



Accurate geometric imperfection detection and quantification of cold-formed steel members from point clouds

Burcu Güldür Erkal*

Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Faculty of Engineering, Hacettepe University, 06800, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Accurate detection and quantification of geometric imperfections in cold-formed steel members
- Automatic geometric imperfection detection by performing point cloud processing
- Comparison of improved geometric imperfection detection method with precious method

Keywords:

- Cold-formed steel
- C-sectioned member
- Geometric imperfection
- Point cloud
- Automated imperfection detection

Article Info:

Research Article

Received: 11.03.2022

Accepted: 19.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1086437

Acknowledgement:

This material is based upon work supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) under Grant No. 217M513 and Hacettepe University.

Correspondence:

Author: Burcu Güldür Erkal
e-mail: burcuguldur@hacettepe.edu.tr
phone: +90 533 367 0751

Graphical/Tabular Abstract

In recent years, the use of cold-formed steel (CFS) in low and medium-rise buildings has become widespread. CFS members have a high strength-to-weight ratio, and since the construction of the structures performed using these elements takes a short time, it offers an effective solution in terms of meeting the requirements of rapid construction. CFS construction has advantages as well as disadvantages, and one of these disadvantages is that the geometric imperfections that occur in the member during the manufacturing, transportation, and installation processes affect the element's behavior. This research focuses on accurately detecting and quantifying the geometric imperfections found in C-sectioned CFS members. Figure A presents the geometric imperfection detection results for the twist, δ_θ , obtained using both old and improved new methods on a 1000 mm long C-sectioned CFS member, Pmid6.

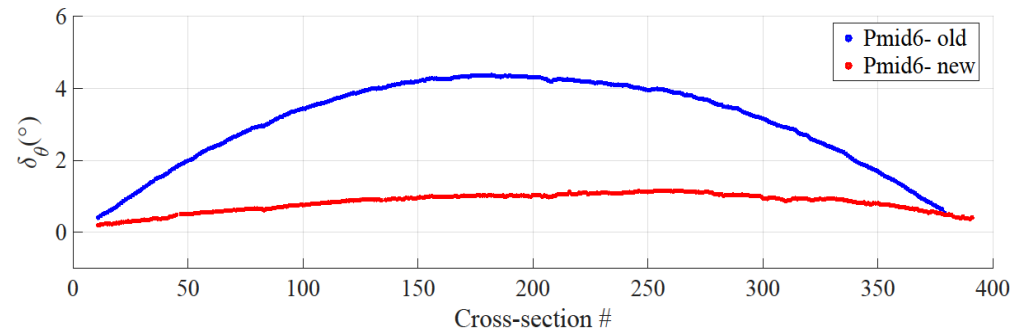


Figure A. Geometric imperfection detection results for the twist, δ_θ , obtained using both old and improved new methods for the cross-section cuts along the member axis

Purpose: This research aims to accurately detect and quantify the geometric imperfections found in C-sectioned CFS members by using the improved geometric imperfection detection and quantification method.

Theory and Methods: Local and global imperfections in CFS members are determined using the improved automatic geometric imperfection detection and quantification method. The improved geometric imperfection detection and quantification method performs an advanced reference geometric model registration that improves the global imperfection detection results. Furthermore, the local imperfections are investigated by projecting the reference key-points detected on the point cloud section cuts on the ideal geometric model representation. The results obtained were compared with a previously developed, literature-based geometric imperfection detection and quantification method.

Results: The obtained results showed that the maximum and average geometric imperfection values calculated by the improved geometric imperfection detection and quantification method for all elements decreased by 50% or more, except for the geometric imperfections whose formulation remain same, and which are not directly affected by the initial ideal geometric model placement process.

Conclusion: The developed improved geometric imperfection detection and quantification method is capable of both the precise registration of the ideal geometric model used as a reference and the accurate detection and quantification of both local and global geometric imperfections. Obtained results have showed that the improved method can capture the actual distributions of both local and global geometric imperfections.



Nokta bulutları kullanılarak hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusurların doğru tespit edilmesi ve boyutlandırılması

Burcu Güldür Erkal*

Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusurların doğru tespit edilmesi ve boyutlandırılması
- Nokta bulutu verileri işlenerek otomatik şekilsel kusur tespitinin gerçekleştirilmesi
- İyileştirilmiş şekilsel kusur tespit yönteminin eski yöntemlerle kıyaslanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.03.2022

Kabul: 19.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1086437

Anahtar Kelimeler:

Hafif çelik,
c-kesitli eleman,
şekilsel kusur,
nokta bulutu,
otomatik kusur tespiti

ÖZ

Son yıllarda az ve orta katlı yapılarda hafif çelik kullanımı yaygınlaşmıştır. Hafif çelik elemanlar yüksek dayanım-ağırlık oranına sahiptir ve bu elemanları kullanarak oluşturulan yapıların inşası kısa sürdüğünden hızlı yapılanma gereksinimleri karşılamak açısından etkili bir çözüm sunmaktadır. Hafif çelik yapının avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır ve bu dezavantajlardan bir tanesi imalat, nakliye ve kurulum süreçleri sırasında elemanda meydana gelen şekilsel kusurların eleman davranışını etkilemesidir. Bu araştırma, C-kesitli hafif çelik elemanlarda bulunan şekilsel kusurların doğru bir şekilde tespit edilmesi ve boyutlandırılması üzerine yoğunlaşmaktadır. İyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespit ve boyutlandırma yöntemi kullanılarak hafif çelik elemanlarda bulunan lokal ve global hasarlar tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki çalışmalar taban alınarak oluşturulmuş ikinci bir şekilsel kusur tespit ve boyutlandırma yönteminin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yürütülen çalışma sonucunda, formülasyonu değişmeyen ve başlangıçta uygulanan ideal geometri modeli yerleştirme işleminden birebir etkilenmeyen şekilsel kusurlar dışında bütün elemanlar için iyileştirilmiş şekilsel kusur çıkarımı yöntemi ile hesaplanan maksimum ve ortalama şekilsel kusur değerlerinde eskiye oranla %50 ve üzerinde düşüş görülmüştür. İyileştirilmiş yöntemin hem lokal hem de global şekilsel kusurları gerçeğe uygun tespit ettiği gözlemlenmiştir.

Accurate geometric imperfection detection and quantification of cold-formed steel members from point clouds

H I G H L I G H T S

- Accurate detection and quantification of geometric imperfections in cold-formed steel members
- Automatic geometric imperfection detection by performing point cloud processing
- Comparison of improved geometric imperfection detection method with precious methods

Article Info

Research Article

Received: 11.03.2022

Accepted: 19.07.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1086437

Keywords:

Cold-formed steel,
c-sectioned member,
geometric imperfection,
point cloud, automated
imperfection detection

ABSTRACT

In recent years, the use of cold-formed steel (CFS) in low and medium-rise buildings has become widespread. CFS members have a high strength-to-weight ratio, and since the construction of the structures performed using these elements takes a short time, it offers an effective solution in terms of meeting the requirements of rapid construction. CFS construction has advantages as well as disadvantages, and one of these disadvantages is that the geometric imperfections that occur in the member during the manufacturing, transportation, and installation processes affect the element's behavior. This research focuses on accurately detecting and quantifying the geometric imperfections found in C-sectioned CFS members. Local and global imperfections in CFS members are determined using the improved automatic geometric imperfection detection and quantification method. The results obtained are compared with a previously developed, literature-based geometric imperfection detection and quantification method. As a result of this study, it is observed that the maximum and average geometric imperfection values calculated by the improved geometric imperfection detection and quantification method for all elements decreased by 50% or more, except for the geometric imperfections whose formulation remain same and which are not directly affected by the initial ideal geometric model placement process. It has been verified that the improved method accurately detects both local and global geometric imperfections.

1. Giriş (Introduction)

Hafif çelik Türkiye’de çoğunlukla raf sistemlerinde ve az katlı yapılarda kullanılıyor olmasına rağmen sanayileşmiş ülkelerde az ve orta katlı yapılarda taşıyıcı sistem olarak da tercih edilmektedir. Yaklaşık 1 mm kalınlığındaki çelik şeritlerden makaralı şekillendirme yöntemiyle elde edilen hafif çelik elemanlar (C, U, Ω vb. kesitler), hem yüksek dayanım-ağırlık oranına hem de değişken hava koşullarına ve çürümeye dayanıklı galvaniz kaplamaya sahiptir. Dolayısıyla yapılarda hafif çelik kullanımı hem yapısal verimliliği arttırmakta hem de yapım maliyetlerinin düşmesini sağlamaktadır.

Hafif çelik yapıların çeşitli avantajları olmasına rağmen, imalat, nakliye ve kurulum süreçleri sırasında hafif çelik elemanlarda şekilsel kusurlar oluşabilmektedir. Bu şekilsel kusurlar hafif çelik elemanların bireysel davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir [1]. Son zamanlarda hafif çelik eleman ve sistem düzeylerinde birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen hafif çelik eleman davranışını doğrudan etkileyen şekilsel kusurların tespit edildiği ve bu kusurların eleman davranışına olan etkilerinin incelendiği az sayıda çalışma bulunmaktadır. Yürütülen güncel çalışmalarda ise şekilsel kusur tespiti ve boyutlandırması için kullanılacak ölçümler eleman yüzeyinde belirlenen aralıklı noktalardan yapılmaktadır. Dolayısıyla şekilsel kusurların eleman üzerindeki dağılımı detaylı bir şekilde incelenememektedir.

Bu makalenin odak noktası doku kaplamalı nokta bulutlarından otomatik ve doğru bir şekilde şekilsel kusur çıkarımı gerçekleştirmek olduğundan, şekilsel kusur tespitine ve boyutlandırmasına odaklanan önceki çalışmalar derinlemesine araştırılmıştır. Belirtilen doku kaplamalı nokta bulutu, nokta bulutunu oluşturan her bir nokta için koordinat bilgilerini (x, y ve z) ve kırmızı-yeşil-mavi renk modeliyle uyumlu renk bilgisini içeren üç boyutlu bir veri kümesidir. Literatürdeki çalışmalarda şekilsel kusur tespit ve boyutlandırması için kullanılacak ölçümler sınırlı sayıda noktadan toplanan veriler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Lazer tarayıcılar gibi hafif çelik elemanlardan detaylı yüzey bilgisi toplayan sistemlerde ise ölçümler referans (hasarsız) bir elemana göre yapılmaktadır. Schafer ve Peköz [2], hafif çelik elemanlarındaki şekilsel kusurları ve artık gerilmeleri karakterize etmek için bir çalışma yürütmüştür. Kesit üzerinde sayılı noktadan ölçüm alınarak bir kusur spektrumu elde edilmiştir. Dubina ve Ungureanu [3] şekilsel kusurların tespiti ve bu kusurların sonlu eleman modeline entegrasyonu için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada hem global hem de lokal şekilsel kusur değerlerini hesaplamak için kesit düzeyinde beş nokta kullanılmıştır. Young ve Rasmussen [4], hafif çelik kolon deneyleri sırasında sadece elemanın orta noktasındaki deformasyonları ve dönmeleri ölçmek için kullanılan yeni bir deney düzeneği geliştirmiştir. Peterman [5] şekilsel kusurları kesit çevresinde yedi konumda ölçüm yapılmasını sağlayan özel bir teçhizat aracılığıyla tespit etmiştir. Ölçümler, eleman ekseninde, ~2,5 m uzunluk boyunca, her ~2,5 mm’de bir kaydedilmiştir. Tespit edilen şekilsel kusurlar daha sonra beş burkulma modu ile kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Zeinoddini ve Schafer [6] şekilsel kusurların dağılımlarının çıkarılmasında modal yaklaşımları ve spektral temsilleri birleştiren bir yöntem geliştirilmiştir. Modellenen şekilsel kusur değerleri hafif çelik elemanların kesiti etrafındaki yedi belirli konumdan kaydedilen fiziksel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Sadovský vd. [7] hesaplamalı modelleme yaparak, elemanda bulunan şekilsel kusurların hafif çelik elemanların burkulma mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemek için bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada kullanılan şekilsel kusur değerleri, Lecce ve Rasmussen [8]’de sunulan, her bir elemanın flanş-dudak bağlantısının orta yüksekliğinde ölçülen mutlak kusur değerleridir. Bu çalışma, hafif çelik elemanların şekilsel kusur etkilerini hesaba katan geometri ve malzeme açılarından doğrusal

olmayan sonlu elemanlar analizinde (GMNIA) öz mod şekilleri tarafından temsil edilen en elverişsiz şekilsel kusurlarını belirlemeyi amaçlamıştır. Zeinoddini ve Schafer [9], hafif çelik dudaklı kanal elemanlarda uzunluk boyunca bükülme, dışbükeylik ve burulma durumlarını karakterize etmek ve boyutsal değişiklikleri ölçmek için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Deformasyon ölçümleri, hafif çelik elemanlar boyunca kesit seviyesinde üç noktadan alınmıştır. Hesaplanan global kusurlar ve boyutsal farklılıklar, üretim toleransları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan ölçümler daha sonra güvenilirlik veya doğrusal olmayan analiz için uygun şekilsel kusur büyüklüklerini tespiti üzerine istatistiksel bir çalışma yapmak için kullanılmıştır. Hafif çelik şekilsel kusur dağılımı çıkarımı için üç boyutlu (3B) ölçümleri kullanmaya yönelik ilk girişim olarak, Zhao vd. [10] 240 mm’ye kadar olan genişliklerde ölçüm yapabilen iki boyutlu (2B) çizgi lazer içeren bir test düzeneği geliştirmiştir. Daha sonra Zhao vd. [11], hafif çelik kesit boyutlarını hesaplamak ve şekilsel kusurların lazer tarama verilerinden tespiti için başka bir çalışma da gerçekleştirmiştir. Hesaplanan şekilsel kusurlar daha sonra sonlu eleman modellerini iyileştirmek için kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada, şekilsel kusur hesaplamalarında kullanılan yer değiştirme ölçüm noktaları elle seçilmiştir. McAnallen vd. [12], enine kesit seviyesinde yedi nokta kullanarak şekilsel kusurları tespit etmiştir. Ortak bir şekilsel kusur gösterim formatı oluşturmak için bu ölçümler önceki araştırmalardan elde edilen ölçümlerle birlikte kullanılmıştır. Salomon vd. [13], hafif çelik kolonlarının burkulma deformasyonunun dijital durum modellerini oluşturmak için yüksek çözünürlüklü optik kameralar ve bilgisayarla görme algoritmaları kullanmıştır. Ancak elde edilen 3B model doğruluğu Mulligan ve Peköz [14], Peterman [5] ve Young [15]’te sunulan kaydedilen minimum lokal kusur değerlerinden daha yüksek olarak, 0,25 mm, raporlanmıştır. Selvaraj ve Madhavan [16], hafif çelik elemanlardaki ideal geometriden sapmalar 3B lazer tarama yöntemi kullanılarak ölçmüştür. Şekilsel kusurların çıkarılması için kesit düzeyinde yirmi yedi sapma ölçüm noktası kullanılmıştır. Bu ölçüm noktaları, ticari bir yazılım desteği ile manuel olarak seçilmiştir ve ideal hafif çelik eleman geometrisi referans alınarak sapmalar hesaplanmıştır. Bu çalışmada, hafif çelik elemanlarındaki şekilsel kusurlar ile narinlik oranları, burulma sabiti ve plaka narinliği gibi geometrik özellikler arasındaki ilişkiler de araştırılmıştır. Son olarak, Zhao vd. [17], yüksek doğrulukta şekilsel kusur ölçümleri yapmış ve bunları çeşitli simülasyon yöntemlerine uygun olarak şekilsel kusur dağılımlarını karakterize etmek için kullanmıştır. Elde edilen nokta bulutu, alt örnekleme ile istenen yoğunlukta bir kesit elde etmek için kullanılmıştır.

Literatürdeki çalışmaların sonucusu (Zhao vd. [17]) dışında hafif çelik elemanların şekilsel kusur bilgileri eleman ana eksenini boyunca toplanan sınırlı sayıda veri noktasından çıkarılmıştır. Böylece, kapsamlı şekilsel kusur dağılımı değil de kısmi olarak kaydedilmiş şekilsel kusur dağılımları elde edilmiştir. Bu tip çalışmalarda bütün geometriyi kapsayacak şekilsel kusur dağılımları, ek veri işleme teknikleri kullanılarak kesit boyunca veya hafif çelik eleman boyunca ölçülmeyen noktalarda tahmin edilmiştir (Farzianian vd. [18]; Zeinoddini-Meimand [19]). Bu çalışmada, hafif çelik elemanlarda bulunan şekilsel kusurları otomatik ve doğru olarak tespit etmek için eleman yüzeyinden 3B tarama teknolojisi ile toplanan doku kaplamalı nokta bulutları kullanılmıştır. Literatürdeki yöntemlerden farklı olarak, her bir hafif çelik elemanlardaki mevcut şekilsel kusurların tam dağılımı eleman geometrisini birebir yansıtan doku kaplamalı nokta bulutlarından otomatik olarak çıkartılmakta ve tespit edilen bu şekilsel kusurlar boyutlandırılmaktadır. Lokal şekilsel kusurların tespitini etkileyebileceğinden bu çalışmada nokta bulutu yoğunluğunu değiştiren aşağı örnekleme gibi yaklaşımlardan özellikle kaçınılmış, toplanan nokta bulutları olduğu gibi kullanılmıştır. Bu çalışmada, yazarın araştırma grubunun çeşitli hafif çelik kesit türleri için

geliştirdiği kesit tabanlı ve otomatik şekilsel kusur tespit yöntemi güncellenmiş ve şekilsel kusurları doğru boyutlandırarak şekilde iyileştirilmiştir [20]. Yürütülen güncel çalışma göstermiştir ki literatürdeki çalışmalar (özellikle Selvaraj ve Madhavan [16]) referans alınarak geliştirilen şekilsel kusur tespit ve boyutlandırma yöntemi (Cagrici [20]) global şekilsel kusurlarının dağılımlarını doğru hesaplasa da lokal şekilsel kusurların boyutlandırmasını doğru yapamamaktadır. Bu sebeple Cagrici [20]'da geliştirilen şekilsel kusurların nokta bulutlarından otomatik olarak tespit edilmesi yöntemi (eski yöntem) iyileştirilmiş, hem lokal hem de global kusurların doğru tespit edilip boyutlandırılacağı şekilde güncellenmiştir (yeni yöntem). Böylece hafif çelik elemanlardaki mevcut şekilsel kusurları otomatik ve doğru bir şekilde tespit edip boyutlandırmak mümkün olmuştur. Yeni yöntemle elde edilen sonuçlar eski yöntemle karşılaştırılmış ve farklılıklar tartışılmıştır.

Yürütülen çalışma belirli aşamalardan oluşmaktadır. İlk olarak, optik bir tarayıcı ile hafif çelik elemanların 3B nokta bulutları elde edilmiştir (Bölüm 2). Elde edilen doku kaplamalı nokta bulutları taranan nesnelerin geometrilerini olduğu gibi yansıtmaktadır. Şekilsel kusurlar daha sonra her bir hafif çelik elemanın uzunluğu boyunca hesaplanan noktasal sapmalar kullanılarak kesit seviyesinde hesaplanmıştır. Her bir hafif çelik elemanın yüzeyinde sınırlı sayıda nokta kullanmak yerine tüm nokta bulutu işlenmiştir. Nokta bulutları, her bir hafif çelik elemanın uzunluğu boyunca her kesitte temsili anahtar noktaları elde etmek için işlenmiş ve referans kesit kullanılarak noktasal sapmalar hesaplanmıştır (Bölüm 3). Bunu takiben, her bir şekilsel kusurun hafif çelik elemanları boyunca varyasyonlarını gözlemek ve tartışmak için, çıkarılan şekilsel kusurların dağılımları eleman uzunluğuna hem eski hem de yeni yöntem sonuçlarını kapsayacak şekilde çizilmiştir. Eski ve yeni yöntemle elde edilen sonuçlar raporlanmış ve tartışılmıştır (Bölüm 4). Son olarak, yürütülen araştırmanın sonuçları özetlenmiştir (Bölüm 5).

2. Hafif Çelik Elemanların Nokta Bulutlarının Toplanması (Point Cloud Collection from CFS Members)

Bu çalışmada, hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusurlar 3B veri toplama sistemi aracılığıyla toplanan nokta bulutlarından otomatik olarak elde edilmektedir. 3B veri toplama sistemleri, taranan nesnenin boyutuna ve 3B veri toplama sisteminin özelliklerine bağlı olarak, taraması yapılan yüzeylerden milyonlarca veri noktası toplayabilir. Nokta bulutları genellikle nokta koordinat ve yüzey renk bilgilerinden oluşur. Tarama dikkatli bir şekilde yapılırsa 3B veri toplama sistemi kullanılarak elde edilen nokta bulutları yüksek çözünürlüğe sahiptir. Kullanılan 3B veri toplama sisteminin görüş açısını engelleyen bir obje yoksa, elde edilen nokta bulutları taranan nesnenin birebir geometrik temsili sunar.

2.1. İncelenen Hafif Çelik Elemanlar (Investigated CFS Members)

Yürütülen çalışmada, farklı boyutlarda ve oluklu/oluksuz toplam 16 C-kesitli hafif çelik elemanı incelenmiştir. Bu 16 hafif çelik elemanın doku kaplamalı nokta bulutlarını elde etmek için bir 3B veri toplama sistemi kullanılmıştır. İncelenen tüm hafif çelik elemanların flanş genişliği 45 mm, gövde uzunluğu 90 mm, dudak genişliği 10 mm ve et kalınlığı 1,2 mm'dir. Her bir elemanın uzunluğu, elde edilen her bir nokta bulutundaki nokta sayısı ve nokta bulutu çözünürlükleri (mm başına düşen nokta sayısı cinsinden) Tablo 1'de verilmiştir.

2.2. Nokta Bulutu Toplamak için Kullanılan Tarayıcı (Scanner used for Point Cloud Collection)

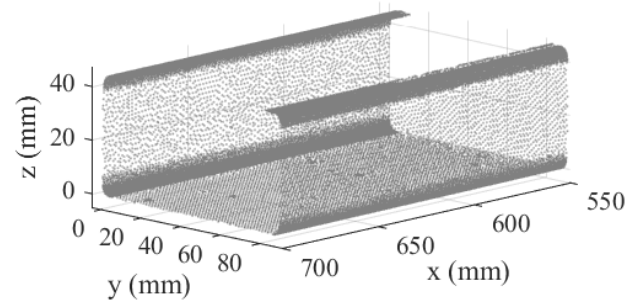
Nokta bulutlarını elde etmek için 3B bir optik tarama sistemi kullanılmıştır. Optik tarama sistemleri genellikle yüksek çözünürlüklü nokta bulutu toplama özelliğine sahiptir. Elde edilen nokta bulutunun

çözünürlüğü taranan hedeften alınan görüntü sayısına bağlı olarak farklılık gösterir. 3B optik tarama sistemlerinin ana uygulama alanı kalite kontrol ve tersine mühendislik uygulamalarının yapıldığı fabrikalardır.

Tablo 1. İncelenen hafif çelik elemanlara ait bilgiler (Information on the examined cold-formed steel members)

Eleman	Eleman Uzunluğu (mm)	Nokta Bulutundaki Nokta Sayıları	Çözünürlük (nokta sayısı/mm)
Pmid1	900	2992989	48
Pmid2		3221521	51
Pmid3		2402741	38
Pmid4		2338500	37
Pmid5	1000	2289340	33
Pmid6		3425889	49
Pmid7		3214102	46
Pmid8		2759337	39
Pmid9	1100	2699770	35
Pmid10		3122099	41
Pmid11		2388330	31
Pmid12		2446148	32
Pmid13	1200	3323790	40
Pmid14		4327279	52
Pmid15		4669468	56
Pmid16		2573508	31

Bu çalışmada kullanılan 3B optik tarama sistemi, maksimum 3 mikronluk çözünürlüğe sahip bir Breuckmann 3B tarayıcıdır [21]. Bu tarayıcı, orta, yüksek ve süper yüksek olarak sıralanan üç kamera seçeneğiyle mono ve renkli tarama yapma imkanına sahiptir. Görüş alanı 30 mm ile 1,5 m arasında değişmektedir. Bu tarayıcı, ince ayrıntıları yakalayabilir ve karmaşık geometriye sahip öğeleri tarayabilir. Böylece 1,2 mm çelik şeritlerden oluşturulan hafif çelik elemanlarının taraması için gereken hassasiyeti sağlar. Her bir hafif çelik eleman tarama sırasında kameradan 1 m uzağa konumlandırılmış ve yüksek çözünürlük seçeneği kullanılmıştır. C-kesitli bir hafif çelik eleman için örnek nokta bulutu parçası Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. C-kesitli bir hafif çelik eleman için örnek nokta bulutu (Sample point cloud for a C-sectioned cold-formed steel member)

3. Hafif Çelik Elemanlarda Otomatik Şekilsel Kusur Tespit Yöntemi (Automatic Geometric Imperfection Detection Method for CFS Members)

Literatürdeki çalışmalarda nokta bulutlarından şekilsel kusur tespit ve boyutlandırması nokta bulutu yoğunluğunun fazla olmasından ve ticari yazılım yardımıyla elle nokta bulutu üzerinden referans ölçüm noktası seçimi yapılabildiğinden, genelde manuel olarak seçilen ölçüm noktalarının referans bir eleman modelinden sapmaları hesaplanarak gerçekleştirilmektedir. Fakat, bu yöntem hem uzun zaman almakta hem de belirli bir uzmanlık seviyesi gerektirmektedir. Bu nedenle hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusurların otomatik

olarak tespit edilmesi için hızlı ve hassas yöntemler geliştirilmesi önemlidir.

Bu bölümde, ilk önce, literatürdeki diğer yaklaşımlar referans alınarak Cagrici [20] tarafından geliştirilen otomatik şekilsel kusur tespit yöntemi eski yöntem olarak anlatılmıştır. Bunu takiben eski yöntemdeki, özellikle lokal, şekilsel kusurların tespiti ve boyutlandırılmasındaki sıkıntılar göz önünde bulundurularak geliştirilen iyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespit yöntemi yeni yöntem olarak verilmiştir.

3.1. Eski Yöntem (Old Method)

Cagrici [20] tarafından geliştirilen otomatik şekilsel kusur tespit yöntemi tespit tabanlı şekilsel kusur tespiti ve boyutlandırması gerçekleştirmektedir. İncelenen hafif çelik elemanların nokta bulutları toplandıktan sonra, sıralanan otomatik şekilsel kusur tespit ve boyutlandırma adımları gerçekleştirilir: nokta bulutu döndürme ve kaydırma, kesit indirgeme, segmentasyon ve kümeleme, referans ölçüm noktası çıkarma, sapma hesaplama ve son olarak, şekilsel kusur hesaplama. Sonuç olarak, hafif çelik elemanlarının uzunlamasına eksenine boyunca birbirini izleyen enine kesitlerdeki referans ölçüm noktaları otomatik olarak çıkarılır ve daha sonra şekilsel kusur ölçümü için kullanılır. Şekil 2a örnek bir nokta bulutu kesiti ve otomatik olarak tespit edilmiş 12 referans ölçüm noktasını göstermektedir. 1-2-3 ve 10-11-12 noktalarının sapmaları y eksenindeki değişimler olarak hesaplanırken 5-6-7-8 noktalarının sapmaları z ekseninde meydana gelen sapmalar olarak hesaplanmıştır. İdeal eleman modeli referans alınarak elemana meydana gelen açılmalar pozitif olarak sınıflandırılmıştır. Bu durumda, 1-2-3 noktaları için pozitif sapma değerleri $-y$ yönünde bir sapma kaydedildiği durumda gerçekleşirken 10-11-12 noktaları için pozitif yön $+y$ yönünde kaydedilmektedir. 5-6-7-8 noktaları için pozitif yön ise $-z$ olarak tanımlanmıştır. Referans ölçüm noktalarının ideal geometriye sahip hafif çelik referans modelinden sapmaları hesaplanırken kullanılan pozitif yönler Şekil 2b'de gösterilmektedir.

Hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusurlar kaydedilen ölçüm noktası sapmaları kullanılarak Şekil 3 ve Şekil 4'te verilen ortak formülasyonlara dayalı olarak hesaplanır. Şekil 3F'deki formülasyonda bulunan D değişkeni gövde uzunluğunu temsil etmektedir. Şekil 3'te verilen her lokal kusur için hesaplanan maksimum ve ortalama değerler Bölüm 4.3'te Tablo 3 ve Tablo 5'de listelenmektedir. Global kusurlar, belirli lokal şekilsel kusurlar için özel durumlar olarak ele alınır. Dışbükey, flanşlara ortogonal enine kesit kaymasının özel bir durumu iken, kavis, gövdeye ortogonal enine kesit kaymasının özel bir durumudur. Bu tanımlara karşılık gelen lokal şekilsel kusurlar hem dışbükey hem de kavis tipi global

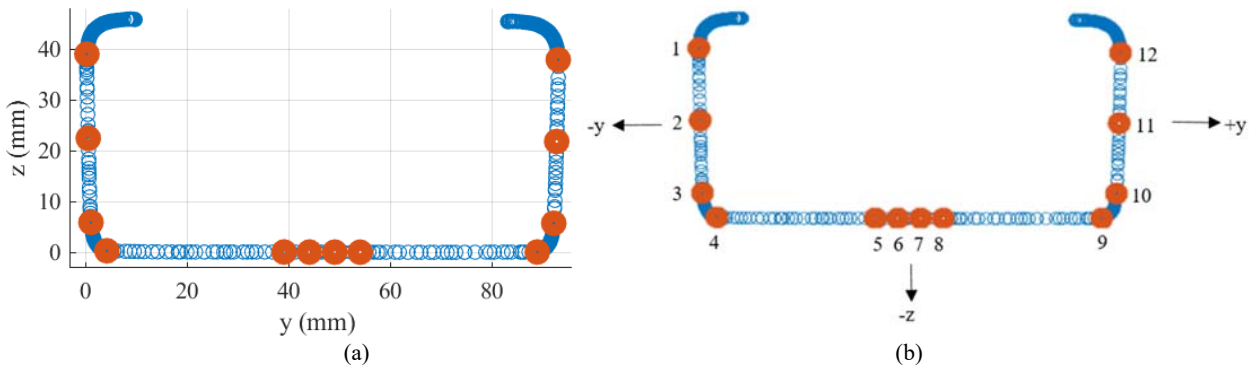
şekilsel kusurların boyutlandırılması için kullanılmıştır. Global burulma da lokal burulma ile aynı tanıma sahiptir.

3.2. Yeni Yöntem - İyileştirilmiş Otomatik Şekilsel Kusur Tespit Yöntemi

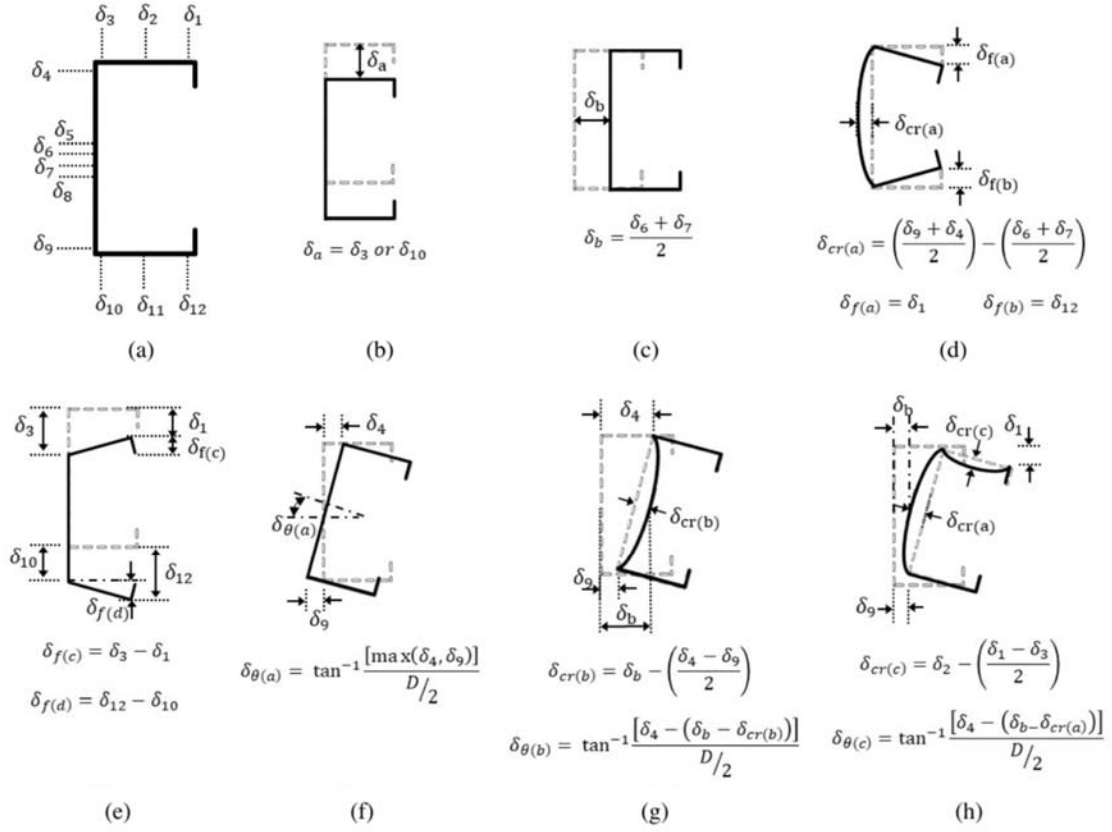
(New Method – Improved Automatic Geometric Imperfection Detection Method)

Literatürdeki önceki çalışmalarda ve Cagrici [20]'da geliştirilen şekilsel kusur tespiti yönteminde (eski yöntem), kavis, dışbükey ve global burkulma hesaba katılmadan sabit konumlu bir ideal geometri modeli ile karşılaştırma yapılarak sapmalar, dolayısıyla da şekilsel kusurlar, tespit edilmektedir. Fakat, global şekilsel kusurlar hesaba katılmadan referans ölçüm noktalarından yapılan bu sapma hesaplamaları yanlış olmaktadır. Bu durumu düzeltmek için iyileştirilmiş otomatik şekilsel tespit yöntemi geliştirilmiştir. Cagrici [20]'da toplanan her bir nokta bulutunun başlangıç kısmının 10 mm içerisinde gövdeden alınan 5 mm'lik nokta bulutu kesitinin düzleme indirgenmiş halinin y eksenine ile örtüştürülerek nokta bulutları hem taşınmış hem de döndürülmüştür. Bundan sonra ise ideal geometri modeli aynı başlangıç durumu referans alınarak nokta bulutu üzerine yerleştirilmiştir. İdeal geometri ve nokta bulutu kesitleri arasındaki kıyaslama bu yerleştirme sonrasında gerçekleştirilmiştir. Fakat, hesaplanan global şekilsel kusur değerleri incelendiğinde elemanın başlangıcı ve sonunda sıfır noktasına yaklaşması beklenen kavis ve dışbükey olarak tanımlanan şekilsel kusurların bu davranışa uygun bir şekilde hesaplanmadığı ve genelde olduğundan daha yüksek değerler olarak raporlandığı tespit edilmiştir (Şekil 8a - Şekil 8c). Bunun üzerine elemanın başlangıç tarafına ek olarak bitiş kısmından da gene 10 mm içeriden gövde kısmından 5 mm'lik bir kesit alınmıştır. Bu iki kesitin de orta noktaları hesaplanmış, 3B temel bileşen analizi gerçekleştirilmiştir [22]. Böylece başlangıç ve bitiş kısımlarından geçen bir doğru oluşturulmuş ve kıyaslama için kullanılacak ideal geometri modeli bu doğru üzerine oturtulmuştur. İdeal geometri ve nokta bulutu kesitleri arasındaki kıyaslama bu yeni yerleştirme sonrasında yinelenmiştir.

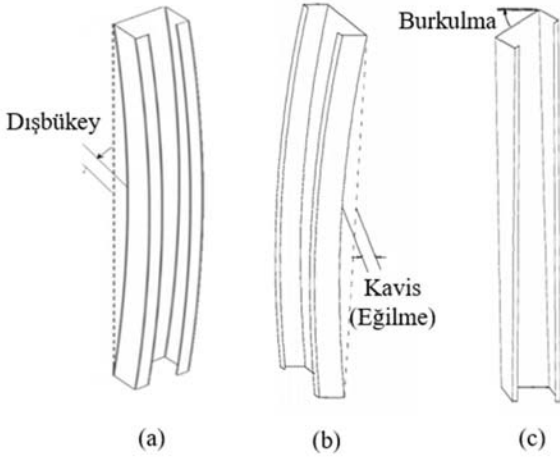
İdeal geometri modeli yerleştirilmesi ile ilişkili sıkıntılar giderildikten sonra lokal şekilsel kusurlardaki hesaplama sıkıntılarını düzeltmeye yönelik adımlar atılmıştır. Cagrici [20]'da geliştirilen yöntemde nokta bulutu üzerinde tespit edilen referans ölçüm noktalarının sapmaları kesite denk gelen ideal geometri modeli kesiti kullanılarak hesaplanmıştır. Hem önceki hem de şimdiki çalışma için, 1-3 ve 10-12 arası noktalar için sapma değeri olarak yatay kaymalar hesaplanırken 4-9 arası noktalar için dikey yer değiştirmeler kaydediliyordu. Fakat, detaylı incelemeler global şekilsel kusurların etkisi çıkarılmadan yapılan lokal ölçümlerin hatalı olduğunu göstermiştir.



Şekil 2. (a) Örnek nokta bulutu kesitinde otomatik olarak tespit edilmiş referans ölçüm noktaları ve (b) bu noktalar kullanılarak gerçekleştirilen sapma hesaplamaları için kullanılan pozitif yönler ((a) Automatically determined reference measurement points in the sample point cloud cross-section; and (b) positive directions used for deviation calculations using these points)



Şekil 3. Şekilsel kusur formülasyonları: (a) Referans ölçüm noktası sapmaları, (b) flanşlara ortogonal kesit kayması, (c) gövdeye ortogonal kesit kayması, (d) dışbükey taç, (e) açılma, (f) sadece burulma, (g) içbükey gövdeli burulma ve (h) dışbükey gövdeli ve içbükey flanşlı burulma (Selvaraj ve Madhavan [16] referans alınarak hazırlanmıştır)
(Formulations of geometric imperfections: (a) Reference point deviations, (b) sectional shift orthogonal to flanges, (c) sectional shift orthogonal to the web, (d) convex crown, (e) flare, (f) torsion only, (g) concave body torsion, and (h) torsion with convex body, and concave flange (revisited from Selvaraj ve Madhavan [16]))



Şekil 4. Global şekilsel kusur gösterimleri: (a) Kavis, (b) dışbükey ve (c) burulma
(Global geometric imperfection representations: Bow, camber, and twist)

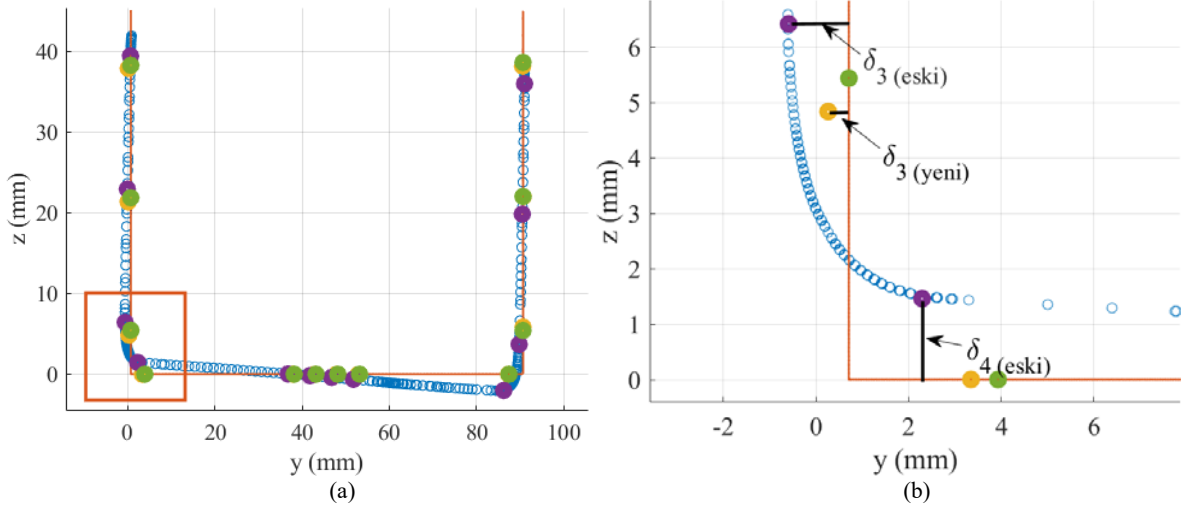
İyileştirilmiş otomatik şekilsel tespit yöntemi referans ölçme noktaları için öncü bir sapma hesaplaması gerçekleştirmekte ve bu 12 sapma değerini global şekilsel kusurların hesaplanmasında kullanmaktadır. Kavis, dışbükey ve burulma olarak sıralanan bu şekilsel kusurlar hesaplandıktan sonra incelenen nokta bulutu kesitinde bulunan 12

referans ölçüm noktası kavis ve dışbükey değerleri kullanılarak y ve z eksenlerinde kaydırılmaktadır. Sonrasında kaydırılan 12 referans ölçüm noktası hesaplanan burulma açısı θ 'nın Eş. 1'e yerleştirilmesi ile elde edilen rotasyon matrisi kullanılarak döndürülmektedir.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Şekil 5, otomatik şekilsel kusur hesaplama yönteminde gerçekleştirilen iyileştirmeleri göstermektedir. Şekil 5a'da ideal geometri modelinden alınan kesit kırmızı, incelenen nokta bulutu ise mavi noktalarla temsil edilmektedir. Mor noktalar nokta bulutu kesitinde tespit edilen referans ölçüm noktalarını, yeşil noktalar ise ideal geometri modelindeki ölçüm noktalarını göstermektedir. Sarı noktalar ise iyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur yöntemi kullanılarak taşınan ve döndürülen ölçüm noktalarını göstermektedir. Sarı noktaları elde etmek için mor noktalar üzerinde taşıma ve döndürme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5a'daki kırmızı dikdörtgenle gösterilen kısmın yakınlştırılması ile elde edilen Şekil 5b, iki yöntem arasındaki farklılıkları açıklamak için kullanılacaktır.

Şekil 5b iki sapma değerindeki değişimleri göstermektedir, δ_3 ve δ_4 . Şekil 5b'den rahatça görülebileceği üzere eski yöntem hem δ_3 hem de δ_4 değerlerini olduğundan fazla hesaplamaktadır. Bu da hesaplanan lokal şekilsel kusurların olduğundan daha büyük değerlerde hesaplanmasına sebep olmaktadır. Mesela δ_4 'ün gerçek değerinin sıfıra yakın bir değer olması gerekirken global şekilsel kusurlar



Şekil 5. İyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespit yöntemi ve eski yöntem karşılaştırması
(Improved automated geometric imperfection detection method and old method comparison)

hesaba katılmadan bir çıkarım yapıldığı için δ_4 değeri bu kesit için olduğundan çok büyük bir değer olarak kaydedilmiştir. Geliştirilen iyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespit yöntemi sayesinde hesaplamalarda yapılan bu hataları düzeltmek mümkün olmaktadır. Son olarak iyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur yönteminin bir uzantısı olarak Şekil 3'te verilen şekilsel kusur formülasyonları güncellenmiştir. Lokal ve global şekilsel kusurları doğru temsil ettiği düşünülen formülasyonlar değiştirilmemiş, diğerlerinde ise yeni düzenlemeler yapılmış gereksiz olduğu düşünülenler ise tamamen hesaplamadan çıkarılmıştır. İyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur yöntemi çerçevesinde kullanılan güncellenmiş şekilsel kusur formülasyonlar Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da verilen her lokal kusur için hesaplanan maksimum ve ortalama değerler Bölüm 4.3'te Tablo 4 ve Tablo 6'da listelenmektedir. Bölüm 4'te iyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespit yöntemi ve eski yöntem kullanılarak gerçekleştirilen hesaplama sonuçları verilmiş ve aralarındaki farklar tartışılmıştır.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Önceki bölümde, Bölüm 3'te, hafif çelik elemanlarda kullanılan güncel otomatik şekilsel kusur tespit yöntemleri üzerinde durulmuştur. Cagirci [20]'de sunulan eski yöntem ve iyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespit yöntemi arasındaki benzerlikler ve farklar detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu bölümde ise iki yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmuş ve aralarındaki farklar tartışılmıştır. Bu bölümde, sonuçlara geçmeden önce, kullanılan nokta bulutlarının şekilsel kusur tespitinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Önce elde edilen nokta bulutlarının bireysel çözünürlükleri ile ilgili bir araştırma yapılmıştır. Bunu takiben toplanan nokta bulutları için bir doğrulama çalışması yürütülmüştür. Böylece ölçülen eleman boyutlarının nokta bulutundan elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Toplanan nokta bulutlarının şekilsel kusur tespiti için kullanılabilir olduğu doğrulanınca ise eski ve yeni şekilsel kusur tespit yöntemleri uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

4.1. Nokta Bulutu Çözünürlüğü (Point Cloud Resolution)

Toplanan doku haritalı nokta bulutlarının taranan nesnelerin gerçek geometrisini temsil ettiği varsayılmaktadır. Bununla birlikte, önceki çalışmalar, nokta bulutu hassasiyetinin nokta bulutu yoğunluğu, nokta bulutu birleştirme kesinliği ve lazer ışını geliş açısı gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğunu ortaya koymuştur [23-27]. Bu araştırma,

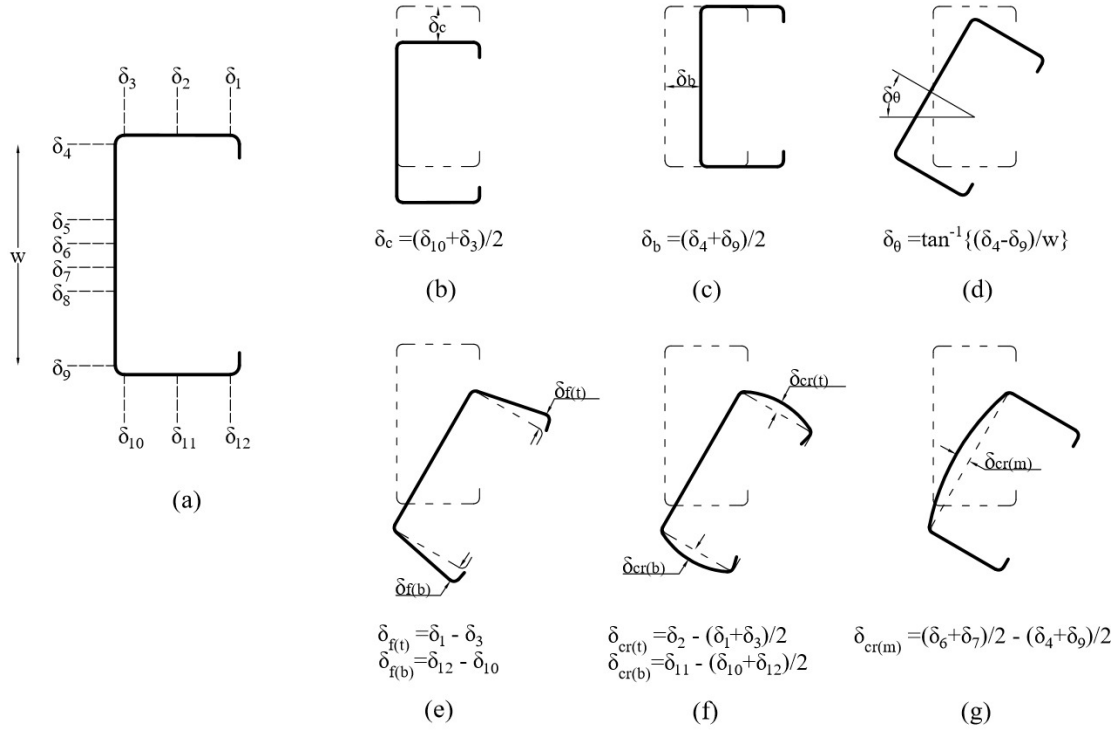
nokta bulutu elde etmek için yakın mesafeli bir optik tarayıcı kullanılmıştır. Optik tarayıcılar, üretim hatlarında da kullanıldıkları için nispeten daha yüksek hassasiyete sahiptir. Bununla birlikte, bu çalışmanın birincil odak noktasının şekilsel kusurları belirlemek olduğu düşünüldüğünde, nokta bulutlarının çözünürlük seviyesinin detaylı bir şekilde kontrol edilmesi halen gereklidir. Toplanan nokta bulutları hatalıysa, elde edilen şekilsel kusur sonuçları incelenen hafif çelik elemanların gerçek geometrilerini temsil etmeyecektir.

Her bir nokta bulutunun yoğunluğu incelenerek, araştırılan tüm hafif çelik elemanların nokta bulutları üzerinde ayrıntılı bir çözünürlük çalışması yapılır. Çözünürlük her bir elemanın nokta bulutunun uzunluğu boyunca başlangıç (10 cm içeride), orta ve bitiş (10 cm içerisinde) bölümlerinin gövde kısmından alınan 5cm x 5cm'lik bir kesit için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Her bir kesit için 1cm²'lik alana düşen ortalama nokta sayısının homojen bir şekilde 1cm² alana dağıtıldığında herhangi bir yönde iki nokta arasında hesaplanan maksimum uzunluk çözünürlük olarak kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar toplanan nokta bulutlarının çözünürlüklerinin 0,018 ile 0,033 mm arasında değiştiğini göstermektedir (Şekil 7). Tüm elemanlar için ortalama nokta bulutu çözünürlüğü 0,025 mm'dir. Toplanan nokta bulutlarının ortalama çözünürlük değerinden daha büyük şekilsel kusurları sorunsuzca algılaması beklenmektedir.

Elde edilen çözünürlük değeri daha sonra literatürdeki lokal, distorsiyonel ve global kusurlar için hesaplanan ortalama değerlerin minimumu ile karşılaştırılmıştır [2, 5, 9, 14-16, 19, 28-32]. Literatürdeki çalışmalar referans alınarak 900-1200 mm eleman uzunluğu için hesaplanan ortalama şekilsel kusur değerlerinin minimumu Young [15] kullanılarak dışbükey için 0,09 mm olarak hesaplanmıştır. Bu karşılaştırma, nokta bulutu çözünürlüğünün şekilsel kusur tespiti ve ölçümü için yeterli olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada tespit edilen çözünürlük değerleri, literatürdeki minimum kusur değerlerinden çok daha küçüktür. Böylece, toplanan nokta bulutları şekilsel kusur ölçümü için kullanılabilir olduğu değerlendirilmiştir.

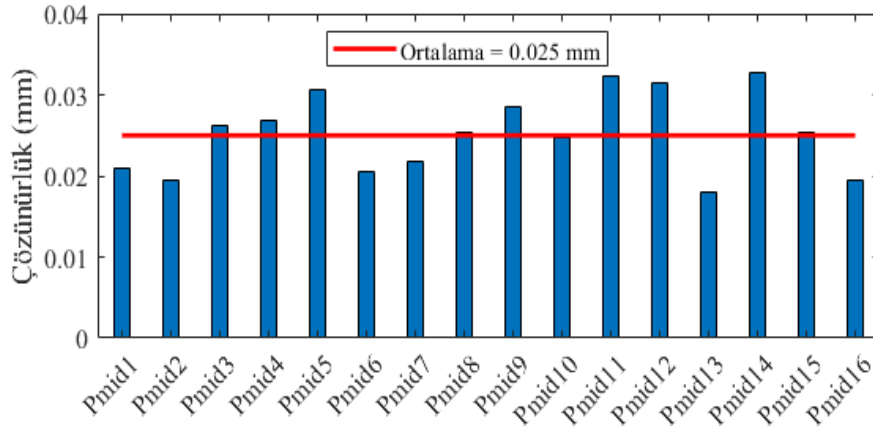
4.2. Toplanan Nokta Bulutları için Doğrulama (Validation for the Collected Point Clouds)

Toplanan nokta bulutlarının gerçekten hafif çelik eleman geometrisini temsil ettiğini gösterebilmek için elemanların mikrometreyle ölçülen boyutları ve nokta bulutlarından tespit edilen boyutlarla



Şekil 6. İyileştirilmiş şekilsel kusur formülasyonları: (a) Referans ölçüm noktası sapmaları, (b) flanşlara ortogonal kesit kayması, (c) gövdeye ortogonal kesit kayması, (d) sadece burulma, (e) burulma ve açılma, (f) dışbükey flanşlı burulma, (g) dışbükey gövdeli burulma

(Improved formulations of geometric imperfections: (a) Reference point deviations, (b) sectional shift orthogonal to the flanges, (c) sectional shift orthogonal to the web, (d) torsion only, (e) torsion and flare, (f) convex flange torsion, (g) convex hull torsion)



Şekil 7. İncelenen 16 hafif çelik elemanın nokta bulutları için hesaplanan çözünürlük değerleri
(Calculated resolution values for point clouds of 16 examined cold-formed steel members)

karşılaştırılarak bir doğrulama yapılmıştır. Tablo 2’de, hafif çelik elemanların hem mikrometreyle ölçülen hem de otomatik olarak nokta bulutlarından algılanan boyutlarını listelenmektedir. Hata değerlerini hesaplamak için ölçülen boyutlar tespit edilen boyutlarla karşılaştırılmış ve elde edilen hata değerleri de Tablo 2’de verilmiştir. 16 hafif çelik elemanın tümünün hem gövde hem de flanşları için hesaplanan hata değerleri %2’nin altındadır. Gövde ve flanşlar için standart sapmalar %0,49 ve %0,38’dir. Yürütülen doğrulama çalışması, toplanan nokta bulutlarının incelenen hafif çelik elemanların geometrisini doğru bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

4.3. Yeni Yöntem - İyileştirilmiş Otomatik Şekilsel Kusur Tespit Yöntemi Sonuçları

(Results for the New Method – Improved Automatic Geometric Imperfection Detection Method)

Toplanan nokta bulutlarının şekilsel kusur tespiti için kullanılabilir olduğu tespit edilince hem yeni hem eski şekilsel kusur yöntemleri kullanılarak Tablo 1’de detayları verilen 16 C-kesitli hafif çelik eleman için otomatik şekilsel kusur tespiti gerçekleştirilmiştir. Eski ve iyileştirilmiş (yeni) yöntem arasındaki farkları göstermek için her iki yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar tek bir hafif çelik eleman için incelenmiştir. Şekil 8, Pmid6 için eski ve yeni yöntemlerle δ_c , δ_b , δ_θ ,

Tablo 2. Nokta bulutu doğrulama sonuçları (Point cloud verification results)

Eleman	Ölçülen Boyutlar (mm)		Tespit Edilen Boyutlar (mm)		Hata (%)	
	Gövde	Flanş	Gövde	Flanş	Gövde	Flanş
Pmid1	89,81	44,91	89,96	44,06	-0,17	1,89
Pmid2	89,89	44,05	88,23	43,36	1,85	1,57
Pmid3	89,42	43,34	88,32	42,83	1,23	1,18
Pmid4	89,35	44,35	88,42	43,63	1,04	1,62
Pmid5	89,28	44,40	88,12	43,58	1,30	1,85
Pmid6	89,94	43,06	88,25	42,91	1,88	0,35
Pmid7	88,85	44,02	87,82	43,27	1,16	1,70
Pmid8	88,67	44,36	87,79	43,53	0,99	1,87
Pmid9	89,81	43,78	88,32	43,02	1,66	1,74
Pmid10	89,32	44,28	88,45	43,48	0,97	1,81
Pmid11	89,73	44,05	88,83	43,21	1,00	1,91
Pmid12	89,56	43,84	88,16	43,02	1,56	1,87
Pmid13	88,11	44,20	87,62	43,49	0,56	1,61
Pmid14	89,28	44,46	88,42	43,81	0,96	1,46
Pmid15	89,52	44,08	88,66	43,22	0,96	1,95
Pmid16	89,37	44,38	88,09	43,62	1,43	1,71
				<i>Ortalama</i>	<i>1,15</i>	<i>1,63</i>
				<i>St. Sapma</i>	<i>0,49</i>	<i>0,38</i>

$\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$ ve $\delta_{cr(m)}$ şekilsel kusurları için elde edilen sonuçları göstermektedir. İlk üç şekilsel kusur (δ_c , δ_b ve δ_θ), sırasıyla dışbükey, kavis ve burulmaya karşılık gelmektedir. Bölüm 3.2’de de belirtildiği üzere ideal geometri modelinin yerleştirilme pozisyonu sapma ölçümlerini etkilemekte ve bu da hesaplanan şekilsel kusurları değiştirmektedir. Eski yöntemle elde edilen dışbükey ölçümleri, δ_c elemanın başlangıç noktasında az olmakla beraber, yaklaşık 0,5 mm, sonlara doğru 1,5 mm’ye kadar yükselmiştir (Şekil 8a). Oysa ki bu Şekil 4b’de gösterilen dışbükey tanımına uygun değildir. İyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespiti sonuçlarına bakıldığında ise hem başlangıç hem de bitiş için hesaplanan δ_c değerlerinin yaklaşık olarak 0,3 mm olduğu görülmektedir. δ_c değerleri elemanın orta noktasına doğru azalmakla beraber sona gelirken baştaki değere yaklaşmıştır. Hem Şekil 4 hem de Şekil 6’de δ_b için verilen formülasyon aynı olduğundan kavis için hesaplanan şekilsel kusur değerleri hem yeni hem de eski yöntem için benzerdir. Hesaplanan maksimum kavis değeri 3 mm’nin biraz altındadır. Şekil 4b’de elemanın başlangıcında görülen farklılaşma ise iki yöntemde ideal geometri modeli otururken oluşan farklılıklardan dolayı gözlenmektedir. Burulma, hesaplaması en hatalı yapılan şekilsel kusurlardan biridir. Bunun sebebi Şekil 4’te verilen burulma formülasyonunun burulmanın açılma değerini hep olduğundan fazla tespit etmesidir. Göreceli sapma değerleri kullanmak yerine iki sapma değerinden (δ_4 ve δ_9) değerinden büyüğü alınarak yapılan hesaplama doğru sonuçlar vermemektedir. Bu problem yeni yöntemde burulma için yapılan formülasyon güncellemesi ile düzeltilmiştir (Şekil 6d). Şekil 8c)’de eski yöntemle hesaplanan δ_θ değerleri 4°’nin üzerine çıkarken yeni yöntemle hesaplanan δ_θ değerleri maksimum 1°’yi görmektedir.

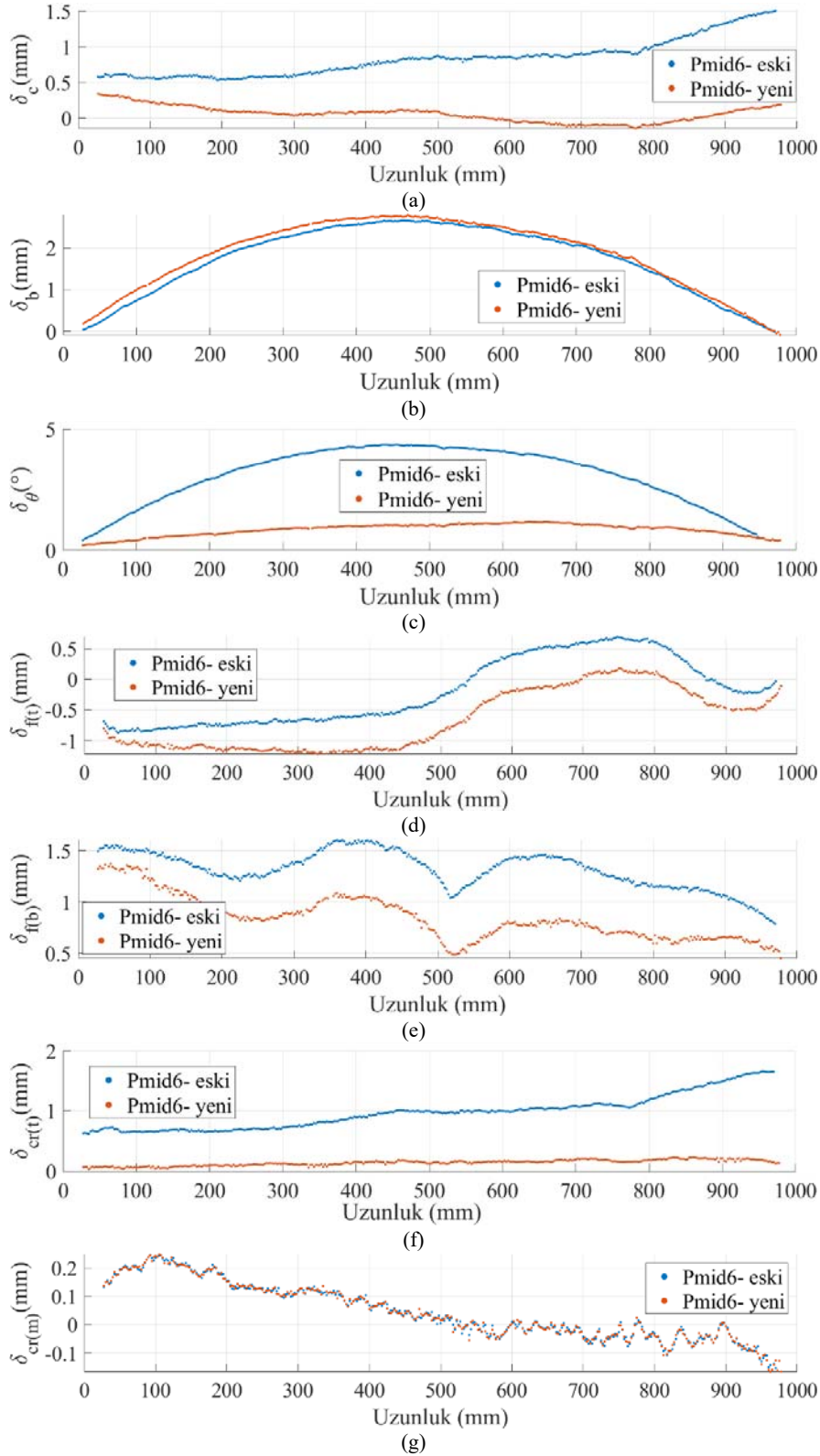
İyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespit yöntemi özellikle lokal kusurların hesaplanması konusunda fark yaratmaktadır. Bölüm 3.2’de belirtildiği gibi yeni yöntem global kusurları da hesaba katarak daha doğru bir lokal kusur çıkarımına olanak vermektedir. Bu durumda Şekil 4e ve Şekil 6e’de flanş açılmalarını temsil eden $\delta_{f(t)}$ ve $\delta_{f(b)}$ için verilen formülasyonlar hem yeni hem de eski yöntem için aynı olsalar

da, referans noktalarında yapılan sapma ölçümleri farklılaştığından elde edilen sonuçlar da değişkenlik göstermektedir. Hem Şekil 8d hem de Şekil 8e’den de görülebileceği eski ve yeni yöntemle hesaplanan $\delta_{f(t)}$ ve $\delta_{f(b)}$ değerleri şekilsel olarak benzer dağılımlara sahip olsalar da eski yöntem kullanılarak hesaplanan $\delta_{f(t)}$ ve $\delta_{f(b)}$ değerlerinin daha yüksek seyrettiği görülmektedir.

Özellikle dışbükey flanş temsil eden $\delta_{cr(t)}$ hesaplamalarında iyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespit yönteminin kullanılması büyük fark yaratmaktadır. Global şekilsel kusurlar hesaba katılmadan referans ölçüm noktalarında hesaplanan sapmalar elemanda aslında mevcut olmayan dışbükey flanş durumu ile sonuçlanmaktadır. Referans ölçüm noktaları düzeltilip de yeni yöntem kullanıldığında ise $\delta_{cr(t)}$ ile temsil edilen lokal şekilsel kusurun doğru bir şekilde hesaplandığı gözlemlenmiştir (Şekil 8f). Bütün hafif çelik elemanlar için ortalama $\delta_{cr(t)}$ değeri 0,20 mm olarak hesaplanmıştır.

Dışbükey gövdeli burulma, $\delta_{cr(m)}$, için hem eski hem de yeni yöntem ile hesaplanan lokal şekilsel kusur değerleri birbirine çok yakın olarak gözlenmiştir (Şekil 8g). Her iki yöntemde de verilen $\delta_{cr(m)}$ formülasyonları global şekilsel kusur etkilerini çıkararak ve lokalde hesaplanan sapmaları kullanarak bir kusur hesaplaması yapıldığından her iki yöntemle de elde edilen dışbükey gövdeli burulma değerleri birbirine çok yakın çıkmaktadır.

Eski ve yeni yöntemlerle elde edilen şekilsel kusur değerlerini daha detaylı karşılaştırabilmek için her eleman için iki yöntem kullanılarak maksimum ve ortalama değerler hesaplanmıştır. Maksimum değerler mutlak şekilsel kusur değerleri göz önünde bulundurulularak hesaplanmış, yönü gösteren – ve + işaretleri değiştirilmeden kaydedilmiştir. İncelenen bütün hafif çelik elemanlar (Pmid1-Pmid16) için eski yöntem kullanılarak hesaplanan şekilsel kusur değerlerinin maksimumları Tablo 3’te verilmiştir. Benzer şekilde, yeni yöntem kullanılarak her bir hafif çelik eleman için hesaplanan şekilsel kusur değerlerinin maksimumları Tablo 4’te verilmiştir.



Şekil 8. Pmid6 elemanı için eski ve yeni yöntemlerle hesaplanan (a) δ_c , (b) δ_b , (c) δ_θ , (d) $\delta_{ff(t)}$, (e) $\delta_{ff(b)}$, (f) $\delta_{cr(t)}$ ve (g) $\delta_{cr(m)}$ şekilsel kusurlarının eleman uzunluğu boyunca değişimi (The change of the geometric imperfections (a) δ_c , (b) δ_b , (c) δ_θ , (d) $\delta_{ff(t)}$, (e) $\delta_{ff(b)}$, (f) $\delta_{cr(t)}$ and (g) $\delta_{cr(m)}$ along the length of member Pmid6 computed by both old and new method)

Tablo 3. Eski yöntemle hesaplanan δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$ ve $\delta_{cr(m)}$ şekilsel kusurlarının maksimum (+ veya -) değerleri (Maximum values (+ or -) of the geometric imperfections δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$, and $\delta_{cr(m)}$ computed using the old method)

Eleman	δ_c (mm)	δ_b (mm)	δ_θ (°)	$\delta_{f(t)}$ (mm)	$\delta_{f(b)}$ (mm)	$\delta_{cr(t)}$ (mm)	$\delta_{cr(m)}$ (mm)
Pmid1	0,82	1,33	1,77	-1,03	1,98	0,93	0,24
Pmid2	1,41	1,27	2,97	0,82	1,55	1,47	0,21
Pmid3	1,26	1,95	3,04	-1,22	1,59	1,46	-0,29
Pmid4	1,07	1,33	1,77	-1,06	2,15	1,27	0,19
Pmid5	0,43	2,10	2,88	-1,32	1,44	0,52	0,30
Pmid6	1,41	2,65	4,37	-0,87	1,61	1,66	0,25
Pmid7	1,06	2,04	4,02	1,12	1,63	1,22	-0,21
Pmid8	1,55	2,42	4,23	-1,11	1,77	1,67	0,24
Pmid9	1,18	0,69	2,42	1,80	1,93	1,27	-0,20
Pmid10	1,61	0,64	2,61	2,03	2,04	1,67	0,20
Pmid11	0,82	0,77	2,68	1,44	2,31	0,95	-0,30
Pmid12	0,55	0,87	2,63	1,24	1,43	0,74	-0,31
Pmid13	1,36	0,69	1,36	1,20	1,11	1,47	-0,12
Pmid14	1,44	0,82	1,82	1,68	1,37	1,58	-0,14
Pmid15	1,57	0,56	3,21	2,47	2,45	1,64	-0,15
Pmid16	1,72	0,84	3,18	2,43	2,35	1,82	-0,14
<i>Ortalama</i>	<i>1,20</i>	<i>1,31</i>	<i>2,81</i>	<i>0,60</i>	<i>1,79</i>	<i>1,33</i>	<i>-0,01</i>
<i>St. Sapma</i>	<i>0,37</i>	<i>0,66</i>	<i>0,83</i>	<i>1,35</i>	<i>0,37</i>	<i>0,35</i>	<i>0,22</i>

Tablo 4. Yeni yöntemle hesaplanan δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$ ve $\delta_{cr(m)}$ şekilsel kusurlarının maksimum (+ veya -) değerleri (Maximum values (+ or -) of the geometric imperfections δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$, and $\delta_{cr(m)}$ computed using the new method)

Eleman	δ_c (mm)	δ_b (mm)	δ_θ (°)	$\delta_{f(t)}$ (mm)	$\delta_{f(b)}$ (mm)	$\delta_{cr(t)}$ (mm)	$\delta_{cr(m)}$ (mm)
Pmid1	-0,89	1,61	-0,59	-1,29	1,76	0,21	0,25
Pmid2	-0,60	1,40	0,77	1,10	0,92	0,21	0,14
Pmid3	0,62	1,58	1,28	-1,49	1,08	0,23	0,22
Pmid4	-0,68	1,43	1,41	1,47	1,22	0,25	0,27
Pmid5	0,46	2,04	0,67	-1,70	1,30	0,19	0,30
Pmid6	0,33	2,79	1,16	-2,41	1,43	0,24	0,25
Pmid7	0,53	1,97	1,95	-0,69	0,9	0,22	-0,21
Pmid8	0,36	2,41	1,86	-1,52	1,50	0,19	0,25
Pmid9	1,16	0,78	2,62	0,49	0,42	0,18	-0,19
Pmid10	0,89	0,67	2,90	0,51	0,38	0,17	-0,22
Pmid11	0,98	0,67	3,03	-0,44	-0,44	0,15	-0,28
Pmid12	0,77	0,44	2,43	-0,16	-0,47	0,15	-0,32
Pmid13	0,63	0,56	1,52	0,69	0,48	0,20	-0,11
Pmid14	1,87	0,62	1,55	0,81	0,49	0,22	-0,15
Pmid15	1,19	0,60	3,57	0,44	0,46	0,16	-0,15
Pmid16	1,28	0,65	3,29	0,57	0,42	0,18	-0,15
<i>Ortalama</i>	<i>0,56</i>	<i>1,26</i>	<i>1,84</i>	<i>-0,23</i>	<i>0,74</i>	<i>0,20</i>	<i>-0,01</i>
<i>St. Sapma</i>	<i>0,73</i>	<i>0,70</i>	<i>1,03</i>	<i>1,09</i>	<i>0,60</i>	<i>0,03</i>	<i>0,22</i>

Tasarım sırasında kritik olarak nitelendirilen maksimum lokal ve global şekilsel kusur değerlerinin değişimlerini görsel olarak da değerlendirebilmek için Şekil 9 oluşturulmuştur. Şekil 9, her bir eleman için hem yeni hem de eski yöntem kullanılarak δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$ ve $\delta_{cr(m)}$ şekilsel kusurları için hesaplanan maksimum değerleri ve bu değerlerin ortalama değerlerindeki değişimleri göstermektedir. Hem eski hem de yeni yöntemde aynı formülasyonlara sahip δ_b ve $\delta_{cr(m)}$ dışında kalan bütün ortalama maksimum şekilsel kusur değerleri eski yöntemle daha yüksek hesaplanmıştır. Yeni yöntemle hesaplanan diğer global ve lokal şekilsel kusur maksimum değerlerinin ortalamalarında, δ_c , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$ ve $\delta_{cr(t)}$, eski yöntemle hesaplanana kıyasla %50'den fazla azalma tespit edilmiştir. Yeni yöntem kullanılarak δ_θ için hesaplanan ortalama maksimum değerinde ise eskiye nazaran %35 azalma görülmüştür.

Yukarıda sıralanan çıkarımlar maksimum değerlerin ortalamaları üzerinden yapılmıştır. Fakat, hafif çelik elemanların bireysel şekilsel kusur değerleri incelendiğinde özellikle Pmid5, Pmid6, Pmid7 ve Pmid8 için yeni yöntem kullanılarak hesaplanan maksimum şekilsel kusur değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu davranış yeni

yöntemle hesaplanan ortalama değerlerde (Tablo 5 ve Tablo 6) gözlemlenmediğinden daha detaylı bir inceleme yürütülmüş ve maksimum şekilsel kusur değerlerinde oluşan bu beklenmedik yükselişin ölçümün yapıldığı kesitlerdeki nokta bulutu yoğunluğunun azalmasından kaynaklı bir problem olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan nokta bulutları optik tarayıcı tarafından farklı açılarda çekilen görüntülerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu durumda üst üste gelen görüntüler çoğaldıkça belirli bir alana düşen nokta sayısı da artmaktadır. Bunun tersi olarak ise yeterli görüntü toplanamaması durumunda bazı bölgelerde nokta yoğunlukları dolayısıyla da çözünürlükler ortalama değer altına inmektedir. Özellikle köşe ve birleşim noktalarında kayıplar yaşanması sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Genelde nokta bulutları modelleme amacıyla kullanıldıklarında bu problemi aşmak için nokta bulutu yoğunluğu homojenleştirilmektedir; fakat, bu çalışmanın amacı mevcut şekilsel kusurların tespiti olduğundan ve yapılan müdahaleler elde edilen şekilsel kusur sonuçlarının etkileyeceğinden herhangi bir müdahalede bulunulmamıştır. Böylece şekilsel kusurlar nokta bulutu yoğunluğunun yeterli olduğu noktalarda hassas bir şekilde tespit edilmiştir.



Şekil 9. Yeni ve eski yöntem kullanılarak δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$ ve $\delta_{cr(m)}$ şekilsel kusurları için hesaplanan maksimum değerler ve bu değerlerin ortalamalarındaki değişimler (Maximum values of the geometric imperfections δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$, and $\delta_{cr(m)}$ computed using both old and new method, and the variations in the mean of the maximum values)

Tablo 5. Eski yöntemle hesaplanan δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$ ve $\delta_{cr(m)}$ şekilsel kusurlarının ortalama değerleri
(Mean values of the geometric imperfections δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$, and $\delta_{cr(m)}$ computed using the old method)

Eleman	δ_c (mm)	δ_b (mm)	δ_θ (°)	$\delta_{f(t)}$ (mm)	$\delta_{f(b)}$ (mm)	$\delta_{cr(t)}$ (mm)	$\delta_{cr(m)}$ (mm)
Pmid1	0,70	0,78	1,27	-0,80	1,07	0,82	0,02
Pmid2	0,77	0,67	2,30	0,25	1,27	0,92	0,04
Pmid3	0,79	0,91	2,22	-0,38	1,41	0,96	0,00
Pmid4	0,86	0,73	1,27	-0,9	1,16	1,04	-0,01
Pmid5	0,34	1,39	2,02	-0,73	0,65	0,37	0,03
Pmid6	0,81	1,72	3,02	-0,20	1,32	0,98	0,05
Pmid7	0,60	1,27	2,91	0,48	1,29	0,75	0,02
Pmid8	0,85	1,43	2,84	-0,01	1,32	1,00	0,03
Pmid9	0,65	0,35	1,71	1,05	1,12	0,78	-0,08
Pmid10	0,90	0,29	2,04	1,25	1,32	1,02	-0,07
Pmid11	0,57	0,45	1,70	0,80	0,61	0,71	-0,13
Pmid12	0,38	0,52	1,47	0,69	0,36	0,44	-0,18
Pmid13	0,69	0,38	1,05	0,62	0,63	0,81	-0,03
Pmid14	0,69	0,48	1,38	0,85	0,77	0,74	-0,03
Pmid15	0,90	0,33	2,15	1,30	1,49	1,02	-0,04
Pmid16	0,93	0,57	2,37	1,23	1,40	1,08	-0,05
<i>Ortalama</i>	<i>0,72</i>	<i>0,77</i>	<i>1,98</i>	<i>0,34</i>	<i>1,07</i>	<i>0,84</i>	<i>-0,03</i>
<i>St. Sapma</i>	<i>0,17</i>	<i>0,44</i>	<i>0,60</i>	<i>0,74</i>	<i>0,34</i>	<i>0,20</i>	<i>0,06</i>

Tablo 6. Yeni yöntemle hesaplanan δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$ ve $\delta_{cr(m)}$ şekilsel kusurlarının ortalama değerleri
(Mean values of the geometric imperfections δ_c , δ_b , δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$, and $\delta_{cr(m)}$ computed using the new method)

Eleman	δ_c (mm)	δ_b (mm)	δ_θ (°)	$\delta_{f(t)}$ (mm)	$\delta_{f(b)}$ (mm)	$\delta_{cr(t)}$ (mm)	$\delta_{cr(m)}$ (mm)
Pmid1	-0,54	1,09	0,09	-0,90	1,07	0,15	0,02
Pmid2	-0,35	0,9	0,19	0,56	0,50	0,16	-0,01
Pmid3	0,12	0,99	1,08	-1,03	0,83	0,19	0,01
Pmid4	-0,19	0,87	1,13	1,11	0,85	0,19	0,00
Pmid5	0,21	1,34	0,02	-0,74	0,62	0,13	0,03
Pmid6	0,06	1,83	0,83	-0,66	0,84	0,14	0,04
Pmid7	0,19	1,23	1,33	-0,28	0,54	0,18	0,02
Pmid8	-0,05	1,44	1,13	-0,6	0,71	0,14	0,03
Pmid9	0,59	0,48	1,52	0,19	0,19	0,13	-0,09
Pmid10	0,46	0,39	1,84	0,19	0,16	0,12	-0,09
Pmid11	0,59	0,34	1,49	0,00	-0,24	0,11	-0,14
Pmid12	0,41	0,16	1,17	0,02	-0,28	0,11	-0,18
Pmid13	0,10	0,30	0,60	0,25	0,25	0,12	-0,03
Pmid14	1,20	0,36	0,90	0,28	0,25	0,12	-0,03
Pmid15	0,65	0,35	1,93	0,17	0,27	0,12	-0,04
Pmid16	0,62	0,33	1,84	0,14	0,24	0,14	-0,05
<i>Ortalama</i>	<i>0,25</i>	<i>0,77</i>	<i>1,07</i>	<i>-0,08</i>	<i>0,42</i>	<i>0,14</i>	<i>-0,03</i>
<i>St. Sapma</i>	<i>0,42</i>	<i>0,47</i>	<i>0,57</i>	<i>0,54</i>	<i>0,37</i>	<i>0,03</i>	<i>0,06</i>

Eski yöntem kullanımından yeni yöntem kullanımına geçerken lokal ve global kusurların maksimum değerlerinde görülen düşüş eğilimi şekilsel kusurlar için hesaplanan ortalama değerler için de geçerlidir. Bu çalışmada kullanılan bütün hafif çelik elemanlar için eski yöntem kullanılarak hesaplanan şekilsel kusurların ortalama değerleri Tablo 5'te verilirken, yeni yöntem kullanılarak hesaplanan şekilsel kusurların ortalama değerleri ise Tablo 6'da verilmiştir. δ_b ve $\delta_{cr(m)}$ eski ve yeni yöntemde aynı formülasyonlara sahip olduğundan, bu şekilsel kusurlar için hesaplanan ortalama değerlerin genel ortalamaları da aynıdır. δ_c , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$ ve $\delta_{cr(t)}$ şekilsel kusurların ortalama değerleri için yeni yöntem kullanılarak hesaplanan genel ortalamaların eski yöntemle hesaplanana kıyasla %60'dan fazla düştüğü gözlemlenmiştir. Yeni yöntem kullanılarak δ_θ ortalama değerleri için hesaplanan genel ortalamasının ise eski yöntemle hesaplanana kıyasla yaklaşık %50 azaldığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, formülasyonu değişmeyen ve başlangıçta uygulanan ideal geometri modeli oturtma işleminden birbir etkilenmeyen şekilsel kusurlar olan δ_b ve $\delta_{cr(m)}$ dışında bütün elemanlar için hesaplanan maksimum ve ortalama değerlerde ciddi bir düşüş görülmüştür.

Son adım olarak hem eski hem de yeni yöntemle hesaplanan şekilsel kusur değerleri literatürdeki diğer çalışmalarda raporlanan veya uzunluğa bağlı bir formüle tanımlanan şekilsel kusur değerleri ile karşılaştırılmıştır. Tablo 7, literatürdeki çalışmalarda raporlanan ve verilen denklemlere göre 900 ve 1200 mm uzunluğundaki hafif çelik elemanlar için hesaplanan ortalama ve maksimum şekilsel kusur değerleri ve güncel çalışma sonuçlarını göstermektedir. Tablo 7'de verilen bütün çalışmalar C-kesitli hafif çelik elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan elemanlara ait sac kalınlıkları da ayrıca Tablo 7'de verilmiştir.

Yukarıda da belirtildiği gibi bu çalışmada toplamda dört farklı uzunluktaki (900-1000-1100-1200 mm) elemanlar için şekilsel kusur tespit ve boyutlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Özellikle global şekilsel kusur olarak tanımlanan kavis ve dışbükey (δ_c ve δ_b), Tablo 7'de verilen çalışmaların birçoğunda eleman uzunluğuna bağlı parametreler olarak verilmektedir. Bu yüzden de Tablo 7'de hem kavis hem de dışbükey için 900 ve 1200 mm'lik elemanlar için hesaplanan iki değer aynı hücrede iki satır halinde verilmiştir. Üstteki

Tablo 7. Literatürdeki çalışmalarda raporlanan ve verilen denklemlere göre 900 ve 1200 mm uzunluğundaki hafif çelik elemanlar için hesaplanan ortalama ve maksimum şekilsel kusur değerleri ve güncel çalışma sonuçları
(Average and maximum geometric imperfection values calculated for cold-formed steel members with 900 and 1200 mm length according to the equations reported and given in the previous studies, and the results of the current study)

Literatür	Sac Kalınlık (t) (mm)	Lokal Dışbükey ($\delta_{cr(m)}$) (mm)		Açılma (δ_f) (mm)		Kavis (δ_b) (mm)		Dışbükey (δ_c) (mm)		Burulma (δ_θ) (°)	
		Ort.	Maks.	Ort.	Maks.	Ort.	Maks.	Ort.	Maks.	Ort.	Maks.
Mulligan ve Peköz [14]	1,1 – 1,5	0,51	1,25	4,32	7,29	0,35	0,73	0,15	0,28	-	-
Young [15]	1,5	0,41	0,99	1,16	2,10	0,15	0,81	0,09	0,78	-	-
Schafer ve Peköz [2]	0,9	0,54	-	0,12	-	-	-	-	-	-	-
Zeinoddini [33]	0,8 – 1,7	-	-	-	-	0,91	1,39	0,47	0,78	0,89	1,13
Zeinoddini ve Schafer [9]	0,8 – 1,7	-	-	-	-	1,22	1,86	0,62	1,03	0,91	2,75
Peterman [5]	1,8	0,48	1,05	0,89	1,76	0,40	1,39	0,26	0,78	0,37	1,02
Zeinoddini ve Schafer [6]	1,7	-	-	-	-	0,54	1,86	0,35	1,03	0,36	-
Selvaraj ve Madhavan [16]	1,5 – 2,5	3,51	8,6	5,65	10,66	0,74	2,66	0,57	1,28	3,24	8,85
ECCS [28]	Standart	-	-	-	-	0,99	3,55	0,76	1,71	-	-
EN 1090-2:BS [31]	Standart	-	-	-	-	0,85	-	0,67	-	-	-
EN 1993-1-5:2006/AC:CEN [32]	Standart	0,45	-	0,9	-	1,13	-	0,90	-	-	-
AISI [29]	Standart	1,59	-	1,59	-	0,9	-	0,94	-	-	-
ASTM [30]	Standart	1,59	-	1,59	-	1,25	-	1,25	-	-	-
Eski Yöntem	1,2	0,04	0,29	0,90	1,22	0,94	-	0,94	-	12,7	-
Yeni Yöntem	1,2	0,18	0,31	1,49	2,47	1,26	-	1,26	-	0,91	1,95
		0,02	0,27	1,07	1,49	1,26	-	1,26	-	1,72	2,65
Yeni Yöntem	1,2	0,18	0,32	1,11	1,76	1,83	2,79	1,20	1,87	1,93	3,57
		0,18	0,32	1,11	1,76	1,83	2,79	1,20	1,87	1,93	3,57

değerler 900 mm alttakiler ise 1200 mm için hesaplanan değerleri göstermektedir. Eleman uzunluğu arttıkça bu iki şekilsel kusur için hesaplanan değerlerinin de artması beklenmektedir. Fakat, yürütülen çalışmada nokta bulutlarından otomatik olarak elde edilen şekilsel kusur değerlerinde ne δ_c ve δ_b ne de geriye kalan şekilsel kusurlar olan δ_θ , $\delta_{f(t)}$, $\delta_{f(b)}$, $\delta_{cr(t)}$ ve $\delta_{cr(m)}$ için uzunluğa bağlı önemli bir değişkenlik gözlemlenmemiştir. Bunun yanı sıra, literatürdeki önemli çalışmalardan (Tablo 7) sadece Schafer ve Peköz [2] şekilsel kusur değerlerini sac kalınlığına bağlı parametreler olarak vermiştir. Yürütülen çalışmada sadece tek bir sac kalınlığı (1.2 mm) kullanıldığından sac kalınlığının şekilsel kusur değerleri üzerindeki etkisi hakkında çıkarım yapmak mümkün olmamıştır.

Güncel çalışmada lokal dışbükey ($\delta_{cr(m)}$) ve açılma ($\delta_{f(t)}$ ve $\delta_{f(b)}$) için hesaplanan ortalama ve maksimum değerlerin literatürdeki C-kesitli elemanlar için verilen örneklerden daha düşük seyrettiği tespit edilmiştir. Bunun yanında hesaplanan ortalama ve maksimum δ_c , δ_b ve δ_θ değerlerinin literatürdekilere nazaran çok az yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Global şekilsel kusurları temsil eden bu üç şekilsel kusurun eleman davranışını birbir etkilediği bilinmektedir. Hafif çelik elemanların geometrik özellikleri ve uzunlukları eleman davranışını kritik bir şekilde etkileyecek şekilsel kusur limitlerinin belirlenmesinde önemlidir. Fakat, elde edilen sonuçlar elemanlarda oluşan şekilsel kusur boyutlarının eleman uzunluğundan ziyade imalat ve nakliye gibi dış etmenlere bağlı olduğu düşündürmektedir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışma hafif çelik elemanlarda bulunan ve eleman davranışını etkileyen lokal ve global şekilsel kusurların doku kaplamalı nokta bulutlarından otomatik olarak tespit edilmesi ve boyutlandırılması üzerine yoğunlaşmıştır. Yazarlar tarafından literatürdeki uygulamalar taban alınarak otomatik şekilsel kusur tespit ve boyutlandırması için geliştirilmiş olan ve eski yöntem olarak isimlendirilen yöntemin çıktılarını, bu çalışmada detayları verilen iyileştirilmiş otomatik şekilsel kusur tespit ve boyutlandırma yöntemi ile karşılaştırılmıştır. İyileştirilme ile elde edilen bu yeni yöntem hem referans olarak kullanılan ideal geometrik modelin bütün nokta bulutu göz önünde bulundurularak yerleştirilmesine hem de lokal şekilsel kusurların doğru tespiti ve boyutlandırmasına imkân vermektedir.

Yürütülen çalışma sonucunda, formülasyonu değişmeyen ve başlangıçta uygulanan ideal geometri modeli yerleştirme işleminden birbir etkilenmeyen şekilsel kusurlar olan δ_b ve $\delta_{cr(m)}$ dışında bütün elemanlar için hesaplanan maksimum ve ortalama şekilsel kusur değerlerinde %50 ve üzerinde düşüş görülmüştür. Buna rağmen elde edilen şekilsel kusur değerleri literatürde raporlanan değerler ile karşılaştırıldığında hem yeni hem de eski yöntemle hesaplanan şekilsel kusur değerlerinden global şekilsel kusurları temsil eden δ_c , δ_b ve δ_θ değerlerinin 1000 mm uzunluğundaki dört hafif çelik eleman için yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu duruma hafif çelik

elemandan toplanan nokta bulutlarındaki nokta yoğunluğunun bölgesel olarak düşmesinin sebep olduğu tespit edilmiştir. Sonraki çalışmalarda, yukarıda belirtildiği gibi ayırık şekilsel kusur değerleri elde etmemek için, şekilsel kusur dağılımını etkilemeyecek şekilde nokta bulutu yoğunluğunu düzenli hale getirecek yoğunluk artırma veya gerektiğinde azaltma algoritmalarının otomatik şekilsel kusur tespiti yapmadan kullanılması önerilmektedir.

Gelecekte yürütülecek çalışmalarda hem eski hem de yeni şekilsel kusur tespit yöntemi sonuçlarının eleman davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi planlanmaktadır. Oluşturulan nümerik modellerde sadece elemanların deney sonucunda elde edilen maksimum yük taşıma kapasitesi ve deplasman kapasitesi incelenmekle kalmıyacak, aynı zamanda şekilsel bozulmaların da gerçek eleman davranışıyla örtüşmesi sağlanacaktır. Bunları takiben de nokta bulutları kullanılarak doğrudan eleman analiz modeli oluşturulacak ve elde edilen sonuçlar önceki çıktılarla karşılaştırılacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar bu araştırmaya katkılarından dolayı Arkitech İleri Yapı Teknolojileri ve Polygon Mühendislik'e teşekkür eder. Bu makalede sunulanlar, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 217M513 numaralı TÜBİTAK 3501 projesi kapsamında Hacettepe Üniversitesi'nde yürütülen çalışmalara dayanmaktadır. Makalede verilen görüş, bulgu, sonuç ve tavsiyeler yazarlara aittir, TÜBİTAK'ın görüşlerini yansıtmayabilir.

Kaynaklar (References)

- Atacan A.T., Yükseler R.F., Snap-buckling and post-buckling analyses of fixed supported beams having initially small circular imperfection under the effect of uniformly distributed vertical load, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 1091-1102, 2022.
- Schafer, B., Peköz, T., Computational modeling of cold-formed steel: Characterizing geometric imperfections and residual stresses, *Journal of Constructional Steel Research*, 47 (3), 193-210, 1998.
- Dubina, D., Ungureanu V., Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members, *Thin-Walled Structures*, 40 (3), 239-262, 2002.
- Young, B., Rasmussen, K.J., Measurement techniques in the testing of thin-walled structural members, *Experimental Mechanics*, 43 (1), 32-38, 2003.
- Peterman, K.D., Experiments on the stability of sheathed cold-formed steel studs under axial load and bending, *Doktora Tezi, Johns Hopkins University, Department of Civil Engineering, Baltimore, MD, USA, 2012.*
- Zeinoddini, V., Schafer, B., Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach, *Thin-Walled Structures*, 60, 105-117, 2012.
- Sadovský, Z., Kriváček, J., Ivančo, V., Ďuricová A., Computational modelling of geometric imperfections and buckling strength of cold-formed steel, *Journal of Constructional Steel Research*, 78, 1-7, 2012.
- Lecce, M., Rasmussen, K.J., Finite element modelling and design of cold-formed stainless steel sections, R845, Centre for Advanced Structural Engineering, Sydney, Australia, 2005.
- Zeinoddini, V., Schafer, B.W., Global imperfections and dimensional variations in cold-formed steel members, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 11 (05), 829-854, 2011.
- Zhao, X., Tootkaboni, M., Schafer, B., Development of a laser-based geometric imperfection measurement platform with application to cold-formed steel construction, *Experimental Mechanics*, 55 (9), 1779-1790, 2015.
- Zhao, X., Tootkaboni, M., Schafer, B.W., Laser-based cross-section measurement of cold-formed steel members: model reconstruction and application, *Thin-Walled Structures*, 120, 70-80, 2017.
- McAnallen, L., Padilla-Llano, D., Zhao, X., Moen, C., Schafer, B., Eatherton, M., Initial geometric imperfection measurement and characterization of cold-formed steel C-section structural members with 3D non-contact measurement techniques, *Structural Stability Research Council, Toronto, Canada, 2014.*
- Salomon, A.L., Fratamico, D., Schafer, B.W., Moen, C.D., Full field cold-formed steel column buckling measurements with high resolution image-based reconstruction, *Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, Orlando, FL, USA, 2016.*
- Mulligan, G.P., Peköz, T., The influence of local buckling on the structural behavior of singly-symmetric cold-formed steel columns, *Wei-Wen Yu Center for Cold-Formed Steel Structures, Springfield, MO, USA, 1983.*
- Young, B., The behaviour and design of the cold formed channel columns, *Doktora Tezi, University of Sydney, Department of Civil Engineering, Sydney, Australia, 1997.*
- Selvaraj, S., Madhavan., M., Geometric imperfection measurements and validations on cold-formed steel channels using 3D noncontact laser scanner, *Journal of Structural Engineering*, 144 (3), 2018.
- Zhao, X., Tootkaboni, M.P., Schafer, B.W., High fidelity imperfection measurements and characterization for cold-formed steel members, *7th International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, Baltimore, MD, USA, 2016.*
- Farzarian, S., Louhghalam, A., Schafer, B.W., Tootkaboni, M., Geometric imperfections in shell finite element models of CFS members - a review of current state of practice, *Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, Baltimore, MD, USA, 2018.*
- Zeinoddini-Meimand, V., Geometric imperfections in cold-formed steel members, *Doktora Tezi, Johns Hopkins University, Department of Civil Engineering, Baltimore, MD, USA, 2011.*
- Cagirci, O.G., 3D point cloud-based imperfection determination of cold-formed steel members for numerical modeling, *Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe University, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Turkey, 2021.*
- HEXAGON. SmartScan. <https://www.hexagonmi.com/products/structured-light-scanners/aicon-smartscan>. Yayın tarihi 2022. Erişim tarihi Mart 23, 2022.
- Jolliffe, I., *Principal Components in Regression Analysis*, Principal Component Analysis, Springer, Medford, MA, 129-155, 2002.
- Kashani, A.G., Olsen, M.J., Parrish, C.E., Wilson, N., A review of LiDAR radiometric processing: From ad hoc intensity correction to rigorous radiometric calibration, *Sensors*, 15 (11), 28099-28128, 2015.
- Laefer, D.F., Gannon, J., Deely, E., Reliability of crack detection methods for baseline condition assessments, *Journal of Infrastructure Systems*, 16 (2), 129-137, 2010.
- Laefer, D.F., Truong-Hong, L., Carr, H., Singh, M., Crack detection limits in unit based masonry with terrestrial laser scanning, *NDT&E International*, 62, 66-76, 2014.
- Olsen, M.J., Kuester, F., Chang, B.J., Hutchinson, T.C., Terrestrial laser scanning-based structural damage assessment, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24 (3), 264-272, 2010.
- Melis U., Tunalioglu N., Arican D., A. Tümay A., Investigation of the filtering methods on 3D models using terrestrial laser scanning data, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 1765-1776, 2019.
- ECCS, European recommendations for the design for the design of light gauge steel members, *European Convention for Constructional Steelwork*, Brussels, Belgium, 1987.
- AISI S240-2015, North American standard for cold-formed steel structural framing, *American Iron and Steel Institute, Washington, DC, USA, 2015.*
- ASTM C955-17, Standard specification for cold-formed steel structural framing members, *American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2017.*
- EN 1090-2:2008, Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures, *British Standards*, UK, 2008.
- EN-19931-5:2006/AC:2009, Eurocode 3: Design of steel structures. I-V: Plated structural elements, *European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2009.*
- Zeinoddini, V.M., Geometric imperfections in cold-formed steel members, *Doktora Tezi, Johns Hopkins University, Department of Civil Engineering, Baltimore, MD, 2011.*

