



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Hafif Çelik Elemanlar için İki Boyutlu Görüntülerden Üç Boyutlu Yüzey Ağı Elde Edilmesi

 Burcu GÜLDÜR ERKAL ^{a,*}

^a İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: burcuguldur@hacettepe.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1146323

Öz

Hafif çelik yapılarla ilgili yürütülen araştırmalardaki son gelişmeler ve güncellenen tasarım yönergeleri sayesinde hafif çelik elemanların inşaat süreçlerinde kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Değişken kesit özelliklerine sahip hafif çelik elemanlar ince çelik sacların soğuk şekillendirme aracılığıyla bükülmesiyle elde edilmektedir. Bu elemanların yapılarda kullanılmasıyla ekonomik, hafif, verimli ve esnek yapılar tasarlanabilmektedir. Fakat, yapısı gereği hafif çelik elemanları oluşturan ince çelik saclarla nakliye, kurulum ve hatta üretim nedeniyle şekilsel kusurlar oluşabilmektedir. Bu şekilsel kusurlar hafif çelik elemanların fiziksel davranışlarını etkileyebilmektedir. Bu nedenle, hafif çelik bir elemanın fiziksel davranışını doğru bir şekilde değerlendirebilmek için mevcut şekilsel kusurları belirlemek ve bu şekilsel kusurların hafif çelik eleman davranışı üzerindeki etkisini araştırmak gerekir. Ancak, hafif çelik elemanların kapsamlı şekilsel kusur dağılımlarını çıkarabilmek için detaylı yüzey verisine ihtiyaç vardır. Son yıllarda yürütülen çalışmalarda yüzey verisi üç boyutlu (3B) tarayıcı sistemler kullanılarak elde edilmektedir. Fakat, 3B veri toplama işlemi kullanılan özel ekipmanlar sebebiyle maliyetli bir işlemdir. Bu çalışmada, incelenen hafif çelik elemanların yüzeyinden standart bir kamera ile toplanan iki boyutlu (2B) görüntülerden kapsamlı 3B yüzey verilerinin çıkarılması için düşük maliyetli bir metodoloji önerilmiştir. Oluşturulan 3B verinin ileriki çalışmalarda şekilsel kusur çıkarımı için kullanılacak detay ve çözünürlükte olması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: C-kesitli eleman, Hafif çelik, Nokta bulutu, Şekilsel kusur, Yüzey ağı

Obtaining Three-Dimensional Surface Meshes from Two-Dimensional Images for Cold-Formed Steel Members

ABSTRACT

The use of cold-formed steel (CFS) in construction processes has increased significantly, thanks to the latest research on CFS structures and updated design guidelines. CFS members are obtained by forming thin steel sheets into different cross-section geometries. Using these elements in buildings, economic, light, efficient, and flexible structures could be designed. However, due to its nature, thin steel sheets that make up CFS members may have geometric imperfections resulting from transportation, installation, and production. These geometric imperfections could affect the physical behavior of CFS members. Therefore, to accurately evaluate a CFS member's physical behavior, it is necessary to identify the existing geometric imperfections and investigate their effect on the CFS member's behavior. However, detailed surface data is needed to extract comprehensive geometric imperfection distributions of CFS members. In studies carried out in recent years, surface data is obtained by using three-dimensional scanning systems. However, three-dimensional data collection is costly due to the special equipment used. In this study, a low-cost methodology is proposed to extract comprehensive three-dimensional (3D) surface data from two-dimensional (2D) images collected with a standard camera from the surface of the investigated CFS members. It is aimed that the created 3D representation will be in detail and resolution to be used for geometric imperfection extraction in future studies.

I. GİRİŞ

Ülkemizde sıkça raf sistemleri ve az katlı konut inşasında kullanılan hafif çelik elemanların mevcut geometrileri çeşitli nedenlerle ideal tasarım geometrisinden ayrılmaktadır. Hafif çelik elemanlarda yaygın olarak gözlemlenen bu sapmalar şekilsel kusur olarak adlandırılmaktadır. Şekilsel kusurlar nakliye, kurulum ve üretim sırasında oluşabilmektedir. Hafif çelik elemanlar üzerinde bulunan mevcut şekilsel kusurlar eleman mukavemeti ve burkulma davranışını etkilemektedir. Bu nedenle, hafif çelik eleman davranışını doğru bir şekilde değerlendirebilmek için mevcut şekilsel kusurları karakterize etmek ve etkilerini tasarıma dahil etmek önemlidir.

Yürütülen güncel çalışmalarda şekilsel kusurları tespit etmek için gelişmiş veya özelleştirilmiş üç boyutlu (3B) veri toplama ekipmanları kullanılarak yüzey verisi toplanmaktadır. 3B yüzey verisi toplamak için kullanılan bu ekipmanlar genelde hem maliyetlidir hem de gerekli kalitede veri toplamak belirli bir uzmanlık gerektirmektedir. Ayrıca, literatürdeki çalışmaların çoğunda şekilsel kusurlar hafif çelik elemanların yüzeyindeki sınırlı sayıda noktadan toplanan veriler kullanılarak elde edilen 3B yüzey gösterimlerinden çıkarılmaktadır. Dolayısı ile incelenen hafif çelik elemanların tüm yüzeyini temsil eden yoğun 3B yüzey verileri elde edilememektedir. Bu nedenle, şekilsel kusur tespiti uygulamalarına uygun yoğun 3B veriyi toplamak için kullanımı kolay ve düşük maliyetli bir çözüm geliştirmek literatüre önemli bir katkı olacaktır.

Son yıllarda geometrik kusurların tespiti, boyutlandırması ve modellenmesine odaklanan birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Hafif çelik elemanlardan 3B veri toplanmasına ve şekilsel kusur çıkarılması üzerine yoğunlaşan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir ve burada kronolojik olarak tartışılmıştır. Schafer ve Peköz [1] kesit üzerinde sayılı noktadan ölçüm olarak bir kusur dağılımı elde etmiştir. Elde edilen dağılımlar hafif çelik elemanlarındaki şekilsel kusurları ve artık gerilmeleri tespit etmek için kullanılmıştır. Başka bir çalışmada hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusurların tespiti ve bu kusurların sonlu eleman modeline entegrasyonu için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (Dubina ve Ungureanu [2]). Hem global hem de lokal şekilsel kusurların tespiti yapılmıştır. Peterman [3] kesit çevresinde yedi konumda ölçüm yapmasını sağlayan özel bir teçhizat aracılığıyla şekilsel kusur tespiti yapmıştır. Elde edilen şekilsel kusurlar literatürde sıkça karşılaşılan ve şekilsel kusur gösteriminde kullanılan beş burkulma modu ile eşleştirilmiştir. Sadovský, vd. [4] hafif çelik elemanlarda bulunan şekilsel kusurların burkulma mukavemeti üzerindeki etkilerini incelemek için bir çalışma yapmıştır. Yürütülen çalışmada şekilsel kusur değerleri olarak Lecce ve Rasmussen [5]'de sunulan değerler kullanılmıştır. Zeinoddini ve Schafer [6] bükülme, dışbükeylik ve burulma olarak temsil edilen şekilsel kusurları karakterize etmek ve boyutsal değişiklikleri ölçmek için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Elde edilen sonuçlar üretim toleransları ile karşılaştırılmıştır. Zhao, vd. [7] iki boyutlu (2B) çizgi lazer içeren bir test düzeneği ile 240 mm'ye kadar olan uzunluklarda ölçümler gerçekleştirmiş ve şekilsel kusur ölçümleri yapmıştır. McAnallen, vd. [8] hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusur tespitini kesit seviyesinde topladıkları sınırlı sayıda noktayı kullanarak gerçekleştirmiştir. Literatürdeki çalışmalarda elde edilen şekilsel kusur değerleri de hesaba katılarak ortak bir şekilsel kusur gösterim formatı oluşturulmuştur. Salomon, vd. [9], yüksek çözünürlüklü optik kameralar ve bilgisayarla görme algoritmaları kullanarak hafif çelik kolonların burkulma deformasyonunu takip eden bir metodoloji geliştirmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen minimum lokal kusur değeri 0,25 mm'dir. Bu değer literatürdeki çalışmalarda raporlanan lokal kusur değerlerinden daha yüksektir (Mulligan ve Peköz [10], Peterman [3] ve Young [11]). Zhao, vd. [12] kesit boyutlarını ölçmek, şekilsel kusurları ayıklamak ve elde edilen geometriyi kullanarak sonlu eleman modelleri oluşturmak için hafif çelik elemanlardan lazer tarama işlemiyle 3B nokta bulutları elde edilmesi üzerine bir çalışma yürütmüştür. Selvaraj ve Madhavan [13], değişen kesit geometrilerine sahip 188 hafif çelik elemandan yüzey verilerini 3B lazer tarayıcı ile toplanmış ve listeledikleri şekilsel kusurların çıkarımını gerçekleştirmiştir. Hafif çelik elemanlarındaki şekilsel kusurların narinlik oranları, burulma sabiti ve plaka narinliği gibi geometrik özelliklerle korelasyon içinde olduğu gözlemlenmiştir.

Yukarıda detaylandırılan çalışmalarda eleman ana eksenini boyunca kesit seviyesinde sınırlı sayıda noktadan toplanan verilerle oluşturulan 3B gösterimler kullanılarak hafif çelik elemanların şekilsel kusur bilgileri elde edilmiştir (Zhao, vd. [12] hariç). Bu çalışmalarda, hafif çelik eleman yüzeyini tamamen yansıtan değil de kısmi olarak gösterimi sağlayan dağılımlar elde edilmiştir. Ayrıca, bu dağılımları elde edebilmek için özelleştirilmiş ekipmanlar veya gelişmiş 3B tarayıcı sistemler kullanılmıştır. Kesit boyunca veya hafif çelik elemanı boyunca ölçülmeyen noktalarda ise bütün geometriyi kapsayacak şekilsel kusur dağılımları ek veri işleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Zeinoddini [14], Farzanian, vd. [15]). Yürütülen çalışma, literatürden farklı olarak, düşük maliyetli bir kamera sistemi kullanılarak toplanan 2B görüntülerden detaylı 3B gösterimler elde edilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Böylece ek veri işleme yöntemlerine gerek kalmadan şekilsel kusur tespit işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi ve elde edilen şekilsel kusur değerlerinin çözünürlüğünün yüksek olması amaçlanmıştır.

Literatürde 2B görüntülerden elde edilen 3B veri setleri kullanılarak hasar/kusur/değişim tespiti gerçekleştirmek üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Gerekli işlemler (yeterli sayıda görüntü toplama, görüntü kesim alanlarının yeterli olması, yeterli çözünürlükte görüntü toplanması vb.) gerçekleştirildiğinde elde edilen 3B verinin çözünürlüğü hasar/kusur/değişim tespiti için yeterli olmaktadır. Jahanshahi ve Masri [16] 2B görüntüleri kullanarak inceledikleri yüzeylerin 3B modelini oluşturmuştur. Elde edilen 3B veri kullanılarak yüzeysel hasar tespiti gerçekleştirilmiştir. Torok, vd. [17], görüntü tabanlı 3B yeniden yapılandırma yöntemini kullanarak yeni bir 3B çatlak algılama algoritması geliştirmiştir. Liu, vd. [18], 2B görüntü işleme ve 3B yeniden yapılandırma yöntemlerini kullanarak çatlak kenarlarının 3B konumunu belirlemiştir. Zhou, vd. [19], kasırga sonrası konut binalarında oluşan hasar miktarının değerlendirmesi için görüntü tabanlı 3B yeniden yapılandırma yöntemini baz alan bir metod geliştirmiştir. Geliştirilen bu metod Sandy Kasırgası sonrası çekilen görüntüler kullanılarak test edilmiştir. Kalfarisi, vd. [20], nicel değerlendirme ve entegre görselleştirme için 3B gerçeklik örgü modeliyle derin öğrenmeyi kullanarak çatlak algılama ve segmentasyon işlemlerini gerçekleştirmiştir. Özelleşen bu çalışmaların yanı sıra literatürde hem görüntü tabanlı hasar tespit hem de 3B yeniden yapılandırma yöntemlerinin incelendiği derleme makaleler de mevcuttur. Koch, vd. [21] beton ve asfalt altyapılarda bilgisayarla görü tabanlı kusur tespiti ve durum değerlendirmesi üzerine yoğunlaşan çalışmaları içeren bir derleme yapmıştır. Ma ve Liu [22] ise inşaat mühendisliğinde kullanılan 3B yeniden yapılandırma teknikleri ve uygulamalarını içeren çalışmaları gözden geçirmektedir.

Önceden de belirtildiği üzere yürütülen çalışmanın amacı 2B görüntülerden 3B yüzey verilerinin çıkarılmasını sağlayan düşük maliyetli bir yöntem geliştirmektir. Bu bağlamda, değişken boyutlu toplam 23 tane C-kesitli hafif çelik eleman incelenmiştir. İncelenen hafif çelik elemanların 3B yüzey ağlarını elde etmek için özel bir test kurulumuna monte edilmiş hafif çelik elemanların yüzeylerinden, yani elemanın etrafındaki 360°'yi kapsayan hacimden, toplamda 36 görüntü toplanmıştır. Bunu takiben kalibrasyon ve görüntü iyileştirme, görüntü kalitesi doğrulaması için anahtar nokta algılama ve eşleştirme, 3B yüzey ağı oluşturulması ve 3B yüzey ağı iyileştirilmesi adımları gerçekleştirilerek her bir elemana ait 3B yoğun yüzey ağı elde edilmiştir. Eleman üzerindeki belirli konumlardan mikrometre ölçümleri alınarak incelenen hafif çelik elemanların gerçek boyutları kaydedilmiş ve bu ölçümler oluşturulan yüzey ağının doğruluğunu kontrol etmek için kullanılmıştır. Ölçülen boyutlar daha sonra 3B yüzey ağını oluşturan nokta bulutlarından çıkarılan boyutlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen yüzey verisinin şekilsel kusur tespiti için yeterli çözünürlüğe sahip olduğu literatürdeki referans çalışmalarla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Nokta bulutu olarak da adlandırılan yüzey verilerinin daha sonraki çalışmalarda şekilsel kusurların tespiti ve boyutlandırması için kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında geliştirilen kamera tabanlı ve düşük maliyetli 3B veri toplama yönteminin literatürde kullanılan maliyetli yöntemlere alternatif olarak hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusurların tespiti için etkin olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

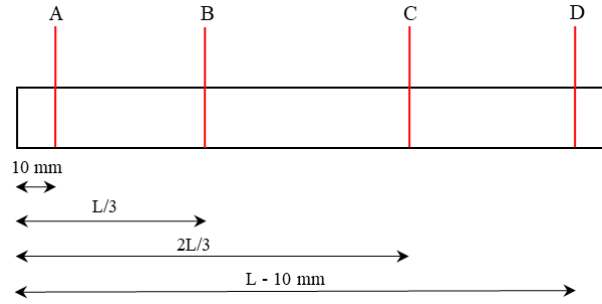
II. HAFİF ÇELİK ELEMANLARDAN VERİ TOPLANMASI

Bu bölümde, makale kapsamında incelenen 23 C-kesitli hafif çelik elemana ait boyut ölçüm bilgisi, görüntü toplamak için kullanılan kameranın detaylı özellikleri ve hafif çelik eleman yüzeyinin tamamını kapsayacak şekilde görüntü toplamaya imkân verecek şekilde tasarlanan test düzeneğinin detayları verilmiştir

A. HAFİF ÇELİK ELEMANLAR

Bu çalışmada, değişken boyutlara sahip C-kesitli 23 adet hafif çelik eleman kullanılmıştır. İncelenen bu hafif çelik elemanlar çeşitlilik sağlamak açısından farklı tedarikçilerden temin edilmiştir. Böylece, üretim aşamalarında oluşan benzer şekilsel kusurların eleman yüzeyinde tekrarlanmasından kaynaklı veri yanlışlığı engellenmiştir. Ayrıca, toplanan elemanlar birbirinden farklı boyutlara sahip olduğundan, bu değişkenliğin oluşturulan yüzey ağırları üzerindeki etkilerini görmek de mümkün olmuştur.

Eleman uzunluğu boyunca kesit boyutları değişkenlik gösterebileceğinden, farklı noktalardan flanş, gövde ve kalınlık ölçümleri alınmıştır. *Şekil 1*, incelenen hafif çelik elemanlarda mikrometre ölçümlerinin toplandığı konumları göstermektedir. Flanşlar (gövdenin her iki tarafından), gövde ve kalınlık (hem gövde hem de flanşlarda) için A-D arası dört noktanın her birinde altı (2 flanş, 1 gövde ve 3 kalınlık) ölçüm, toplamda da 24 (6x4) ölçüm yapılmıştır. *Tablo 1*, incelenen hafif çelik elemanlardan mikrometrelerle yapılan ölçümlerin her boyut için ayrıca hesaplanan ortalama değerlerini göstermektedir.



Şekil 1. Mikrometre ölçümlerinin toplandığı konumlar.

Tablo 1. İncelenen hafif çelik elemanlara ait boyutlar.

Eleman	Flanş (mm)	Gövge (mm)	Kalınlık (mm)	Uzunluk (mm)
El-1	48,8	90,7	1,3	1026,1
El-2	48,8	90,9	1,3	1023,2
El-3	48,9	90,9	1,3	1122,7
El-4	48,9	90,8	1,3	994,2
El-5	49,0	90,8	1,3	1135,3
El-6	40,9	61,3	0,9	1004,1
El-7	45,7	73,1	1,3	938,0
El-8	45,8	74,0	1,2	1055,8
El-9	48,4	88,6	1,1	1068,4
El-10	46,9	97,3	1,4	1079,1
El-11	47,7	92,2	1,3	1013,5
El-12	46,0	74,2	1,7	946,9
El-13	46,2	75,2	1,8	947,1
El-14	48,7	88,8	1,4	1118,9
El-15	49,0	91,5	1,4	1010,9
El-16	48,7	91,8	1,4	1048,7
El-17	48,9	90,7	1,5	1110,7
El-18	47,9	93,3	1,2	982,0
El-19	47,0	140,6	1,1	1044,6
El-20	51,5	91,8	1,5	950,1

El-21	46,0	92,6	1,0	987,1
El-22	49,5	94,9	0,9	948,8
El-23	48,8	141,6	1,0	1117,4

İncelenen hafif çelik elemanlar galvaniz kaplamalı olduklarından homojen ve parlak bir yüzey dokusuna sahiptir. Araştırmanın amacı hafif çelik elemanların yüzeylerinden toplanan görüntülerden 3B yüzey ağları elde etmek olduğundan eleman yüzeyinin pürüzsüz ve homojen bir yapıda olması istenen bir durum değildir. Eleman yüzeyinde karakteristik desenler olması yüzey ağı oluşturma işlemini kolaylaştırmakta ve yüzey ağı doğruluğunu arttırmaktadır. Bu çalışmada yüzey desenleri, hafif çelik elemanların yüzeylerine siyah bir boyanın 1 m mesafeden rastgele püskürtülmesi ile oluşturulmuştur. Özellikle metal yüzeylere uygun, kalıcı, siyah bir boya seçilmiştir. Elde edilen yüzey desenleri daha sonra anahtar nokta algılama ve eşleştirme adımında kullanılmıştır.

B. KAMERA ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada kullanılan kamera, DX formatında 23,5 mm x 15,6 mm CMOS görüntü sensörlü bir Nikon D7100'dür. Bu kamera Nikon AF-S DX NIKKOR 18-105mm f/3.5-5.6G lense sahiptir ve de 24 MP (6000 x 4000 piksel) çözünürlüğünde görüntü toplayabilmektedir. 2B görüntüleri toplamak için kullanılan bu kamera, test düzeneğinden 1,2 metre mesafede sabit bir tripod üzerine yerleştirilmiştir.

C. TEST DÜZENEGİ

Kullanılan test düzeneği, bilyeli bir yatağa bağlı iki plakadan oluşmaktadır. Altta bulunan plaka sabittir ve üstteki plaka serbestçe dönmektedir. Alt plakanın çeperinde birbirinden 10° aralıklı 36 delik vardır. Üst plakada ise sadece dört delik vardır. Görüntü toplama işlemi sırasında, üst plakada yer alan dört delik hafif çelik elemanın yerleştirildiği bu plakayı sabit konumda tutmak için kullanılmaktadır. Bu deliklere dört adet çubuk yerleştirilir ve alt plakada karşılık gelen deliklere denk getirilerek test düzeneği sabitlenir.

Üst plakada bir adet düz, iki adet L şeklinde delikli plaka bulunmaktadır. Bu üç plaka birbirinden bağımsız olarak hareket edebilmektedir ve incelenen hafif çelik elemanı üst plakaya sabitlemek için kullanılır. Plakaların konumları, incelenen C-kesitli hafif çelik elemanın ağırlık merkezine göre belirlenir.

Toplanan görüntülerde karşıtlık (kontrast) oluşturmak için test düzeneği beyaz bir duvarın önüne yerleştirilmiştir. İncelenen hafif çelik eleman üst plakaya sabitlendikten sonra bir görüntü kaydedilir ve üst plaka 10° döndürülür. 10° döndürme işlemi toplamda 36 kez tekrarlanarak incelenen hafif çelik elemanın bütün yüzeyini kapsayan 36 görüntü toplanır.

III. HAFİF ÇELİK ELEMANLARIN 3B YÜZEY AĞININ ÇIKARIMI

Hafif çelik elemanların 3B yüzey ağı çıkarımı dört ana adımdan oluşmaktadır. Öncelikle toplanan görüntüler kalibre edilir ve görüntü işlem metotları kullanılarak görüntü kalitesi artırılır. Bunu takiben, görüntü kalitesi arttırılan görüntülerin 3B yüzey ağı çıkarımında kullanılabilirliğini doğrulamak için anahtar nokta algılama ve eşleştirme adımları gerçekleştirilir. Doğrulama işlemi tamamlandıktan sonra ise bu görüntüler kullanılarak yüzey ağı elde edilir. Farklı uygulamalarda kullanılmadan önce ise oluşturulan yüzey ağları üzerinde bir iyileştirme yapılır. Böylece daha homojen bir nokta dağılımına sahip yüzey gösterimleri elde etmek mümkün olmaktadır.

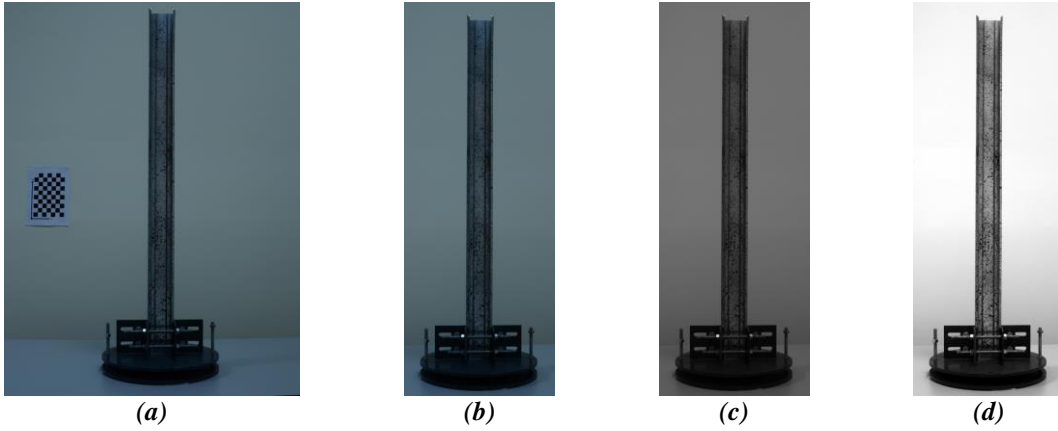
A. KALİBRASYON VE GÖRÜNTÜ İYİLEŞTİRME

Yüzey ağı oluşturulmasında kullanılmak üzere toplanan her görüntü, görüntüde bozulma yaratan 18 mm'lik geniş bir odak uzaklığı ile çekilmiştir. Bu nedenle, görüntü işleme aşamalarına geçmeden önce lens bozulmaları düzeltilmelidir.

Lens bozulmalarını düzeltmek amacıyla MatLab'ta [23] hali hazırda bulunan kamera kalibrasyon uygulaması kullanılmıştır. Bu çalışmada, kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmek için test düzeneğinin beyaz arka planına fiziksel boyutları bilinen bir dama tahtası görüntüsü eklenmiştir. Kullanılan kameranın içsel, dışsal ve lens bozulma parametreleri tahmin edilmiş ve toplanan görüntülerdeki lens bozulma etkileri bu parametreler kullanılarak düzeltilmiştir. **Şekil 2(a)**, kalibre edilmiş örnek görüntülerden birini içermektedir. **Şekil 2(a)**'daki görüntü, test düzeneği, sabitlenmiş hafif çelik eleman ve kalibrasyon kağıdını içermektedir.

Kalibrasyon işlemi bittikten sonra toplanan görüntüler sadece test kurulumunu gösterecek şekilde kırılmıştır. Görüntüleri belirli bir boyuta kırmak için yine MatLab kullanılmıştır. İncelenen her hafif çelik eleman için toplanan 36 görüntüden bir adet referans görüntü seçilmiş, bu referans görüntüden kırma dikkörtgeni konumu elde edilmiş ve geri kalan 35 görüntüde bu kırma konumu kullanılmıştır.

Hafif çelik elemanların parlak yüzeyi nedeniyle görüntü alınırken flaş kullanılmamış, ek aydınlatma olarak sadece soğuk ışık kaynakları kullanılmıştır. Dolayısıyla da elde edilen görüntüler oldukça karanlıktır. Takip eden görüntü işleme adımlarına geçebilmek için görüntülerin anahtar nokta çıkarımına uygun hale getirilerek kalitesinin artırılması gerekir. Toplanan görüntüler önce gri tonlamalı görüntülere çevrilir ve bunu takiben görüntü yoğunluk değerleri ayarlanarak görüntülerin karışıklığı artırılır. **Şekil 2** aynı zamanda, kırılmış bir görüntüyü (**Şekil 2(b)**), gri tonlamalı bir görüntüyü (**Şekil 2(c)**) ve iyileştirilmiş bir görüntüyü (**Şekil 2(d)**) göstermektedir.



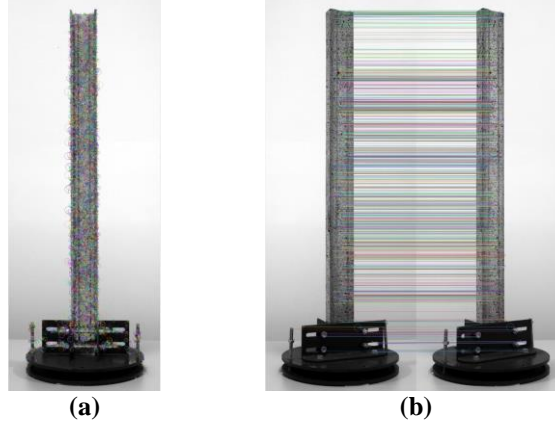
Şekil 2. (a) Test kurulumunu, sabitlenmiş hafif çelik elemanı ve arkadaki duvara iliştirilmiş kalibrasyon kağıdını içeren kalibre edilmiş örnek görüntü, (b) kırılmış görüntü, (c) gri tonlamalı görüntü ve (d) iyileştirilmiş görüntü.

B. İYİLEŞTİRİLMİŞ GÖRÜNTÜLERİN KONTROL EDİLMESİ

Bu çalışmada, iyileştirilmiş görüntülerin 3B yüzey ağı oluşturmak için yeterli kalitede olup olmadığını tespit etmek için anahtar nokta çıkarma ve eşleştirme adımlarını uygulanmıştır. Belirtilen anahtar nokta çıkarma ve eşleştirme adımları Regard3D [24] yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Regard3D, bir nesnenin farklı bakış açılarından çekilmiş bir dizi fotoğrafını kullanarak nesnelere 3B yüzey ağları elde etmeyi sağlayan bir hareketten yapı (SfM) oluşturma yazılımıdır. Her görüntü için, ardışık görüntüde bulunma olasılığı yüksek olan anahtar noktalar tespit edilir. Daha sonra, her bir anahtar nokta için yerel yoğunluk dağılımı modeline dayalı bir tanımlayıcı hesaplanır. Bu tanımlayıcı,

farklı bakış açlarına sahip ardışık görüntülerde bulunan değişmez özellikleri de içinde bulundurur. Ardışık görüntülerdeki tanımlayıcılar eşleştirilir ve geometrik olarak filtrelendirir. **Şekil 3(a)** ve **Şekil 3(b)**, sırasıyla, anahtar nokta tespit sonuçlarını ve ardışık iki görüntüdeki anahtar nokta eşleşmelerini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar iyileştirilmiş görüntülerin incelenen hafif çelik elemanın 3B yüzey ağını oluşturmak için yeterli kalitede olduğunu doğrulamıştır. Başarılı bir eşleşme için kilit nokta sayısı eşiği 8000 olarak alınmıştır.



Şekil 3. (a) Hafif çelik eleman yüzeyinde algılanan anahtar noktalar ve (b) algılanan anahtar noktalara dayalı olarak eşleştirilmiş iki ardışık görüntü.

C. 3B YÜZER AĞI OLUŞTURULMASI

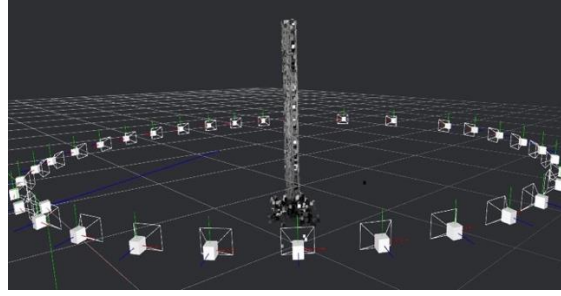
Yürütülen çalışmanın bir sonraki adımı yüzey ağı oluşturulmasıdır. Yüzey ağları Meshroom [25] yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Ardışık olarak toplanan ve belirli bir miktarda örtüşen 2B görüntülerden Meshroom yazılımı kullanılarak 3B yüzey ağları elde edilmiştir. Meshroom, kullanıcılara görüntü yükleme ile başlayan ve dokulu ağ oluşturma ile biten bir fotogrametrik işlem zinciri içerisinde kullanılan algoritmaların parametrelerini değiştirme ve özelleştirme imkânı sağlar.

Meshroom yazılımında 3B yüzey ağları sekiz ana adımı gerçekleştirerek elde edilmektedir. Sürecin ilk adımı, ölçeklendirme ile değişmeyen özellik çıkarımının gerçekleştirilmesidir. Amaç, her bir görüntüdeki dönme, ötelenme ve ölçekten bağımsız olarak ardışık görüntüdeki ayırt edici betimleyicilerle karşılaştırılabilecek özelliklerin çıkarılmasıdır. Özellik çıkarma işlemini görüntü eşleştirme takip eder; çıkarılan özellikler fotometrik eşleştirme ile eşleştirilir. Daha sonra hareketten yapı oluşturma algoritması çalıştırılır. Hareketten yapı oluşturma adımını eleman yüzeyini yansıtan derinlik haritalarının oluşturulması takip etmektedir. Derinlik haritası da elde edildikten sonra yüzey ağı oluşturma ve filtreleme işlemleri gerçekleştirilir. Oluşturulan yüzey ağının incelenen objeyi detaylı ve doğru bir şekilde yansıtabilmesi için doku kaplaması oluşturulur. Son olarak da doku kaplamalı yüzey ağı kullanılarak görüntülerin toplandığı kamera pozisyonları elde edilir. Meshroom yazılımına ait analiz şeması **Şekil 4**'te verilmiştir.



Şekil 4. Meshroom analiz şeması.

Şekil 5, örnek bir hafif çelik eleman için yüzey ağı oluşturma işleminin nihai sonucunu göstermektedir. Hafif çelik elemanı temsil eden yüzey ağı **Şekil 5**'te verilen ekran görüntüsünün ortasında yer almaktadır. Bu yüzey ağı, 36 görüntünün çekildiği kamera konumlarıyla çevrilidir. Havada asılı olan dikdörtgenler kamera konumları göstermektedir.



Şekil 5. Görüntü işleme için kullanılan 36 görüntünün tümü için kamera pozları ve oluşturulan yüzey ağı.

Tablo 1'de detayları verilen 23 hafif çelik eleman için Meshroom yazılımında üzerinde değişiklik yapıp kullanılan parametreler **Tablo 2**'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu çalışmada özellik betimleyici olarak ölçek değişmez özellik dönüşümü (SIFT) [26] ve AKAZE [27] kullanılmıştır. Kullanılan yazılımın varsayılan özellik betimleyicisi SIFT olmasına rağmen bu betimleyicinin yeterli olmadığı durumlarda AKAZE kullanılmıştır. Hem SIFT hem de AKAZE görüntülerdeki yerel özellikleri algılamak, tanımlamak ve eşleştirmek için kullanılmaktadır. Özellik betimleyicisi için varsayılan çözünürlük normal olarak tanımlanmıştır, ancak bu çözünürlüğün yetersiz olduğu durumlarda (yeterli sayıda anahtar nokta tespit edilememesi) yüksek çözünürlük kullanılmıştır. Hareketten yapı oluşturma adımında karşılaştırma için kullanılan giriş parçaları mevcuttur. Genel olarak iki adet giriş parçası yeterli olurken bazı profiller için üç giriş parçası kullanılmıştır. Hatalı eşleştirmeleri ayıklamak için üç ardışık görüntüde algılanan betimleyiciler karşılaştırılmaktadır. Ardışık üç kamera görüntüsünün hatalı eşleştirmeleri ayıklamak için uygun olmadığı durumlarda ise dört ve beş kamera görüntüsü kullanılmıştır. Genelde toplanan görüntülerin piksel yoğunluğu yüzey ağını doku ile kaplamak için uygundur. Fakat, bazı yüzey ağlarını oluşturan nokta yoğunluğu düşük olduğundan hatalı kaplama durumlarını engellemek için doku aşağı ölçeklendirme katsayısı iki olarak kullanılmıştır. **Tablo 2**'de verilen parametrelere ilaveten **Şekil 4**'te gösterilen analiz şemasında yer alan her adım için birçok değişken tanımlanmıştır. **Tablo 2**'de verilenler dışındaki bütün parametreler varsayılan değerlerde kullanılmıştır. Parametreler ve varsayılan değerler hakkında detaylı bilgi Meshroom yazılımının kullanım kılavuzunda bulunmaktadır.

Tablo 2. İncelenen 23 hafif çelik eleman için Meshroom yazılımında değiştirilerek kullanılan parametreler.

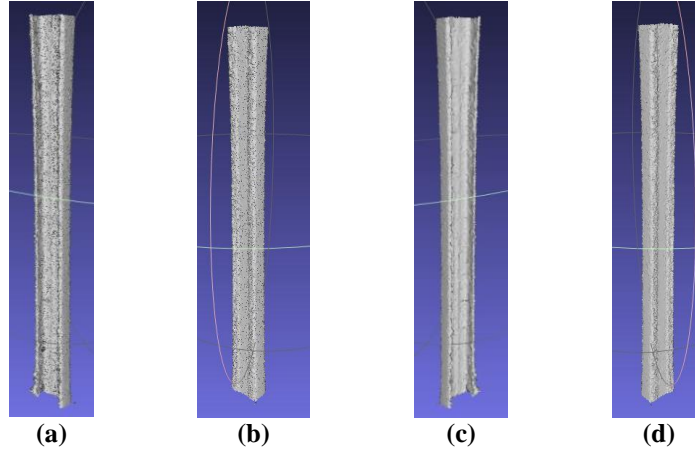
Eleman	Özellik Betimleyici	Betimleyici Çözünürlüğü	SfM için Minimum Giriş Parçası Sayısı	Kullanılan Minimum Sürekli Kamera Sayısı	Kötü Benzerlik Algılaması için Kullanılan Kamera Sayısı	Doku Aşağı Ölçeklendirme Katsayısı
E1-1	SIFT	Yüksek	2	3	4	1
E1-2	AKAZE	Yüksek	2	3	4	1
E1-3	SIFT	Normal	2	3	4	1
E1-4	SIFT	Normal	2	3	4	1
E1-5	SIFT	Normal	2	3	4	1
E1-6	SIFT	Yüksek	2	3	4	1
E1-7	SIFT	Normal	2	3	4	1
E1-8	AKAZE	Yüksek	2	3	4	1
E1-9	AKAZE	Yüksek	3	2	3	1
E1-10	AKAZE	Yüksek	2	3	4	1
E1-11	SIFT	Normal	2	3	4	1
E1-12	AKAZE	Yüksek	3	3	3	1
E1-13	SIFT	Normal	2	3	4	1
E1-14	SIFT	Normal	2	3	4	2
E1-15	SIFT	Normal	2	3	4	2

El-16	SIFT	Normal	2	3	4	2
El-17	SIFT	Normal	2	3	4	2
El-18	SIFT	Normal	2	3	4	2
El-19	SIFT	Yüksek	3	3	4	1
El-20	AKAZE	Normal	3	2	3	2
El-21	AKAZE	Yüksek	3	3	4	2
El-22	SIFT	Yüksek	3	4	5	1
El-23	AKAZE	Yüksek	3	3	4	1

D. 3B YÜZEY AĞI İYİLEŞTİRMESİ

Son adım olarak, oluşturulan yüzey ağının kalitesini iyileştirmek ve yüzey nokta dağılımını daha homojen bir hale getirmek için MeshLab [28] kullanılmıştır. MeshLab, 3B yüzey ağlarını işlemek ve düzenlemek için kullanılan açık kaynaklı bir yazılımdır. Bu yazılım, yüzey ağlarını düzenlemek, temizlemek, iyileştirmek, denetlemek, işlemek ve doku ile kaplamak için bir dizi araçtan oluşmaktadır. Bu çalışmada, birbirlerine birimsiz ölçekte 0.0001 yakınlıkta bulunan noktalar birleştirilmiştir. Ayrıca, eski yüzey temsilinden yeni yüzey temsiline geçerken maksimum ortalama normal açı yer değiştirmesi 0,5 olacak şekilde yüzey nokta dağılımı sabit tutarak Laplacian düzeltmesi [29] uygulanmıştır.

Şekil 6, incelenen hafif çelik elemanlardan biri olan El-7 için oluşturulmuş orijinal ve iyileştirilmiş yüzey ağlarını göstermektedir. **Şekil 6(a)** ve **Şekil 6(b)**, iç ve dış görünüşleri kapsayan iki farklı perspektiften orijinal yüzey ağını göstermektedir. **Şekil 6(c)** ve **Şekil 6(d)** ise, iç ve dış görünüşleri kapsayan iki farklı perspektiften iyileştirilmiş yüzey ağını göstermektedir.



Şekil 6. El-7 için oluşturulan orijinal yüzey ağının (a) iç ve (b) dış gösterimi ve iyileştirilmiş yüzey ağının (c) iç ve (d) dış gösterimi.

IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Yürütülen çalışma sonucunda 23 adet hafif çelik C-kesitli elemanın yüzey ağları başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Aynı zamanda elde edilen yüzey ağlarının hafif çelik elemanlarda şekilsel kusur tespiti için kullanılabilirliği de tartışılmıştır.

Bu bölümde ilk önce, oluşturulan yüzey ağlarının doğruluğu araştırılmıştır. Bu adımda hafif çelik eleman boyutları için elle yapılan ölçümler oluşturulan 3B yüzey ağlarından elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra, elde edilen 3B yüzey ağlarını oluşturan nokta bulutları incelenmiş ve şekilsel kusur ölçümünde kullanılabilirliğini tartışabilmek içinse çizgisel çözünürlükleri hesaplanmıştır. Son olarak, elde edilen yüzey ağlarının şekilsel kusur çıkarımında kullanılabilirliği literatürdeki mevcut çalışmalarda raporlanan değerlerle kıyaslama yapılarak incelenmiştir.

A. OLUŞTURULAN YÜZEY AĞLARI İÇİN DOĞRULAMA

Görüntü çözünürlüğü ve kalitesi sınırlaması nedeniyle ardışık görüntüleri doğru şekilde eşleştirmek ve eşleşen görüntüleri kullanarak yüzey ağı oluşturmak zor bir işlemdir. Önceki çalışmalar, yüzey ağı hassasiyetinin yüzeyi oluşturan noktaların yoğunluğu, görüntü betimleyici eşleştirme kesinliği ve nesne yüzeyinin fiziksel özellikleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğunu ortaya koymuştur [30].

Bu çalışmada, oluşturulan yüzey ağlarının gerçekten hafif çelik eleman geometrisini temsil ettiğini gösterebilmek için elemanların mikrometreyle ölçülen boyutları ve yüzey ağlarını oluşturan nokta bulutlarından tespit edilen boyutlar karşılaştırılarak bir doğrulama yapılmıştır. Çünkü; eğer elde edilen yüzey ağları hatalıysa, incelenen hafif çelik elemanların gerçek yüzey geometrilerini temsil etmeyecektir. **Tablo 3**'te, hafif çelik elemanların hem mikrometreyle ölçülen hem de otomatik olarak nokta bulutlarından algılanan boyutları listelenmektedir. Gövde ve flanş uzunlukları **Şekil 1**'de gösterilen konumlarda tespit edilmiş ve ortalama değerleri hesaplanmıştır. Hata değerlerini hesaplamak içinse ölçülen boyutlar tespit edilen boyutlarla karşılaştırılmış ve elde edilen hata değerleri de **Tablo 3**'te verilmiştir. Nokta bulutu işleme ve boyut çıkarma işlemlerine ait detaylar ve örnekler Guldur [31] ve Guldur Erkal [32]'da yer almaktadır. Ayrıca, elde edilen verideki gürültü nedeniyle dudak boyutlarının çıkarılmasının mümkün olmadığı da unutulmamalıdır.

Tablo 3. Yüzey ağı doğrulama sonuçları.

Eleman	Ölçülen Boyutlar (mm)			Tespit Edilen Boyutlar (mm)			Hata (%)		
	Gövde	Flanş 1	Flanş 2	Gövde	Flanş 1	Flanş 2	Gövde	Flanş 1	Flanş 2
EI-1	90,70	48,70	48,90	88,78	49,58	49,56	-2,12	1,80	1,35
EI-2	90,90	49,00	48,70	92,46	49,74	49,53	1,72	1,51	1,70
EI-3	90,90	48,70	49,10	93,00	49,40	49,86	2,31	1,43	1,55
EI-4	90,80	48,80	49,00	88,70	49,70	49,82	-2,31	1,85	1,67
EI-5	90,80	48,90	49,10	92,82	49,60	50,00	2,23	1,44	1,83
EI-6	61,30	41,00	40,90	62,65	40,39	40,28	2,20	-1,49	-1,51
EI-7	73,10	46,00	45,40	74,79	46,85	46,05	2,31	1,85	1,44
EI-8	74,00	45,90	45,70	75,56	46,59	46,56	2,11	1,51	1,88
EI-9	88,60	51,60	45,20	90,27	52,57	45,81	1,88	1,88	1,35
EI-10	97,30	47,20	46,60	99,25	46,28	47,34	2,00	-1,95	1,59
EI-11	92,20	47,00	48,40	93,85	47,77	49,15	1,79	1,64	1,54
EI-12	74,20	45,70	46,30	75,50	46,44	47,05	1,75	1,62	1,63
EI-13	75,20	46,00	46,50	76,61	46,88	47,23	1,87	1,92	1,56
EI-14	88,80	49,50	47,90	90,30	50,18	47,07	1,69	1,38	-1,73
EI-15	91,50	50,60	47,40	89,42	51,40	48,14	-2,27	1,59	1,56
EI-16	91,80	50,10	47,40	89,93	50,87	48,23	-2,04	1,53	1,75
EI-17	90,70	48,20	49,60	92,70	49,01	50,43	2,20	1,69	1,68
EI-18	93,30	47,90	48,00	91,11	47,68	47,10	-2,35	-0,45	-1,87
EI-19	140,60	46,90	47,10	143,17	47,81	47,74	1,83	1,93	1,35
EI-20	91,80	52,10	50,90	93,81	53,08	51,65	2,19	1,88	1,48
EI-21	92,60	45,60	46,40	94,15	46,35	47,04	1,67	1,64	1,39
EI-22	94,90	49,50	49,60	92,79	50,22	50,33	-2,22	1,46	1,48
EI-23	141,60	49,80	47,90	144,72	50,69	48,67	2,20	1,79	1,61
					Ortalama	0,90	1,28	1,14	
					St. Sapma	1,86	1,04	1,11	

23 hafif çelik elemanın tümünün hem gövde hem de flanşları için hesaplanan hata yüzdeleri %3'ün altındadır. Gövde, Flanş 1 ve Flanş 2 için ortalama hata yüzdeleri sırasıyla %0,9, %1,28 ve %1,14 iken, standart sapmalar ise %1,86, %1,04 ve %1,11'dir. Hata yüzdelerinin gövde kısımlarında flanşlara kıyasla yüksek olduğu görülmektedir. Bu gövdenin iki noktada flanşlara bağlı olmasından ve oluşturulan yüzey ağlarının köşe kısımlarında sıkça gürültü görülmesinden kaynaklanmaktadır. Yürütülen doğrulama çalışması, toplanan nokta bulutlarının incelenen hafif çelik elemanların geometrisini doğru bir şekilde temsil ettiğini göstermiştir.

B. YÜZEY AĞI ÇÖZÜNÜRLÜĞÜ

Elde edilen yüzey ağlarının şekilsel kusur tespitinde kullanılabilirliğini doğrulamak için oluşturulan yüzey ağlarının incelenen hafif çelik elemanların geometrilerini doğru olarak temsil ettiğini göstermek yeterli değildir. Oluşturulan yüzey ağlarının şekilsel kusur tespitinde kullanılabilirliğini göstermek için elde edilen yüzey ağlarının çözünürlüklerinin detaylı bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir ve bu çözünürlüklerin şekilsel kusur tespiti gerçekleştirilebilmek için yeterli olup olmadığı araştırılmalıdır.

Elde edilen her bir yüzey ağını oluşturan nokta bulutundaki toplam nokta sayısı, nokta bulutlarının çizgisel çözünürlükleri (mm başına düşen nokta sayısı cinsinden) ve şekilsel kusur ölçüm yeterliliği için referans alınacak olan çözünürlükler *Tablo 4*'te verilmiştir.

Tablo 4. Oluşturulan yüzey ağlarını temsil eden nokta bulutlarındaki toplam nokta sayısı, hesaplanan çizgisel çözünürlük ve çözünürlük değerleri.

Eleman	Yüzey Ağlarındaki Nokta Sayıları	Çizgisel Çözünürlük (nokta sayısı/mm)	Çözünürlük (mm)
El-1	25132	8	0,12
El-2	21328	7	0,14
El-3	34988	13	0,08
El-4	36967	14	0,07
El-5	34817	13	0,08
El-6	16944	6	0,18
El-7	29588	10	0,10
El-8	24395	8	0,12
El-9	31535	11	0,09
El-10	30135	11	0,09
El-11	15770	6	0,18
El-12	25190	8	0,12
El-13	22781	6	0,16
El-14	34357	13	0,08
El-15	34147	13	0,08
El-16	29260	9	0,11
El-17	21790	6	0,18
El-18	9544	3	0,31
El-19	22451	6	0,16
El-20	25021	7	0,14
El-21	24543	7	0,15
El-22	19761	5	0,19
El-23	36130	14	0,07
Ortalama	26373	9	0,13

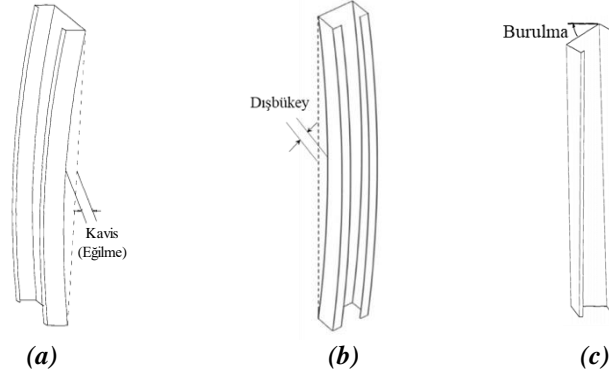
Sonuçlar oluşturulan yüzey ağlarının çözünürlüklerinin 0,07 ile 0,31 mm arasında değiştiğini göstermektedir. Tüm elemanlar için ortalama yüzey ağı çözünürlüğü ise 0,13 mm'dir. Oluşturulan yüzey ağları ortalama çözünürlük değerinden daha büyük boyutlu şekilsel kusurların tespitinde sorunsuzca kullanılabilir.

C. YÜZEY AĞI OLUŞTURMA SONUÇLARININ LİTERATÜRDEKİ ŞEKİSEL KUSUR TESPİT LİMİT DEĞERLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

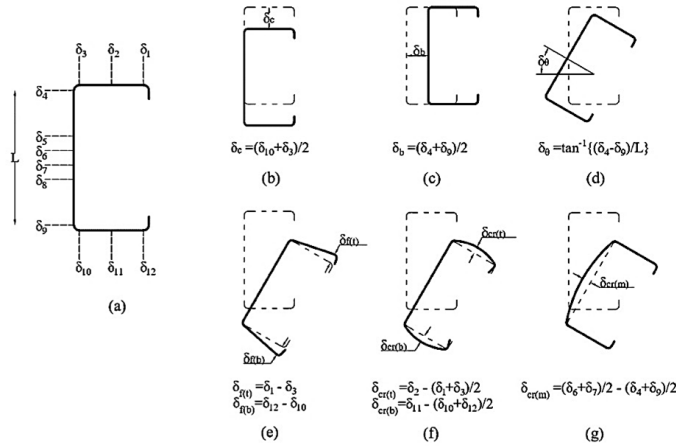
Son olarak, hesaplanan çözünürlük değerleri literatürdeki diğer araştırmalarda raporlanan veya uzunluğa bağlı bir formülle tanımlanan şekilsel kusur değerleri ile karşılaştırılmıştır. Hafif çelik elemanlardaki mevcut şekilsel kusurlar global ve lokal olarak iki ana grupta incelenmektedir. *Şekil 7*'de global şekilsel kusurlar olan kavis, dışbükey ve burulma gösterilmiştir. Global şekilsel kusurların eleman davranışını birebir etkilediği bilinmektedir. *Şekil 8* ise iyileştirilmiş lokal şekilsel kusur gösterimlerinden oluşmaktadır. Kesit düzeyinde *Şekil 8(a)*'da gösterilen konumlarda yer değiştirmeler tespit edilmekte ve bu yer değiştirmeler verilen formüller kullanılarak lokal şekilsel kusurların hesaplanmasında

kullanılmaktadır. Otomatik şekilsel kusur tespiti ve boyutlandırmasına yönelik detaylar Guldur Erkal ve Cagirci [33]'de yer almaktadır.

Yürütülen çalışmada incelenen hafif çelik eleman boyutları 900 ve 1200 mm arasında kaldığından bu iki değer limit olarak alınmıştır. **Tablo 5**, literatürdeki çalışmalarda raporlanan ve verilen denklemlere göre 900 ve 1200 mm uzunluğundaki hafif çelik elemanlar için hesaplanan ortalama ve maksimum şekilsel kusur değerlerini göstermektedir. 900 ve 1200 mm'lik eleman uzunlukları için ayrı ayrı hesaplama yapıldığı durumlarda, alt ve üst değerler aynı hücrede iki satır halinde verilmiştir. Üstteki değerler 900 mm değerlerini alttakiler ise 1200 mm için hesaplanan değerleri göstermektedir.



Şekil 7. Global şekilsel kusur gösterimleri: (a) Kavis, (b) dışbükey ve (c) burulma [34].



Şekil 8. İyileştirilmiş lokal 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 [33].

Tablo 5. 900 ve 1200 mm uzunluğundaki hafif çelik elemanlar için doğrudan raporlanan ve literatürde bildirilen denklemlere dayalı olarak hesaplanan ortalama ve maksimum şekilsel kusur değerleri.

Literatür	Lokal Dışbükey ($\delta_{cr(m)}$) (mm)		Açılma (δ_r) (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 [10]	0,51	1,25	4,32	7,29	0,35	0,73	0,15	0,28	-	-
Young [11]	0,41	0,99	1,16	2,10	0,15	0,81	0,09	0,78	-	-
Schafer ve Peköz [1]	0,54	-	0,12	-	-	-	-	-	-	-
Zeinoddini [14]	-	-	-	-	0,91	1,39	0,47	0,78	0,89	1,13
Zeinoddini ve Schafer [35]	-	-	-	-	0,40	1,39	0,26	0,78	0,91	2,75
					0,54	1,86	0,35	1,03		

Peterman [3]	0,48	1,05	0,89	1,76	0,74 0,99	2,66 3,55	0,57 0,76	1,28 1,71	0,37	1,02
Zeinoddini ve Schafer [6]		-		-	0,85 1,13	-	0,67 0,90		0,36	-
Selvaraj ve Madhavan [13]	3,51	8,6	5,65	10,66	5,90	24,30	2,36	6,50	3,24	8,85
Guldur Erkal ve Cagrici [33]	0,04 0,18	0,29 0,31	0,90 1,49	1,22 2,47	0,91 1,72	1,95 2,65	0,86 0,93	1,41 1,72	2,30 3,02	3,04 4,37
ECCS [36]	-	-	-	-	0,90 1,20	-	0,90 1,20	-	-	-
EN 1090 BS [37]	-	-	-	-	1,20 1,60	-	1,20 1,60	-	-	-
EN-1993-1-3 [38]/CEN [39]	0,45	-	0,90	-	-	-	-	-	-	-
AISI-S240 [40]	1,59	-	1,59	-	0,94 1,25	-	0,94 1,25	-	-	-
ASTM [41]	1,59	-	1,59	-	0,94 1,26	-	0,94 1,26	-	12,7	-

Elde edilen çözünürlük değerleri literatürdeki lokal dışbükey, açılma, kavis, dışbükey ve burulma için hesaplanan ortalama değerlerin minimumu ile karşılaştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalar referans alınarak 900-1200 mm eleman uzunluğu için hesaplanan ortalama şekilsel kusur değerlerinin minimumu Young [11] kullanılarak dışbükey için 0,09 mm olarak hesaplanmıştır. Oluşturulan yüzey ağlarından elde edilen çözünürlük değerlerinin birçoğu maalesef bu değer üzerinde kalmaktadır. Fakat, Young [11] ve Mulligan ve Peköz [10] hariç tutulduğunda diğer bütün çalışmalar için hesaplanan minimum dışbükey değerleri hesaplanan çözünürlük değerinin altında kalmaktadır. Dışbükey dışındaki diğer şekilsel kusurlar için hesaplanan minimum değerlerse zaten hesaplanan nokta bulutu çözünürlük değerlerinin üzerinde kalmaktadır. Bu karşılaştırma, elde edilen yüzey ağı çözünürlüğünün şekilsel kusur tespiti ve ölçümü için yeterli olduğunu göstermektedir. Fakat, oluşturulan 3B yüzey ağlarını dışbükey hesaplamalarında kullanırken dikkatli olunması gerekmektedir. Böylece, oluşturulan yüzey ağlarının hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusurların tespiti ve boyutlandırması için kullanılabilir olduğu değerlendirilmiştir.

V. SONUÇ

İnce cidarlı hafif çelik elemanlarda nakliye, kurulum ve üretim sırasında şekilsel kusurlar oluşabilmektedir. Bu şekilsel kusurlar eleman davranışını birebir etkilemektedir. Dolayısıyla incelenen hafif çelik elemanın davranışını doğru tayin edebilmek için eleman üzerinde bulunan şekilsel kusurların tespit edilmesi ve analizler sırasında göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Ancak, şekilsel kusur tespiti için kullanılacak verileri toplamak için genelde özel ya da gelişmiş ekipmanlar kullanılmaktadır ve elde edilen verinin işlenmesi için belirli bir uzmanlık seviyesi gerekmektedir. Bu çalışmada, hafif çelik elemanlardaki şekilsel kusurların doğru tespit edilmesi ve boyutlandırılmasında kullanılabilecek 3B yüzey ağlarının düşük maliyetli kameralar aracılığı ile toplanan 2B görüntülerden elde edilmesi amaçlanmıştır.

Öncelikle 23 tane hafif çelik eleman üzerinden tripoda yerleştirilmiş bir kamera aracılığıyla görüntü toplanmıştır. Bunun için eleman çevresinden 10'ar derecelik açı değişimiyle 36 tane görüntü toplayacak bir test düzeneği geliştirilmiştir. Toplanan görüntülerden 3B yüzey ağı elde edebilmek için öncelikle görüntüler kalibre edilmiş ve iyileştirilmiştir. Daha sonra ise ardışık görüntüler arasında 3B yüzey ağı oluşturmak için yeterli sayıda anahtar nokta olduğu teyit edilmiştir. Bunu takiben 3B yüzey ağları oluşturulmuş ve veri kalitesini arttırmak için iyileştirme yapılmıştır.

Oluşturulan 3B yüzey ağlarının şekilsel kusur tespitinde kullanılabilirliğini araştırmak için öncelikle oluşturulan yüzey ağlarından çıkarılan gövde ve flanş boyut bilgileri ile elle yapılan ölçüm değerleri karşılaştırılmıştır. En büyük boyutsal hata %3 olarak hesaplanmıştır. Sonrasında her bir yüzey ağını oluşturan nokta bulutları incelenmiş ve çözünürlük değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan çözünürlük değerleri literatürdeki şekilsel kusur tespit limit değerleriyle karşılaştırılmıştır. Oluşturulan 3B yüzey

ağlarının, dışbükey olarak tanımlanan şekilsel kusur dışındaki hem lokal hem de global şekilsel kusurların tespitinde kullanılabilceği değerlendirilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, bu çalışmada verilen yöntemle oluşturulan 3B yüzey ağlarının otomatik şekilsel kusur tespitinde kullanılması amaçlanmaktadır. Tespit edilen şekilsel kusurlar eleman davranışını incelemek için oluşturulan analiz modellerine değişik şekillerde eklenebilmektedir (mod şekillerine çarpan tanımlama, direk olarak model geometrisini değiştirme vb.). Tespit edilen şekilsel kusurlar analiz modellerine entegre edilmeli ve eleman davranışını üzerindeki etkileri gözlemlenmelidir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışma Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından FHD-2017-15248 No'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazar, test kurulumu tasarımı ve üretimi için destek ve rehberliklerinden dolayı Parkon İnşaat firmasına teşekkür eder. Bu makalede ifade edilen görüşler, bulgular ve sonuçlar yazara aittir ve Hacettepe Üniversitesi'nin görüşlerini yansıtmayabilir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] B. Schafer and T. Peköz, "Computational modeling of cold-formed steel: Characterizing geometric imperfections and residual stresses," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 47, no. 3, pp. 193-210, 1998, doi: 10.1016/S0143-974X(98)00007-8.
- [2] D. Dubina and V. Ungureanu, "Effect of imperfections on numerical simulation of instability behaviour of cold-formed steel members," *Thin-Walled Structures*, vol. 40, no. 3, pp. 239-262, 2002, doi: 10.1016/S0263-8231(01)00046-5.
- [3] K. D. Peterman, "Experiments on the stability of sheathed cold-formed steel studs under axial load and bending," Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, John's Hopkins University, Baltimore, MD, USA, 2012.
- [4] Z. Sadovský, J. Kriváček, V. Ivančo, and A. Ďuricová, "Computational Modelling of Geometric Imperfections and Buckling Strength of Cold-Formed Steel," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 78, pp. 1-7, 2012.
- [5] M. Lecce and K. J. Rasmussen, "Finite element modelling and design of cold-formed stainless steel sections," , Centre for Advanced Structural Engineering, Sydney, Australia, R845, 2005.
- [6] V. Zeinoddini and B. Schafer, "Simulation of geometric imperfections in cold-formed steel members using spectral representation approach," *Thin-Walled Structures*, vol. 60, pp. 105-117, 2012, doi: 10.1016/j.tws.2012.07.001.
- [7] X. Zhao, M. Tootkaboni, and B. Schafer, "Development of a laser-based geometric imperfection measurement platform with application to cold-formed steel construction," *Experimental Mechanics*, vol. 55, no. 9, pp. 1779-1790, 2015, doi: 10.1007/s11340-015-0072-7.
- [8] L. McAnallen, D. Padilla-Llano, X. Zhao, C. Moen, B. Schafer, and M. Eatherton, "Initial geometric imperfection measurement and characterization of cold-formed steel C-section structural members with 3D non-contact measurement techniques," in *Proceedings of the Structural Stability Research Council*, Toronto, Canada, March 25-28, 2014.
- [9] A. L. Salomon, D. Fratamico, B. W. Schafer, and C. D. Moen, "Full field cold-formed steel column buckling measurements with high resolution image-based reconstruction," in *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council*, Orlando, FL, USA, April 12-15, 2016.

- [10] G. P. Mulligan, "The influence of local buckling on the structural behavior of singly-symmetric cold-formed steel columns," Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, USA, 1983.
- [11] B. Young, "The behaviour and design of the cold formed channel columns," Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, University of Sydney, Sydney, Australia, 1997.
- [12] X. Zhao, M. Tootkaboni, and B. W. Schafer, "Laser-based cross-section measurement of cold-formed steel members: model reconstruction and application," *Thin-Walled Structures*, vol. 120, pp. 70-80, 2017, doi: 10.1016/j.tws.2017.08.016.
- [13] S. Selvaraj and M. Madhavan, "Geometric imperfection measurements and validations on cold-formed steel channels using 3D noncontact laser scanner," *Journal of Structural Engineering*, vol. 144, no. 3, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001993.
- [14] V. M. Zeinoddini, "Geometric imperfections in cold-formed steel members," Ph.D dissertation, Civil Engineering, Johns Hopkins University, Baltimore, MD, 2011.
- [15] S. Farzarian, A. Louhghalam, B. Schafer, and M. Tootkaboni, "Geometric imperfections in CFS structural members: Part I: A review of the basics and some modeling strategies," *Thin-Walled Structures*, vol. 186, p. 110619, 2023, doi: 10.1016/j.tws.2023.110619.
- [16] M. R. Jahanshahi and S. F. Masri, "Adaptive vision-based crack detection using 3d scene reconstruction for condition assessment of structures," *Automation in Construction*, vol. 22, pp. 567-576, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.11.018.
- [17] M. M. Torok, M. Golparvar-Fard, and K. B. Kochersberger, "Image-based automated 3D crack detection for post-disaster building assessment," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. Technical Paper A4014004, pp. 1-13, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000334.
- [18] Y.-F. Liu, S. Cho, B. Spencer Jr, and J.-S. Fan, "Concrete crack assessment using digital image processing and 3D scene reconstruction," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 30, no. 1, p. 04014124, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000446.
- [19] Z. Zhou, J. Gong, and M. Guo, "Image-based 3D reconstruction for posthurricane residential building damage assessment," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 30, no. 2, p. 04015015, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000480.
- [20] R. Kalfarisi, Z. Y. Wu, and K. Soh, "Crack detection and segmentation using deep learning with 3D reality mesh model for quantitative assessment and integrated visualization," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 34, no. 3, p. 04020010, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000890.
- [21] C. Koch, K. Georgieva, V. Kasireddy, B. Akinci, and P. Fieguth, "A Review on Computer Vision Based Defect Detection and Condition Assessment of Concrete and Asphalt Civil Infrastructure," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 29, no. 2, pp. 196-210, 2015, doi: 10.1016/j.aei.2015.01.008.
- [22] Z. Ma and S. Liu, "A review of 3D reconstruction techniques in civil engineering and their applications," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 37, pp. 163-174, 2018, doi: 10.1016/j.aei.2018.05.005.
- [23] MatLab, *MATLAB and Statistics Toolbox Release 2019a*. Natick, MA: The MathWorks, Inc., 2019.
- [24] Regard3D, *Regard3D: A Structure-from-motion Program*. Regard3D, 2018.

- [25] Meshroom, *Meshroom*. AliceVision, 2021.
- [26] D. G. Lowe, "Object recognition from local scale-invariant features," in *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, vol. 2: IEEE, pp. 1150-1157.
- [27] P. F. Alcantarilla and T. Solutions, "Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces," *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, vol. 34, no. 7, pp. 1281-1298, 2011, doi: 10.1109/83.661190.
- [28] MeshLab, *MeshLab*. CNR, 2022.
- [29] G. A. Hansen, R. W. Douglass, and A. Zardecki, *Mesh enhancement: selected elliptic methods, foundations and applications*. London, United Kingdom:Imperial College Press, 2005.
- [30] Y. Zhang, "Challenges and Advances in Image-Based Geometric Modeling and Mesh Generation," in *Image-Based Geometric Modeling and Mesh Generation*, Y. Zhang Ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, pp. 1-10..
- [31] B. Guldur, "Laser-based Structural Sensing and Surface Damage Detection," Ph.D. Dissertation, Civil and Environmental Engineering, Northeastern University, Boston, Massachusetts, 2014.
- [32] B. Guldur Erkal, "Image-Based 3D Surface Reconstruction of Cold-Formed Steel C-Sections," in *Proceedings of the 2019 European Conference on Computing in Construction*, Chania, Crete, Greece 2019.
- [33] B. Guldür Erkal and Ö. G. Çağrıçı, "Automated geometric imperfection detection and quantification of CFS members from point clouds," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 26, no. 9, pp. 3888-3904, 2022, , doi: 10.1007/s12205-022-0795-9.
- [34] O. G. Cagrici, "3D point cloud-based imperfection determination of cold-formed steel members for numerical modeling," M.S. thesis, Department of Civil Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey, 2021.
- [35] V. Zeinoddini and B. W. Schafer, "Global imperfections and dimensional variations in cold-formed steel members," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 11, no. 05, pp. 829-854, 2011, doi: 10.1142/S0219455411004361.
- [36] ECCS, *European recommendations for the design for the design of light gauge steel members*. Brussels, Belgium:European Convention for Constructional Steelwork, 1987.
- [37] *Execution of steel structures and aluminium structures - Part 2: Technical requirements for steel structures*, EN 1090-2:2008, British Standard, UK, 2008.
- [38] *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*, EN-1993-1-3, Brussels, Belgium, 2006.
- [39] *Eurocode 3: Design of steel structures. I–V: Plated structural elements*, EN-19931-5:2006/AC:2009 , Brussels, Belgium, 2009.
- [40] *North American Standard for Cold-Formed Steel Structural Framing*, AISI-S240, Washington, D.C., USA, 2015.
- [41] *Standard specification for cold-formed steel structural framing members*, ASTM C955-17, West Conshohocken, PA, USA, 2017.