



Eğilme etkisi altındaki soğukta şekil verilmiş çelik konik çatı kirişlerinin sonlu elemanlar modellemesine etki eden parametrelerin incelenmesi

Investigation of parameters affecting finite element modeling of cold formed steel conical roof beams under bending

Ramazan Oruç^{1,*}, Mehmet Emin Kara²

^{1,2} Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray Türkiye

Öz

Bu çalışmada soğukta şekil verilmiş çelik kiriş elemanların doğrusal olmayan nümerik modellemesinin deneysel veriler ile doğrulanması amaçlanmıştır. C harfi formunda kesiti olan kirişlerden oluşturulan ve konik çatıya benzetilen deney elemanı test edilmiştir. Nümerik çalışmada ise deney elemanları farklı ağ tipleri, boyutları ve büyütme katsayıları kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca, global ve lokal geometrik kusurlar gibi değişkenlerin analize etkisi değerlendirilmiş ve model doğrulanmıştır. Belirlenen modelin analizlerinden elde edilen sonuçlar, deneyde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Analitik modelin doğrulanmasında global kusurların tek başına yeterli olmadığı, lokal etkilerin de tanımlanması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Soğukta şekil verilmiş çelik, Eğilme elemanı, Sonlu elemanlar yöntemi, Geometrik kusur

1 Giriş

Soğukta şekil verilmiş çelik elemanlar günümüzde silolar, sanayi yapıları ve konutlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel haddeleme ile üretilen çelik profillerin aksine soğukta şekil verilmiş elemanlar oda sıcaklığında rulo şekillendirme makinesi veya abkant büküm makineleri ile kolay üretilmektedir. İstenilen geometrinin sağlanması, yüksek dayanım-ağırlık oranına sahip olması, minimum %25 geri dönüştürülmüş üründen elde edildiği için de sürdürülebilir olması gibi birçok avantajları bulunmaktadır [1-3]. C ve Z harfi formundaki kesitler çatı aşıklarında, döşemelerde ve kolon, kiriş elemanlarında kullanılmaktadır. Öte yandan soğukta şekil verilmiş çelik elemanlar ince cidarlı ürünler olduğu için ($t < 6.35$ mm) lokal, distorsiyonel ve yanal burulmalı burkulma göçme modlarına ve bu burkulma modlarının birbiri ile etkileşimine yatkındır [4]. C harfi formunda olan kesitlerin asal eksene göre simetrik olmaması geometrik merkez ile kayma merkezinin örtüşmemesine neden olmaktadır. Eğilme etkisindeki açık kesitlerde yük aktarımı kayma merkezinden sağlanmadığı için kesit hem burulma momentinin hem de eğilme momentinin etkisi ortaya çıkmakta ve yanal burulmalı burkulma davranışı baskın olmaktadır [2,5]. Yanal burulmalı burkulma etkisindeki kiriş düzlem dışı eğilme yaparak stabilitesini kaybetmekte ve kapasitesi azalmaktadır. İlave

Abstract

This study aims to verify the nonlinear numerical modeling of cold-formed steel beam members with experimental data. An experimental member formed by beams with a C-section and modeled as a conical roof was tested. In the numerical study, the experimental elements were modeled using different mesh types, sizes and amplification factors. In addition, the effect of parameters such as global and local geometric imperfections on the analysis is evaluated and the model is validated. The results obtained from the specified model analysis are compared with those obtained in the experiment. It is concluded that global imperfections alone are insufficient to validate the analytical model and local effects should also be identified.

Keywords: Cold formed steel, Bending member, Finite element method, Geometric imperfection

çözüm yöntemleri ile bu durumun tahmin edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, yanal burulmalı burkulma davranışı birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve davranışın belirlenebilmesi için analitik ve nümerik modeller oluşturulmuştur [6-10]

Yazılım sektörünün gelişmesiyle birlikte sonlu elemanlar yönteminin kullanımı artmış, büyük doğrulukla gerçek davranışın incelenmesine olanak sağlanmıştır [11]. Yüksek doğrulukla çözüm yapan yazılımlardan bir tanesi de ABAQUS programıdır [12]. Literatür incelendiğinde birçok araştırmacı tarafından [13-19] eğilme etkisi altındaki elemanların incelenmesinde kullanılmıştır. Ancak, sonlu elemanlar modeli ile tahmin edilen taşıma gücü değerlerinin doğruluğunu kontrol edebilmek amacıyla tek başına kullanılmaktansa gerek deney sonuçları gerekse standart kapasite hesaplamaları ile kıyaslanarak doğrulama yapılması önerilmektedir.

Soğukta şekil verilmiş çelik elemanlardaki geometrik kusurlar, kusursuz geometriden sapmaları ifade etmektedir. Geometrik kusurlar, soğukta şekil verilmiş çelik elemanlarda rulolama işlemi ve şekil verme işlemleri gibi imalat aşamalarında, depolama ve nakliye süreçlerinde ve uygulama süreçlerindeki işlemler sonucunda meydana gelebilmektedir. Söz konusu geometrik kusurlar ise yapı elemanlarının burkulma davranışını ve yük taşıma

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ramazanoruc@aksaray.edu.tr. (R. Oruç)

Geliş / Received: 05.12.2023 Kabul / Accepted: 01.03.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1400650

kapasitesini etkileyen önemli parametrelerdendir [20-22]. Özellikle sonlu elemanlar modellemelerinde geometrik kusurların tanımlanması, soğukta şekil verilmiş çelik elemanların davranışının belirlenmesinde gerekli olmaktadır. Çünkü, kusursuz modelde gerçek davranışın incelenmesi mümkün olmamaktadır.

Yapılan çalışmalarda [23,24], araştırmacılar farklı ağ tiplerinin, boyutlarının ve lokal geometrik kusurların sonlu elemanlar modeline olan etkisini incelemiştir. Ağ boyutlarının sıklaştırılması hem çözüm sürelerinin uzamasına hem de depolanan dosya boyutunun artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle çok sık ağ boyutları tercih edilmemiştir. Ayrıca, yüksek oranda kusur verilen modellerin deneysel sonuçlardan çok uzaklaştığı, daha düşük kusur verilen modellerin daha doğru sonuç verdiği belirtilmiştir.

Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde, sonlu elemanlar modellerinin oluşturulmasında geometrik kusurların etkisi üzerine yapılan çalışmaların çoğunda lokal kusurların ele alındığı, ancak global kusurları göz ardı edildiği görülmektedir. Bu amaçla çalışmada model oluşturma aşamasında öncelikle farklı büyütme katsayılarına sahip global kusurların etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Daha sonra, en etkili büyütme katsayısına sahip global kusurun etkisi göz önüne alınarak, farklı büyütme katsayılarına sahip lokal kusurların süperpozisyon ile birleştirilerek model üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, ağ model tipleri ve boyutlarının etkisi de detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

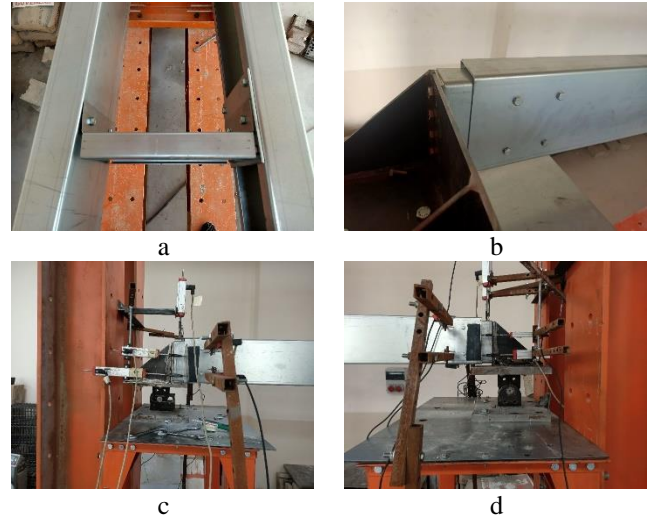
2 Materyal ve metot

2.1 Deneysel program

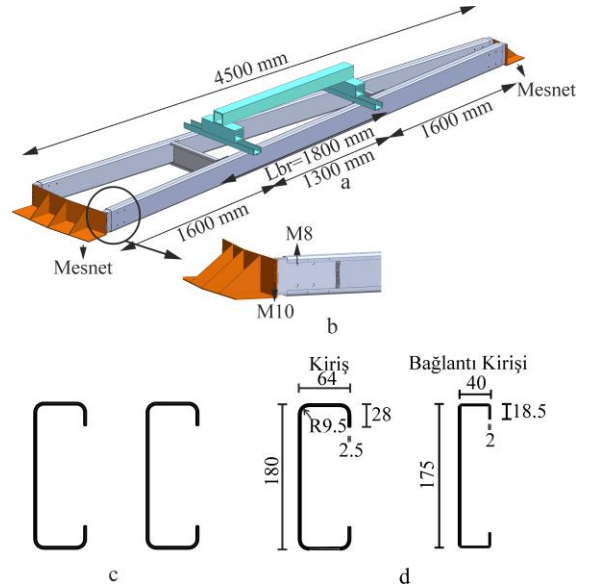
Konik silo çatılarında aralarında açı bulunan kirişler kullanılmaktadır. Kullanımı en yaygın olan silonun yarıçapı 9 m'dir. Bu amaçla deneysel çalışmada, 1/2 ölçekli, 4.5 m uzunluğunda, tek açıklıklı ve soğukta şekil verilmiş çelik elemanlardan oluşan bir kiriş sistemi tasarlanmıştır. Laboratuvar deneylerinde C-180x64x28-2.5 olarak isimlendirilen kirişler, C-175x40x18.5-2 olarak isimlendirilen bağlantı kirişleri yardımıyla birbirlerine ve uç bağlantı elemanları ile de mesnetlere konik silo çatısındaki form verebilmek için 9°'lik açı ile bağlanmıştır. Kirişler aynı yönlü olacak şekilde düzenlenmiştir. Elemanların birbirlerine bağlanmasında bulonlu birleşim kullanılmıştır. Kirişlerin birbirlerine ve uç bağlantı elemanlarına bağlanmasında M8 bulonlar kullanılırken uç bağlantı elemanlarının mesnetlenmesinde M10 bulonlar kullanılmıştır. Bulonların kalite sınıfı 8.8'dir. Kirişlerin birbirine bağlanması ve mesnetlenmesi Şekil 1 (a-d)'de verilmiştir. Kirişlerin yerleşimi, kiriş bağlantı detayı ve kirişlere ait enkesit özellikleri Şekil 2 (b-d)'de verilmiştir.

Deneysel çalışmada kirişler, birbirlerine mesafesi 1800 mm olan bağlantı kirişleri ile yanal olarak desteklenmiştir. Yükleme ara mesafesi 1300 mm olan reaksiyon kirişi ile iki noktadan yapılmıştır. Deneysel düzeneği şematik olarak Şekil 2a'da ve deneysel elemanın laboratuvar ortamındaki görüntüsü Şekil 3a'da verilmiştir. Böylece deneysel elemanda göçmenin sabit moment bölgesinde gerçekleşmesi

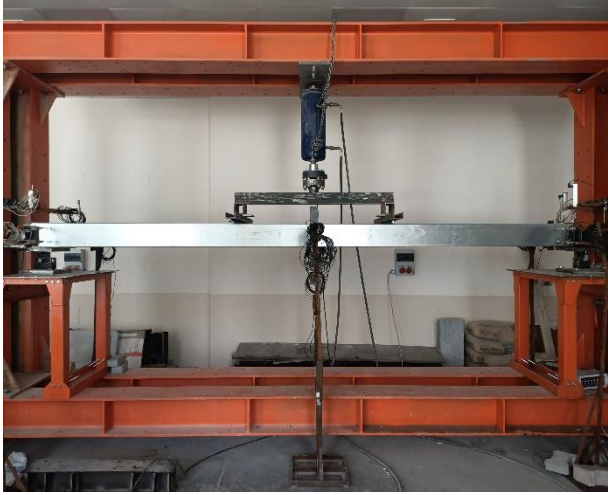
amaçlanmıştır. Ayrıca, yükleme esnasında lokal ezilmelerin önüne geçebilmek için yükleme noktalarında kesitin içine 80x50x175 mm boyutlarında ahşap takozlar yerleştirilmiştir (Şekil 3d). Yükleme 500 kN kapasiteli bir hidrolik kriko ve el kumandalı hidrolik pompa aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Yük artım hızı 0.25 kN/sn'dir. Uygulanan yük 100 kN kapasiteli bir yük hücresiyle ölçülmüştür. Teste göçme gerçekleşene kadar devam edilmiştir. Deplasman ölçümleri potansiyometrik cetveller ile gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin orta noktasından bir adet düşey, iki adet yatay deplasman, mesnet çökmeleri ve mesnet dönmeleri olacak şekilde deplasman ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deplasman ölçümlerinin laboratuvar ortamındaki görüntüsü Şekil 3 (b-c)'de verilmiştir.



Şekil 1. a) Kirişlerin bağlantı kirişleri ile bağlanması, b) kirişlerin uç bağlantı elemanı ile mesnetlenmesi, c-d) deneysel elemanın mesnetlenmesi.



Şekil 2. a) Deneysel düzeneğin şematik gösterimi b) kirişlerin uç bağlantı elemanları ile mesnetlere bağlantı detayı c) kirişlerin yerleşimi d) kirişlerin ve bağlantı kirişlerinin kesit özellikleri.



a



b

c



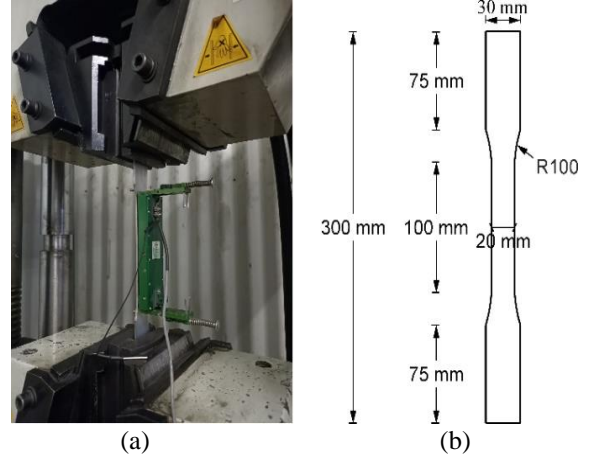
d

Şekil 3. a) Deney düzeneği ve ölçüm sisteminin görünüşü b) orta nokta düşey ve yanal deplasman ölçümleri c) mesnet düşey ve yanal deplasman ölçümleri d) kesit içine ahşap takoz yerleştirilmesi.

2.2 Malzeme özellikleri

Deney elemanları DX51D sınıfında sıcak daldırılmış galvanizli çelik malzemeden üretilmiştir. Deney elemanlarının gövdelerinin düz bölgesinden alınan numuneler test edilmiştir. Çekme testi ASTM E8/E8M-13a'ya [25] uygun olarak yapılmıştır. Tüm çekme numuneleri 600 kN kapasiteli 0,01 mm/sn yükleme hızlı çekme test cihazı ile çekilmiştir (Şekil 4). Uzama 100 mm

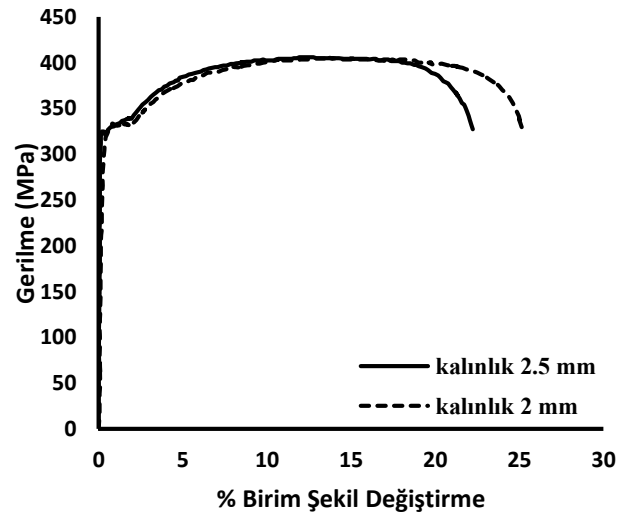
boyunda ekstansometre ile ölçülmüştür. Kupon elemanların Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5'te ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 4. Çekme testi a) çekme test numunesi b) çekme elemanlarının geometrisi.



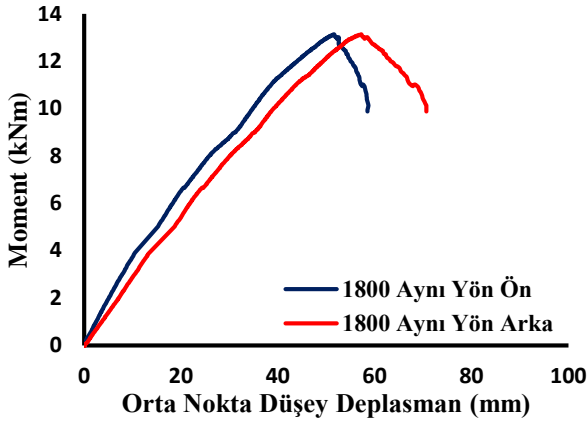
Şekil 5. Çekme elemanlarının ortalama gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.

Tablo 1. Soğukta şekil verilmiş çelik elemanların mekanik özellikleri

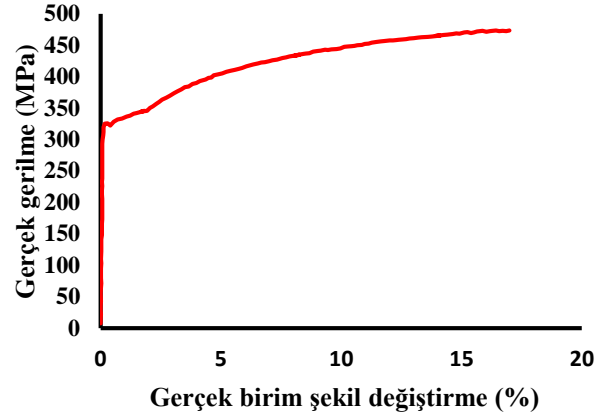
Kalınlık (mm)	E_s (GPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_f (%)
2	202.8	326.5	331.15	25.1
2.5	198.8	321.6	326.7	22.2

2.3 Deney sonucu

Deney elemanına yük dört noktadan 0.25 kN/sn yük artırımı hızıyla uygulanmıştır. Yük 13.1 kNm moment düzeyine kadar artmış rijitliğin azalmasıyla yük de düşmüştür. Deney elemanında göçme yanal burkulmalı burkulma ve kiriş gövdesinde lokal burkulma oluşmasıyla gerçekleşmiştir. Deney elemanına ait moment-düşey deplasman grafiği Şekil 6'da ve göçme şekli Şekil 7 (a-b)'de verilmiştir.



Şekil 6. Deneysel eleman için moment-düşey deplasman grafiği



Şekil 8. Model için üretilen gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 7. Deneysel elemanın göçme şekli.

3 Sonlu elemanlar analizi

Deneysel elemanın sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Modelin taşıma gücü ve göçme modu tahminini geliştirebilmek amacıyla farklı ağ boyutları ve ağ türleri kullanılmıştır. Ayrıca, sonlu elemanlar modeline global ve lokal kesit kusurları tanımlanarak analiz hassasiyeti geliştirilmeye çalışılmıştır.

3.1 Malzeme özellikleri

Sonlu elemanlar analizlerinde malzeme özelliklerinin tam olarak yansıtılması için gerçek gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle, sonlu elemanlar modellemesinde kullanılan malzeme özellikleri çekme testleri sonucunda elde edilen mühendislik gerilme değerlerinin gerçek gerilme değerlerine dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. Gerçek gerilme değerlerinin elde edilmesinde Denklem (1,2)'deki dönüşümlerden yararlanılmıştır. Kirişler için elastisite modülü 200000 MPa ve akma dayanımı 322 MPa olarak elastik-plastik malzeme modeli uygulanmıştır. 2.5 mm kalınlığındaki kirişler için gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme (%) grafiği Şekil 8'de verilmiştir.

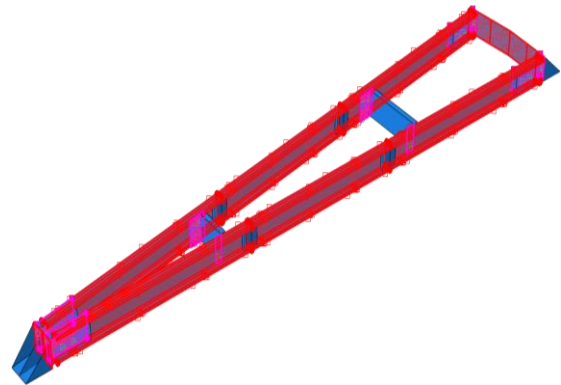
$$\sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_t}{E} \quad (2)$$

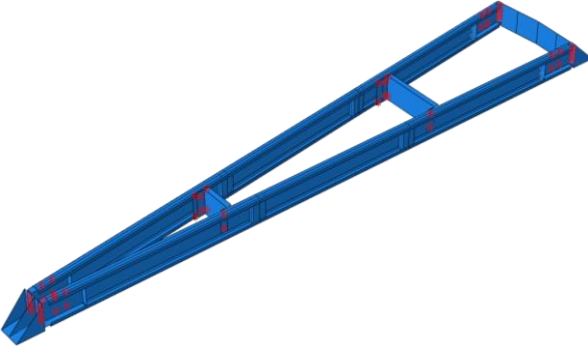
σ : mühendislik gerilmesi, ε : mühendislik birim şekil değiştirilmesi, E : elastisite modülü, ε_t : gerçek birim şekil değiştirilmesi ve σ_t : gerçek gerilmeyi ifade etmektedir.

3.2 Mesnet şartları ve temas yüzeyleri

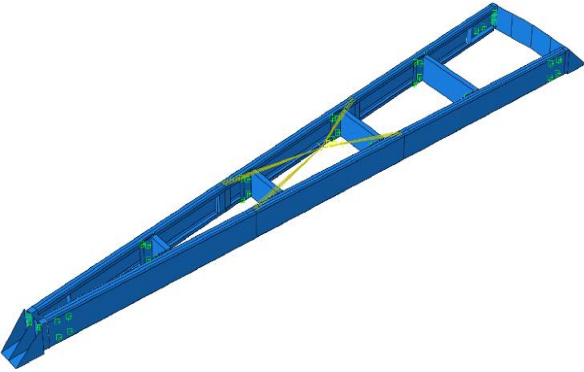
Sonlu elemanlar modellemesinde mesnet şartları basit mesnetli olarak modellenmiştir. Modelde yükleme plakasına eş değer olacak şekilde kiriş sisteminin orta noktasında "reference point" tanımlanmış ve yükleme noktalarına "coupling" ile bağlanmıştır. "Coupling" davranışı için "Structural Coupling" seçilmiştir. Yükleme noktalarının altına deneyde olduğu gibi erken oluşabilecek burkulmaların engellenmesi için rijit ahşap bloklar oluşturulmuş, "Tie" bağlantı kullanılarak kirişe yerleştirilmiştir. "Contact" özelliklerinde ise "Allow separation after contact" özelliği aktif edilerek "Hard Contact" ve "Penalty" seçilerek sürtünme katsayısı olarak 0.3 kullanılmıştır. Bağlantı kirişleri ile kirişlerin, kirişler ile uç bağlantı elemanlarının ve uç bağlantı elemanları ile mesnet levhalarının arasında oluşan temas yüzeylerinin tanımlanmasında "Surface to Surface" ve "Finite sliding" bağlantı modeli kullanılmış ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Bulonlu birleşimlerin tanımlanması "point-based fastener" olarak modellenerek ABAQUS kütüphanesinde bulunan 3 serbestlik derecesine sahip "Cartesian" bağlantı elemanı olarak tanımlanmıştır. Kirişlerin birbirine bağlanmasında kullanılan bulonların modellenmesinde fiziksel yarıçap 4 mm olarak tanımlanırken uç bağlantı elemanı ve mesnet levhasındaki bulonlu birleşimde fiziksel yarıçap 5 mm olarak tanımlanmıştır (Şekil 10). Oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 9. Temas yüzeylerinin modellenmesi



Şekil 10. Bulonlu birleşimlerin modellenmesi



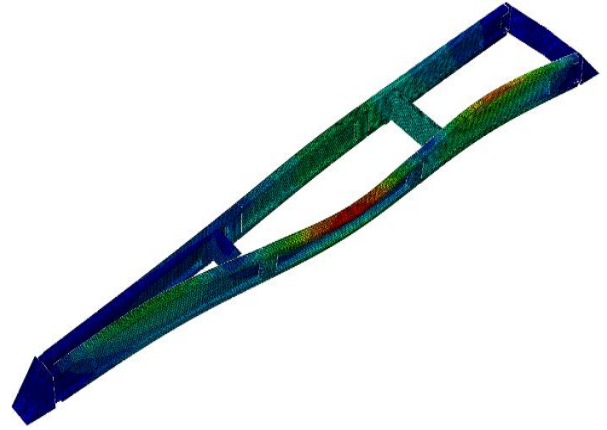
Şekil 11. Oluşturulan sonlu elemanlar modeli

3.3 Ağ (Mesh) modeli

Deney elemanını oluşturan kirişler kabuk eleman "Shell" olarak tanımlanmıştır. Modellemenin doğruluğu ve işlem süresi dikkate alınarak erken oluşabilecek lokal burkulmaların engellenmesi için yerleştirilen ahşap bloklar için sekiz düğüm noktasına sahip azaltılmış integrasyon tekniği ile üç boyutlu katı eleman "C3D8R" kullanılmıştır. Kirişlerin modellenmesinde farklı ağ modellerinin etkisini incelemek için S4R ve S4 ağ modelleri ile kurulan modeller karşılaştırılmıştır. S4R ağ modeli dört düğüm noktasına sahip, azaltılmış integrasyon tekniği olan ve "large-strain" formülasyonuna sahiptir. Ancak S4 ağ modelinde ise azaltılmış integrasyon tekniği yoktur. Ayrıca 5, 10, 15 ve 20 mm olan farklı ağ boyutlarının etkileri incelenmiştir.

3.4 Analiz yöntemi

Kiriş sisteminin burkulma modlarının tespit edilebilmesi için öncelikle burkulma analizi "linear perturbation buckling" yapılmıştır. Bu analiz sonucunda deney elemanına ait baskın lokal ve global burkulma modları elde edilmiştir. Kiriş sistemine ait global ve lokal burkulma modları sırasıyla Şekil 12 (a) ve (b-c)'de verilmiştir. Lokal burkulma modları birleştirilerek geometrik kusurların işlenmesinde uygulanmıştır. Geometrik kusurlar model komut satırına "*Imperfection" komutunun girilmesiyle tanımlanmıştır. Burkulma modlarının belirlenmesinin ardından, yükleme kiriş sisteminin ortasında tanımlanan "reference point" üzerinden deplasman kontrollü olarak ve doğrusal olmayan geometri "NLGEOM" parametresinin açık olduğu statik "Static" analiz yapılmıştır. Statik analizde maksimum artış sayısı, ilk, minimum ve maksimum artış genişliği sırasıyla 100000, 0.01, 10-15 ve 0.1 olarak belirlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

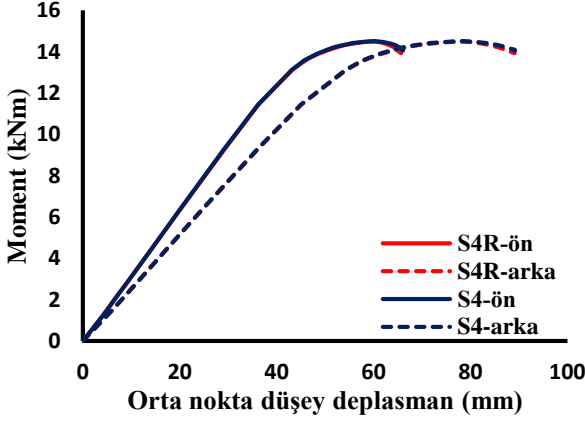
Şekil 12. Burkulma analizi sonucunda elde edilen kirişin baskın burkulma modları (a) global burkulma (b-c) lokal burkulma

4 Bulgular

4.1 Ağ modeli

Kirişlerin modellenmesinde, farklı ağ modellerinin etkisini incelemek için S4R ve S4 ağ modellerinin moment-orta nokta düşey deplasman davranışına olan etkisi incelenmiştir (Şekil 13). Bu ağ modelleri sonlu membran şekil değiştirmelerini ve büyük dönmeleri dikkate aldığı için modelde uygulanmıştır. Öte yandan, başka bir kabuk türü ve daha ekonomik bir ağ modeli olan S4R5 küçük şekil değiştirmelere ve büyük dönmelere neden olduğundan

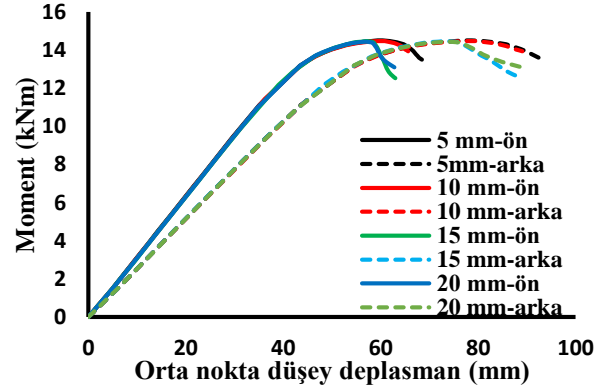
uygulanamamıştır. S4R ve S4 ağ modelleri incelendiğinde benzer bir moment-deplasman davranışı göstermiştir. Ağ modelleri için moment kapasitesi sırasıyla 14.48 kNm ve 14.51 kNm elde edilmiştir. Ancak, azaltılmış integrasyon uygulaması üç boyutlu modellemelerde daha doğru sonuç verdiği için S4R ağ modeli uygulanmıştır.



Şekil 13. S4R ve S4 ağ modellerinin karşılaştırılması

4.2 Ağ boyutları

Farklı ağ boyutlarının etkisini incelemek amacıyla, kiriş elemanların modellenmesinde 5, 10, 15 ve 20 mm boyutlarında ağ kullanılmış, S4R ağ modeli ile analiz yapılmıştır. Karşılaştırmada ön ve arka kirişlere ait moment-orta nokta düşey deplasman grafiği dikkate alınmış ve Şekil 14'te verilmiştir. Dört farklı ağ boyutu kullanımıyla moment taşıma kapasiteleri sırasıyla 14.50, 14.48, 14.47 ve 14.45 kNm olarak hesaplanmıştır. Moment taşıma kapasitelerinde çok büyük farklılıklar olmasa da ağ boyutlarına ait moment-deplasman davranışları değişiklik göstermektedir. 5 ve 10 mm benzer moment-deplasman davranışları sağlarken 15 ve 20 mm'lik modeller de kendi içerisinde benzerlik göstermektedir. Ancak, ağ boyutlarının daha sık olması hem analiz süresini hem de depolanan dosyanın boyutunu artırmaktadır. Bu da büyük modellerin analizinde bilgisayar kullanımını sınırlamaktadır. Yapılan analizler ağ boyutlarına göre sırasıyla 35973, 23586, 4400.5 ve 4029.6 cpu sürelerinde tamamlanmıştır. 20 mm'den 5 mm'ye ağ boyutlarının düşürülmesiyle yaklaşık 9 kat işlem süresinde artış meydana gelmiştir. 15 ve 20 mm ağ boyutlarındaki analizlerde hem moment-deplasman grafiğinde maksimum moment kapasitesine erişildikten sonra ani bir yük kaybıyla göçme meydana gelmesi hem de daha büyük ağ boyutlarının analiz sonucunda tutarlı olmasını kısıtlayacağı için bu boyutlar dikkate alınmamıştır. Ayrıca, 5 ve 10 mm ağ boyutlarından ise cpu süreleri dikkate alınarak daha uygulanabilir sonuç elde edildiği için 10 mm'lik ağ boyutları tercih edilmiştir.



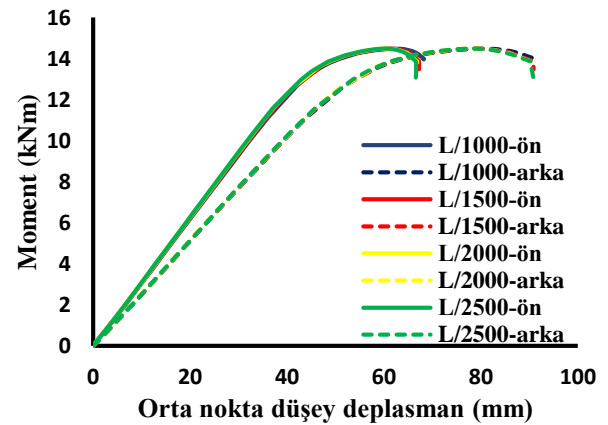
Şekil 14. Ağ boyutlarının karşılaştırılması

4.3 Geometrik kusurlar

Ağ modelinin ve ağ boyutlarının analizlere olan etkisi tespit edildikten sonra geometrik kusurların modele olan etkisi incelenmiştir. Deney elemanında global ve lokal burkulma baskın olduğundan modellemelerde burkulma analizi sonucu elde edilen global ve burkulma modları farklı büyütme katsayıları kullanılarak Denklem (3)'teki gibi etki edilmiştir [5].

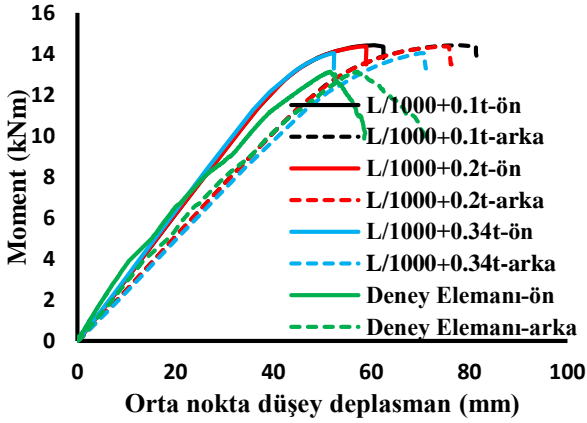
$$\Delta x_i = w_i \phi_i \quad (3)$$

Burada x_i : geometrik kusuru, w_i : büyütme katsayısını ve ϕ_i : i 'nci mod şeklini ifade etmektedir. Şekil 12 (a)'de verilen global burkulma modu L/1000, L/1500, L/2000 ve L/2500 farklı büyütme katsayıları ile büyütülerek analizi yapılmış ve moment-orta nokta düşey deplasman grafiğinde Şekil 15'te karşılaştırılmıştır. Büyütme katsayılarına göre modellerin maksimum moment kapasiteleri sırasıyla 14.48, 14.48, 14.48 ve 14.49 kNm olarak elde edilmiştir. Modellerde global burkulma büyütme katsayılarının hem maksimum moment seviyelerinde hem de moment-orta nokta düşey deplasman davranışlarında çok önemli bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Bu sebeple global burkulma modu etkisinin tek başına yeterli olmadığı lokal burkulma modları ile birleştirilerek modele kusur verilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Lokal kusurlar dahil edilirken L/1000 global büyütme katsayısı ile birleştirilerek kullanılmıştır.

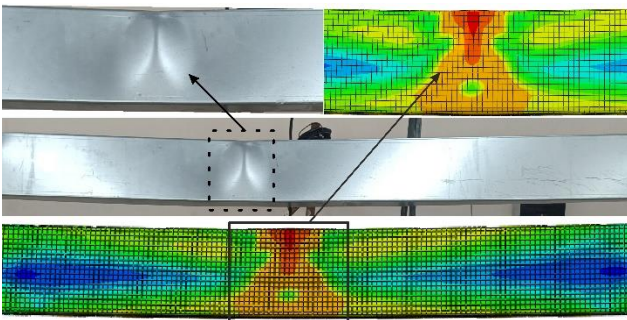


Şekil 15. Global burkulma için büyütme katsayılarının karşılaştırılması.

Şekil 12 (b-c)'de burkulma analizi sonucunda her bir kiriş için ayrı ayrı elde edilen lokal burkulma modları süperpozisyon ile birleştirilerek farklı büyütme katsayıları (0.1t, 0.2t ve 0.34t) kullanılarak analiz yapılmıştır. Lokal kusurların tanımlanmasında kesit kalınlığı dikkate alınmıştır. [22] kümülatif dağılım fonksiyonunda (cdf) aşılma olasılığı %50 olan 0.34t katsayısı maksimum büyütme katsayısı hedefi olarak belirlenmiştir. Farklı büyütme katsayılarının etkisi moment-orta nokta düşey deplasman grafiği olarak Şekil 16'da deney elemanı ile karşılaştırılarak verilmiştir. Modellerde elde edilen maksimum moment seviyeleri sırasıyla 14.42, 14.36 ve 14.0 kNm olarak elde edilmiştir. Deney elemanı ile kıyaslandığında 0.1t ve 0.2t büyütme katsayılı modellerde maksimum moment oranı (M_{fea}/M_{den}) %10 dolaylarındadır. 0.34t büyütme katsayısının uygulandığı modelde ise yaklaşık %7'dir. Bu sebeple 0.34t büyütme katsayılı model ile daha doğru sonuç elde edilmiştir. Ayrıca, deney elemanının göçme modu ile 0.34t büyütme katsayılı modelin göçme modu uyum içerisindedir (Şekil 17).



Şekil 16. Global ve lokal burkulma modlarının birleşik etkisi



Şekil 17. Deney elemanı ile sonlu elemanlar modelinin göçme modları karşılaştırılması

5 Sonuçlar

Bu çalışmada soğukta şekil verilmiş kirişlerden oluşan deney elemanının modellenmesinde ağ modeli, ağ boyutu ve geometrik kusurların etkisi incelenmiştir. Ağ modeli tipleri karşılaştırıldığında, S4R ağ modelinde azaltılmış entegrasyon uygulaması ile üç boyutlu modellemelerde S4 ağ modeline göre daha doğru sonuç verdiği için tercih

edilmiştir. Ağ boyutlarının azalmasıyla bilgisayar çözüm süresinde yaklaşık 9 kat yavaşlama meydana gelmiştir. Bu sebeple de en yoğun ağ boyutu ile modelin oluşturulması uygulanabilir olmaktan çıkmaktadır. Geometrik kusurların etkisi dikkate alındığında, tek başına global burkulma modunun farklı büyütme katsayıları ile modele kusurun verilmesinde moment-deplasman grafiğinde önemli bir değişiklik yapmadığı belirlenmiştir. Global burkulma modu ile lokal burkulma modlarının birleştirilmesiyle hem moment-deplasman ilişkisinde hem de göçme modunun karşılanmasında en etkili yaklaşım L/1000+0.34t büyütme katsayısında olmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] W-W Yu, R.A. LaBoube and H. Chen, Cold-formed steel design. Wiley, Hoboken, 2019.
- [2] G. J. Hancock, T. Murray, and D. S. Ellifrit, Cold-formed steel structures to the AISI specification. CRC Press, Madison Avenue, 2001.
- [3] L. W. Williams, 1 - Introduction to recent trends in cold-formed steel construction. In: C. Yu. (editor) Recent Trends in Cold-Formed Steel Construction, Woodhead Publishing; 2016, p. 1-35. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100160-8.00001-3>.
- [4] Y. Bölükbaş, Güncel tasarım standartlarına göre soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin eğilme dayanımlarının hesabı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 1-1, 2024. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1309045>
- [5] S. Selvaraj and M. Madhavan, Bracing effect of sheathing in point-symmetric cold-formed steel flexural members. Journal of Constructional Steel Research, 157, 450-462, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.037>
- [6] L. Y. Li, Lateral-torsional buckling of cold-formed zed-purlins partial-laterally restrained by metal sheathing. Thin-walled structures, 42(7), 995-1011, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2004.03.005>
- [7] P. Nandini and V. Kalyanaraman, Strength of cold-formed lipped channel beams under interaction of local, distortional and lateral torsional buckling. Thin-walled structures, 48(10-11), 872-877, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.04.013>
- [8] B. Janarthanan and M. Mahendran, Behaviour and strength of unlipped channel sections under combined bending and torsion. Journal of Constructional Steel Research, 182, 106648, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106648>
- [9] H. X. Wan, B. Huang and M. Mahendran, Experiments and numerical modelling of cold-formed steel beams under bending and torsion. Thin-Walled Structures, 161, 107424, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107424>
- [10] R. H. Plaut and C. D. Moen, Lateral-torsional deformations of single-span and two-span thin-walled

- beams with continuous bracing. *Journal of Constructional Steel Research*, 179, 106534, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106534>
- [11] C. Zhao, Investigations on structural interaction of cold-formed steel roof purlin-sheet system. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, UK, 2014.
- [12] ABAQUS Analysis User's Manual-Version 6.14., ABAQUS Inc., USA, 2018
- [13] C. Yu and B.W. Schafer, Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method. *Journal of Constructional Steel Research*, 63, 5, 581-590, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.07.008>.
- [14] N. D. Kankanamge and M. Mahendran, Behaviour and design of cold-formed steel beams subject to lateral-torsional buckling. *Thin-Walled Structures*, 51, 25-38, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.10.012>.
- [15] M. R. Haidarali and D.A. Nethercot, Local and distortional buckling of cold-formed steel beams with edge-stiffened flanges. *Journal of Constructional Steel Research*, 73, 31-42, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.01.006>.
- [16] M. Anbarasu, Local-distortional buckling interaction on cold-formed steel lipped channel beams. *Thin-Walled Structures*, 98, 351-359, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.003>.
- [17] M. Anbarasu, Local-distortional buckling interaction on cold-formed steel lipped channel beams. *Thin-Walled Structures*, 98, 351-359, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.003>
- [18] Q. Y. Li and B. Young, Structural performance of cold-formed steel built-up section beams under non-uniform bending. *Journal of Constructional Steel Research*, 189, 107050, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107050>
- [19] K. Roy, H. H. Lau, T. C. H. Ting, B. Chen, and J. B. Lim, Flexural behaviour of back-to-back built-up cold-formed steel channel beams: Experiments and finite element modelling. *Structures*, 29, 235-253, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.052>
- [20] D. Dubina and V. Ungureanu, Effect of imperfections numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members. *Thin-walled structures*, 40, 3, 239-262, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(01\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(01)00046-5)
- [21] V. M. Zeinoddini and B. W., Schafer, Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach. *Thin-Walled Structures*, 60, 105-117, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.07.001>
- [22] B. W. Schafer and T. Peköz, Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*, 47, 193-210, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(98\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(98)00007-8).
- [23] C. H. Pham and G. J. Hancock, Numerical simulation of high strength cold-formed purlins in combined bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 1205-17, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.014>.
- [24] P. Natario, N. Silvestre and D. Camotim, Computational modelling of flange crushing in cold-formed steel sections. *Thin-Walled Structures*, 84, 393-405, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.07.006>
- [25] ASTM E8/E8M-13a, Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken, 2013.

