

İÇİ BOŞ ALÜMİNYUM PROFİLLERİN EKSTRÜZYONUNDA KAYNAMA ODASI GEOMETRİSİNİN ÜRÜN KALİTESİNE ETKİSİ

Burcu Gizem ÖZMEN¹, M. Tahir ALTINBALIK^{2*}

¹ Eksenal Ekstrüzyon Teknolojileri A.Ş., Kocaeli / Türkiye

² Trakya Üniversitesi, Mühendislik, makine Mühendisliği, Edirne / Türkiye

Makale Künye Bilgisi:

Öne Çıkanlar	
	<ul style="list-style-type: none">➤ ALE algoritmasını kullanan HyperXtrude yazılımına dayalı Inspire Extrude Metal 2021.2 programı ile içi boş alüminyum profillerin köprülü kalıp ekstrüzyonunu simüle etmek için bir 3D FE modellemesi yapılarak metalin akış davranışı incelenmiştir➤ İki farklı kaynama odası tasarımı çeşitli parametreler ışığında karşılaştırılmıştır. Özellikle biyetler arası geçişte kalıntı malzeme probleminin çözülmesi amaçlanmıştır.➤ Ürünün yüzey kalitesi baz alındığında, yeni tasarlanan eğrisel geometriye kaynama odası profili ile yüzey kalitesi daha yüksek ekstrüzyon ürünler elde edilebileceği gösterilmiştir.
Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihi: Geliş:..... Kabul:.....	İçi boş profiller pek çok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. İçi boş ve karmaşık şekilli profillerin ekstrüzyon yöntemi ile üretiminde köprülü kalıplar yaygın olarak kullanılırlar. Profilin kalitesini etkileyen kalıp tasarımındaki en önemli bölümlerden biri, kaynama bölgesinde biyet geçişleri sırasında oluşacak, ölü bölge olarak adlandırılan artık alüminyum miktarıdır. Bu çalışmada arka arkaya biyet ekstrüzyonu yapılan köprülü kalıplarda biyet geçişlerindeki malzeme birikmesini önlemek için mevcut kalıbın kaynama odasında bir tasarım değişikliği yapılmış ve bu değişikliğin sonuçları incelenmiştir. Katı modelleme çalışmaları FEM tabanlı bir yazılım olan ve ALE algoritmasını kullanan Inspire Extrude Metal 2021.2 ile gerçekleştirilmiştir. Biyet malzemesi olarak alüminyum AA6063 seçilmiştir. Biyet sıcaklığı 460°C ve ram hızı 5 mm/sn olarak seçilmiştir. Son olarak, FEM sonuçları analiz edilerek yeni kalıp tasarımı öncelikle profil kalitesi bakımından değerlendirilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Köprülü kalıp; Ekstrüzyon; Kaynama odası	

EFFECT OF WELDING CHAMBER GEOMETRY ON THE PRODUCT QUALITY FOR HOLLOW ALUMINUM PROFILES

Article Info	Abstract
Article History: Received: ... Accepted:.....	Hollow profiles are used in many engineering applications. Porthole dies are widely used in the manufacturing of the hollow and complex shaped profiles by extrusion. One of the most important parameters in die design that affects the quality of the profile is the amount of residual aluminum, which is called the dead zone, which will occur during billet transitions in the welding chamber. In this study, a new design was made in the welding chamber of the current die in order to prevent material accumulation in the billet transitions, and the results of the new design were examined. 3D finite element model for modelling porthole die extrusion was carried out based on Inspire Extrude Metal 2021.2 software using ALE algorithm. AA6063 aluminium alloy was chosen as material. The temperature of billet was selected as 460°C and the ram speed of 5 mm/sec was set up. Finally, the FEM results were analyzed and the new die design was evaluated primarily in terms of profile quality.
Keywords: Porthole die; Extrusion; Welding chamber	

1. Giriş

Alüminyum alaşımları, otomobillerde, demiryolu konstrüksiyonlarında, havacılıkta ve dış cephe kaplamaları başta olmak üzere inşaatta yaygın olarak kullanılır. Bunun yanında ince folyo üretimi, ilaç kutuları, içecek kutuları, dış macunu kapları, kaynak elektrodlarının üzerlerinin kaplanması gibi pek çok alanda alüminyumu görmek mümkündür. Düşük yoğunlukları, yüksek özgül mukavemetleri, özgül sertlikleri ve geri dönüştürülebilirlikleri nedeniyle mühendislikte birçok avantaja ve ekonomik üstünlüğe sahiptir.

Alüminyum alaşımlarının köprülü kalıplar ile ekstrüzyonu, yüksek verimliliği ve esnekliği nedeniyle karmaşık şekilli ve içi boş profiller üretmek için yaygın olarak uygulanır (Chen ve diğerleri, 2015). İçi boş profiller, yüksek hızlı trenler, binalar, tekneler ve gemiler, mühendislik yapıları gibi birçok önemli alanda kilit rol oynamıştır. Yöntemde sıcak biyet (kütük), kalıp köprülerinde birkaç metal akışına bölünür. Daha sonra bu metal akışları kaynak odasında (kaynama bölgesi) tekrar birleşir ve temas yüzeyindeki aşırı plastik deformasyon ve güçlü hidrostatik basınç, oldukça karmaşık ekstrüzyon kaynak işlemine yol açar. Son olarak, istenen şekil ve boyuttaki profiller kalıp zıvanası ile alt kalıp arasındaki kalıp deliğinden dışarı akar. İşlem sonucunda ekstrüzyon yönü boyunca bir veya birden fazla kaynak dikişi oluşacaktır (Fan ve diğerleri, 2017). Kaynak dikişlerinin kaynama kalitesi, profillerin performansını belirler ve kaynak dikişlerinin kalitesi, kaynak ara yüzlerinin yapışma derecesine, kaynak bölgesinin mikro yapısına ve ekstrüzyon kalıp geometrisine bağlıdır (Den Bakker ve diğerleri, 2014; Kim ve diğerleri, 2002). Ekstrüzyon basıncı ve sıcaklığı, koç hızının artmasıyla artar, bu da köprülü kalıp ekstrüzyonu sırasında kaynak kalitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir (Zhang ve diğerleri, 2012a; Bingöl ve Keskin, 2007).

Köprülü kalıplarda kalıp tasarımı oldukça önemlidir. Geleneksel deneme yanılma tasarımında, ekstrüzyon kalıbı tasarımı esas olarak kalıp tasarımcılarının uygulama deneyimine ve uzmanlığına dayanmaktadır. Genellikle, bir köprülü kalıp üretildikten sonra, kabul edilebilir bir profil elde edilene kadar çeşitli modifikasyonlara ve testlere tabi tutulur, bu da ek maliyet ve zaman kaybına neden olur (Liu ve diğerleri, 2012). Sayısal teknolojinin hızlı gelişimi ile birçok araştırmacı, kalıp tasarımı için alüminyum alaşımlarının köprülü kalıplarla ekstrüzyonu üzerinde bazı simülasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir. Xue ve diğerleri (2018), endüstriyel uygulaması olan ince cidarlı içi boş bir profil için çok çıkışlı bir köprü kalıplı ekstrüzyon prosesi geliştirmek için optimizasyon stratejileri önermiştir. Zhang ve diğerleri (2012b) bir FEM simülasyonu yardımıyla alüminyum malzemeden içi boş bir tüp geometrisinin üç delikli bir köprülü kalıpla ekstrüzyon işlemini araştırmıştır. Çalışmalarında, hem köprü sayısı hem de kalıp deliğinin malzeme akışını, ekstrüzyon kuvvetini ve kaynak basıncını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Sun ve diğerleri (2015), HyperXtrude yazılımını kullanarak karmaşık bir içi boş kapı çerçevesi için ekstrüzyon işleminin sayısal simülasyonunu araştırmışlardır. Bastani ve diğerleri (2010), akış dengesini ve çıkış sıcaklığını etkileyen işlem parametrelerinin incelenmesi amacıyla ALE algoritmasına dayalı alüminyum ekstrüzyon işleminin geçici bir simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Chen ve diğerleri (2011), geniş delikli bir profilin ekstrüzyon işlemi için FE analizi yapmıştır. Yi ve diğerleri (2018), karmaşık bir içi boş alüminyum profilin ekstrüzyonunda, parçanın alt kısmında oluşan içbükey kusurunu çözmek için, ALE algoritması kullanılarak HyperXtrude yazılımına dayalı bir köprülü kalıp ekstrüzyon sürecini simüle etmişlerdir. Kalıp çıkışındaki hız dağılımını ve kaynama odasındaki basınç dağılımını nicel olarak analiz eden Yi ve

arkadaşları tasarıma bölme plakaları ekleyerek kalıbı değiştirmiş ve kusuru gidermiştir.

Son birkaç on yılda, köprülü kalıplar kullanılarak ekstrüze edilen profillerin kaynak kalitesini araştırmak için de birçok çalışma yapılmıştır. Çok sığ kaynak odaları (kaynama bölgesi), ekstrüze edilmiş profillerde kusurlara neden olacaktır (Yu ve diğerleri, 2016). Bir köprülü kalıpla ekstrüzyon işlemi için, ekstrüzyon kalıbının kaynak odasının derinliği, mikro gaz boşluklarının olup olmasının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Çok küçük bir kaynak odası derinliği, kalıp köprüsünün arkasında bir gaz boşluğunun bulunmasına neden olur. Bu ise kaynak kalitesi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olan nano ölçekli boşluklar ve amorf tabakalar ile birleştirme ara yüzünün oluşumuna yol açar. Kaynak odası derinliğinin ve ekstrüzyon hızının artması, mikro boşlukların varlığını önlemektedir. Ayrıca kaynak odalarının hacminin artırılmasının da kaynak kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunduğu literatürde yer almaktadır (Donati ve Domesani, 2005).

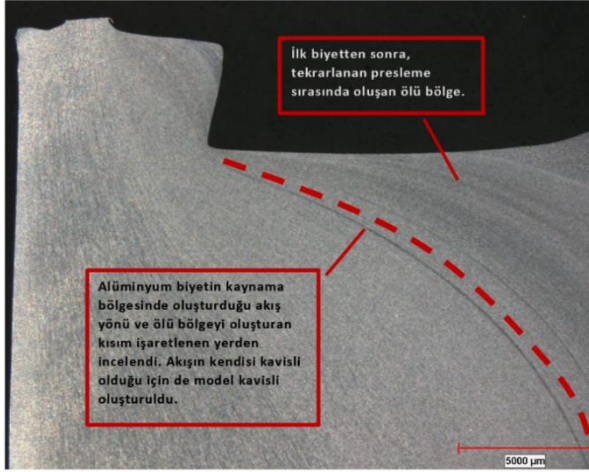
6000 serisi Al-Mg-Si alaşımları da içi boş profiller, düşük yoğunlukları ve yüksek performansları nedeniyle otomotiv sanayi ve sivil inşaat alanlarında önemli bir rol oynamaktadır (Li ve diğerleri, 2019). Yu ve Zhao (2018), farklı türlerde Al-Mg-Si alaşımlarının köprülü kalıplarla ekstrüzyonunda, ekstrüzyon kalıbı geometrisi ve proses parametreleri değiştirilerek farklı türlerde kaynak dikişleri elde etmiştir. Kaynak dikişlerinin ara yüzey yapıları optik mikroskop ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak sistematik biçimde incelenmiştir. Çalışma sonunda ekstrüzyon kalıbı geometrisinin ve işlem parametrelerinin kaynak dikişlerinin oluşum süreçleri, katı hal bağlama koşulları ve ara yüzey yapıları üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Fan ve diğerleri (2017), benzer olmayan malzemelerin köprülü kalıplarla daha iyi birleştirilebileceği düşüncesiyle farklı bileşimlerdeki Al alaşımlarının birleştirilmesi

için köprülü kalıp ekstrüzyonuna dayalı bir yöntem geliştirilmeye çalışmıştır. Söz konusu makalede köprülü kalıplar ile 1060/6063 Al alaşımları ekstrüze edilmiş ve iyi bir kaynak kalitesi elde edilmiştir. Çalışma farklı malzemelerin birleştirilmesi konusunda farklı bir bakış açısı sunmuştur.

Bu çalışmada arka arkaya biyet ekstrüzyonu yapılan köprülü kalıplarda biyet geçişlerindeki malzeme birikmesini önlemek için kalıp uygulamasında bir tasarım değişikliği yapılmış ve bu değişikliğin sonuçları incelenmiştir.

2. Problemin Tanımlanması ve Yeni Kalıp Tasarımı

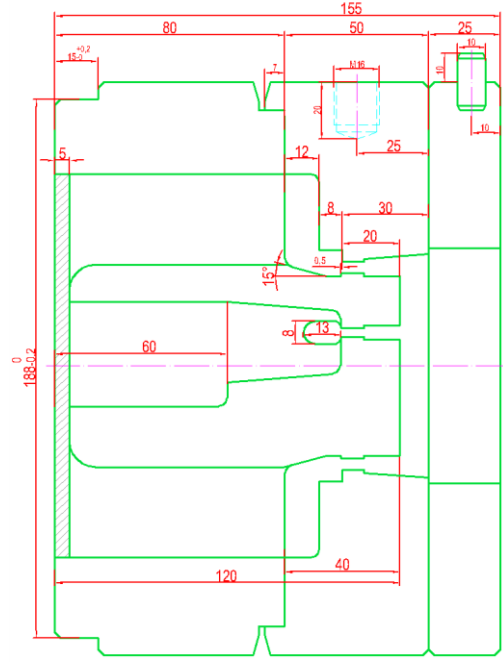
Önceden de bahsedildiği gibi köprülü kalıplar özellikle içi boş alüminyum profil üretiminde kilit bir rol oynar. Köprülü kalıbın kalitesi hem ürün kalitesini hem de kalıbın hizmet ömrünü doğrudan etkiler. Kalıp çıkışında metal akış hızı üniform değilse, ekstrüze edilmiş profillerin performansı ve kalitesi ciddi şekilde etkilenecektir. Geleneksel deneme-yanılma tarzı tasarımlarda, ekstrüzyon kalıbı tasarımı öncelikle tasarımcıların uygulama deneyimine ve uzmanlığına dayanmaktadır. Bu tarz bir uygulamada genellikle bir köprülü kalıp, üretildikten sonra kabul edilebilir bir profil elde edilene kadar çeşitli modifikasyonlara ve testlere tabi tutulur. Bu da doğal olarak ek maliyet ve zaman kaybına neden olur. Malzeme birikmesini önlemek amaçlı olarak yapılan bu çalışma için seçilen parça, otomotiv sektöründe, genelde kauçukla birlikte kullanılan ve tüm yüzeyi görülebildiği için yüzey kalitesi ve görselliği üst düzeyde olması gereken bir parçadır. Bu profili seçmemizin bir başka sebebi ise, ürünün bitmiş haldeki iç yapısının homojen olması için mevcut tasarımda karşılaşılan fire miktarı, olması istenen miktarın 3 katıdır. Çalışmanın temel amaçlarından biri de bu fire miktarını minimum düzeye indirebilmektir. Bu fire miktarı bize aynı zamanda kaynama problemi yaşanan bölgenin uzunluğunu verir. Şekil 1'de mevcut kalıp kullanılarak yapılan işlemde bu fire miktarının uzunluğu görülmektedir.



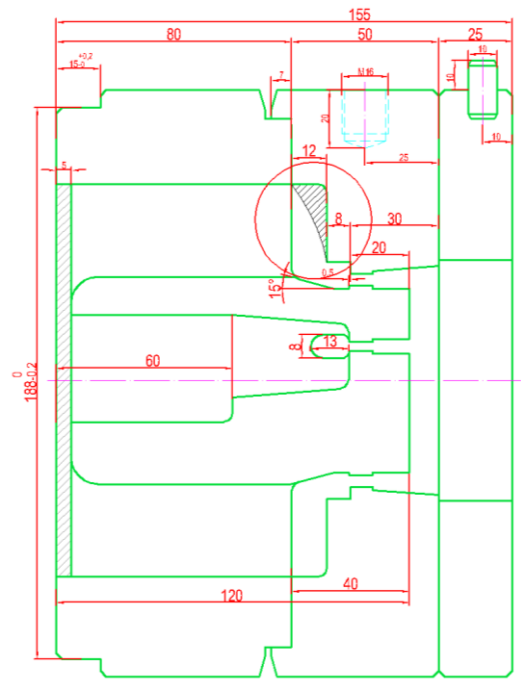
Şekil 1. Kaynama odası sebebiyle fire bölgesi.

Bu çalışmanın temel amacı profilin kalitesini etkileyen kalıp tasarımındaki en önemli bölümlerden biri olan kaynama bölgesi üzerinde biyet geçişleri sırasında oluşacak ve Şekil 1’de görülen ölü bölge diye tabir edilen artık alüminyumu en aza indirmek için kalıpta optimizasyon çalışması yapılmasıdır. Köprülü kalıp modeli Inspire Extrude Metal 2021.2’de simüle edilmiştir.

Yukarıda sıralanan sorunların giderilmesi amacıyla mevcut kalıpta kaynama odasında geometrik değişiklik yapılması öngörülmüştür. Bu sayede biyetler arası geçişlerde kaynama odasında biriken Al miktarının en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Tasarlanan yeni kaynama odası ve mevcut tasarım hali ile birlikte Şekil 2.a ve Şekil 2.b’de sunulmaktadır. Tasarımda öncelikli amaç keskin köşelerden kaçınmaktır. Bu bakımdan Şekil 2.a’da gösterilen 12 mm yüksekliğindeki keskin köşeli ve düz yüzeyli olan kaynama odası, tüm kalıp formunda eğrisel geometri olarak tasarlanmıştır. Yeni form teknik resim görseli olarak Şekil 2.b’de daire içine alınmış bölgede sunulmaktadır.



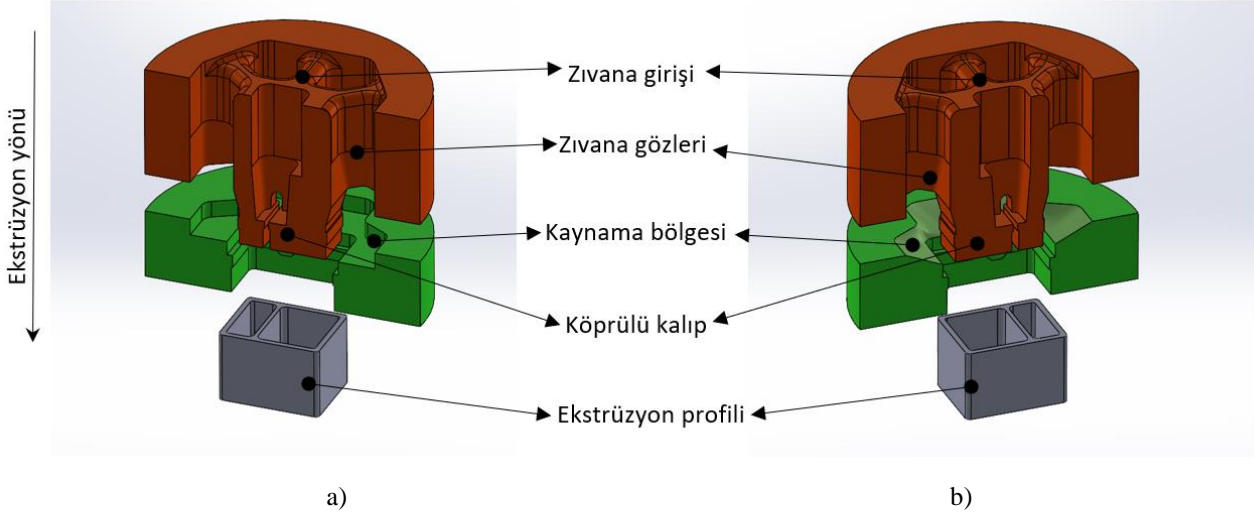
a)



b)

Şekil 2. Tasarım değişikliği yapılan köprülü kalıbın geometrisi ve ölçüleri

a) Mevcut kalıp b) Yeni tasarım



Şekil 3. Mevcut ve yeni tasarım için köprülü ekstrüzyon kalıbı ve ürün profilinin üç boyutlu görseli
a)Mevcut kalıp b) Yeni tasarım

Sunulan çalışmada kullanılan ekstrüzyon kalıbı ve ürün profili mevcut hali ve yeni kaynama odası tasarımı olacak biçimde sırasıyla Şekil 3.a ve Şekil 3.b’de gösterilmektedir. Mevcut kalıpta 6 adet köprü bulunur ve alüminyum biyet buralarda bölünüp kaynama odasında tekrar birleşmesi için yeterli hacim oluşturulur. Şekil 3.a’da gösterilen kaynama odası profilinde; köşeler keskin bırakıldığında alüminyum biyet ilk seferinden sonra sürekli bir sonraki biyete eklenerek çıkmaktadır. İlk biyet işlemin sonlarına doğru soğumakta iken yeni biyet sıcak olarak girdiğinden iki biyetin karışımları çatlaklara sebep olmaktadır. Bu da profil yüzeyinde bozulmalara ve yüzeyde oluşabilecek istenmeyen izlere neden olur. Dahası kaynama odasında kalan metal birikimleri kalıpların kostik havuzunda sık temizlenmesi zorunluluğunu doğurmaktadır. Bunun için eğrisel yüzeye sahip kaynama odasını katı modelleme analizi mevcut kalıp ile karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Her iki kalıp tasarımı için Inspire Extrude Metal programı ile akış analizi yapılmıştır. Kalıptan çıkan profilin akış hızı, profilde oluşan gerilmeler, kaynama bölgesindeki ölü alüminyum oranı gibi parametreler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Katı modelleme analizi için biyet malzemesi olarak gerçekte olduğu gibi AA6063 seçilmiştir.

Diğer ekstrüzyon simülasyon parametreleri şu şekildedir:

Biyet çapı: 184 mm

Biyet uzunluğu: 800 mm

Profil geçiş bölgesi uzunluğu: 15mm

Biyet sıcaklığı: 460°C

Kalıp ve kovan sıcaklığı: 420°C

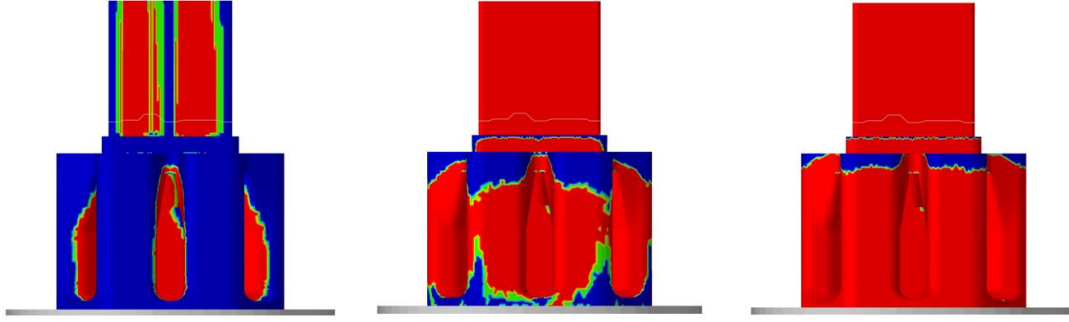
Koç hızı: 5mm/sn.

Ekstrüzyon oranı: 24

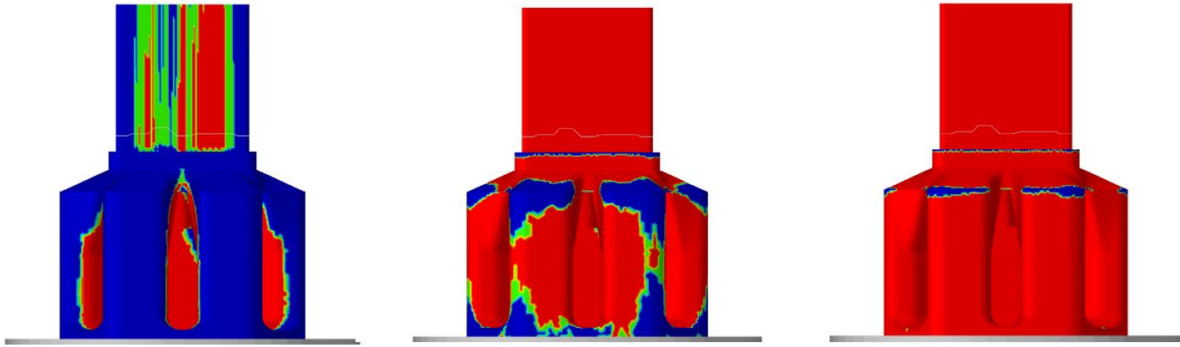
Kalıp malzemesi olarak da programa H13 çeliği özellikleri programa girilmiştir.

3. Simülasyon Sonuçları

Şekil 4’te hali hazırda firmada kullanılan mevcut köşeli kalıba ait ürünün ekstrüzyonu sırasında kalıptan çıkış simülasyonu 3 ayrı aşama için sunulmaktadır. Simülasyonda mavi renk ilk ekstrüze olan birinci biyeti kırmızı renk ise ikinci biyeti göstermektedir.



Şekil 4. Mevcut kalıp için yapılan simülasyon ile kaynama odasında kalan alüminyum miktarı
a)?? b) ?? c)??

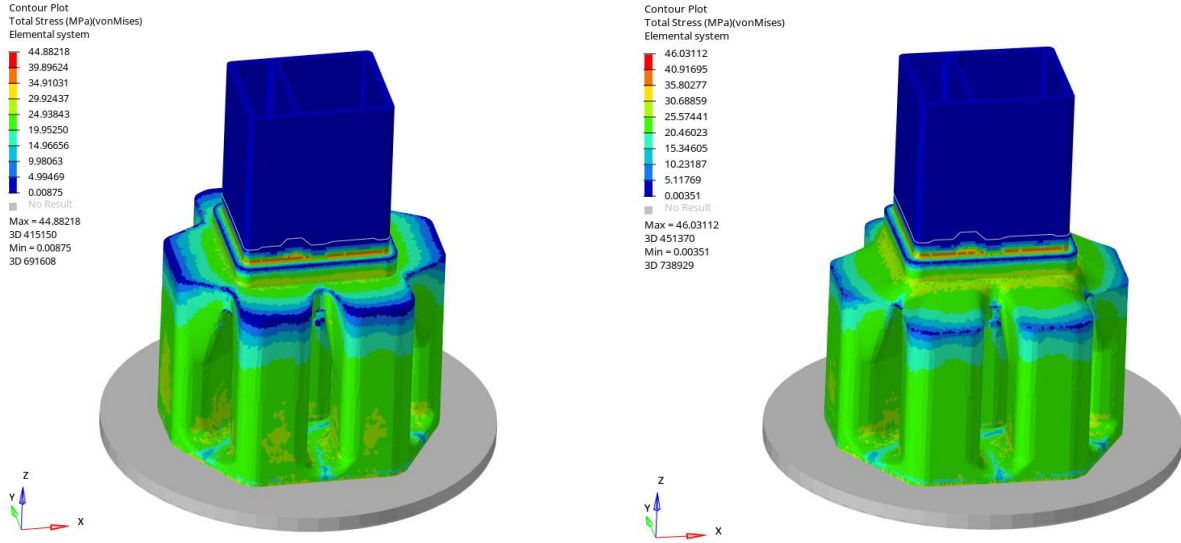


Şekil 5. Yeni tasarlanan kalıp için yapılan simülasyon ile kaynama bölgesinde kalan alüminyum miktarı
a)?? b) ?? c)??

Şekil 4.a ikinci biyetin kalıba girmesinden hemen sonraki aşamayı, Şekil 4.b ise birleşme işleminin ortalarını simüle etmektedir. Özellikle Şekil 4.c'de ikinci biyetin tamamen kalıbı doldurduğu aşamada ürün çıkışına yakın noktada keskin köşelerde ilk biyete ait parçalar istenmeyen oranda (mavi bölgeler) kalmaktadır. Böylece keskin köşeli ve düz yüzeyli olarak tasarlanıp imal edilen kalıplarda bir önceki aşamadaki alüminyum biyeti, her preslemede bir sonraki biyete parça parça karışarak profilde heterojen bir yapının oluşmasına sebep olmaktadır.

Bu olumsuzlukları en aza indirgeyip kalan alüminyum oranını azalmak için kaynama odası profili Şekil 2'deki gibi kavisli geometrili olacak şekilde dizayn edilerek simülasyon aynı şartlarda tekrarlanmıştır. Şekil 5.a, 5.b

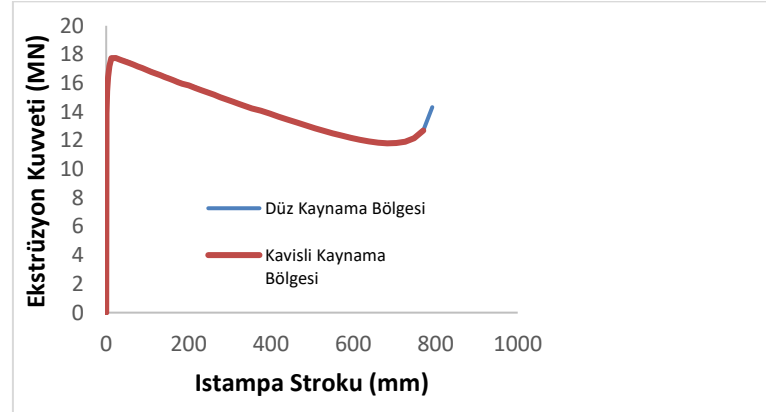
görüntüler alınmıştır. Ara kademelerde çok büyük farklılıklar olmamakla birlikte en önemli fark son kademede görülmektedir. Şekil 5.c'den anlaşılacağı gibi ilk biyetten kalan kısımların göstergesi olan mavi renkli bölgeler oldukça azalmış durumdadır. İki model için de aynı şartlarda ekstrüzyon işlemi tamamlandığında Şekil 4.c ile Şekil 5.c arasındaki fark, eski biyetlerin miktarı incelenerek tespit edilmiştir. Buna göre mevcut tasarımda ikinci biyetin kalıbı tamamen doldurduğu aşamada ilk biyetten 0,55 kg malzeme kalmışken (Şekil 4.c), eğrisel kaynama odalı yeni tasarımda aynı şartlarda kalan artık malzeme miktarı 0.23 kg. (Şekil 5.c) olarak tespit edilmiştir. Böylece eğimli bir kaynama odası, artık malzeme miktarını %58 oranında azaltmıştır ve daha düzgün profillere sahip ürünlere imkân tanıyacağını söylemek mümkündür.



Şekil 6. Von-Mises gerilme dağılımı
a)Mevcut kalıp b)Yeni tasarım

İki farklı kaynama odası geometrisinin, köprü, kaynama odası ve ürün profili üzerindeki gerilme etkisinin değerlendirilmesi amacıyla her iki durum için total gerilme değerleri incelenmiştir. Şekil 6.a ve 6.b incelendiğinde gerilme değerleri arasında önemli bir fark bulunmamakta olup kalıp çıkış ağzında yaklaşık 45 MPa değerinde bir eşdeğer gerilme sözkonusudur. Eğrisel yüzeyli kaynama odasındaki gerilme değeri, keskin köşeli düz yüzeyli tasarıma göre çok az yüksek olsa da sürecin işleyişini veya ürün kalitesini etkileyecek bir fark olmadığı açıkça görülmektedir.

İki farklı kaynama odası tasarımı için son karşılaştırma parametresi olarak ekstrüzyon kuvveti incelenmiştir. Şekil 7’de her iki tasarım için ekstrüzyon kuvvetinin tüm strok boyunca hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Yalnızca, düz kaynama odalı tasarımda, ilk biyetten 2.biyete geçiş esnasında, kaynama odasının geometrisi gereği daha fazla alüminyum biriktiğinden, kuvvetin %13 oranında fazla olacağı öngörülmektedir.



Şekil 7. Her iki kaynama odası için kuvvet – strok diyagramı

4. Tartışma

1) Bu çalışmada ALE algoritmasını kullanan HyperXtrude yazılımına dayalı Inspire Extrude Metal 2021.2 programı ile içi boş alüminyum profillerin köprülü kalıp ekstrüzyonunu simüle etmek için bir 3D FE modellemesi yapılarak metalin akış davranışı incelenmiştir.

2) İki farklı kaynama odası tasarımı çeşitli parametreler ışığında karşılaştırılmıştır. Özellikle biyetler arası

geçişte kalıntı malzeme probleminin çözülmesi amaçlanmıştır.

3) Ürünün yüzey kalitesi baz alındığında, yeni tasarlanan eğrisel geometrilili kaynama odası profili ile yüzey kalitesi daha yüksek ekstrüze ürünler elde edilebileceği gösterilmiştir.

4) Ancak zıvana ile kalıp arasında yine de keskin köşeler kaldığı için artık malzeme problemi tamamen çözümlenmemiştir ve bununla ilgili farklı tasarım modellemeleri sonraki çalışmalara bırakılmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar katı modelleme programının kullanım izni ile alakalı olarak Eksenal Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojileri A.Ş.'ye içtenlikle teşekkürlerini sunarlar.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışmada çıkar çatışması yaratan bir durum söz konusu değildir.

ORCID

M. Tahir ALTINBALIK: 0000-0001-9433-3030

Kaynakça

Bastani, A.F., Aukrust, T. & Skauvik, I. (2010). Study of flow balance and temperature evolution over multiple aluminum extrusion press cycles with HyperXtrude 9.0. *Key Engineering Materials*, 424, 257–264.

Bingöl, S., Keskin, M.S. (2007). Effect of different extrusion temperature and speed on extrusion welds. *J. of Achievements in Mat. and Manuf. Eng.*, 23(2), 39–42.

Chen, H., Zhao, G.Q., Zhang, C.S., Guan, Y.J., Liu, H. & Kou, F.J. (2011). Numerical simulation of extrusion process and die structure optimization for a complex

aluminum multicavity wallboard of high-speed train. *Mat. and Manuf. Pro.*, 26(12), 1530–1538.

Chen, L., Zhao, G., Yu, J. & Zhang, W. 2015. Evaluation of a pyramid die extrusion for a hollow aluminum profile using FE simulation. *J. Mech. Sci. Technol.* 29, 2195–2203.

Den Bakker, A.J., Werkhoven, R.J., Sillekens, W.H. & Katgerman, L. (2014). The origin of weld seam defects related to metal flow in the hot extrusion of aluminium alloys EN AW-6060 and EN AW-6082. *J. Mater. Process. Technol.* 214 (11), 2349–2358.

Donati, L., Tomesani, L. (2005). The effect of die design on the production and seam weld quality of extruded aluminum profiles. *J. Mater. Process. Technol.* 164, 1025–1031.

Fan, X., Chen, L., Chen, G., Zhao, G. & Zhang C. (2017). Joining of 1060/6063 aluminum alloys based on porthole die extrusion process. *J. of Mat. Proc. Tech.*, 250, 65-72.

Kim, K.J., Lee, C.H. & Yang, D.Y. (2002). Investigation into the improvement of welding strength in three-dimensional extrusion of tubes using porthole dies. *J. Mater. Process. Technol.*, 130, 426–431.

Li, S., Li, L., He, H., Liu, Z. & Zhang, L. (2019). Influence of dynamic recrystallization on microstructure and mechanical properties of welding zone in Al-Mg-Si aluminium profile during porthole die extrusion. *Trans.Nonferrous Met.Soc. China*, 29, 1803-1815.

Liu, P., Xie, S. & Cheng, L. (2012). Die structure optimization for a large, multi-cavity aluminum profile using numerical simulation and experiments. *Mater. Des.*, 36, 152–160.

Sun, Y.D., Chen, Q.R. & Sun, W.J. (2015). Numerical simulation of extrusion process and die structure

optimization for a complex magnesium doorframe. *The Int. J. of Adv. Manuf. Tech.*, 80(1–4), 495–506.

Xue, X., Vincze, G., Pereira, A., Liao, J. & Pan, J. (2018). Role of die structures on metal flow balance in multi-output porthole extrusion of thin-walled profile. *Procedia Manufacturing*, 15, 225-231.

Yi, J., Wang, Z., Liu, Z., Zhang, J. & He, X. (2018). FE analysis of extrusion defect and optimization of metal flow in porthole die for complex hollow aluminium profile. *Trans.Nonferrous Met.Soc. China*, 28, 2094-2101.

Yu, J. & Zhao, G. (2018). Interfacial structure and bonding mechanism of weld seams during porthole die extrusion of aluminum alloy profiles. *Materials Characterization*, 138, 56-66.

Yu, J., Zhao, G. & Chen, L. (2016). Analysis of longitudinal weld seam defects and investigation of bonding criteria in porthole die extrusion process of aluminum alloy profiles. *J. Mater. Process. Technol.* 237, 31–47.

a) Zhang, C., Zhao, G., Chen, Z.R., Chen, H. & KOU, F.J. (2012). Effect of extrusion stem speed on extrusion process for a hollow aluminum profile. *Mat. Sci. and Eng. B*, 177(19), 1691–1697.

b) Zhang, C., Zhao, G., Chen, H., Guan, Y., Cai, H. & Gao, B. (2012). Investigation on effects of die orifice layout on three-hole porthole extrusion of aluminum alloy 6063 tubes. *J. of Mat. Eng. Perf.*, 22, 1223–1232.