

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON KALIP TASARIMI VE SONLU
ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

FIRAT GÜNGÖRDÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2019

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON KALIP
TASARIMI VE SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

FIRAT GÜNGÖRDÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. FEVZİ BEDİR

GEBZE
2019

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**ALUMINUM EXTRUSION DIE DESIGN
AND SIMULATION BY FINITE ELEMENT
METHOD**

FIRAT GÜNGÖRDÜ
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. FEVZI BEDİR

GEBZE
2019

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 26/06/2019 tarih ve 2019/29 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30/09/2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Fırat GÜNGÖRDÜ'nün tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : PROF. DR. FEVZİ BEDİR

ÜYE

: PROF. DR. SELİM SIVRIOĞLU

ÜYE

: PROF. DR. BURAK DİKİCİ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu çalışmada, QExDD (QForm Extrusion Die Designer) programı kullanılarak bir alüminyum ekstrüzyon kalıbının üç boyutlu parametrik CAD modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan üç boyutlu CAD modeli QFORM metal şekillendirme simülasyon programına aktarılmış ve alüminyum ekstrüzyon profilinin üç boyutlu malzeme akış simülasyonu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon sınır şartları olarak kalıp seti sıcaklıkları, profil ilerleme hızı, kalıp malzemesi ve biyet malzemesi tanımlanmıştır. Simülasyon tamamlandıktan sonra alüminyum profilin kesitinde akış doğrultusundaki hız değerleri incelenmiştir. Yüksek hız farklarından dolayı bozuk bir profil çıkışı elde edilmiştir. Profil kesitindeki hız farkının azaltılması için önce kalıp sıcaklık değeri değiştirilerek ikinci bir simülasyon yapılmıştır. Ayrıca kalıp tasarımında revizyon yapılarak sıcaklığın ve revizyonun profil akış hızına etkisi incelenmiştir. Revizyonun etkisinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir ve tasarımda gidilen revizyon değişikliği farklı konfigürasyonlarla değiştirilerek farklı simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre en uygun tasarım seçilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Ekstrüzyon, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Simülasyon, QFORM, QExDD.

SUMMARY

In this study, three dimensional parametric CAD model of an aluminum extrusion die was created by using QExDD (QForm Extrusion Die Designer) program. The three dimensional CAD model was transferred to QFORM metal forming simulation program and three dimensional material flow simulation of aluminum extrusion profile was made by using finite element method. Die set temperatures, profile feedrate, die material and billet material were defined as simulation boundary conditions. After the completion of the simulation, the velocity values in the flow direction were examined in the cross section of the aluminum profile. A distorted profile output was obtained due to high speed differences. In order to reduce the speed difference in the profile section, a second simulation was performed by changing the die temperature value. Besides, the effect of temperature and revision on profile flow rate was examined by revision of die design. The effect of the revision has been observed to be greater and different simulation results have been obtained by changing the revision change in the design with different configurations. According to these results, the most appropriate design was chosen.

Key Words: Aluminum Extrusion, Finite Element Method, Simulation, QFORM, QExDD.

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca ilgisini eksik etmeyen değerli danışman hocam Prof.Dr. Fevzi BEDİR'e, manevi desteklerinin yanında yazılım ve bilgisayar kullanımında sorun yaşamamamı sağlayan Armada Yazılım A.Ş' ye ve Quantor Form Ltd.' ye, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek her daim yanımda olan aileme, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. TEORİK TEMELLER	3
2.1. Alüminyum Ekstrüzyonun Tarihçesi	3
2.2. Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojisinin Kullanım Alanları	4
3. LİTERATÜR TARAMASI	5
4. MATERYAL VE METOT	8
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	8
4.2. QForm Metal Şekillendirme Simülasyon Programı	9
4.2.1. QForm Extrusion Die Designer	10
4.2.2. QForm Ekstrüzyon Modülü	11
4.3. Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbı	13
4.3.1. Kullanılan Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbının Teknik Resmi	13
4.3.2. Kullanılan Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbının 3B Modeli	14
4.3.3. Kalıp Malzeme Özellikleri	15
4.3.3.1. Kalıp Malzemesi Öz Isı Değerinin Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği	15
4.3.3.2. Kalıp Malzemesi Termal İletkenlik Katsayısı Değerinin Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği	16
4.3.4. Biyet Malzeme Özellikleri	17
5. ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON PROSESİNİN SİMÜLASYONU	18
5.1. Simülasyon Sınır Şartları	18

5.2. Simülasyon Sonucu	19
5.3. Kalıp Sıcaklığının Profil Akış Hızına Etkisinin İncelenmesi	21
5.4. Kalıp Tasarımında Yapılan Revizyonun Profil Akış Hızına Etkisinin İncelenmesi	22
5.4.1. 10 mm Derinliğe Sahip Hazne' ye Göre Simülasyon Sonucu	23
5.4.2. 20 mm Derinliğe Sahip Hazne' ye Göre Simülasyon Sonucu	24
5.4.3. 30 mm Derinliğe Sahip Hazne' ye Göre Simülasyon Sonucu	25
5.4.4. Elde Edilen Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	26
6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	28
 KAYNAKLAR	 29
ÖZGEÇMİŞ	31

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u> Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
<i>mm</i>	: Milimetre
<i>sn</i>	: Saniye
°C	: Celcius
<i>kg</i>	: Kilogram
m	: Metre
W	: Watt
K	: Kelvin
<i>j</i>	: Joule
MPa	: Mega Pascal
3B	: 3 boyutlu
2B	: 2 boyutlu
QExDD	: Qform Extrusion Die Designer
FASAD	: Binaların cephe kaplama sistemleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.1: Qform Metal Şekillendirme Simülasyon Programı Çıktı Örneği.	9
4.2: QExDD Arayüzü ve Örnek Kalıp Modeli.	11
4.3: QForm Ekstrüzyon modülünde analiz sonrası profil çıkışı örneği.	12
4.4: Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbının Teknik Resmi.	13
4.5: Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbının 3B Modeli.	14
4.6: H13 Çeliğinin Öz Isı Değerinin Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği.	15
4.7: H13 Çeliğinin Termal İletkenlik Katsayısı Değerinin Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği.	16
5.1: Biyet ve Kalıp Setinin Simülasyon Modeli.	18
5.2: Profil Akış Yönündeki Kesit Hız değerleri Grafiği.	20
5.3: Kalıp Sıcaklığının 480 °C ye çıkarılması ile Elde Edilen Kesit Hız Değerleri Grafiği.	21
5.4: Kalıp Tasarımına Hazne Eklenmesi.	22
5.5: 10 mm Hazne Oluşturulması ile Elde Edilen Kesit Hız Değerleri Grafiği.	23
5.6: 20 mm Hazne Oluşturulması ile Elde Edilen Kesit Hız Değerleri Grafiği.	24
5.7: 30 mm Hazne Oluşturulması ile Elde Edilen Kesit Hız Değerleri Grafiği.	25

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.1: H13 Çeliğinin 450 °C’ deki Malzeme Özellikleri.	15
4.2: Al 6063’ ün 450 °C‘ deki Malzeme Özellikleri.	17
5.1: Simülasyon Sınır Şartları.	19
5.2: Simülasyon Sonuçlarına İlişkin Karşılaştırma Tablosu.	27

1. GİRİŞ

Çevre dostu çözüm önerilerinin önem kazandığı günümüz teknolojisinde kararlı ve bozulmayan yapısı ile alüminyum, diğer metallere veya alaşımlarına göre kolay işlenebilirliği, hafif yapısının yanı sıra yüksek mukavemeti ve yüksek korozyon dayanımı ile endüstriyel tasarımlar için birçok alanda umut vaat eden çözüm önerileri sunmaktadır. Alüminyum endüstriyel kullanıma hazır hale getirilmek için, yassı mamül, döküm parça veya profil ekstrüzyon gibi farklı üretim teknolojileri kullanılarak nihai ürüne dönüştürülebilmektedir. Burada üretim yöntemini seçerken ürünün kullanım amacı önem kazanmaktadır. Paneller, basınç tankları, taşıt gövdeleri gibi sac kullanımına uygun alanlarda daha çok yassı mamül, blok gibi ağır ve rijit ürünler için döküm, hafif ama mukavemetli ürünler için ise genellikle profil ekstrüzyon yöntemi tercih edilmektedir.

Bu yöntemlerin üretim süreçleri de birbirinden tamamen farklı olmaktadır. Her birinin kendisine göre zorluğu olsa da, özellikle ekstrüzyon yöntemi zorluk bakımından diğer yöntemlere kıyasla biraz daha ağır basmaktadır. Bir alüminyum profilin üretilmesi için yüksek tonajda pres gücü gerekmektedir. Bir yandan profilin minimum hata ile çıkması gerekirken diğer yandan da nihai ürün için tasarımı yapılan ve üretilen kalıbın da dayanım kriterlerinden geçmesi gerekmektedir. Çünkü kalıpta alüminyum malzeme akışından dolayı meydana gelebilecek herhangi bir deformasyon durumu doğrudan elde edilecek olan alüminyum profilin kalitesine etki etmektedir. İstenildiği gibi çıkmayan bir profil, endüstriyel kullanıma uygun olmayacağı gibi üretici firma için hem zaman kaybına hem de ciddi derecede maddi kayıplara yol açmaktadır.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Alüminyum Ekstrüzyon yöntemi, özellikle karmaşık geometrik kesite sahip profillerin üretilebilmesi için en uygun üretim yöntemidir. Üretilmesi talep edilen profile göre öncelikle doğru bir kalıp tasarımı yapılmalıdır. Sektörde alüminyum ekstrüzyon kalıplarının imalatı oldukça zor bir prosestir. Alüminyum ekstrüzyon kalıpları imal edilirken hem zaman harcanır hem de üretimleri oldukça maliyetlidir. Elde edilecek olan nihai ürünün karmaşıklığı arttıkça hem zaman kaybı hem de maliyetler artmaktadır. Yapılan tasarıma göre imal edilen ekstrüzyon kalıpları, elde edilecek olan nihai ürünlerin çıkarılmasından önce istenilen sonucun alınıp alınmamasını kontrol etmek amacı ile birçok teste tabi tutulurlar. Bu testlerin sayısı her üründe değişmektedir. Böylelikle ilk üretimden kaynaklanan zaman ve maliyet kaybına ek olarak, kalıpların uygunluğunu kontrol etmek amacı ile yapılan testler de ek süre ve maliyete sebep olmaktadır.

Günümüz teknolojisinde mühendislik projelerinde tasarımların doğrulanması amacı ile kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, alüminyum ekstrüzyon sektöründeki doğrulama testlerine alternatif olacak kullanışlı bir çözüm yöntemidir. Deneysel olarak kalıpların teste tabii tutulması yerine, bütün proses sanal ortamda simule edilerek zaman ve maliyet kayıplarına engel olmak mümkün olmaktadır.

2. TEORİK TEMELLER

Ekstrüzyon, alüminyum kütüğün, baskı kuvveti ile, kalıp seti içinden geçirilerek, kalıp boşluğu şeklinde bir profilin çıkarılmasıdır. Alüminyum ekstrüzyon sıcak olarak yapılır, biyetler ortalama 450 °C ön ısıtmaya tabi tutulur, çıkan profil sıcaklığı sürtünme ve deformasyon etkisi ile ilk sıcaklıktan daha fazla olmaktadır. Ekstrüde edilen iş parçası soğutulur, soğuk gerdirme işlemine tabi tutulduktan sonra istenilen boyda kesilir. Daha sonra nihai ürüne direnç kazandırmak için ekstrüdata ısıtıl işlem uygulanır. Bu süreçte ekstrüde edilmiş iş parçası yaklaşık 180 °C sıcaklıkta 7-9 saatlik süre boyunca tutulur [Web 1].

Aslında alüminyum ekstrüzyon prosesi daha açık bir anlatımla, alüminyum kütük kesitinin, nihai ürün (profil) kesitine çevrilmesi işlemidir. Bundan dolayı kullanılmış olan biyet kesiti, üretilmesi istenilen profilin kesitine şekil ve yüzeysellik bakımından benzer oldukça, söz konusu prosesin tamamlanması da bir o kadar kolay olmaktadır.

Toparlanacak olursa ince ve küçük kesite sahip bir profilin üretilebilmesi için daha küçük ölçülere sahip kütük ve prosesin ihtiyaçlarını karşılayabilecek ekstrüzyon tezgahı, büyük ölçüye sahip bir profil içinse küçük profile kıyasla daha büyük ölçüye sahip kalıp seti, kütük ve daha büyük tonajlarda kuvvet uygulayabilen tezgahlar gerekmektedir.

2.1. Alüminyum Ekstrüzyonun Tarihçesi

Alüminyum ekstrüzyon teknolojisi yaklaşık 100 yıl öncesine kadar pek çok yenilikçi yöntem için kullanılmıştır. Alüminyum ekstrüzyon ile nihai ürün üretimi teknolojisi ilk başlarda manuel olarak insan eli ile yapılmaktaydı. Daha sonra hidrolik gücün basınç etkisi keşfedilmiştir. 1797 senesinde pirinç ve bakır alaşımları için ekstrüzyon işleminin patenti alınmıştır [Web 2].

Alüminyum, çok daha uzun sürelerdir hali hazırda kullanılan bakır, bronz, demir ve çelik gibi madenler ile karşılaştırıldığı zaman kullanım başlangıç zamanı ele alındığında daha genç bir metal olarak karşımıza çıkmaktadır. İlk olarak 1825 senesinde elde edilen alüminyum 1807 senesinde metal bir element olarak tespit

edildi. O zamanlar alüminyum oldukça değerli, adeta bir altın gibi ulaşılması zor bir metal gibi kabul görüyordu [Web 2].

1894 senesinde Alexder Dick tarafından günümüz şartlarına da uygun sıcak ekstrüzyon teknolojisi icat edilmiştir. Günümüz teknolojisinde özellikle soğuk ekstrüzyon ve sıcak ekstrüzyon yöntemleri oldukça yaygın olarak hali hazırda kullanılmaktadır [Web 2].

Bir örnek verecek olursak otomotiv yedek parça imalatındaki ilk alüminyum ekstrüzyon teknolojisi 1904 yılında Amerika, Pensilvanya’ da kullanılmıştır. 2. Dünya Savaşı zamanında hava aracı üretimi için yoğunlaşan istekler ve diğer bütün askeri ihtiyaçların sağlanabilmesi için alüminyum parçaların imalatı oldukça yüksek şekilde hız kazanmış ve bütün bu durumlar daha yeni ekstrüzyon teknolojisi tezgahlarının imal edilmesine zemin hazırlamıştır [Web 2].

2.2. Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojisinin Kullanım Alanları

Alüminyum ekstrüzyon uygulamasının kullanıldığı başlıca endüstriyel alanlar; motorlu araçlar (otomobil, tren, gemi, metro , hava araçları), mimari çalışmalar ve inşaat sektörü (binalardaki cephe kaplama işlemleri (FASAD), pencere ve kapı gibi çeşitli konstruktif ekipman ve tasarımlar), elektronik tasarım endüstrisi, makine ve ekipman imal prosesi, gıda ve kimya endüstrisi şeklindedir [Web 3].

3. LİTERATÜR TARAMASI

Supic vd., bir Alman firması olan HUECK GmbH' ye ait bir alüminyum profil projesinde kalıp tasarımının doğrulanması için ekstrüzyon prosesinin COMSOL® yazılımında simülasyonunu yapmıştır. Kullanılan profil L kesite sahip olup, simülasyon için Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Yapmış oldukları çalışmanın sonunda profil sıcaklığını, ekstrüzyon hızını ve deformasyonları incelemiştir. Bulguları neticesinde simülasyon sonuçlarına göre proses sürecinde kalıpta hasar oluşup oluşmayacağını yorumlamış ve hasar oluşması durumunda üretimden önce bu problemleri sanal ortamda gözlemleyerek hem zamandan hem de maliyetten tasarruf için simülasyonun gerekliliğine kanaat getirmişlerdir [1].

Jose Bressan vd., yaptıkları çalışmada Forge 2008 ve Sonlu Hacimler Yöntemini kullanarak, bir 6060 alüminyum alaşımının ekstrüzyonunu nümerik ve deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Testler 400 °C sıcaklık altında 2 mm/sn ve 5 mm/sn hızlarında gerçekleştirilmiştir. Yapmış oldukları bu çalışma sonucunda kullandıkları nümerik yöntemin tasarım doğrulama için elverişli olduğu sonucuna varmışlardır [2].

X. Ma vd., yapmış oldukları çalışmada alüminyum ekstrüzyon kalıbı üzerinden geçiş bölgeleri için profilin sürtünme durumunu incelemiştir. Elde edilmiş profildeki yüzey kalitesini arttırmak için geçiş bölgelerinin uzunluğu ile oynayarak yüzey kalitesine etkisini incelemek için deneyler yapmışlardır ve sonuçların örtüşüğünü gözlemlemişlerdir [3].

Bakhtiani vd., yapmış oldukları çalışmada kaplamalı ve kaplamasız kalıplar kullanarak aşınma durumunu ve kalıp ömrünü incelemiştir. Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemini ve archards aşınma modelini kullanmışlardır. Yapmış oldukları simülasyon sonuçlarını kullanarak kaplama kalınlığı üzerinden optimizasyon yapıp kalıp kullanım ömrünü tahmin etmek için kullanacaklardır [4].

YI vd., yapmış oldukları çalışmada HyperXtrude yazılımına kaynak kod yazarak kalıp çıkışında ekstrüde edilen hammadde kesitindeki hız dağılımını ve kaynak odasındaki basınç dağılımını analiz etmişlerdir. Kesitteki hız dağılımında homojenlik elde etmek için plakalar eklemiştir. Ekledikleri plakalar kalıp deformasyonunu da azaltarak profil akışındaki homojenliği arttırmıştır [5].

Marin vd., yaptıkları çalışmada sıcaklığın ekstrüzyon prosesine etkisini incelemişlerdir. İncelemelerinde, sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Farklı sıcaklık değerlerine göre gereken yükü ve çıkış hızlarını hesaplayarak, optimum ekstrüzyon kalitesi için en uygun kalıp ve biyet sıcaklıklarına karar vermişlerdir [6].

Zhang vd., yapmış oldukları çalışmada ekstrüzyon işlemine tabi tutulan alüminyum profildeki enine kaynak dikişlerini ve bu dikişlerin ekstrüzyon kalitesine etkisini incelemişlerdir. Hem HyperXtrude yazılımını kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile hem de deneysel olarak ekstrüzyon parametreleri ile oynayarak, nümerik ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Kullanılan her iki yöntemin de birbirlerini doğruladıklarını tespit etmişlerdir [7].

Omolayo vd., yaptıkları çalışmada yağlayıcı kullanımının ve yağlayıcı tipinin ekstrüzyon prosesinde sıcaklığa ve gerilme dağılımına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada yağlayıcı kullanmadan, Hindistan cevizi yağını kullanarak ve hint yağı kullanarak farklı deneyler yaparak farklı gerilme değerleri hesaplamışlardır. Sonrasında en kritik iki deney sonucu üzerinden DEFORM simülasyon yazılımını kullanarak sıcaklıkların artan gerilme oranı ile arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca simülasyon sonucunda buldukları yük – strok eğrisi deneysel sonuçlar ile uyumluluk göstermiştir [8].

Mayavaram vd., yaptıkları çalışmada ekstrüzyon kalıbındaki geçiş bölgelerinin ekstrüzyon kalitesine etkisini incelemişlerdir. Geçiş bölgelerinin uzunlukları ile oynayarak ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak deneysel çalışmaya gerek kalmadan tasarımdaki değişikliklerin sebep olacağı sonuçları nümerik yöntem ile öngörebilmişlerdir [9].

Fang vd., alüminyum ekstrüzyon kalıbında yer alan ceplerdeki katman sayısının alüminyum ekstrüzyon ile üretilen profilin metal akışına etkisi gözlemlemişlerdir. Farklı katman sayılarındaki modeller üzerine 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi uygulaması yaparak, ceplerde yer alan katman sayılarının alüminyum metal akışına etkisi olduğunu gördükleri için cep katman sayısının optimize edilebileceği sonucuna varmışlardır [10].

Wang vd., yaptıkları çalışmada HyperXtrude yazılımını kullanarak bir ekstrüzyon prosesinin simülasyonunu yapmışlardır. Burada kullandıkları teknoloji ekstrüzyon simülasyonlarında ve benzer metal şekillendirme simülasyonlarında

kullanılması oldukça önemli olan Lagrang – Euler remeshing teknolojisidir. Simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar arasında tutarlılık gözlemlenmiştir [11].

Anupama vd., yaptıkları çalışmada bir ekstrüzyon prosesini DEFORM 3D ile simüle etmişlerdir. Bu çalışmada farklı iş parçası malzemeleri kullanıp, itici hızı, kalıp uzunlukları, kalıp açısı ve sürtünme katsayı değerlerini değiştirerek bu parametrelerin prosesin sonucuna etkisini incelemişlerdir [12].

4. MATERİYAL VE METOT

Bu çalışmada bir alüminyum ekstrüzyon prosesi, QForm Metal Şekillendirme Programı kullanılarak bilgisayar ortamında simüle edilecektir. Bir alüminyum ekstrüzyon kalıp seti QForm' un dahilinde bulunan QExDD ekstrüzyon kalıp tasarım programında 3B modele dönüştülüp, sonrasında QForm Ekstrüzyon modülünde simülasyonu yapılacaktır. Simülasyon için sonlu elemanlar yöntemi kullanılacaktır. Simülasyonun tamamlanması için, kalıp ve biyet malzeme tanımlamaları, kalıp ve biyet sıcaklıkları ve ekstrüzyon tezgahına yönelik itici hızı sınır şartı olarak girilecektir.

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Yapılan tasarımların doğrulanması araştırmacılar, mühendisler ve tasarımcılar için kritik öneme sahiptir. Geçmişten günümüze kadar tasarım doğrulamak için farklı yöntemler kullanılmıştır. İlk zamanlarda tasarımları doğrulamak amacı ile analitik çözüm yöntemleri kullanılmıştır. Analitik çözüm yöntemi aslında herhangi bir probleme yönelik el ile yapılan bütün hesapları kapsamaktadır. Basit geometriye sahip tasarımlarda kullanılması kolay bir yöntem olmasına karşın, karmaşık geometriye sahip tasarımlarda hem daha fazla bilgi birikimi hem de daha fazla zaman gerekmektedir.

Teknolojinin gelişmesi ve rekabetin artması ile analitik yöntemlere alternatif olarak 'Prototip ile Tasarım Doğrulama' yöntemine geçilmeye başlanmıştır. Herhangi bir tasarımın önce prototipi üretilerek doğrulama testleri prototip üzerinden yapılmaktadır. Karmaşık geometriye sahip tasarımlarda analitik yöntemle kıyasla daha kolay olmasına karşın, prototip yöntemi hem üretim maliyeti hem de test maliyetleri doğurmuştur. Ayrıca prototip üretiminin sebep olduğu zaman kaybı da olmaktadır.

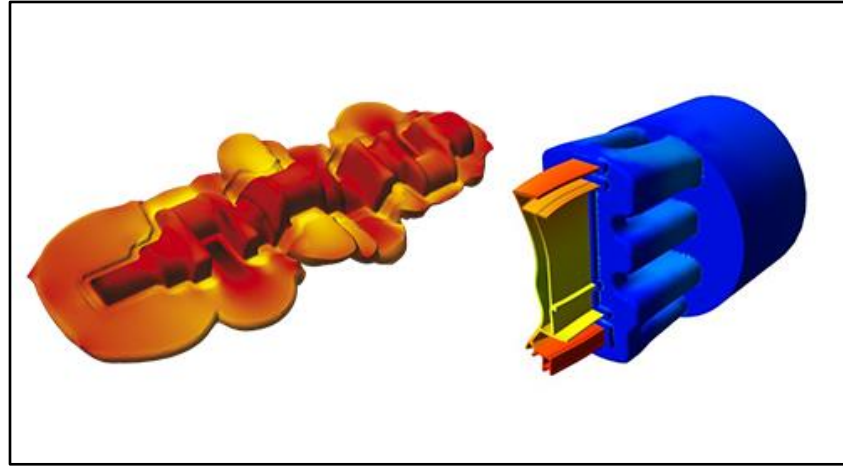
Analitik yöntem ve prototip yöntemlerden sonra bilgisayar teknolojisinin de gelişmesiyle nümerik yöntem dediğimiz tamamen bilgisayar hesaplamalarına dayalı yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi de son yıllarda en çok kullanılan tasarım doğrulama yöntemlerinden biridir. Analitik yöntemde kullanılan

bütün hesaplar bir yazılım tabanında işlenir. Sonrasında ilgili probleme yönelik yapılması gereken bütün hesaplar bilgisayar tarafından yapılır. Programın mesh yapısı oldukça kullanışlıdır. Üçgen elemanlar kullanılır ve her iterasyonda mesh yapısı değişir. Bu özellik metal şekillendirme simülasyonlarında olmazsa olmaz özelliklerden bir tanesidir.

4.2. QForm Metal Şekillendirme Simülasyon Programı

QForm Metal Şekillendirme Simülasyon yazılımı, soğuk dövme işlemi ve sıcak dövme işlemi, hadde işlemleri, alüminyum profil ekstrüzyon işlemleri ve diğer metal şekillendirme işlemlerinin nümerik yöntem kullanılarak analiz edilmesi ve optimizasyon çalışmalarının yapılabilmesi amacı ile tasarlanmıştır. Programda mikroyapı, termal işlem analizi ve kullanıcı tarafından belirlenmiş özel alt fonksiyonlar oluşturma gibi çeşitli ek özellikli modüller de bulunmaktadır. Şekil 4.1’de QForm Metal Şekillendirme Simülasyon Programı’ndan alınan bazı çıktı görselleri paylaşılmıştır [Web 4].



Şekil 4.1: QForm Metal Şekillendirme Simülasyon Programı Çıktı Örneği.

QForm Metal Şekillendirme Simülasyon Programı kullanıcı dostu arayüze, en modern programlama teknikleri ve geniş fonksiyonelliği sayesinde oldukça hızlı simülasyon süresine sahiptir. Çok güçlü ve evrensel yazılım çekirdeği, her türlü

metal şekillendirme işleminin simülasyonunu mümkün kılar. Bütün bunların yanında en önemli özelliği uyumlu ve otomatik mesh oluşturma alt yapısıdır [Web 7].

Simülasyon sınır şartlarının oluşturulması, sonuç grafiklerinin görünümü ve her zaman adımında simülasyonun ilerlemesi tek bir pencerededir. Simülasyon parametrelerinin ve / veya simülasyon için başlangıç verilerinin hepsinin bir pencerede düzenlenmesi çalışma verimliliğini önemli ölçüde artırır [Web 7].

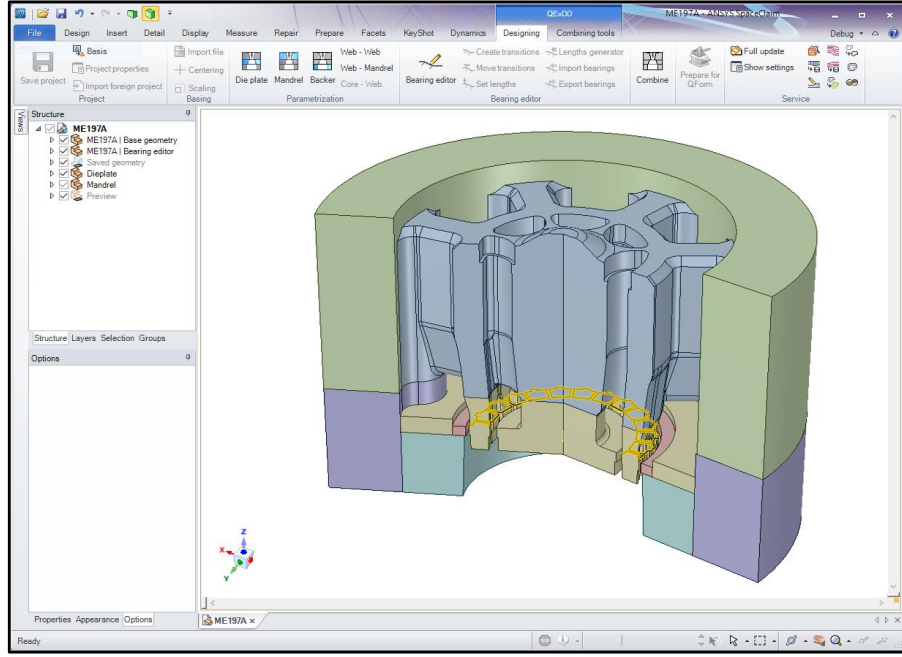
Yeni yazılımlar, çok çekirdekli olma özelliğine sahip işlemcilerin ve tüm bilgisayar kaynaklarının çok etkin biçimde kullanılmasına ve böylece daha hızlı simülasyonların yapılmasına izin verir. Çözücü ve kullanıcı ara yüzü ayrıdır, ancak ikisi de aynı zamanda çalıştığı için karmaşık bir analiz yürütülmesi esnasında bile sonuçlar gerçek ve eş zamanlı şekilde görüntülenebilmektedir [Web 7].

Kullanıcı ilk verileri atar, simülasyon işlemini yönetir ve simülasyon sonuçlarını tek bir ara yüz penceresinden görüntüler. Kullanıcının simülasyonunu hazırladığı metal şekillendirme teknolojisine uygun karmaşık simülasyon sınır koşullarını kolayca ve çok hızlı bir şekilde tanımlamasına ve simülasyonda mevcut olan veri zenginliğini kolayca görüntülemesine olanak veren birçok araç bulunmaktadır [Web 7].

Sonlu elemanlar ağ oluşturma ve simülasyon sırasında remeshing otomatik olarak yapılır ve genellikle kullanıcının müdahalesini gerektirmez. Remeshing olayı, özellikle explicit analizlerde sonuçların doğruluğu açısından sonlu elemanlar paket programında olmazsa olmaz özelliklerden biridir [Web 7].

4.2.1.QForm Extrusion Die Designer

QExDD (QForm Ekstrüzyon Kalıp Tasarımcısı), içi boş veya dolu alüminyum profillerin ekstrüzyonu için kalıp setinin 3 boyutlu modelinin oluşturulması için geliştirilmiş bir yazılımdır. Bu sistem özel parametrik tasarım araçlarını kullanarak bir kalıp setinin tamamen parametrik olarak 3B modelini oluşturmaya yardımcı olur [Web 5]. Şekil 4.2' de QExDD programı arayüzüne ve bir kalıp setinin 3B modeline yönelik örnek görsel yer almaktadır [Web 5].



Şekil 4.2: QExDD arayüzü ve örnek kalıp modeli.

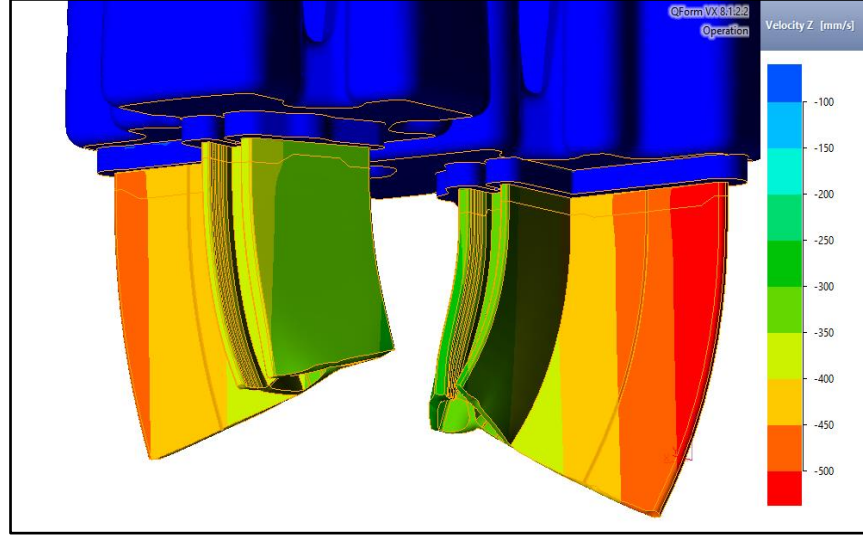
Teknisyen veya mühendis, kalıp modelinin 3 boyutlu modelini ve kaba ölçülerini belirledikten sonra dizayn prosesini kontrol altında tutar. Bu 3 boyutlu parametrik modelleme prosesi, geleneksel kalıp tasarımından çok daha kolay ve hızlı şekilde gerçekleşmektedir. Simülasyon sonuçlarında malzeme davranışı ile ilgili eğer herhangi bir sorun ile karşılaşırsa , kalıbın hali hazırda bitmiş olan dizaynındaki her türlü revizyon işlemi QExDD programında kolay bir şekilde yapılabilir ve QForm’ da kolayca tekrar simülasyon yapılabilir. Bu durum, 3 boyutlu dizaynı tamamlanmış bir ekstrüzyon kalıbının simülasyonunu ve doğrulamasını çok daha kolayca ve oldukça hızlı bir şekilde yapılmasına olanak tanır [Web 5].

Bu çalışma kapsamındaki ekstrüzyon kalıp setinin 3B modellemesi QExDD programı ile yapılmıştır.

4.2.2. QForm Ekstrüzyon Modülü

QForm Metal Şekillendirme Programı’ nın ekstrüzyon modülü, çok karmaşık alüminyum profillerin bile kalıp deformasyonu etkilerinin de hesaba katılarak hem termal hem de mekanik problemin aynı anda çözülmesi ile malzeme akışı simülasyonlarının gerçekleştirilebilmesini sağlayan, sonlu elemanlar yöntemini kullanan bir metal şekillendirme simülasyon programıdır [Web 6]. Simülasyonu

yapılmış olan bir alüminyum ekstrüzyon prosesine yönelik örnek bir profil çıkışının görseli şekil 4.3’ te görülmektedir [Web 6].



Şekil 4.3: QForm Ekstrüzyon modülünde analiz sonrası profil çıkışı örneği.

QForm programının ekstrüzyon alt yapısı, ekstrüzyon prosesi devam ederken biyetin akış simülasyonunu ve kalıp setinde meydana gelen bütün deformasyonların analizinin yapılabilmesi için özel olarak geliştirilmiştir. Program, kullanıcıya geometriye uygunluk ve sonlu elemanlar çözümü için en optimum mesh yapısını otomatik oluşturulmasını sağlayarak daha hızlı simülasyon projeleri yapabilmeyi sunmaktadır [Web 6].

Bütünleşik simülasyon özelliği sayesinde malzeme akışı devam ederken iş parçasının kalıba temas ettiği bölgelerde oluşan deformasyonların etkisi de simülasyon sonuçlarına etki etmektedir. O yüzden kalıp geometrisindeki herhangi bir değişim malzemenin akış hızını doğrudan değiştirerek gerçek sonuçlar ile hata payını minimize etmektedir. Yazılım, üretim mühendisleri ve kalıp tasarımcıları tarafından kullanılmak üzere geliştirilmiştir [Web 6].

Bu çalışmada da QExDD programı ile 3B modellemesi tamamlanan bir alüminyum ekstrüzyon kalıbının QForm ekstrüzyon modülü ile simülasyonları elde edilerek tasarım doğrulamaları yapılmıştır.

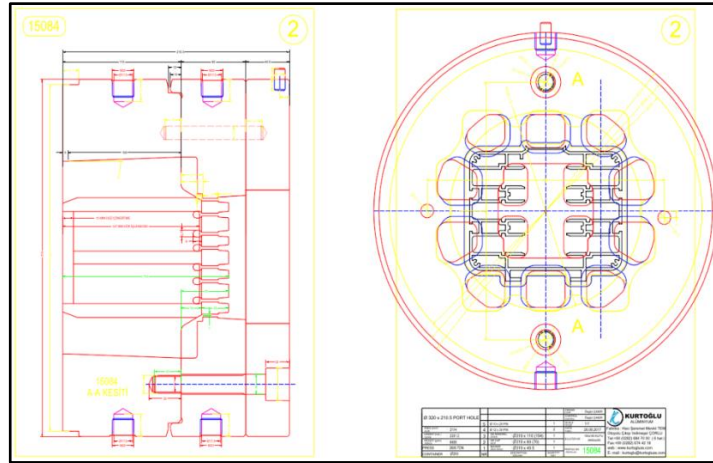
4.3. Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbı

Alüminyum ekstrüzyon kalıbı, alüminyum profilin ekstrüzyon işleminde kullanılan kalıplara verilen isimdir. Bu kalıplar çekirdek kısmı, köprü ve ayaklar olmak üzere birkaç bölümden oluşmaktadır. Aynı zamanda biyetin kalıp içine basılması hareketini veren itici, kalıp ile tezgah bağlantısını sağlayan kovan kısmı ve biyet ile itici arasında kullanılan biyet yastığı da alüminyum ekstrüzyon presinde kalıp seti ile birlikte kullanılan elemanlardır.

Bu çalışmadan bir alüminyum ekstrüzyon kalıbının 2B çizimi referans kullanılarak, QExDD programında 3B kalıp modeli oluşturulacak ve oluşturulan 3B kalıp modeli QForm Ekstrüzyon Modülü' nde simule edilecektir.

4.3.1.Kullanılan Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbının Teknik Resmi

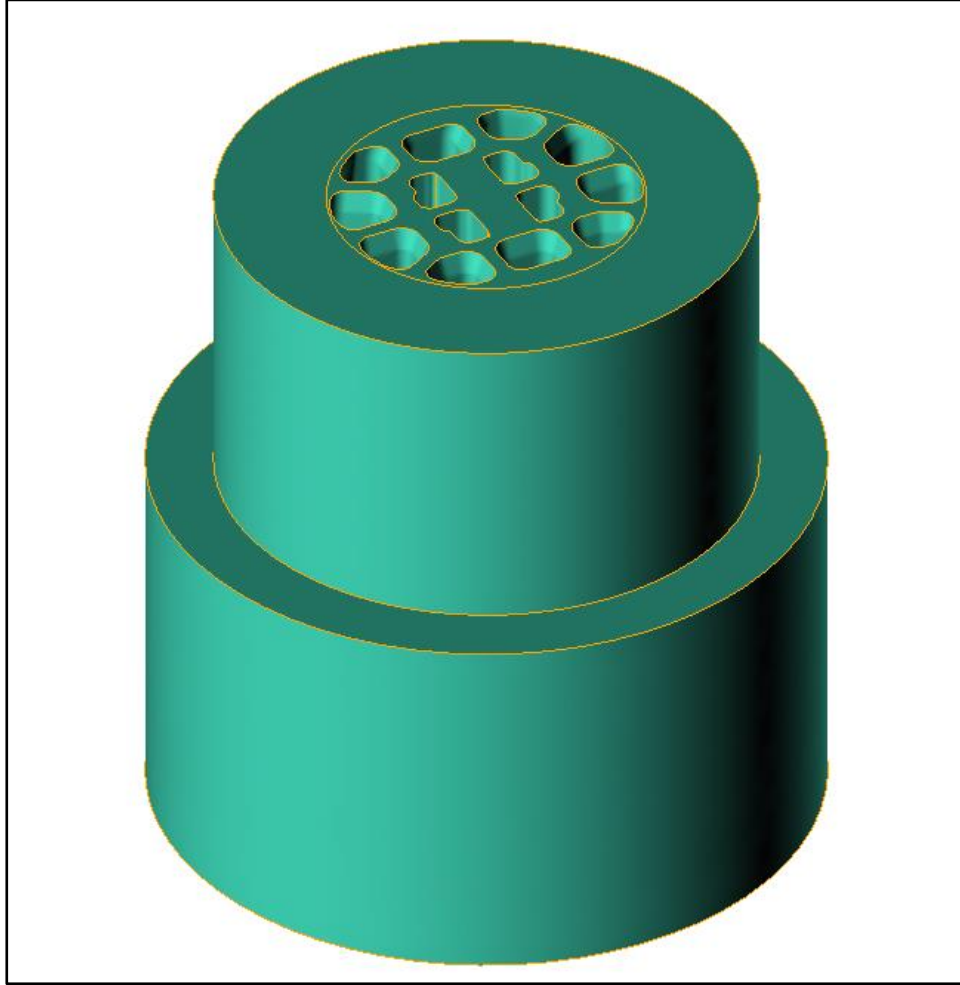
Alüminyum ekstrüzyon kalıbının 3B modelini oluşturmak için Kurtoğlu Alüminyum firmasından alınan ve şekil 4.4' te gösterimi verilen alüminyum ekstrüzyon kalıbının teknik resmi referans alınmıştır. Teknik resimdeki 2B çizimler kullanılarak, ekstrüzyon kalıbının 3B modeli QExDD programı ile tamamen parametrik olarak oluşturularak, QForm Ekstrüzyon Modülü' nde simülasyon yapılmak için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.4: Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbının Teknik Resmi.

4.3.2. Kullanılan Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbının 3B Modeli

İki boyutlu çizim üzerinden QExDD programı ile oluşturulmuş ve QForm Ekstrüzyon modeline aktarılmış olan alüminyum ekstrüzyon kalıbının 3B modeli şekil 4.5’ te gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Alüminyum Ekstrüzyon Kalıbının 3B modeli.

Simülasyon sonuçlarının incelenmesi sonucunda kalıp tasarımında revizyona gidilecektir.

4.3.3.Kalıp Malzeme Özellikleri

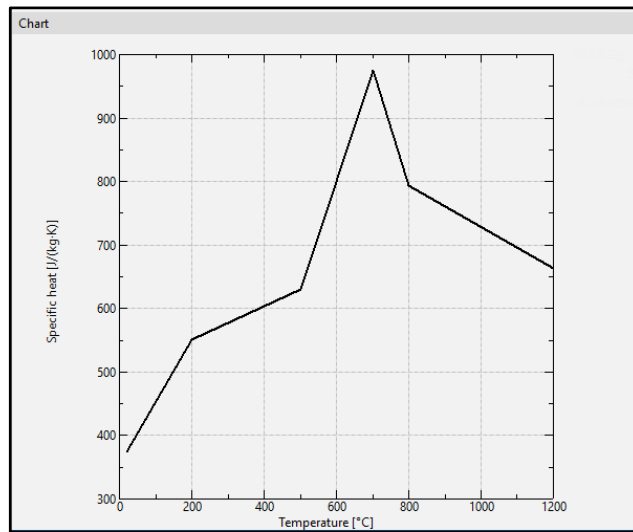
Kalıp Seti malzemesi olarak H13 çeliği seçilmiştir. H13 çeliğinin Qform programından alınan 450 °C’ deki malzeme özellikleri tablo 4.1’ de verilmiştir.

Tablo 4.1: H13 çeliğinin 450 °C’ deki malzeme özellikleri.

Yoğunluk (kg/m ³)	7575
Akma Mukavemeti (MPa)	1150
Termal İletkenlik [W/(m.K)]	30
Poisson Oranı	0.3
Öz ısı [j/(kg.K)]	612
Sertlik Parametresi	0.028
Elastiklik Modülü (MPa)	174000

4.3.3.1. Kalıp Malzemesi Öz Isı Değerinin Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği

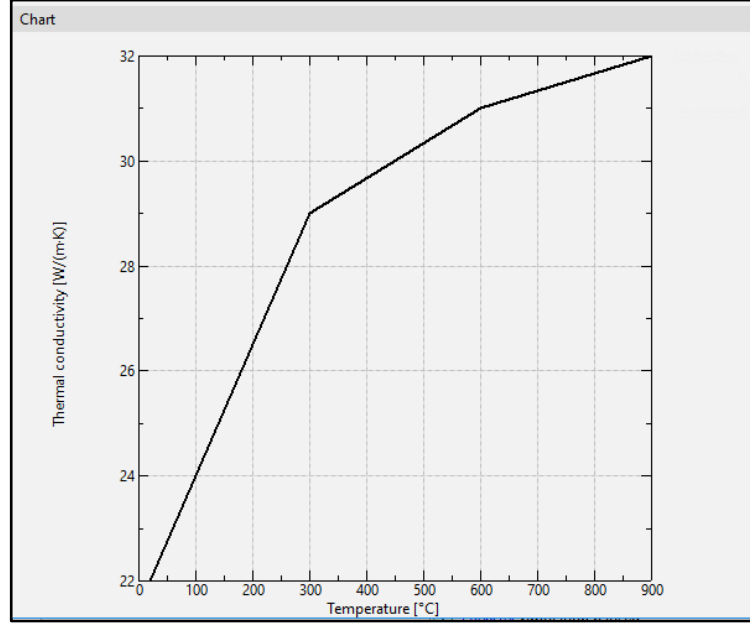
H13 çeliğinin Qform programından alınan öz ısı değerinin sıcaklığa göre değişim grafiği şekil 4.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.6: H13 çeliğinin öz ısı değerinin sıcaklığa göre değişim grafiği.

4.3.3.2. Kalıp Malzemesi Termal İletkenlik Katsayısı Değerinin Sıcaklığa Göre Değişim Grafiği

H13 çeliğinin Qform programından alınan termal iletkenlik katsayısı değerinin sıcaklığa göre değişim grafiği şekil 4.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.7: H13 çeliğinin termal iletlenlik katsayısı değerinin sıcaklığa göre değişim grafiği.

4.3.4. Biyet Malzeme Özellikleri

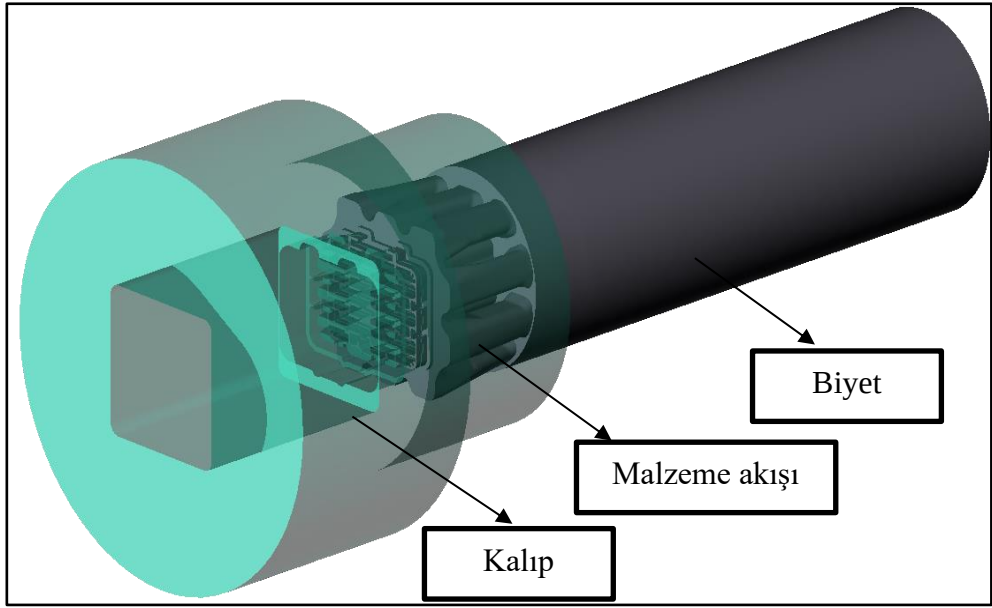
Biyet malzemesi olarak Al 6063 seçilmiştir. Al 6063' ün Qform programından alınan 450 °C' deki malzeme özellikleri tablo 4.2' de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Al 6063' ün 450 °C' deki malzeme özellikleri.

Yoğunluk (kg/m ³)	2595
Termal İletkenlik (W/m.K)	242
Termal Genleşme (1/°C)	27.25 10 ⁻⁶
Öz ısı (j/(kg.K))	1012
Elastikiyet Modülü (MPa)	48000
Poisson Oranı	0.35

5. ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON PROSESİNİN SİMÜLASYONU

İlgili biyet ve kalıp setinin alüminyum ekstrüzyon simülasyonu, QForm Metal Şekillendirme programında, belirlenen sınır şartları altında yapılmıştır. Biyet ve kalıp setinin simülasyon modeli Şekil 5.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Biyet ve Kalıp setinin simülasyon modeli.

5.1. Simülasyon Sınır Şartları

Alüminyum ekstrüzyon prosesinin simülasyonunun QForm programında yapılabilmesi için; itici hızı, biyet sıcaklığı, biyet uzunluğu, biyet çapı, kalıp seti sıcaklığı, varsa kalıp destek takımının sıcaklığı, biyet yastığının sıcaklığı ve kovan sıcaklığı parametrelerinin tanımlanmış olması gerekmektedir. Biyet uzunluğu ve biyet çapı direk parametrik olarak tanımlandığı için biyetin katı modelinin ayrıca oluşturulmasına gerek duyulmamaktadır. Kalıp geometrisi ise daha önceden QExDD programında oluşturulmuştur.

Simülasyon için QForm programının arayüzünde tanıtılması gereken bütün simülasyon sınır şartları tablo 5.1’ de gösterilmiştir. Biyetin kalıp içinde ilerlemesini sağlayan itici hızı, plastik şekil değişimine uğrayacak olan silindir şeklinde biyetin uzunluk ve çap değerleri ve kalıp sıcaklıkları programda tanıtılması gereken sınır şartlarıdır.

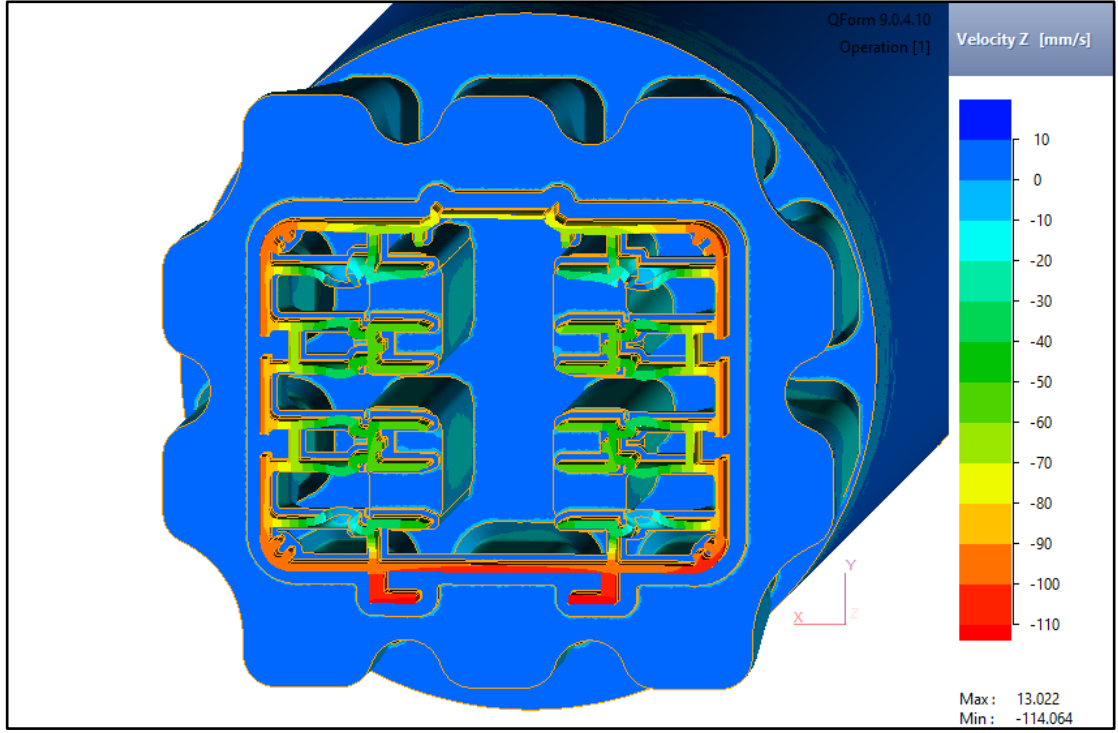
Tablo 5.1: Simülasyon Sınır Şartları.

İtici Hızı (mm/sn)	6
Biyet Sıcaklığı (°C)	450
Biyet Uzunluğu (mm)	800
Biyet Çapı (mm)	203
Kalıp Seti Sıcaklığı (°C)	450
Kalıp Destek Sıcaklığı (°C)	450
Biyet Yastığı Sıcaklık (°C)	450
Kovan Sıcaklığı (°C)	425

Tablo 5.1 de verilen değerler tanımlandıktan sonra simülasyon çalıştırılmıştır ve profilin ilerleme ekseninde (Z eksen) malzeme akış hızı değerleri elde edilmiştir.

5.2. Simülasyon Sonucu

Alüminyum ekstrüzyon prosesinin simülasyonu tamamlandıktan sonra, malzeme akışının ilerleme yönünde (Z eksen) profil kesitindeki hız değerleri gözlemlenmiştir. Profil kesitindeki hızın homojenliği proses sonucunda çıkacak olan nihai profilin yapı düzgünlüğü ile doğru orantılıdır. Elde edilen simülasyon sonucuna göre profil akış yönündeki (Z eksen) kesit hız değerleri grafiği şekil 5.2’ de verilmiştir.



Şekil 5.2: Profil akış yönündeki kesit hız değerleri grafiği.

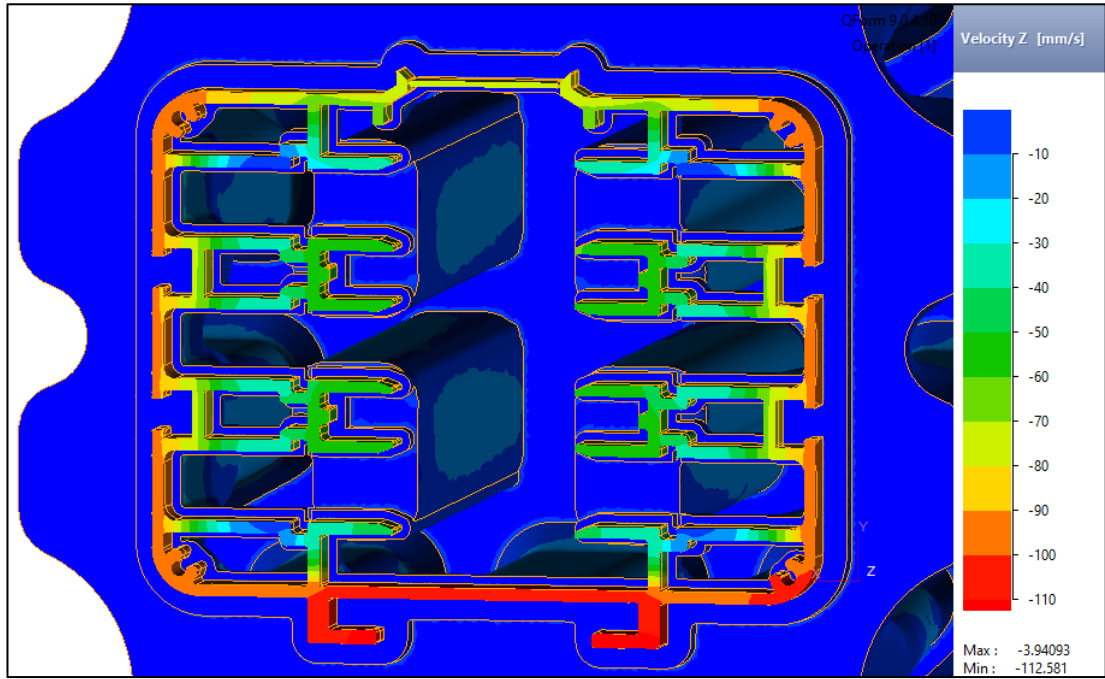
İlgili grafikteki değerler profil akış yönündeki (Z eksen) ilerleme hızını göstermektedir. Sayıların önünde yer alan – veya + işaretleri ise yön belirtmektedir. Grafiği incelediğimiz zaman profil kesitinde yüksek hız farklarının yanı sıra yön farklılıkları da görülmektedir. Kesitte yaklaşık 127 mm/sn lik bir hız farkı mevcuttur. Nihai ürünün kalitesini arttırmak için profil kesitinde hıza yönelik homojenliğin artırılması gerekmektedir.

Profil kesitindeki homojenliğin artırılması için profil akış yönündeki hız farklarının azaltılması gerekmektedir. Hız farklarının değişmesi için ya kalıpta tasarım değişikliğine gidilecektir ya da kalıp sıcaklığı değiştirilecektir. Bunun için öncelikle kalıp tasarımında herhangi bir değişiklik yapılmadan, kalıp seti sıcaklıklarının profil kesitindeki hıza etkisi gözlemlenecektir.

5.3. Kalıp Sıcaklığının Profil Akış Hızına Etkisinin İncelenmesi

Elde edilen ilk simülasyon sonucundan sonra kalıp seti sıcaklığı değiştirilerek sıcaklık dışındaki bütün veriler aynı kalacak şekilde yeniden bir simülasyon yapılmıştır. Kalıp sıcaklığı 450 °C sıcaklıktan 480 °C sıcaklığa yükseltilmiştir. Burada sıcaklığın artırılmasındaki sebep, malzeme sıcaklığının da ısı transfer etkisi ile artarak malzeme akışını rahatlatmaktır.

Sadece kalıp sıcaklığının 480 °C ye çıkarılması ile elde edilen kesit hız değerleri grafiği şekil 5.3’ te gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Kalıp sıcaklığının 480 °C ye çıkarılması ile elde edilen kesit hız değerleri grafiği.

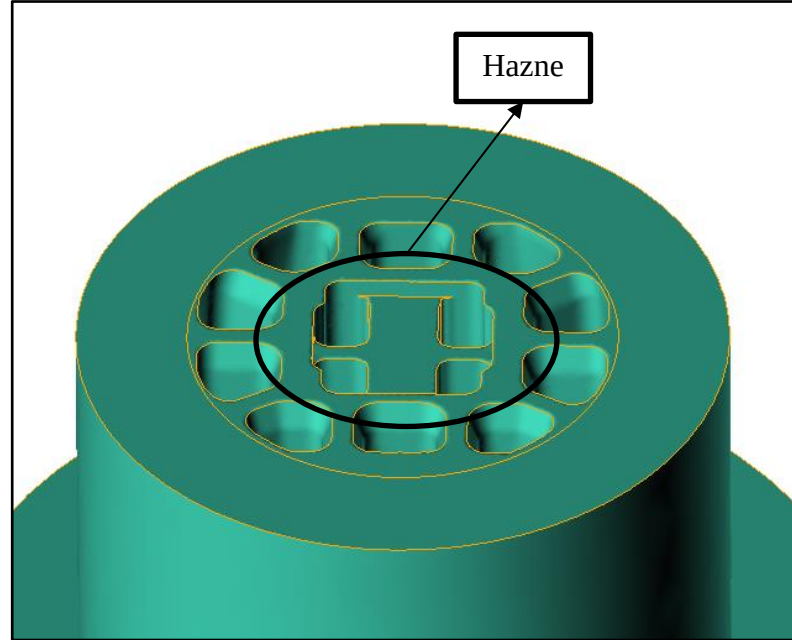
Kalıp sıcaklığının 480 °C ye çıkarılması ile, profil ilerleme yönündeki (Z eksen) kesitte öncesinde yaklaşık 127 mm/sn olan hız farkı 109 mm/sn den daha az seviyeye düşmüştür. Bu çıkarım için şekil 5.3’ teki grafikte belirtilen maksimum ve minimum değerler kullanılmıştır. Kalıp sıcaklığının artırılması profil kesitindeki akış hızının homojenliğini arttırmıştır. Bu da nihai ürünün kalitesini arttıracaktır.

Bir sonraki aşamada kalıp sıcaklığı ilk haline getirilip kalıp tasarımına revizyon uygulanacaktır. Kalıp revizyonunun profil akış hızına etkisi incelenecek ve sıcaklığın profil akış hızına etkisi ile karşılaştırma yapılacaktır.

5.4. Kalıp Tasarımında Yapılan Revizyonun Profil Akış Hızına Etkisinin İncelenmesi

Kalıp sıcaklığının 450 °C den 480 °C ye çıkarılması ile profil kesitindeki hız farklarının daha homojen bir hale geldiği gözlemlenmiştir. Şimdi ise kalıpta bir tasarım değişikliği yapılacak ve kalıp sıcaklığı tekrar 450 °C ye ayarlanarak tasarım revizyonunun profil kesitindeki hız farklarına etkisi incelenecektir.

Yapılan ilk simülasyonda profilin orta kısmının, kenar kısımlara göre oldukça yavaş kaldığı gözlemlenmişti. Profilin orta kısmının hızını arttırmak için, proseste biyetin kalıp ile temas ettiği ilk kısımda ekstra bir akış hacmi oluşturularak profilin orta kısmının hızının artacağı düşünülmüştür ve tasarımda da bu şekilde bir revizyon yapılmıştır. Kalıp tasarımına hazne eklenmesi şekil 5.4' te gösterilmiştir.

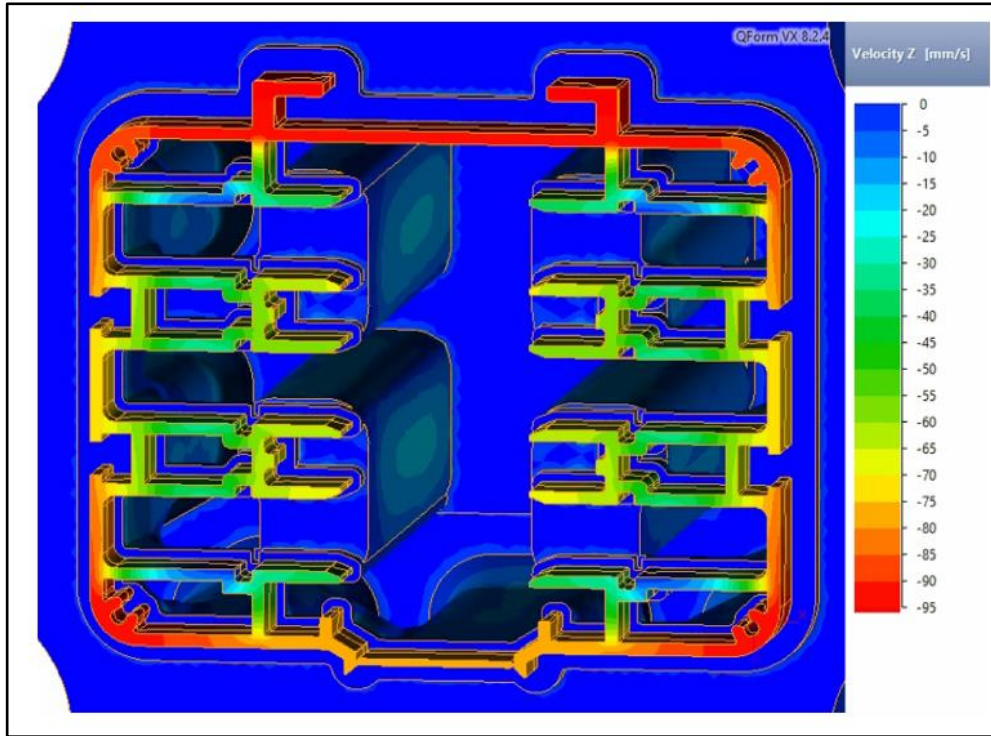


Şekil 5.4: Kalıp tasarımına hazne eklenmesi.

Profil akış hacmini arttırmak için şekil 5.4’ te de görüldüğü gibi biyetin baskı anında kalıp ile temas ettiği ilk yüzeyde 10 mm derinlikte bir hazne oluşturulmuştur. Sonrasında ilk simülasyon sınır şartları kullanılarak yeniden simülasyon yürütülmüştür.

5.4.1. 10 mm Derinliğe Sahip Hazne’ ye Göre Simülasyon Sonucu

Kalıpta 10 mm derinliğe sahip bir hazne oluşturularak tekrar yürütülen simülasyon sonucuna göre hesaplanmış olan 10 mm hazne oluşturulması ile elde edilen kesit hız değerleri grafiği şekil 5.5’ te gösterilmiştir.



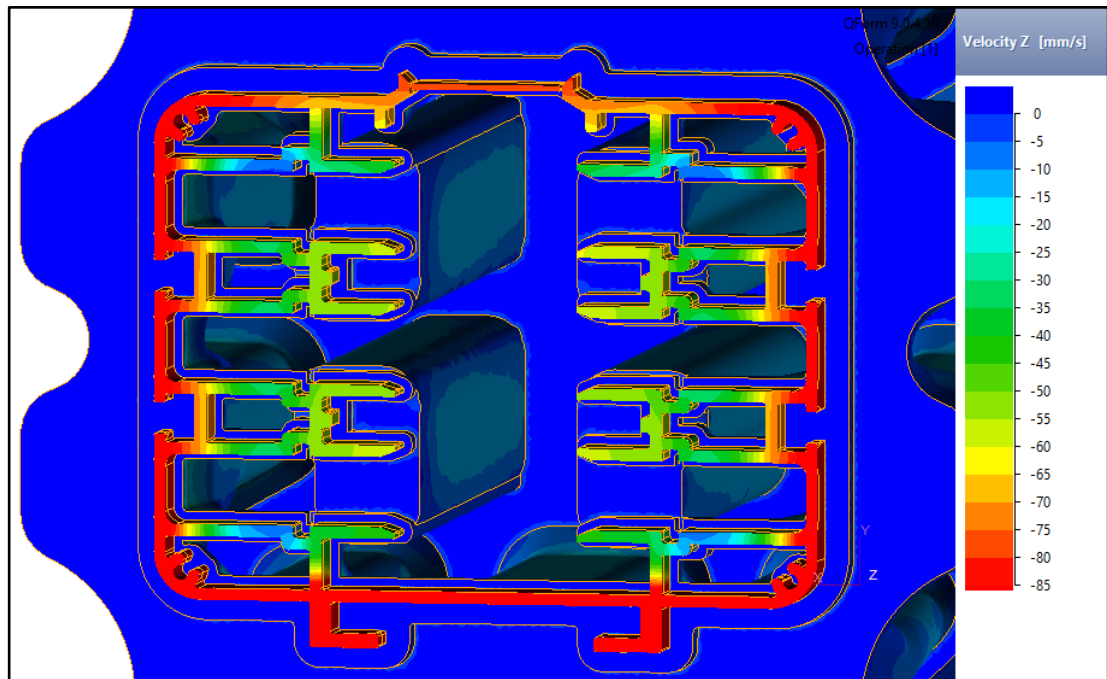
Şekil 5.5: 10 mm hazne oluşturulması ile elde edilen kesit hız değerleri grafiği.

Şekil 5.5’ te de görüldüğü üzere, kalıp yüzeyine 10 mm derinliğinde bir hazne eklenmesiyle profil kesitindeki hız farkı 95 mm/sn değerine düşmüştür. Bu durumda kalıpta akış hacmi oluşturmanın, kalıp sıcaklığını arttırmaya kıyasla profil kesitindeki hız homojenliğine daha büyük etki gösterdiği görülmektedir. Sonraki aşamalarda oluşturulan hazne derinliği artırılarak tekrar sonuçlar gözlemlenecektir.

5.4.2. 20 mm Derinliğe Sahip Hazne' ye Göre Simülasyon Sonucu

Daha önce oluşturulmuş olan 10 mm derinliğindeki haznenin profil akış kesitindeki hız farklarına etkisini gözlemlemiştik ve kalıp sıcaklığını arttırmaya kıyasla kalıp yüzeyine hazne eklenmesinin daha büyük etki yarattığını görmüştük.

Şekil 5.6' da 20 mm hazne oluşturulması ile elde edilen kesit hız değerleri grafiği görülmektedir.



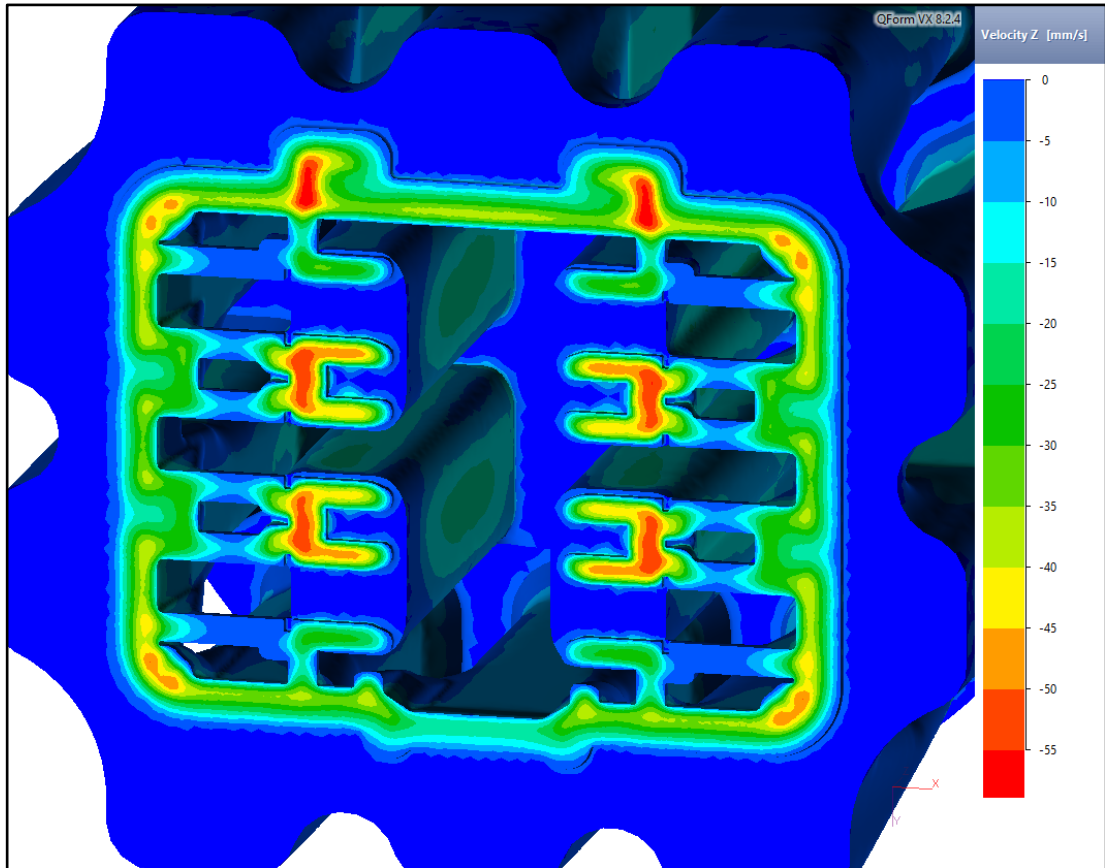
Şekil 5.6: 20 mm hazne oluşturulması ile elde edilen kesit hız değerleri grafiği.

Şekil 5.6’da da görüldüğü üzere hazne derinliğinin 10 mm den 20 mm ye çıkarılması ile profil kesitindeki hız farkı 95 mm/sn den 85 mm/sn değerine düşmüştür.

Hazne derinliği 30 mm ye çıkarılarak bir simülasyon daha yapıp hız farkına etkisi incelenecektir.

5.4.3. 30 mm Derinliğe Sahip Hazne' ye Göre Simülasyon Sonucu

Hazne derinliğinin 20 mm' den 30 mm' ye çıkarılması sonucunda, 30 mm hazne oluşturulması ile elde edilen profil kesit hız değerleri grafiği şekil 5.7' de gösterilmiştir.



Şekil 5.7: 30 mm hazne oluşturulması ile elde edilen kesit hız değerleri grafiği.

Hazne derinliğinin 20 mm' den 30 mm' ye çıkarılması sonucunda şekil 5.7' de de görüldüğü üzere profil kesitindeki hız farkı 85 mm/sn den 55 mm/sn ye düşürülmüştür.

Burada hazne derinliğini daha fazla arttırarak kesitteki hız farkı bakımından daha homojen yapıda bir profil elde edileceği düşünülebilir. Fakat hazne derinliğini daha fazla arttırmak, baskıdan dolayı kalıplarda meydana gelen gerilmelerin artmasına sebep olacaktır ve bunun sonucunda kalıp ömrü azalacaktır. Bu sebepten dolayı hazne derinliği 30 mm' den daha fazla arttırılmamıştır.

5.4.4. Elde Edilen Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada öncelikle 450 °C kalıp sıcaklığında ve kalıbın ilk tasarımına göre bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonucuna göre profil ilerleme yönünde (Z eksin) profil kesitindeki hız değerleri gözlemlenmiştir. Hız değerleri arasındaki fark yaklaşık 127 mm/sn olarak okunmuştur. Hız farkını azaltmak için öncelikle 450 °C olan kalıp sıcaklığı 480 °C ye çıkartılmıştır. 480 °C sıcaklıkta profil ilerleme yönündeki (Z eksen) hız farkı, 450 °C kalıp sıcaklığındaki hız farkı verisine kıyasla 127 mm/sn den 109 mm/sn ye düşmüştür. Kalıp sıcaklığının artırılması profil kesitindeki hız farkını azaltmıştır.

Sonrasında kalıp sıcaklığı tekrar 450 °C ye ayarlanmıştır ve profilin orta kısmının hızını artırarak profil kesitindeki hız farklarını düşürmek için, biyetin kalıba temas ettiği ilk yüzeyde kalıbın orta kısmında bir akış hacmi oluşturulmuştur. Bu akış hacmi hazne olarak adlandırılmıştır.

Hazne derinliği sırasıyla 10 mm, 20 mm ve 30 mm değerine ayarlanarak ve kalıp sıcaklığı 450 °C sıcaklığında sabit tutularak üç farklı simülasyon daha yapılmıştır. 10 mm derinlikte hazne oluşturulması ile profil kesitindeki hız farkı 95 mm/sn, 20 mm derinlikte hazne oluşturulması ile profil kesitindeki hız farkı 85 mm/sn ve 30 mm derinlikte hazne oluşturulması ile profil kesitindeki hız farkı 55 mm/sn ye düşmüştür.

Bu verilere göre, elde edilen bütün simülasyon sonuçlarına ilişkin karşılaştırma durumu tablo 5.2 ‘ de gösterilmiştir.

Tablo 5.2: Simülasyon sonuçlarına ilişkin karşılaştırma tablosu.

Konfigürasyon	Elde Edilen Hız Farkı
450 °C kalıp sıcaklığı, haznesiz	127 mm/sn
480 °C kalıp sıcaklığı, haznesiz	109 mm/sn
450 °C kalıp sıcaklığı, 10 mm hazne	95 mm/sn
450 °C kalıp sıcaklığı, 20 mm hazne	85 mm/sn
450 °C kalıp sıcaklığı, 30 mm hazne	55 mm/sn

6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Öncelikle elde bulunan alüminyum ekstrüzyon kalıp seti modeli, proses sınır şartları tanımlanarak QForm Metal Şekillendirme Simülasyon Programı'nda simüle edilmiştir. Elde edilen sonuca göre profil kesitindeki hız farkları yüksek çıkmıştır. Profil kesitindeki hız farklarının fazla olması, nihai ürün kalitesini düşürmektedir. Bu nedenle hız farklarını azaltmaya yönelik bazı çalışmalar yapılmıştır.

Hız farklarını azaltmaya yönelik iki yöntem üzerinde durulmuştur. Öncelikle kalıp sıcaklıkları arttırılarak bir simülasyon daha yapılmış ve kalıptaki sıcaklık artışının profil kesitindeki hız dağılımına etkisi gözlemlenmiştir. Daha sonra sıcaklık ilk haline getirilip, profil akışının yavaş kaldığı kısımlara hız kazandırmak amacı ile, kalıpta malzemenin daha rahat akması için kalıp yüzeyinde hazne şeklinde bir akış hacmi oluşturularak bir simülasyon daha yapılmıştır. Akış hacminin oluşturulması sonucunda oluşan hız farkındaki azalma, kalıp sıcaklığın arttırılması ile oluşan azalmaya kıyasla daha fazla olmuştur. Sonrasında farklı hazne derinliklerinde diğer bütün sınır şartları aynı kalacak şekilde iki ayrı simülasyon daha yapılmıştır.

Hazne derinliğinin arttırılması profil kesitindeki hız farklarını azaltmıştır. Fakat hazne derinliğinin arttırılması aynı zamanda biyet baskısından ve malzeme sürtünmesinden dolayı kalıp mukavemetini azaltacağı için, 30 mm den daha fazla hazne derinliği oluşturulmamıştır. Kalıplarda oluşan gerilmeler arttıkça kalıp ömürleri azalmaya başlayacaktır ve bu da istenmeyen farklı sonuçlara sebep olacaktır.

Nümerik yöntem ile tasarım doğrulama yapılarak tasarım sanal ortamda test edilmiştir. Benzer proseslerde de tasarımdan kaynaklanan olası sorunlar üretimden önce sanal ortamda test edilerek, istenmeyen sonuçların önüne geçilebilir. Bu yöntem kullanıcıyı hem test maliyetlerinden kurtarır hem de zamandan tasarruf sağlamış olur.

KAYNAKLAR

- [1] Šupić A., Bečirović A., Obućina A., Zrilić M., (2018), “Modeling and Simulation for Aluminium Profile Extrusion,” *Procedia Struct. Integr.*, 13, 2077–2082.
- [2] Bressan D., Martins M., Bandini C., (2019), “Validation of Finite Volume Method by hot extrusion analysis of aluminium alloy,” *Mater. Today Proc.*, 10, 234–241.
- [3] Ma X., Rooij M., Schipper D., (2012), “Friction conditions in the bearing area of an aluminium extrusion process,” *Wear*.
- [4] Bakhtiani T., El-Mounayri H., Zhang J., (2014), “Numerical simulation of aluminum extrusion using coated die,” *Mater. Today Proc.*, 1, 94–106.
- [5] Yi J., Huwang Z., Wenliu Z., Mingzhang 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*, 10, 2094–2101.
- [6] Marín M., Camacho A., Pérez A., (2017), “Influence of the temperature on AA6061 aluminum alloy in a hot extrusion process,” *Procedia Manuf.*, 13, 327–334.
- [7] Zhang C., Dong Y., Zhao G., Chen L., (2017), “Experimental and numerical investigations on transverse weld of hollow aluminum profile during porthole extrusion process,” *Procedia Eng.*, 207, 1653–1658.
- [8] Ikumapayi O., Oyinbo S., Bodunde O., Afolalu S., Okokpuije I., Akinlabi E., (2019), “The effects of lubricants on temperature distribution of 6063 aluminium alloy during backward cup extrusion process,” *J. Mater. Res. Technol.*, 1, 1175–1187.
- [9] Mayavaram R., Sajja U., Secli C., Niranjana S., (2013), “Optimization of bearing lengths in aluminum extrusion dies,” *Procedia CIRP*, 12, 276–281.
- [10] Fang G., Zhou J., Duszczek J., (2009), “FEM simulation of aluminium extrusion through two-hole multi-step pocket dies,” *J. Mater. Process. Technol.*, 209, 4, 1891–1900.
- [11] He Z., Wang H., Wang M., Li G., (2012), “Simulation of extrusion process of complicated aluminium profile and die trial,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 7, 1732–1737.
- [12] Francy K., Rao C., Gopalakrishnaiah P., (2019), “Optimization of Direct extrusion Process Parameter on 16MnCr5 and AISI1010 using DEFORM-3D,” *Procedia Manuf.*, 30, 498–505.

- [13]Web 1, (2019), <http://www.asistal.com/hizmet/ekstruzyon>, (Eriřim Tarihi: 10/11/2018)
- [14]Web 2, (2019), <http://www.ozenaluminyum.com/kurumsal/aluminyum-ekstruzyon>, (Eriřim Tarihi: 10/11/2018)
- [15]Web3,(2019),http://www.formal.com.tr/aluminyum/21/4/21/aluminyum_ekstruzyon_profil.html, (Eriřim Tarihi: 10/11/2018)
- [16]Web 4, (2019), <https://www.qform3d.com/software>, (Eriřim Tarihi: 17/05/2019)
- [17]Web 5, (2019), <https://www.qform3d.com/products/qexdd>, (Eriřim Tarihi: 18/05/2019)
- [18]Web 6, (2019), <https://www.qform3d.com/products/qformextrusion>, (Eriřim Tarihi: 19/05/2019)
- [19]Web 7, (2019), <https://www.qform3d.com/products/qform>, (Eriřim Tarihi: 16/05/2019)

ÖZGEÇMİŞ

Fırat GÜNGÖRDÜ 1993 yılında İstanbul’da doğdu. 2011 yılında başladığı Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2016 yılında başarıyla tamamlayarak aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2017 yılından bu yana ARMADA YAZILIM A.Ş.’ de Analiz Ürünleri Uzmanı olarak çalışmaktadır.