzun bağ kirişleri için sırasıyla 1,60, 1,37 ve 1,40 olarak elde edildiği belirtilmiştir. Rijitlik levhası yerleşiminin pekleşme katsayısı üzerine etkilerinin de incelendiği çalışmada, kısa ve orta bağ kirişlerinde daha seyrek rijitlik levhası kullanılması halinde, daha küçük pekleşme katsayıları elde edilmiştir. Ji vd. [10] 12 adet çok kısa yapma bağ kirişini çevrimsel yükleme altında test etmiştir. Deney sonuçlarına göre çok kısa bağ kirişlerinde (ρ<1) pekleşme katsayısını 1,90 olarak belirlemişlerdir. Çok kısa bağ kirişlerinde enkesit başlığının enkesitin kesme kuvveti dayanımına katkı sağlayarak kesme kuvveti dayanımının %15-%20 arttığını, çevrimsel yüklemede dönmenin 0,15 rad. değerlerine ulaşmasıyla da malzemenin pekleşme etkisi nedeniyle bağ kirişi kesme kuvveti dayanımının %65-%75 arttığını belirtmişlerdir. Literatürde kısa bağ kirişleri için pekleşme katsayısı 1,50 olarak verilirken, gerçekleştirilen çalışmada daha yüksek pekleşme katsayısı elde edilmesinin, bağ kirişi enkesit başlıklarının sağladığı katkı nedeniyle olabileceğini belirtmişlerdir. Bozkurt [11] değiştirilebilir bağ kirişleri üzerine yapmış olduğu çalışmada kısa bağ kirişleri için pekleşme katsayısını 2,0 civarında bulmuştur. HEA enkesitli profillerden teşkil edilmiş değiştirilebilir bağ kirişleri üzerine gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kısa bağ kirişleri için pekleşme katsayısı 1,82-2,30 aralığında bulunmuştur [12-17]. Hu vd. [18] yapma enkesitli profilden oluşturulan çok kısa bağ kirişlerini (ρ<1) çevrimsel yükleme altında nümerik olarak incelemiş ve çok kısa bağ kirişlerinde pekleşme katsayısının 1,90-2,05 aralığında bulunduğunu göstermişlerdir. IPE240 enkesitli kısa bağ kirişleri ile gerçekleştirilen farklı deneysel çalışmalarda pekleşme katsayısı 1,47-1,83 aralığında bulunmuştur [19-22]. Özkılıç [23] numerik analizlere dayanan çalışmasında, geniş başlıklı I enkesitli Amerikan profillerinden oluşan kısa bağ kirişlerinde pekleşme değerini 1,69 ile 2,09 arasında bulmuştur.

Della Corte vd. [24] IPE ve H- enkesitli kısa bağ kirişlerinin pekleşme katsayıları üzerine yaptıkları çalışmada enkesit başlık alanına, gövde alanına ve yüksekliğine, bağ kirişi uzunluğuna ve mesnetlenme koşuluna bağlı olarak pekleşme katsayısını tahmin edebilecek bir eşitlik geliştirmişlerdir. Manganiello vd. [25] sonlu eleman analizlerine dayanan çalışmalarında kısa ve çok kısa bağ kirişlerini pekleşme katsayısı açısından incelemişler ve pekleşme katsayısı için eşitlik önermişlerdir. Mesnet koşullarının da incelendiği çalışmada bağ kirişinin eksenel doğrultuda desteklenmesi halinde pekleşme katsayısının ortalama %15 civarında artacağını belirtmişlerdir. Özkılıç [26] uzun bağ kirişleri ile ilgili gerçekleştirdiği nümerik çalışmada, bağ kirişinin uzunluğuna, gövde ve başlık boyutuna bağlı pekleşme katsayısı eşitliği önermiştir.

Dusicka vd. [27] eşdeğer kesme kuvveti dayanımına sahip, enkesit ve malzeme kaliteleri değişen yapma enkesitli beş adet kısa bağ kirişini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda pekleşme katsayısı, düşük akma gerilmesine sahip malzemeden (F_y=100 MPa) imal edilen bağ kirişlerinde 4,90 olarak bulunmuş, yüksek akma gerilmesine sahip malzemeden imal edilen bağ kirişlerinde ise 1,42-1,90 aralığında bulunmuştur. Yin vd. [28] gövde enkesiti düşük akma gerilmesine sahip çok kısa bağ kirişlerinde (□<0,5) pekleşme katsayısını 2,18-3,74 olarak belirlemişler ve çok kısa bağ kirişlerinde enkesit başlığının kesme kuvveti dayanımına önemli katkı sağladığını ve bu bağ kirişlerinde pekleşme katsayısının bu nedenle yüksek bulunduğunu belirtmişlerdir. Ghadami vd. [29] düşük akma gerilmesine sahip yapma enkesitli kısa bağ kirişleri üzerine gerçekleştirdikleri parametrik çalışmada pekleşme katsayısını L100 malzemesine sahip bağ kirişleri için 2,12-7,44 aralığında, L225

malzemesine sahip bağ kirişleri için 1,48-4,58 aralığında elde etmişlerdir. Pekleşme katsayısını tahmin etmek üzere her iki malzeme sınıfı için enkesit gövde narinliğine bağlı eşitlik önermişlerdir.

Kapasite tasarımı ilkesi gereğince çevre elemanların tasarımında dikkate alınacak, iç kuvvetler bağ kirişinin plastikleşmesine karşı gelen iç kuvvet dağılımı ile uyumlu olması gerekmektedir. Bundan dolayı bağ kirişinin maksimum kesme kuvveti dayanımının gerçekçi bir şekilde hesaplanabilmesi büyük önem taşımaktadır. Bozkurt ve Topkaya [11, 13, 14] tarafından gerçekleştirilen DMÇÇÇ deneylerinde, çapraz elemanın bazı numunelerde burkulduğu, sonrasında sistemin ani dayanım kaybına uğradığı raporlanmıştır. Çaprazların burkulması bağ kirişinin yüksek pekleşme katsayısına sahip olmasına bağlanmış ve tasarımda bağ kirişi pekleşme katsayısının tutarlı bir şekilde belirlenmesinin önemine vurgu yapılmıştır. Dolayısıyla çevre elamanların elastik kalmasını sağlamak amacıyla pekleşme katsayısının tutarlı bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, ülkemizde yaygın olarak kullanılan profil enkesiti türleri ve malzeme sınıfı dikkate alınarak, pekleşme katsayısının araştırılması öngörülmüştür. İlk olarak, sonlu eleman modelinin doğrulanması amacıyla, bir adet Avrupa tipi IPE200 enkesitli bağ kirişinin davranışı, tersinir çevrimsel yükleme altında deneysel olarak elde edilmiş ve sonlu eleman modelinden elde edilen analiz sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman modelinin doğrulanmasının ardından, normalleştirilmiş bağ kirişi uzunlukları 0,9 ile 3,5 arasında değişen IPE200-IPE500 ve HE200B-HE400B enkesitli 280 adet bağ kirişinin sonlu eleman modelleri oluşturulmuş ve tersinir çevrimsel yükleme altında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile her bir bağ kirişi için pekleşme katsayısı hesaplanmış ve TBDY 2018'de [2] tanımlanan pekleşme katsayılarının yeterliliği tartışılmıştır.

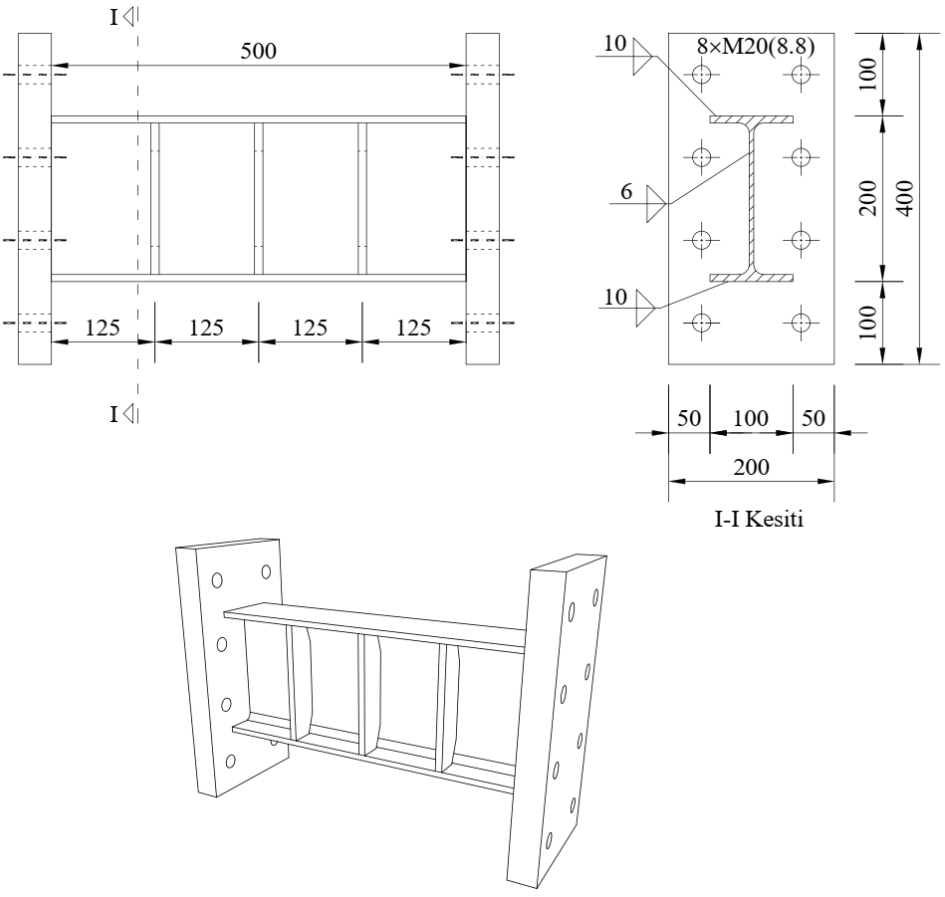
2. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

2.1. Test Numunesi (Test Specimen)

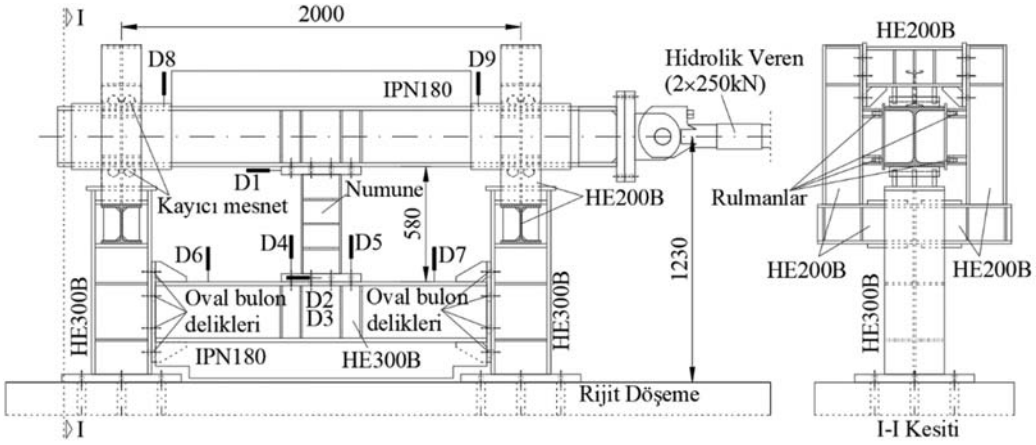
Çalışma kapsamında kullanılacak sonlu eleman modelinin doğrulanması amacıyla, bir adet bağ kirişi numunesi yarı-statik çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Laboratuvar koşulları ve yükleme kapasitesi dikkate alınarak, 500mm uzunluğunda IPE200 enkesitli profilden teşkil edilen bağ kirişi, deney numunesi olarak seçilmiştir. 500mm uzunluğa sahip IPE200 enkesitli bağ kirişinin normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğu (ρ) karakteristik malzeme dayanımları ile 1,4, çekme testinden elde edilen malzeme dayanımları ile 1,6 olarak hesaplanmıştır. Detayları Şekil 1'de verilen bağ kirişi numunesinde gövdenin her iki tarafında tam boy rijitlik levhaları kullanılmıştır. TBDY 2018 [2] koşulları dikkate alınarak rijitlik levhası kalınlığı 10 mm, levhalar arası mesafe 125 mm olarak belirlenmiştir. Bağ kirişinin deney düzeneğine bağlantısının sağlanması amacıyla kirişin her iki ucunda 40mm kalınlığında alın levhaları kullanılmış ve bağ kirişi-alın levhası birleşimleri çepeçevre köşe kaynakla geçekleştirilmiştir. Alın levhalarının deney düzeneğine bağlantısında 8 adet M20-8.8 yüksek dayanımlı bulon kullanılmıştır.

2.2. Deney Düzeneği (Test Setup)

Şekil 2'de detayları ve Şekil 3'te görünümü verilen deney düzeneği iki adet kolon, alt kiriş ve yükleme kirişinden (üst kiriş) oluşmaktadır. Kolonlar rijit temele 6 adet 40mm çapında ankraj çubuğu ile



Şekil 1. Referans numunesi detayları, ölçüler mm cinsinden verilmiştir (Details of reference specimen, all units are in mm).



Şekil 2. Deney düzeneği detayları, ölçüler mm cinsinden verilmiştir (Details of test setup, all units are in mm)



Şekil 3. Deney düzeneği (Test setup)

bağlanmıştır. Bağ kirişi numunesi, alt kiriş ve yükleme kirişine bağlanmaktadır. Bağ kirişi-alt kiriş ve bağ kirişi-yükleme kirişi bağlantıları tam öncekme uygulanan 8×M20-8.8 bulonlar kullanılarak sağlanmıştır. Yükleme kirişinin yanal (düzlem dışı) yerdeğiştirmesini önlemek amacıyla, yükleme kirişinin iki ucunda HE300B enkesitli düşey elemanların üst ucuna bağlanan HE200B enkesitli profillerin kullanıldığı çerçeveler oluşturulmuştur. Yükleme kirişinin bu çerçeveler içinde sürtünme etkisini minimum düzeyde tutmak amacıyla; yatay doğrultuda rulmanlar, düşey doğrultuda ise dolu enkesitli dairesel elemanlar kullanılmıştır. Yükleme kirişi ile alt kirişin eğilme rijitlikleri bu elemanlara uzunlukları boyunca kaynaklanan IPN180 enkesitli profiller ile arttırılmıştır. Bağ kirişinde; özellikle büyük yatay yerdeğiştirme değerlerine ulaşıldığında, eksenel kuvvet oluşmasını önlenmek için alt kirişin düşey doğrultuda hareket edebilmesi sağlanmıştır. Bunun için alt kirişin bulonlu uç bağlantılarında bulon delikleri düşey doğrultuda oval olacak şekilde açılmıştır.

Yüklemeyi oluşturan adımlar yerdeğiştirme kontrollü olarak yükleme kirişi (üst kiriş) aracılığıyla uygulanmıştır. Yükleme 250kN yükleme kapasitesine ve ±300mm yerdeğiştirme kapasitesine sahip 2 adet hidrolik verenin birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Yerdeğiştirme kontrollü yükleme adımları, reaksiyon duvarına sabitlenen ve eşzamanlı çalışan hidrolik verenler vasıtasıyla itme-çekme şeklinde yükleme kirişine uygulanmıştır.

Deney düzeneğinde toplamda 9 adet yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. D1 yerdeğiştirme ölçeri bağ kirişin üst ucunun yatay yerdeğiştirme miktarını ölçerken, D2 ve D3 yerdeğiştirme ölçerleri bağ kirişinin alt ucundaki yerdeğiştirme değerini ölçmektedir. Bağ kirişi uçları arasındaki rölatif yerdeğiştirme miktarı; D2 ve D3 yerdeğiştirme ölçerlerinden okunan değerlerin ortalamasının, D1 yerdeğiştirme ölçerinden okunan değerden çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Bağ kirişi dönme açısı bağ kirişi uçları arasındaki rölatif yerdeğiştirmenin bağ kirişi uzunluğuna oranı şeklinde hesaplanmıştır. D4 ve D5 yerdeğiştirme ölçerleri alt kısımdaki bağ kirişi alın levhasının düşey doğrultuda yerdeğiştirme miktarını ölçmektedir. Alt kirişin düşey doğrultudaki yerdeğiştirme miktarı D6 ve D7 yerdeğiştirme ölçerleri, yükleme kirişinin düşey doğrultudaki yerdeğiştirme miktarları ise D8 ve D9 yerdeğiştirme ölçerleri yardımıyla ölçülmektedir. D8 ve D9 yerdeğiştirme ölçerleri ile ölçülen yükleme kirişinin düşey yerdeğiştirmesi 2 mm olarak

ölçülmüştür. Yükleme kirişi ve alt kiriş düşey yerdeğiştirmeleri arasındaki fark bağ kirişinin serbest ucunun diğer ucuna göre eksenel doğrultuda yerdeğiştirmesine karşı gelmektedir. Bağ kirişinin serbest ucunun eksenel doğrultuda yerdeğiştirmesi 3,60 mm olarak ölçülmüştür.

2.3. Malzeme Deneyi (Material Test)

Bağ kirişi ve deney düzeneğinde kullanılan tüm elemanlar S275 yapısal çelik malzeme sınıfına sahiptir. Numune bağ kirişinin yapısal çelik malzemesine ait karakteristik özelliklerin belirlenmesi amacıyla başlık ve gövde enkesit parçalarından üçer adet çekme deneyi numunesi alınmıştır. Çekme deneyi numune ölçüleri TS EN ISO 6892-1 [30] Tablo D2 esas alınarak belirlenmiştir. Çekme deneyi sonucunda elde edilen malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

2.4. Yükleme Protokolü (Loading Protocol)

Yükleme protokolü AISC 341-16 [31] Bölüm K2 4c'de açıklanan esaslar çerçevesinde oluşturulmuştur. Bu protokole göre yükleme adımları, bağ kirişi toplam dönme açısı cinsinden verilmektedir. Buna göre çevrim sayıları ve bağ kirişi hedef toplam dönme açıları sırasıyla 6 çevrim 0,00375 rad, 6 çevrim 0,005 rad, 6 çevrim 0,0075 rad, 6 çevrim 0,01 rad, 4 çevrim 0,015 rad, 4 çevrim 0,02 rad, 2 çevrim 0,03 rad, 1 çevrim 0,04 rad, 1 çevrim 0,05 rad olarak ve sonrasında her adımda 1 çevrim ve hedef bağ kirişi toplam dönme açısı 0,02 rad arttırılarak uygulanmaktadır. Bağ kirişi toplam dönme açısı, bağ kirişi uç noktalarının göreli yerdeğiştirmesinin bağ kirişi uzunluğuna oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, hedef yerdeğiştirme değerleri toplam hedef dönme açısı ve bağ kirişi uzunluğu çarpımı ile hesaplanmış ve her çevrimde yükleme, hedef yerdeğiştirme değerine ulaşana kadar yükleme uygulanmıştır.

3. Sonlu Eleman Çalışması (Finite Element Study)

İlk olarak, IPE200 enkesitli deney numunesinin sonlu eleman modeli hazırlanarak, modelin geliştirilmesinde uygulanan esasların ve yöntemin, modelin analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması suretiyle, doğrulanması sağlanmıştır. Doğrulama aşamasının ardından nümerik çalışma kapsamında, normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğu 0,9-3,5 aralığında değişen, IPE200-IPE500 ve HE200B-HE400B aralıklarındaki enkesitlere sahip 280 adet bağ kirişi modeli hazırlanmıştır. Bağ kirişi sonlu eleman modelleri ABAQUS/CAE 2019 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur [32].

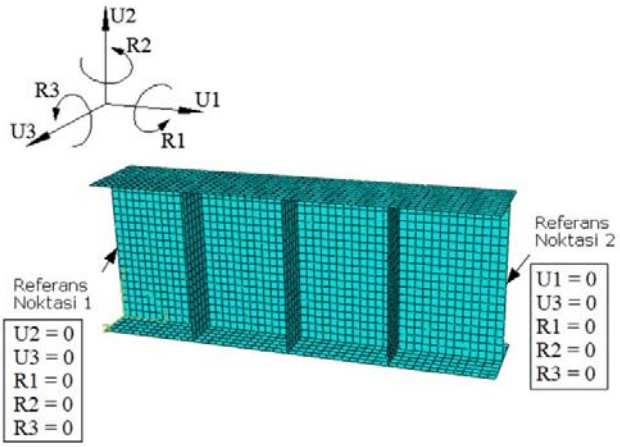
3.1. Sonlu Eleman Modeli (Finite Element Model)

Üç boyutlu olarak oluşturulan modellerde (Şekil 4); başlık, gövde ve rijitlik levhaları ABAQUS kütüphanesinde yer alan dört-düğüm noktalı kabuk eleman ile modellenmiştir (S4R: A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains) [33]. Gövdenin her iki tarafında tam boy rijitlik levhaları kullanılmış, levha kalınlığı ve aralıkları her model için TBDY 2018 [2] 9.8.5.2(a) dikkate alınarak belirlenmiştir. Rijitlik levhası-profil arasında bağlantının tam olarak sağlandığı varsayılarak, birleşimin teşkilinde kullanılan kaynaklar ayrıca modellenmemiştir.

Bağ kirişinin her iki ucunda enkesitin ağırlık merkezine karşı gelen noktalarda referans noktaları tanımlanmıştır. Bağ kirişinin her bir ucundaki düğüm noktaları o uçtaki referans noktasına "rigid body" özelliği kullanılarak bağlanmıştır. Böylece mesnet koşulları ve yükleme, elemanın ucundaki referans noktalarına doğrudan uygulanabilmiştir. Sonlu eleman analizinde dikkate alınan mesnet koşulları Şekil 4'te görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Bağ kirişinin her iki ucunda dönmeler tutulmuş, RN1 (Referans Noktası 1) noktasının yer aldığı uçta eleman ekseni (U1) doğrultusunda yerdeğiştirmeye izin verilmiş, diğer eksenlerdeki dönme ve yerdeğiştirmelere izin verilmemiştir. Böylece bağ kirişi üzerinde eksenel kuvvet oluşması engellenmiştir. RN2 (Referans Noktası 2) noktasının yer aldığı uçta ise, yüklemenin yapılacağı U2 ekseni doğrultusunda yerdeğiştirmeye izin verilmiş, diğer eksenlerdeki dönme ve yerdeğiştirmeler önlenmiştir. Çevrimsel yükleme RN2 noktasına U2 doğrultusunda yerdeğiştirme uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Geometri değişimi bakımından oluşan ikinci mertebe etkiler "nlgeom" özelliği ile dikkate alınmıştır. Ayrıca geometri bakımından bir başlangıç kusuru tanımlanmamıştır. Mohebkhah ve Chegeni [9] ve Richards ve Uang [34] çalışmalarında bağ kirişlerindeki ikinci mertebe etkilerin sonlu eleman modelinde başlangıç kusuru tanımlanmaksızın "nlgeom" özelliği kullanılarak yeterli düzeyde temsil edilebildiğini belirtmişlerdir.

Tablo 1. Malzeme çekme deneyi sonuçları (Tensile test results).

Enkesit Parçası	Akma Gerilmesi F_y [MPa]	Çekme Gerilmesi F_u [MPa]	F_u/F_y	Maksimum Uzama %
Başlık	343	479	1,40	32
Gövde	392	504	1,29	30



Şekil 4. Sonlu eleman modeli ve mesnet koşulları (Finite element model and boundary conditions)

3.2. Malzeme Modeli (Material Model)

Malzemenin gerilme-şekildeğiştirme davranışı kupon çekme testlerinden elde edilen veriler doğrultusunda tanımlanmıştır. Rijitlik levhası malzemesi için herhangi bir kupon çekme testi yapılmadığından, bu elemanlar için gövde malzemesi ile aynı malzeme özellikleri tanımlanmıştır. ABAQUS yazılımında gerçek gerilme – gerçek şekildeğiştirme değerlerinin kullanılması gerektiğinden, Eş. 2 ve Eş. 3 kullanılarak malzeme testlerinden elde edilen mühendislik gerilme (σ) – mühendislik şekildeğiştirme (ε) değerleri gerçek gerilme (σ_{true}) – gerçek şekildeğiştirme (ε_{true}) değerlerine dönüştürülmüştür [35]. Yapısal çelik için Poisson oranı 0,30 ve elastisite modülü 200000 MPa olarak dikkate alınmıştır. Çevrimsel yükleme altında malzemenin pekleşme davranışı için kinematik ve izotropik pekleşmenin birlikte dikkate alındığı bileşik pekleşme (combined hardening) esas alınmıştır. Gövde ve başlık için aynı değerlerin kullanıldığı Tablo 2'de verilen bileşik pekleşme parametreleri, sonlu eleman modelinden elde edilen çevrimsel eğrilerin deneysel eğrilerle uyumlu olması sağlanacak şekilde düzenlenmesiyle elde edilmiştir. ABAQUS yazılımında bileşik pekleşme parametreleri C_1 ve γ_1 "Combined hardening" parametreleri olarak, Q_∞ ve b "Cylic hardening" parametreleri olarak tanımlanmıştır.

$$\sigma_{true} = \sigma\,(1+\varepsilon) \tag{2}$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1+\varepsilon) \tag{3}$$

Tablo 2. Bileşik pekleşme parametreleri
(Combined hardening parameters).

Parametre	Değer
Q_∞	80
b	4
C_1	6500
γ_1	40

3.2. Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması (Validation of the Finite Element Model)

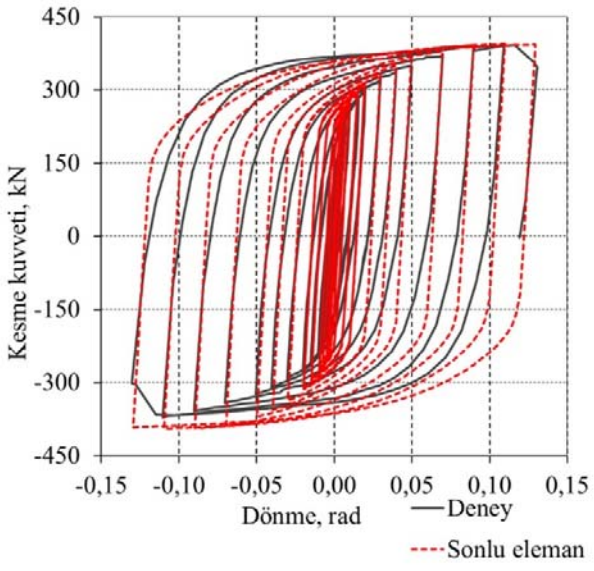
Sonlu eleman modelinde kullanılan yaklaşımların doğrulanması amacıyla deneysel çalışmada kullanılan IPE200 enkesitli referans numunesi yarı-statik çevrimsel yükleme altında analiz edilmiştir. Şekil 5'te deneysel çalışma ve sonlu eleman analizi sonucunda bağ kirişi için elde edilen kesme kuvveti-dönme eğrileri karşılaştırılmıştır. Kesme kuvveti-dönme eğrileri karşılaştırıldığında, sonlu eleman modelinin geliştirilmesinde izlenen yöntemin ve uygulanan yaklaşımların bağ kirişi davranışını temsil etmek için yeterli düzeyde uygunluğa sahip olduğu görülmektedir. Şekil 6'da bağ kirişinin deneysel olarak elde edilen göçme anındaki şekildeğiştirmiş durumu ile bağ kirişinin sonlu eleman analizinde aynı adıma karşı gelen şekildeğiştirmiş durumu verilmiştir. Şekildeğiştirmiş durum incelendiğinde bağ kirişine uygulanan beyaz boyanın dökülmesi ile akma gerilmesine ulaşılan bölgeler görülmektedir. Ayrıca kenar panel bölgelerin başlıklarında yerel burkulma meydana gelmiştir. Sonlu eleman analizinde bağ kirişinin göçme anına karşı gelen adımda oluşan şekildeğiştirmiş durum ile deneysel çalışma sonucunda oluşan şekildeğiştirmiş durum karşılaştırıldığında benzer bir formun oluştuğu görülmektedir. Bu durum da sonlu eleman modelinin bağ kirişi davranışını yeterli düzeyde temsil edebildiğini göstermektedir.

4. Parametrik Çalışma (Parametric Study)

4.1. Bağ kirişi modelleri (Link Beam Models)

Parametrik çalışma kapsamında, IPE200-IPE500 aralığı ile HE200B-HE400 aralığındaki Avrupa tipi profillerden oluşan toplam 20 adet bağ kirişi kullanılmıştır. Ayrıca her bir bağ kirişi enkesiti için, normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğu (ρ), 0,9-3,5 aralığında yer alacak şekilde 14 farklı uzunlukta sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Böylece kısa, orta ve uzun bağ kirişi davranışları gösteren toplam 280 farklı bağ kirişinin sonlu eleman modeli oluşturulmuştur.

Her bir bağ kirişi modelinde rijitlik levhası boyutları ve yerleşimi TBDY2018 [2] 9.8.5'te yer alan koşullara uygun olarak belirlenmiştir. TBDY2018 [2] 9.8.5 uyarınca bağ kirişi gövdesinin her iki tarafında olmak üzere, kısa ve orta uzunluktaki bağ kirişleri için maksimum aralık $30t_w - d_b/5$ olacak şekilde rijitlik levhaları, uzun bağ kirişlerinde ise bağ kirişi uçlarından $1{,}5b_{bf}$ uzaklıkta birer rijitlik levhası yerleştirilmiştir. Rijitlik levhalarının kalınlığı, gövde levhası kalınlığının 0,75'inden ve 10mm'den az olmayacak şekilde belirlenmiştir. Örnek HE300B enkesitli bağ kirişi ele alındığında Eş. 4'te kısa bağ kirişi için maksimum rijitlik levhası aralığı 270 mm, Eş.



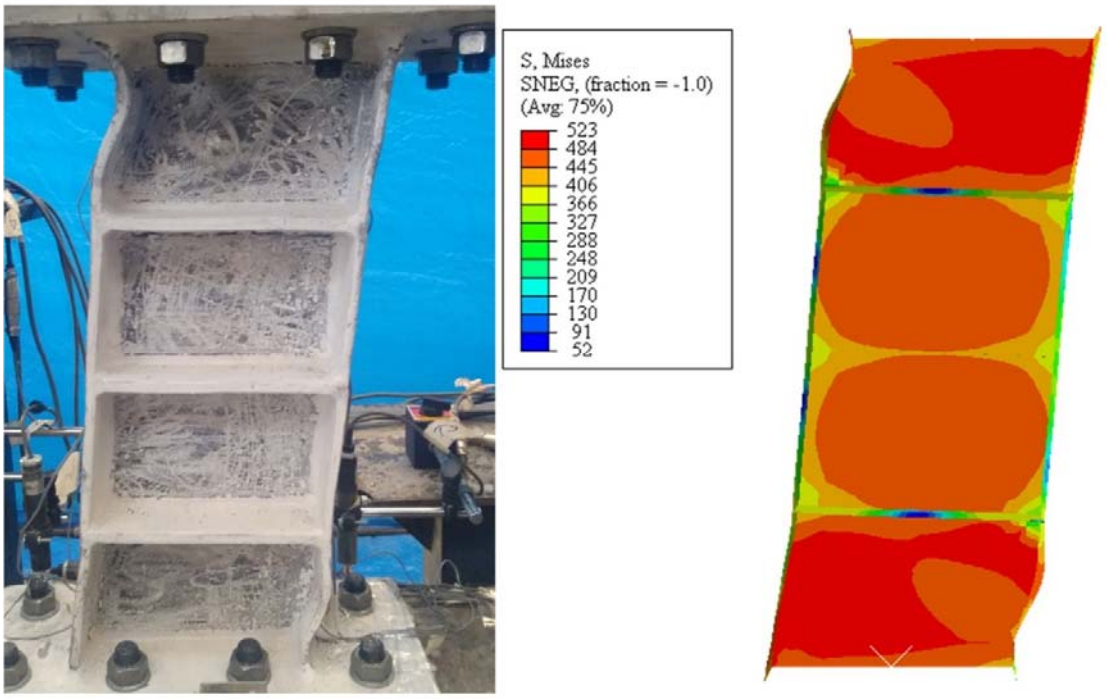
Şekil 5. Referans numune kesme kuvveti-dönme eğrisi (Rotation-shear force diagram for reference specimen).

5'te orta uzunluktaki bağ kirişi için 0,05 rad. dönme açısı değerine karşı gelen maksimum rijitlik levhası aralığı 391 mm olarak hesaplanmıştır. Eş. 6 ile minimum rijitlik levhası kalınlığı 10mm olarak hesaplanmıştır. Şekil 7'de örnek HE300B enkesitli bağ kirişi için sınırlamalara uygun olarak detaylandırılmış rijitlik levhası yerleşimi verilmiştir. Ayrıca TBDY2018 9.8.4 [2] esas alınarak bağ kirişlerinin hedef plastik dönme açıları belirlenmiş ve AISC 341-16 [31] Bölüm K2 4c kapsamında yükleme protokolleri oluşturulmuştur.

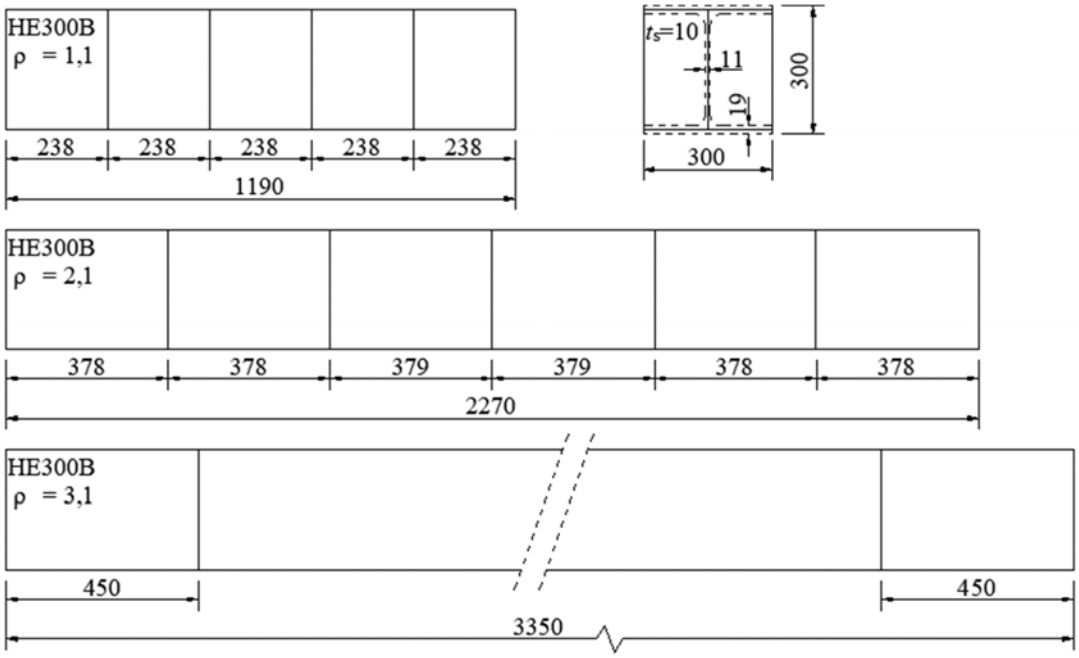
Yükleme protokolünün son adımı, hedef dönme açısına karşı gelen adıma bir yükleme adımı eklemek suretiyle belirlenmiştir.

$$s_{\text{maks}} = 30t_{\text{w}} - d_{\text{b}}/5 = 270\ \text{mm} \tag{4}$$

$$s_{\text{maks}} = \frac{\left((30t_{\text{w}} - d_{\text{b}}/5) - (52t_{\text{w}} - d_{\text{b}}/5)\right)\left(0{,}08 - \gamma_{\text{p}}\right)}{0{,}08 - 0{,}02} = 391\ \text{mm} \tag{5}$$



Şekil 6. Deneysel çalışma ve sonlu eleman analizi sonucunda bağ kirişinin şekil değiştirmiş durumu
(Deformed shape of the link beam in experimental study and finite element analysis).



Şekil 7. HE300B rijitlik levhası detayı (Stiffener details for HE300B).

$$t_{\text{smin}} = \text{maks}[0{,}75 \times t_{\text{w}} = 8{,}25\,;\ 10] = 10\ \text{mm} \quad (6)$$

4.2. Değerlendirme ve Tartışma (Evaluation and Discussion)

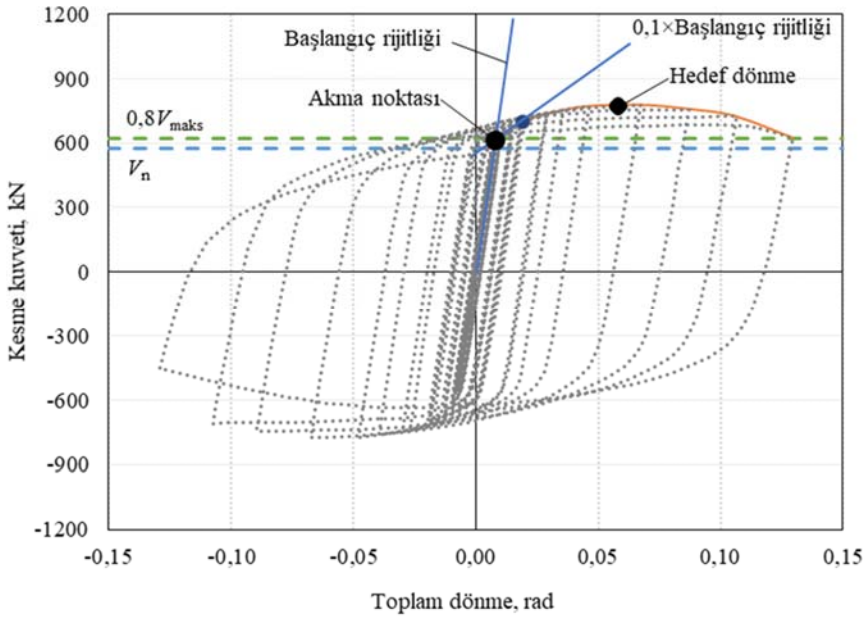
Çalışma kapsamında bağ kirişi maksimum kesme kuvveti dayanımının bağ kirişi karakteristik kesme kuvveti dayanımına oranı pekleşme katsayısı olarak dikkate alınmıştır. Bağ kirişlerinin gerekli dönme kapasitelerinden daha yüksek dönme kapasitesine ulaşabildikleri durumlar bulunmaktadır [36]. Ancak bağ kirişlerinin hedef dönme değerlerinin altında veya bu değerlere yakın dönme kapasitelerine sahip olduğu durumlar da raporlanmıştır [8, 20, 37]. Çalışma kapsamında hazırlanan sonlu eleman modellerinde malzeme kırılma davranışı tanımlanmadığından sadece stabilite kaybından kaynaklanan göçme durumları elde edilmiştir. Dolayısıyla bağ kirişlerinin dönme açıları TBDY 2018 [2]'de izin verilen maksimum dönme değerlerini aştığında göçmeye ulaşıldığı kabul edilmiştir. Bu kapsamda, bağ kirişinin akma noktasının belirlenmesi amacıyla başlangıç rijitliğinin %10 eğimine sahip doğru zarf eğrisine teğet geçirilmiş ve başlangıç rijitliği doğrusu ile kesişim noktası akma noktası olarak kabul edilmiştir [38]. Akma noktasındaki dönme açısına (γ_y) hedef plastik dönme açısı (γ_p) eklenmek suretiyle yönetmelikte öngörülen toplam hedef dönme açısı (γ) belirlenmiştir ve toplam hedef dönme açısı noktasındaki kesme kuvveti dayanımı bağ kirişinin maksimum kesme kuvveti dayanımı olarak kabul edilmiştir [24]. Dönme-kesme kuvveti eğrisi üzerinde belirlenen değerlendirme parametreleri Şekil 8'de verilmiştir.

Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçların tamamı değerlendirildiğinde, bütün modellerin TBDY 2018 [2]'de yer alan hedef plastik dönme koşulunu sağladığı görülmüştür. TBDY 2018 [2] uyarınca rijitlik levhası kalınlığı ve yerleşiminin belirlendiği bağ kirişlerinde gövdede yerel burkulmadan dolayı hedef plastik dönme sınırları içerisinde göçme olmadığı görülmüştür. Şekil 9'da normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğu 1,1, 2,1 ve 3,1 olan HE300B enkesitli bağ kirişinin dönme-kesme kuvveti eğrisi ve analizin son adımında elde edilen şekildeğiştirme durumu örnek olarak gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, kısa bağ kirişinde gövde plastikleşmiş, orta ve uzun bağ kirişlerinde uç birleşimine yakın başlık bölgelerde yerel burkulmalar görülmüştür. Bağ kirişlerinin yeterli dönme kapasitesini sağlamasından sonra başlayan yerel burkulmalar nedeniyle, dayanım kaybı başlamasına rağmen bağ kirişleri göçmeye ulaşmamıştır. Sonlu eleman analizlerinde malzemenin kırılma davranışı tanımlanmadığından malzemeden dolayı oluşacak göçme durumları gözlenememiştir.

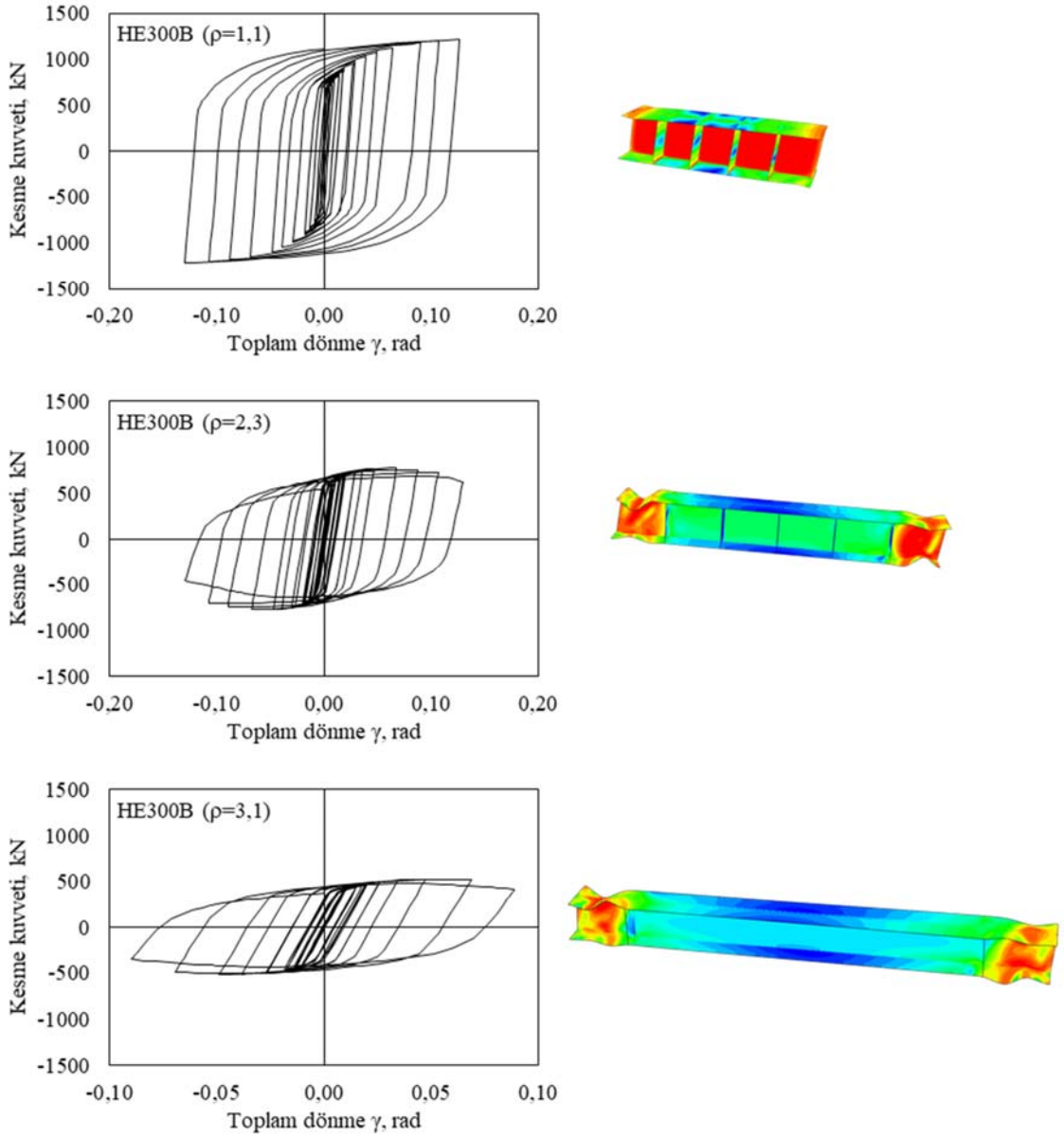
İncelenen bağ kirişleri için elde edilen normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğu-pekleşme katsayısı grafiği literatürde yer alan çeşitli pekleşme katsayıları ile birlikte Şekil 10'da verilmiştir. Ayrıca Tablo 3'te tüm enkesitler için elde edilen pekleşme katsayısı değerleri sayısal olarak verilmiştir. Pekleşme katsayısı dağılımı incelendiğinde, katsayının normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğu ile ilişkili olduğu görülmektedir. Eğilme etkisinde plastikleşen bağ kirişlerinde pekleşme katsayısının yaklaşık olarak 1,4 civarında olduğu, bağ kirişi plastikleşme davranışında kesme kuvveti etkisinin belirleyiciliği arttıkça pekleşme katsayısının da artma eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir.

TBDY 2018'de [2] tüm bağ kirişleri için pekleşme katsayısı 1,25 olarak tanımlanmıştır, dolayısıyla TBDY 2018 [2] açısından incelendiğinde tanımlanan pekleşme katsayısının yetersiz olduğu görülmektedir. Özellikle kısa bağ kirişleri açısından bakıldığında pekleşme katsayısının yaklaşık olarak %50 daha az tanımlandığı ve çevre elemanlarda hesaplanan kısa bağ kirişlerinin plastikleşmesine karşı gelen iç kuvvetlerin daha düşük düzeyde hesaplanacağı görülmektedir. Kapasite tasarımı gereğince çevre elemanların elastik kalması gerekliliği bu durumda yerine getirilemeyecektir. Dolayısıyla bağ kirişinin plastikleşmesine karşı gelen iç kuvvet dağılımının, çevre elemanların elastik kalmasını sağlayacak şekilde belirlenebilmesi için pekleşme katsayılarının yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bağ kirişi pekleşme katsayısını tahmin etmek üzere geliştirilen eşitlik, Eş. 7'de verilmiştir. Şekil 10 incelendiğinde Eş. 7 ile hesaplanan bağ kirişi pekleşme katsayılarının analiz sonuçlarından elde edilen pekleşme katsayılarını yaklaşık olarak temsil ettiği görülmektedir.

$$\Omega = \begin{cases} \rho \leq 1{,}6 \rightarrow 2{,}10 - 0{,}37\rho \\ \rho > 1{,}6 \rightarrow 1{,}64 - 0{,}08\rho \end{cases} \quad (7)$$



Şekil 8. Değerlendirme parametreleri (Assesment parameters).



Şekil 9. HE300B (ρ=1,1 , ρ=2,1 , ρ=3,1) dönme-kesme kuvveti eğrisi ve şekil değiştirmiş durum
(Rotation-shear force diagram and deformed shape for HE300B (ρ=1,1 , ρ=2,1 , ρ=3,1)).

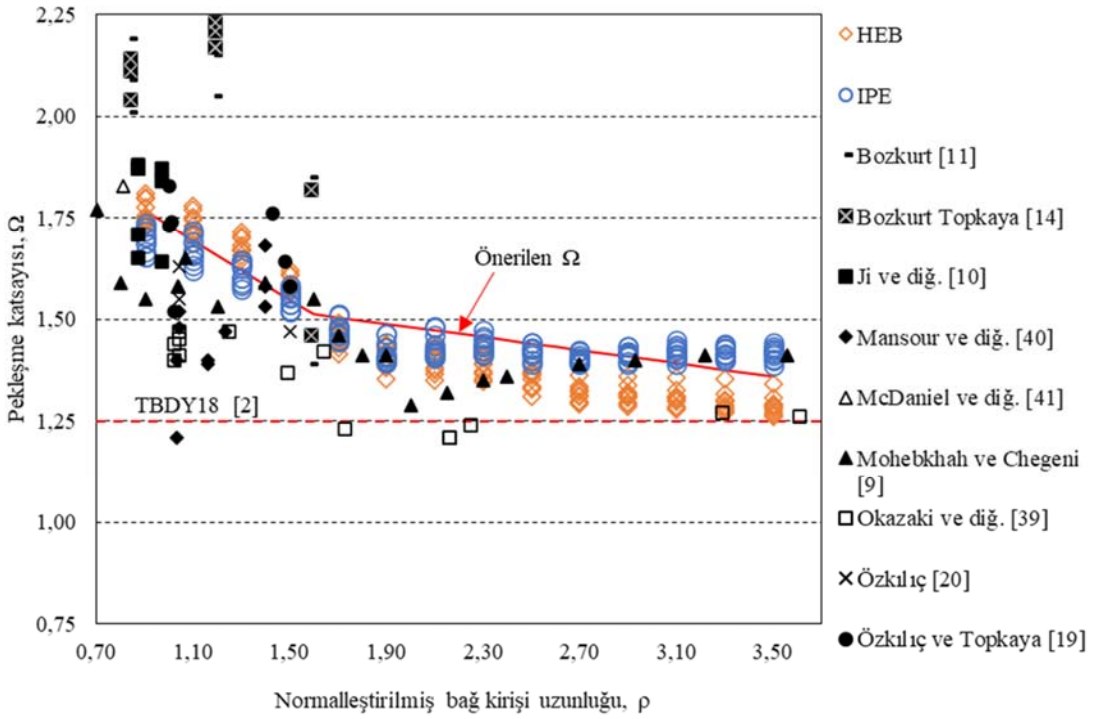
Della Cortre vd. [24] ve Manganiello vd. [25] H- ve I- enkesitli Avrupa profillerinden teşkil edilen kısa bağ kirişlerinde pekleşme katsayısını tahmin etmek üzere eşitlik önermişlerdir. Bu iki çalışmada sonlu eleman modeli Amerikan tipi enkesit ve malzemeden imal edilmiş bağ kirişleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla kalibre edilmiş, ancak Avrupa tipi profiller için eşitlik önerisi geliştirilmiştir. Özkılıç [26] uzun bağ kirişlerinde pekleşme katsayısını tahmin etmek üzere normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğuna bağlı eşitlik önermiştir. Önerilen eşitlikler kullanılarak elde edilen pekleşme katsayısı değerleri bu çalışmada elde edilen verilerle karşılaştırmalı olarak Şekil 11'de sunulmuştur. Buna göre Manganiello vd. [25] tarafından önerilen eşitlik kullanıldığında bu çalışma kapsamında elde edilen pekleşme değerlerinden daha yüksek seviyelerde pekleşme katsayıları elde edilmektedir. Della Corte vd. [24] tarafından geliştirilen eşitlik bu çalışma ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Aynı şekilde Özkılıç [26] tarafından uzun bağ kirişlerinde kullanılmak üzere önerilen eşitlik de bu çalışma ile uyumlu gözükmektedir.

5. Simgeler (Symbols)

AISC	– American Institute of Steel Construction
DMÇÇÇ	– Dışmerkez çaprazlı çelik çerçeve
MAÇÇ	– Moment aktaran çelik çerçeve
MÇÇÇ	– Merkezi çaprazlı çelik çerçeve
TBSC	– Türkiye Building Seismic Code
TBDY	– Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
b_{bf}	: Enkesit başlık genişliği
d_b	: Enkesit yüksekliği
s_{maks}	: Maksimum rijitlik levhası aralığı
t_s	: Rijitlik levhası kalınlığı
$t_{s,min}$	: Minimum rijitlik levhası kalınlığı
t_w	: Enkesit gövde kalınlığı
F_y	: Malzeme akma gerilmesi
F_u	: Malzeme çekme gerilmesi
R_y,	: Malzeme olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranını

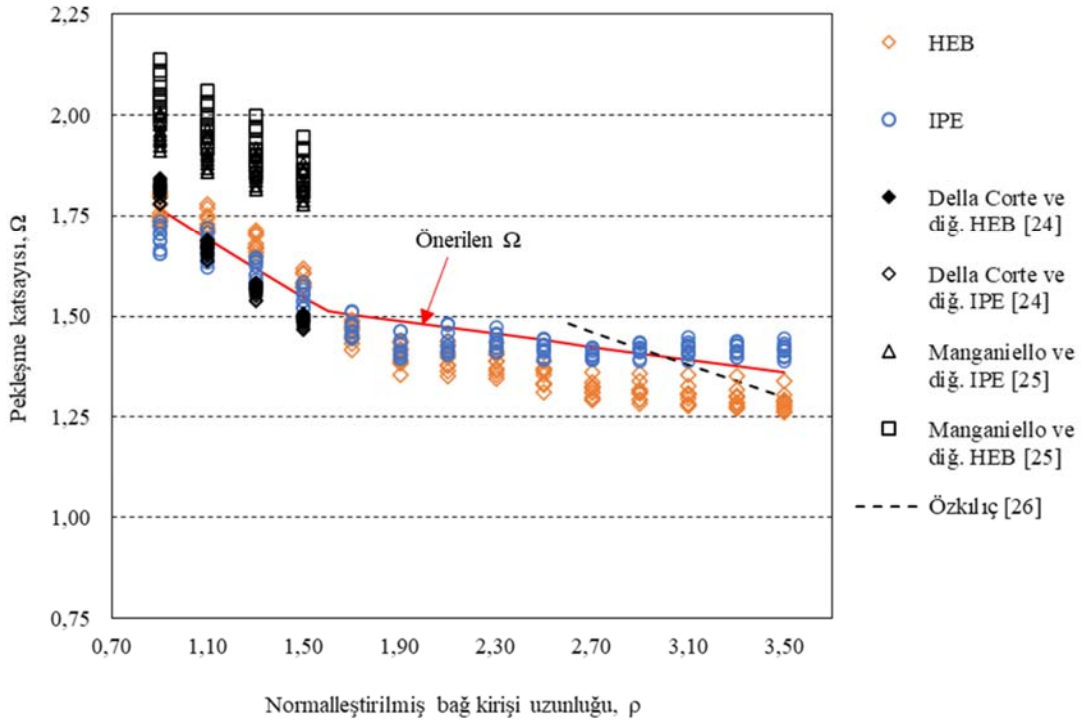
Tablo 3. Pekleşme katsayısı değerleri (Strain hardenin factor values).

Bağ kirişi pekleşme katsayısı, Ω															
		Normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğu, ρ													
		0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5
Enkesit tipi	HE200B	1,81	1,78	1,71	1,62	1,49	1,43	1,43	1,41	1,37	1,32	1,31	1,31	1,30	1,29
	HE220B	1,80	1,77	1,71	1,61	1,49	1,44	1,43	1,41	1,36	1,33	1,32	1,31	1,30	1,29
	HE240B	1,80	1,75	1,70	1,61	1,47	1,42	1,40	1,39	1,35	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28
	HE260B	1,78	1,75	1,67	1,58	1,44	1,39	1,38	1,36	1,33	1,29	1,29	1,28	1,27	1,27
	HE280B	1,76	1,73	1,68	1,57	1,43	1,38	1,36	1,35	1,33	1,30	1,29	1,28	1,28	1,27
	HE300B	1,75	1,72	1,67	1,57	1,42	1,35	1,35	1,35	1,31	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26
	HE320B	1,74	1,71	1,67	1,57	1,45	1,39	1,38	1,37	1,33	1,31	1,31	1,30	1,28	1,28
	HE340B	1,73	1,71	1,67	1,58	1,45	1,40	1,40	1,39	1,37	1,32	1,32	1,31	1,30	1,29
	HE360B	1,74	1,71	1,65	1,58	1,47	1,42	1,41	1,40	1,37	1,34	1,34	1,33	1,32	1,31
	HE400B	1,73	1,68	1,66	1,58	1,48	1,44	1,44	1,44	1,39	1,36	1,36	1,36	1,35	1,34
	IPE200	1,75	1,72	1,64	1,58	1,51	1,46	1,48	1,46	1,44	1,42	1,43	1,43	1,43	1,42
	IPE220	1,74	1,71	1,64	1,58	1,51	1,46	1,48	1,47	1,44	1,42	1,42	1,43	1,43	1,43
	IPE240	1,72	1,69	1,64	1,56	1,48	1,44	1,46	1,45	1,43	1,41	1,41	1,41	1,40	1,40
	IPE270	1,73	1,67	1,63	1,56	1,48	1,43	1,44	1,44	1,42	1,40	1,42	1,41	1,41	1,42
	IPE300	1,70	1,66	1,62	1,55	1,48	1,41	1,43	1,43	1,41	1,39	1,41	1,41	1,41	1,40
	IPE330	1,69	1,66	1,60	1,54	1,46	1,41	1,41	1,41	1,39	1,39	1,39	1,39	1,40	1,39
	IPE360	1,69	1,66	1,60	1,54	1,46	1,41	1,42	1,42	1,43	1,40	1,42	1,42	1,42	1,41
	IPE400	1,67	1,64	1,59	1,52	1,44	1,40	1,40	1,41	1,40	1,39	1,40	1,40	1,41	1,42
	IPE450	1,65	1,63	1,58	1,52	1,45	1,40	1,41	1,42	1,42	1,40	1,41	1,44	1,44	1,43
	IPE500	1,65	1,62	1,57	1,52	1,45	1,40	1,42	1,44	1,43	1,41	1,43	1,45	1,44	1,44



Şekil 10. Pekleşme katsayılarının geçmiş deneysel verilerle karşılaştırılması
(Comparison of link strain hardening factor with past tests)

V_n : Bağ kirişi karakteristik kesme kuvveti dayanımı
V_y : Bağ kirişi akma dayanımı
V_{maks} : Bağ kirişi maksimum kesme kuvveti dayanımı
V_n : Bağ kirişi karakteristik kesme kuvveti dayanımı
ε : Mühendislik şekildeğiştirme
ε_{true} : Gerçek şekildeğiştirme
γ : Toplam dönme
γ_p : Plastik dönme
γ_y : Akma noktasında bağ kirişi dönme açısı (Elastik dönme)
σ : Mühendislik gerilme
σ_{true} : Gerçek gerilme
Ω : Pekleşme katsayısı



Şekil 11. Önerilen pekleşme katsayısı değerleri (Proposed strain hardening factor values)

6. Sonuçlar (Conclusions)

Dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerde deprem enerjisi bağ kirişlerinin plastik şekildeğiştirmesi ile sönümlenmektedir. Bağ kirişlerinin plastik şekildeğiştirmesi sırasında çevre elemanların elastik kalması beklenmektedir. Çevre elemanların elastik bölgede kalması, bu elemanların tasarımında bağ kirişinin plastikleşmesine neden olan yükleme durumunun esas alınmasını gerektirmektedir. Bu yükleme durumu için pekleşme ve malzeme etkilerinin de dikkate alındığı bağ kirişinin taşıyabileceği en büyük kesme kuvvetinin kullanılması gerekmektedir. Eş. 1'de verilen en büyük kesme kuvveti hesabında; malzemeden kaynaklanan dayanım fazlalığı, beklenen (olası) akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı (R_y) ile, pekleşme etkilerinden meydana gelen dayanım fazlalığı ise, pekleşme katsayısı (Ω) ile dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada IPE200-IPE500 ve HE200B-HE400B aralıklarındaki enkesitlere sahip 280 adet bağ kirişinin sonlu eleman modeli hazırlanmış ve yarı statik-çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilen analizlerden elde edilen veriler yardımıyla S275 çelik kalitesine sahip Avrupa tipi IPE ve HEB enkesitli profillerden imal edilen bağ kirişleri, pekleşme katsayısı açısından irdelenmiştir. Çalışma sonucunda,

- Bağ kirişi pekleşme davranışının kinematik ve izotropik pekleşmenin birlikte dikkate alındığı bileşik pekleşmeli malzeme modeli ile yeterli bir yaklaşıklıkla temsil edilebildiği görülmüştür.
- Tüm bağ kirişlerinin stabilite kaybı olmaksızın TBDY 2018'de [2] tanımlanan hedef plastik dönme açısına ulaştığı gözlemlenmiştir.
- TBDY 2018'de [2] tanımlanan pekleşme katsayısının bağ kirişleri için yetersiz olduğu ve beklenen dayanımın daha küçük olarak elde edilmesine neden olduğu belirlenmiştir.
- Kısa, orta ve uzun bağ kirişlerinde pekleşme katsayısı için basit bir eşitlik önerilmiş ve bu eşitlikle pekleşme katsayısının yaklaşık bir şekilde tahmin edildiği gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında normalleştirilmiş bağ kirişi uzunluğu 0,9-3,5 arasında değişen S275 malzeme sınıfına sahip Avrupa tipi IPE ve HEB enkesitli profiller incelendiğinden, farklı enkesit ve malzeme sınıfı için analizlerin tekrarlanması gerekir. Ayrıca, sonlu eleman modelinin malzemenin kırılma (kopma) davranışını içermemesi nedeniyle, bağ kirişlerinin olası bir çatlak oluşumunun ardından kırılmaya (kopmaya) bağlı göçme davranışlarının araştırılması için geniş kapsamlı deneysel bir çalışmanın yapılması önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 41905 proje numarası ile desteklenmiştir.

Kaynaklar (References)

1. Roeder C.W., Popov E.P., Inelastic behavior of eccentrically braced steel frames under cyclic loadings, Earthquake Engineering Research Center, Research Report No. UCB/EERC-77/18, 1977.
2. Turkish Building Seismic Code, Disaster and Emergency Management Presidency, AFAD, Ankara, 2018.
3. Akşar B, Doğru S, Akbaş B., Amplified seismic loads in steel moment frames under strong ground motion, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (2), 439–454, 2018.
4. Akşar B., Akbaş B., Kaya E.Ş., Çakır F., Relative story displacements and torsional effects caused by strength variations in concentrically braced frames, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (1), 13–30, 2018.
5. Engelhardt M.D., Popov E.P., Behavior of long links in eccentrically braced frames, Earthquake Engineering Research Center, Research Report No. UCB/EERC-89/01, 1989.
6. Azad K., C. Topkaya, A review of research on steel eccentrically braced frames, J. Constr. Steel Res., 128, 53–73, 2017.
7. Itani A.M., Elfass S., Douglas B.M., Behavior of built-up shear links under large cyclic displacement, Engineering Journal, 40 (4), 221–234, 2003.
8. Okazaki T., Engelhardt M.D., Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A992 steel, J. Constr. Steel Res., 63, 751–765, 2007.

9. Mohebkhah A., Chegeni B., Overstrength and rotation capacity for EBF links made of European IPE sections, Thin-Walled Struct., 74, 255–260, 2014.

10. Ji X., Wang Y., Ma Q., Okazaki T., Cyclic behavior of very short steel shear links, J. Struct. Eng., 142 (2), 04015114, 2016.

11. Bozkurt M.B., Developing replaceable members for steel lateral load resıstıng systems, PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2017.

12. Bozkurt M.B., Kazemzadeh Azad S., Topkaya C., Development of detachable replaceable links for eccentrically braced frames, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 48 (1), 1134–1155, 2019.

13. Bozkurt M.B., Topkaya C., Replaceable links with direct brace attachments for eccentrically braced frames, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 46 (13), 2121–2139, 2017.

14. Bozkurt M.B., Topkaya C., Replaceable links with gusseted brace joints for eccentrically braced frames, Soil Dyn. Earthquake Eng., 115, 305–318, 2018.

15. Bozkurt M.B., Topkaya C., Splice connection details for eccentrically braced frame replaceable links, The14thNordic Steel Construction Conference, Copenhagen,Denmark, 463–468, September 18–20, 2019.

16. Kazemzadeh Azad S., Numerical investıgation of braces and replaceable links for steel frames, PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2021.

17. Bozkurt M.B., Kazemzadeh Azad S., Topkaya C., Low-cycle fatigue testing of shear links and calibration of a damage law, J. Struct. Eng., 144 (10), 04018189, 2018.

18. Hu S., Xiong J., Zhou Q., Lin Z., Analytical and numerical investigation of overstrength factors for very short shear links in EBFs, KSCE J. Civ. Eng., 22 (11), 4473–4482, 2018.

19. Özkılıç Y.O., Topkaya C., Extended end-plate connections for replaceable shear links, Eng. Struct., 240, 112385, 2021.

20. Özkılıç Y.O., Zeybek Ö., Topkaya C., Stability of laterally unsupported shear links in eccentrically braced frames, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 51(4), 832–852, 2022.

21. Özkılıç Y.O., Bozkurt M.B., Topkaya C., Mid-spliced end-plated replaceable links for eccentrically braced frames, Eng. Struct., 237, 112225, 2021.

22. Özkılıç Y.O., Experimental and numerical studies on replaceable links for eccentrıcally braced frames, PhD Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 2020.

23. Özkılıç Y.O., Optimized stiffener detailing for shear links in eccentrically braced frames, Steel Compos. Struct., 39 (1), 35–50, 2021.

24. Della Corte G., D'Aniello M., Landolfo R., Analytical and numerical study of plastic overstrength of shear links, J. Constr. Steel Res., 82, 19–32, 2013.

25. Manganiello L., Montuori R., Nastri E., Piluso V., The influence of the axial restraint on the overstrength of short links, J. Constr. Steel Res., 184, 106758, 2021.

26. Özkılıç Y.O., Interaction of flange and web slenderness, overstrength factor and proposed stiffener arrangements for long links, J. Constr. Steel Res., 190, 107150, 2022.

27. Dusicka P., Itani A.M., Buckle I.G., Cyclic behavior of shear links of various grades of plate steel, J. Struct. Eng., 136 (4), 370–378, 2010.

28. Yin W.H., Sun F.F., Jin H.J., Hu D.Z., Experimental and analytical study on plastic overstrength of shear links covering the full range of length ratio, Eng. Struct., 220, 110961, 2020.

29. Ghadami A., Pourmoosavi G., Talatahari S., Azar B.F., Overstrength factor of short low-yield-point steel shear links, Thin-Walled Struct., 161, 107473, 2021.

30. TS EN ISO 6892-1, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature, Turkish Standard Instution, Ankara, 2010.

31. AISC 341-16. Seismic Provisions for Steel Structural Buildings. American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, 2016.

32. ABAQUS FEA, Finite element analysis software v2019. Dassault Systems Simulia Corp., RI, USA, 2019.

33. ABAQUS, User's Manual, Version 6.14, Dassault Systems Simulia Corp., RI, USA, 2014.

34. Richards P.W., Uang C.M., Effect of flange width-thickness ratio on eccentrically braced frames link cyclic rotation capacity, J. Struct. Eng., 131 (10), 1546–1552, 2005.

35. Scheider I., Brocks W., Cornec A., Procedure for the determination of true stress-strain curves from tensile tests with rectangular cross-section specimens, ASME J. Eng. Mater. Technol., 126, 70–76, 2004.

36. Al-Janabi M.A.Q., Topkaya C., Nonsymmetrical loading protocols for shear links in eccentrically braced frames, Earthquake Eng. Struct. Dyn., 49 (1), 74–94, 2020.

37. Men J., Xiong L., Wang J., Zhang Q., He P., An experimental study on the seismic behavior and replaceability of the replaceable steel shear links, Structures, 33, 2334–2348, 2021.

38. Stratan A., Dubina D., Bolted links for eccentrically braced steel frames, Connections in Steel Structures V, Amsterdam–Netherlands, 223–232, June 3–4, 2004.

39. Okazaki T., Arce G., Ryu H.-C., Engelhardt M.D., Experimental study of local buckling, overstrength, and fracture of links in eccentrically braced frames, J. Struct. Eng., 1331 (10), 1526–1535, 2005.

40. Mansour N., Christopoulos C., Tremblay R., Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames, J. Struct. Eng., 137 (10), 1141–1152, 2011.

41. McDaniel C.C., Uang C.-M., Seible F., Cyclic testing of built-up steel shear links for the New Bay Bridge, J. Struct. Eng., 129 (6), 801–809, 2003.