

# Alüminyum Profil Bükümünde Dolgu Takviyesinin Etkisinin İncelenmesi

## Investigation of the Effect of Filler Reinforcement in Aluminum Profile Bending

Esra ÇETİN<sup>1</sup> , Yiğit GÜLLER<sup>1</sup> , Eren BOYACI<sup>1</sup> , Kübra BAŞARAN<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş. Ar-Ge Merkezi, İstanbul, Türkiye

### Öz

Teknolojideki gelişmeler ile beraber mimari tasarımlarda artan çeşitlilik ile kullanıcıya/sektöre farklı seçenekler sunma imkanı yakalanmaktadır. Tasarımın çeşitlenmesi ile bu tasarımların üretilebilmesi için üretim yöntemlerinde de gelişmeler yaşanmaktadır. Teknolojik imkanların yapı, malzeme ve inşaat yöntemlerini de geliştirmesiyle, cephe üzerinde karmaşık geometrileri yakalayabilmek için kullanılan profillerin farklı açı, boyut ve ölçülerde bükülmesi kolaylaşmıştır. Bu çalışmada Alüminyum doğrama ve cephe sistemlerinde kullanılan ekstrüzyon yöntemi ile üretilen alüminyum profillerin üç silindirik bükme yöntemi kullanılarak bükülmesiyle ilgili proses parametrelerinin tespit ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Profil büküm prosesi için sonlu elemanlar analiz programı olarak Ansys kullanılmıştır. Ansys ile yapılan simülasyon sonuçları ile üç silindirik bükme cihazında bükülen profillerin karşılaştırmaları yapılmıştır. Üretim sürekliliği ve maliyet için önemli parametrelerden biri olan profiller, içerisi dolgu malzemeli ve dolgu malzemesiz olarak profillerin iki eksenli büküm deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel teorik ve sayısal çalışmalar yapılarak dolgu malzemeli ve boş profillerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Dolgu malzemeleri olmadan yapılan büküm işlemlerinde istenmeyen deformasyonlar ve profilin geometrisinde bozulmalar görülmüş olup bunların sayısal analizlerle de belirlenme çalışmaları hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ekstrüzyon, Profil, Alüminyum, Büküm, Dolgu Maddesi.

### Abstract

With the developments in technology and the increasing diversity in architectural designs, it is possible to offer different options to the user/industry. With the development of technological opportunities, construction, materials and construction methods, it has become easier to bend the profiles used to capture complex geometries on the facade at different angles, sizes and dimensions. In this study, determination and improvement of the process parameters related to the bending of aluminum profiles produced by the extrusion method used in aluminum joinery and facade systems using the three-rolling bending method were carried out. Ansys was used as the finite element analysis program for the profile bending process. Comparisons were made between the simulation results made with Ansys and the bent profiles in the three-rolling bending device. Profiles, one of the important parameters in terms of production continuity and cost, biaxial bending tests of the profiles with and without filling material were carried out. Experimental, theoretical and numerical studies were carried out and the results of the filled and without filled profiles were compared. Undesirable deformations in bending operations without filling materials and deformations in the geometry of the profile were observed, and it was aimed to determine them by numerical analysis.

**Keywords:** Extrusion, Profile, Aluminum, Bending, Filler.

## I. GİRİŞ

Endüstri 4.0 çağına geçişle birlikte metal şekillendirme sektörü de bu köklü değişikliklerden etkilenmekte ve gelişmektedir. İmalattaki bu devrimin en önemli yönlerinden biri ürünlerin, makinelerin ve süreçlerin potansiyellerini artırmak, geleneksel seri üretimden kitlesel özelleştirme için daha fazla talep tipi üretime geçişi mümkün kılmaktır. Binaların ve kentlerin yüzü olan cepheler, tasarımları ile kente ve kullanıcıya etki eden bölümlerdir. Cephe tasarımında biçim, boyut, renk, kullanılan malzeme gibi birçok önemli parametre vardır. Özellikle cephenin bütününde görsel olarak varlığını gösteren tasarımın biçimi, yer aldığı çevre içerisinde hem işlevsel hem de görsel olarak rol oynamaktadır. İki boyutta bükülen profiller, mimari endüstrisinde artan çeşitlilik ve talepleri karşılamak için giderek daha fazla dikkat çekmektedir [1].

Bu ihtiyaç, yeni ve yenilikçi şekillendirme teknolojilerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bükme bazı şekillendirme teknolojileri, profil benzeri ürünlerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu süreçlerin geliştirilmesi ve optimizasyonu zaman alıcı aynı zamanda maliyetlidir. Bu nedenle, sonlu eleman simülasyonları,

üretim öncesinde profil tasarım parametrelerine ve çıktının kalite güvencesine yol gösterici olarak çok sık kullanılmaktadır [2]. Bu çalışmada, bir alüminyum profilin üç silindri bükülmesini analiz etmek için Ansys sonlu eleman programı kullanılmıştır.

Bu sürecin üç boyutlu bir sonlu eleman modeli, temas sınır koşul şartları, malzeme özellik tanımları, ağ oluşturma tekniği vb. gibi birkaç temel tekniğin çözümüne dayalı olarak oluşturulmuştur. Bugüne kadar bu tür ürünlerin farklı gereksinimlerine yönelik döner çekme bükme rotary draw bending (RDB), gerdirme bükme, tork üst üste uzamsal bükme torque superposed spatial bending (TSSB) ve üç silindri bükme three-roll bending (TRB) gibi bir dizi yöntem geliştirilmiştir [3].

Çalışmada bu yöntemlerden, profillerin çok çeşitli kesitlerin bükülmesine olanak sağlayan TRB yöntemi kullanılmıştır. TRB yönteminin avantajı, bükme şeklinin mekanik olarak ayarlanmasıdır, bu da daha yüksek esnekliğe ve daha düşük üretim maliyetine yol açmakta ve seri üretim için tercih edilir kılınmaktadır [4].

TRB yöntemi ile bükümün avantajları yanında dezavantaj olarak bükülme sırasında boş profillerin dolu profillere oranla bükülmeye karşı dayanıksız olduğu gözlemlenmiştir. Bükülmeye karşı dayanıklılık için ince duvarlı kare profillerin takviye optimizasyonu kapsamında enerji absorbe etme ve koruma performansını değerlendirmek için SEA (spesifik enerji absorpsiyonu) ve CLE (çarpma yükü verimliliği) iki temel gösterge tanıtılarak SEA ve CLE değerlerini, geleneksel boş profil ile karşılaştırıldığında sırasıyla %93,5 ve %68,1 oranında önemli ölçüde iyileştirdiği bulunmuştur [5]. Dolgu destekli merdane bükme işleminin deformasyon davranışının malzemenin değişken kalınlıkta silindirin eğrilik tutarlılığını iyileştirebildiğini göstermiştir. Dolgu malzemesinin sertliğinin artması, naylon-metal kalınlık oranının azalması ve silindir darbesinin artmasıyla rulo bükülmüş ince duvarlı alüminyum silindirin yarıçapının azaldığını ve uygun kalınlık telafisinin dolgu malzemesi olduğu belirtilmiştir [6]. Çalışmada maliyet ve proste uygulanabilirlik açısından dolgu malzemesi olarak silis kumu, simülasyon çalışmasında ise PVC Foam seçilmiş ve profil büküm işleminde dolgu etkisinin deneysel ve simülasyon analizleri yapılmıştır.

A. Wang ve arkadaşları tarafından sunulan çalışmaya dayanarak TRB yönteminde büküm kusurları ve büküm kontrol stratejisini etkileyen önemli parametrelerden biri de büküm profilin kesitidir [7]. Bu doğrultuda simülasyonda profil kesit belirleme çalışmaları yapılmıştır.

C. Chen ve arkadaşları, geri esnemeyi azaltmak için süreç parametrelerini optimize etmek ve geri esneme

sapması üzerindeki etki yarasını kontrol etmek üzerine çalışma yaparak, yatay bükülme yarıçapı ve dikey bükülme yarıçapı, Y profilinin geri esneme sapması üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu görmüş, yatay bükülme yarıçapındaki artışla, yatay bükülme ve dikey bükülmenin geri esneme sapmasının giderek azaldığını gözlemlemişlerdir [8].

Yukarıdaki çalışmalar, deneysel ve sayısal yöntemlerin büküm analizinde yaygın olarak kullanıldığını ve ilgili şekillendirme işleminde belirli bir kesite sahip profiller için bunu etkili bir şekilde tahmin edebileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada pek çok mühendislik alanında yaygın olarak uygulanan alüminyum profillerin dolgu malzemeli ve dolgu malzemesiz olarak aksel sıkıştırma, eğilme momenti veya birleşik yük altındaki davranışları teori, deney ve simülasyon yoluyla kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

Bununla birlikte, bu araştırmalar, sayısal tahmin ve kontrol stratejisini içermeden, üç silindri bükme işleminde mimari sistemde kullanılan alüminyum profil parçalarının dolgulu ve dolgunsuz bükülme etkilerine odaklanılmamıştır. Bu nedenle, güvenilir bir sonlu eleman analiz modeli oluşturmak ve hadde bükmede bu tür profiller için şekillendirme kalitesini iyileştirmek için ilgili kontrol stratejileri geliştirmek için bu çalışma yapılmıştır.

## II. MATERYAL METOT

### 2.1. Malzeme Özellikleri

Mimari cephe sistemlerindeki eğimli ve karmaşık tasarımlar için en çok tercih edilen 6000 serisinden 2 farklı geometriye sahip alüminyum profiller belirlenerek çalışma ve analizler yapılmıştır.

6000 seri alüminyum malzeme özellikleri Young modülü E, yoğunluk  $\rho$  ve Poisson oranı kullanılarak Ansys de tanımlamalar yapılmıştır.

Sayısal ve deneysel incelemelerde 2800 mm uzunluğunda ve yaklaşık 15 kg ağırlığında alüminyum profil kullanılmıştır. Profil malzemesi için izotropik yapısal davranış varsayılmıştır. Mekanik özellikler ise akma mukavemeti = 240 MPa, elastisite modülü E = 69 GPa, poisson katsayısı  $\nu = 0.33$ , yoğunluk  $\rho = 2.71 \text{ g / cm}^3$  ve sürtünme katsayısı 0,32 olarak tanımlanmıştır.

Merdane malzemesi için Ansys programında rijit malzeme olarak yapı çeliği kullanılmıştır. Mekanik özellikler ise akma mukavemeti = 235 MPa, elastisite modülü E = 210 GPa, poisson katsayısı  $\nu = 0.33$ , yoğunluk  $\rho = 7.850 \text{ g / cm}^3$  ve sürtünme katsayısı 0,32 olarak tanımlanmıştır.

Deneysel çalışma için tercih edilen kestamit mardanelerin özellikleri ise; akma mukavemeti = 80

MPa, elastisite modülü  $E = 3.1 \text{ GPa}$ , poisson katsayısı  $\nu = 0.39$ , yoğunluk  $\rho = 1.15 \text{ g / cm}^3$  ve sürtünme katsayısı 0,36 olarak tanımlanmıştır [9].

Deneyisel çalışmalarda , dolgu malzemesi olarak üretim hattında tekrar tekrar kullanılabilir malzeme olan silis kumu tercih edilmiştir. Silis kumu için Young modülü 19.89 GPa, poisson oranı 0,3, kayma modülü 76.9 MPa olarak tarif edilmiştir [10]-[11].

Ansys programında dolgu malzemesi için PVC Foam atanmıştır. PVC Foam young modülü 1.1 GPa, poisson oranı 0,3, kayma modülü (Shear modulus) 27 MPa olarak tanımlanmıştır.

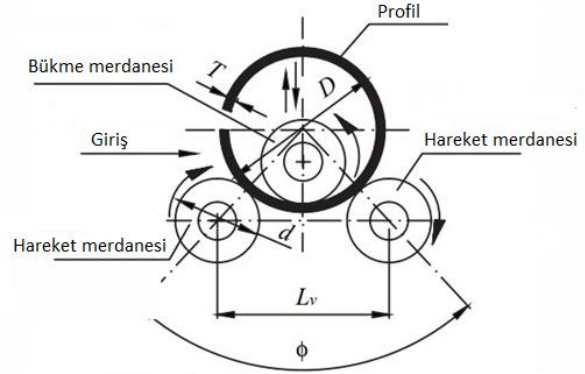
## 2.2. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

TRB yöntemi ile bükmenin sonlu eleman simülasyonu için ilk koşul, sonlu eleman modelinin oluşturulması ve sınır koşullarının belirlenmesidir. Simülasyon sonuçları, kuruluş modeli ile deneysel sonuç arasındaki eşleştirme durumlarından doğrudan etkilenmektedir.

Üç silindirli bükme makinesi için Ansys’de kullanılan model, gerçek ekstrüzyon boyutuna ve işleme teknolojisine göre oluşturulmuştur (Şekil 1).

Bu çalışmanın Ansys tanımlamasında “Yüzeyden yüzeye (surface to surface)” temas tipi, profil ve tüm yüzeyin arasındaki temas davranışlarını tanımlamak için kullanılmıştır. Büküm sırasında profil ve yüzey arasındaki kayma davranışlarını tanımlamak için ise

“Sürtünmeli kayma tipi (frictional contact)” kullanılmıştır.

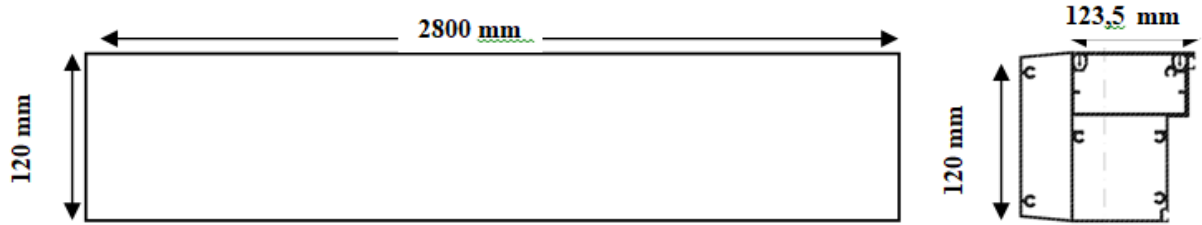


Şekil 1. Üç Silindirli Bükme [12].

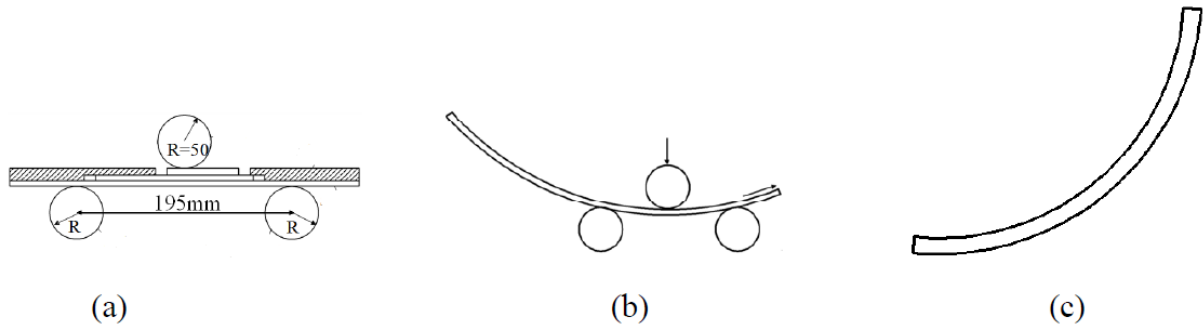
## 2.3. Deneyisel TRB Numunesinin oluşturulması

TRB Büküm için 2800mm × 120 mm × 123,5 mm ebatlarında bir numune profili tasarlanmıştır (Şekil 2). Alüminyum profil üzerinde Şekil 2’de görüldüğü gibi farklı ölçülerde üç bölüm bulunmaktadır. Dolgulu bükümde, dolgu malzemesi bu b 2800 mm ldurarak büküm gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, değişken kalınlıkta karmaşık mimari tasarımlarda kullanılmak üzere alüminyum profillerin üretimi için üç silindirli bükme makinesi kullanılmıştır.



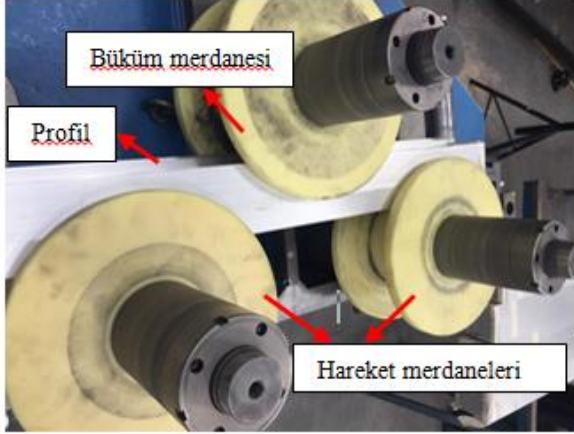
Şekil 2. Alüminyum profilin geometrik boyutları



Şekil 3. Üç Silindirli Bükme adımları [6].

Bükme adımları Şekil 3'te gösterilmiştir:

- (a) Bükülecek profil tabaka hatta yerleştirilir;
- (b) Üst silindir ve iki alt silindiri ileri doğru hareket ettirilir ve kademeli olarak bükülür;
- (c) Belirli bir eğrilige sahip profil tabaka merdaneler arasında ilerleyerek şekillendirilir.



Şekil 4. Deneysel çalışmaların yapıldığı TRB makinesi.

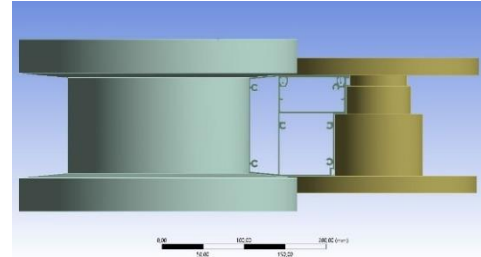
Şekil 4, mevcut incelemede uygulamanın gerçekleştirildiği TRB makinesini göstermektedir. Merdaneler için yaygın olarak ısıl işlem görmüş çelik veya kestamit kullanılmaktadır. Bu çalışmada hızlı ve kolay şekillendirilebilmenin yanında düşük maliyet avantajlarından dolayı deneysel çalışmalarda kestamit tercih edilmiştir. Yatak ile profil arasındaki sürtünmeyi azaltıp rahat ilerlemesini sağlamak için WD40 ve uçucu yağ kullanılmıştır. Büküm işlemleri silindir başına maksimum tork 3000 Nm (3 kNm) kapasiteye sahip TRB makinesinde gerçekleştirilmiştir [13]. Alüminyum profil, kalıp çapı 10 inch olan 4000 tonluk alüminyum ekstrüzyonda işlenmiştir. Silis kumu profili tam doldurması için dikkatlice hazırlanarak, büküm işlemi sırasında dolgu malzemesinin aksel olarak hareket etmesini önlemek amacıyla başlangıçta profil uçları kapaklar ile kapatılarak sabitlenmiştir. Büküm işleminde çıkış hızı farkıyla bükülme yarıçapının oluşumu her zaman önce gerçekleşmekte ve bükülme yarıçapı yatak yüzü kenarında başlamazsa, deformasyon kısmı artmaktadır” Ekstrüzyon işlemi sırasında ekstrüde profillerin bükülmesi” Bu veriler doğrultusunda içi dolu profiller 1 sn'de 135° Açısal hız: 2,3 rad/s ve içi boş profiller ise 1 sn'de 360° Açısal hız: 6,2 rad/s ile büküm işlemine tabii tutulmuştur.

Elde edilen profillerin büküm sonu fotoğrafları ve radyus değerleri bulgular kısmında sunulmaktadır. Bu şekillerin her biri, bu profil tipi için araştırılan tüm parametre kombinasyonları dahil olmak üzere, 6000 serisi alüminyumun davranışını temsil etmektedir.

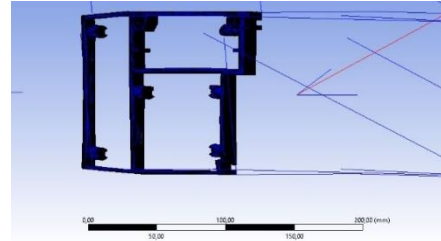
### III. BULGULAR

#### 3.1 Sonlu Eleman Analizi Sonuçları

Ansys analizinde boş profil ve PVC Foam dolgu profillerin bükümü simüle edilmiştir. Simülasyonda içi boş büküm öncesi ve sonrası kesitler Şekil 5'te, içi dolu büküm öncesi ve sonrası kesitler Şekil 6'da yer almaktadır.

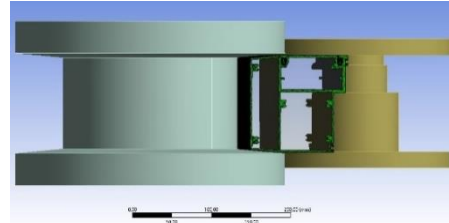


(a)

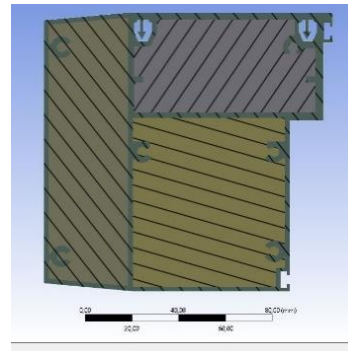


(b)

Şekil 5. (a) İçi boş büküm öncesi kesit, (b) İçi boş büküm sonrası kesit.



(a)



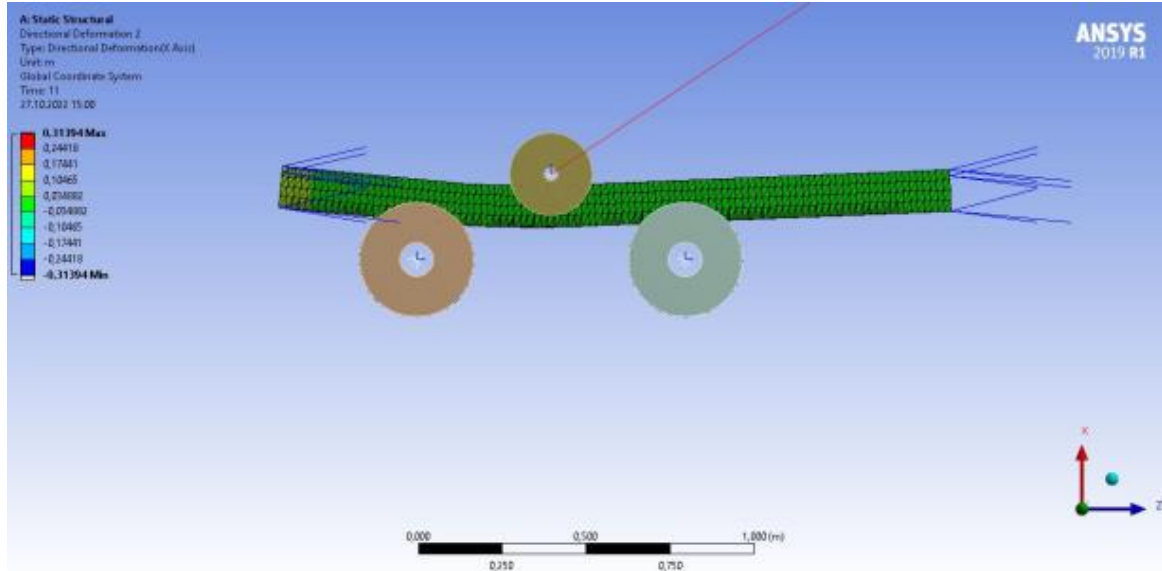
(b)

Şekil 6. (a) İçi dolu büküm öncesi kesit, (b) İçi dolu büküm sonrası kesit.

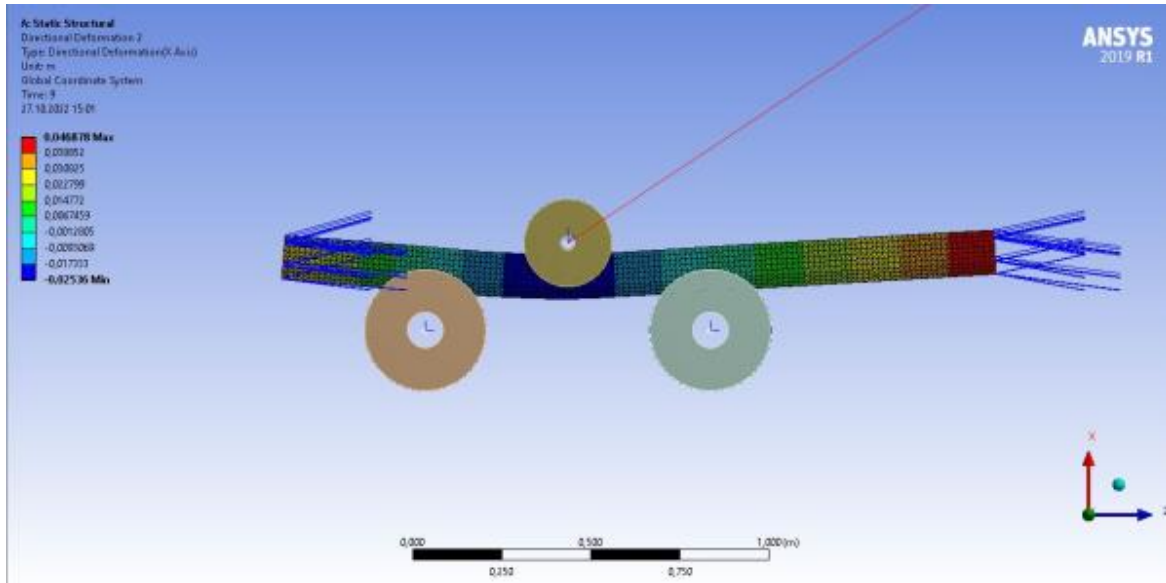
Simülasyon sonrası boş profilin radyus görseli ile PVC Foam dolgu profilin radyus görseline Şekil 7'de yer verilmiştir.



Şekil 7. (a) İçi boş büküm sonrası radyus değeri, (b) İçi dolu büküm sonrası radyus değeri.



(a)

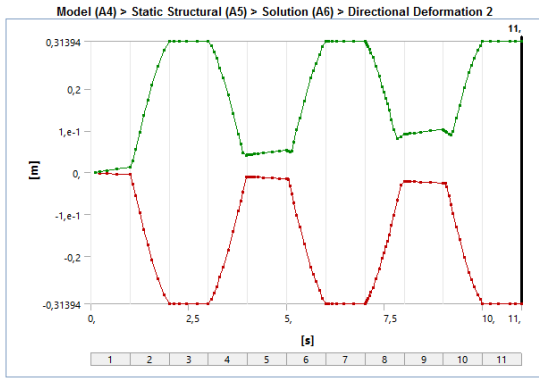


(b)

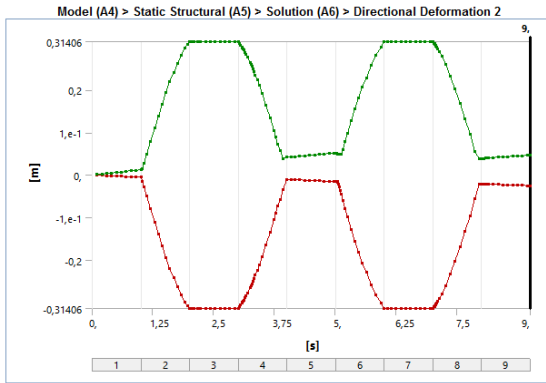
Şekil 8. (a) İçi boş büküm sonrası deformasyon , (b) İçi dolu büküm sonrası deformasyon.



İçi boş profil ve PVC Foam dolgulu profillerin 25 mm merdane hareketi sonucunda deformasyon değişimi incelenmiştir. Şekil 8'de içi boş büküm sonrası deformasyon ve içi dolu büküm sonrası deformasyon görselleri ile deformasyon değerleri yer almaktadır. Şekil 8(a) görselinde dolgu malzemesiz profili analiz ettiğimizde minimum deformasyonun 34 mm , maksimum deformasyonun ise 313 mm olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 8(b) görselinde dolgu malzemeli profili analiz ettiğimizde minimum deformasyonun 1 mm, maksimum deformasyonun ise 40 mm olduğu gözlemlenmiştir. Profillerin hareket halindeki deformasyon grafikleri ise Şekil 9'da gösterilmektedir.



(a)



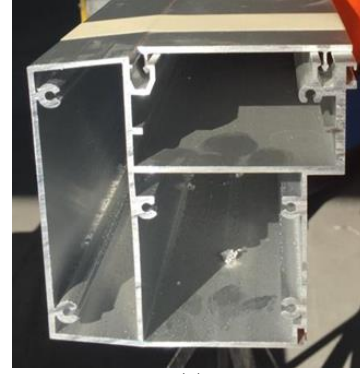
(b)

Şekil 9. (a) İçi boş profilin hareket halindeki deformasyon tablosu, (b) İçi dolu profilin hareket halindeki deformasyon tablosu.

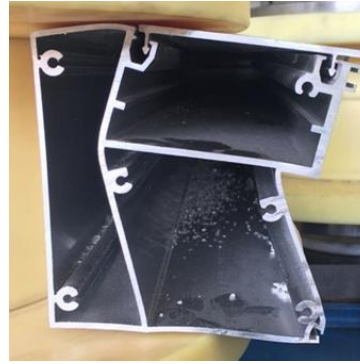
Analizde Şekil 9'da görüldüğü üzere merdanelerin hareket halindeki mesafe değerlerinin değişkenliğine göre deformasyon değerleri değişkenliği incelenmiştir. Analiz sonucuna göre PVC Foam dolgu malzemeli profilin içi boş profile göre daha düşük deformasyona sahip olduğu gözlemlenmiştir.

### 3.2. Deneysel Büküm Sonuçları

Deneysel büküm ile boş profil ve silis kumu dolgulu profillerin bükümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'da içi boş büküm öncesi kesit ve içi boş büküm sonrası kesit görselleri, içi dolu büküm öncesi ve sonrası kesit görselleri Şekil 11'de yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 10. (a) İçi boş büküm öncesi kesit, (b) İçi boş büküm sonrası kesit.



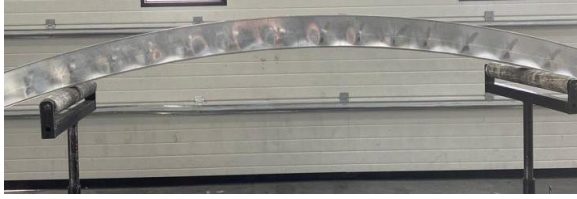
(a)



(b)

Şekil 11. (a) İçi dolu büküm öncesi kesit, (b) İçi dolu büküm sonrası kesit.

Deney sonrası dolgunsuz profil ile silis kumu dolgulu profilin görseline Şekil 12’de yer verilmiştir.



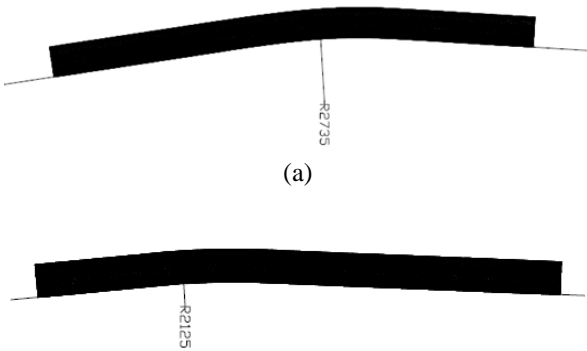
(a)



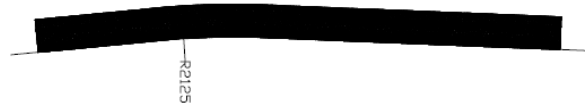
(b)

**Şekil 12.** (a) Dolgunsuz profilin deney sonrası görseli, (b) Silis kumu dolgulu profilin deney sonrası görseli.

Deney sonrası içi boş profilin radyus görseline ile silis kumu dolgulu profilin radyus görseline Şekil 13’te yer verilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 13.** (a) Deney sonrası içi boş büküm sonrası radyus değeri, (b) Deney sonrası içi dolu büküm sonrası radyus değeri.

#### IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, alt ve yan silindirlerin silindirik ve dışbükey geometrileri olmak üzere 3 boyutlu model ile FEA modeli oluşturulmuş ardından ansys çıktısı deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Deneysel ve analiz çalışmalarında benzer deformasyon sonuçları elde edildiğinden, ansys geometri, profil boyutu, profil ve merdaneler arası sürtünme katsayısı ve dolgu malzemesi kullanımı gibi farklı parametrelere sahip FEA modeli oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda, dolgu malzemesi faktörünün önemi, dolgu malzemesiz çekilen profil ile kıyaslanarak tartışılmıştır.

Metal şekillendirme alanındaki araştırmacılar için bu çalışma ile alüminyum bir profilin 2 eksenli bükülmesinin FEA simülasyonu ve dolgu malzemesi kullanımı gibi önemli parametrelerle 3 boyutlu bir

modelin oluşturulması için kapsamlı bir açıklama sunmak amaçlanmıştır. Dolgu malzemesinin kusurlar üzerindeki etkilerini araştırmak için içi boş olarak bükülen alüminyum profil ve silis kumu ile doldurulmuş bir profil için bir dizi deneysel ve sayısal FEA çalışması uygulanmış aynı zamanda bu çalışmalar üretimi gerçekleştirilen profillerle karşılaştırılmıştır. Deney ve simülasyon arasındaki farklar kıyaslandığında, içi dolu profillerin deney ve simülasyon radyus değerlerinde %2,52'lik  $((2180-2125) \times 100) / 2180$  bir sapma olduğu, içi boş profillerin deney ve simülasyon radyus değerlerinde %3  $((2820-2735) \times 100) / 2820$  'lik bir sapma olduğu gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılan silis kumu Ansys malzeme kütüphanesinde bulunmamaktadır. Buna alternatif olarak PVC foam, analizde dolgu malzemesi olarak atanmıştır. İki farklı dolgu malzemesi kullanılmasına rağmen düşük oranda sapma ile birbirine yakın sonuçlar meydana gelmiştir. Yapılan sayısal ve deneysel karşılaştırmanın %2-3 oranında tutması ile çalışmanın hedefleri doğrultusunda oldukça büyük bir başarı elde edilmiştir. Bu gözlemlerin yanında profillerin deformasyon yönünden kıyaslanması yapıldığında ise dolgu malzemesi kullanılarak bükülen profillerin çok daha az deformasyona uğradı, büküm sonrası bükülmenin dış hatlar formunu bozmadan hedeflenen şekilde gerçekleştiği gözlenirken (Şekil 10. (b)), dolgu kullanmadan bükülen profillerde deformasyonun daha fazla olduğu ve dış hatlar formunda bozulma gerçekleştiği (Şekil 9. (b)) gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar, endüstrinin üç silindirik bir bükme makinesinin tasarımında gerekli olan ayar parametrelerini tahmin etmesi için pratik öneme sahiptir. Bununla birlikte gelecekteki araştırmalar, geliştirilen bu modellerin deneysel doğrulamasından faydalanabileceklerdir.

#### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş Ar-Ge Müdürlüğü bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca değerli bilgilerinizi bizlerle paylaşan saygıdeğer hocamız Prof. Dr. Bülent Ekici'ye teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR

- [1] Durmuş, B.G., Tekin, Ç., (2021). Bina ve Bina Cephesinin Kullanıcı-Tasarımcı İletişiminin Alan Çalışması ile Sorgulanması. *Tasarım + Kuram*, 7(33), 138–162.
- [2] Kamaş, T., Sarıkaya, M., (2021). Explicit Dynamics Finite Element Analyses of Asymmetrical Roll Bending Process. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 05(02), 278-290.
- [3] Welo, T., Ma, J., Blindheim, J., Ha, & T., Ringen, G., (2020). Flexible 3D Stretch Bending Of Aluminium Alloy Profiles: An Experimental And Numerical Study. *Procedia Manufacturing*, 50, 37–44.

- [4] Ktari, A., Antar, Z., Haddar, N., & Elleuch, K., (2012). Modeling and Computation of The Three-Roller Bending Process of Steel Sheets. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (1), 123-128.
- [5] Xie, Z., (2020). The Reinforcement Optimization of Thin-Walled Square Tubes for Bending Crashworthiness. *International journal of crashworthiness*, 25, 240-248.
- [6] Baoguo, C., Zhibin, H., Xueting, H., Lei, L., & Zhibo, Z., (2015). Numerical Simulation Analysis for Padding Assisted Roll-Bending Process, *Advanced Materials Research*, 1153-1157.
- [7] Wang, A., Xue, H., Bayraktar, E., Yang, Y., & Chen, P., (2020). Analysis and Control of Twist Defects of Aluminum Profiles with Large Z-Section in Roll Bending Process, *Metals*, 10, 2-16.
- [8] Chen, C., Li, J., Liang C., Jin, W., (2021). Springback Analysis of Flexible Stretch Bending of Multi-Point Roller Dies Process for Y-Profile under Different Process Parameters. *Metals*, 11, 2-14.
- [9] Filiz Plastik (2021). *Kestamit-Döküm Poliamid*. 11.08.2022, <https://filizplastik.com.tr/urun/pa6-g-kestamit-levha-dokum-poliamid>.
- [10] Massarsch, K.R., (2015). Determination of Shear Modulus of Soil from Static and Seismic Penetration Testing. *Tsotras*, 335-352.
- [11] Ateş, B., Şadoğlu, E., (2020). Donatılı Kum Zeminlerde Düzlem Deformasyon Koşullarında Düşey Gerilme Dağılışı. *Teknik Dergi*, 575, 9967-9985.
- [12] Oberg, E., Jones, F.D., (2012). H.Horton, H.Ryffel, machinery's handbook 29th edition. New York, Industrial Press.
- [13] Profile Bending Technology (2022), *PBT profile bending machines overview*. 10.09.2022, <https://www.pbt-ag.com/en/products/profile-bending-machines/profile-bending-machine-pbt35>.