

**Atf İçin:** Kılıç, M., Aydın, A. C., Maali, M ve Maali, M. (2024). Çarpık Eksenli Standart Çelik Profillerin Eğilme Kapasitesinin İncelenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(1), 284-293.

**To Cite:** Kılıç, M., Aydın, A. C., Maali, M & Maali, M. (2024). Investigation of Flexural Capacity Warped Axis Standart Steel Profiles. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(1), 284-293.

## **Çarpık Eksenli Standart Çelik Profillerin Eğilme Kapasitelerinin İncelenmesi**

Mahmut KILIÇ<sup>1\*</sup>, Abdulkadir Cüneyt AYDIN<sup>1</sup>, Mahyar MAALİ<sup>2</sup>, Merve MAALİ<sup>2</sup>

### **Öne Çıkanlar:**

- Kaçıklığın artması eğilme momenti kapasitesini azaltmıştır
- Kaçıklığın artması enerji sönümlenme kapasitesini azaltmıştır
- Çelik kirişlerdeki kaçıklık değerinin artması ile hasar seviyesi de artmaktadır.

### **Anahtar Kelimeler:**

- Çelik yapılar
- Eksen çarpılması
- Eğilme davranışı
- Montaj

### **ÖZET:**

Çelik yapılar gelişmişlik seviyesinin de bir göstergesi olarak günlük hayatta giderek fazla yer bulmaktadır. Ancak, çelik yapıların imalat ve montajı esnasında bazı problemlerle karşılaşılması kaçınılmazdır. Bu tür problemler büyük veya küçük boyutlu olabilmektedirler. Bu tür problemlerden önde gelen bir tanesi; standart profillerden oluşturulan kiriş sisteminde, kirişlerin yerleştirilmesi ile ortaya çıkan hatalardır. Bu durum yapının projelendirilmesi sürecinde ön görülen kabuller ile uyum göstermemektedir. Böyle bir durumda yapı hesaplanan yükleri taşıyamayacak ve yapı ciddi hasarlar alabilecek bir duruma gelebilecektir. Bu kapsamda; taşıyıcı sistemi çelik olarak imal edilen binalarda kiriş olarak kullanılan standart profillerin eksenlerinden 5°, 10°, 15°, 20° ve 25°'lik açılarla montaj sürecinde hatalı olarak yerleştirilmesi sebebiyle meydana gelecek olumsuz durumlar incelenmiştir. Çelik kirişlerin yerleştirilmesinde meydana gelen çarpıklık sebebiyle ortaya çıkan eksenden kaçıklık kiriş için projesinde ön görülen yük kapasitesi azalmış ve bu duruma paralel olarak elamanın ve/veya yapının taşıma kapasitesini de büyük ölçüde zayıflamıştır. Çarpık eksenli olarak hazırlanan çelik profillerle yapılan deneyler sonucunda yük-deplasman grafikleri elde edilerek, taşıma kapasitesindeki kayıplar; hatasız (mükemmel) profillerle karşılaştırılarak bu tür imalat veya montaj hatalarının yapıda meydana getirdiği taşıma gücü kayıpları irdelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların irdelenmesiyle birlikte bu tür montaj ve/veya imalat hatalarının olumsuz etkileri ve bu etkilerin seviyesi literatüre kazandırılacak, mühendislik bilinç ve ön görüşünün gelişiminin sağlanarak geleceğe matuf muhtemel işçilik, montaj vb. hataların önüne geçilmesi planlanmaktadır.

## **Investigation of Flexural Capacities of Warped Axis Standard Steel Profiles**

### **Highlights:**

- Increasing the misalignment decreased the flexural moment capacity.
- Increasing the misalignment decreased the energy dissipation capacity
- The damage rate increases with the increase in the misalignment value in steel beams

### **Keywords:**

- Steel structure
- Axis distortion
- Flexural behavior
- Assembly

### **ABSTRACT:**

Steel structures are increasingly taking place in daily life as an indicator of the level of development. However, it is inevitable to encounter some problems during the manufacturing and assembly of steel structures. Such problems can be large or small. One of the leading problems of this kind; These are the errors that occur with the placement of the beams in the beam system formed from standard profiles. This situation does not comply with the assumptions foreseen in the project design process of the building. In such a case, the structure will not be able to carry the calculated loads and the structure will be in a situation where serious damage can occur. Within this scope; In this study, negative situations that may occur due to incorrect placement of the standard profiles used as beams in buildings whose carrier system is made of steel at 5°, 10°, 15° and 20° angles from their axes during the assembly process were examined. The load capacity foreseen in the project for the eccentricity beam caused by the skewness in the placement of the steel beams has decreased and in parallel to this situation, the bearing capacity of the element and/or the structure has weakened considerably. The load-displacement graphs were obtained as a result of the experiments with the steel profiles prepared with a crooked axis, and the losses in the carrying capacity; By comparing with the perfect (perfect) profiles, the bearing capacity losses caused by such manufacturing or assembly errors in the structure are examined. With the examination of the experimental results obtained, the negative effects of such as assembly and /or manufacturing error, and the level of these effects will be brought to the literature. It is planned to prevent errors.

<sup>1</sup> Mahmut Kılıç ([Orcid ID: 0000-0003-0947-685X](https://orcid.org/0000-0003-0947-685X)), Abdulkadir Cüneyt Aydın ([Orcid ID: 0000-0002-6696-4297](https://orcid.org/0000-0002-6696-4297)) Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

<sup>2</sup> Mahyar Maali ([Orcid ID: 0000-0002-6398-1139](https://orcid.org/0000-0002-6398-1139)), Merve Maali ([Orcid ID: 0000-0001-8717-0800](https://orcid.org/0000-0001-8717-0800)) Erzurum Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye ve Maali Çelik Ar-Ge Danışmanlık Müh. İnş. Taa. San. Tic. Ltd. Şti .

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mahmut Kılıç, e-mail: mahmut.kilic@atauni.edu.tr

## GİRİŞ

Gerek imalat gerekse montaj sürecinde çelik yapıların olmazsa olmazı niteliğindeki standart çelik profiller eksen çarpılmasına maruz kalabilmektedir. Ekseni çarpılan bir çelik profilin ise gerek tasarım sürecinde ele alınan taşıma kapasitesi, gerekse öngörülen kesit tesirleri bağlamındaki davranışı yük aktarımındaki değişim ve oluşan ikincil kuvvetlerin etkisiyle öngörülen elemen ve/veya yapısal davranışı sergileyememektedir. Bu bağlamdaki kusur ve hataların özellikle deprem gibi namüsaıt kuvvetler tesirinde iken yapının tasarım davranışının dışına çıkması, beklenen performans seviyelerini sağlayamamasına sebebiyet verebilmektedir. Özellikle çelik yapıların kiriş elemanlarında karşılaşılabilen bu durumu incelemek maksadıyla standart çelik profillere eksenlerinden 5°, 10°, 15° ve 20° lik açılarla eksenden çarpıklığı verilerek, hatalı olarak yerleştirilmesi ve/veya imalatı sebebiyle meydana gelebilecek olumsuz durumlar eğilme davranışı bağlamında incelenmiştir. İmalat ve montaj sürecinde eksen çarpılması olmayan kiriş elemanlar mükemmel olarak nitelendirilerek çarpık eksenli profillerin eğilme davranışları ile karşılaştırılması yapılacaktır. Böylece inşa edilecek çelik yapılarda imalat ve/veya montaj esnasında oluşacak hataların tasarım sürecinde göz önüne alınması hedeflenmektedir. Oluşacak hatalar sonucunda ne gibi olumsuzlukların ortaya çıkacağı, ortaya çıkacak olumsuzlukların yapıya nasıl etki edeceği irdelenmiştir.

I-kesit, çelik binaların ve köprülerin yapımında kullanılan en bilinen profildir. Bu açık kesit, uygulanan yük düzlemindeki yüksek rijitliği nedeniyle tercih edilir; ancak zayıf yanal ve burulma sertliği nedeniyle burkulmaya karşı düşük dirençlidir (Matloub ve ark, 2023). Dolayısıyla da bu çalışmada da I kesitli kirişlerin davranışı ele alınmıştır. Çelik yapıların tasarımına yönelik uluslararası tasarım yönetmeliklerinde, yerel burkulma meydana gelmeden teorik plastik limit kapasitelerine kadar yüklenebilen yüksek dönme ve deformasyon kapasitesine sahip daha narin elemanlar ile plastik kapasiteye ulaşılmadan önce mukavemeti yerel burkulma ile belirlenecek daha ince elemanlar arasında ayırım yapmak için yaygın olarak bir sınıflandırma sistemi kullanılmaktadır. Geometri ve malzemenin geometrik ve elastik özelliklerine ek olarak, gerinim sertleşmesi, nihai mukavemet ile akma gerilmesi arasındaki oran ve malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisinde bir akma platosunun varlığı veya yokluğu, elde edilen dönme kapasitesini önemli ölçüde etkiler (Liu ve ark, 2020; Studer ve Taras 2023).

İmalat ve/veya montaj hatalarından kaynaklanan nedenlerden dolayı kirişler kendi kapasitelerinde çalışmamaktadırlar. Bu durum, yapının projelendirilmesi yapılırken alınan sonuçlarla uyumlu olmamakta ve hesaplanan yükü taşıyamayarak yapıya ciddi hasarlar vermektedir. Çelik kirişlerin ekseninin çarpık olması durumunda yük kapasitesi azalır ve taşıma kapasitesini de büyük ölçüde kaybeder. Bu çalışmada ekseni çarpılmış kirişlerin eğilme etkisinde taşıma gücü kayıpları incelenecektir. Literatürde bu konu ile ilgili yeter sayıda çalışma mevcut değildir.

J.P. Boyer, (1964), çelik kirişin imalatını, eşdeğer uzunluk hesabını ve uç elastik bağlantı hesabını detaylı olarak açıklamaktadır. Okubo ve ark. (1985), kirişin burkulma analizi üzerine on altı adet deney yaparak, göçme davranışı, diyafram nervürlerinin boyutu ve yükün uygulama modu arasında ki ilişkiyi ortaya koymuşlardır.

Zaarour ve ark. (1996), on iki kiriş üzerinde yaptıkları deneyler sonucunda burkulma yükünü tahmin etmek için yöntem önermişlerdir. Megharief ve ark. (1998), kesme-açıklık oranının nihai burkulma yükü üzerinde çok az etkisi olduğunu ve elastik burkulma analizinin kirişlerin burkulma yükü tahmini için uygun olduğunu bulmuşlardır. Zirakian ve Showkati (2006), elastoplastik ve elastik burkulma teorisine dayalı olarak distorsiyonel burkulmanın hesaplanması için bir formül önermektedirler. Sonuçların, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir. Gholizadeh ve ark. (2011), Çelik kirişlerin nihai ve burkulma yükünün tahmininde doğrusal olmayan

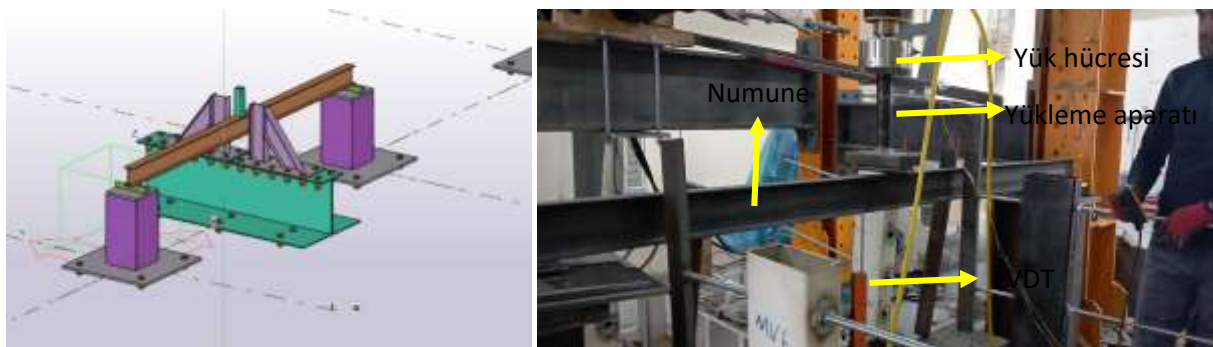
sonlu eleman yazılımlarını kullanarak doğruluğunu araştırmışlardır. Sonuçlara bakıldığında ANSYS analiz programı ile elde edilen değerlerin doğruluğunun yüksek olduğunu göstermiştir. Ellobody (2011), distorsiyonun çelik kirişlerin burkulma yükünü önemli ölçüde azaltabileceğini ve yüksek mukavemetli çelik kullanımının taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırabileceğini bulmuştur. Soltani ve ark. (2012), ilk kusurları olan çelik kirişin doğrusal olmayan burkulma analizini gerçekleştirmek için FEA yazılımını kullanmışlardır. Sebastian ve ark. (2012), dört polimer bağlı çelik kiriş üzerinde mekanik deneyler yapmak ve farklı kalınlıktaki malzemelerin tüm yapının göçme modeli üzerindeki etkisini tartışmıştır. Showkati ve ark. (2012), yapısal rijitliği önemli ölçüde artırabilen ve yapısal kesme direncini büyük ölçüde artırabilen, çelik kiriş için elastik bir stabilizasyon cihazı önermektedir.

Bu çalışma kapsamında; çelik yapılarda kiriş olarak kullanılan standart profillerin özellikle hatalı olarak yerleştirilmesi sonucunda meydana gelebilecek olumsuz durumların incelemek amacıyla  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $25^\circ$ 'lik açılarla eksenden çarpıklık verilmiştir. Böylece oluşturulacak yapılarda imalat sırasında ve/veya montaj esnasında oluşacak işçilik hatalarının dikkate alınması hedeflenmektedir. Yanlış montaj veya imalat hatası sebebiyle ortaya çıkacak olumsuzluklar ve bu olumsuzlukların elemanın ve/veya yapının davranışına nasıl etki edeceği eğilme davranışı bağlamında belirlenmiştir. Böylece, elemanların taşıma kapasitelerindeki kayıplar dikkate alınabilecektir. Ayrıca sonuçların elde edilmesiyle benzeri imalat ve/veya montaj hatalarına bağlı ortaya çıkacak olumsuzluklar literatüre kazandırılarak bu tür kusur ve/veya hataların minimize edilmesi, daha kontrollü bir inşaa sürecinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

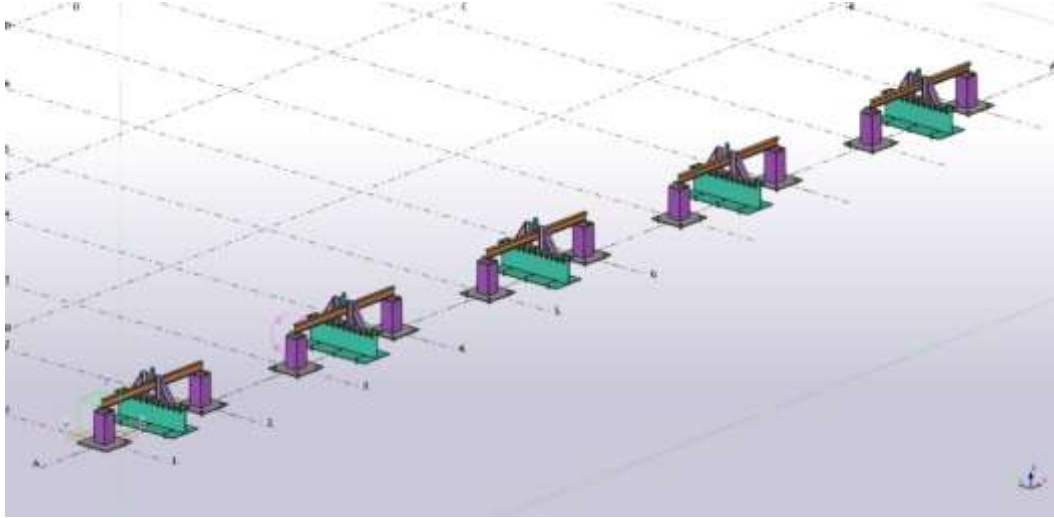
## MATERYAL VE METOT

Materyal ve metot başlığı altında deney numuneleri, ölçüm yöntemi ve deney prosedürü açıklanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında toplam altı adet deney numunesi hazırlanmıştır. Altı adet deney numunesinden ise bir adet numune referans olması açısından herhangi bir eksen kaçıklığı olmayacak şekilde üretilmiştir. Diğer numuneler ise imalattan oluşacak hataları temsil etmesi açısından kiriş ekseninden  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $25^\circ$ 'lik çarpıklıklar yapılarak üretilmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında IPE 120 çelik profili kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen çelik kirişlere eğilme momenti deneyleri uygulanmıştır. Şekil 1' de eğilme momenti deney düzeneği görülmektedir. Şekil 2' de ise farklı açılarla yerleştirilen deney numuneleri sunulmuştur. Deney numunelerinin isimlendirmesi ise D1, D2, D3, D4, D5 ve D6 şeklinde yapılmıştır. Çizelge 1' de numunelere ait adlandırma görülmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan IPE 120 çeliğinin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için çekme deneyi uygulanmıştır. Kiriş numunelerinin üretildiği aynı malzemeden alınan örnek üzerinde çekme deneyi uygulanmıştır. Şekil 3' de deney numunelerinden alınan örnek parçalarına uygulanan çekme deneyi sonucu görülmektedir.



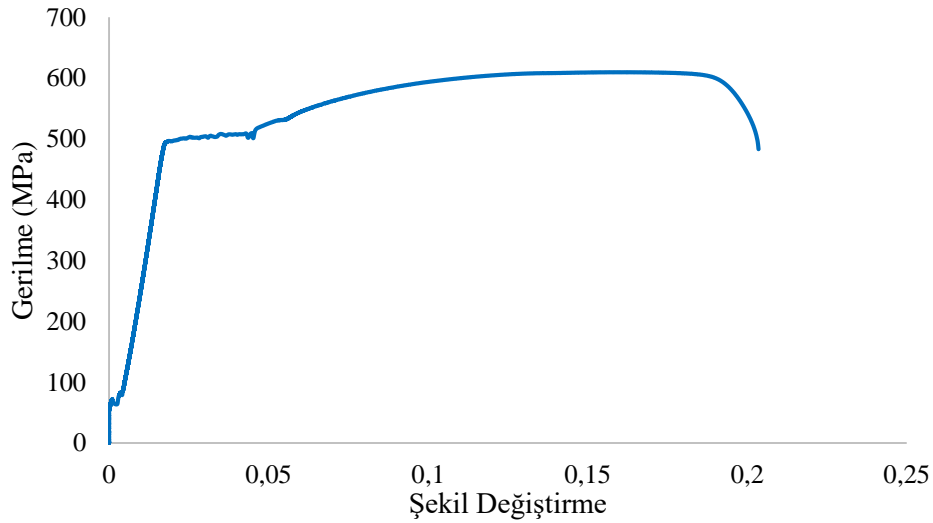
Şekil 1. Deney düzeneği



Şekil 2. Farklı açılarla yerleştirilen deney numuneleri

Çizelge 1. Deney numunelerinin adlandırılmaları

Deneyler	İsimlendirme
Referans numunesi	D1
%5 eksen kaçıklıklı numune	D2
%10 eksen kaçıklıklı numune	D3
%15 eksen kaçıklıklı numune	D4
%20 eksen kaçıklıklı numune	D5
%25 eksen kaçıklıklı numune	D6



Şekil 3. Deney numunelerinde kullanılan çeliğin çekme kuvvetleri altında gerilme-şekil değiştirme eğrisi

DeneySEL çalışma Erzurum Teknik Üniversitesi Yapı Laboratuvarlarında yürütülmüştür. Çalışma kapsamında eğilme momentinden kaynaklı sehimler ölçülebilmesi için LVDT cihazı kullanılmıştır. Çalışmada kapsamında kullanılan LVDT, 100 mm ölçüm kapasiteli, SDP-100C modelidir. Deformasyon cihazları uygun bir şekilde dirençlere bağlandıktan sonra elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Çalışma kapsamında eğilme momenti için orta nokta sehimi ölçülmüştür. Bu yüzden LVDT kiriş orta noktasına yerleştirilmiştir. DeneySEL çalışmada uygulanan yük verilerini kayıt altında almak için TEDS marka ve maksimum kapasitesi 250 kN olan yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücreleri yardımıyla sadece basma yönünde yük okunabildiği gibi basma-çekme yönünde de yük okunabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan pompa Enerpac U10M tipindedir. 90 ton kapasiteye sahip olan pompanın üzerinde bulunan valf yardımıyla hızı ayarlanabilmektedir. Data Logger ve Dynamic

Strain Meter olarak da adlandırılan statik ve dinamik veri toplama cihazları sayesinde deney numunelerinde ölçülen değerler bu sistem sayesinde bilgisayar ortamında sayısallaştırılmıştır. Sıcaklık, gerilme, yük voltajı, direnç ve deformasyon gibi elde edilen sayısal değerler yardımıyla deney numunelerinin ilgili parametreleri hesaplanmıştır. Deneylerde ABD üretimi 120 kanallı, 13 portlu giriş kablolu ve  $\mp 20$  mV ile  $\mp 10$  mV aralığında Insturinet I 420 modeli veri toplama sistemi kullanılmıştır.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

IPE 120 standard Profil kullanılarak, referans numunesi ve eksenden  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  ve  $25^\circ$ lik çarpıklıklar verilerek, eğilme kapasitesindeki değişimler incelenmiştir. Deformasyon ölçüm cihazları (LVDT-300 mm) kullanarak dikey deformasyonları ölçmek için yerleştirilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda yük-deplasman grafikleri elde edilerek karşılaştırmaları yapılmıştır. Şekil 4, 5 ve 6' da numunelere ait deney resimleri görülmektedir. Şekil 4' da referans numune ve %5 eksen kaçıklıklı deney numuneleri görülmektedir. Deney numunelerinin üç noktalı eğilme momenti uygulandığı deney şekillerinden görülmektedir. Şekil 5' de de kaçıklık oranları %10 ve %15 olan deney numuneleri görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 6' da ise kaçıklık oranları %20 ve %25 olan deney numuneleri görülmektedir.



Şekil 4 a) Referans numunesi deney resimleri (D1) b) %5 eksen kaçıklıklı deney resimleri (D2)



Şekil 5 a) %10 eksen kaçıklıklı deney resimleri (D3) b) %15 eksen kaçıklıklı deney resimleri (D4)



a

b

Şekil 6 a) %20 eksen kaçıklıklı deney resimleri (D5) b) %25 eksen kaçıklıklı deney resimleri (D6)

Şekil 7’ de numunelerinin deneylerden sonraki fotoğrafları görülmektedir. Eğilme deneylerinden sonra en fazla deformasyon D1 numunesinde olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerdeki kaçıklık oranının artması deney sonrası deformasyon miktarının artmasına neden olmuştur. Kaçıklığın artması ile deney numunelerine etki eden yük miktarı da artmaktadır. Bununla birlikte eğilme momenti altındaki kirişlerde çekme ve basınç bölgeleri oluşmaktadır. Kirişin alt bölgesi ile üst bölgesi arasında farklı gerilmeler meydana gelmektedir. Kirişlerin alt yüzeylerindeki gerilme miktarı da kaçıklığın artması ile artmıştır. Bu olay da kirişin yük taşıma kapasitesini azaltmakla birlikte deformasyonu da arttırmıştır. Bu olaya ek olarak kiriş alt ve üst bölgeleri arasındaki gerilme farkları yerel burkulmalar üzerinde de etkili olmuştur.

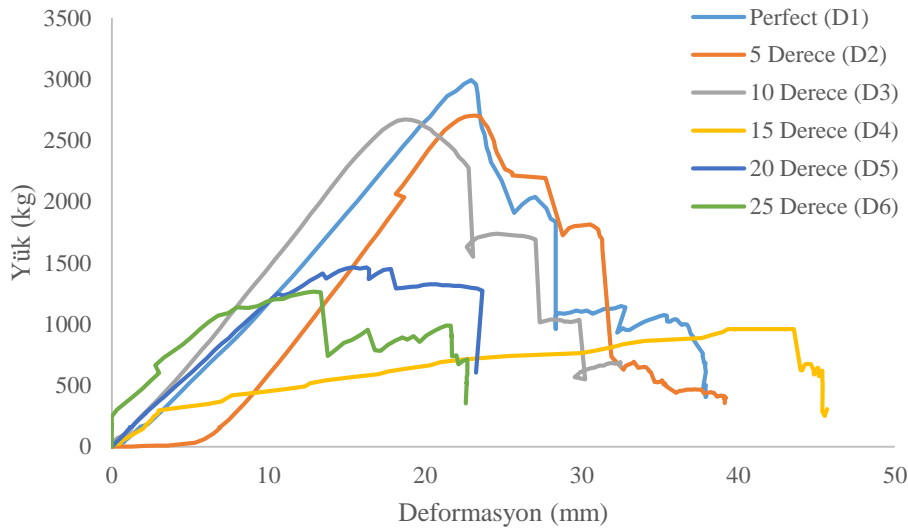


Şekil 7. Deney numunelerinin genel görünümü

Şekil 8’ de deney numunelerinin yük-deformasyon eğrileri görülmektedir. Tüm numunelerde maksimum yüke ulaşıldıktan sonra dayanım azalması ve buna ters olarak deformasyonlarda artış devam etmiştir. Referans numunesinde yaklaşık olarak 3000 kg yük değerine ulaşmıştır. Bununla birlikte maksimum yük değerine karşılık 24 mm deformasyon değerine ulaşılmıştır. 5 derece kaçıklıklı numunede (D2) ise yaklaşık olarak 2700 kg yük ve bu değere karşılık 26 mm deformasyon değerlerine ulaşılmıştır. 10 derece kaçıklıklı D3 numunesinde ise D2 numunesine yakın maksimum yük değerine ulaşılmıştır. Buna karşılık D3 numunesinde D2 numunesine göre maksimum yük değerinde daha düşük deformasyon değerine ulaşılmıştır. Dolayısıyla kaçıklığın 5 derece artırılması maksimum yük değeri

üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamasına rağmen deformasyon değerini azaltmıştır. Kaçıklık değerinin 15 derece olduğu D4 numunesinde ise maksimum yük değeri D1, D2 ve D3 numunelerine göre önemli ölçüde azalmıştır. Buna karşı maksimum yük değerine karşılık gelen deformasyon kapasitesi ise artmıştır. Kaçıklık değerinin 20 derece ve 25 dereceye artırılması ise D3 numunesine göre deformasyon kapasitesini önemli ölçüde azaltmıştır. Kaçıklık değerinin 10 dereceye kadar artırılması referans numunesine göre maksimum yük değerinde önemli bir etkiye sahip olmamasına rağmen, kaçıklık değerinin artırılması yük kapasitesinde önemli ölçüde azalmaya neden olmuştur.

Kirişin kaçıklığının artmasıyla birlikte, kirişe etki eden burkulma momenti de artar ve kiriş şekil değiştirir. Bu şekil değişiklikleri, malzeme içyapısında yer değiştirme ve deformasyonlara neden olur. Bu yer değiştirme ve deformasyonlar da kirişin hem yük taşıma hem de deformasyon kapasitesi üzerinde etkili olmaktadır. Kaçıklıktan dolayı deney numunelerinde yerel olarak gerilme yığılmaları da meydana gelmiştir. Bu gerilme yığılmaları numunelerin içyapısındaki zayıf noktalarda yoğunlaşmıştır. Bu da yük taşıma kapasitesinde azalmalara neden olmuştur. Deney numunelerinde kaçıklığın artması ile kirişin plastik deformasyonlara daha fazla maruz kalması mümkündür. Bu deformasyonlar, malzeme içyapısında kalıcı şekil değişikliklerine de neden olmuştur.



Şekil 8. Yük-deformasyon eğrisi

Çizelge 2' de deney sonuçları görülmektedir. Çizelge 2' den görüldüğü üzere maksimum yük değeri 2691,5 kg değeri ile D1 numunesinde elde edilmiştir. Bununla birlikte en düşük yük değeri ise 1260,9 kg değeri ile 25 Derece (D6) numunesinde elde edilmiştir. Çarpıklık derecesinin artması ile yük taşıma kapasitesinde azalış meydana gelmektedir. Hatta bu azalış %57 oranlarına kadar çıkmaktadır. Numunelerdeki çarpıklık ile maksimum yüke karşılık gelen deformasyon arasında da benzer bir ilişki görülmektedir. Çarpıklığın artması ile maksimum yükte kaydedilen deformasyon kapasitesi de azalmaktadır.

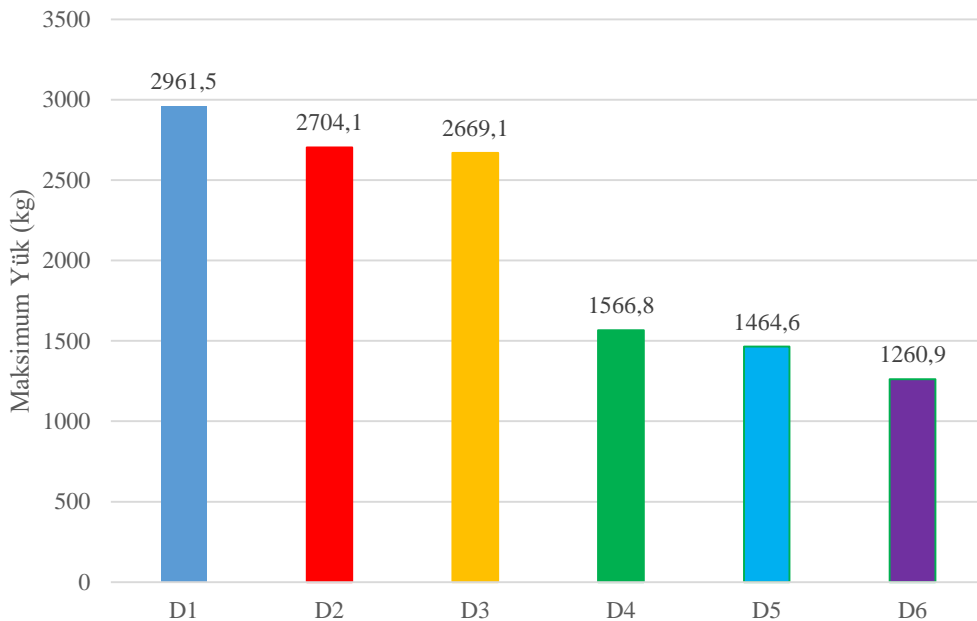
Çarpık eksenli olarak hazırlanan I kesitli çelik profillerde, profilin ana eksenine göre simetri eksenini yer değiştirmiş veya kaymıştır. Bundan dolayı, çarpıklığın artmasıyla birlikte profilin taşıyabileceği yük kapasitesi de azalmaktadır. Çarpık eksenli profillerde, yüksek aksenal yüklerin etkisiyle, profilin ana ekseninden uzaklaşan kısımlarında burkulma gerilmesi meydana gelmektedir. Bu gerilmelerin ise profilin taşıma kapasitesini azalttığı görülmektedir. Çarpık eksenli profillerde, profilin kesit merkezi yerine simetri eksenindeki kısımlarında kesme gerilmesi de meydana gelmektedir. Bu kesme gerilmeleri,

profilin taşıma kapasitesini daha da azaltmaktadır. Çarpık eksenli profillerde, profilin düzlemi boyunca burulmaya maruz kalan kısımlarında burulma gerilmeleri de profilin taşıma kapasitesini azaltır.

## Çizelge 2. Deney sonuçları

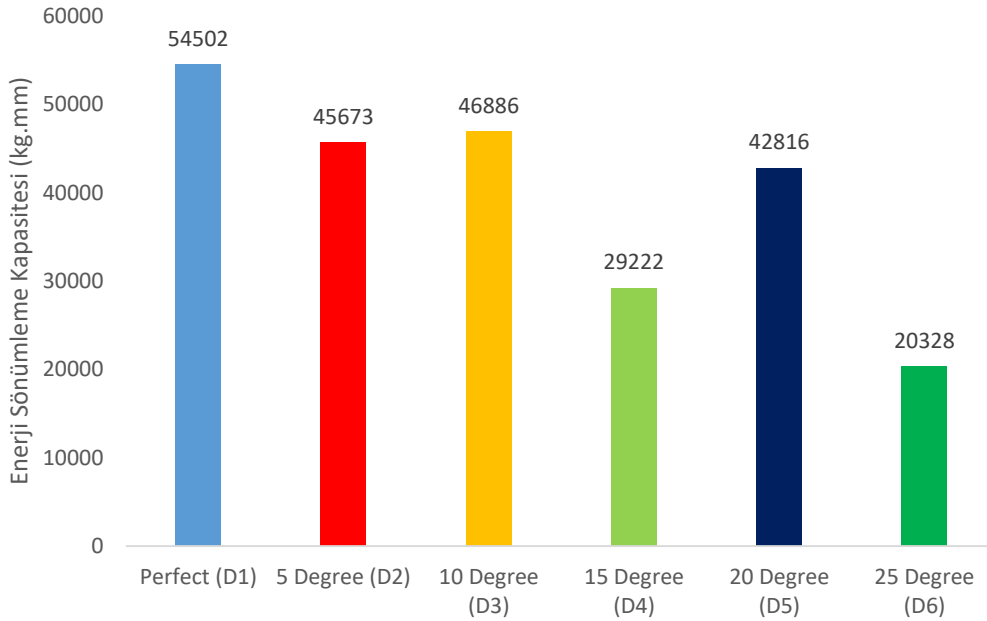
Numune	Maksimum Yük (kg)	Maksimum Yüke Karşılık Gelen Deformasyon (mm)	Referans Numunesine göre Yükteki Azalış (%)	Enerji Sönümleme Kapasitesi (kg.mm)
Referans (D1)	2961.5	23.25	-	54502
5 Degree (D2)	2704.1	23.23	8.6	45673
10 Degree (D3)	2669.1	19.16	9.8	46886
15 Degree (D4)	1566.8	43.31	47.1	29222
20 Degree (D5)	1464.6	16.25	50.5	42816
25 Degree (D6)	1260.9	13.33	57.4	20328

Çizelge 2' den görüldüğü üzere 5 derece kaçıklığa sahip D2 numunesinin maksimum yük taşıma kapasitesi 10 derece kaçıklığa sahip D3 numunesinden daha fazla çıkmıştır. Bunun nedeni, daha dik bir açıda yerleştirilen I kirişin daha yüksek bir eğilme direncine sahip olmasıdır. Bu, kirişin çevresindeki yükleri daha iyi dağıtmasına ve daha az eğilme veya burkulma oluşmasına olanak tanımıştır. Ayrıca, daha dik bir açıda yerleştirilen D2 numunesi, daha yüksek bir moment kapasitesine ulaşmıştır ve bu da daha yüksek yükleri taşımasına olanak tanımıştır. Benzer durum diğer numunelerin yük taşıma kapasiteleri arasındaki farklar için de geçerlidir. Sapkas ve Kollar (2002) da I çelik profil kirişlerde kaçıklığın yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Sapkas ve Kollar da I kirişlerde kaçıklık oranının artmasının yük taşıma kapasitesini azalttığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde Mandal ve Calladine (2002) de çelik kirişlerde kaçıklığın artmasının yük taşıma kapasitesini azalttığını belirtmişlerdir. Salah (2023) I kirişlerde kaçıklığın yük taşıma limitini etkileyen önemli bir parametre olarak tanımlamıştır. Bunların birlikte kaçıklığın yük ve deformasyon kapasitesi üzerindeki etkisini inceleyen analitik bir çalışma yürütmüş olup bu çalışmada ulaşılan sonuçlara paralel olarak kaçıklığın artmasının yük taşıma kapasitesini azalttığını belirtmiştir. Belaid ve ark. (2023) de kaçıklık oranı yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişkiyi sayısal olarak ele almışlardır. Çalışma neticesinde kaçıklığın artmasının yük ve deformasyon kapasitesini azalttığını belirtmişlerdir.



Şekil 9. Numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri





Şekil 10. Numunelerin enerji sönümlenme kapasitesi

Şekil 9’ da numunelerin maksimum yük taşıma kapasitesi ve Şekil 10’ da numunelerin enerji sönümlenme kapasiteleri görülmektedir. Ayrıca numunelerin enerji sönümlenme kapasiteleri Çizelge 2’ de de görülmektedir. Numunelerin enerji sönümlenme kapasiteleri yük-deplasman eğrisinin altında kalan alandan hesaplanmıştır. Maksimum enerji sönümlenme kapasitesi D1 numunesinde elde edilmiştir. Minimum enerji sönümlenme kapasitesi ise D6 numunesinde elde edilmiştir.

## SONUÇ

Tüm numunelerde maksimum yüke ulaşıldıktan sonra dayanım azalması ve buna ters olarak deformasyonlarda artış devam etmiştir. Referans numunesinde yaklaşık olarak 3000 kg yük değerine ulaşmıştır. Bununla birlikte maksimum yük değerine karşılık 24 mm deformasyon değerine ulaşılmıştır. 5° kaçıklıklı numunede (D2) ise yaklaşık olarak 2700 kg yük ve bu değere karşılık 26 mm deformasyon değerlerine ulaşılmıştır. 10° kaçıklıklı D3 numunesinde ise D2 numunesine yakın maksimum yük değerine ulaşılmıştır. Buna karşılık D3 numunesinde D2 numunesine göre maksimum yük değerinde daha düşük deformasyon değerine ulaşılmıştır. Dolayısıyla kaçıklığın 5° arttırılması maksimum yük değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmamasına rağmen deformasyon değerini azaltmıştır.

Kaçıklık değerinin 15° olduğu D4 numunesinde ise maksimum yük değeri D1, D2 ve D3 numunelerine göre önemli ölçüde azalmıştır. Buna karşı maksimum yük değerine karşılık gelen deformasyon kapasitesi ise artmıştır. Kaçıklık değerinin 20° ve 25° arttırılması ise D3 numunesine göre deformasyon kapasitesini önemli ölçüde azaltmıştır. Kaçıklık değerinin 10° kadar arttırılması referans numunesine göre maksimum yük değerinde önemli bir etkiye sahip olmamasına rağmen, kaçıklık değerinin arttırılması yük kapasitesinde önemli ölçüde azalmaya neden olmuştur.

Sonuç olarak, eğilme momenti altındaki çelik I profil kirişlerde kaçıklığın artması, kirişin taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Bu nedenle, kirişlerin taşıma kapasitesini arttırmak için, kaçıklık boyutu kontrol altında tutulmalı veya kirişin boyutu veya malzeme özellikleri gerekli ise değiştirilmelidir.

Çelik I profil kirişlerde kaçıklığın artması, malzeme iç yapısında gerilme seviyelerinde artış, şekil değişiklikleri, iç yapıda kusur ve plastik deformasyonlara neden olmuştur. Bu değişiklikler, kirişin taşıma kapasitesini azaltıp ve kirişin hasar görmesine yol açmıştır.

## TEŞEKKÜR

Projemiz Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimince (BAP) FAB-2022-10449 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Deneylerin hazırlanmasında ve yapımında katkılarından dolayı Atateknokent firması Maali Çelik Ar-Ge Danışmanlık Müh. İnş. Taa. San. Tic. Ltd. Şti. ye teşekkür ederiz.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Á. Sapkás, L.P. Kollár, (2002). Lateral-torsional buckling of composite beams. *International Journal of Solids and Structures*, 39(11), 2939-2963.
- A.A. Matloub, Y.S. Rizk, M.M. Fawzy, A.H. Yousef, (2023). Innovative steel I-girder under bending having hollow tubular flanges. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6), 102146.
- E. Ellobody, (2011). Interaction of buckling modes in castellated steel beams, *Journal of Constructional Steel Research.*, 67 (5), pp. 814-825. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.12.012
- H. Showkati, T.G. Ghazijahani, A. Noori, T. Zirakian, (2012). Experiments on elastically braced castellated beams, *Journal Of Constructional Steel Research*, 77, pp-163-172. DOI 10.1016/j.jcsr.2012.05.008
- J. Megharief, R. Redwood,(1998). Behavior of composite castellated beams, *Journal Of Constructional Steel Research*, 46 (1), pp. 199-200. DOI: 10.1016/S0143-974X(98)80019-9
- J.P. Boyer, (1964). Castellated beams - new developments, *AISC Engineering Journal*, 1, pp. 104-108.
- M.R. Soltani, A. Bouchair, M. Mimoune, (2012). Nonlinear FE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 70, pp- 101-104. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.10.016.
- P. Mandal, C.R. Calladine, (2002). Lateral-torsional buckling of beams and the Southwell plot. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(12), 2557-2571.
- P. Studer, A. Taras, (2023). Strain-hardening dependent cross-sectional slenderness limits for the plastic resistance of steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 205, 107879.
- S. Gholizadeh, A. Pirmoz, R. Attarnejad, (2011). Assessment of load carrying capacity of castellated steel beams by neural networks, *Journal Of Constructional Steel Research.*, 67 (5), pp. 770-779. DOI:10.1016/j.jcsr.2011.01.001
- T. Belaid, A. Slimani, F. Ammari, D. Boukhalfa, R. Adman, (2023). Formulation of the critical lateral buckling moment of steel beams under asymmetric loadings. *Thin-Walled Structures*, 182, 110163.
- T. Okubo, D.A. Nethercot, (1985). Web-post strength in castellated steel beams, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 79 (3), pp. 533-557. DOI: 10.1680/iicep.1985.837
- T. Zirakian, H. Showkati, (2006). Distortional buckling of castellated beams, *Journal Of Constructional Steel Research.*, 62 (9), pp. 863-871. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.01.004
- W.A. Salah, (2023). Lateral Torsional Buckling Capacity Assessment of Cellular Steel Beams. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 28(1), 04022065.
- W. Zaarour, R. Redwood, (1996). Web buckling in thin webbed castellated beams, *Journal Of Structural Engineering*, 122 (8), pp. 860-866. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:8(860)
- W.M. Sebastian, J. Ross, T. Keller, S. Luke, (2012). Load response due to local and global indeterminacies of FRP-deck bridges, *Composites Part B-Engineering*, 43 (4), pp. 1727-1738. DOI:10.1016/j.compositesb.2012.01.061
- X. Liu, Y. Wang, H. Ban, M. Liu, M. Veljkovic, F.S. Bijlaard, (2020). Flexural strength and rotation capacity of welded I-section steel beams with longitudinally profiled flanges, *J. Constr. Steel Res.* 173 (2020) 106255