

ALIN LEVHALI BULONLU KOLON KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNDE PANEL BÖLGESİ GÜÇLENDİRMESİNİN ETKİSİ

Orkun YILMAZ, Serkan BEKİROĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul
orkun.yilmaz@hotmail.com.tr, serkanb@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 21.08.2015; Kabul/Accepted: 03.11.2015)

ÖZET

Bu çalışma, monotonik yükleme altında sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilen alın levhalı bulonlu birleşimlerde, alın levhası kalınlığı değişimi ile panel bölgesi güçlendirmesinin etkisini incelemektedir. Çalışmanın ilk aşamasında, literatürden alınan iki adet alın levhalı bulonlu birleşimin sonlu elemanlar analizi yapılmış ve literatürdeki sonuçları ile bu çalışmadaki sonuçları karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise, literatürden alınan bu birleşimlerdeki alın levhası kalınlığının artırılmasının ve panel bölgelerinin güçlendirilmesinin etkileri incelenmiştir. Panel bölgesini güçlendirmek için diyagonal koyulmuş levha veya kolon gövdesi takviye levhası kullanılmıştır. Birleşimlerdeki bulonlar öngerilmeli olup, analiz için konsol kiriş ucuna monotonik olarak yer değiştirme uygulanmıştır. Analizlerde doğrusal olmayan malzeme ve geometri değişimi dikkate alınmıştır. Ayrıca, kolon, kiriş, bulon, levha gibi parçalar arasındaki temaslar, doğrusal veya doğrusal olmayan durum olarak dikkate alınmıştır. Birleşimler, kuvvet taşıma kapasitesi, moment – dönme eğrisi, panel bölgesindeki şekil değiştirmeler ve bulon çekme kuvvetleri bakımından birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemelere göre, panel bölgesinin güçlendirilmesi kolondaki panel bölgesinin şekil değiştirmesinin azalmasına fakat kiriş başlıklarının ve gövdesinin daha erken burkulmasına ve dönme kapasitelerinin azalmasına neden olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alın levhalı bulonlu birleşim, panel bölgesi güçlendirmesi, sonlu eleman analizi, doğrusal olmayan analiz

THE EFFECT OF REINFORCING PANEL ZONE OF BOLTED END PLATE COLUMN BEAM CONNECTIONS

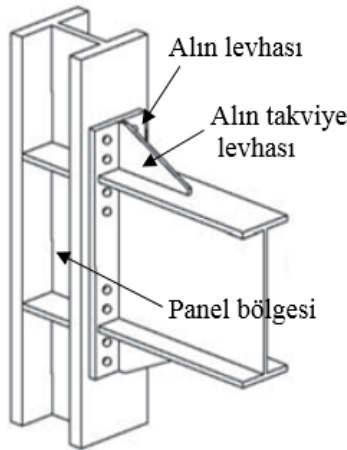
ABSTRACT

The aim of this study is to assess the efficiency of changing thickness of end plate and reinforcing panel zone in bolted end plate column–beam connections that are performed by finite element analyses under monotonic loading. In the first phase of the study, finite element analyses of two bolted end plate connections which were taken from literature were performed and the experimental results from the literature and the numerical results of the present study were compared. In the second phase, effects of increasing the end plate thickness and the effects of reinforcing panel zone of connections, taken from the literature, were investigated. To reinforce the panel zone, diagonal braces or column web doubler plates were used. Pretensioned bolts were used in connections and monotonic displacement loading are applied to end of cantilever beam. Material and geometry nonlinearities were considered in the analyses. The linear or nonlinear contacts between connection parts such as column, beam, bolt and plate were considered. Connections were evaluated in terms of loading capacity, moment – rotation curve, plastic strain distributions of panel zone and bolt tension forces. The results reveal that reinforcing panel zone causes the plastic strains of column panel zone to decrease but resulting in earlier buckling of beam flange and beam web and reductions in the rotational capacity of the connection.

Keywords: Bolted end plate connection, reinforcing panel zone, finite element analysis, nonlinear analysis

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bulonlu kolon-kiriş birleşimleri çelik yapılarda sıklıkla kullanılan bir birleşim şeklidir. Bulonlu birleşimlerin en sık kullanılan çeşidi alın levhali bulonlu olanlardır. Alın levhali bulonlu birleşimler, kiriş başlıkları ve gövdesine kaynak ile, kolon başlığına bulonlar ile bağlanan bir alın levhasından oluşmaktadır. Gerekliğinde kiriş gövdesi hizasında kiriş başlıklarının dış kısmında alın takviye levhası da kullanılmaktadır. Alın levhali bulonlu birleşimler, alın levhası uzunluğunun kiriş derinliğine eşit veya daha uzun yapılarak çeşitlendirilmektedir. Bu birleşimlerin daha az zamanda monte edilebilmeleri ve yapımından sonra denetlenmesinin daha kolay olması bazı avantajlarından [1, 2]. Şekil 1’de alın levhali bulonlu birleşim örneği gösterilmektedir.



Şekil 1. Alın levhali bulonlu kolon-kiriş birleşim örneği [3] (Bolted end plate column beam connection specimen)

Bugüne kadar birçok araştırmacı alın levhali bulonlu birleşimlerin monotonik ve çevrimsel yüklemeye altında deneysel ve sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Literatürde karşılaşılan bazı sonlu elemanlar analizleri ile yapılmış çalışmalar şu şekildedir:

Shi vd. sekiz adet alın levhali birleşimin analizini monotonik yüklemeye altında yapmışlardır. Burada alın levhasında ve kolon gövdesinde süreklilik levhalarının olup olmaması, alın levhası kalınlığı (16, 20 ve 25 mm) ve bulon çapı değişimleri (20 ve 24 mm) incelenmiştir [1]. Bahaari ve Sherbourne alın levhali birleşimlerin monotonik yüklemeye altında sonlu eleman analizlerini yapmışlardır [4-7]. Çalışmalarında birleşimdeki alın levhası kalınlığının etkisini incelemiş olup, birleşimin toplam dönme değerine etki eden parametreler araştırılmıştır. İnce alın levhali birleşimlerde birleşimin toplam dönme değerine alın levhasının katkısı yaklaşık %60-70 iken, kalın alın levhali birleşimlerde bu oranın azaldığı görülmüştür [4]. Diğer çalışmalarında ise bu birleşimlerin bulonlarına öngerilme uygulanmış ve bunun etkisi araştırılırken [5], bir diğer çalışmalarında da kolon gövdesinde süreklilik levhası olmayan birleşimlerin

analizi yapılarak bu levhaların etkisi incelenmiştir [6]. Sonrasında da sekiz bulon sıralı birleşimlerin analizlerini yapmışlardır [7]. Gerami vd. alın levhali ve T kesit levhali birleşimlerde bulon yerleşiminin etkisini çevrimsel yüklemeye altında sonlu eleman analizi ile incelemişlerdir. Her iki birleşimden beşer tane model hazırlanmış olup, bulonların yatay ve düşey mesafelerinin değişmesinin sisteme olan etkisi üzerinde durulmuştur. Bu mesafelerin değişmesinin moment kapasitesine fazla bir etkisi olmamakla birlikte, sistemin çevrimsel yüklemeye elde edilen histerik eğrisine etki ettiği görülmüştür [8]. Mashaly vd. alın levhali birleşimleri çevrimsel yüklemeye altındaki davranışlarını incelemişlerdir ve bulonları modellemek için yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Bulon gövdesini modellemek için çubuk elemanlar, bulonların somunları için de kabuk elemanlar kullanılmasını önermişlerdir [9]. Eldemerdash vd. alın levhali birleşimlerin monotonik yüklemeye altında sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Alın levhali birleşimlerdeki bulonların kuvvet dağılımını iyileştirme amacıyla kolon başlığı ile alın levhası arasına ince levhalar yerleştirmişlerdir. Analiz sonucunda basınç bölgesindeki bazı bulonların taşıdığı kuvvet değerinde azalma görülmüştür. Birleşimlerde bulonda hasar oluşmasını engelleyebilmek için bir çözüm olduğu söylenmektedir [10]. Wang vd. alın levhali birleşimler ile kaynaklı birleşimlerin çevrimsel yüklemeye altında sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. İmalatında özen gösterildiği takdirde, kaynaklı birleşim ile alın levhali birleşimin yaklaşık olarak aynı moment kapasitesinde olduğunu söylemişlerdir [11]. Kaushik vd. alın levhali birleşimlerdeki bulonları öngerilmeli ve öngerilmesiz olarak analizlerini yapmış ve öngerilme etkisini araştırmışlardır [12]. Dessouki vd. alın levhali birleşimlerde parametrik bir araştırma yapmış ve yırtılma çizgisi analizini kullanarak alın levhali birleşimlerin eğilme momenti kapasitesi için bir denklem önermişlerdir [13]. Saberi vd. alın levhali ve T kesit levhali birleşimlerde levha kalınlıklarının değişimini çevrimsel yüklemeye altında sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir. Toplamda yedi adet analiz yapılmış olup, üç tanesi T kesit levhali, üç tanesi takviyesiz alın levhali ve bir tanesi de takviyeli alın levhali birleşimdir. Yapılan çalışma sonucunda, T kesit levhali birleşimlerin levha kalınlığı değişimine daha hassas oldukları görülmüştür. Her iki birleşim türünde de levha kalınlığının azalmasıyla, maksimum momente daha yüksek dönme değerlerinde ulaşıldığı görülmüştür [14]. Shaker ve Abd Elrahman alın levhali birleşimlerde alın levhası kalınlığı, bulon çapı, kolonda süreklilik levhası olup olmaması değişimlerini incelemek için [1]’de verilen modellemelerden faydalanmışlardır [15]. Yılmaz ve Bekiroğlu alın levhali birleşimlerde malzeme değişimini incelemek için iki tanesi [1]’de verilen modellemelerden olmak üzere üç adet birleşimin iki farklı malzeme özellikleriyle monotonik yüklemeye altında sonlu eleman analizini yapmışlardır.

Birleşimde kullanılan çeliğin akma ve kopma gerilmelerinin artmasının moment kapasitesini arttırdığı, fakat başlangıç dönme rijitliklerini değiştirmedeği görülmüştür [16]. Literatürde yer alan bu çalışmalarda doğrulama amaçlı başka çalışmalarda yapılan deneysel çalışmalar örnek durum olarak seçilip modellenmiştir. Mashaly vd. alın levhalı birleşimlerin on iki parametresini değiştirerek malzeme ve geometrik özelliklerinin değişimini araştırmışlardır [17]. Birleşimlerin hem deneysel olarak hem de sonlu elemanlar analizleri ile incelenen çalışmalar şu şekildedir: Maggi vd. alın levhalı birleşimleri monotonik yükleme altında araştırmışlardır. Altı adet birleşim hazırlanmış ve alın levhası kalınlığı ve bulon çapı değişimlerini incelemişlerdir [18]. Prinz vd. altı adet alın levhalı birleşimin monotonik yükleme altında deneysel ve sonlu eleman analizlerini yapmışlardır. Kolonda süreklilik levhaları kullanmadan bulonlarla birleşimi güçlendirmeyi amaçlamışlardır. Bunun için, kolon başlığında kolon gövdesinin her iki tarafında iki sıra bulon kullanmışlardır [19]. Guo vd. altı adet alın levhalı birleşimin çevrimsel yükleme altında deneysel analizini yapmışlardır. Çalışmada alın levhası kalınlığı, takviye levhası ve süreklilik levhasının etkileri incelenmiştir. Takviye levhalarına sahip birleşimlerin daha fazla kuvvet taşıdığı ve enerji dağıtma kapasitelerinin daha fazla olduğu görülmüştür [20].

Sonlu elemanlar analizi ile deneysel çalışmadan elde edilen gerçek sonuçların yakın bulunması, sonlu eleman modellemesinin gerçeğe en uygun şekilde yapılmasıyla mümkün olabilir. Bu şekilde yapılacak sonlu eleman modellemeleri, kolon-kiriş birleşimlerinin davranışlarının incelenbilmesine imkan vermektedir. Öyle ki, deneysel çalışma eksikliği sonlu eleman analizi ile giderilebilir. Çelik kolon kiriş birleşimlerinde panel bölgesi güçlendirmesi sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat, bu güçlendirmenin bulonlu birleşime olan etkisini deneysel veya sonlu elemanlar analizleri ile karşılaştırılmalı olarak inceleyen çalışmaların sayısı kısıtlıdır. Bu çalışmada, yukarıda özetlenen literatürdeki çalışmalardan farklı olarak birleşimlerin panel bölgeleri iki ayrı durum ile güçlendirilmekte, ayrıca alın levhası kalınlığının da etkisi incelenmekte olup, çalışmanın literatüre katkı sağlaması amaçlanmaktadır. Bunun için öncelikle literatürden [1] deneysel ve sonlu eleman analizleri yapılmış olan birleşimler seçilmiştir. Literatürden alınan çalışmada panel bölgesi güçlendirmenin etkisi incelenmemiştir. Çalışmanın ilk aşamasında literatürden alınan birleşimlerin sonlu eleman analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar, literatürdeki deneysel ve sonlu eleman analiz sonuçları ile karşılaştırılacaktır. İkinci aşamada ise, literatürden alınan bu birleşimlerdeki panel bölgelerinin diyagonal koyulmuş levha ve kolon gövdesi takviye levhası ile ayrı ayrı güçlendirilmesi ve alın levhası kalınlığının artırılmasının birleşime

etkileri incelenecektir. Birleşimlerin analizi sonlu eleman analiz programlarından biri olan ANSYS [21] ile yapılacaktır.

2. BİRLEŞİMLERİN ANALİZE HAZIRLANMASI (PREPARATION OF CONNECTIONS FOR ANALYSIS)

Çalışmanın ikinci kısmında kurulacak sonlu eleman modellerinin doğruluğunu sağlamak amacıyla çalışmanın birinci kısmında literatürdeki sözü edilen çalışmadan [1] 20 mm ve 25 mm alın levhası kalınlığına sahip, süreklilik ve alın takviye levhaları olan iki adet birleşimin sonlu eleman analizi yapılmakta olup, bu çalışmadaki sonuçlar ile literatürdeki sonuçları karşılaştırılmaktadır. Daha sonra çalışmanın ikinci kısmında alın levhası kalınlığı Shi vd. [1] çalışmasında olmayan kalınlıklar ile birlikte 20, 25, 30 ve 35 mm şeklinde dikkate alınarak dört farklı durum oluşturulmaktadır. Buna ilave olarak bu birleşimlerin panel bölgeleri, diyagonal levhalar ve kolon takviye levhaları ile ayrı ayrı güçlendirilerek toplamda on iki adet birleşimin için sonlu eleman sonuçları sunulmaktadır.

2.1 Birleşimlerin Geometrik Özellikleri (Geometric Properties of the Connections)

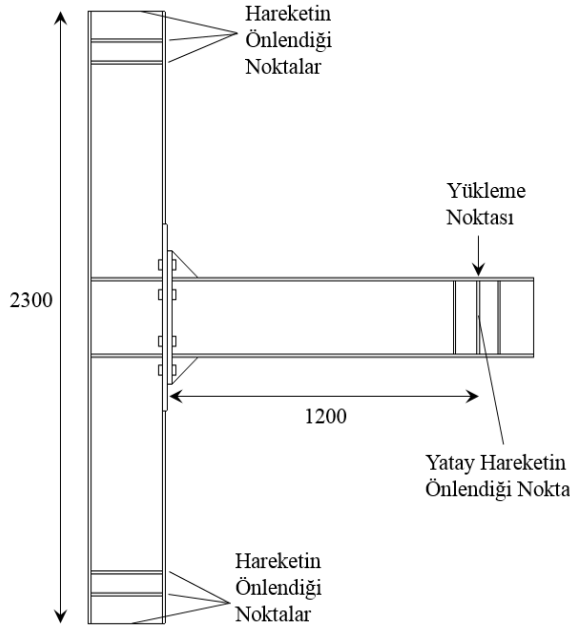
Birleşimlerdeki kolon ve kiriş profilleri, alın levhası kalınlığı, bulon çapı, kolon ve kiriş uzunlukları gibi veriler literatürdeki çalışmadan alınmaktadır [1]. Kolon ve kiriş için yapma profiller kullanılmış olup, boyutları Tablo 1’de verilmektedir. Bu çalışmada önce alın levhası kalınlığının etkisi incelenmektedir. Bunun için birleşimlerdeki diğer özellikler sabit bırakılarak, alın levhası kalınlığı sırasıyla, 20 mm, 25 mm, 30 mm ve 35 mm olarak alınmaktadır. Daha sonra her bir birleşime, panel bölgesini güçlendirme amacıyla, kolon gövdesinin her iki tarafına diyagonal olarak konulmuş levhalar eklenmektedir. Panel bölgesinin bir diğer güçlendirme şekli de, kolon gövde kalınlığını arttırma amacıyla, kolon gövdesinin her iki tarafına kolon takviye levhaları eklenmesi şekliyle yapılmaktadır.

Tablo 1. Kolon ve kiriş kesitinin boyutları (mm) [1].
(Dimensions of column and beam sections)

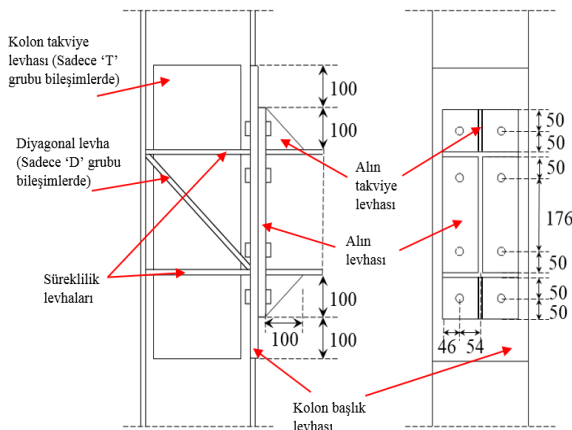
Kesit	Kesit yüksekliği	Gövde kalınlığı	Başlık genişliği	Başlık kalınlığı
Kiriş	300	8	200	12
Kolon	300	8	250	12

Kolon başlığı alın levhasının başlangıç ve bitiş noktasının 100 mm uzağından itibaren kesilerek buradaki boşluğa 20 mm kalınlığında kolon başlık levhası yerleştirilmektedir. Ayrıca birleşimlerde M20 bulon kullanılmaktadır. Bulon çapı ve delik çapı 20 mm olup, bulon gövdesi ile delik arasındaki boşluk dikkate alınmamıştır. Şekil 2’de birleşimlerin mesnet şartları ve boyutları, Şekil 3’de ise birleşimlerin detayı verilmektedir. Birleşimlerde kullanılan alın

takviye levhasının kalınlığı 10 mm'dir. Diagonal levhalı birleşimlerde kullanılan diagonal levhasının boyutları 240x700x8 (mm) olup, kolon takviye levhalı birleşimlerde kullanılan kolon takviye levhasının boyutları 120x380x12 (mm)'dir. Birleşimlerin adlandırılmasında "EP" kısaltması kullanılmakta olup, panel bölgesi güçlendirme şekli diagonal levhalı durum için "D", kolon takviye levhalı durum için "T" ile adlandırılmaktadır.



Şekil 2. Birleşimlerin mesnet şartları ve boyutları (mm) (Support conditions and dimensions of the connections)

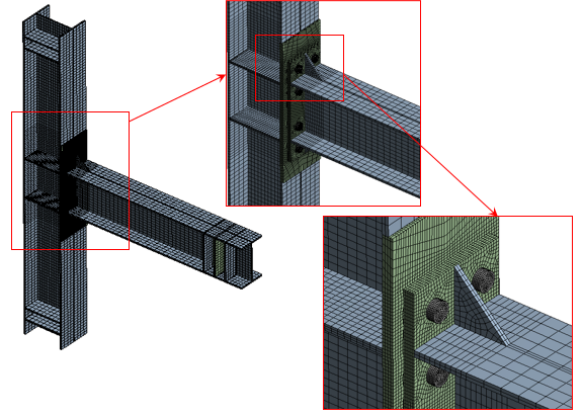


Şekil 3. Birleşimlerin detayı (mm) (Details of the connections)

2.2 Sonlu Eleman Modelleri (Finite Element Models)

Sonlu elemanlar ağı oluşturulurken literatürdeki çalışmada [1] dört yüzlü elemanlar kullanılırken, burada mümkün olduğu sürece altı yüzlü elemanlar kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar ağında kullanılan eleman üç boyutlu, yirmi düğüm noktalı, her düğüm noktasında altı serbestlik derecesine sahip olan

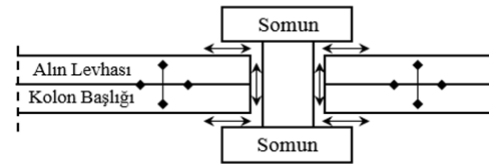
"SOLID186" adlı elemandır. Şekil 4'de bu çalışmadaki "EP-20" adlı birleşimin sonlu eleman ağı gösterilmektedir. Sonlu eleman ağı oluşturulurken bulonlar ve delik çevreleri gibi gerilme dağılımının önemli olduğu yerler daha küçük elemanlarla modellenmektedir.



Şekil 4. EP-20 Birleşiminin sonlu eleman ağı (Mesh of EP-20 connection)

2.3 Temas Özellikleri (Contact Properties)

Bulonlu kolon-kiriş birleşimleri kolon, kiriş, levha ve bulon gibi parçalardan meydana gelmektedir. Bu parçaların birbirlerine etkileşimleri söz konusudur. Bu etkileşimleri dikkate almak için, doğrusal veya doğrusal olmayan temas özellikleri, gerçeğe uygun şekilde dikkate alınmaktadır. Birleşimlerde alın levhası ile kolon başlığı arasındaki temas durumları doğrusal olmayan sürtünmeli olarak dikkate alınmış olup, sürtünme katsayısı 0,44 olarak alınmaktadır [1]. Bulonlar ve delikleri arasındaki temas durumlarının belirlenmesinde bulonun delikten ayrılması ihmal edilmektedir. Dolayısıyla, birleşimlerde bulonlar deliklerden ayrılmayacak ama bulon gövdesi ile delik birbirlerinin teğeti doğrultusunda hareket edebilecek şekilde doğrusal olarak tanımlanmaktadır. Birleşim parçaları arasındaki temas durumları Şekil 5'de açıklanmaktadır.

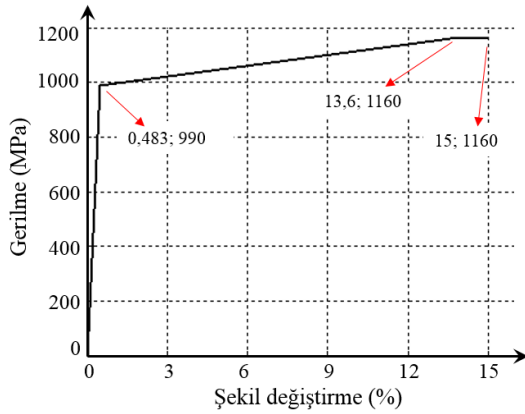


<p>Bu temas durumu, parçaların birbirlerinin teğeti doğrultusunda hareket edebileceğini fakat normal doğrultusunda ayrılmayacağını ifade etmektedir.</p>	<p>Bu temas durumu, parçaların birbirlerinin teğeti doğrultusunda hareket edebileceğini ve normal doğrultusunda ayrılabileceğini ifade etmektedir.</p>
--	--

Şekil 5. Birleşim parçaları arasındaki temas özellikleri (Contact properties between connection components)

2.4 Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Malzeme özellikleri doğrulama yapılacak olan çalışmadan alınmaktadır [1]. Bulonlar yüksek mukavemetli olarak dikkate alınmakta olup, gerilme-şekil değiştirme değerleri Şekil 6'da verilmektedir. Diğer çelik malzemeler ideal elasto-plastik olarak dikkate alınmaktadır. Kalınlığı 16 mm'den büyük olan levhalar için akma gerilmesi ve elastisite modülü sırasıyla 363 MPa ve 204227 MPa, diğer levhalar için ise sırasıyla 391 MPa ve 190707 MPa olarak alınmaktadır. Bütün malzemeler için poisson oranı 0,3'tür.



Şekil 6. Yüksek mukavemetli bulonun gerilme – şekil değiştirme değerleri [1] (Stress – strain values of high strength bolt)

2.5 Yükleme (Loading)

Her bir birleşim 2 adımda yüklenmektedir. 1. yükleme adımında sadece bulonlara 155 kN'luk öngerilme kuvveti etki ettirilmektedir [1]. Bulonlara uygulanan bu öngerilme kuvvetleri 1. yükleme adımının sonundan, analiz sonuna kadar sabit tutulmaktadır. 2. yükleme adımında ise, kiriş üzerindeki yükleme noktasına yerçekimi yönünde monotonik olarak 150 mm yer değiştirme uygulanmaktadır. Birleşimlerin analizleri doğrusal olmayan geometri değişimi dikkate alınarak yapılmaktadır.

3. SONLU ELEMAN ANALİZİ (FINITE ELEMENT ANALYSIS)

Bu bölümde önce sonlu eleman modellemelerinin doğrulanması, ardından bu çalışmadaki sonlu eleman analiz sonuçlarının irdelenmesi yapılmaktadır.

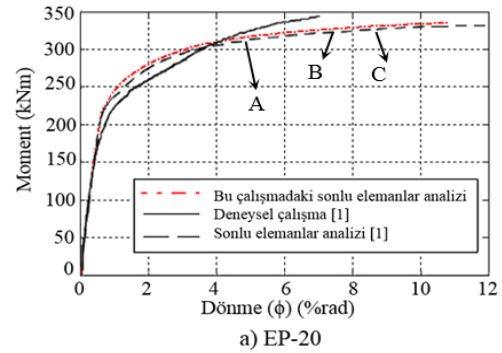
3.1 Sonlu Eleman Modellerinin Doğrulanması (Verification of Finite Element Modeling)

Bu bölümde öncelikle “EP-20” ve “EP-25” adlı birleşimlerin literatürde deneysel ve sonlu eleman analizleriyle elde edilen sonuçlarıyla, bu çalışmadaki sonlu eleman analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmanın ve literatürden alınan çalışmanın kuvvet taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması Tablo 2'de verilmektedir. Moment – dönme ve moment –

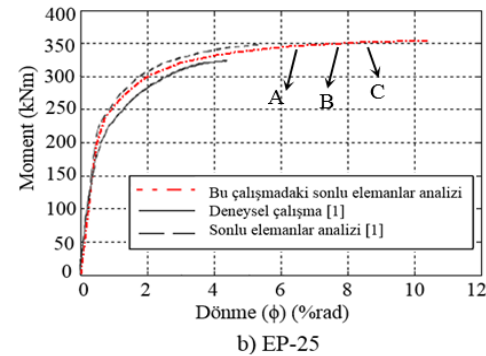
kayma dönmesi eğrilerinin karşılaştırılması sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 9'da ise, bu çalışmadan ve literatürdeki çalışmadan elde edilmiş olan moment – bulon çekme kuvveti eğrileri verilmektedir. Birleşimlerin dönme değeri (ϕ), kayma dönmesi (ϕ_s) ve boşluk dönmesi (ϕ_{ep}) değerlerinin toplanmasıyla bulunmaktadır [1].

Tablo 2. Yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması (kN) (Comparison of loading capacities)

	EP-20	EP-25
Deneysel çalışma [1] (A)	286,4	268,4
Sonlu elemanlar [1] (B)	276,8	289,2
Sonlu elemanlar (Bu çalışma) (C)	278,8	294,4
(C)/(A)	0,97	1,10
(C)/(B)	1,01	1,02



a) EP-20



b) EP-25

Şekil 7. Bu çalışma ve literatürden alınan çalışmanın moment – dönme bakımından karşılaştırılması (Comparison of this study and referred study in terms of moment – rotation)

Kayma ve boşluk dönmeleri ile dönme sırasıyla Eşitlik 1, Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 ile elde edilmektedir [1].

$$\phi_s = \Delta/h_t \quad (1)$$

$$\phi_{ep} = \delta/h_t \quad (2)$$

$$\phi = \phi_s + \phi_{ep} \quad (3)$$

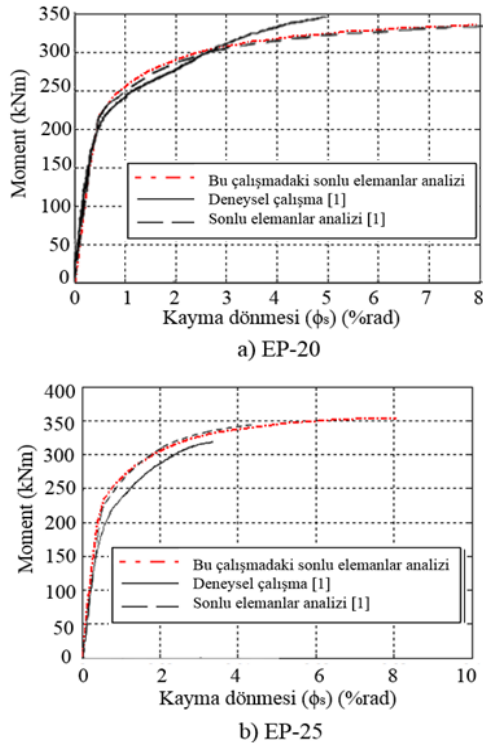
Burada:

Δ =Kolon başlık levhasındaki kiriş alt ve üst başlıklarının orta nokta hizalarındaki yer değiştirme farkları.

δ =Kolon başlık levhası ve alın levhası arasında kiriş üst başlığının orta nokta hizasındaki boşluk.

h_f = Kiriş alt ve üst başlıklarının orta noktaları arasındaki mesafe.

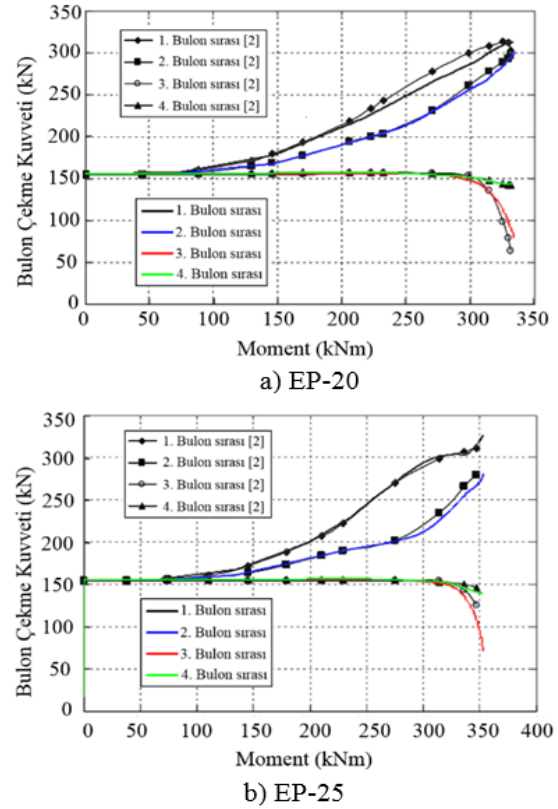
Moment değeri ise, yükleme noktasındaki kuvvet değeri ile yükleme noktasının kolon yüzüne olan uzaklığının çarpımı ile elde edilmektedir [1].



Şekil 8. Bu çalışma ve literatürden alınan çalışmanın moment – kayma dönmesi bakımından karşılaştırılması. (Comparison of this study and referred study in terms of moment – shear rotation)

Bu çalışmadaki sonlu elemanlar analizleri ile literatürden alınan çalışmadaki deneysel ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen birleşimlerin yük taşıma kapasiteleri, moment – dönme, moment – kayma dönmesi ve moment – bulondaki çekme kuvveti karşılaştırmalarının birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Literatürdeki deneysel ve sonlu eleman analizlerinde bulon gövdesi ile delik arasında ne kadar boşluk olduğu belirtilmemiş olup, bu çalışmada bu boşluğun dikkate alınmadığı daha önce açıklanmıştı. Sonuçların karşılaştırılmasına bakıldığında bu boşluğun dikkate alınmamasının sonuçları fazla etkilemediği söylenebilir. Tablo 2'ye bakıldığında bu çalışmadaki ve literatürden alınan çalışmadaki kuvvet taşıma kapasitelerinde EP-20 adlı birleşim için %1, EP-25 adlı birleşim için %2 fark bulunmuştur. Bunun nedeninin sonlu eleman ağının

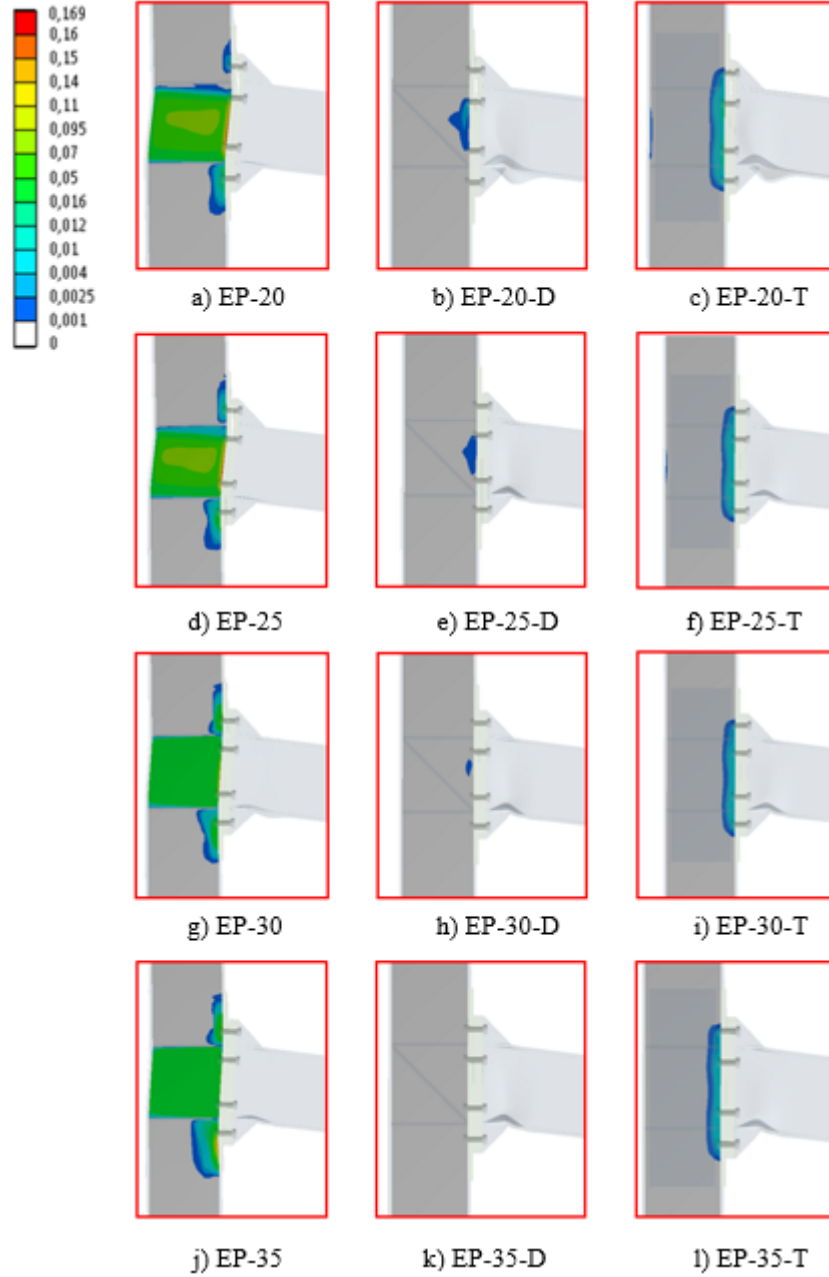
yoğunluğu, sonlu eleman tipi, parçalar arasındaki temas durumu tipi gibi nedenler olabileceği düşünülmektedir. Analiz süresince, birleşim parçalarında meydana gelen büyük şekil değiştirmeler Şekil 7 üzerinde işaretlerle gösterilmiştir. A noktasında kiriş üst başlığını alın levhasına bağlayan kaynak bölgesinde ve üst başlıktaki alın takviye levhasında nispeten büyük plastik şekil değiştirmeler meydana gelmeye başlamaktadır. B noktasında panel bölgesindeki plastik şekil değiştirmeler alın levhası tarafından başlanarak artmaktadır. C noktasında çekme bölgesindeki alın takviye levhası hizasındaki bulonlarda kolon başlığı ile alın levhası arasındaki kaymadan dolayı plastik şekil değiştirmeler artmaya başlamaktadır. Diğer çekme bulonlarında bu şekil değiştirmeler nispeten küçük değerlerde kalmakta, basınç bölgesindeki bulonlarda ise ihmal edilebilecek kadar küçük değerlerde olmaktadır. Şekil 7'de görüldüğü üzere, EP-20 adlı birleşimde A noktası, EP-25 adlı birleşime göre daha erken oluşmaktadır.



Şekil 9. Bu çalışma ve literatürden alınan çalışmanın moment – bulondaki çekme kuvveti bakımından karşılaştırılması (Comparison of this study and referred study in terms of moment – bolt tension force)

3.2 Birleşimde Alın Levhası Kalınlığının ve Panel Bölgesi Güçlendirmesinin Etkisi (Effect of Thickness of End Plate and Reinforcing Panel Zone)

Birleşimlerin panel bölgesi güçlendirmesinin kolon gövdesine etkisini incelemek için Şekil 10'da her bir birleşimin kolon gövdesinin plastik şekil değiştirme dağılımı verilmektedir.



Şekil 10. Birleşimlerin kolon gövdesindeki eşdeğer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları (Equivalent (von-Mises) plastic strain distributions of the column web of the connections)

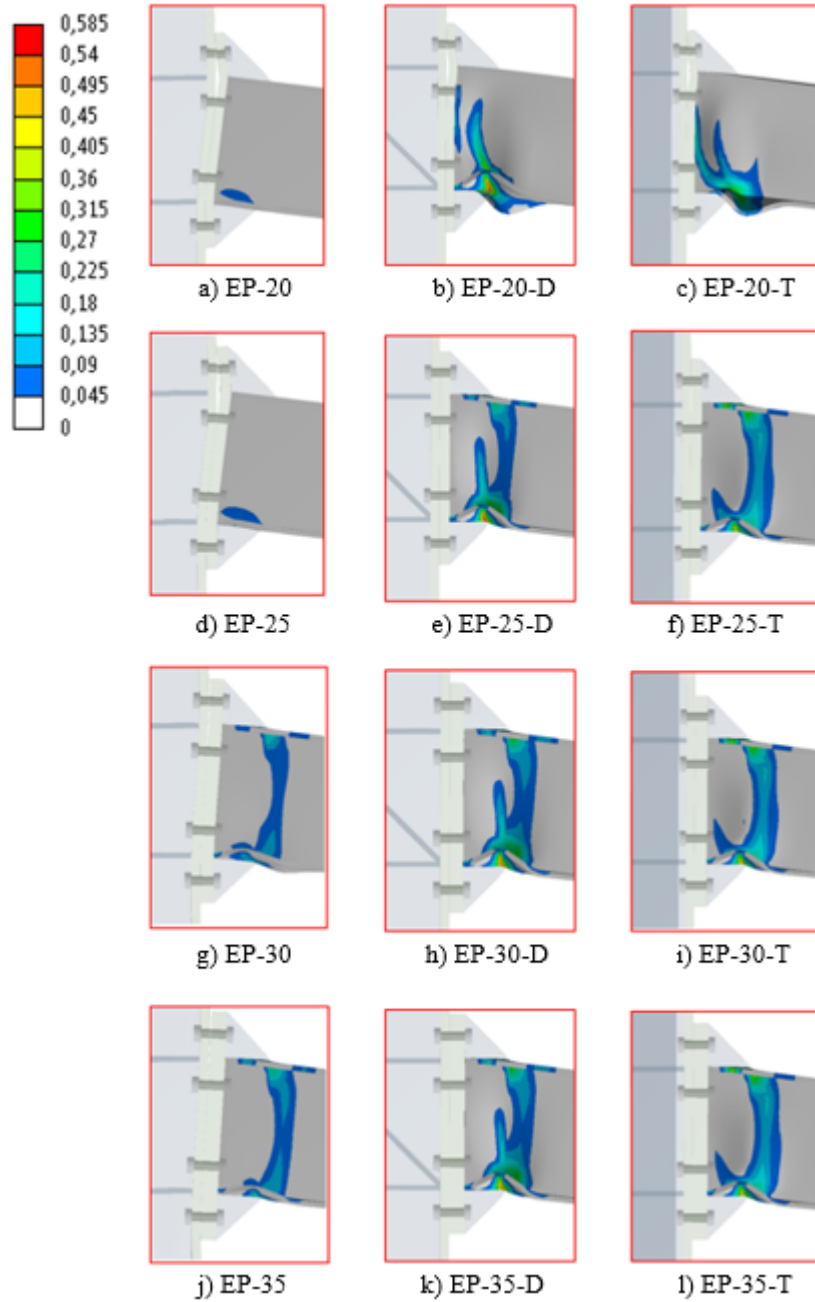
Güçlendirme yapılmamış birleşimlerde, panel bölgesinde ve panel bölgesinin alt ve üst bölgelerinde plastik şekil değiştirmelerin çok fazla olduğu görülmektedir. Alın levhası kalınlığının artmasıyla, güçlendirme yapılmamış birleşimlerde plastik şekil değiştirme dağılımının panel bölgesinde azaldığı fakat panel bölgesinin alt ve üst bölgelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Ayrıca, alın levhası kalınlığı arttıkça, kiriş alt başlığında burkulmanın meydana geldiği görülmektedir. Panel bölgesi güçlendirmesi yapılmış birleşimlerde, kolon gövdesinde plastik şekil değiştirmelerin azaldığı görülmektedir. Diagonal levhalı birleşimlerde alın levhası kalınlığı arttıkça plastik şekil değiştirme dağılımında azalma

görülmektedir. Kolon takviye levhalı birleşimlerde ise, alın levhası kalınlığı artışının kolon gövdesindeki plastik şekil değiştirme dağılımına çok fazla etki etmediği görülmektedir. Ayrıca, güçlendirme yapılmış birleşimlerde kiriş alt başlığındaki burkulmanın güçlendirme yapılmamış durumdakine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Alın levhası kalınlığının ve panel bölgesi güçlendirmesinin kiriş üzerindeki bu etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 11'de kirişlerdeki plastik şekil değiştirme dağılımı verilmektedir. Güçlendirme yapılmamış birleşimlerde alın levhası kalınlığı artışının kirişteki plastik şekil değiştirmeleri çok fazla artırdığı, güçlendirme yapılmış birleşimlerde ise birleşimlerin

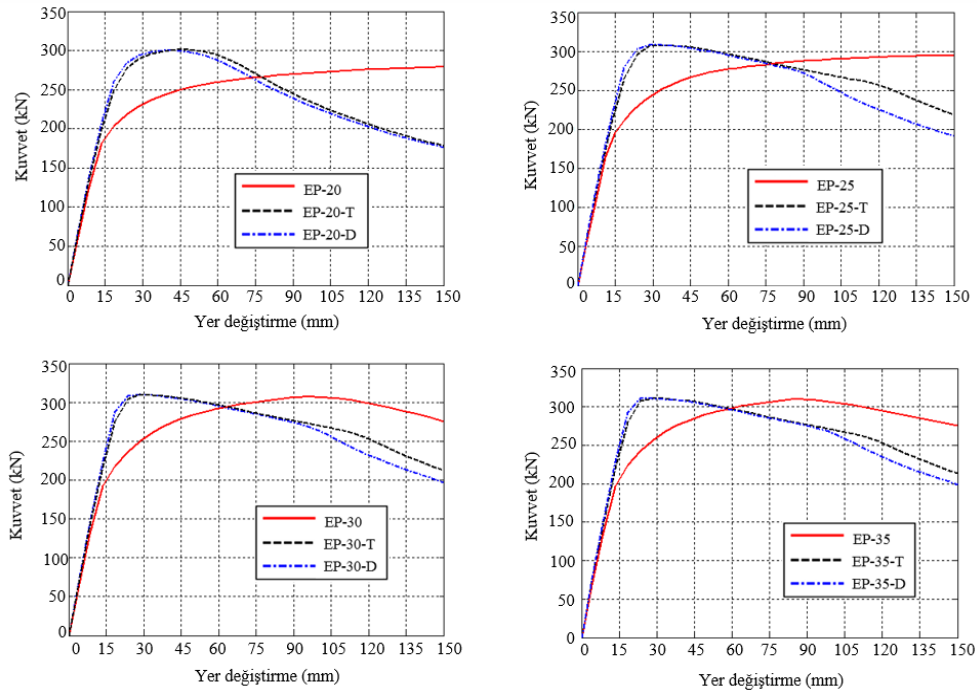
güçlü olmasından dolayı kiriş üzerindeki plastik şekil değiştirme miktarı alın levhası kalınlığı artışıyla daha da fazla olmamaktadır. Şekil 12’de birleşimlerin kuvvet yükleme noktasındaki kuvvet – yer değiştirme grafikleri alın levhası kalınlığına göre gruplandırılarak verilmektedir. Bu grafiklerden görüldüğü gibi, panel bölgesi güçlendirmesi olmayan birleşimler, kuvvet taşıma kapasitelerine daha büyük yer değiştirme değerlerinde ulaşmaktadır. Panel bölgesi güçlendirmesi yapılmış birleşimlerde ise, yaklaşık olarak 30 mm yer değiştirme değerine kadar taşınan kuvvet değerinde artış görülürken, bu yer değiştirme değerinden sonra azalma görülmektedir. Güçlendirme yapılmış birleşimlerde görülen bu azalmalar,

güçlendirme yapılmamış birleşimlere kıyasla, kirişlerin alt başlıklarındaki ve gövdelerindeki (bkz. Şekil 11) nispeten aşırı burkulmalardan dolayı olmaktadır.

Tablo 3’de her bir birleşimin kuvvet taşıma kapasitesi verilmektedir. Tablo 3’den görüldüğü üzere, alın levhası kalınlığının artması, birleşimin kuvvet taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Güçlendirme yapılmamış birleşimlerde alın levhası kalınlığı 20 mm’den 35 mm’ye kadar artırıldığında kuvvet taşıma kapasitesinin %11 arttığı görülürken, kolon takviye levhalı birleşimlerde bu artış %3 olurken, diyagonal levhalı birleşimlerde ise %4 artış görülmektedir.



Şekil 11. Kirişlerdeki eşdeğer (von-Mises) plastik şekil değiştirme dağılımları (Equivalent (von-Mises) plastic strain distributions of the beams)



Şekil 12. Birleşimlerin kuvvet yüklenme noktasındaki kuvvet – yer değiştirme grafikleri (Force reaction of loading point – displacement graphics of the connections)

Tablo 3. Birleşimlerin kuvvet taşıma kapasiteleri (Loading capacities of the connections)

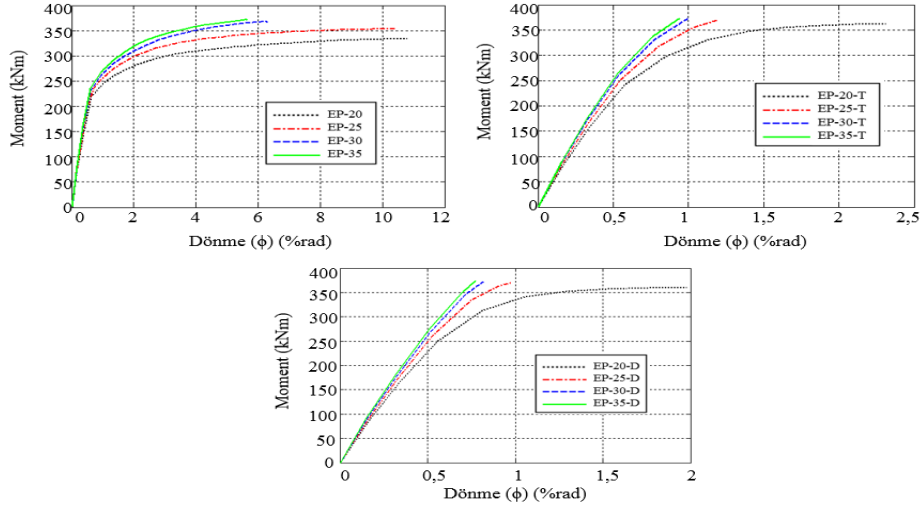
Birleşim	Kuvvet (kN)	Birleşim	Kuvvet (kN)	Birleşim	Kuvvet (kN)
EP-20	278,8	EP-20-T	301,1	EP-20-D	299,9
EP-25	294,4	EP-25-T	308,4	EP-25-D	308,5
EP-30	306,8	EP-30-T	309,9	EP-30-D	309,9
EP-35	309,4	EP-35-T	311,3	EP-35-D	311,3

Yani güçlendirme yapılmış birleşimlerde alın levhası kalınlığının artması, güçlendirme yapılmamış birleşimlere kıyasla kuvvet taşıma kapasitesine fazla etki etmemektedir. Aynı alın levhası kalınlığına sahip birleşimlerin birbirleriyle karşılaştırılacak olursa, alın levhası kalınlığı 20 mm olan birleşimde panel bölgesi güçlendirmesinin kuvvet taşıma kapasitesini %8 arttırdığı görülmektedir. Alın levhası kalınlığı 35 mm olan birleşimde ise, panel bölgesi güçlendirmesinin kuvvet taşıma kapasitesini %1 arttırdığı görülmektedir. Bu durumda, kalın alın levhalı birleşimlerde panel bölgesi güçlendirmesinin kuvvet taşıma kapasitesini fazla arttırmamaktadır.

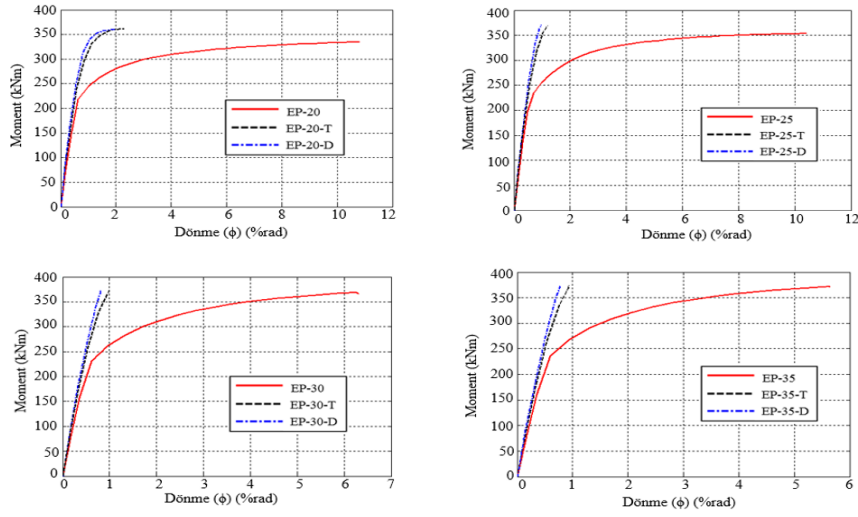
Şekil 13’de güçlendirme yapılamamış, kolon takviyeli ve diyagonal levhalı birleşimlerde alın levhası kalınlığı artışının moment – dönme eğrisine etkisi verilmektedir. Burada her üç grup birleşimde de alın levhası kalınlığı artışının birleşim dönme kapasitesini azalttığı görülmektedir. Güçlendirme yapılmamış birleşimlerde alın levhası kalınlığının 20 mm’den 35 mm’ye çıkarılmasıyla, dönme kapasitesinin yaklaşık olarak %50 azaldığı görülürken, bu oran diyagonal levhalı birleşimlerde %63, kolon takviye levhalı birleşimlerde ise %60 olmaktadır. Şekil 14’de birleşimlerin moment–dönme eğrileri aynı alın levhası kalınlığına sahip olan birleşimler için gruplandırılarak

verilmektedir. Her bir birleşimde panel bölgesi güçlendirmesinin birleşimin dönme kapasitesini yaklaşık olarak %80 azalttığı görülmektedir. Ayrıca, güçlendirme yapılmış birleşimlerde, birleşimin akmaya başladığı andaki moment değerinin dönme değerine oranı olan başlangıç dönme rijitliği değerlerinin, güçlendirme yapılmamış birleşimlerdeki göre daha fazla olduğu görülmektedir.

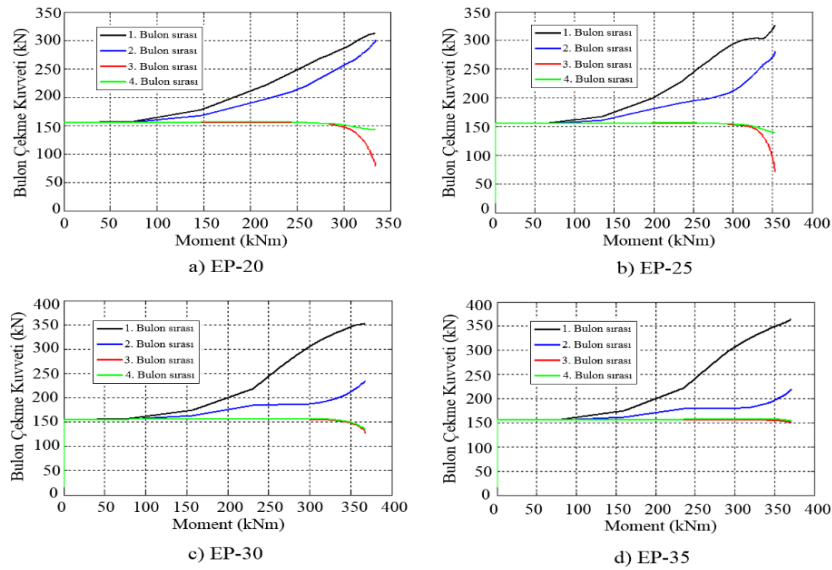
Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17’de her bir birleşimdeki moment–bulondaki çekme kuvveti eğrileri verilmektedir. Burada güçlendirme yapılmamış birleşimlerde, alın levhası kalınlığının artmasıyla birinci bulon sırasındaki bulonların taşıdığı kuvvetin arttığı, ikinci bulon sırasındaki bulonların taşıdığı kuvvetin ise azaldığı görülmektedir. Yani güçlendirme yapılmamış birleşimlerde, alın levhası kalınlığı arttıkça, çekme bölgesindeki en uzak bulonun daha fazla zorlandığı görülmektedir. Kolon takviyeli levhalı birleşimlerde ve diyagonal levhalı birleşimlerde görülen davranışın birbirine benzer oldukları görülmektedir. Birinci bulon sırasındaki bulonların taşıdığı kuvvet değerinde alın levhası kalınlığı artışına bağlı olarak bir değişme görülmezken, ikinci bulon sırasında bu kuvvet değerinde azalma görülmektedir.



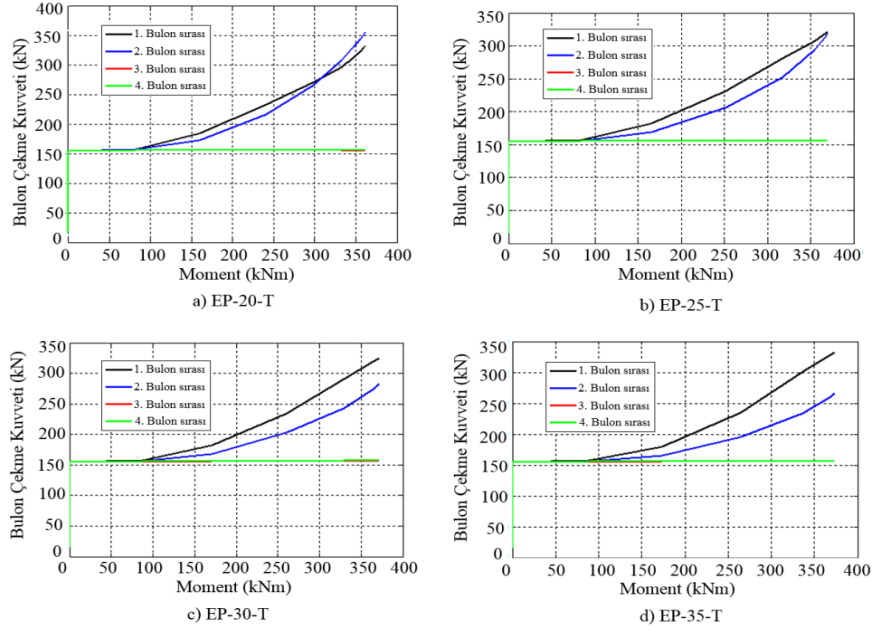
Şekil 13. Birleşimlerin moment – dönme eğrilerinin birleşim güçlendirme türüne göre gruplandırılması (Grouping moment – rotation curves of the connections by connection reinforcing type)



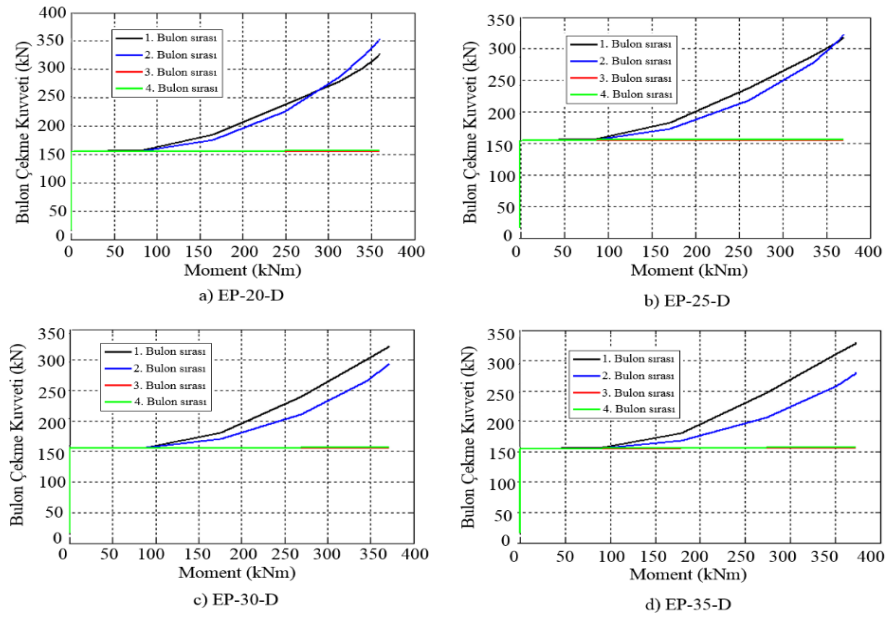
Şekil 14. Birleşimlerin moment – dönme eğrilerinin alın levhası kalınlığına göre gruplandırılması (Grouping moment – rotation curves of the connections by end plate thickness)



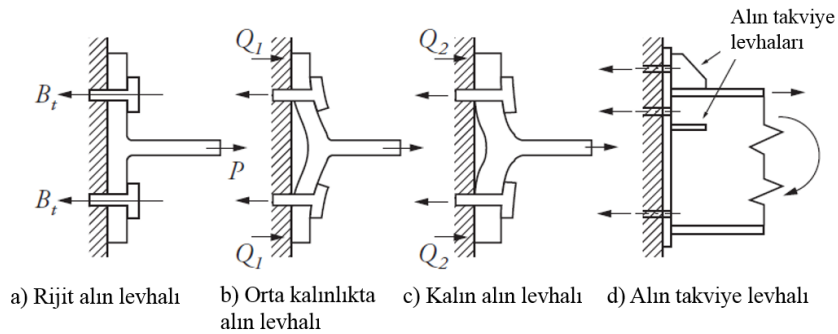
Şekil 15. Güçlendirme yapılmamış birleşimlerin moment – bulondaki çekme kuvveti eğrileri (Moment – bolt tension force curves of the connections without reinforcing)



Şekil 16. Kolon takviye levhalı birleşimlerin moment – bulondaki çekme kuvveti eğrileri (Moment – bolt tension force curves of the connections with column doubler plate)



Şekil 17. Diagonal levhalı birleşimlerin moment – bulondaki çekme kuvveti eğrileri (Moment – bolt tension force curves of the connections with diagonal plate)



Şekil 18. Bulonlu birleşimlerde levye etkisi [23]. (Prying effect in bolted connections)

Şekil 18’de görüldüğü üzere, bulonlu birleşimlerde alın levhasının eğilmesi sonucunda bulondaki çekme kuvvetini artıran, levye etkisi (Şekil 18 “b” ve “c”de Q kuvvetleri) adı verilen bir mekanizma söz konusudur. Birleşimde alın takviye levhası kullanılması bulonlardaki bu etkileri önemli oranda azaltmaktadır [20], [22]. Bugüne kadar bulonlu birleşimlerde bu etkileri inceleyen araştırmacılar, modellerinde alın takviye levhasız birleşim kullanmışlardır [4], [6], [7], [18], [19]. Alın takviye levhalı birleşimlerde bu etkinin az olmasından dolayı, bu çalışmada bulonlardaki levye etkisi incelenmemektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada bulonlu alın levhalı birleşimlerde alın levhası kalınlığı ile panel bölgesi güçlendirmesinin etkisi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar kısaca şöyle açıklanabilir:

Birleşimlerde alın levhası kalınlığının artırılması, güçlendirme yapılmamış birleşimlerde biçim değiştirmenin birleşimden kirişe doğru aktarılmasını sağlamakta olup güçlendirme yapılmış birleşimlerde güçlendirmeden dolayı birleşimlerin zaten güçlü olmasından ötürü birleşimden kirişe doğru olan bu aktarım çok az olmaktadır. Alın levhası kalınlığı artırılması, ayrıca, güçlendirme yapılmamış birleşimlerde güçlendirme yapılmış birleşimlere kıyasla daha fazla kuvvet kapasitesi artışı meydana getirmekte olup güçlendirme yapılmış birleşimlerde önemli bir etki oluşturmamaktadır. Panel bölgesi güçlendirmesi yapılmış birleşimlerin kolon gövdelerindeki plastik şekil değiştirmelerin azaldığı görülmüşken, kiriş alt başlığındaki burkulmanın artmasından ötürü kuvvet–yer değiştirme eğrisinde azalma meydana gelmektedir. Güçlendirme yapılmış birleşimlerde kolon ve kiriş arasındaki kayma ve boşluktan kaynaklanan dönme miktarı çok büyük ölçüde azaldığından oldukça rijit bir birleşim oluşturulmaktadır. Birleşimlerin panel bölgesinin diyagonal levha ve kolon gövdesi takviye levhası ile güçlendirmesi hemen hemen aynı etkiyi yaratmakta olup ilk güçlendirme şekli nispeten diğerine göre daha rijit bir birleşim oluşturmaktadır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

- EP:** Birleşimin alın levhası kalınlığı
D: Panel bölgesi diyagonal levha ile güçlendirilmiş birleşim
T: Panel bölgesi kolon gövdesi takviye levhası ile güçlendirilmiş birleşim
 ϕ : Birleşimdeki dönme değeri
 ϕ_s : Birleşimdeki kayma dönmesi değeri
 ϕ_{ep} : Birleşimdeki boşluk dönmesi değeri
 Δ : Kolon başlık levhasındaki kiriş alt ve üst başlıklarının orta nokta hizalarındaki yer değiştirme farkları

- δ : Kolon başlık levhası ve alın levhası arasında kiriş üst başlığının orta nokta hizasındaki boşluk
h_i: Kiriş alt ve üst başlıklarının orta noktaları arasındaki mesafe

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Shi, G., Shi, Y., Wang, Y. ve Bradford, M.A. “Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details”, **Engineering Structures**, Cilt 30, No 10, 2677-2686, 2008.
- Shi, G., Shi, Y. ve Chen, H. “Finite Element Analysis of Beam-Column Bolted End-Plate Connections in Steel Frames”, **Seventh Pacific Structural Steel Conference**. Long Beach, California, U S A, March 24-27, 2004.
- ANSI/AISC 358-10. Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, AISC, Chicago, IL, 2010.
- Sherbourne, A.N. ve Bahaari, M.R. “3D simulation of end-plate bolted connections”, **Journal of Structural Engineering**, Cilt 120, No 11, 3122-3136, 1994.
- Bahaari, M.R. ve Sherbourne, A.N. “Structural behavior of end-plate bolted connections to stiffened columns”, **Journal of Structural Engineering**, Cilt 122, No 8, 926-935, 1996.
- Bahaari, M.R. ve Sherbourne, A.N. “3D simulation of bolted connections to unstiffened columns-II. Extended end-plate connections”, **Journal of Constructional Steel Research**, Cilt 40, No 3, 189-223, 1996.
- Bahaari, M.R. ve Sherbourne, A.N. “Behavior of eight-bolt large capacity endplate connections”, **Computers & Structures**, Cilt 77, Sayı 3, 315-325, 2000.
- Gerami, M., Saberi, H., Saberi, V. ve Daryan, A.S. “Cyclic behavior of bolted connections with different arrangement of bolts”, **Journal of Constructional Steel Research**, Cilt 67, No 4, 690-705, 2011.
- Mashaly, E., El-Heweity, M., Abou-Elfath, H. ve Osman, M. “Behavior of four-bolt extended end-plate connection subjected to lateral loading”, **Alexandria Engineering Journal**, Cilt 50, No 1, 79-90, 2011.
- Eldemerdash, M., Abu-Lebdeh, T. ve Al Nasra, M. “Finite element analysis of large capacity endplate steel connections”, **Journal of Computer Science**, Cilt 8, No 4, 482-493, 2012.
- Wang, M., Shi, Y., Wang, Y. ve Shi, G. “Numerical study on seismic behaviors of steel frame end-plate connections”, **Journal of Constructional Steel Research**, Cilt 90, 140-152, 2013.
- Kaushik K., Sharma A.K. ve Kumar R. “Modeling and FE analysis of column to beam

- end-plate bolted connection”, **Engineering Solid Mechanics**, Cilt 2, No 1, 51-66, 2013.
13. Dessouki, A.K., Youssef, A.H. ve Ibrahim, M.M. “Behavior of I-beam bolted extended end-plate moment connections”, **Ain Shams Engineering Journal**, Cilt 4, No 4, 685-699, 2013.
 14. Saberi, V., Gerami, M. ve Kheyroddin, A. “Comparison of bolted end plate and T-stub connection sensitivity to component thickness”, **Journal of Constructional Steel Research**, Cilt 98, 134-145, 2014.
 15. Shaker, F.M.F. ve Abd Elrahman, W.M. “Analytical behavior of steel pre-tensioned bolted connections with flushed and extended end plates under bending”, **World Applied Sciences Journal**, Cilt 30, No 6, 673-684, 2014.
 16. Yılmaz, O. ve Bekiroğlu, S. “Behavior of pretensioned bolted steel column beam connections subjected to monotonic loading”, **11th International Congress on Advances in Civil Engineering**, İstanbul, Ekim 2014.
 17. Mashaly E, El-Heweity M, Abou-Elfath H ve Osman M. “Finite element analysis of beam-to-column joints in steel frames under cyclic loading”, **Alexandria Engineering Journal**, Cilt 50, No 1, 91-104, 2011.
 18. Maggi, Y.I., Gonçalves, R.M., Leon, R.T., ve Ribeiro, L.F.L. “Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modeling”, **Journal of Constructional Steel Research**, Cilt 61, No 5, 689-708, 2005.
 19. Prinz, G.S., Nussbaumer, A., Borges, L. ve Khadka, S. “Experimental testing and simulation of bolted beam-column connections having thick extended endplates and multiple bolts per row”, **Engineering Structures**, Cilt 59, 434-447, 2014.
 20. Guo, B., Gu, Q. ve Liu, F. “Experimental behavior of stiffened and unstiffened end-plate connections under cyclic loading”, **Journal of Structural Engineering**, Cilt 132, No 9, 1352-1357, 2006.
 21. ANSYS, Incorporated programmers manual for ANSYS version 16.
 22. Gorenc, B.E., Tinyou, R. ve Syam, A.A., **Steel Designers’ Handbook 8th edition**, NewSouth Publishing, Sydney, Australia, 2012.

