



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.10.2023  
Kabul Tarihi : 11.02.2024

Received Date : 30.10.2023  
Accepted Date : 11.02.2024

### SOĞUKTA ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK KESİTLERİN GÖVDE EZİLMESİ DAYANIMI BELİLENMESİNDE KULLANILAN GÜNCEL İKİ STANDARTIN İNCELENMESİ

#### AN INVESTIGATION OF TWO CURRENT STANDARDS FOR DETERMINING THE WEB-CRIPPLING STRENGTH OF COLD-FORMED STEEL SECTIONS

*Yakup BÖLÜKBAŞ<sup>1</sup>* (ORCID: 0000-0003-4466-6245)

<sup>1</sup> Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yakup BÖLÜKBAŞ, ybolukbas@aksaray.edu.tr

#### ÖZET

İnşaat sektöründe kullanımı son yıllarda oldukça popüler hale gelen soğukta şekil verilmiş çelik (Cold Formed Steel, CFS) kesitlerin mesnet ve diğer elemanlardan kaynaklı tekil yükleme durumunda oluşan gövde ezilmesi davranışı tasarım açısından oldukça önemli bir davranıştır. Bu çalışmada CFS kanal kesitlerin gövde ezilmesi dayanımını belirlemek amacıyla kullanımı öne çıkan TS EN 1993-1-3 ve AISI S100-16 standartlarının uygulanması ve yaklaşım farklılıklarını göstermek amaçlanmıştır. Ayrıca bu iki standardın dayanım tahminleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modellerin tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda TS EN 1993-1-3 standardının genel olarak güvenli tarafta kalarak tutucu sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak her iki standardın sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre oldukça tutucu tahminlerinin olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Soğuk şekil verilmiş çelik, gövde ezilmesi, AISI S100-16, TS EN 1993-1-3, Sonlu elemanlar analizi

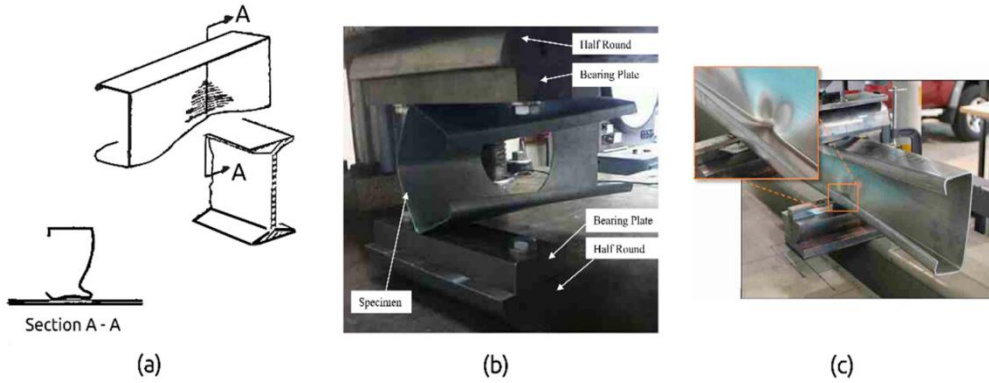
#### ABSTRACT

The web-crippling behavior of cold-formed steel (CFS) sections, which have become very popular in the construction industry in recent years, is critical in design. In this study, the following results were obtained from applying TS EN 1993-1-3 and AISI S100-16 standards, which are prominently used to determine the body crushing strength of CFS channel sections and to show the differences in approach. In addition, the strength predictions of these two standards were compared with the predictions of the models created using the finite element method. As a result of the study, it was seen that the TS EN 1993-1-3 standard generally gives conservative results by staying on the safe side. However, according to the effects of finite element analysis of both measures, it is seen that they have very conservative predictions.

**Keywords:** Cold-formed steel, web crippling, AISI S100-16, TS EN 1993-1-3, Finite element analysis

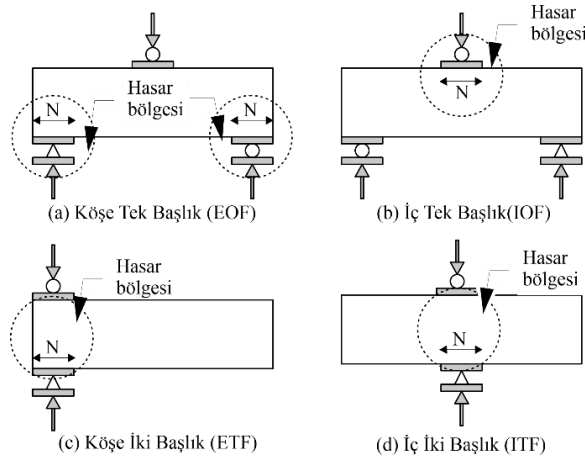
## GİRİŞ

Son yıllarda soğuk şekil verilmiş çelik elemanların (Cold formed steel, CFS) gerek taşıyıcı gerekse tamamlayıcı yapı elemanı olarak kullanımı oldukça popüler hale gelmiştir. Bu elemanlar, yapısal çeliğe göre yüksek taşıma gücü-ağırlık oranına sahip olmaları, kesit şeklinde sağladığı esneklik ve kolay montaj imkânı sunması gibi avantajlar sebebiyle tercih edilmektedir. Soğukta şekil verilmiş çelik elemanlar oluşturduğu sistemin mesnetlerinden kaynaklanan tekil kuvvetlere maruz kalırlar (Şekil 1). Bu kuvvetler kesit gövdesinin ezilerek burkulmasına sebebiyet veren ve gövde ezilmesi (web crippling) adlı verilen davranışın ortaya çıkmasına sebep olur. Özellikle büyük gövde yüksekliği-kalınlık oranına sahip narin soğukta şekil verilmiş çelik elemanlarda bu davranışın tasarımı oldukça önemlidir (Prabakaran ve Schuster 1998).



Şekil 1. Mesnetlenme Durumu Sebebiyle Oluşan Gövde Ezilmesi (Alsanaat vd. 2019)

CFS kesitlerin gövde ezilmesi dayanımı hesabı, gövdenin stabilitesi, yük uygulama bölgesi yakınındaki yerel deformasyonlar ve başlangıç kusurları gibi belirsizlikler nedeniyle çok karmaşıktır (Yu vd, 2000). Bu nedenle, Kuzey Amerika standardında gövde ezilmesi dayanımının tahmini için geçmiş çalışmalara dayanan ampirik bir formül önerilmiştir (Winter ve Pian 1946, Yu ve Hetrakul 1978, Santaputra vd.1989, Bhakta vd. 1992, AISI S100 2012). Standart CFS kesitlerin gövde ezilmesi taşıma gücü hesabında 4 farklı yükleme durumu için denklem önerilmiştir. Bu yükleme durumu sırasıyla uç tek başlık (EOF), iç tek gövde (IOF), uç iki başlık (ETF) ve iç iki başlık (ITF) (Şekil 2) olarak sunulmuştur. Amerikan standardını takiben Eurocode, CFS kesitlerinin gövde ezilmesi dayanımını tahmin etmek için bir denklem önermiştir (Eurocode 3 2007). Oldukça popüler olan bu iki standart, CFS kesitlerin gövde ezilmesi dayanımını iki farklı yaklaşımla tahmin etmeye çalışmaktadır. Eurocode 3'te (1993-1-3) sunulan tasarım yönteminde yükleme durumu ve kesit tipine bağlı olarak farklı formüller ve farklı katsayı denklemleri önerilmektedir. Kuzey Amerika standardında (AISI S100-16 2012) ise Prabakaran ve Schuster tarafından 1998 yılında önerilen çalışma temel alınarak tek bir denklem oluşturulmuştur (Prabakaran ve Schuster 1998). Bu denklemdeki katsayılar kesit tipine ve yükleme koşullarına bağlı olarak tablolaştırılmıştır. Eurocode 3'e göre uygulaması daha kolay bir tasarım yöntemine sahip olsa da her iki standardın yaklaşımı da kesit tipleri ve malzeme özellikleri ile sınırlıdır.



Şekil 3. Gövde Ezilmesi Dayanımının Belirlenmesi Amacıyla Önerilen 4 Farklı Yükleme Durumu Standartların yararlandığı çalışmalarda test edilmeyen farklı malzemeler, kesit şekilleri ve yükleme durumları ile karşılaştırıldığında standartların tahminlerinin yetersiz kaldığı görülmüştür. Araştırmacılar yaptıkları deneysel

çalışmalarda AISI standardının gövde ezilmesi dayanımının tahmini için önerdiği denklemin yetersiz olduğunu belirterek yeni yaklaşımlar önermişlerdir. Beshara ve Schuster (2000) standartta önerdiği denklemdeki katsayıların değişmesi gerektiğini belirtirken, Young ve Hancock (2012), gövde narinliğini temel alan yeni bir denklem önermiştir. Macdonald vd. (2011) yaptıkları çalışma ile soğukta şekil verilmiş çelik C kesitlerin gövde ezilmesi davranışı AISI'nin önerdiği 4 yükleme türü için deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca Eurocode 3 ve Polonya standartlarının gövde ezilmesi tahminleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Araştırmacıların yaptığı diğer çalışmada ise gövde bozulması dayanımının tahmini için sonlu elemanlar tabanlı tasarım önerilmiştir (Macdonald ve Heiyantuduwa 2012). Gövde ezilmesi davranışını sadece iki başlık yüklemesi altında inceleyen Gunalan ve Mahedran (2015) 450 MPa akma dayanımına sahip C kesitlerden hazırlanan 42 test numunesi üzerine deneyler yapılmıştır. Kesit başlıkların mesnetlerde sabitlenerek yapılan çalışma sonuçları ile Doğrudan dayanım yöntemi (Direct Strength Method, DSM) ile tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzer bir çalışma sadece ETF yükleme durumu için gövde ezilmesi dayanımının tahmini için DSM kullanılan bir yöntem geliştirilmiştir. Yeni yöntem sonuçları ile AISI ve Eurocode 3 standartlarının tahmini karşılaştırılmıştır (Natario vd.2016). Köşe başlık yükleme durumundaki soğukta şekil verilmiş çelik kirişlerin gövde ezilmesi davranışını inceleyen Holesapple ve LaBoube (2003) yaptıkları çalışmada, köşe mesnetten taşan kesit parçasının gövde bozulması davranışa olan etkisi ve mevcut tasarım standartlarının bu şekildeki mesnetlenme durumundaki sınırlamaları test edilmiştir. İki başlık yükleme durumu altındaki turnaklı C kesit üzerinde gövde ezilmesi davranışını incelemek amacıyla yapılan çalışmada deney sonuçları ile tasarım standardının tahmini karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda DSM tabanlı geliştirilen tasarım deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan bu yeni yöntem SupaCEE olarak bilinen gövde rijitleştiricili kesitlerin gövde ezilmesi tasarımında da test edilmiştir (Sundararajah vd. 2016,2017).

Literatürde, CFS kesitlerinin gövde ezilmesi davranışı ile ilgili yayınlar çoğunlukla standartların hesaplama doğruluğunu ve alternatif hesaplama yöntemlerini sunmaktadır. Araştırmacılar, farklı malzeme özelliklerinin, kesit tiplerinin ve yükleme koşullarının gövde ezilmesi davranışı üzerindeki etkilerini araştırarak literatüre ve çelik endüstrisine önemli katkılarda bulunmuşlardır. Ülkemizde çoğunlukla sanayi yapılarının çatılarında aşık olarak kullanılan CFS kesitlerin tasarımında gövde ezilmesi davranışının tam olarak belirlenmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, CFS kanal kesitlerinin iç tek başlık (IOF) ve dış tek başlık (EOF) yüklemesi altında gövde ezilmesi dayanımının hesaplanmasında kullanılan güncel iki standardın (AISI ve Eurocode) yaklaşımları ele alınacaktır. Bu hesaplamalarda kesitlerin gövde yükseklikleri, kesit kalınlıkları ve yükleme plaka genişlikleri değiştirilerek farklı kesit tipleri için dayanım değerleri sunulacaktır. Ayrıca seçilen CFS kesitlerin gövde ezilmesi davranışını sonlu elemanlar modeli ABAQUS programı ile oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda standartlarda hesaplanan taşıma gücü değerleri sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilen değerler karşılaştırılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada CFS kanal kesitlerin EOF ve IOF yükleme durumu için gövde ezilmesi dayanımını belirlemek amacıyla sektörde tedariki kolay olan kesitler seçilmiştir. Kesit boyutları, yükleme plakası genişliği ve kesit kalınlığının değişimi ile gövde ezilmesi dayanımının tahmini için önerilen denklemler karşılaştırılmıştır. Üç farklı gruba ayrılan kesitlerde; 1. Grupta kesit kalınlığı ve yükleme plakası genişliği sabit tutulurken kesit yüksekliği değiştirilmiştir. 2. gruptaki kesitlerde ise gövde yüksekliği ve kesit kalınlığı sabit tutulurken, yükleme plakası genişliği değiştirilmiştir. Son grupta kesit yüksekliği ve yükleme plakası genişliği sabit bırakılırken, kesit kalınlığı değiştirilerek hesaplamalar yapılmıştır. Numunelerin kesit ölçüleri ve bu kesitlerin değişimleri Tablo 1'de verilmiştir. Numune isimlendirmesi C100-t1.5-N75 şeklinde yapılmıştır. Burada gövde yüksekliği (h) 100 mm, kesit kalınlığı (t) 1.5 mm ve yükleme plakası genişliği (N) 75 mm olan CFS kanal kesit ifade edilmektedir. Tüm kesitler için akma dayanımı ( $\sigma_y$ ) 275 MPa, kopma dayanımı ( $\sigma_u$ ) 430 MPa ve Elastisite modülü 205 GPa olarak alınmıştır.

### AISI S100-16 Standardı

CFS kesitlerin gövde ezilme dayanımının tahmini için Amerikan (AISI S100-16) standartlarının önerdiği eşitlik aşağıda verilmiştir. AISI S100'de gövde ezilmesi dayanımı ( $P_n$ ) aşağıda verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$P_n = Ct^2F_y \sin \theta \left( 1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \left( 1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}} \right) \left( 1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}} \right) \quad (1)$$

**Tablo 1.** Çalışmada Kullanılan CFS Kanal Kesitlerin Boyutları ve Kesit Özellikleri

| Numune         | Y. D. | h   | b  | c  | t   | N   |
|----------------|-------|-----|----|----|-----|-----|
| C100-t1.5-N75  | EOF   | 100 | 50 | 25 | 1.5 | 75  |
|                | IOF   | 100 | 50 | 25 | 1.5 | 75  |
| C150-t1.5-N75  | EOF   | 150 | 50 | 25 | 1.5 | 75  |
|                | IOF   | 150 | 50 | 25 | 1.5 | 75  |
| C200-t1.5-N75  | EOF   | 200 | 50 | 25 | 1.5 | 75  |
|                | IOF   | 200 | 50 | 25 | 1.5 | 75  |
| C150-t1.5-N100 | EOF   | 150 | 50 | 25 | 1.5 | 100 |
|                | IOF   | 150 | 50 | 25 | 1.5 | 100 |
| C150-t1.5-N150 | EOF   | 150 | 50 | 25 | 1.5 | 150 |
|                | IOF   | 150 | 50 | 25 | 1.5 | 150 |
| C150-t1.5-N200 | EOF   | 150 | 50 | 25 | 1.5 | 200 |
|                | IOF   | 150 | 50 | 25 | 1.5 | 200 |
| C150-t2-N75    | EOF   | 150 | 50 | 25 | 2   | 75  |
|                | IOF   | 150 | 50 | 25 | 2   | 75  |
| C150-t3-N75    | EOF   | 150 | 50 | 25 | 3   | 75  |
|                | IOF   | 150 | 50 | 25 | 3   | 75  |
| C150-t4-N75    | EOF   | 150 | 50 | 25 | 4   | 75  |
|                | IOF   | 150 | 50 | 25 | 4   | 75  |

Burada C standartta verilen tablodan alınan katsayı, t kesit gövdesinin kalınlığı,  $F_y$  tasarım akma dayanımı,  $\theta$  kesit gövdesi ile başlık arasındaki açı,  $C_R$  büküm yarıçapı katsayısı, R büküm yarıçapı,  $C_N$  yükleme plakası genişliği katsayısı, N yükleme plakası genişliği,  $C_h$  gövde yükseklik katsayısı ve h gövde yüksekliği (düz) ifade etmektedir. Eşitlikteki katsayılar kesitin yükleme durumuna göre değişiklik göstermektedir.

AISI S100-16 standardı bölüm G5' de verilen eşitlik çalışmamızda seçilen kesitler ve yükleme durumları için belirlenen katsayılar Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** CFS Kanal Kesitlerin Gövde Ezilmesi Dayanımının Tahmininde Kullanılan AISI S100-16'da Önerilen Eşitlikte Bulunan Katsayılar ve Bu Katsayıların Çalışmada Kullanılan Karşılıkları

| Numune         | Y.D. | C  | $C_R$ | $C_N$ | $C_h$ |
|----------------|------|----|-------|-------|-------|
| C100-t1.5-N75  | EOF  | 4  | 0,14  | 0,35  | 0,02  |
|                | IOF  | 13 | 0,23  | 0,14  | 0,01  |
| C150-t1.5-N75  | EOF  | 4  | 0,14  | 0,35  | 0,02  |
|                | IOF  | 13 | 0,23  | 0,14  | 0,01  |
| C200-t1.5-N75  | EOF  | 4  | 0,14  | 0,35  | 0,02  |
|                | IOF  | 13 | 0,23  | 0,14  | 0,01  |
| C150-t1.5-N100 | EOF  | 4  | 0,14  | 0,35  | 0,02  |
|                | IOF  | 13 | 0,23  | 0,14  | 0,01  |
| C150-t1.5-N150 | EOF  | 4  | 0,14  | 0,35  | 0,02  |
|                | IOF  | 13 | 0,23  | 0,14  | 0,01  |
| C150-t1.5-N200 | EOF  | 4  | 0,14  | 0,35  | 0,02  |
|                | IOF  | 13 | 0,23  | 0,14  | 0,01  |
| C150-t2-N150   | EOF  | 4  | 0,14  | 0,35  | 0,02  |
|                | IOF  | 13 | 0,23  | 0,14  | 0,01  |
| C150-t3-N150   | EOF  | 4  | 0,14  | 0,35  | 0,02  |
|                | IOF  | 13 | 0,23  | 0,14  | 0,01  |
| C150-t4-N150   | EOF  | 4  | 0,14  | 0,35  | 0,02  |
|                | IOF  | 13 | 0,23  | 0,14  | 0,01  |

**TS EN 1993-1-3 Standardı**

TS EN 1993-1-3'e gövde ezilmesi dayanımı ( $R_{w,Rd}$ ) aşağıda verilen denklemler ile hesaplanmaktadır. Uç yükleme durumu için Denklem 2, iç yükleme durumu ise Denklem 3 ile hesaplanmaktadır.

$$R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[ 9.04 - \frac{h_w}{60} \right] \left[ 1 + 0.01 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (2)$$

$$R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[ 14.7 - \frac{h_w}{49.5} \right] \left[ 0.75 + 0.011 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3)$$

Burada  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  ve  $k_5$  standartta verilen katsayılar,  $t$  kesit gövdesinin kalınlığı,  $f_{yb}$  tasarım akma dayanımı,  $h_w$  gövde yüksekliği (düz) ve  $s_s$  ise yükleme plakası genişliğini ifade etmektedir. Eşitlikteki katsayılar kesitin yükleme durumuna göre değişiklik göstermektedir.

TS EN 1993-1-3 standardı bölüm 6.1.7' de verilen eşitlik çalışmamızda seçilen kesitler ve yükleme durumları için belirlenen katsayılar Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** CFS Kanal Kesitlerin Gövde Ezilmesi Dayanımının Tahmininde Kullanılan TS EN 1993-1-3'de Önerilen Eşitlikte Bulunan Katsayılar ve Bu Katsayıların Çalışmada Kullanılan Karşılıkları

| Numune         | Y.D | k    | k <sub>1</sub> | k <sub>2</sub> | k <sub>3</sub> | k <sub>4</sub> | k <sub>5</sub> |
|----------------|-----|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| C100-t1.5-N75  | EOF | 1,20 | 0,93           | 0,85           | 1              | -              | -              |
|                | IOF | 1,2  | -              | -              | 1              | 0,95           | 0,94           |
| C150-t1.5-N75  | EOF | 1,20 | 0,93           | 0,85           | 1              | -              | -              |
|                | IOF | 1,2  | -              | -              | 1              | 0,95           | 0,94           |
| C200-t1.5-N75  | EOF | 1,20 | 0,93           | 0,92           | 1              | -              | -              |
|                | IOF | 1,2  | -              | -              | 1              | 0,95           | 0,97           |
| C150-t1.5-N100 | EOF | 1,20 | 0,93           | 0,85           | 1              | -              | -              |
|                | IOF | 1,2  | -              | -              | 1              | 0,95           | 0,94           |
| C150-t1.5-N150 | EOF | 1,20 | 0,93           | 0,85           | 1              | -              | -              |
|                | IOF | 1,2  | -              | -              | 1              | 0,95           | 0,94           |
| C150-t1.5-N200 | EOF | 1,20 | 0,93           | 0,85           | 1              | -              | -              |
|                | IOF | 1,2  | -              | -              | 1              | 0,95           | 0,94           |
| C150-t2-N150   | EOF | 1,20 | 0,93           | 0,92           | 1              | -              | -              |
|                | IOF | 1,2  | -              | -              | 1              | 0,95           | 0,97           |
| C150-t3-N150   | EOF | 1,20 | 0,93           | 0,92           | 1              | -              | -              |
|                | IOF | 1,2  | -              | -              | 1              | 0,95           | 0,97           |
| C150-t4-N150   | EOF | 1,20 | 0,93           | 0,92           | 1              | -              | -              |
|                | IOF | 1,2  | -              | -              | 1              | 0,95           | 0,97           |

### Nümerik Çalışmalar

Çalışmanın bu bölümünde AISI S100-16 ve TS EN 1993-1-3' de gövde ezilmesi dayanımı tahmini yapılan kesitlerin EOF ve IOF yüklemeleri altındaki gövde ezilmesi dayanımını tahmin etmek amacıyla sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizi için ABAQUS yazılımı kullanılmıştır.

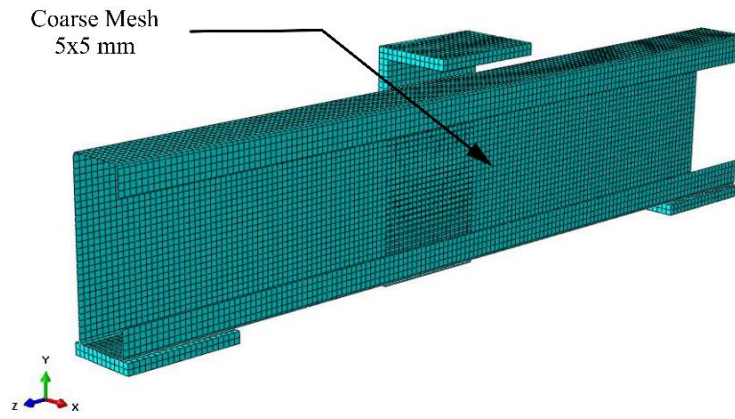
Sonlu elemanlar analizi başarımını test edebilmek amacıyla Lian ve diğerlerinin 2017 yılında yaptıkları çalışmada test edilen iki kesit modellenerek test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Test modeli için referans çalışmadan alınan iki CFS kesit ölçüleri Tablo 4' de verilmiştir.

**Tablo 4.** Çalışmada Kullanılan Referans CFS Kanal Kesitlerin Boyutları ve Kesit Özellikleri

| Numune                    | h   | b    | c    | t   | N   |
|---------------------------|-----|------|------|-----|-----|
| 142×60×13-t1.3-N100-A0-FR | 142 | 60,6 | 13,6 | 1,2 | 100 |
| 202×65×15-t1.4-N100-A0-FR | 202 | 64,7 | 14,7 | 1,3 | 100 |

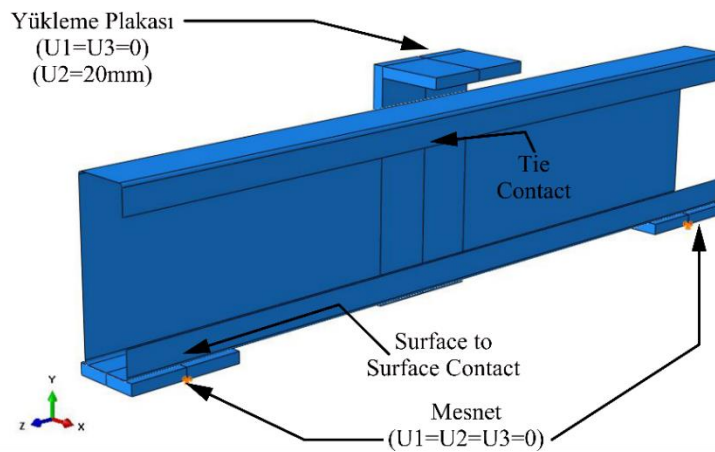
Sonlu elemanlar referans test modelinden tatminkâr sonuç elde edilmesinin ardından çalışmada teorik hesapları yapılan ve kesit özellikleri ve yükleme koşulları Çizelge 1’de verilen kesitlerin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken tüm kesitler gerçek ölçülerine sadık kalınarak modele aktarılmıştır. Modelin malzeme özellikleri tanımlanırken elastik-mükemmel plastik malzeme davranışı olarak tanımlanmıştır. Keist akma dayanımı 275 MPa, kopma dayanımı 430 MPa olarak modele tanımlanırken; Elstisite modülü 205000 MPa ve poisson oranı 0.3 olarak alınmıştır. Modelde CFS elemanlar ve yükleme plakaları 5x5 mm mesh boyutlarına sahiptir (Şekil 3). CFS elemanların modelinde Abaqus programı kütüphanesinden S4R kabuk model seçilmiştir. Yükleme plakaları ise C3D8R katı model seçilmiştir. Her iki kesit elemanı seçiminde literatürdeki kullanımları seçimi etkilemiştir.



Şekil 4. Sonlu Elemanlar Modeli Mesh Durumu

Hazırlanan modelde, yükleme plakası ve CFS eleman arasında surface to surface contact tasarlanmıştır. Burada yükleme plakası master, CFS eleman ise slave olarak ayarlanmıştır. Alt kısımda yer alan yükleme noktası pin mesnet oluşturmak amacıyla her yönde deplasman tutulurken dönmeler serbest bırakılmıştır. Üst kısımda ise yükleme plakası x ve z yönünde deplasmanlar tutulurken, yükleme için y yönünde plaka 20 mm aşağı yönde deplasman tanımlanmıştır. Üst plaka tüm yönlerde dönmeleri tutulmuştur. Yükleme plakası ve cfs eleman arasındaki birleşim tie contact elemanı ile tanımlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 5. EOF Yükleme Durumu Mesnet ve Birleşim Sonlu Elemanlar Modeli

## BULGULAR VE TARTIŞMA

CFS kanal kesitlerin gövde ezilmesi davranışını güncel iki standart ışığında inceleyen çalışma sonucunda, gövde ezilmesi dayanımının tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. AISI S100 ve TS EN 1993-1-3 ile tahmin edilen gövde ezilmesi dayanım sonuçları sonlu elemanlar analiz ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar aşağıda verilmiştir.

**Tablo 5.** Çalışmada Kullanılan Referans CFS Kanal Kesitlerin Boyutları ve Kesit Özellikleri

| Numune         | Y.D. | PAISI | PEN  | PFEM | PAISI/PTS EN | PFEM/PAISI | PFEM/PEN |
|----------------|------|-------|------|------|--------------|------------|----------|
| C100-t1.5-N75  | EOF  | 5,77  | 5,83 | 8,4  | 0,99         | 1,45       | 1,44     |
| C150-t1.5-N75  | EOF  | 5,52  | 5,42 | 7,28 | 1,02         | 1,31       | 1,34     |
| C200-t1.5-N75  | EOF  | 5,30  | 5,01 | 6,7  | 1,06         | 1,26       | 1,33     |
| C150-t1.5-1005 | EOF  | 6,13  | 6,02 | 7,91 | 1,02         | 1,29       | 1,31     |
| C150-t1.5-N150 | EOF  | 7,15  | 7,23 | 8,72 | 0,99         | 1,22       | 1,20     |
| C150-t1.5-N200 | EOF  | 8,01  | 8,43 | 9,15 | 0,95         | 1,14       | 1,08     |
| C150-t2-N150   | EOF  | 9,47  | 10,1 | 12,5 | 0,93         | 1,32       | 1,23     |
| C150-t3-N150   | EOF  | 20,1  | 23,6 | 25,0 | 0,85         | 1,24       | 1,05     |
| C150-t4-N150   | EOF  | 34,1  | 40,9 | 42,1 | 0,83         | 1,23       | 1,02     |
| C100-t1.5-N75  | IOF  | 9,92  | 9,64 | 14,8 | 1,03         | 1,49       | 1,53     |
| C150-t1.5-N75  | IOF  | 9,72  | 9,15 | 13,3 | 1,06         | 1,36       | 1,45     |
| C200-t1.5-N75  | IOF  | 9,55  | 8,67 | 12,0 | 1,10         | 1,26       | 1,39     |
| C150-t1.5-1005 | IOF  | 10,4  | 10,4 | 14,6 | 1,00         | 1,39       | 1,39     |
| C150-t1.5-N150 | IOF  | 11,7  | 11,9 | 16,0 | 0,98         | 1,37       | 1,34     |
| C150-t1.5-N200 | IOF  | 12,7  | 13,6 | 17,1 | 0,94         | 1,33       | 1,25     |
| C150-t2-N150   | IOF  | 17,4  | 15,6 | 19,2 | 1,12         | 1,10       | 1,23     |
| C150-t3-N150   | IOF  | 39,1  | 33,1 | 47,2 | 1,18         | 1,20       | 1,42     |
| C150-t4-N150   | IOF  | 69,0  | 56,0 | 78,6 | 1,23         | 1,13       | 1,40     |

Çizelge incelendiğinde EOF yükleme durumu için kesit gövde yüksekliğinin artması, gövde ezilmesi dayanımını azalttığı görülmüştür. Kesit gövde yüksekliği 2 kat artırıldığında taşıma gücü %8 ile %14 oranında azalmaktadır. Gövde yüksekliğine bağlı kesit gövde ezilmesi dayanım tahmininde TS EN 1993-1-3 daha güvenli tarafta kalmaktadır. Yükleme plakası genişliğinin artması taşıma gücünde %23 ile %28 oranında artış hesaplanmıştır. Kesit kalınlığında 2 mm'den 4 mm çıkarıldığında, taşıma gücü %70 oranında artmaktadır. Kesit kalınlığının artması ile taşıma gücü tahminlerinde AISI 'ın daha güvenli tarafta kaldığı görülmektedir.

IOF yükleme durumu için kesit gövde yüksekliğinin artması, gövde ezilmesi dayanımını azalttığı görülmüştür. Kesit gövde yüksekliği 2 kat artırıldığında taşıma gücü %3 ile %10 oranında azalmaktadır. Gövde yüksekliğine bağlı kesit gövde ezilmesi dayanım tahmininde TS EN 1993-1-3 daha güvenli tarafta kalmaktadır. Yükleme plakası genişliğinin artması taşıma gücünde %18 ile %23 oranında artış hesaplanmıştır. Kesit kalınlığında 2 mm'den 4 mm çıkarıldığında, taşıma gücü %75 oranında artmaktadır. Kesit kalınlığının artması ile taşıma gücü tahminlerinde TS EN 1993-1-3 'ün daha güvenli tarafta kaldığı görülmektedir.

Sonlu elemanlar analizi ile modellenen CFS kanal kesitlerin gövde ezilmesi dayanım tahminleri incelendiğinde (Çizelge 5), genel olarak sonlu elemanlar analiz tahminlerine göre standartların tahminin daha güvenli tarafta olduğu gözlenmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilen gövde ezilmesi dayanım tahminleri AISI'a göre %28 daha TS EN' ye göre ise %30 daha yüksek değerler tahmin edilmiştir.

## SONUÇLAR

CFS kanal kesitlerin gövde ezilmesi dayanımını belirlemek amacıyla kullanılan öne çıkan TS EN 1993-1-3 ve AISI S100-16 standartlarının uygulanması ve yaklaşım farklılıklarını göstermek amacıyla yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- CFS kesitlerin karmaşık doğası gereği gövde ezilmesi dayanımının tahmini için her iki standartta ampirik denklemler kullanan yaklaşımlar geliştirmiştir. Bu durum sonucunda kesit özelliklerinin değişimi tahmin sapmalarını oldukça artırdığı görülmüştür. Örnek olarak kesit gövdesi yüksekliğinin artışı TS EN 1993-1-3 standardını daha tutucu tahminler yapmasına sebep olmuştur.
- Genel olarak TS EN 1993-1-3 standardının gövde ezilmesi dayanım tahminleri AISI S100-16 'ya göre daha güvenli tarafta kalmakla beraber özellikle kesit kalınlığının artırıldığı kesitlerde AISI dayanım tahminleri daha güvenli tarafta kalmaktadır.
- CFS kesitlerin gövde ezilmesi dayanımının tahmininde daha kabul edilebilir çözüm sunabilmek amacıyla deneysel çalışmalar ile desteklenen araştırmaların yapılması planlanmaktadır.
- Gövde ezilmesi davranışını ülkemizde sıklıkla kullanılan CFS kesitler özelinde tam olarak incelemek amacıyla deneysel çalışmaların yapılması gereklidir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bulunan sonlu elemanlar analizlerinde sunduğu yardımlar için Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. BABÜR DELİKTAŞ' teşekkürlerimi sunarım.

## KAYNAKLAR

- AISI S100-16. (2012). Specifications for the cold-formed steel structural members, cold-formed steel design manual. American Iron and Steel Institute (AISI).
- Alsanat, H., Gunalan, S., Guan, H., Keerthan, P., & Bull, J. (2019) Experimental study of aluminium lipped channel sections subjected to web crippling under two flange load cases. *Thin-Walled Struct.* 141, 460–476.
- Bhakta, B.H., LaBoube, R.A., & Yu, W.W. (1992). The effect of flange restraint on web crippling strength. *Missouri University of Science and Technology, CCFSS Library (1939 - present)*, 90.
- Beshara, B., & Schuster, R. (2000) Web crippling of cold formed steel C-and Z-sections. 15th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. University of Missouri—Rolla.
- Eurocode. (2007). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. European Committee for Standardization.
- Holesapple, and R. LaBoube. (2003). Web crippling of cold-formed steel beams at end supports,” *Engineering structures*, vol. 25, no. 9, pp. 1211-1216. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00076-2).
- Gunalan, S. & Mahendran, M. (2015). Web crippling tests of cold-formed steel channels under two flange load cases. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 110, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.018>.
- Lian, Y., Uzzaman, A., Lim, J. B., Abdelal, G., Nash, D., & Young, B. (2016). Effect of web holes on web crippling strength of cold-formed steel channel sections under end-one-flange loading condition—Part I: Tests and finite element analysis. *Thin-Walled Structures*, 107, 443-452. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.06.025>.
- Macdonald, M., Don, M. A. H., Kotelko, M., & Rhodes, J. (2011). Web crippling behaviour of thin-walled lipped channel beams. *Thin-Walled Structures*, vol. 49, no. 5, pp. 682-690. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.09.010>.
- Macdonald, M., & Heiyantuduwa, M. A. (2012) A design rule for web crippling of cold-formed steel lipped channel beams based on nonlinear FEA. *Thin-Walled Structures*, vol. 53, pp. 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.01.003>.
- Natario, P., Silvestre, N., & Camotim, D. (2016). Direct strength prediction of web crippling failure of beams under ETF loading. *Thin-Walled Structures*, vol. 98, pp. 360-374. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.09.012>.
- Prabakaran, K., & Schuster, R. (1998). Web Crippling of Cold-Formed Steel Members. 14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (151-164). Department of Civil Engineering Center for Cold-formed Steel Structures University of Missouri – Rolla.
- Rhodes, J., & Nash, D. (1998). An investigation of web crushing behaviour in thin-walled beams. *Thin-Walled Structures*, 32(1-3), 207-230. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(98\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(98)00035-4).
- Santaputra, C., Parks, M.B., & Yu, W.W. (1989). Web crippling strength of cold-formed steel beams. *Journal of structural engineering*, 115(10): 2511-2527. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:10\(2511\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:10(2511)).
- Sundararajah, L., Mahendran, M., & Keerthan, P. (2016). Experimental Studies of Lipped Channel Beams Subject to Web Crippling under Two-Flange Load Case. *Journal of Structural Engineering*, 142-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001523](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001523).
- Sundararajah, L., Mahendran, M., & Keerthan, P. (2017). Web crippling studies of SupaCee sections under two flange load cases. *Engineering Structures*, vol. 153, pp. 582-597. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.058>.
- Young, B., & Hancock, G. J. (2001) Design of cold-formed channels subjected to web crippling. *Journal of Structural Engineering-Asce*, vol. 127, no. 10, pp. 1137-1144. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:10\(1137\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:10(1137)).
- Yu, W. W., & Hetrakul, N. (1978). Webs for cold formed steel flexural members structural behavior of beam webs subjected to web crippling and a combination of web crippling and bending. *Missouri University of Science and Technology, CCFSS Library (1939- present)*, 194.
- Yu, W. W., LaBoube, R. A., & Chen H. (2000). *Cold-formed steel design*. John Wiley & Sons.



Winter, G., & Pian, R.H.J. (1946). Crushing strength of thin steel webs. Cornell Bulletin 35:Part 1. Cornell University.