

## Araştırma Makalesi

# Eğilme ve Eksenel Kuvvet Etkisindeki Başlık Levhalı Kutu Kesitlerin İncelenmesi

\*<sup>1</sup>İlyas Devran ÇELİK, <sup>2</sup>Mustafa Bedirhan AY, <sup>3</sup>Gülsüm Beyza YAVUZ, <sup>4</sup>Kılıç Yasin ARSLAN

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Isparta, Türkiye, [devrancelik@sdu.edu.tr](mailto:devrancelik@sdu.edu.tr), ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9011-4041>

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Isparta, Türkiye, [mustafabedirhanay@gmail.com](mailto:mustafabedirhanay@gmail.com), ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-7478-3322>

<sup>3</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Isparta, Türkiye, [beyzayavuz1@gmail.com](mailto:beyzayavuz1@gmail.com), ORCID ID <http://orcid.org/0009-0002-3828-905X>

<sup>4</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Isparta, Türkiye, [kyarlan92@gmail.com](mailto:kyarlan92@gmail.com), ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-4433-9204>

Geliş : 10.06.2024;

Kabul: 16.12.2024

## Öz

Yapı sistemi üzerinde birleşim tasarımından genel yapı tasarımına dek, süneklik özelliklerinin sağlanması gerekir. Ülkemizde yaygın olarak tercih edilen kutu kesitli profillerin iç kuvvetler tesiri altında oluşan ani kapasitelerin kayıplarına ve gevrek kırılmalarına yol açarak telafi edilemez hasarlara neden olabilir. Bu nedenle yapı elemanlarının tasarımlarında gerçekleşebilecek burkulma durumunun dikkate alınarak tasarımları yapılmalıdır. Yapılan bu çalışmada, kutu profillerin lokal burkulmalarının önlenmesi amacıyla başlık levhalarıyla güçlendirilmiştir. Bu güçlendirmenin eksenel kuvvet etkisi altındaki kutu kesitli profillerde kaynaklı birleşim lokal burkulmaları ve taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analizler, tersinir statik artımsal yükler etkisinde sayısal olarak yapılmıştır. Kaynak dikişinde meydana gelmesi olası yırtılmalar önlendiğinde başlık levhasıyla güçlendirme tekniğinin etkili sonuçlar verdiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Kutu Kesitli Kiriş-Kolonlar, Alın Levhalı Birleşim, Kaynaklı Moment Aktaran Birleşim, Moment Aktaran Çerçeve Sistemler

\*<sup>1</sup>Sorumlu yazar

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Çelik, İ.D., Ay, M.B., Yavuz, G.B. & Arslan, K.Y. (2024). Eğilme ve Eksenel Kuvvet Etkisindeki Başlık Levhalı Kutu Kesitlerin İncelenmesi. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 6(2), 159-177. <https://doi.org/10.60093/jiciviltech.1497584>

## Investigation of Box Sections with Heading Plates Under the Effect of Flexural and Axial Force

### Abstract

---

Ductility needs to be ensured in the building system, from connection design to overall structure design. For the RHS profiles that are commonly used in general, the sudden loss of capacity and brittle fractures that occur under the influence of internal forces may cause irreversible damage. For this reason, the design of structural elements should be made with the consideration of the possible buckling conditions. In this study, RHS profiles are strengthened with endplates in order to prevent local buckling. The effects of this reinforcement on local buckling and carrying capacity of welded joints in RHS profiles under the influence of axial force are examined. Analyzes are made numerically under the influence of cyclic static incremental loads. It has been observed that the strengthening technique with the endplate gives effective results when possible fractures in the weld seam are prevented.

*Keywords: RHS Beams-Columns, End Plate Connections, Welded Moment Resisting Connections, Moment Resisting Frame Systems*

## 1. Giriş

Çelik yapı malzemesi sönüm kabiliyeti, yüksek sünekliği açısından depreme dayanıklı yapı tasarımındaki önemli yapısal malzemedendir (Jian & Guang, 2022). Fakat çelik malzemenin mekanizmadaki özelliklerin avantajlarını tam anlamıyla kullanabilmek için sistemde birleşim tasarım aşamasından başlayarak, bütün çelik yapısına sahip malzemenin, tasarımındaki özelliklerin, sünekliğe uygun tasarım yapılmalıdır. Kesit özelliği ve bütün sistem olarak davranışın yapısal bütünlüğe etkisi detaylı bir şekilde dikkate alınmalıdır (Zhao et al., 2024). Çelik yapısal sistemin sismik etkiler altındaki davranışı malzeme özelliğine, kesit geometrisine ve birleşim detayına bağlıdır (Mahim et al., 2002). Yapı birleşim detayları açısından, perçinli, kaynaklı ve bulonlu bağlantı vb. birleşim türleri, birleşim şekil ve detayları yapımı ve malzemedeki kalite çelik yapıların sünekliğini çok fazla etkileyen temel etkenlerdendir. Çelik bir yapının tasarımındaki temel kavramlar dayanımı, rijitliği ve sünekliğidir. Süneklik özelliği, yapıdaki oluşabilecek plastik deformasyon durumlarında tüketilen döngüsel enerjiyi tanımlar (Dicleli & Mehta, 2007; Gioncu & Mazzolani, 2002). Kiriş-kolon birleşim detaylarında gevrek kırılma durumunun olmaması olasılığı yerine, buradaki bağlantı noktasının sistemin sünekliğine uygun bir davranış sergilemesi beklenir. Tam aksi bir durumda ise, çelik yapılardaki eleman birleşim bölgesinden gevrek kırılmakta ve bu durum çelik yapıda bölgesel ya da bütün yapı elemanı kullanılmaz duruma

gelmesi beklenmekte veya göçmesi beklenmektedir (Gioncu, 2000). Gevrek kırılma durumları beraberindeki bir sürü yapısal sorunu meydana getirdiğinden dolayı, bu durumun engellenmesi can güvenliği, yapısal sistemin fonksiyonun devamını sürdürme durumu büyük önem taşımaktadır (Chopra & Goel, 1999). Deprem enerjisinin yapıya etkimesi durumu esnasında malzeme özellikleri süneklik düzeyi yüksek çelik yapısının bu türdeki özelliğın sistemdeki davranışa yansıtılması ve uygun çelik birleşim detayının belirlenmesi amacı güdülerek bu alanda birçok deney ve sayısal analiz çalışmaları yapılmıştır.

Çelik yapısına sahip elemanlarının sünekliğini etkileyen temel faktörlerin başında, yerel burkulma tipi, elemanın kesitsel özellikleri, malzeme özellikleri, geometrisindeki kusurlar çoklu burulma modu etkileşimi, moment diyagramı değişimi, düğüm noktalarının etkisi gibi faktörler etkilemektedir. Bu sebeplerden dolayı, çelik yapı elemanlarının sahip oldukları özelliklerle, yapılarındaki geometri ve ağırlık yüklerinin deprem etkisi altındaki yapının davranış olasılıklarını etkileyen faktörler olarak karşı karşıya kalmaktayız (Mashiri & Zhao, 2004). Çelik yapı sisteminin deprem enerjisinden etkilendiği anda şayet yapının sönümleme enerjisi, depremin yapıya kazandırmış olduğu enerjisinden büyük durumda ise, bu enerji sönümleme enerjisi ile denge durumuna gelir (Mashiri & Zhao, 2010). Sönüm enerjisi, depremin etki enerjisinden küçükse, sönümleme enerjisi ile deprem etki enerjinin aralarındaki fark, döngüsel enerjisi ile

denge haline gelir. Buradaki ele aldığımız fark yapının süneklik özelliğinin doğru tanımlanmasıyla mümkündür. Bu nedenle, süneklik, plastik deformasyon özellikleri vasıtasıyla tüketilen enerji miktarını tanımlayan bir özellik olarak kabul edilir. Bu özellik, bir yapının deprem etkilerine karşı direncini değerlendirmek amacıyla rijitlik ve dayanım kavramlarıyla birlikte kullanılarak performansını belirlemede önemli bir rol oynar (Zhao, 2000).

Çelik sistemindeki elemanların gevrek tarzda kırılması, yerel burkulma durumu ve eğilmeli-burulma nedenlerinden dolayı yüksek ölçüdeki plastik dönme sonuçlarına ulaşmak mümkün değildir. Bu sebepten yapı tasarımındaki kesit özellikleri, plastik dönmelerdeki kabiliyetlerine göre sınıflandırılırlar (Chao & Goel, 2006). Berman & Bruneau (2007), yaptıkları deneysel çalışmada, çevrimsel yüklemeye yapıldığında çelik yapısına sahip moment çerçevenin mafsallaşması ve hasar tespiti hakkında bilgi alabilmek amacıyla araştırma yapılmıştır. 3 katlı tam ölçek özelliğine sahip çelik moment çerçeve sisteminde deneysel araştırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen veri sonuçlarında kiriş elemanları, kolon ve panel bölgelerinin tabanlarında dengeli bir şekilde deformasyon oluştuğu gözlemlenmiştir.

Nakashima et al. (2004), çatı elemanındaki deplasman kontrolleri statiksel pushover analiz sonuçlarına bakıldığında, detaylı modellemelerin sonucunda artan kapasite durumundan

faydalanması, 9 ve 20 katlı binaların deneyleri yapıp, sonuçları değerlendirilmiştir. Deneysel modellere farklı yer hareketleri uygulanarak analiz yapılmış, kapasite durumunda artış gözlemlenmiştir. Başından sonuna kadar, panel bölgesinde ve döşemede kompozit etkisinin oluşmaması bir eşdeğer düşey açıklığın, kirişte ve kolonlarda aradaki açık uzunluğun ölçüsünü içeren modelin en uygun modelin olacağı tespit edilmiştir (Foutch & Yun, 2001). Deprem kuvveti etkisi altında moment aktarabilen çelik çerçeve yapıların, eski teknolojilerdeki moment aktarmadığı kabulü yapılarak birleşim tasarımı yapılan binalardan daha iyi performans sağladıkları sonucuna varılmıştır (Yun et al., 2002).

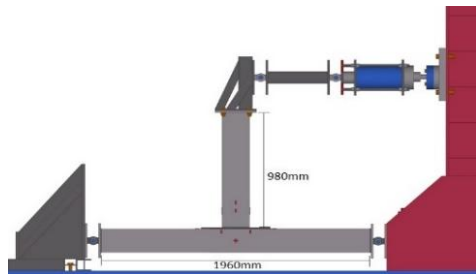
Çalışmadaki kutu kesitleri ele aldığımızda, değişik gövde ve başlığa sahip sistemin, akma dayanım sınır durumu ve kalınlık parametrelerine sahip kutu kesitli profillerin plastik kesme durumu ve momentlerin dayanım verileri bulunmuştur. Çalışmadaki denklemlerin, başlıkta ve gövdede burkulmalarını engel olabilmek için minimumda gövdedeki rijitleştirme mesafeleri ve maksimum başlık kalınlığındaki davranışı incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu araştırma, sayısal analizlerle gerçekleştirilmiştir ve incelenen modeller, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Çelik Yapılar Laboratuvarı'nda (Fincanoğlu, 2015) yapılan "Eğilme Etkisi Altında C

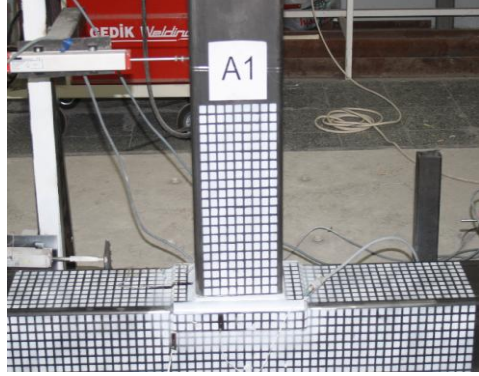
Tipi Başlık Levhali Kutu Kesitli Birleşimlerin Dönme Kapasitesinin İncelenmesi" adlı doktora tezindeki deneysel verileri temel alınarak geliştirilmiştir. Kutu kesitli profillerin T tipi kaynaklı birleşimlerinin incelendiği bu çalışmada, sistem statik artımsal olarak etkitilen yük ile detaylı bir analize tabi tutulmuştur. Başlık levhasıyla güçlendirilen birleşimin lokal burkulma etkileri de araştırmada ele alınmıştır. Doktora tezindeki statik artımsal yük uygulamasına ek olarak, kiriş üzerine artımsal eksenel yük etkitilmiştir.

Kolonun kesiti,  $200 \times 200 \times 5$  mm ölçülerinde kare kesitli kutu profillerdir, kirişin kesiti  $150 \times 200 \times 4$  mm boyutlarında dikdörtgen kesitli kutu profillerdir. Tasarımı yapılan birleşimin elemanlarında, kirişin düşey doğrultudaki uzunluğu 980 mm ve kolonun yatay doğrultudaki uzunluğu 1960 mm olmak üzere belirlenen boyutlar hep aynı ölçülerde kullanılmıştır. Şekil 1'de deneydeki numunenin boyutları gösterilmiştir.



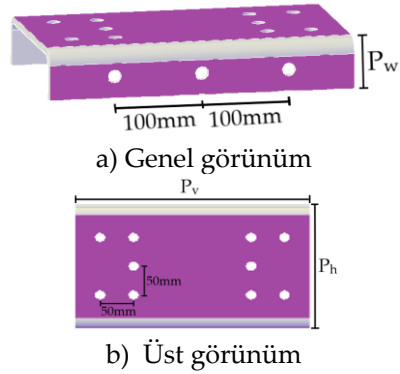
Şekil 1. Deney numunesi boyutları.

Şekil 2'de deneysel çalışmada kullanılan numune örneği verilmiştir.



Şekil 2. Deney numunesi örneği.

Bu çalışmadaki, söz konusu birleşim tipinde oluşabilecek lokal burkulma etkilerini en aza indirmek amacıyla geliştirilen başlık levhasının yerleşim görünümü Şekil 3'te detaylı bir şekilde sunulmaktadır.



Şekil 3. Alın levhali kiriş kolon birleşim detayları. Birleşime ait perspektif ve kesit görüntüleri.

Bu deney çalışmasında, adlandırma yaparken temel alınan parametreler başlık levhalarının boyutları ve dikkate alınan eksenel kuvvet büyüklüğü ölçütüne göre yapılmıştır.  $P_v$  terimi, levhanın boyuna uzunluğunu temsil etmektedir. Uzunluğun kolonun üst başlığında etkinin alanını büyütebilmek

amacıyla boyutta değişimler yapılmıştır.  $P_h$  terimi, levha elemanının yataydaki uzunluğunu ifade etmektedir. Kolon bir yüzünü tamamen sardığı için bu değer sabit olarak belirlenmiştir.  $P_w$  terimi birleşimde kolon yapı elemanı gövdesi boyunca uzanan uzunluğu temsil etmektedir. Gövdede olası burkulma etkilerinin  $P_w$  uzunluğunun ilişkisini değerlendirmek için üç farklı boyda boyutlandırma yapılmıştır. Kolonun üst kısmıyla başlık levhasının birleşimi açılmış olan deliklere kaynaklı olarak

yapılmıştır. Levhaya açılmış olan kaynak deliklerin boyutu 10mm çapına sahiptir. Kaynak deliklerini yerleştirme bölgesi levhanın üst kısmında 50mm, kenar kısmında 100mm aralıklar kullanılarak yerleştirilmiştir. Tasarlanan sayısal modellerin geometrik özellikleri dışında, tüm modellerin değişik eksenel yükleme etkisi altında analizi yapılmıştır. Analizde kullanılan boyutsal parametreler ve yükler Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Modellerde kullanılan boyutsal parametreler ve eksenel yükler.

Sayısal No	Model No	Kolon (mm)	Kiriş (mm)	$P_w$ (mm)	$P_v$ (mm)	Eksenel Yük (kN)
1	M8/1					8kN
2	M12/1	200x200x5	150x200x4	50	300	12kN
3	M16/1					16kN
4	M8/2					8kN
5	M12/2	200x200x5	150x200x4	75	300	12kN
6	M16/2					16kN
7	M8/3					8kN
8	M12/3	200x200x5	150x200x4	100	300	12kN
9	M16/3					16kN
10	M8/4					8kN
11	M12/4	200x200x5	150x200x4	50	400	12kN
12	M16/4					16kN
13	M8/5					8kN
14	M12/5	200x200x5	150x200x4	75	400	12kN
15	M16/5					16kN
16	M8/6					8kN
17	M12/6	200x200x5	150x200x4	100	400	12kN
18	M16/6					16kN

Yapılan sayısal analizler, ANSYS WorkBench sonlu elemanlar programıyla yapılmıştır. Kolonlara, başlık levhaları kaynak yöntemi

kullanılarak rijit bir birleşim sağlanmıştır. Birleşimlerde, kullanılan kaynak dikişi kalınlığının hesaplanmasında, alışılmışın dışında bir

yaklaşım benimsenmiştir. Kaynak dikişi kalınlığı, birleşimdeki minimum levha kalınlığı değil birleşimdeki minimum kesit alanındaki eleman dikkate alınarak seçilmiştir.

Bu sebepten dolayı birleşimde kullanılan kaynak dikişi kalınlığı maksimum 7mm olarak belirlenmiştir. Birleşimi oluşturan elemanların et kalınlıkları göz önünde bulundurularak kaynak dikişi kalınlığı 6mm olarak seçilmiştir.

Kaynak dikişlerinin mekanik özellikleri; Akma gerilmesi 450N/mm<sup>2</sup>, Kopma gerilmesi 59kg/mm<sup>2</sup>, uzaması %28 ve elastisite modülü 21000kg/mm<sup>2</sup>'dir. Sayısal analizlerde kaynak dikişleri için bu değerler kullanılmıştır.

Modelin rijit bir davranış sergilemesi amacıyla, kolon ve kolon başlık levhası arasındaki iki yüzeyin bağlantısı "bonded" komutu kullanılarak sağlanmıştır.

Sayısal modellerdeki doğrusal olmayan burkulma analizleri için algoritma ilk olarak doğrusal burkulma analizi yapılarak burkulma modu bulunmuştur. Sonrasında Şekil değiştirmiş durumdan doğrusal olmayan malzeme dikkate alınıp doğrusal olmayan sayısal analizi de yapılmıştır.

Düğüm noktası eğilme etkisiyle karşılaştığında, sistemin yapı elemanları olan kolonlar, kirişler ve çaprazlarda lokal yer değiştirmeler oluşmaktadır. Sistemin yapı elemanlarındaki yer değiştirmeler, birleşim bölgesinin

çalışma prensibini yani rijit veya yarı rijit bir davranış sergilemesinde etkili olmaktadır. Literatür çalışmalarında özellikle kolonlardaki yerel burkulma etkilerinin, birleşim bölgesindeki davranışını etkilediğinin önemli olduğunun üzerinde durulmuştur. Bu konuya, Committee for International Development and Education on Construction of Tubular Structures (CIDECT) ve Eurocode-3 bölüm 8'de detaylı bir şekilde yer verilmiştir. CIDECT ve Eurocode-3 yönetmeliklerinde bu tür birleşimlerin tanımını yaparken belirli kriterleri belirlemişlerdir.

Yönetmeliklerde belirtilen katsayılar, kiriş genişliğinin kolon genişliğine oranını ifade eden  $\beta$  ve kolon et kalınlığının kolon derinliğine oranını ifade eden  $\gamma$  olarak adlandırılan orantısal katsayılardır. Kullanılan katsayıları temel alarak, birleşimin rijitlik tanımlaması yapılmıştır. Rijitlik kriterinin oluşmasındaki en temel etken kiriş genişliğinin kolon genişliğine oranına bağımlı olarak, kolonumuzda meydana gelen şekilsel değişimlerin baş kısmında ya da gövdede oluşması veya her iki durumun da aynı anda oluşmasıdır. Bu durumu genel olarak ifade etmek gerekirse;  $\beta=1.0$  olduğunda, kolon yapı elemanının başlıkta da gövde kısmında da şekilsel değişime uğrarken, birleşim bölgesinin rijit davrandığı tespit edilmektedir.  $\beta<0.9$  iken ise kolonun başlık kısmının şekil değiştirdiği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, CIDECT tarafından belirlenen  $\beta$  değeri temel alınarak, kolon ve kirişin ( $\beta=0.75$ ) yarı rijit kabul edildiği

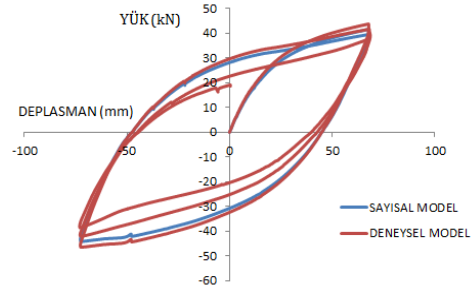
birleşim noktasının, rijit bir davranış sergilemesi amacıyla rijitleştirme levhalarının eklenme durumu tasarlanmıştır. Bu bağlamda, birleşim noktasına başlık levhası eklemesi yapılmıştır. Başlık levhalarının farklılık gösteren boyutsal parametreleri kullanarak tasarlanmış olup,  $\beta$  katsayısının hesaplanmasında kirişin genişliği ile kolonun genişliği oranının yerine, alın levhasının genişliğinin ( $P_h$ ) kolonun genişliğine oranı alınmıştır ve bu oran  $\beta_a$  simgesi ile adlandırılmıştır.  $\gamma$  katsayısı hesaplanmasında, alın levhasının cidar kalınlığını ve kolonun cidarının kalınlığını toplamının karşılığı ile kolon derinliğinin oranı hesaplanmıştır. Bu oran  $\gamma_a$  olarak adlandırılmıştır. Elde edilen deneysel ve sayısal model sonuçları, CIDECT'te tanımlanan ampirik formüllerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmadaki modellerdeki başlıktaki levhanın genişliğinin ve cidardaki kalınlığın aynı tutulup  $\beta_a=1.0$  olarak baz alınmıştır.  $\gamma_a$  değeri için ise sabit cidar kalınlığı 18.18mm olarak dikkate alınmıştır.

### 3. Bulgular

Buradaki araştırmada, doktora tezi kapsamında elde edilen deneysel sonuçların analizi temel alınmıştır. Çalışmadaki modellerin üzerine eklenen eksenel yüke bağlı olarak, lokal burkulma ve kapasite üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Şekil 4'te, çalışma kapsamında yapılan analizlere ait yük-deplasman eğrileri verilmiştir. Bu karşılaştırma, sayısal

modelin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Deneysel ve sayısal model yük deplasman eğrileri.

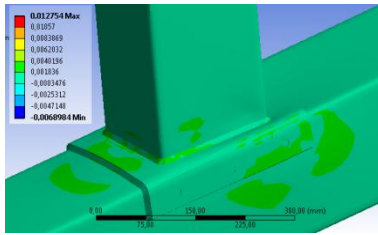
Başlık levhalarındaki eksenel kuvvetin etkisi altında davranış, kapasite, şekil değiştirmeler ve gerilme dağılım faktörleri açısından ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Bu değerlendirme sürecinde, başlık levhalarının lokal burkulmayı engelleme amacıyla kullanılmasının, eksenel yük altındaki davranışının optimizasyonu, kapasite artışı, Şekil değiştirme ve gerilme dağılımı açısından nasıl etkili olduğuna dair çeşitli yorumlar sunulmuştur. Bu şekilde, başlık levhalarının boyutsal değişimlerinin eksenel yük altındaki optimizasyonu detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında ilk olarak M01 numaralı modellere etkitilen eksenel yük durumları için oluşturulan modeller belirlenmiştir (M8/1, M12/1 ve M16/1).  $P_v=300$ ,  $P_w=50$ mm değerlerine sahip numuneler test edilmiştir. Tercih edilen başlık levhasının kullanılmasıyla kolon üzerindeki yerel burkulma etkisinin azaldığı gözlemlenmiştir. Baş kısma yerleştirilen levha elemanının etki alanı içinde, kirişten kolona iletilen gerilmelerin sistemsel olarak başlıkta ve

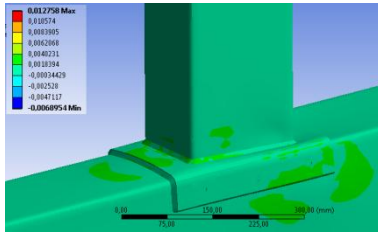


gövde kısmında bütünsel bir halde karşılanmıştır. Kolondaki şekil değiştirmenin, lineer elastik sınırları içinde kalması sağlanmıştır.

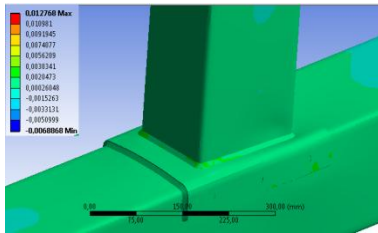
Şekil 5'te M01 numunesinin, üç farklı eksenel yük durumunda deformasyona uğramış halleri verilmiştir. Deformasyon görüntüleri, tersinir statiksel olarak artımsal yüklemdeki durumda 1. döngü sonucu elde edilmiştir. Sistem üzerindeki eksenel kuvvetin etkisinin, deneysel numuneye kıyasla kolon ve başlık levhasındaki deformasyonların arttığı ve kullanılan başlık levhasının yeterli düzeyde rijitlik elde edemediği gözlemlenmiştir.



M8/1



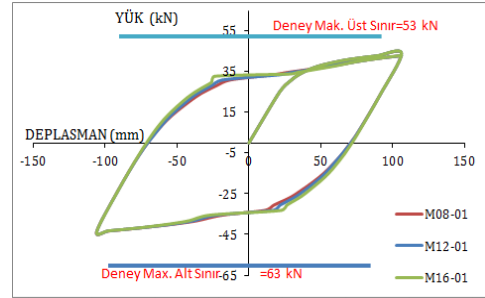
M12/1



M16/1

Şekil 5. M01 modelleri deforme olmuş halleri.

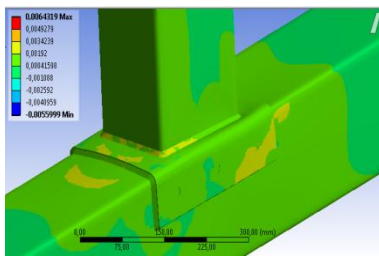
Mevcut verileri kıyasladığımızda, deneysel araştırma numunedeki sonuçtan farklı olarak eğilme kuvveti etkisinin dışında ilave olarak etkilene eksenel yük durumu için başlık kısmına ek olarak eklenen levha rijitlik kazancı sağlayamamıştır. Bu durum, Şekil 6'da sunulan kapasite karşılaştırmalarında gözlemlenmektedir. Grafikler incelendiğinde, eksenel yük altındaki kapasite kayıplarının, alt modellerde kendi içerisindeki davranış durumunu ve yük-deplasman döngüsünü değiştirmemiş olduğu görülmektedir.



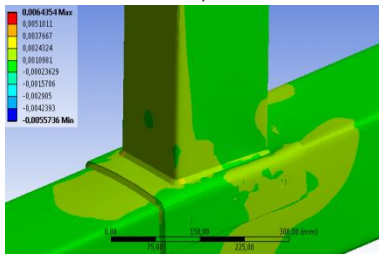
Şekil 6. M01 modellerinin yük deplasman eğrileri.

Çalışma kapsamında ikinci olarak M02 numaralı modellerde, başlık levhasının boyutsal parametre değerleri  $P_v=300$ ,  $P_w=75$ mm olarak belirlenmiştir. M02 numunesi için, tersinir statik artımsal yüklem durumunda kullanılan başlık levhası sayesinde kolonda meydana gelebilecek olan muhtemel lokal burkulmalar engellenmiştir ve bu numunedeki deformasyonlar lineer-elastik sınırlar çerçevesi içerisinde yer almıştır. Tasarımda tercih edilen başlık levhası gövdedeki kısım boyunca boyut faktörlerindeki artış, önceki numune sonuçlarına göre çok daha iyi bir sonuç vermiştir.

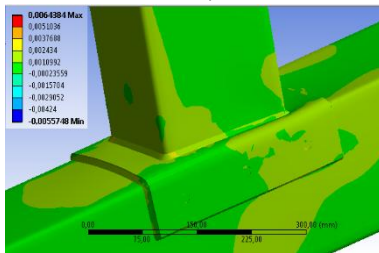
Şekil 7'de M02 numunesinin üç farklı eksenel yükleme durumu dolayısıyla oluşmuş olan modellerin deforme olmuş durumlarını gösteren görsel sunulmuştur. 1. Sistem üzerinde etkili olan eksenel kuvvetindeki, kolonda ve başlıktaki levha üzerindeki deformasyonları bir önceki modele benzer şekilde deneysel numuneye kıyasla artırdığını ortaya koymaktadır. Ancak, bu artışın, eksenel kuvvetin modeller arasındaki artışına paralel olmadığı gözlenmektedir.



M8/2



M12/2

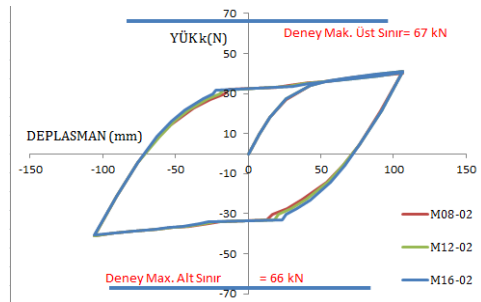


M16/2

Şekil 7. M02 modelleri deforme olmuş halleri.

M02'nin alt modellerinde elde edilen kapasite dağılımları incelendiğinde

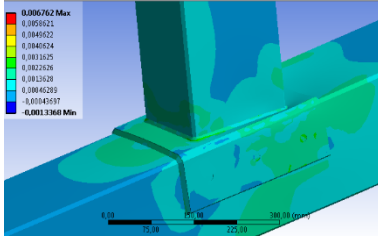
eksenel yük-kapasite ilişkisi görülmektedir. Artan eksenel kuvvetlerin rijitlik talebi başlık levhasınca karşılanamamıştır. Şekil 8'de sunulan kapasite karşılaştırmalarında da bu durum net bir şekilde görülmektedir. Ancak, önceki durumlardakinin benzeri şekilde, eksenel kuvvet artışı, modellerin içsel davranışında ve yük-deplasman döngüsünde farklı bir değişikliğe sebep olmamıştır.



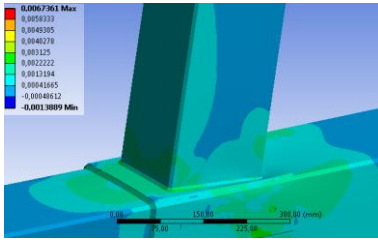
Şekil 8. M02 modellerinin yük deplasman eğrileri.

Çalışma kapsamındaki üçüncü olarak M03 numarasına sahip olan modellerde, başlık levhasının boyutları  $P_v=300$ ,  $P_w=100$ mm olarak belirlenmiştir. Bu gruptaki diğer modellerden farklılığı boyutsal açıdan en büyük modeldir. Kolon yapı elemanının üzerinde meydana gelen lokal burkulmaların ve deforme olmuş durumunun tümünün önlenmesi gözlemlenmiştir. Levhadaki etki alanı artışı, kolonda sargı etkisinin artmasına neden olmuştur. Deformasyonlar kabul edilebilir seviyelerde kalmıştır. Bu durum, kolon üzerindeki şekil değişimlerinin lineer-elastik sınırlar içinde kaldığını ortaya koymaktadır.

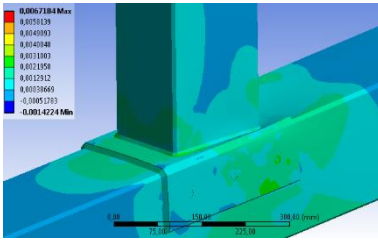
Şekil 9'da, M03 numunesinin üç farklı eksenel yükleme durumları için oluşan, alt modellerin deformasyona uğramış durumlarını gösteren görüntüler sunulmaktadır. Sayısal analiz sonuçlarından elde edilen deformasyon durumu, deneysel verilere uygun olarak 1. yük döngüsü için gösterilmiştir.



M8/3



M12/3

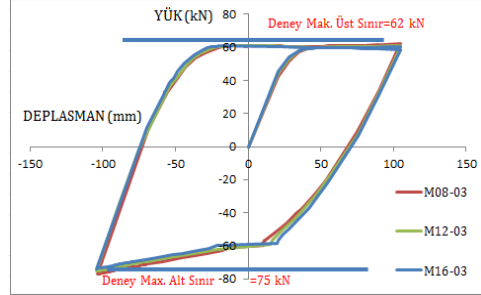


M16/3

Şekil 9. M03 modelleri deforme olmuş halleri.

Model M03'ün eksenel yükleme parametrelerinde türetilmiş alt modellerin yük deplasman değerleri, Şekil 10'da sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, tasarımda eklenen başlık levhası ve kolon deformasyon etkisi, kapasiteye etkisi görülmektedir. M03 modellerinde gövdedeki

deformasyon engellenmiştir. Bu durumdan dolayı numunenin eksenel yüksüz analizi deneysel numuneyle birebir aynı sonuçları vermiştir.

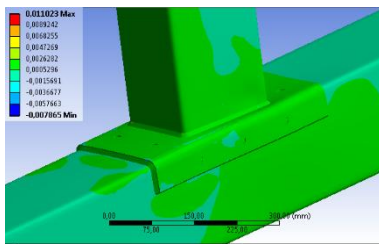


Şekil 10. M03 modellerinin yük deplasman eğrileri.

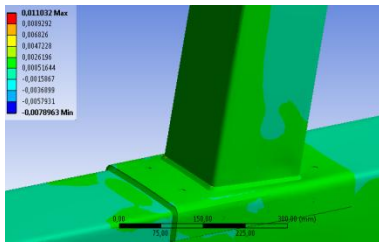
Çalışma kapsamında dördüncü olarak M04 modeli incelenmiştir. M04 modellerinde başlık levhasının kullanılması düğüm noktasındaki rijitliğini arttırmıştır.

Deneysel numunelerde kolon gövdesini saracak şekilde yerleştirilen levhali birleşimde, boyutsal artışın en kısa olduğu doğrultuda, yük taşıma kapasitesi üzerinde diğer başlık levhalarına göre belirgin bir etki sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Ancak, levha elemanının kolonun üzerindeki alanının artması, başlık levhasının deformasyonunu kolaylaştırmıştır. Buradaki durum birleşim bölgesindeki istenilen rijitlik oluşmasını engellemiştir. Eksenel yükleme durumu dolayısıyla belirlenen farklı alt modellerdeki şekil değişimine uğramış durumların görünümleri Şekil 11'de verilmiştir. Bu görselden anlaşılacağı üzere, bu numunede tercih edilen başlık kısmına yerleştirilen levhanın boyut özellikleri, gerilmelerin daha geniş bir alanda etkili bir biçimde absorbe edildiğini göstermektedir. Levhayı cidar kalınlığı

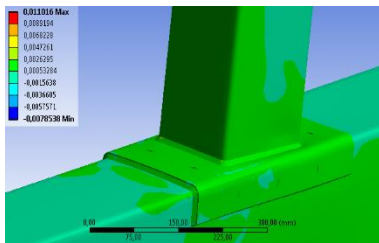
oranıyla ilişkilendirirsek deformasyon hasarındaki istenilen kontrol sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Eksenel kuvvetle birlikte değerlendirilen sayısal model analizinde, kolonun gövdesinde ve başlıkta oluşan yerel deplasmanların artmış olduğu tespit edilmiştir. Fakat, farklı alt model çalışmalarının içsel görece deforme hasarlarının, buradaki model çalışmasında birbiriyle uyumlu bir şekilde olduğu görülmüştür.



M8/4



M12/4

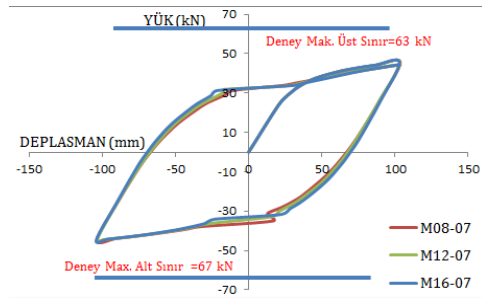


M16/4

Şekil 11. M04 modelleri deforme olmuş halleri.

Sayısal modellerinin alt model verileri için elde edilen kapasite dağılımları incelendiğinde, deformasyon durumlarını gösteren şekillerle paralel sonuçlara ulaşılmıştır. Şekil 12’de

kapasite grafikleri deneysel veri sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil 12’de sunulan kapasite karşılaştırmaları incelendiğinde, eğilme etkisiyle birlikte etki eden eksenel yük durumunun daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, başlık levhasının sağladığı rijitlik avantajını aşarak, levhanın kapasiteye olan olumlu katkısını önemli ölçüde kısıtlamıştır. Bununla birlikte, eksenel kuvvetin etkisi altındaki kapasite kaybının, oluşturulan farklı alt model verilerinin davranışını ve yük-deplasman döngü durumunu değiştirmedeği gözlemlenmektedir.

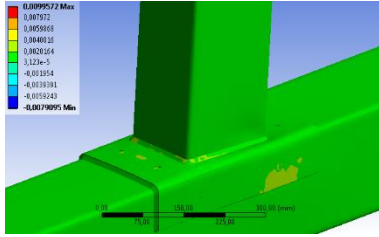


Şekil 12. M04 modellerinin yük deplasman eğrileri.

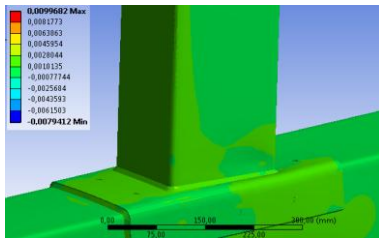
Çalışma kapsamında beşinci olarak M05 modelinde, başlık kısmında kullanılan, kolonun gövde kısmına paralel yöndeki kısmı 75mm’ye çıkarılmıştır. Başlıktaki levha elemanındaki uzunluk ve cidar kalınlığı ölçüleri sabit kalmıştır.

Modelin eksenel kuvvetlerin değişim etkisine bağlı olarak sayısal analizden kaynaklanan deformasyonları Şekil 13’te verilmiştir. Birleşimde yeterli rijit davranış elde edilemediğinden eksenel kuvvet durumuyla birleştiğinde kolon yapı elemanındaki deformasyon hasar durumu sınırlanamamıştır. Bu sebeple,

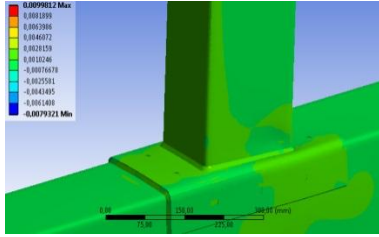
sayısal analizlerin sonuçlarına bakıldığı zaman deformasyon hasarları, deneysel verilerin sonucundaki sınır koşul durumlarını aşmaktadır.



M8/5



M12/5

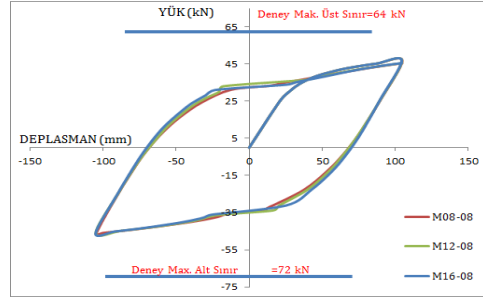


M16/5

Şekil 13. M05 modelleri deforme olmuş halleri.

Model 05'e dayalı farklı diğer alt modellerin kapasite sonuçları değerlendirildiğinde benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Deney numunesindeki farklılık, eğilmedeki etki durumuna ek olarak sistemde rol oynayan eksenel yük durumu, birleşim bölgesindeki kapasite faktöründe azalmaya sebep olmuştur. Şekil 14'te sunulan kapasitesindeki karşılaştırmaları da bu durumu net bir şekilde göstermektedir. Eksenel kuvvetin etkisi altındaki kapasite

kaybında ve yük-deplasman döngüsünde diğer modellere paralel sonuçlarla karşılaşılmıştır.

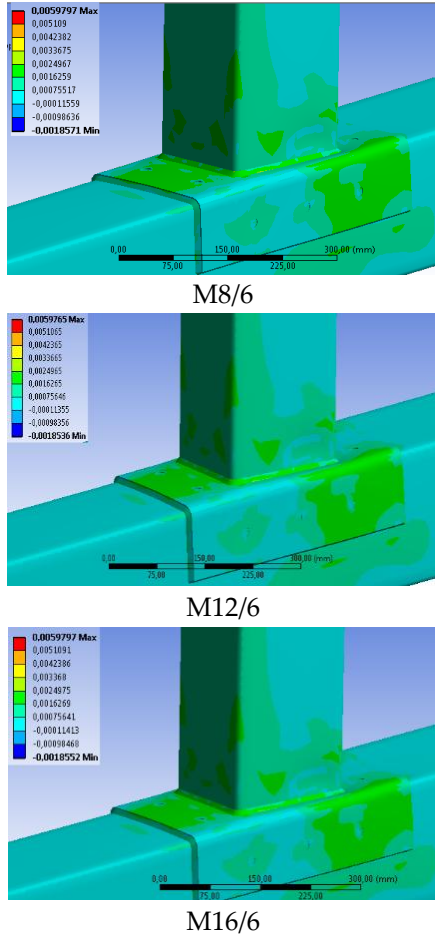


Şekil 14. M05 modellerinin yük deplasman eğrileri.

Çalışma kapsamında son olarak M06 numaralı numunede, başlık levhasının boyutları, kolon boyunca 400mm ve gövde boyunca 100mm olarak seçilmiştir. Bu boyutlar, başlık levhasının etkin bir şekilde sargı etkisini sağlaması için seçilmiştir. Başlık levhasının kolonda oluşacak olan kalıcı hasarları veya deformasyonları engellediği gözlemlenmiştir. Fakat, kirişte oluşacak olan hasarın yani yırtılmanın engellenemediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, meydana gelen deplasman durumu, lineer-elastik sınır koşulları içerisinde kalmayı başarmıştır. Bu durum tercih edilen levha elemanının, özellikle kolonun yerleşim şekline göre paralel yöndeki boyut ölçüsünün artışının gerilme dağılımının daha genişletilmiş bir alanda sönmülenererek plastik davranışın önlenmesine katkı sağlamıştır.

Başlıktaki levhanın boyutsal parametrelerin artması, eğilme etkisine maruz kalan birleşimde, kirişin tam olarak istenen plastik davranışı sağlayacak kadar düğüm noktasını tam

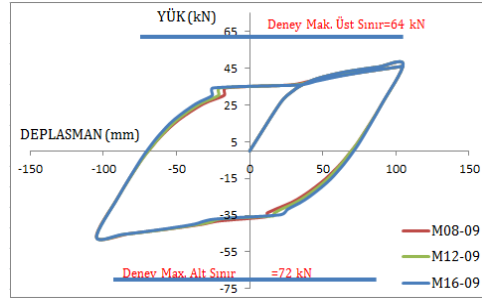
anlamıyla rijitlik sağlanamamasına rağmen, kirişteki yırtılmanın gecikmesiyle birlikte kapasite kayıplarını minimize etmiştir. Şekil 15'te, M06'ya ait deformasyon hasar görselleri verilmiştir.



Şekil 15. M09 modelleri deforme olmuş halleri.

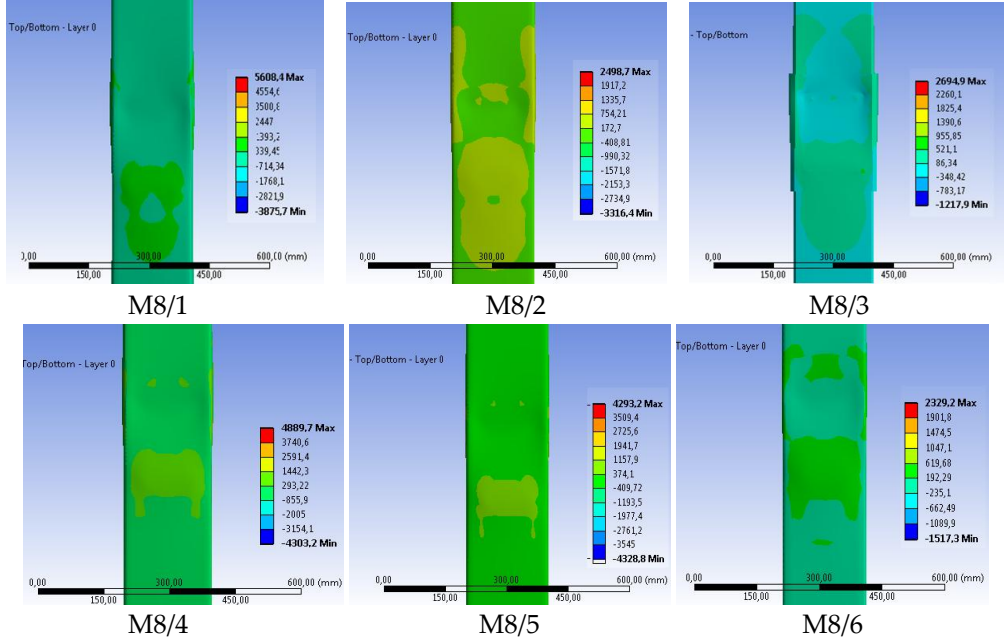
Model M-06'nın alt numunelerinin kapasite durumlarının sonuçları incelendiğinde, deformasyona uğramış durumu yansıtan şekillerle uyumlu

sonuçlar oluşmuştur. Şekil 16'da modele kapasite eğrilerinin karşılaştırması verilmiştir. Başlıkta tercih edilen levhanın, aksenal kuvvet etkisinin kolon yapı elemanında deformasyon artışı nedeniyle kapasitedeki kayıp, modelin yük-deplasman grafiklerine etki etmiştir.

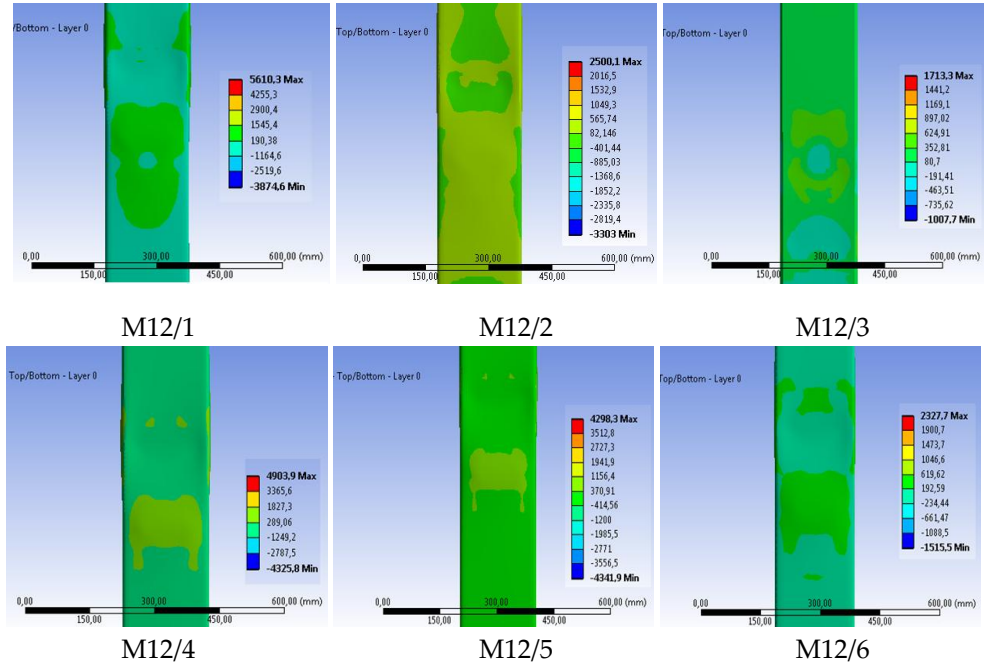


Şekil 16. M06 modellerinin yük deplasman eğrileri.

Eksenel yük etkisinde yapılan sayısal analizlerden elde edilen 8 kN yük için kolonlarda oluşan gerilme dağılımı Şekil 17'de sunulmuştur. Şekil incelendiğinde gerilme dağılımı sonuçlarının şekil-değişim ve yük-deplasman dağılımlarına karşılık gelen şekillerle benzer davranış gösterdiği belirlenmiştir. Modellerdeki tercih edilen başlık levha elemanının, kolonun üst başlık kısmındaki gerilmelerin sönümlendiğini tespit etmiştir. Bu durumun sonucunda başlık levhasının etkin davranış sergilediği görülmüştür. Eksenel yük etkisinde yapılan sayısal analizlerden elde edilen 12 kN yük için kolonlarda oluşan gerilme dağılımı Şekil 18'de sunulmuştur.



Şekil 17. 8 kN eksenel yük ve eğilme etkisi altındaki kolon üst başlığı gerilme dağılımı.

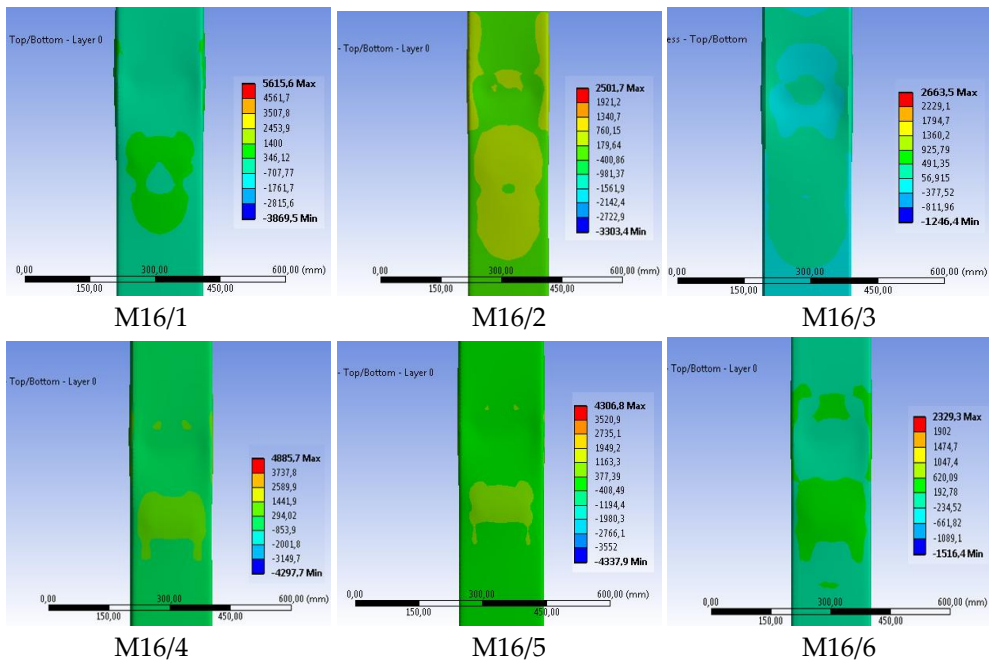


Şekil 18. 12 kN eksenel yük ve eğilme etkisi altındaki kolon üst başlığı gerilme dağılımı.

Şekil incelendiğinde önceki yükleme durumuyla benzer nitelikte sonuçlar görülmüştür. Kolonun üst başlık kısmındaki gerilme durumları, başlık levhasının analize dahil olduğu modellerde minimize edilebilmiştir. Fakat bu elde edilen avantaj birleştirme kapasite durumuna yansıtılmamıştır. Bahsi geçen durumda eğilme etki etmesi, birleşimlerde levha elemanının kolonun üst yüzeyinden ayrı bir şekilde deformasyona sebep olan bir davranışı tetikleyen durum sergilemektedir.

Bundan dolayı, eksenel kuvvet etkisinde olan modelin kapasitedeki kaybı engellenememiştir.

Çalışma kapsamında en büyük eksenel kuvvetin sisteme etkimesi ve sonucundaki gerilmelerin dağılımı Şekil 19'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde diğer eksenel kuvvetlere sahip modellerle benzer nitelikte gerilme dağılımı oluşmuştur. Şekil değiştirme ve kapasite grafikleri açısından sonuçlar diğer modellerle paraleldir.



Şekil 19. 16 kN eksenel yük ve eğilme etkisi altındaki kolon üst başlığı gerilme dağılımı.

#### 4. Sonuçlar

Kutu kesitli yapısal profiller için tasarlanan birleşimlerinde, kesitteki atalet verilerinin hesabındaki yapılan kapasite analizleri, gerçek durumlardan önemli ölçüde farklılıklar gösterebilir. Kutu kesitli profillerin uygulanmasında

ekstra eklenecek olan levhaların birleşiminde özel imalatlar ve detaylar gerekebilmektedir. Bu durum projelendirme, imalat ve montaj süreçlerini zorlaştırarak maliyetleri arttırmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, kesitlerin güçlendirilmesi yoluyla lokal



burkulmaların önlenmesi ve kapasite artışının elde edilebilmesi hedeflenmiştir. Analizler, tersinir statik artımsal yatay yöndeki yükler etkisinde incelenen kaynaklı kutu kesitli birleşimlerin bağlı deneysel veriler kullanılarak sayısal olarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında, deneyde seçilen başlık levhaları aracılığıyla kolonlardaki deformasyon hasarının engellendiği ve deformasyonun meydana geldiği durumlarda dahi lineer-elastik sınırlar içinde kaldığı gözlenmiştir. Deneysel veriler incelendiğinde, başlık levhasındaki deformasyon ve düğüm noktasındaki etkinin, levhanın kolon yapı elemanından bağımsız bir şekilde hareket edebilme kabiliyetini sınırlandırılmasıyla ilişkili olduğu ortaya çıkmıştır.

Araştırmada, kolonun ve kullanılan başlıktaki levhanın beraber çalışabilmesi için tercih edilen ek kaynak deliklerinin kullanılmasına rağmen, ek kaynak levhasının kolon yapı elemanı boyunca uzanan  $P_v$  değerine uzama davranış üzerindeki olumsuz bir etkiye sahip olduğu, ayrıca kullanılan ek kaynak dikişlerinin yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, eksenel kuvveti dikkate almadan analize sokulan numunelerdeki; başlık levhasının döngüsel yük yükleme durumu incelendiğinde etkili bir davranış gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle, kiriş yapı elemanındaki kaynak dikişinin uygulama durumunda oluşan ısıl etki nedeniyle ortaya çıkan gevrek yırtılma durumunu önlemenin mümkün olduğu durumlarda, yeterli rijitlik

seviyesine ulaşabilecek ve rijit yapı davranışı elde edilebileceği sonucunun oluşacağına ulaşılmıştır. Bu bağlamda, kirişlerdeki meydana gelen yırtılma durumunu engellemek için kolonun boyuna paralel yönde bulunan kiriş gövdelerinin ek levhalarıyla destekleyerek gerilmelerinin kaynak dikişinin sınırından, levha eksenine kaymasının sağlanmasıyla kapasitede kazanım sağlanabilir beraberinde döngüsel etkinin altında da enerjinin kaybı engellenebilir.

Başlık levhalarının eksenel kuvvet kullanılarak alt modellere ayrıştırılan sayısal analizlerinde, bazı özel durumlar dışında eksenel kuvvet sebebiyle kolon üzerinde oluşan deformasyonlar arttığı için deneysel sonuçların altında kalan kapasite değerleri oluşmuştur. Yük-deplasman grafikleri incelendiğinde, eksenel kuvvetin artmasına rağmen kapasite kaybı neredeyse sabit kalmıştır. Bu durum deformasyon, gerilme-şekil değiştirme grafiklerinde açıkça görülmektedir.

Şekil değiştirme ve gerilme dağılımları incelendiğinde, belirlenen boyut parametrelerinin, başlık levhalarının iyi optimum sonuçlarını sağladığı görülmüştür. Buradaki yapı elemanının cidar kalınlığının ve boyutlarındaki ek başlık levhalarının eğilme etkisinin altında kolon yapı elemanı ile etkili çalışabilmesi sağlanmıştır.

Başlık kısmındaki levhanın, kolonun gövdesi boyunca etkili bir sonuç verebilmesi için  $P_w$  uzunluğu buradaki birleşimde 75-100mm aralığında optimum sonuç verdiği belirlenmiştir.

Başlık levhasında  $P_w$  değerinin, kapladığı kolon yüksekliğinin yarısı kadar uzatılması önerilmektedir. Ayrıca kaynak dikişinin sınırında meydana gelmesi olası yırtılmalar önleğinde başlık levhasıyla güçlendirme tekniği etkili sonuçlar vermiştir.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

- Yazar 1: Deneş, Yazma, Analiz ve yorumlama, Fikir sahibi.  
 Yazar 2: Araştırma, Analiz ve yorumlama, Görselleştirme, Kaynaklar, Yazma.  
 Yazar 3: Kaynaklar, Araştırma, Yazma.  
 Yazar 4: Kaynaklar, Araştırma, Yazma.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Berman, W.J., Bruneau, M. (2007). Experimental and analytical investigation of tubular links for eccentrically braced frames, *Engineering Structures*, 29(8), 1929-1938.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.10.012>
- Chao, S-H., Goel, S.C. (2006). Performance-based design of eccentrically braced frames using target drift and yield mechanism as performance criteria, *Engineering Journal*, 43(4), 173-199.  
<https://doi.org/10.62913/engi.v43i4.893>

- Chopra, A.K., Goel R.K. (1999). Capacity-Demand-Diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures, *Earthquake Spectra*, 15(4), 637-656.  
<https://doi.org/10.1193/1.1586065>
- Dicleli, M., Mehta, A. (2007). Simulation of inelastic cyclic buckling behavior of steel box sections, *Computers & Structures*, 85(7-8), 446-457.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2006.09.010>
- Foutch, D.A., Yun, S.Y. (2002). Modeling of steel moment frames for seismic loads, *Journal of Constructional Steel Research*, 58(5-8), 529-564.  
[https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00078-5](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00078-5)
- Gioncu, V. (2000). Framed structures. ductility and seismic response general report, *Journal of Constructional Steel Research*, 55(1-3), 125-154.  
[https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00081-4)
- Gioncu, V., Mazzolani, F. (2002). Ductility of seismic resistant steel structures, Spon press, Biddles Ltd., 694s. USA and Canada.
- Jian, W., Guang, T.W. (2022). Experimental seismic behavior of RHS column-to-I beam connection with additional plates, *Iranian Journal of Science and Technology*, 46(3), 2053-2065.  
<https://doi.org/10.1007/s40996-021-00770-0>
- Mahin, S., Malley, J., Hamburger, R., (2002). Overview of the Fema/Sac program for reduction of earthquake hazards in steel moment frame structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 58(5-8), 511-528.  
[https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00088-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00088-8)
- Mashiri, F.R., Zhao, X.L. (2004). Plastic mechanism analysis of welded thin-walled T-joints made up of circular braces and square chords under in-plane bending, *Thin-Walled Structures*, 42(5),

- 759–783.  
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2003.12.010>
- Mashiri, F.R., Zhao, X.L. (2010). Square hollow section (SHS) T-joints with concrete-filled chords subjected to in-plane fatigue loading in the brace, *Thin-Walled Structures*, 48(2), 150–158.  
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.07.010>
- Nakashima, M., Matsumiya, T., Liu, D., Suita, K., Liu, D. (2005). Test on full-scale three-storey steel moment frame and assessment of ability of numerical simulation to trace cyclic inelastic behaviour, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 35(1), 3–19.  
<https://doi.org/10.1002/eqe.528>
- Yun, S.-Y., Hamburger, R.O., Cornell, C.A., Foutch, D.A., (2002). Seismic performance evaluation for steel moment frames, *Journal of Structural Engineering*, 128(4), 534–54.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2002\)128:4\(534\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:4(534))
- Zhao, B., Liu, C., Lin, S. (2024). Comparison of in-plane flexural seismic behavior between traditional RHS X-joints and eccentric RHS X-joints. *In Structures* 60, 105835.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105835>
- Zhao, X.L. (2000). Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed rhs sections, *Journal of Constructional Steel Research*, 53(2). 149–165. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00063-2](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00063-2)