T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KALIP GEOMETRİSİNİN EKSTRÜZYON İŞLEMİ ÜZERİNE ETKİSİ

Tuğçe Cemre PAÇAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
Mart 2021

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Tuğçe Cemre PAÇAL tarafından yapılan Kalıp Geometrisinin Ekstrüzyon İşlemi Üzerine Etkisi" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. Önder AYER

Üye : Doç Dr. Sedat BİNGÖL (Danışman)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mesut HÜSEYİNOĞLU

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 01 / 03 / 2021

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../ 2021

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitim hayatım süresince hayat ve eğitim tecrübelerini paylaşarak sadece hazırlanan bu tez çalışmasında değil aynı zamanda bilimin yaşama katkısını konusunda beni bilgilendirmek için bana destek olan rehberim, değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Sedat BİNGÖL'e teşekkürü borç bilirim.

Her zaman destek olmak isteyen aileme ve yakınlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasının hazırlanma sürecinde zamanlarını ayırarak yardımcı olan hocamalarım Doç. Dr. Önder AYER'e, Prof. Dr. Fevzi Önen'e ve değerli arkadaşım Saif Wakeel'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü (DÜBAP) tarafından MÜHENDİSLİK.20.003 Nolu proje ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR 1
İÇİNDEKİLER II
ÖZET IV
ABSTRACT VI
ÇİZELGE LİSTESİ VIII
ŞEKİL LİSTESİ IX
KISALTMA ve SİMGELER XI
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ÖZETLERİ 3
3. MATERYAL VE METOT 7
3.1. Ekstrüzyon İşlemi 7
3.1.1. Ekstrüzyon Yöntemleri 8
3.1.1.1. Direkt Ekstrüzyon 8
3.1.1.2. Endirekt Ekstrüzyon 9
3.1.1.3. Hidrostatik Ekstrüzyon 10
3.1.2. Ekstrüzyon Malzemeleri 10
3.1.2.1. Alüminyum Ekstrüzyonu 11
3.1.2.2. Magnezyum Ekstrüzyonu 12
3.1.2.3. Kurşun ve Kalay Ekstrüzyonu 14
3.1.2.4. Bakır Ekstrüzyonu 15
3.1.2.5. Zirkonyum Ekstrüzyonu 15
3.1.2.6. Nikel Ekstrüzyonu 15
3.1.2.7. Berilyum Ekstrüzyonu 16
3.1.2.8. Titanyum Ekstrüzyonu 16
3.1.2.9. Demir-Çelik Ekstrüzyonu 17
3.1.3. Ekstrüzyonda Malzeme Akışı 18
3.1.3.1. Malzeme Akışı Araştırma Yöntemleri 19
3.1.3.2. Direkt Ekstrüzyon Yönteminde Malzeme Akışı 20
3.1.3.3. Endirekt Ekstrüzyon Yönteminde Malzeme Akışı 26
3.1.4. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımlarının Ekstrüzyonu 27
3.1.4.1. Magnezyumun Özellikleri 27
3.1.4.2. Magnezyum ve Alaşımları 29
3.1.5. Ekstrüzyon Kalıpları ve Kalıp Tasarımı 31
3.1.5.1. Kalıp 33
3.1.5.2. Kalıp Şekilleri 33
3.2. Deneysel Çalışma 35

3.2.1. Kullanılan Malzeme AZ31 Magnezyum Alaşımı 35
3.2.2. Deney Şartları 35
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi 37
3.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Analizin Süreçleri 39
3.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Analizlerin Avantaj ve Dezavantajları 40
3.3.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Ekstrüzyonda Uygulamaları 40
3.3.4. DEFORM 3D ile Deneysel Çalışmanın Modellenmesi 41
3.3.5. DEFORM 3D ile Modelleme Çalışması 43
3.4. Gen İfadesi İle Programlama (GİP) 43
3.4.1. GİP Modelinin Bileşenleri 44
3.4.2. GİP Modelinin Gelişimi 46
3.4.3. GİP Modelinin Oluşturulması 48
3.4.4. GİP Modelinin Çalıştırılması 49
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 55
4.2. Kalıp Geometrisinin Ekstrüzyon Kuvveti Üzerindeki Etkisi 57
4.3. DEFORM-3D ve GİP'in Tahmini Ekstrüzyon Kuvveti Arasındaki Karşılaştırma 60
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 61
6. KAYNAKLAR 63
ÖZGEÇMİŞ 67

ÖZET

KALIP GEOMETRİSİNİN EKSTRÜZYON İŞLEMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TUĞÇE CEMRE PAÇAL

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2021

Magnezyum, yüksek mekanik özelliklere ve daha düşük ağırlığa sahip olmasından dolayı inşaat, havacılık ve otomotiv gibi birçok sektörde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Magnezyum ve alaşımlarının uygulamasının yaygınlaştığı yöntemlerden biri de ekstrüzyon işlemidir. Ekstrüzyon, biyet ya da iş parçası olarak adlandırılan metal bir bloğun basınç yardımıyla kendisinden daha küçük kesitli bir kalıp boşluğundan akmasının sağlandığı bir plastik şekillendirme yöntemidir. Bu yöntem ile hem dolu kesitli profiller hem de içi boşluklu ve karmaşık kesitli profiller imal edilmektedir.

Ekstrüzyon işleminde elde edilen profillerin kalitesini iyileştirmek için birçok parametrenin etkisi incelenmiştir. Başlıca etmenlerden olan malzeme akışı, malzemenin homojen bir yapıda olması ve buna bağlı olarak düzgün bir geometride olması nedeni ile önemlidir. Ekstrüzyon kalıplarındaki metal akışını kontrol etmek kalıp geometrisinin optimize edilmesi gerekmektedir. Kalıp tasarımı uygun olmadığı takdirde ekstürize edilen üründe burkulma ya da katlanma olması muhtemeldir. Bununla birlikte kalıp üzerinde oluşan gerilme ve profildeki çıkış sıcaklığında meydana gelen kritik yükselmeler kalıbın ve ürünün işlevsiz hale gelmesine neden olabilmektedir.

Bu çalışmada, kalıp geometrisindeki önemli parametrelerden ekstrüzyon oranı ve kalıp giriş açısı dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmanın ardından bu deneysel çalışması yapılmış ekstrüzyon işlemi modellenerek DEFORM 3D yazılımı sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucu ve analiz sonuçları mukayese edilip sonlu eleman modelinin geçerliliği test edilmiştir. Geçerli bir sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra ekstrüzyon oranı ve kalıp giriş açısı değiştirilerek yeni sonlu eleman simülasyonları gerçekleştirilerek oluşan sonuçlar

irdelenmiştir. Sonlu eleman analizleri ile elde edilen veriler GİP (gen ifadesiyle programlama) kullanılarak modellemeler yapılmıştır. Bu GİP modellemeleri ile ekstrüzyon oranı ve kalıp giriş açısı (girdi parametreleri), ekstrüzyon kuvveti (çıktı parametresi) arasındaki ilişki ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ekstrüzyon, Magnezyum;AZ31, Kalıp Geometrisi, Sonlu Eleman Metodu (SEM), DEFORM 3D, GİP (Gen İfadesiyle Programlama)

ABSTRACT

THE EFFECT OF DIE GEOMETRY ON EXTRUSION PROCESS
MSc. THESIS

TUĞÇE CEMRE PAÇAL

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2021

Using of magnesium has been widespread in many sector such as construction, aerospace and automotive due to its high mechanical properties and lower weight. One of the methods of application of magnesium and its alloys is extrusion process. Extrusion is a plastic forming method in which a metal block, called billet or workpiece, is allowed to flow through a mold cavity with a smaller cross section through the pressure. With this method, both profiles that solid section and profiles that hollow and complex section can be produced.

In order to improve the quality of the profiles obtained in the extrusion process, the effect of many parameters was investigated. The material flow, which is one of the main factors, is important because of the material is in a homogeneous structure and accordingly has a smooth geometry. The die geometry needs to be optimized to control the metal flow in the extrusion dies. If the die design is not suitable, it is likely that there will be buckling or folding in the extruded product. However, the stress on the die and critical rises in the outlet temperature in the profile can cause the die and product to become dysfunctional.

In this study, extrusion rate and die entry angle which are important parameters in die geometry, are taken into consideration. After the experimental study, DEFORM 3D software finite element analysis was performed by modeling the extrusion process that this experimental study was made. The validity of the finite element model was tested by comparing the experimental study result and analysis result. After creating a valid finite element model, extrusion rate and die entry angle are changed and new finite element simulations are performed and the results are examined. Data obtained by finite element analysis were modeled using GEP

(Gene Expression Programming). With these GEP models, the relationship between extrusion rate and die entry angle (input parameters), extrusion force (output parameters) is revealed.

Key Words: Extrusion, Magnesium;AZ31, Geometry of Die, Finite Element Method DEFORM 3D, GEP (Gene Expression Programming)

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No **Sayfa**

Çizelge 3. 1. Malzeme akışını etkileyen tüm faktörler 18
Çizelge 3. 2. Direk ekstrüzyon yönteminde malzeme akış tiplerinin karakteristikleri (Sönmez 1989) 25
Çizelge 3. 3. Saf bir magnezyumun karakteristik özellikleri 27
Çizelge 3. 4. Magnezyumun alaşım elementlerini temsil eden harfler 30
Çizelge 3. 5. AZ31 alaşımının tanımlanması 31
Çizelge 3. 6. Deneyde kullanılan AZ31 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi (%) 35
Çizelge 3. 7. Deneyde kullanılan AZ31'in fiziksel ve mekanik özellikleri 35
Çizelge 3. 8. Deneysel çalışmanın modellemesinin boyutsal tanımı 42
Çizelge 3. 9. Simülasyonlarda kullanılan parametrelerin seviyesi 43
Çizelge 3. 10. Ekstrüzyon işlemi için uygun GİP modelinin parametreleri 48

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No **Sayfa**

Şekil 3. 1. Direkt ekstrüzyonda içi dolu profil üretimi 8
Şekil 3. 2. Direkt ekstrüzyonda içi boş profil üretimi 9
Şekil 3. 3. Endirekt ekstrüzyon yöntemi 9
Şekil 3. 4. Hidrostatik ekstrüzyon. 1, profil; 2, kalıp; 3, akışkan; 4, biyet; 5, kovan; 6, ıstampa; 7, hidrostatik ortam 10
Şekil 3. 5. Magnezyum alaşımlı profil 13
Şekil 3. 6. Tekstil makinesi için MgAl3Zn alaşımı ile üretilmiş ürün 14
Şekil 3. 7. Otomobil motoru için MgAl3Zn alaşımı ile üretilmiş ürün 14
Şekil 3. 8. Ekstrüzyondaki hız dağılımı: a) Tipik akış b)Arzu edilen akış (Zasadzinski 1996) .19
Şekil 3. 9. Koordinat usulune göre hazırlanmış blok (Sönmez 1989) a)Blok b)Koordinat çizilmiş blok yarıları c)Birleştirilmiş blok 20
Şekil 3. 10. Direkt ekstrüzyonda biyetin çevresinin (1-2) ve merkezinin (3) izlediği yol (Sönmez 1989). 21
Şekil 3. 11. Direkt ekstrüzyonda takozdaki hız dağılımı (Sönmez1989). 22
Şekil 3. 12. Ekstrüzyon borusu hatası oluşumu. 1, İkincil deformasyon bölgesi; 2, Biyet merkezi; 3, Kesme bölgesi; 4, Birincil deformasyon bölgesi; 5, Kesme bölgesi; 6, Ölü metal bölge; 7, Ekstrüzyon 24
Şekil 3. 13. Direkt ekstrüzyon akış modelleri 25
Şekil 3. 14. Direkt ve endirekt ekstrüzyonda blok yüzeyinin şekil değiştirmesi (Sönmez 1989) 26
Şekil 3. 15. Sıkı paket hegzagonal yapıda atomik katmanlarının 3D ve 2D görünümleri 28
Şekil 3. 16. Sıkı paket hegzagonal yapının birim hücre ve katman dizilişi 28
Şekil 3. 17. Bazı demir dışı metal alaşımları ve mühendislik uygulamaları 30
Şekil 3. 18. Direkt ekstrüzyon için tipik bir pres 31
Şekil 3. 19. Temel bir ekstrüzyon presinin şematin diyagramda görünümü 32
Şekil 3. 20. Dolu profiller için düz (katı) kalıp örnekleri 34
Şekil 3. 21. İçi boş profiller için açık (içi boş) kalıp örnekleri 34
Şekil 3. 22. Odalı (porthole) kalıp (Saha 2000) 34
Şekil 3. 23. (a) Deneysel kalıp seti (b) Kalıp setinin solidworks modeli (c) Deney sonucu elde edilen ürün 36
Şekil 3. 24. Sonlu elemanlar metodu ile analiz yapan ticari programlardaki ağ yapısının gösterimi 38
Şekil 3. 25. (a) Deneysel çalışmanın modellenmesi (b) Simülasyon sonucu elde edilen ürün ..42
Şekil 3. 26. GİP'in akış şeması 45
Şekil 3. 27. Bir Genin Kromozomu, İfade Ağacı ve Matematiksel Denklemi..... 46
Şekil 3. 28. Oluşturulan GİP Model 2 için ifade ağacı (ET) 516
Şekil 3. 29. GİP Model 2'nin eğitim aşamasındaki model değerleri ile gerçek değerlerin karşılaştırılması 52
Şekil 3. 30. Eğitim seti için tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması 52
Şekil 3. 31. GİP Model 2'nin test aşamasındaki model değerleri ile gerçek değerlerin karşılaştırılması 53

Şekil 3. 32. Test seti için tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması 53

Şekil 4. 1. Çalışmanın akış şeması..... 55
Şekil 4. 2. Deneysel ve SEM ile simüle edilmiş ekstrüzyon kuvveti 56
Şekil 4. 3. Deney ve SEM simülasyonunun ekstrüzyon kuvveti 57
Şekil 4. 4. Farklı ekstrüzyon oranı ile ekstrüzyon kuvvetinin değişimi..... 58
Şekil 4. 5. Farklı kalıp giriş açısı ile ekstrüzyon kuvvetinin değişimi 59

KISALTMA VE SİMGELER

SEM : Sonlu Elemanlar Metodu

GİP : Gen İfadesiyle Programlama

GA : Genetik Algoritma

GP : Genetik Programlama

1. GİRİŞ

Magnezyum ve alaşımlarının sahip olduğu yüksek özgül mukavemet, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek boyutsal karalılık ve hafiflik gibi çeşitli üstün özelliklerinden dolayı otomotiv, havacılık, uzay sanayi, askeri uygulamalar, taşımacılık ve inşaat gibi birçok sektörde kullanımı artmaktadır. Böylece magnezyumun şekillendirme yöntemleri de çeşitlenmektedir. Magnezyum ve alaşımlarını şekillendirmede yaygınlaşan yöntemlerden biri de ekstrüzyon işlemidir.

Ekstrüzyon, çeşitli kesit ve geometriye sahip profillerin biçimlendirilmesi için biyet ya da iş parçası olarak tanımlanan metal bir bloğun kalıp boşluğundan yüksek basınç yardımıyla akmasının sağlandığı bir plastik şekillendirme yöntemidir.

Magnezyum ekstrüzyonu, genellikle ağırlık tasarrufunun, örneğin düşük kütleye sahip profillerin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Başlıca uygulama alanları otomobil ve makine parçası imalatıdır. Bu ekstrüde ürünler öncelikle yüksek hızlanma ve frenlemeye maruz kalan makine bileşenleri için, örneğin tekstil makine bileşenlerinde uygundur. Bu ürünler havacılık ve uzay sanayiinde ve askeri uygulamalarda da kullanılmaktadır.

Ekstrüzyon yöntemi ile elde edilen profillerin kalitesini iyileştirmek için birçok parametrenin etkisi incelenmiştir. Düzgün geometriye ve yüksek kaliteye sahip magnezyum alaşımlı profiller elde etmek için malzeme akışı ve malzemenin homojenliğinin incelenmesi temel etmenlerdendir. Ekstrüzyon kalıplarındaki malzeme akışının kontrol edilebilmesi profil kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Metal akışını kontrol etmek için kalıp tasarımlarının optimize edilmesi gerekmektedir.

Akademik ve endüstriyel alanlarda ekstrüzyon yönteminin kullanımı ve üretimdeki gelişimi için yapılan çalışmalarda bilgisayar teknolojisinin kullanımı artış göstermektedir. Ar-Ge üretimdeki analizler bilgisayar ortamında analiz programları ile yapılabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi; kabul edilebilir sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirilerek, analizler sonucu ile imalat sürecinde incelemeler yapılmakta ve oluşabilecek birçok hatanın önüne geçilebilmektedir.

Sonlu elemanlar metoduna (SEM) alternatif olarak daha hızlı modelleme yapabilmek için tahmin programları kullanılabilmektedir. Bu programlar çeşitli uygulamalarda oluşan sonuçları tahmin etmek için kullanılmaktadır. Daha hızlı sonuç almak için literatürde ekstrüzyon ile ilgili yapılmış kısıtlı çalışmaların birinde ekstrüzyon ile farklı diş sayılarına sahip profil üretiminde ekstrüzyon kuvvetinin tahmini için yapay sinir ağı (YSA) yöntemini kullanarak giriş parametrelerini kalıp uzunluğu, ekstrüzyon oranı ve diş sayısı olarak alıp çıkış parametresi olan ekstrüzyon kuvveti başarıyla tahmin edilmiştir (Bingol ve ark. 2014).

Bu çalışmada, kalıp geometrisindeki önemli parametrelerden ekstrüzyon oranı ve kalıp giriş açısı dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmanın ardından bu deneysel çalışması yapılmış ekstrüzyon işlemi DEFORM 3D yazılımında modellenerek sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma ve analiz sonucu mukayese edilip sonlu eleman modelinin geçerliliği test edilmiştir. Geçerli bir sonlu eleman modeli oluşturulduktan sonra ekstrüzyon oranı ve kalıp giriş açısı değiştirilerek yeni sonlu eleman simülasyonları gerçekleştirilip oluşan sonuçlar irdelenmiştir. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen veriler ile GİP (gen ifadesiyle programlama) yöntemi ile modellenmiştir. Bu aşamadaki modelleme işlemi GeneXproTools programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, ekstrüzyon oranı, kalıp giriş açısı ve ıstampanın hareketi ile oluşan strok girdi parametreleri olarak alınmış ve bu girdi parametrelerine bağlı olarak değişen ekstrüzyon kuvveti çıktı parametresi olarak tahmin edilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Endüstride imalat yöntemleri içerisinde yaygın olarak kullanılan ekstrüzyon işlemi, birçok işlem ve giriş parametresi içerdiği için analiz edilmesi zor bir yöntemdir. Bu parametrelerin araştırılarak kendi aralarında mukayese edilmesi için akademik düzeyde yapılan çalışmalar için deney, yazılım teknolojisi, simülasyonlar ve tahmin programları kullanılmıştır.

Magnezyum alaşımları çok düşük bir yoğunluğa (1.74 g/cm^3) sahip olmakla beraber, alüminyum benzeri alaşımlarla (Al: 2.7 g/cm^3) neredeyse aynı özgül mukavemete sahiptirler (Attari 2012).

Bingöl (2016) kalıp geometrisinin ekstrüzyon edilebilirliğe etkisini bir sonlu elemanlar yazılımı olan DEFORM-3D programı kullanılarak incelemiş ve incelediği kalıplar içerisinden en uygun kalıp geometrisini tespit etmeye çalışmıştır. Farklı kalıp giriş formları ile gerçekleştirilen ekstrüzyon simülasyonlarını birbirleriyle karşılaştırarak kalıp formunun işlem üzerine nasıl etki ettiğini analiz etmiştir. Beş farklı kalıp giriş geometrisi (konik kalıp, iç bükey kalıp, dış bükey, ters S kalıp ve S kalıp) kullanılarak beş farklı model için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Her bir farklı kalıp geometrisinin sıcaklık ve efektif gerilim üzerinde meydana getirdiği değişim ekstrüzyon zamanına bağlı olarak incelemiş ve bu değişimlerin sebeplerini belirtmiştir. Tüm modeller için başlangıç biyet sıcaklıkları ve sürtünme değerleri aynı olmasına rağmen dışbükey kalıpta sıcaklık artışı diğerlerinden daha fazla olduğu sonucuna varmıştır. Bunun nedeni, malzeme akışının rahat olması için oluşturulan kalıp giriş formunun dışbükey kalıp için yeterli olmaması olarak açıklanmaktadır. Burada en iyi malzeme akışını sırasıyla, içbükey kalıp, S kalıp, konik kalıp, ters S kalıp ve dışbükey kalıp olarak görmüştür. Sonuç olarak, aynı tip bir profilin üretiminde kullanılacak farklı kalıp geometrileri içerisinde hangisinin en uygun olacağını analiz etmiştir. Benzer bir çalışmada, Bingöl ve ark. (2014) deneysel doğrulama ile SEM ve YSA (yapay sinir ağları) kullanarak farklı kalıp geometrisi için dişli benzeri profilin ekstrüzyon kuvvet tahmini ile karşılaştırma yapılmıştır. Bu çalışmada deney ve DEFORM 3D simülasyon sonuçlarının uyum gösterdiğini ve daha uzun kanal uzunluğuna sahip kalıpta daha fazla ekstrüzyon kuvvetine ihtiyaç duyulduğu sonuçları elde edilmiştir. DEFORM-3D' da yapılan simülasyonlardan elde edilen veriler YSA ile tahmin aşamasında değerlendirilmiştir. Diş sayısı, ekstrüzyon oranı, kalıp

uzunluğu ve ıstampanın yer değiştirdiği mesafe YSA'da giriş verileri olarak seçilmiş ve ekstrüzyon kuvveti de çıkış verisi olarak belirlenmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında SEM ile YSA değerleri arasındaki R^2=0,9981 olduğu görülmüştür. R^2'nin 1'e yakın olması YSA'nın tahmin yeteneğinin mükemmel olduğunu ortaya koymuştur.

Yapılan bir diğer çalışmada beş farklı kalıp açısına (15^o, 30^o, 60^o, 90^o, 120^o ve 150^o) sahip kalıplar kullanılarak yapılan ekstrüzyon işleminde sonlu elemanlar metodu kullanılmış ve simülasyon sonuçları irdelenmiştir (Bingöl ve ark. 2015). Maksimum ekstrüzyon kuvvetinin artan kalıp açısıyla azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük ekstrüzyon kuvveti ve sıcaklığı 150^o 'lik kalıp açısına sahip kalıbın kullanıldığı simülasyonda meydana gelmiştir.

Ayer (2018) AZ31 magnezyum ekstrüzyonunda işlem parametrelerinin ekstrüzyon kuvveti üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu bağlamda, deneyler için ana parametreler olarak işlem sıcaklığını, ekstrüzyon oranını, sürtünme faktörünü ve ıstampa hızını seçmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar, şekillendirme yükünü tahmin etmek için sayısal bir model oluşturmak üzere sonlu elemanlar yöntemi (SEM) ve yapay sinir ağı (YSA) yöntemini kullanarak analiz etmiştir. Tüm deneysel ve sayısal sonuçları birbirleriyle karşılaştırıp ve sonuçlardan sürtünme faktörünün ekstrüzyon kuvveti üzerindeki etkisinin, verilen tüm ekstrüzyon oranları ve ıstampa hızları için daha düşük ekstrüzyon sıcaklığında daha baskın olduğu sonucuna varmıştır. Buna ek olarak, daha yüksek ekstrüzyon oranları daha düşük ekstrüzyon kuvvetini elde etmek için daha yüksek işlem sıcaklıklar gerektirdiği sonucuna varmıştır. Ayrıca, ekstrüzyon hızındaki artışın, tüm ekstrüzyon oranları ve ekstrüzyon sıcaklıkları için şekillendirme yükünde önemli bir artışa neden olduğunu gözlemlemiştir.

Bingöl (2016) yaptığı çalışmada, sonlu eleman modelleme (SEM) ve yapay sinir ağları (YSA) yöntemleri ile biyet sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının maksimum ekstrüzyon sıcaklığı üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Bunun için farklı başlangıç biyet ve kalıp sıcaklıkları ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simülasyonlar yapmıştır. Ek olarak, yapay sinir ağları modellemesi, sonlu eleman simülasyonlarının sonuçlarından elde edilen değişken maksimum ekstrüzyon sıcaklığına karşı ıstampa hareketi ile oluşan stroku tahmin etmek için kullanmıştır. Sonuç olarak, geliştirdiği YSA modelinin çeşitli maksimum ekstrüzyon sıcaklığını başarılı bir şekilde tahmin edebildiğini göstermiştir.

Bingöl ve ark. (2015) sıcak şişirme ve sıcak ekstrüzyon işlemlerinde dövme yükünün tahmini için gen ifadeli programlama (GİP) adı verilen yeni bir evrimsel yaklaşımın etkinliğini kullanmıştır. Giriş parametresi olarak açı (a), L/D oranı (R), sürtünme katsayısı (l), hız (v) ve sıcaklık (T) gibi çeşitli parametreleri almıştır. Geliştirilen GİP modellerinin doğruluğu YSA modelleriyle de karşılaştırarak bazı istatistiksel ölçümlerle kanıtlanmıştır (R2, RMSE, MAE). Çalışmanın sonucunda GİP'in sıcak metal şekillendirme işlemlerinin girdi ve çıktı parametreleri arasındaki karmaşık ilişkiyi temsil etmek için etkili bir araç olarak kullanılabileceğini gösterilmiştir.

Bingöl (2018) gen ifadesiyle programlama kullanılarak ekstrüzyon sıcaklığının tahmin etmek için yaptığı çalışmada; geliştirilen GİP modeli ile elde edilen tahmin sonuçlarını ve literatürden alınan sonlu elemanlar simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak aralarında bir uyum olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak kalıpların tasarımına ve proses parametrelerinin seçimine daha iyi yardımcı olmak için maksimum sıcaklık tahmini oluşturulurken GİP' in etkili bir araç olarak kullanılabileceğini belirtmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Ekstrüzyon İşlemi

Yirminci yüzyılda, genellikle yuvarlak olan bir biyetin yüksek basınçta bir ıstampa ile istenen şekle sahip bir kalıba bastırılarak yapılan plastik şekil verme yöntemidir. İşlem esas olarak alüminyum ve bakır alaşımlarında çubuk, tel, boru ve diğer basit şekilli profillerin üretiminde kullanılmıştır. Bununla birlikte, paslanmaz çelik borular, çelik profiller ve diğer metallerdeki yarı mamul ürünler de ekstrüzyonla küçük miktarlarda üretilmiştir.

Ekstrüzyon, ürünün istenen şeklini elde etmek için malzemenin kalıba zorlandığı bir işlemdir (Ayer, Bingöl ve Karakaya 2019). Ekstrüzyon sırasında, biyet içinde düşük çatlama riski ile büyük deformasyonların elde edilmesini sağlayan bir sıkıştırma gerilme durumu gelişmektedir. Biyet enine kesit alanının ekstrüde edilmiş bölümün kesit alanının oranı, ekstrüzyon oranı olarak bilinir ve genellikle 10 ila 100 aralığındadır. Özel durumlarda örneğin, pirinç tel ekstrüzyon oranı 1000 kadar yüksek olabilir. Ancak bu, malzemenin düşük akış gerilimine sahip olmasını gerektirir.

Ekstrüzyon, farklı kesitler üretmek ve ürün kalitesini artırmak için en sık kullanılan metal şekillendirme yöntemlerinden biridir (Bingöl 2015). Ekstrüzyon, kalıbının şekil oluşturan açıklığı boyunca ekstrüde edilen malzemenin itilmesiyle ve başka herhangi bir sıcak işleme prosesi ile üretilemeyen kesitsel şekillerin üretilmesini sağlar. Çubuk, şerit ve dolu profillerin yanı sıra borular ve içi boş profiller şeklinde yarı bitmiş ürünler üretmek için kullanılır. Ekstrüzyon işlemi aynı zamanda toz metalürjisi esaslı ve kompozit malzemelerden yarı mamul ürünlerin üretilmesine ve kaplama işlemi kullanılarak alüminyum/bakır ve alüminyum/çelik gibi malzeme kombinasyonları ile kaplanmış kompozitlerden yarı mamul ürünlerin üretilmesine olanak sağlar. Kalay ve kurşun alaşımları gibi demir dışı metallerin yanı sıra iyi kaynak özelliklerine ve takım malzemelerinin dayanabileceği çalışma sıcaklıklarına sahip magnezyum ve alüminyum alaşımları ile uygun deformasyon koşullarında ekstrüzyon kalıbının şekil oluşturan bölgesinde biyetin birkaç metal akışına bölünmesini ve ardından yeniden birleşmesini sağlar.

Ekstrüzyon işlemi genellikle 600 ^{o}C'ye kadar çalışma sıcaklıklarına sahip malzemelerle bitmiş boyuta yakın yarı bitmiş bir ürün üretir. Bu, yarı bitmiş ürünleri oluşturmak için kullanılan diğer işlemlerin aksine bir üretim adımında gerçekleşir. Bu nedenle, yarı bitmiş ürünün enine kesitinin tasarımı, sonraki işlem operasyonları ile ilişkili herhangi bir sınırlamayı pratik olarak göz ardı edebilir. En uygun kesit geometrisine sahip profil için özel uygulama serbestçe seçilebilir. Ekstrüzyonun kesitsel geometrisinin statik, dinamik ve geometrik gereksinimlerle basit bir şekilde eşleştirilmesi, montajdaki geniş birleştirme yöntemleri yelpazesi ile bu çalışma sürecinde üretilen ürünlerin yüksek işlevselliğini karakterize eder.

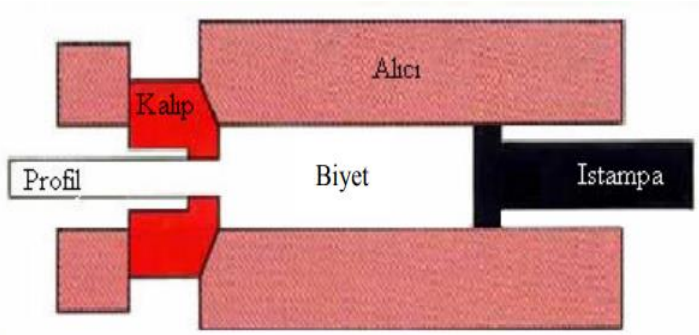
3.1.1. Ekstrüzyon Yöntemleri

Ekstrüzyon yöntemleri, malzeme akış yönüne, kalıbın hareketli veya sabit olmasına ve kuvvet iletim şekline göre üçe ayırabiliriz.

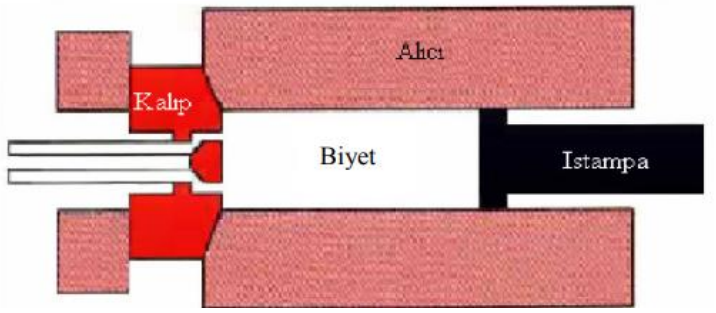
1. Direkt Ekstrüzyon
2. Endirekt Ekstrüzyon
3. Hidrostatik Ekstrüzyon

3.1.1.1. Direkt Ekstrüzyon

Direkt ekstrüzyonda, genellikle önünde bir baskı tamponu bulunan bir gövde, biyeti sabit bir kapta istenen şekle sahip bir kalıbın içinden iter. Biyet ve kovan arasında nispi hareket gerçekleşir.



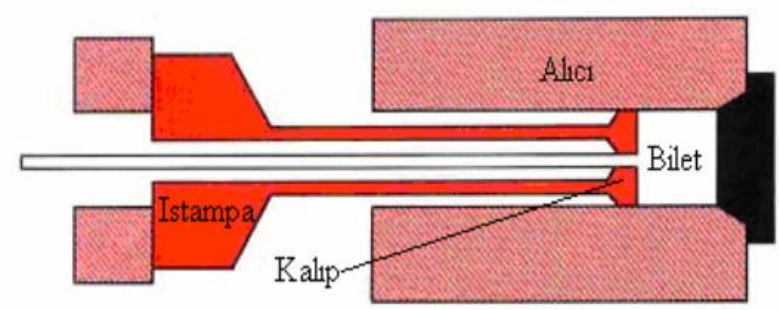
Şekil 3. 1. Direkt ekstrüzyonda içi dolu profil üretimi



Şekil 3. 2. Direkt ekstrüzyonda içi boş profil üretimi

3.1.1.2. Endirekt Ekstrüzyon

Endirekt ekstrüzyonda, kalıp içi boş bir sapın önüne yerleştirilir ve arkada kapalı olan kabın ileri hareketiyle biyetin üzerine itilir. Bu nedenle, biyet ve kovan arasında göreceli bir hareket yoktur.



Şekil 3. 3. Endirekt ekstrüzyon yöntemi

Direkt ekstrüzyonla karşılaştırıldığında, endirekt ekstrüzyon aşağıdaki avantajları sunar:

● Sürtünme veya kesme yükü miktarı direkt ekstrüzyon kuvvetinden daha düşük olduğu için başlangıç biyet sıcaklığını düşürmek ve kovan çapını artırarak ekstrüzyon oranını daha büyük bir artışla artırmak mümkündür.

● Başlangıç biyet sıcaklığının düşürülmesi, ekstrüzyonun uzunluğu boyunca daha iyi bir ürün kalitesi (daha yüksek çekme mukavemeti) verir.

● Endirekt ekstrüzyondaki verimlilik, önemli ölçüde daha büyük başlangıç biyet hacmi nedeniyle direkt ekstrüzyona göre çok daha yüksektir.

Direkt ekstrüzyona kıyasla endirekt ekstrüzyonun dezavantajları şunlardır:

● Endirekt ekstrüzyon için özel olarak tasarlanmış bir prese sahip olmak gerekir.

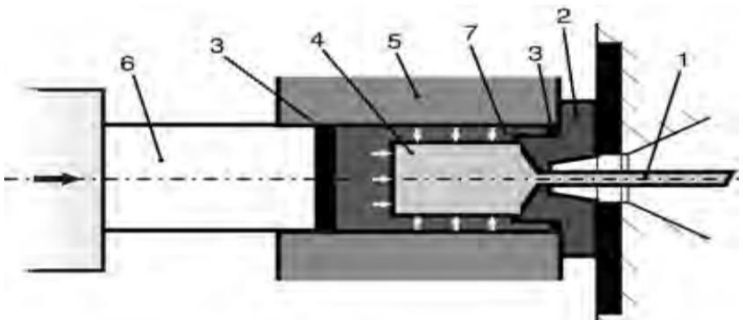
● İç çapı bölümün çevreleyen dairesi tarafından belirlenen ve bazı durumlarda bölümün zarar görmesini önlemek için içten grafit bir kutu ile kaplanması gereken özel bir içi boş gövdeye ihtiyaç vardır.

● Kap uzunluğu boyunca sabit bir kap sıcaklığını garanti etmek için genellikle hem bölge hem de uç yüzey ısıtmaya ve bölge soğutmaya sahip özellikle uzun boyutlu bir kovana ihtiyaç vardır.

● Biyet dış bölgesinin deformasyon bölgesine akmasını önlemek için biyet ile kap arasında sürtünme olmamasına da dikkat edilmelidir. Bu nedenle, saf olmayan biyet yüzeyinin kesitteki bitişik bölgelerin yüzeyine akması riski vardır.

3.1.1.3. Hidrostatik Ekstrüzyon

Hidrostatik ekstrüzyonda (Şekil 3.4), biyet basınçlı bir sıvı ile çevrilidir. Bu, biyet ve kovan arasında ihmal edilebilir sıvı sürtünmesi avantajını bizlere sunar. Dikkate alınması gereken tek sürtünme biyet ile kalıp arasındadır. Ekstrüde tüp işleminin çalıştırılması zor olduğundan, basınçlı sıvının yalnızca nispeten düşük sıcaklıklara dayanabildiğinden ve ekstrüzyon oranlarını kısıtladığından bu işlemin yalnızca sınırlı uygulamaları vardır.



Şekil 3. 4. Hidrostatik ekstrüzyon. 1, profil; 2, kalıp; 3, akışkan; 4, biyet; 5, kovan; 6, ıstampa; 7, hidrostatik ortam

3.1.2. Ekstrüzyon Malzemeleri

Diğer plastik şekil verme yöntemleriyle şekillendirilebilen tüm malzemeler genellikle ekstrüzyon yöntemiyle şekil vermede de kullanılmaktadır. Ekstrüzyon yöntemi ilk uygulamaya konulduğu zaman çok az sayıda malzeme ekstrüzyon edilebilmekteydi. Ekstrüzyon takımları ve presleri geliştirildikçe, ekstrüzyon edilen malzeme çeşidi de

çoğalmıştır. Günümüzde ekstrüzyon malzemelerine duyulan ihtiyaca paralel olarak ekstrüzyon edilebilen malzeme çeşidi de hızla artmaktadır (Bingöl 2001).

3.1.2.1. Alüminyum Ekstrüzyonu

Ekstrüzyonun ana uygulaması, alüminyum alaşımlarında genel olarak çubuk, boru, tel ve özellikle alüminyum profillerin imalatında bulunmaktadır. Kabul edilebilir malzeme özellikleri ve elastisite modülü, düşük yoğunluktan ağırlık tasarrufu, iyi yüzey kalitesi, iyi boyutsal doğruluk, minimum işleme ve geri dönüşüm kolaylığından dolayı alüminyum alaşımlarını hem ekonomik hem de çevresel olarak ilgi çekici kılmaktadır. Bu özellikler ve enine kesit geometrisinin büyük ölçüde kısıtlanmamış şekli, iyi görünüm ve korozyon direncine sahip olması her zamankinden daha işlevsel bileşenlerin geliştirilmesi eğiliminin temelini oluşturmaktadır.

Alüminyum profillerin ekstrüzyonda baskın olmasının nedeni, alüminyum alaşımlarının orta çalışma sıcaklıklarından kaynaklanmaktadır. Ekstrüzyon presi daha sonra termomekanik gerilimlere dayanabilmektedir. Genel olarak, alüminyum alaşımlarının çalışma sıcaklığı, normalde alüminyum ekstrüzyon preslerini imal etmek için kullanılan sıcak iş takım çeliklerinin tavlama sıcaklığının altındadır. Bu, alüminyum profiller için ekstrüzyon kalıp tasarımının geliştirilmesinde belirleyici bir rol oynamıştır. Artık çok zorlu alüminyum profiller üretilebilmektedir. Son yıllarda, büyük profillerin üretimi için ekstrüzyon preslerinin geliştirilmesi başarılı olmuştur.

Büyük alüminyum profillerin üretiminde kullanılan alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri, iyi tasarlanan profil geometrisinin yeterince boyutlandırılmasını sağladığı çoğu uygulama için yeterlidir. Bununla birlikte, ekstrüde edilmesi zor ve bir dereceye kadar ekstrüzyonu orta derecede zor olan alüminyum alaşımları (daha yüksek alaşım içeriğine sahip olanlar), AlMgSi0.5 ve AlMgSi0 gibi düşük alaşımlı ve kolay kaynaklanmış alüminyum alaşımları ile aynı profil geometrisi seçeneklerini sunmamaktadır.

Geniş kesit teknolojisini kullanan yekpare yapının piyasaya sürülmesinden bu yana, alüminyum tasarımları, alüminyumun yüksek malzeme maliyetine rağmen çelik tasarımlarla giderek daha fazla rekabet edebilmektedir. Alüminyum alaşımının spesifik özellikleri, çeşitli alaşımların düşük E-modülü ve düşük yoğunlukları dahil olmak üzere

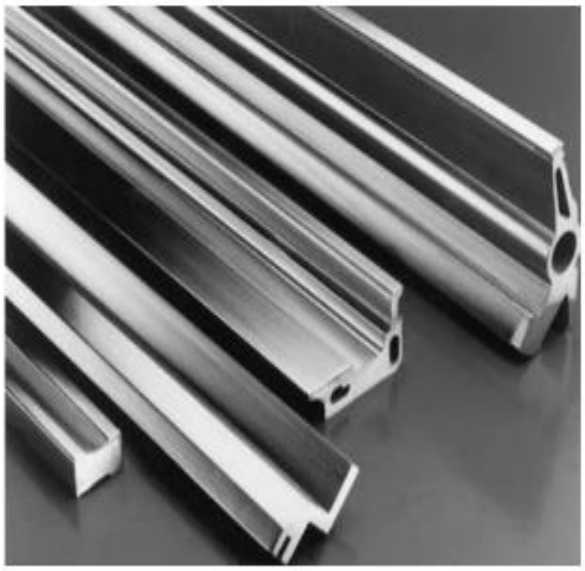
burada bir rol oynamaktadır. Alüminyum alaşımlarının E-modülünün yaklaşık 70 GPa olduğu varsayılabilirken, çeliğinki yaklaşık 210 GPa'dır, üç kat daha yüksektir. Aynı zamanda alüminyum tasarımlara, 2.7 g/cm^3'lük düşük yoğunluk nedeniyle kabul edilemez bükülmeleri veya önemli ölçüde daha düşük ağırlıklara sahip titreşimleri önlemek için çelik tasarımlarla aynı sertlik verilebilmektedir. Ayrıca alüminyum tasarımların elastik özellikleri önemli avantajlar sunmaktadır. Alüminyum alaşımları, düşük E-modüllerinden dolayı çeliğe göre önemli ölçüde daha yüksek enerji emme kapasitesine sahiptir. Bu, örneğin demiryolu veya karayolu taşıma araçlarında darbe yüklerine maruz kalan alüminyum tasarımlar için göz ardı edilmemesi gereken bir avantajdır.

3.1.2.2. Magnezyum Ekstrüzyonu

Magnezyum, 1.74 g/cm^3'lük düşük yoğunluğa sahip bir metaldir ve alüminyumun yaklaşık %40 altındadır. Young modülü (E) yaklaşık 45 GPa olup alüminyum alaşımlarının E-modülünün yaklaşık %65'idir. Bu nedenle, hafif bileşenler için bir yapı malzemesi olarak alüminyum alaşımlarından daha ilgi çekicidirler. Magnezyum alaşımlarının korozyon duyarlılığı, bakır, demir, manganez ve nikel element içeriğini ppm bölgesine düşürerek önemli ölçüde azaltılabilir. Yüksek saflıkta magnezyum alaşımlarının korozyon davranışı, alüminyum alaşımlarınınkine yaklaşır. Bu, yapı malzemesi olarak magnezyum alaşımlarına olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. Saf magnezyumun ergime sıcaklığı 650 ^{o}C'dir ve altıgen kafes yapısı ile kristalleşir. Altıgen kafes yapıya sahip metaller, oda sıcaklığında yalnızca (0001) taban düzleminde kayabilir. Sonuç olarak, magnezyum alaşımları oda sıcaklığında çok kırılgandır. Bununla birlikte, 200 ^{o}C'nin üzerindeki sıcaklıklarda diğer kayma düzlemlerinin aktivasyonunun yanı sıra, bu malzemelerin sıcak işlenebilir olmasını sağlayan deformasyon ikizlerinin oluşumuna izin verir. Magnezyum alaşımlarının kırılgan ve plastik deformasyon davranışı arasındaki dar sıcaklık aralığı ilgi çekicidir. 45 °C'de çalışan kesme gerilimi çatlaklarından görülebileceği gibi, bu malzeme 208 °C'de sınırlı bir işlenebilirliğe sahipken, 220 ° C'de kolayca sıcak işlenebilir; yani, sadece 12 ° C'lik bir sıcaklık artışı, bu alaşımda önemli ölçüde daha iyi deformasyon özellikleri üretir. İkiz lamellerin oluşumu, plastik işlenebilirlikteki gelişme ile ilişkilidir.

Geçmişte, ekstrüde magnezyum alaşımlı ürünler pazarı, ürünlerin iyi özelliklerine, özellikle de düşük yoğunluklarına rağmen sınırlıydı. Bunun nedeni, hem

kafes yapısı ile ilgili kötü soğuk işleme özellikleri hem de alaşıma çok bağlı olan sıcak işleme özellikleridir. Tipik bir profil Şekil 3.5.'te görülebilir.

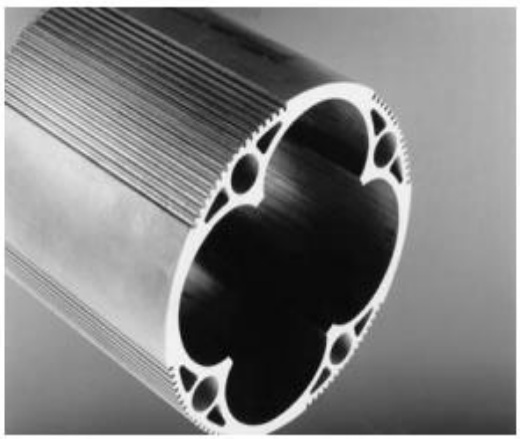


Şekil 3. 5. Magnezyum alaşımlı profil

Temel olarak magnezyum ürünleri, ağırlık tasarrufunun, örneğin düşük kütleli bileşenlerin yüksek önceliğe sahip olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Ana uygulama alanları genellikle otomobil ve makine imalatıdır. Şekil 3.6. ve 3.7'de gösterilen ekstrüde ürünler, özellikle tekstil makinesi bileşenlerinde yüksek hızlanma ve frenlemeye maruz kalan makine bileşenleri için uygundur. Bu ürünler aynı zamanda havacılık endüstrisinde ve askeri uygulamalarda da kullanılmaktadır.



Şekil 3. 6. Tekstil makinesi için MgAl3Zn alaşımı ile üretilmiş ürün



Şekil 3. 7. Otomobil motoru için MgAl3Zn alaşımı ile üretilmiş ürün

3.1.2.3. Kurşun ve Kalay Ekstrüzyonu

Kalay, 20 ila 161 ^{o}C sıcaklık aralığında sabit bir tetragonal kafes ile gümüş beyazı renginde çok yumuşak bir metaldir. Saf metal 7.28 g/cm^3 yoğunluğa ve 232 ^{o}C erime noktasına sahiptir.

Kurşun mat mavi görünümlü, yüzey merkezli kübik kafes yapılı yumuşak metaldir. Saf metal, 11.34 g/cm^3 gibi çok yüksek bir yoğunluğa ve 327 ^{o}C'lik bir erime noktasına sahiptir. Kurşun alaşımları da kolaylıkla işlenebilir.

Oda sıcaklığı ile 300 ^{o}C arasında ekstrüzyon edilebilen malzeme grubunu oluşturur. Bu grup sadece kurşun ve kalay veya iki elementin birbiriyle olan alaşımlarını ve bu elementlerin en önemlileri antimon, bakır, gümüş ve kadmiyum olan elementlerde olan alaşımları içerir. Bu ekstrüzyon malzemeleri genel olarak borular, yumuşak lehim telleri ve kablo kaplamalarında kullanılır (Bingöl 2001).

3.1.2.4. Bakır Ekstrüzyonu

Bakır alaşımlarının ekstrüzyonu için kullanılan sıcaklıklar, alüminyum alaşımlarından önemli ölçüde daha yüksek olan 600 ila 900 ^{o}C arasındadır. Sonuç olarak, şekil üreten preslerin daha şiddetli termal yüklemesi nedeniyle yalnızca daha basit kesit geometrileri ve daha kalın duvarlı kesitlere sahip yarı bitmiş ürünler üretilebilir.

3.1.2.5. Zirkonyum Ekstrüzyonu

Zirkonyum 1852 ^{o}C'de erir ve 6.5 g/cm^{3} yoğunluğa sahiptir. Saf zirkonyum, 862 ^{o}C'ye kadar altıgen bir α kafese sahiptir. Bu dönüşüm sıcaklığının üzerinde bir hacim merkezli kübik β-fazı vardır. Küçük miktarlarda element ilaveli alaşımlarda α ve β fazlarının eşzamanlı mevcudiyeti ile az ya da çok geniş bir sıcaklık aralığı oluşur.

Korozyon ve sıcak dayanımlarının yüksek olması nedeniyle, nükleer reaktörlerde konstrüksiyon elemanı ve radyoaktif çubukları için sarf malzemesi olarak kullanılır. Zirkonyumun ekstrüzyonu sırasında takımlara sıvanması önemli bir problemdir. Bunun için çok iyi yağlama yapılması gerekmektedir. Aynı zamanda biyete ekstrüzyondan önce bir gömlek geçirilmektedir. Dökülen biyetler çoğu durumda bakır ve pirinçle kaplanır. Gömlek, gaz absorbsiyonunu önler (Sönmez 1989).

3.1.2.6. Nikel Ekstrüzyonu

1000 ^{o}C'nin üzerinde ekstrüzyon edilen malzeme grubundandır. Nikel alaşımlarından yapılan yarı mamullerin mekanik mühendisliğinde, kimya mühendisliğinde, elektrik mühendisliğinde, elektronik mühendisliğinde, güç istasyonlarında ve nükleer teknolojisinde birçok kullanım alanı vardır. Nikel ve nikel alaşımlarının korozyon dirençlerinin yüksek olması ve ısıda iyi mukavemet özellikleri göstermesi bu metalin önemini arttırmıştır (Sönmez 1989).

3.1.2.7. Berilyum Ekstrüzyonu

Berilyum, yüksek ısı kapasitesi ve sıcaklığa dayanıklılığının yanında korozyon direncinin de yüksek olması nedeniyle nükleer mühendislik ve uçak teknolojisinde kullanılmaktadır. Döküm yöntemi ile imal edilen blokta kaba tane oluşumu ve buna bağlı olarak kırılganlık ve çatlama eğilimi, döküm tekniği açısından engellenememektedir. Bu nedenle berilyum biyetler sinterleme tekniğiyle hazırlanmaktadır. Ekstrüzyon biyetleri, toz malzemelerin soğuk sıkıştırılması ve koruyucu atmosferde sinterlemesi ile üretilmektedir (Bingöl 2001).

3.1.2.8. Titanyum Ekstrüzyonu

Erime noktası 1668 ^{o}C olan titanyum, erime noktası yüksek metallerden biridir. 822 ^{o}C' nin altında hekzagonal (α) yapısına ve bu sıcaklığın üzerinde hacim merkezli (β) kübik bir yapıya sahiptir. Alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra yerkabuğunda en bol bulunan dördüncü metal olmasına rağmen, özellikle saf metale indirgemenin ve aynı zamanda döküm ve ileri işlemenin yüksek maliyeti titanyum ürünlerini pahalı hale getirir. Demire kıyasla 4,5 g/cm^{3}'lük düşük yoğunluğu ve aynı zamanda alaşımlarından bazılarının çok yüksek mukavemeti, onu özellikle havacılık endüstrisinde uygun bir mukavemet / yoğunluk oranının gerekli olduğu yerlerde yararlı kılar. Çok çeşitli ortama karşı çok iyi korozyon direnci sağlarken oda sıcaklığında bile oluşan güçlü yapışan oksit filmine bağlanabilir. Bu nedenle kimya ve petrokimya endüstrilerinde çok sayıda uygulama bulur. Titanyum alaşımları, yüksek maliyeti nedeniyle egzotik ekstrüde metallerden biri olarak sınıflandırılabilir.

Uçak, uzay aracı ve roket üretimi titanyum alaşımları olmadan düşünülemez. Jet motorlarındaki türbin kanatları dahil olmak üzere özellikle termo-mekanik yükleme altında ağırlık azaltmanın gerekli olduğu durumlarda ekstrüde titanyum alaşımlı ürünler kullanılır. Ek olarak, ekstrüde titanyum alaşımlarındaki bileşenler, uçak şasilerindeki yüksek mukavemetleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle, helikopterlerin imalatında ve örneğin kardan şaftlarının imalatı için otomobil endüstrisinde kullanılır. Ekstrüde tüpler, kimya endüstrisindeki agresif ortamların taşınmasının yanı sıra ısı eşanjörleri, basınçlı kaplar dahil kimyasal ekipmanların imalatında ve tuz içeren sıvılarla, örneğin tuzlu su ile çalışan tesislerde kullanılır. İyi cilt uyumluluğu ve görsel görünümleri, ekstrüde titanyum

alaşımlarını cam çerçevelerin ve saat muhafazalarının üretimi için başlangıç malzemesi olarak kullanışlı hale getirir. Aynı nedenle titanyum alaşımları implantların ve cerrahi aletlerin üretiminde de kullanılmaktadır.

Titanyum alaşımları, iyi özelliklerinden dolayı kesinlikle tam potansiyeline ulaşmamıştır. Daha yüksek termo-mekanik yükleme ve daha ekonomik üretim açısından daha da geliştirilmesi diğer uygulama alanlarını açacaktır. Titanyum alaşımları da geri dönüşüme katkıda bulunur.

3.1.2.9. Demir-Çelik Ekstrüzyonu

Demir alaşımlarının yüksek erime noktası (saf demir: 1535 C, yoğunluk 7.9 g/cm^3), yüksek bir yeniden kristalleşme ve sıcak işleme sıcaklığına karşılık gelir. Sıcak işleme genellikle alaşıma bağlı olarak yüzey merkezli kübik ostenit bölgesinde 1000 ile 1300 ^{o}C arasında yapılmaktadır. Bu, yüksek termal ve mekanik gerilimler nedeniyle yüksek takım aşınması ve bileşime bağlı olarak az ya da çok şiddetli oksit oluşumu ile ilişkilidir. Sonuç olarak, bu alaşımların başarıyla ekstrüde edilebilmesi için nispeten geç kalınmıştır.

Paslanmaz çelikler için kullanılan aynı sıcak işleme süreçleri, nikel alaşımlı borular ve yüksek alaşımlı yüksek sıcak mukavemetli malzemeler için de kullanılır. Bununla birlikte, ekstrüzyon uygulamalarında nikel alaşımlı çelikler paslanmaz çeliklerden çok daha önemli bir rol oynar. Çünkü genellikle çok hassas alaşımlı malzemelerde sadece küçük miktarlar gereklidir. Kimya ve petrokimya endüstrilerinde, türbin ve jet motoru üretiminde, havacılıkta, gemi yapımında ve gıda endüstrisinde çok çeşitli nikel alaşımları uygulamaları bulunmaktadır.

Ekstrüzyonla üretilen borular genellikle yüksek alaşımlı ve sıcak işlenmesi zor alaşımlardan oluşurken, kullanışlı enine kesitlerin üretilmesini sağlamak için profillerin ekstrüzyonunda kolay işlenen versiyonlar tercih edilir. Ekstrüzyon sıcaklığı yaklaşık olarak 1250 ^{o}C'dir. Böylece şekillendirme araçları yalnızca düşük ekstrüzyon basınçlarına dayanabilir ve tek bir ekstrüzyondan sonra yeniden işlenmeleri gerekecek kadar deforme olurlar. Sonraki germe ve düzeltme işlemleri, muhtemelen kalibrasyon ve parlatma çekme işlemleri, kesite son şekli verir.

3.1.3. Ekstrüzyonda Malzeme Akışı

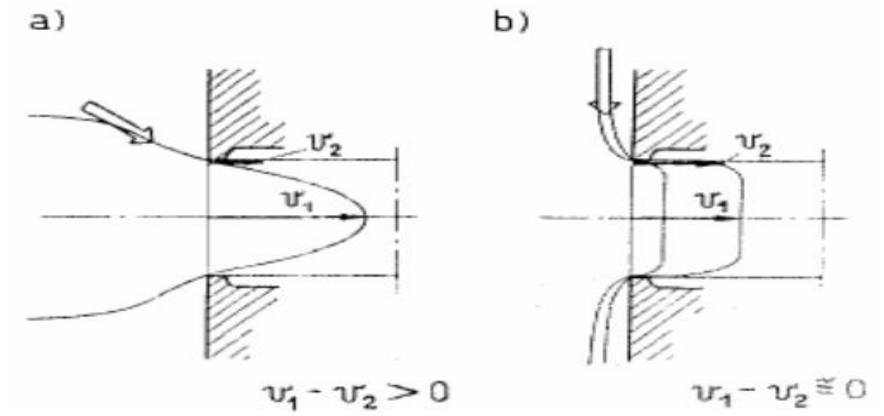
Ekstrüzyon işlemi, yüksek mukavemet/ağırlık oranlarına ve iyi boyutsal doğruluğa sahip istenen ürün şekillerini sağlayabilen uygun bir metal şekillendirme işlemidir (Bingöl ve Bozacı 2015). Ekstrüzyon işleminde, genellikle ara verilerek bir çalışma yapılmaktadır. Bu durumda ilk biyetin ekstrüzyonundan sonra ikinci biyet kovana yerleştirilirken biyette sıcaklık farklılıkları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca biyet-kovan, biyet-kalıp yüzeyi ve biyet-kalıp kanalı arasında sürtünme oluşmaktadır. Böylece biyetin baş kısmından biyet sonuna kadar eşit olmayan akış durumları ortaya çıkmaktadır. Farklı akış durumlarında, ekstrüzyon kuvvetinin değişmesine, malzeme kesiti ve boyunda farklı malzeme özellikleri ve diğer ekstrüzyon hataları açığa çıkmaktadır. İstenmeyen bu oluşumları ortadan kaldırmak için malzeme akışının incelenmesi gerekmektedir (Başaran 2010).

Ekstrüzyon işlemi boyunca malzemenin hareketi yani malzemenin akışı, üretimin kalitesini çok büyük oranda etkilemektedir. Malzeme akışının düzenli ve düzensiz olması ürünün kaliteli ya da kalitesiz (çeşitli ekstrüzyon hataları) olmasına sebep olur. Ayrıca ekstrüzyon kuvvetlerinin belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır. Malzeme akışına, birinci derecede ekstrüzyon edilen malzemenin özellikleri olmak üzere çok sayıda işlem faktörü etkilemektedir. Çizelge 3.1.'de malzeme akışını etkileyen tüm faktörler verilmiştir (Başaran 2010).

Çizelge 3. 1. Malzeme akışını etkileyen tüm faktörler

Faktörler	Olasılıklar
1- Yöntem	Direkt, Endirekt, Hidrostatik
2- Yağlama	Yağlamalı, Yağlamasız
3- Sıcaklık	Soğuk, Sıcak
4- Kalıp biçimi	Düz, Konik, Tek delikli, Çok delikli
5- İş parçası	Plastiklik özelliği
6- Mamul biçimi	Çubuk, Profil, Boru, Tel
7- Ekstrüzyon oranı	Küçük, Büyük

Sürtünmeler, biyet merkezindeki malzemenin biyet çevresindeki malzemeye göre daha hızlı akmasına neden olur. Bu durum, daha düzensiz bir malzeme akışına ve ölü bölgelerin artmasına neden olur. Mümkün olduğu kadar biyetin merkezindeki malzemenin akış hızı ile biyetin çevresindeki malzemenin akış hızı arasındaki farkı azaltmak gerekir. Hız farkları ne kadar azalırsa, malzeme akışı o kadar ideal akış tipine yaklaşır ve böylece ölü bölgeler de azalır. Şekil 3.8'de tipik akış ve arzu edilen akış gösterilmiştir (Sönmez 1989).



Şekil 3. 8. Ekstrüzyondaki hız dağılımı: a) Tipik akış b) Arzu edilen akış (Zasadzinski 1996)

3.1.3.1. Malzeme Akışı Araştırma Yöntemleri

Malzeme akışının araştırılmasında değişik birçok yöntem geliştirilmiştir. Bütün bu yöntemler, bloğun içinde malzeme akışını gösterecek markalama tarzına ve araştırmada kullanılan malzeme cinsine göre üç grupta toplanabilir (Başaran 2010).

Kullanılan malzeme cinsine göre;

a) Plastikliği yüksek malzemelerden (mum, plastilin vs.) modeller.

b) Şekil değiştirtme kabiliyeti yüksek metalsel malzemelerden modeller (Pb, Sn, Bi ortam sıcaklığında veya düşük sıcaklıklarda).

c) Al, Cu ve bunların alaşımlarından modeller (işletme şartlarında).

Malzeme akışını izleyebilecek markalama modellerine göre;

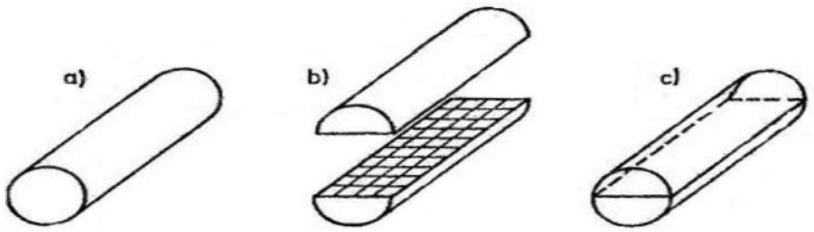
a) Plaka usulü: Optik ve metalografik bakımından farklı, fakat birbirine benzer malzemelerden plakalar bir blok teşkil edecek şekilde bir araya getirilerek

ekstrüzyon işlemine tabi tutulur.

b) İndikatör usulü: Ekstrüzyon işleminde blok yüzeyinin tutumunu incelemek için değişik malzemelerde küçük pimler blok yüzeyine yerleştirilir. Ancak bu usulde blok merkezinin akışı hakkında bilgi vermemektedir.

c) Koordinat usulü: Blok simetri düzleminde ikiye bölünmekte ve bölme yüzeyine koordinatlar çizildikten sonra yarıklar grafit veya benzer maddelerle doldurulur. Blok yarıları tekrar birleştirilir ve bu durumda ekstrüzyon edilir.

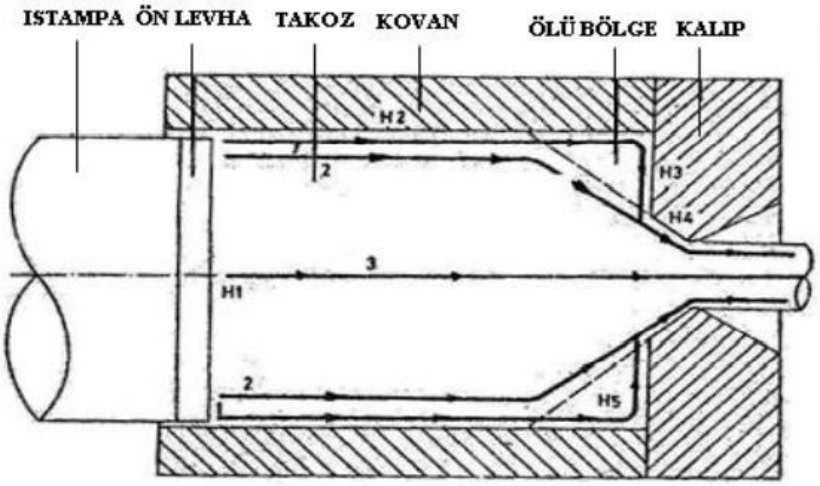
Ekstrüzyon işleminden sonra blokta şekil değiştirmiş koordinat sistemi incelenerek akış hakkında fikir edinilmektedir. Bu usul araştırıcılar tarafından çok kullanılmaktadır (Sönmez 1989). (Şekil 3.9.)



Şekil 3. 9. Koordinat usulüne göre hazırlanmış blok (Sönmez 1989) a)Blok b)Koordinat çizilmiş blok yarıları c)Birleştirilmiş blok

3.1.3.2. Direkt Ekstrüzyon Yönteminde Malzeme Akışı

Malzemenin kovan içindeki hareketini, malzemenin plastikliği ve biyet ile takımlar arasındaki dış sürtünme önemli ölçüde etkilemektedir. Biyetin plastikliğinin homojen olmaması; biyet içinde sıcaklık dağılımının farklı oluşundan, kovan, ıstampa, kalıp, biyet sıcaklıklarının farklı oluşundan ve biyetin içyapısından kaynaklanmaktadır. Dış sürtünme ise Şekil 3.10.'da gösterildiği gibi biyet ile ön levha yüzeyi (H1), kovan yüzeyi (H2), kalıp alın yüzeyi (H3) ve kalıp delik yüzeyi (H4) arasındaki sürtünmeden meydana gelmektedir. Ayrıca biyet ile ölü bölge yüzeyi (H5) arasında da sürtünme meydana gelmektedir (ölü bölge oluşmuş ise) (Başaran 2010).



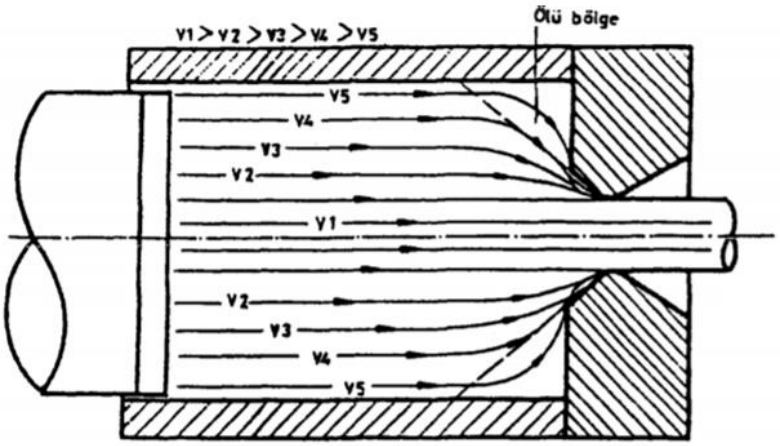
Şekil 3. 10. Direk ekstrüzyonda biyetin çevresinin (1-2) ve merkezinin (3) izlediği yol (Sönmez 1989).

- **S Tipi Malzeme Akışı**

Akış tipi S, biyet ile kap arasında ve ayrıca biyet ile kalıbın ön yüzeyi arasında ihmal edilebilir sürtünme varsayımına dayanır ve ayrıca biyette hiçbir kesme bölgesi oluşmadığı varsayımına dayanır. Bu varsayımlar ve homojen biyet malzemesi ile deforme olan malzeme kalıbın ön yüzeyi boyunca hareket etmelidir ve biyet yüzeyi ekstrüzyonun yüzeyi haline gelir. Akış tipi S tamamen teoriktir ve pratikte görülmez.

S tipi akışta, biyetin kovandan ayrılışı mümkün olabilecek en düzenli ve istenilen bir şekilde olmaktadır. Biyetin plastik akışı, kalıba çok yakın bir şekil değiştirme bölgesinde olmakta ve biyetin ekstrüzyon edilemeyen kısmı biçim değiştirmeden kalıp yönünde hareket etmektedir. Biyetin ön kısımları tabaka tabaka şekil değiştirme bölgesine girmektedir. Bu akış tipi, kovan iç cidarında, kalıp yüzeyinde, kalıp deliği yüzeyinde sürtünmenin olmadığı ve homojen malzemelerde oluşmaktadır. Bütün sınır yüzeylerinde sürtünme olmadığından biyetin çevresi frenlenmeden kolayca hareket edecektir. Bunun neticesinde biyetin bütün kütlesi aynı hızla hareket etmektedir. Sürtünme, etkili bir yağlama yöntemi ile yok edilebilir. Ancak bu yüksek yağlama etkisine rağmen biyet merkezi ve biyet çevresinden daha hızlı akmaktadır. Şekil 3.11.'de görüldüğü gibi küçük de olsa ölü bir bölge oluşmasından malzemede sapmalar meydana gelir (Başaran 2010).

Biyet merkezinin kat ettiği yol daha kısa ve merkezden uzaklaştıkça daha uzun olmaktadır. Akış hızı merkezden çevreye doğru küçülmektedir. Bunun neticesinde malzeme akışı Şekil 3.11'de S tipi ile tam uyum sağlamaktadır. İdeal bir yağlama ile merkez ile çevre arasındaki hız farkı minimuma indirilebilir (Sönmez 1989).



Şekil 3. 11. Direkt ekstrüzyonda takozdaki hız dağılımı (Sönmez1989)

- **A Tipi Malzeme Akışı**

Akış tipi A, homojen biyet malzemesi ile kap arasındaki düşük sürtünmenin yanı sıra biyet ile kalıbın ön yüzeyi arasındaki önemli sürtünme için geçerlidir. Kalıbın önünde oluşan bir "ölü metal bölge" ve ölü metal bölge ile biyet arasında dar bir kesme bölgesi oluşmaktadır. Bu kesme bölgesi, birincil deformasyon bölgesini sınırlayan bir huniye yaklaşır. Bu huninin dışındaki biyet bölgeleri deformasyondan etkilenmez. Biyet yüzeyindeki malzeme hacmi, kesme bölgesi vasıtasıyla ekstrüzyonların dış bölgelerine akabilir.

Bu durumda, kenar bölgelerinin kalıp deliği doğrultusundaki radyal akış engellenir ve bunun sonucu olarak daha büyük bir kayma gerilmesi meydana gelir. Böylece S tipine göre daha büyük bir ölü bölge ve genişlemiş bir biçim değiştirme bölgesi oluşur. Biyetin merkezinde biçim değiştirme düzgün olarak meydana gelir (Sönmez 1989).

- **B Tipi Malzeme Akışı**

Akış tipi B, homojen biyet malzemesi ve kovan arasındaki önemli sürtünmenin yanı sıra biyet ile kalıp yüzeyi ve kalıp deliği arasındaki önemli sürtünme için geçerlidir. Biyet ve kalıp arasındaki sürtünme, biyetin dış tabakasının biyetin iç kısmına göre geride tutulmasına neden olur. Ölü metal bölgeler, A tipindekinden daha fazla işaretlenmiştir. Deformasyon bölgesi daha sonra önemli ölçüde daha büyük bir biyet alanını kapsar.

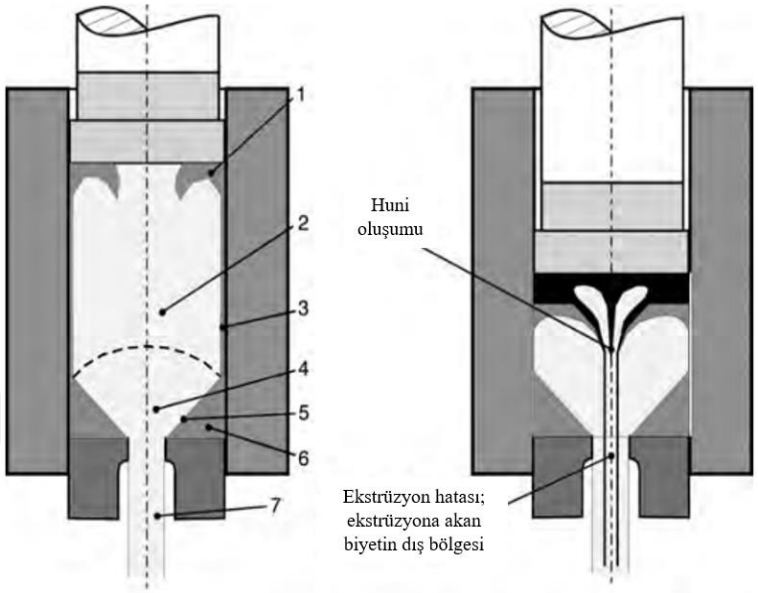
Biyetin çevresi kovan cidarında frenlenmekte ve biyetin merkezi az direnç görmesi nedeniyle kalıp deliği yönünde hareket etmektedir. Şekil değiştirme, A tipine göre kalıbın çok uzaklarında kayma ile başlar. Kayma bölgesi kesin hatalarla ortaya çıktıkça şekil değiştirmenin homojenliği gittikçe kaybolur. Kalıptan dışarıya çıkan her bir kesit sürtünme etkisiyle biyetin iç kısmı ile irtibatta kaldığından kesitler için çıkış açıklığı sürekli olarak daralır. Bundan dolayı şekil değiştirme miktarları biyet ucundan sonuna gittikçe artar. Sürtünme nedeniyle frenlenen çevre malzemesi ile hareket eden merkez malzemesi arasındaki kayma bölgesi, ekstrüzyon malzemesine ve ekstrüzyon şartlarına göre az veya çok şekilde biyete çekilir. Bu durumda ölü bölge büyür. Ekstrüzyon ilerledikçe merkeze doğru büyüyen kayma bölgesinden kirler ve yağlama malzemeleri kayma bölgesi boyunca biyet içine akarlar ve ekstrüzyon edilmiş çubuk yüzeyine çıkma tehlikesi doğururlar (Sönmez,1989).

- **C Tipi Malzeme Akışı**

Akış tipi C, tip B ile aynı sürtünme koşullarından oluşur, ancak bu durumda fark homojen olmayan bir biyettir. Bu, biyet dış bölgelerinin akış gerilimi biyet çekirdeğininkinden önemli ölçüde daha yüksek olduğunda meydana gelir. Şiddetli soğutma, biyet dış bölgesinin biyet çekirdeğinden daha düşük bir sıcaklığa sahip olmasına neden olabilir. Bu, kap sıcaklığı başlangıçtaki biyet sıcaklığından çok daha düşük olduğunda meydana gelir. Bazı malzemelerde, örneğin pirinç (β faz), biyetin iç kısmındaki pirinç (hacim merkezli kübik kafes) ve pirinç (yüzey merkezli kübik kafes) gibi biyet dış bölgelerinin düşük sıcaklığının bir sonucu olarak farklılıklar mümkündür.

Daha yüksek akış gerilimine sahip malzemenin biyet çevresi, biyet çekirdeğine göre sınırlandırılır. Ekstrüzyonun bitimine doğru biyetin kesme bölgelerinden biyet iç kısmına malzeme akışı görülür. Bu malzeme akışı ikincil bir "deformasyon bölgesi" ile

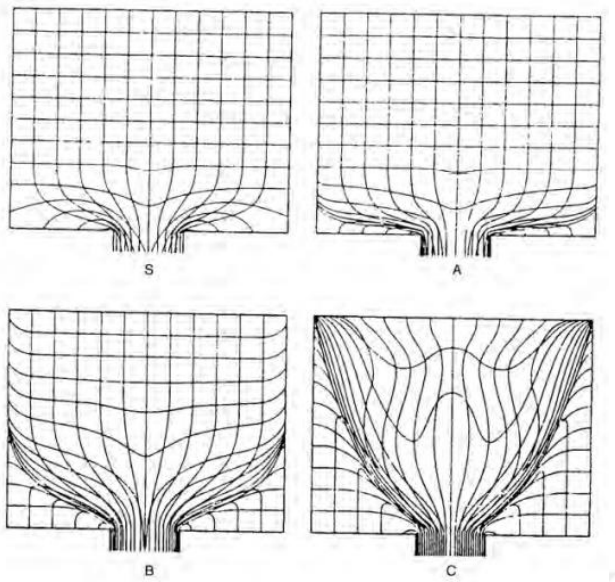
sonuçlanır. Sonuç, boru tesisatı hatası olarak bilinen bir ekstrüzyon hatasıdır (Şekil 3.12). Bu boru tesisatı kusurunu önlemek için biyet uzunluğunu azaltmak ve/veya ıskarta kalınlığını uzatmak gerekir.



Şekil 3. 12. Ekstrüzyon borusu hatası oluşumu. 1, İkincil deformasyon bölgesi; 2, Biyet merkezi; 3, Kesme bölgesi; 4, Birincil deformasyon bölgesi; 5, Kesme bölgesi; 6, Ölü metal bölge; 7, Ekstrüzyon

Yağlama olmadan direkt ekstrüzyonda malzeme akışı şu şekilde özetlenebilir:

Akış tipi A, biyetin kovan cidarı ve kalıp arasında çok az sürtünme olduğunu varsayar. Bu koşullar, yağsız ekstrüzyonda nadiren meydana gelir. Örneğin, yüzeyinin nispeten şiddetli oksidasyon yapılmış biyet ve yeni temizlenmiş bir kovanda meydana gelen kurşun veya bakırın ekstrüzyonunda gelişebilirler. Yağlama olmadan ve düz kalıplarla direk ekstrüzyon için en önemli iki akış tipi B ve C tipleridir, ancak ikisi arasındaki sınır esnektir. Malzeme akışını etkileyen en önemli faktörlerden biri birincil deformasyon bölgesinin geometrik oranı, diğeri ise anlık kalıp doldurma oranıdır (Ayer, Bingöl ve Altınbalık 2015). Direkt ekstrüzyonda malzeme akışı Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 13. Direkt ekstrüzyon akış modelleri

C tipi malzeme akışı, B tipinde olduğu gibi sadece sürtünmenin çok olduğu durumlarda değil, ayrıca ekstrüzyon malzemesinin şekil değiştirme direncinin biyet kenar bölgesinin, biyet içine göre fazla olduğu durumlarda meydana gelir. Şekil değiştirme kalıptan çok uzakta başlar. Ekstrüzyon işleminin başlangıcında malzeme akışının yönü, ön levhanın dış kenarından kalıp profiline doğrudur. Bu nedenle C tipinde oluşan ölü bölge B tipinden daha büyüktür. Buna bağlı olarak kayma gerilmelerinin meydana geldiği koni bölgesi daha büyük ve belirgindir. Bu akış tipinin oluştuğu durumlarda hiç istenmeyen ekstrüzyon hataları meydana gelir. Özellikle pirinç ekstrüzyonun da ikilenme denen ekstrüzyon hatası işlem esnasında çok erken başlar. Ekstrüzyonda malzeme akışı için yapılan araştırmaların çoğu C tipi akış için yapılmıştır. C tipi akış ekstrüzyon asla istenmeyen akış tipidir (Sönmez 1989).

Çizelge 3. 2. Direkt ekstrüzyon yönteminde malzeme akış tiplerinin karakteristikleri (Sönmez 1989)

Akış Tipi	Ekstrüzyon Malzemesi	Sürtünme	Ekstrüzyon Hatası	Artık Malzeme	Şekil Değiştirme Başlangıcı	Uygulamada Karşılaşılan Yerler	Akış Tipinin Hangi Modelle Elde Edildiği
S	Homojen	Yok	Yok	Kalıp girişinde	En az	Cam ile yağlama	Plastilin ve mum (yağlama ile)
A	Homojen	Az (kalıpta)	Yok	Kalıp yakınında	Az	Pb, Sn, Bi, Al (yağlama ile)	Plastilin ve mum (yağlama ile)

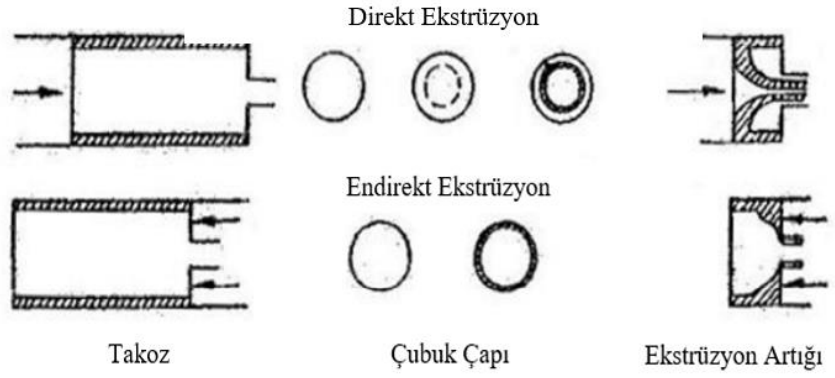
Çizelge 3. 3. Direkt ekstrüzyon yönteminde malzeme akış tiplerinin karakteristikleri (Sönmez 1989) (devami)

B	Homojen	Yüksek (kalıpta ve kovanda	Yüzeyde çanak oluşumu	Kalıptan uzak	Çok	HCu, Pb, Sn, Bi ve Al ve Al alaşımları	Plastilin ve parafin
C	Homojen değil	Çok yüksek (kovanda ve kalıpta)	İkileme	Kalıptan çok uzak	En çok	Pirinç, Al, AlMg, AlZnMg, Mg	Değişik plastiğe sahip silindirik tabakalardan yapılmış mum bloklar

3.1.3.3. Endirekt Ekstrüzyon Yönteminde Malzeme Akışı

Çeşitli malzemeler, direkt ve endirekt ekstrüzyon yöntemine tabi tutularak malzeme akışları arasındaki fark açıklanmaya çalışılmıştır. Endirekt ekstrüzyonda, direkt ekstrüzyondan daha ideal akış tipleri oluşabilmektedir. Endirekt ekstrüzyonda malzemenin şekil değiştirmesi her zaman biyetin kalıp içinde kalan bölgesinde meydana gelir. Biyet ile kovan arasındaki sınır yüzeyin durumu, oluşacak akışın karakteri için önemsizdir. Kalıp yüzeyinin durumuna göre S tipi ve A tipi akış meydana gelir (Başaran 2010)

Endirekt ekstrüzyonda biyetin temiz olmayan kenar tabakasının biyet içine akışına neden olan malzeme girdabı oluşmaz. Bu durum Şekil 3.14'te, mum malzemenin ekstrüzyonunda görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi biyetin dış yüzeyindeki malzeme direkt ekstrüzyonda burkularak çubuk merkezine akarak ekstrüzyon hatasına neden olur ve akış idealden uzaklaşır. Endirekt ekstrüzyonda ise böyle bir durum oluşmamaktadır (Sönmez 1989).



Şekil 3. 14. Direkt ve endirekt ekstrüzyonda blok yüzeyinin şekil değiştirmesi (Sönmez 1989)

3.1.4. Magnezyum ve Magnezyum Alaşımlarının Ekstrüzyonu

3.1.4.1. Magnezyumun Özellikleri

Magnezyum, demir ve alüminyumdan sonra en yaygın kullanılan üçüncü yapısal metaldir. Yapısal uygulamalarda kullanılabilecek en hafif metal olduğu belirtilmektedir. Şu anda mühendislik uygulamaları için yeterince kullanılmayan ama gelecek vaat eden hafif bir metaldir.

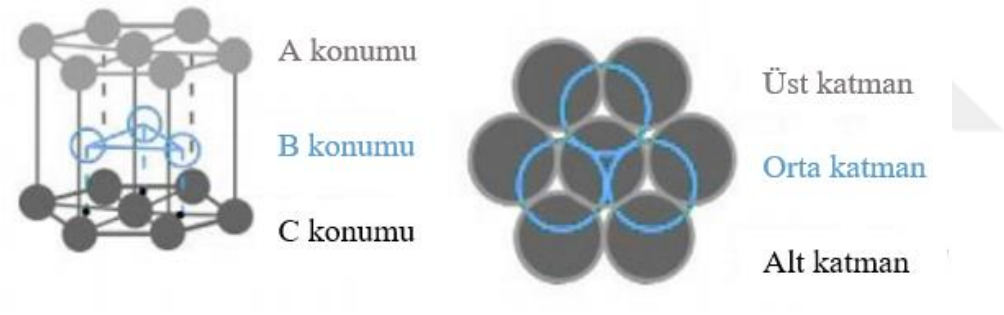
Magnezyum, yer kabuğunda en çok bulunan altıncı elementtir ve yer kabuğunun %2,7'sini temsil eder. Magnezyum, temel formunda bulunmamasına rağmen, magnezyum bileşikleri dünya çapında bulunabilir. En yaygın bileşikler magnezit ($MgCO_3$), dolomit ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$), karnalit ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) ve ayrıca deniz suyudur. Magnezyum, deniz suyunda en çok bulunan üçüncü mineraldir (1,1 kg/m3). Magnezyum, tüm yapısal metallerin en hafifidir. Çeliğin yoğunluğunun yaklaşık dörtte biri ve alüminyumun üçte ikisi olan 1,74 g / cm^3 yoğunluğa sahiptir. Düşük yoğunluğu ve yüksek spesifik mekanik özellikleri nedeniyle magnezyum bazlı malzemeler şirketler tarafından ağırlık açısından kritik uygulamalar için aktif olarak takip edilmektedir.

Saf bir magnezyumun karakteristik özellikleri Çizelge 3.3.'te verilmiştir,

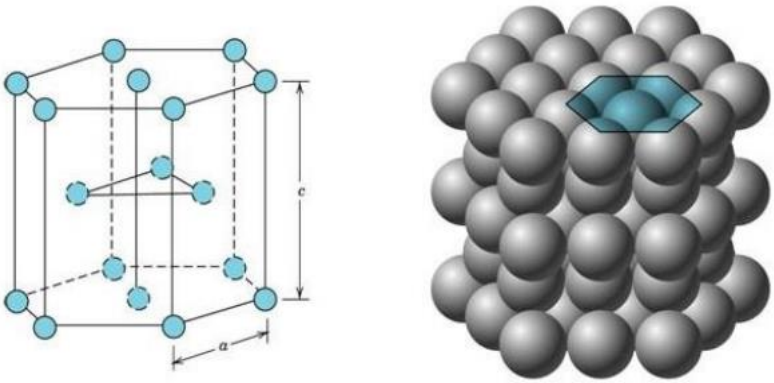
Çizelge 3. 4. Saf bir magnezyumun karakteristik özellikleri

Sembol	Mg
Eleman sınıflandırması	Alkali toprak metal
Atom numarası	12
Atom ağırlığı	24.3050 (6)
Atom hacmi	14.0 cm^3 / mol
Atom yarıçapı	0.160 nm
İyonik yarıçap	0,072 nm
Serbest atomlarda yörünge elektron durumları	$1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$
Kabuk başına elektron	2, 8, 2
En yaygın değerlik	2+
Kristal yapı	Sıkı paket hegzagonal (HCP)
Yoğunluk (20◦C'de)	1.74 g / cm^3
Erime noktası	(650 ± 1) °C
Kaynama noktası	1090°C

Magnezyum, atom numarası 12 olan ikinci grup periyodik cetvelin üyesi olan toprak alkali bir metaldir. Magnezyum, yoğunluğu 1.74 g/cm^3 olan en düşük ağırlıklı metallerden biridir. Magnezyumun atomik yapısı kadmiyum, titanyum, zirkonyum ve çinko gibi sıkı paket hekzagonaldir (SPH). Paketleme faktörü ve c/a oranı, bir SPH metalinin yapısını tanımlamak için iki önemli parametredir. İdeal bir SPH yapısının maksimum paketleme faktörü 0,74 ve eksenel oranı (c/a oranı) 1,633'tür. Bu değerler diğer SPH metallerinde farklılık gösterebilir. Bazal (taban) düzlemde kayma, c/a oranı ideal orandan büyük olduğunda baskın kayma modu olur. Öte yandan, c/a oranı ideal orandan düşük olduğunda prizmatik kayma daha aktif hale gelir. Zirkonyum ve titanyum alaşımları, daha düşük eksenel oranları nedeniyle prizmatik kaymalı metallere iki örnektir. Ancak magnezyumun bir istisnası vardır, eksenel oranı 1.624 olup ideal eksenel orandan daha düşüktür, buna rağmen bazal (taban) kayma sistemleri hala baskın kayma sistemleridir. Bu, magnezyumun kırılgan bir metal olmasının nedenlerinden biridir. Ayrıca magnezyumun erken bozulmasına neden olur.



Şekil 3. 15. Sıkı paket hegzagonal yapıda atomik katmanlarının 3D ve 2D görünümleri



Şekil 3. 16. Sıkı paket hegzagonal yapının birim hücre ve katman dizilişi

Magnezyum sıkı paket hegzagonal yapıya sahip olmasından kaynaklı olarak gevrek ve şekillendirilebilirliği güç bir malzemedir. Fakat yüksek özgül dayanıma, iyi dökülebilirlik özelliğine ve yüksek sönümleme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle uzay araçlarında, yüksek hızlı makine ve nakliye araçlarında kullanılır

Magnezyum, alüminyum kadar dayanımlı değildir. Dayanımının artırılabilmesi için alaşımlama, pekleşme, tane boyutu küçülmesi ve çökelme sertleştirilmesi yapılabilmektedir.

3.1.4.2. Magnezyum ve Alaşımları

Magnezyum alaşımları, daha yüksek seviyelere ulaşmak amacıyla hafif bileşenlere uygunluklarından dolayı daha da geliştirilmektedir.

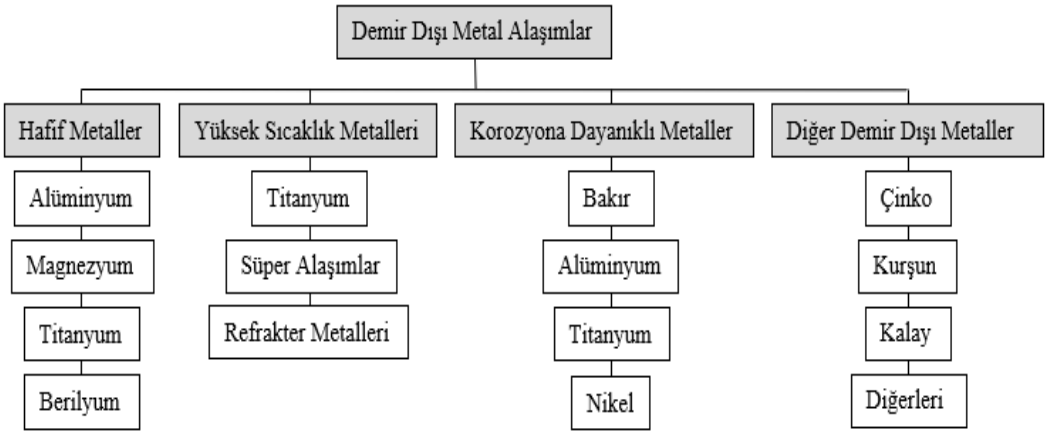
Otomobil endüstrisinin araç ağırlığını azaltarak enerji tasarrufu sağlamak için hafif ekstrüzyonlu ürünlere artan ilgisi, magnezyum alaşımlarında ekstrüde yarı mamul ürünlerin incelenmesini artırmıştır. Magnezyum alaşımlarının daha da geliştirilmesi, daha yüksek statik ve dinamik mukavemet değerlerine ve iyileştirilmiş korozyon özelliklerine sahip olmasıyla magnezyum alaşımları daha da önem kazanacaktır. Bu nedenle, magnezyum alaşımlarının, yük taşıyıcı bileşenlerin yanı sıra, iyi bir dayanıklılık gerilimi ve uzaması gerektiren güvenlik bileşenleri için de artan ölçüde kullanılacağı varsayılabilir. Ayrıca magnezyum alaşımları da alüminyum alaşımları gibi kolayca geri dönüştürülmektedir.

Şekil 3.17.'de görülebileceği gibi magnezyum alaşımı, alüminyum alaşımları, berilyum alaşımları, titanyum alaşımları gibi hafif demir içermeyen metal alaşımlarının üyelerinden biridir. Magnezyum alaşımları, tüm bu hafif alaşımlar arasında en hafif alaşımlardır. Bu bize endüstriyel uygulamalarda kullanılan ağır alaşımlar yerine kullanılacak magnezyum alaşımlarının büyük potansiyeli hakkında bir fikir vermektedir. Bu nedenle, istenen kalitede magnezyum üretmek için magnezyum alaşımlarının dezavantajlarının üstesinden gelinmesi gerekmektedir. Magnezyum alaşımlarının istenilen kaliteden daha düşük kaliteye sebep olan en önemli özelliklerinden üçü;

- korozyon direnci
- güç (nispeten)

• oda sıcaklığında şekillendirilebilirlik.

Magnezyum alaşımlarının bu sorunlarından kurtulmak için yeni üretim teknikleri oluşturulmuş ve daha yeni teknikler üzerinde çalışılmaktadır. Alüminyum, çinko, manganez, silikon, bakır ve diğer bazı toprak elementleri, magnezyum alaşımlarına sahip olmak için magnezyum ile karıştırılan elementlerden bazılarıdır. Alaşım elementlerinin her biri farklı özelliklerde bir gelişme sağlamaktadır. Alaşım elementleri ayrıca magnezyum alaşımlarının endüstriyel üretimde daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımlarının tanımı, Çizelge 3.4.'te gösterilen bu alaşım elementlerinin kısaltılmasıyla yapılmaktadır.



Şekil 3. 17. Bazı demir dışı metal alaşımları ve mühendislik uygulamaları

Çizelge 3. 5. Magnezyumun alaşım elementlerini temsil eden harfler

Harf	**Alaşım Elemanı**	**Harf**	**Alaşım Elemanı**
A	Alüminyum	N	Nikel
B	Bizmut	P	Kurşun
C	Bakır	Q	Gümüş
D	Kadmiyum	R	Krom
E	Nadir Toprak	S	Silikon
F	Demir	T	Kalay
H	Toryum	V	Gadolinyum
J	Stronsiyum	W	Yttrium

Çizelge 3. 6. Magnezyumun alaşım elementlerini temsil eden harfler (devamı)

K	Zirkonyum	X	Kalsiyum
L	Lityum	Y	Antimon
M	Manganez	Z	Çinko

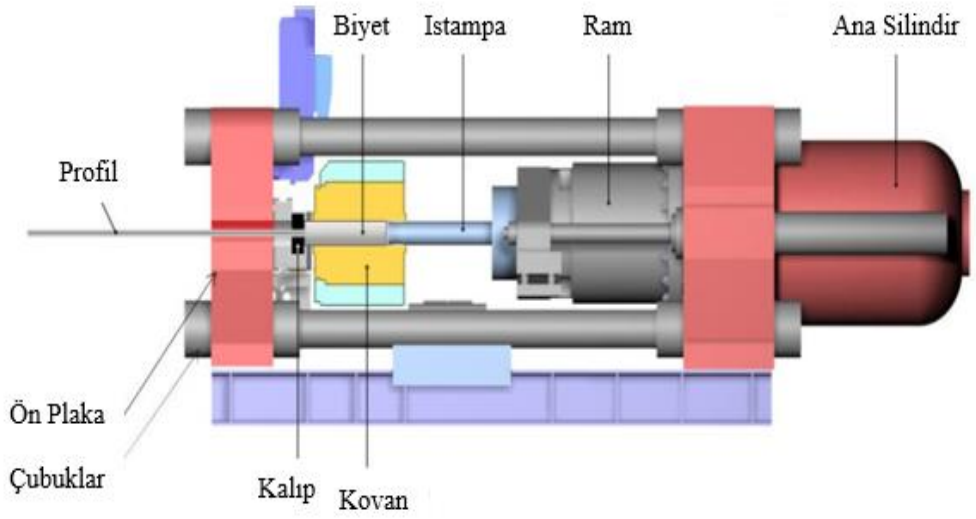
Magnezyum alaşımları, iki ana alaşım elementinin kısaltılması ve alaşımdaki ağırlık yüzdesi ile tanımlanmaktadır. AZ31 magnezyum alaşımının alaşım tanımlaması aşağıdaki Çizelge 3.5.'te verilmiştir.

Çizelge 3. 7. AZ31 alaşımının tanımlanması

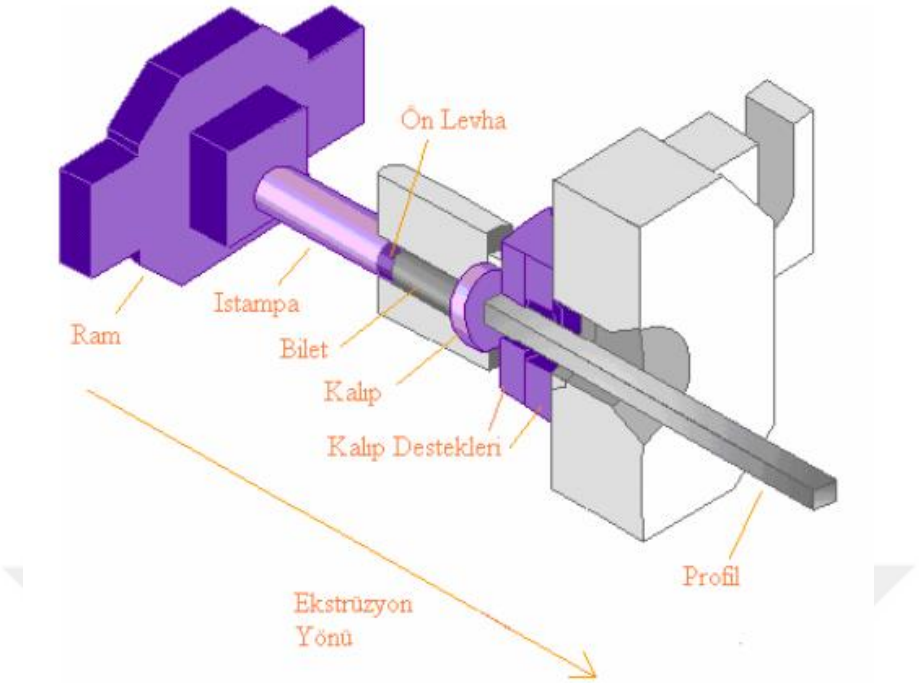
AZ	İki ana alaşım elementi; Alüminyum için A ve Çinko için Z
31	Alaşım elementinin ağırlık yüzdeleri; % 3 alüminyum ve% 1 Çinko

3.1.5. Ekstrüzyon Kalıpları ve Kalıp Tasarımı

Pres, biyetin ekstrüzyon kalıbından geçmesi için gerekli gücü uygular. Bir ekstrüzyon presinin nasıl çalıştığını anlamak için pres parçalarının tanımlanması ve bu parçaların kullanımının açıklanması gerekir. Şekil 3.18'de bir ekstrüzyon presi ve takımları görülmektedir. Şekil 3.19.'da ise temel bir ekstrüzyon presini şematik olarak göstermektedir (Bingöl 2006).



Şekil 3. 18. Direkt ekstrüzyon için tipik bir pres



Şekil 3. 19. Temel bir ekstrüzyon presinin şematin diyagramda görünümü

Ana Silindir: Arzu edilen ram (ıstampa) basıncı ve hareketinin oluşturulması için içerisinde hidrolik akışkanın pompalandığı silindirdir.

Ram: Biyetin kalıp içerisine hareket etmesi için öne ve arkaya kayma hareketi yapar.

Istampa: Ana silindirden aldığı hareket ile önünde bulunan ön levha ve alıcı içerisindeki biyete basınç uygulayarak, biyeti kalıp boşluğuna iter.

Ön Levha: Istampanın önünde bulunup ıstampayla beraber hareket ederek biyete direkt olarak temas eder.

Biyet: Belirli çap ve uzunluğuklara sahip magnezyum kütüklerdir. Biyet, kalıptan geçmesiyle ekstrüzyon profiline dönüşür.

Alıcı (Kovan): Biyetin içerisine yerleştirildiği silindirik bölümdür.

Kalıp ve Kalıp Takımları: Takımlar yardımıyla profile şeklini veren parçadır. Dolu kalıplarda destek, tutucu, kalıp ve besleyici bulunurken içi boş kalıplarda profildeki boşluğu vermeye yarayan mandrel bulunur.

Biyet Fırını: Uzun silindirik magnezyum biyetlerin ekstrüzyon sıcaklığına ısıtıldığı fırındır. Ekstrüzyon sıcaklığına ısıtılan uzun biyetler ekstrüzyon başlangıcında biyetin gereken uzunluğu kadar kesilir. Bazı biyet fırınları ekstrüzyon presi üzerinde bulunmazlar. Ancak yeni teknolojide fırınlar pres üzerinde bulunmaktadır (Bingöl 2006).

Ekstrüzyon Artığının Kesilmesi: Ekstrüzyon işleminde genellikle kalıntılı çalışılır. Biyet preslendikten sonra bir kısım biyet artığı (içerisinde oksitler bulundurup yeterli temizliğe sahip olmadığı için) kesilerek ıskartaya ayrılır (Bingöl 2006).

Kalıp Fırını: Kalıplar kullanılmadan önce 750 – 900 F arasında 4 – 6 saat arasında kalıp fırınında tavlamaya tabi tutulurlar (Bingöl 2006).

Çıkış Tablası: Presten çıkan ekstrüzyon profillerinin üzerinde boylu boyunca ilerlediği tabladır. Bu takımlardan kalıbın, özellikle ağır metal ekstrüzyonunda ve yüksek çıkış sıcaklıklarında, montajının kolay ve her ekstrüzyondan sonra değiştirilmesinin çok kolay olması gerekir. Kalıbın hızlı değiştirilmesi ekonomik avantajlar sağlar. Dış tarafı hafif konik olan kalıp, kalıp tutucusunun ön tarafından tutucu boşluğuna yerleştirilir, böylece kolay ve hızlı bir şekilde değiştirilmesi sağlanabilir (Bingöl 2006).

3.1.5.1. Kalıp

Kalıp, belirli kalınlıktaki bir disk üzerine imal edilecek profilin kesitinin kanal şeklinde açıldığı ekstrüzyon presinin ana takımlarından biridir. Kalıp, biyete basınç altında profil şeklini vermesinin yanında en çok değiştirilen takımdır. Bu değişim ile kalıp, profilin tüm detay ve toleranslarını içerir. Kalıpta oluşacak hatalar doğrudan profile yansır. Profilde özellikle şekil, yüzey ve boyut hataları görülür.

3.1.5.2. Kalıp Şekilleri

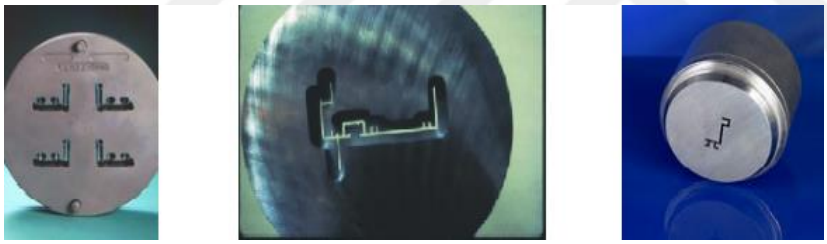
- **Dolu Profiller İçin Ekstrüzyon Kalıplar**

Dolu profiller için kalıpların düzenlenmesinde kalıp deliğinin yerini belirleyecek bazı temel kurallar dikkate alınmalıdır. Malzeme birikiminin fazla olduğu kısımlar, kalıp kenarına yakın bölgelerde olacak şekilde yerleştirilmelidir. Böylece kalıp kanal uzunluğunda bir düzenleme yapılmadan belli bir dengeleme sağlanır. Simetrik bir profilde simetri eksenleri, ön levhanın orta noktasında olacak şekilde bir düzenleme

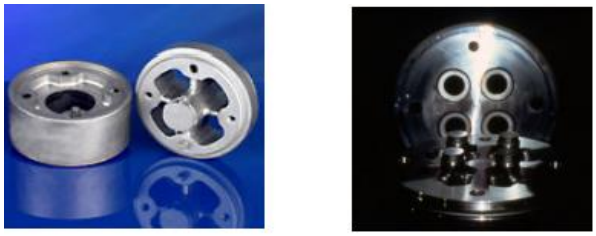
yapılmalıdır. İçi boş kalıplarda, delikler mümkün olduğu kadar simetrik şekilde yerleştirilmelidir. Dolu profiller için, düz kalıplardan başka, ön odalı kalıplar birleştirme ön odalı kalıplar ve destekli kalıplar kullanılmaktadır. Şekil 3.20'de düz kalıplara ilişkin kalıp örnekleri görülmektedir (Bingöl 2006).

- **İçi Boş Profiller İçin Ekstrüzyon Kalıpları**

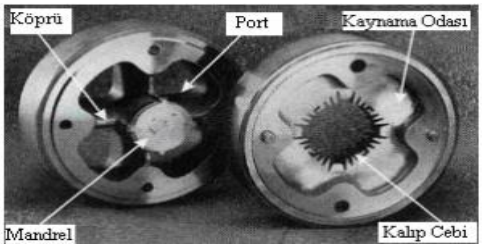
Ekstrüzyon tekniğinin bugün ulaştığı nokta, yüksek sıcaklıkta çalışan çeliklerin gelişmesine ve ısıl işlemlere, işleme makinelerindeki ve ekstrüzyon preslerindeki gelişmelere bağlıdır. Günümüzde çok karmaşık şekilli profilleri, uygun kalıpları kullanarak ekstrüzyon yöntemiyle elde etmek mümkündür. İçi boş profillerin ekstrüzyonunda köprülü, odalı ve spider kalıplar kullanılmaktadır (Sönmez, 1989). Kaptaki biyet, ıstampa tarafından kalıba doğru bastırılır, biyet kalıbın yüzeyine oldukça bastırılır, kalıp portları tarafından metal akışlarına bölünür. Bölünmüş metal akışları, mandrelin arkasındaki kaynak haznesine birleştirildikten sonra kalıptan çıkar (Bingöl ve Keskin 2007).



Şekil 3. 20. Dolu profiller için düz (katı) kalıp örnekleri



Şekil 3. 21. İçi boş profiller için açık (içi boş) kalıp örnekleri



Şekil 3. 22. Odalı (porthole) kalıp (Saha 2000)

3.2. Deneysel Çalışma

3.2.1. Kullanılan Malzeme AZ31 Magnezyum Alaşımı

Deneyde yüksek özgül dayanımı ve hafiflik özelliklerine sahip AZ31 magnezyum alaşımı iş parçası olarak kullanılmıştır. AZ31 alaşımı çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanım açısından belirtilen özelliklerinden dolayı büyük bir potansiyele sahiptir.

AZ31, bir magnezyum-alüminyum-çinko alaşımıdır. AZ31 magnezyum alaşımının tam kimyasal içeriği ve bu içeriklerin ağırlık yüzdeleri Çizelge 3.6.'da, fiziksel ve mekanik özellikleri de Çizelge 3.7.'de verilmiştir. AZ31 magnezyum alaşımı, tek fazlı bir magnezyum alaşımıdır. AZ31 magnezyum alaşımı, en düşük alüminyum içerikli AZ magnezyum alaşımıdır. AZ61 ve AZ91, ticari uygulamalarda da yaygın olarak kullanılan daha yüksek alüminyum içeriğine sahiptir. Bununla birlikte, geniş bir sıcaklık aralığında, daha yüksek alüminyum içeriğine sahip AZ magnezyum alaşımları kolaylıkla çökeltilebilir.

Çizelge 3. 8. Deneyde kullanılan AZ31 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi (%)

Al	Zn	Si	Cu	Mn	Ni	Ca	Fe	Mg
2.5 - 3.5	0.6 – 1.4	0.1	0.05	0.2	0.005	0.04	0.005	97

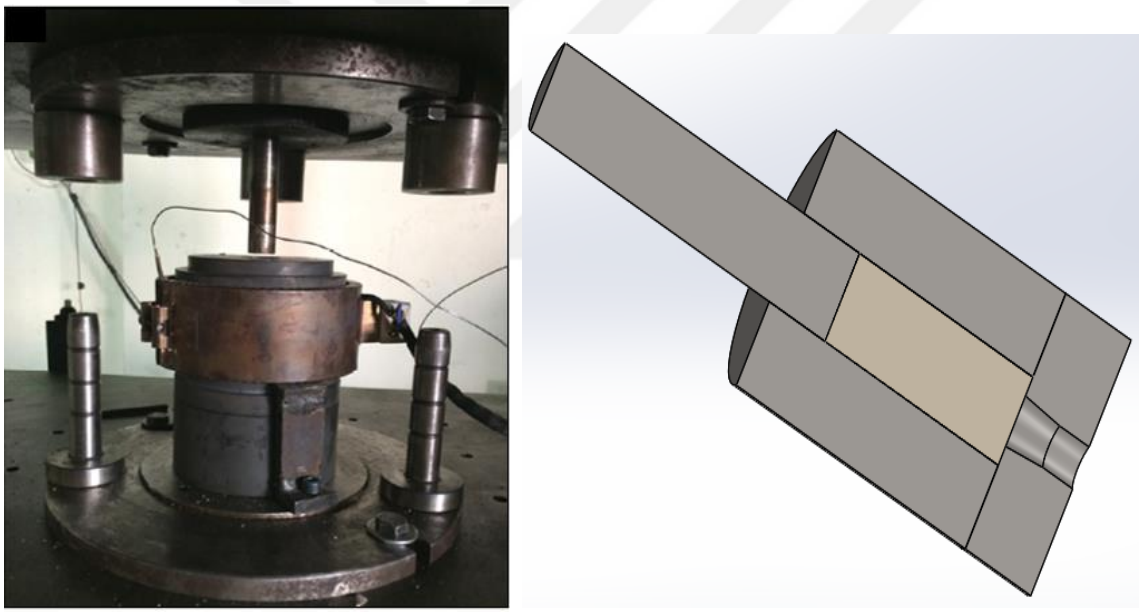
Çizelge 3. 9. Deneyde kullanılan AZ31'in fiziksel ve mekanik özellikleri

Yoğunluk (g/cm3)	Elastiklik Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Yayınım	Akma Dayanımı (gerinim 0.200%) (MPa)
1.74	45000	0.35	0.12	200

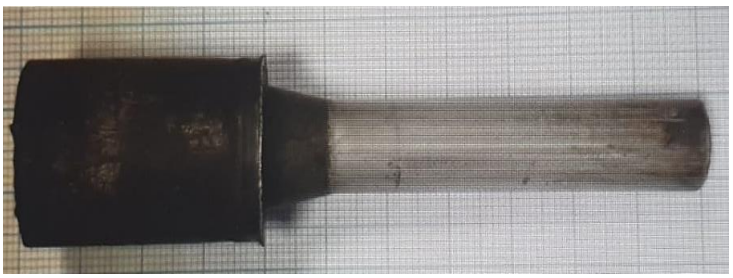
3.2.2. Deney Şartları

Direkt ekstrüzyon deneyimiz, 150 ton kapasiteli PLC sisteme ve 5 mm / sn sabit ıstampa hızına sahip hidrolik pres üzerinde gerçekleştirilmiştir. PLC sistemi sayesinde ilerleyen ıstampa hareketi ile değişen ekstrüzyon kuvveti değerleri kaydedildi. Deneyde iş parçası olarak AZ31 magnezyum malzemesinden çubuk kesilmiştir. Bu silindirik iş parçası 21 mm çapında ve 53 mm uzunluğunda olacak şekilde işlenmiştir. İç çapı 21 mm,

dış çapı 60 mm ve uzunluğu 70 mm olan bir ekstrüzyon kovanı ve 21 mm çapında 90 mm uzunluğuna sahip ıstampa işlenmiştir. Kalıp, kovan ve ıstampa malzemeleri AISI H13 alaşımlı sıcak iş takım çeliği olarak seçilmiştir. Deney için üretilen kalıbın kalıp çıkış çapı 10,5 mm, kalıp uzunluğu 20 mm, kanal uzunluğu 9 mm ve kalıp giriş açısı 10^{o} olarak belirlenmiştir. Düz konik geometriye sahip kalıp için ekstrüzyon oranı ER = (A girişi / A çıkışı) ile verilir ve ER = 4 olarak elde edilmiştir. Deformasyon esnasında yapışma etkisini önlemek için kovanın iç yüzeyleri cilalanmıştır. Kalıp düzeneği dairesel ısıtma bobini sistemi ile ısıtılmıştır. İş parçamız ayrı bir fırında ısıtılıp daha sonra kalıp düzeneğine hızlı bir şekilde alınmıştır. Ardından hemen ekstrüzyon işlemi başlatılmıştır. Kalıp düzeneği ve iş parçası işlem esnasında aynı sıcaklıkta tutulduğu için deney başlangıcında kalıp-iş parçası ara yüzeyleri arasında ısı transferi olmamıştır. Deneysel kalıp düzeneği Şekil 3.23.'te verilmiştir.



(a) (b)



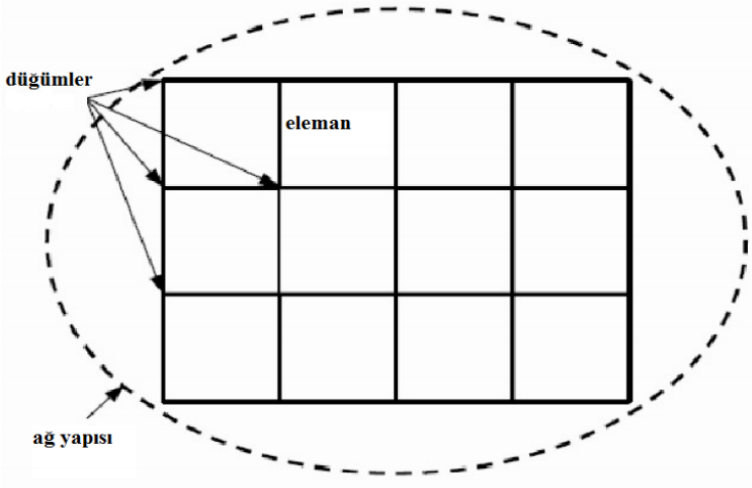
(c)

Şekil 3. 23. (a) Deneysel kalıp seti (b) Kalıp setinin SolidWorks modeli (c) Deney sonucu elde edilen ürün

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi genellikle bilim ve mühendislik uygulamaları için kompleks problemlerin yaklaşık olarak çözümlenmesinde kullanılan bilgisayar destekli sayısal bir tekniktir. Karmaşık ve anlaşılması güç yapısından dolayı birçok mühendislik uygulaması sonuçlarının elde edilmesi noktasında oldukça zahmetlidir. Deneme-yanılma yoluyla yapılan incelemelere bakıldığında ise üretimi hem zaman hem de maddi olarak olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Bilim ve mühendislikteki karmaşık problemlerin analitik yöntemler ile çözümlenemediği durumlarda bu tür sonlu elemanlar yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. Fiziksel modelleme ve analizlere paralel olarak, sonlu elemanlar yöntemi ekstrüzyon işleminin tasarımında ve optimizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal simülasyon, işlem boyunca adım adım doğru bir şekilde hesaplanabilen sıcaklık, gerinim, gerinim hızı ve gerilme gibi yerelleştirilmiş işlem durumu değişkenleri sağlar (Alharthi, Bingöl, Ventur ve Misiolek 2014). Bu yöntem ile akış, gerilme, burkulma, deformasyon, titreşim, yırtılma gibi davranışların hesaplanmasında kullanılabilir ve malzemenin elastik ya da plastik deformasyonunun analizi yapılabilmektedir. Bu üstün özellikleri sayesinde, sonlu elemanlar yöntemi endüstride ve akademik çalışmalarda yoğun bir biçimde kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan ticari programlar, çözümü yapılacak fiziksel problemi sonlu sayıda ideal elemanlara böler. Bu elemanlar arasındaki bağlantı düğümleri ile sağlanır. Problemin fonksiyonu ve türevi bu düğümlerin içerisinde tanımlanmıştır. Sonlu sayıdaki bu eleman ve düğümler, ağ yapısı sistemini (mesh) meydana getirir (Şekil 3.24.) (Yıldız 2017).



Şekil 3. 24. Sonlu elemanlar metodu ile analiz yapan ticari programlardaki ağ yapısının gösterimi

Ağ yapısı modeli, fiziksel problemde yer alan, rijit (şekil değiştirmeyen) ve rijit olmayan (şekil değiştiren) bütün elemanların özelliklerini yansıtırlar. Rijit olan elemanların ağ yapısı, rijit olmayan elemanların ağ yapısından farklı olarak rijit elemanın sadece şeklini temsil eder. Rijit olmayan elemanın ağ yapısı ise elemanın şeklini ve malzeme özelliklerini temsil eder. Ağ yapısı içerisinde yer alan sonlu elemanlar ve düğümlerin her biri birer fonksiyon olduğundan, bu fonksiyonların çözümü iterasyonlar şeklinde yapılır. Ağ yapısı içerisindeki elemanların şekli ne kadar küçük olursa eleman sayısıda o kadar artar ve sonuç olarak problemin çözümü için yapılan iterasyon sayısı fazla olur. Böylece elde edilen sonucun hassasiyeti artar. Ancak işlem süresi uzar. Eğer ağ yapısı içerisindeki elemanların şekli büyürse, ağ içerisindeki eleman miktarı da azalır. Buna bağlı olarak problemin çözümü için yapılan iterasyon sayısı ve elde edilen çözümün hassasiyeti azalır. İşlem süresi de azalan iterasyon sayısı ile azalır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analizlerde ağ yapısı içerisindeki elemanların sayısı en uygun bir seviyede tutularak, uygun bir işlem süresinde en iyi hassasiyete sahip sonuçlar elde etmek istenir (Yıldız 2017).

Metal şekillendirmelerde kullanılan paket programlardan bazıları DEFORM, HyperXtrude, ABAQUS, DYNAFORM, PamStamp olarak sıralanabilir (Ayer 2012).

Bu yazılımlardan bir tanesi olan DEFORM ürün ailesinin bir versiyonu olan DEFORM 3D, karmaşık 3 boyutlu malzeme akışı içeren modellerin problemlerini sonlu elemanlar yöntemiyle çözmek için kullanılmaktadır. DEFORM 3D programı üç boyutlu

çalışarak farklı geometrilere ve sınır şartlarına sahip metal şekillendirme işlemlerini modelleyebilmek amacıyla tasarlanan dinamik analiz yapabilen bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Deneme-yanılma yöntemi ortaya çıkardığı yüksek maliyetinin yanı sıra zaman kaybettiren bir yöntem olmasından dolayı DEFORM 3D farklı metal şekillendirme proseslerini modelleme yeteneği ile söz konusu sorunları ortadan kaldıran verimli bir araştırma-geliştirme aracı olarak giderek artan bir kullanım alanına sahiptir. DEFORM-3D kullanan süreç simülasyonu, son yirmi yıldır maliyet, kalite ve teslimat iyileştirmelerinde etkili olmuştur (Altınbalık, Bingöl ve Ayer 2015). DEFORM 3D; kapalı kalıpla dövme, açık kalıpla dövme, metal kesme, haddeleme, ekstrüzyon, kafa şişirme (heading) gibi çok farklı metal şekillendirme operasyonlarının modellenmesinde doğru, hızlı sonuçlar vermesinden dolayı en çok tercih edilen paket program olarak kullanılmaktadır ve bu yüksek lisans tez çalışmasında da ekstrüzyon kalıplarındaki karmaşık problemin 3 boyutlu olarak modellenebilmesinden dolayı sonlu elemanlar analizi için DEFORM 3D paket programı tercih edilmiştir.

3.3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Analizin Süreçleri

Sonlu elemanlar yöntemi ile problemin analizini yapmak için bazı adımların bilinmesi gerekmektedir. Bu adımlar;

1. Problem tipinin (statik, dinamik, termodinamik) belirlenmesi.

2. Bilgisayar destekli çizim programları ya da analiz programları içerisinde gömülü çizim programları kullanılarak iş parçasının ve araçların şekillerinin çizilmesi.

3. İş parçasının, malzeme bilgisinin tanımlanması.

4. Modelin hareketli ve sabit parçaları, temas yüzeylerinin, temas türlerinin (kaynaklı birleşme, sürtünmeli veya sürtünmesiz birleşme vb.) sürtünme verileri gibi sınır koşullarının belirlenmesi.

5. Sonlu eleman ağ yapısı, türü, zaman adımları ve sonuç parametreleri olarak sıralanmasıdır.

3.3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yapılan Analizlerin Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları

– Özellikle endüstride ve akademik çalışmalarda, pratik uygulamalardan ve deneysel çalışmalardan önce işlemin bilgisayar ortamında yapılması, işlem öncesi tedbirlerin alınmasında büyük rol oynamaktadır.

– Pratikte deneme-yanılma gibi maddi ve zaman kaybına neden olan işlemler yerine, bilgisayar ortamında daha hızlı ve ekonomik bir şekilde yapılmasına olanak sağlamaktadır.

– İçerdiği çeşitli ağ örgüsü modelleri sayesinde çok farklı karmaşık şekillere sahip problemlerin çözümünü kolaylaştırmaktadır.

– Sonradan tanımlanabilir malzeme özellikleri ve kütüphanesinde içerdiği farklı malzemeler, problem çeşitliliğini arttırmaktadır.

– Problemin sınır koşulları model üzerine kolay bir şekilde uygulanabilir.

– Problemler 3 boyutlu veya 2 boyutlu olarak tanımlanabilir.

Dezavantajları

– Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan ticari bilgisayar programları, yüksek kapasiteli bilgisayarlara gereksinim duyarlar.

– Gerçekçi sonuçlar almak için, problemin çok iyi tanımlanması gerekmektedir.

– Çok hassas sonuçlar almak için, ağ yapısı çok sık olmalıdır. Dolayısıyla işlem süresi artmaktadır.

3.3.3. Sonlu Elemanlar Yönteminin Ekstrüzyonda Uygulamaları

Ekstrüzyon işleminde sonlu elemanlar yöntemi ile deneysel uygulamalarda analiz tekniklerinin kullanılabilirliği sayesinde herhangi bir ekstrüzyon işleminin

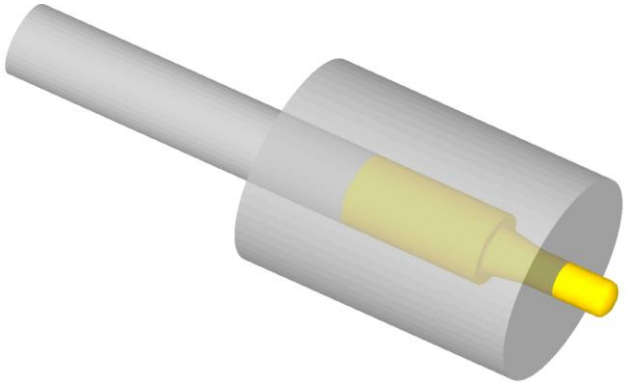
görselleştirilmesi ve süreç boyunca üretilen parçaların içindeki gerilme ve diğer şekillendirme koşullarını kolaylıkla incelemek artık mümkündür.

Sonlu elemanlar yöntemi ile ekstrüzyon işlem koşullarını analiz edip işlemin uygulanabilirliği ya da süreçlerinin iyileştirilebilirliği açısından destek olur. Bu yöntemle gerçeğe yakın modeller oluşturarak kompleks ürünlerin şekillendirilebildiği analiz edilir. Modelin doğruluğu değerlendirebilmek için yapılan deneysel çalışmalar ile endüstriyel ekipmanlarla yapılan ekstrüzyon uygulamalarını araştırmak gerekmektedir.

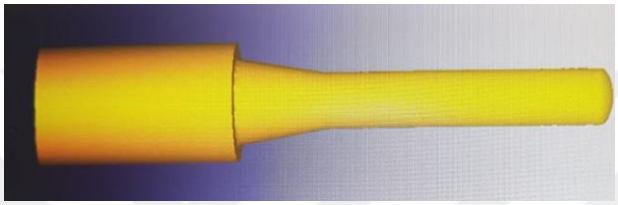
3.3.4. DEFORM 3D ile Deneysel Çalışmanın Modellenmesi

DEFORM 3D ile yapılan modellemede deneyin bir benzetimini yapmak amaçlanmıştır. Bu nedenle deneydeki sınır şartları modele aktarılmıştır. Deneysel çalışmanın modelleme görünümü Şekil 3.25.'te, boyutsal tanımı ise Çizelge 3.8.'de görülmektedir. İş parçası olan AZ31 Ayer (2018)'in makalesinden alınmıştır. Kalıp, kovan ve ıstampa malzemesi olarak da H-13 takım çeliği seçilmiştir.

Kalıp, biyet, kovan ve ıstampanın katı modelleri SolidWorks programında oluşturulup *.stl formatında DEFORM 3D programına aktarılmıştır. Kalıp, kovan ve ıstampa rijit, biyet ise elastik-plastik karakterli olarak programa tanımlanmıştır. İş parçası ve kalıplar sonlu elemanlar programlarında belirli bir eleman sayısı üzerinden ağ örülerek daha basit geometrilere ayrılmaktadır. Söz konusu işlemde iş parçası için eleman sayısı olarak 30000 seçilmiştir. Kalıplar 25000 eleman üzerinden ağ örgüsü (meshleme) yapılmıştır. Eleman sayısının fazla olması işlem zamanını artırmasının yanında problemin sonucunun hassasiyetini iyileştirmesi açısından önemlidir. Ancak her bir problemde optimum bir değerden sonra eleman sayısının artması sonuca çok fazla etki etmeyeceği gibi işlem zamanının da gereksiz yere arttırabilmektedir. Dolayısıyla uygun bir eleman sayısı belirlemek önemlidir ve tecrübe gerektirir (Ayer 2012). Deneyde kullanılan presin üst kalıbının hareketi, yapılan deneyin DEFORM 3D programında benzetimi yapılan ıstampa hareketi ile uyumlu olması açısından 5 mm/sn olarak seçilmiştir. Kalıp ile biyet arasındaki bütün yüzeylerde sürtünme şartları; kayma sürtünmesi m=0.4 olarak seçilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. 25. (a) Deneysel çalışmanın modellenmesi (b) Simülasyon sonucu elde edilen ürün

Çizelge 3. 10. Deneysel çalışmanın modellemesinin boyutsal tanımı

Boyutsal Tanımı	**Değeri**
Biyet Çapı	21 mm
Biyet Uzunluğu	53 mm
Kovan İç Çapı	21 mm
Kovan Dış Çapı	60 mm
Kovan Uzunluğu	70 mm
Istampa Çapı	21 mm
Kalıp Giriş Çapı	21 mm
Kalıp Çıkış Çapı	10,5 mm
Kalıp Kanal Uzunluğu	9 mm
Kalıp Giriş Açısı	10^{o}

3.3.5. DEFORM 3D ile Modelleme Çalışması

Ekstrüzyon simülasyonu, daha önce çeşitli şekillendirme alanlarında kullanılan DEFORM-3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi. İş parçası olan AZ31 Ayer (2018)'in makalesinden alınmıştır. Kalıp, kovan ve ıstampa malzemesi olarak da H-13 takım çeliği seçilmiştir. Ekstrüzyon simülasyonu oda sıcaklığında yapıldığından, ıstampa hızı 5 mm/sn ve sürtünme sabiti 0.4 alınarak ekstrüzyon işlemi olarak düşünülebilir. Ekstrüzyon işlemi 15 mm ıstampa hareketine kadar sürdürülmüştür.

Zaman ve simülasyon hassasiyeti, simülasyon gerçekleştirilirken iki kritik parametredir çünkü daha yüksek ağ yoğunluğunun, oldukça hassas simülasyon sonuçları sağlayabildiği gözlemlenmiştir, ancak simülasyon süresi çok uzundur. Bu nedenle, bu çalışmada, optimum simülasyon süresini ve depolama alanını tahmin etmek için farklı ağ oluşturma kullanılmıştır. Kalıbın etrafındaki dişli boşluğu ince örgülü iken, ıstampaya yakın diğer çalışma alanları kabaca birbirine geçmiştir. Çizelge 3.9.'da gösterildiği gibi kalıp giriş açısını (α) ve ekstrüzyon oranını (E) değişken alarak iki girdi parametresi ile toplam 9 simülasyon gerçekleştirildi.

Çizelge 3. 11. Simülasyonlarda kullanılan parametrelerin seviyesi

GİRİŞ PARAMETRELERİ	SEVİYE 1	SEVİYE 2	SEVİYE 3
Kalıp Giriş Açısı (α)	5	15	25
Ekstrüzyon Oranı (E)	4	6	8

3.4. Gen İfadesi İle Programlama (GİP)

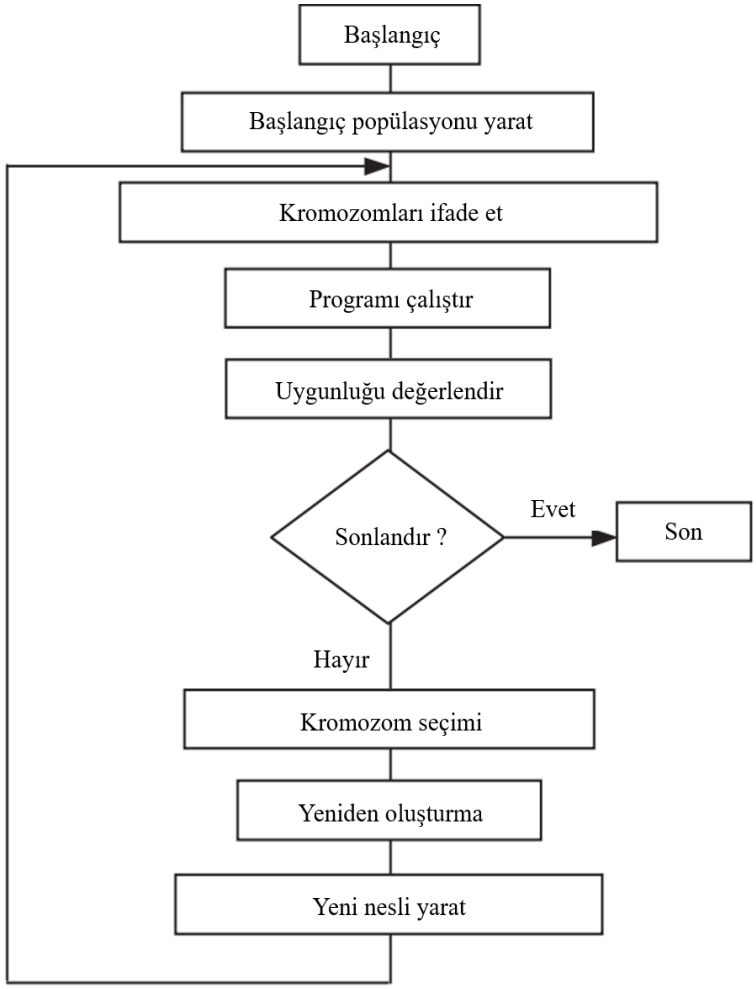
Genetik İfadeli Programlama (GİP), bilgisayar programları geliştirerek büyük veri kümelerinden fonksiyonları keşfedebilen evrimsel bir algoritmadır (Bingöl ve Misiolek 2015). Bu programlar, yaşayan bir organizma davranışlarına çok benzemektedir. Değişkenler arasındaki ilişkileri öğrenebilir, boyutlarını ve şekillerinin değişimi ile onlara uyum sağlayabilirler. Genetik Programlamada amaç evrim teorisinden esinlenerek oluşturulan Genetik Algoritmalar kullanılarak, kullanıcı tarafından tanımlanmış komutların yerine getirilmesidir (Hatunoğlu 2010).

GİP, genetik algoritmalara (GA) ve genetik programlama (GP)'ye dayanan bir algoritmadır. GA, GP ve GİP'in aralarındaki temel fark bireylerin doğallığına bağlıdır.

GA da bireyler, kromozomların en uygun lineer dizileridir. GP'de bireyler farklı boyut ve şekilde lineer olmayan varlıklardır ve GİP'de ise bireyler gen ve kromozomların en uygun lineer dizisine göre kodlanır (Önen ve Aslan 2017). GİP ' in temel hedefi, GİP modelinde kullanılan bir veri kümesini kullanarak bir matematiksel fonksiyon geliştirmektir. Matematiksel denklem için GİP işlemi, GA'nın genetik operatörlerinin çoğu ile sembolik regresyonu gerçekleştirir. Süreç belli sayıda bireyin kromozomlarının üretilmesi ile başlar. Ardından bu kromozomlar tanımlanır ve her bireyin uygunluğu bir dizi sağlıklı duruma karşı değerlendirilir. Daha sonra bireyler, değişiklikle çoğalma özelliklerine göre seçilir. Bu yeni bireyler, genomların ifadesi, seçim ortamının çatışması, seçim ve yeniden üretim ile aynı gelişim süreçlerine tabi tutulur. Süreç belirli bir nesil için veya iyi bir çözüm bulunana kadar tekrarlanır (Ferreira, 2001, 2004, 2006).

3.4.1. GİP Modelinin Bileşenleri

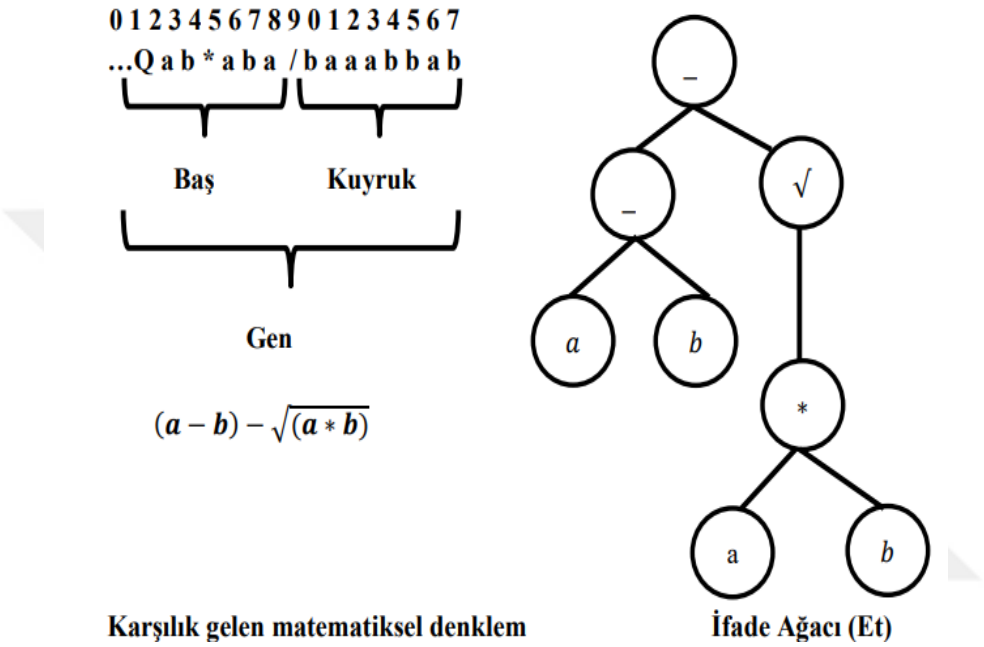
GİP'in akış şeması Şekil 3.26.'da görülmektedir. Problem çözmedeki süreç, belirli sayıda bireyin (ilk popülasyon) kromozomlarının üretilmesiyle başlar. Daha sonra, bu kromozomlar ifade edilir ve her bireyin uygunluğu bir dizi uygunluk durumuna göre değerlendirilir. Daha sonra, bireyler modifikasyonla çoğalmaya uygunluklarına göre seçilir. Bu yeni bireyler, genomların ifadesi, seçim ortamının çatışması, seçim ve modifikasyonla üreme gibi aynı gelişimsel süreçlere tabi tutulur. Süreç, belirli sayıda nesil boyunca veya iyi bir çözüm bulunana kadar tekrarlanır.



Şekil 3. 26. GİP'in akış şeması

GİP'in ifade ağaçları (ET) ve kromozomlar olarak iki önemli ana unsuru vardır. Kromozomlar bir matematiksel ifadenin sembolleridir ve bir veya daha fazla gen içerir. Bir genin matematiksel kodu, Karva Dili olarak adlandırılan, genlerin dili ve ET'lerin dili gibi iki farklı dilde ifade edilir. GİP genleri baş ve kuyruk adı verilen iki kısımdan oluşur. Baş kısmı bazı matematiksel operatörler, değişkenler ve sabitler içerir ve matematiksel bir ifadeyi kodlamak için kullanılır. Terminal sembolleri ihtiva eden değişkenler ve sabitler kuyruğa dahildir. Baştaki terminal semboller matematiksel bir ifadeyi açıklamak için yetersiz kalırsa ek semboller kullanılır. Tek bir genli doğrusal dizge gibi basit bir kromozom Şekil 3.27.'de kodlanmıştır. Ayrıca ifade ağacı ve matematiksel denklemi de verilmiştir. ET'nin Karva Dili'ne çevirisi, ağacın üst satırında soldan sağa ve üstten alta doğru okunmaya başlayarak gerçekleştirilir. Bu yöntemde kullanılan gen dizileri biyolojik genleri, kodlayıcı ve kodlanmayan kısımları kapsar. GİP yönteminde ana

operatörler seçme, transpozisyon ve çaprazlama (rekombinasyon) şeklindedir. Kromozomlar, bu operatörler vasıtasıyla gelecek nesil için daha iyi bir uygunluk elde etmek üzere değişime uğrarlar. Model yapımının başında belirtilen operatör hızları, değişen bir kromozom olasılığını göstermektedir. Ortak olarak önerilen mutasyon oranı 0.001 ile 0.1 arasında değişir. Ayrıca, önerilen aktarım operatörü ve çapraz operatör sırasıyla 0,1 ve 0,4 olmalıdır (Oral 2017).



Şekil 3. 27. Bir Genin Kromozomu, İfade Ağacı ve Matematiksel Denklemi

Bir GİP sürecinin optimizasyonunda dikkate alınması gereken çok fazla parametre bulunmaktadır. Parametrelerin sayısı çok olup bunlar öğrenme algoritması, popülasyon büyüklüğü, gen sayısı, gen boyutu, fonksiyon seti, rastgele sayısal sabit ayarları, bağlanma fonksiyonu, genetik operatörler ve onların oranları, uygunluk fonksiyonu ve benzeridir. Optimal parametre setine karar vermek için bazı ilkeler olmasına rağmen, en doğru ve en etkili yol bir deneme yanılma prosedürünü kullanmaktır (Önen 2014).

3.4.2. GİP Modelinin Gelişimi

Ekstrüzyon kuvvetini tahmin edebilmek için geliştirilen matematiksel ifade, GİP modellerinin geliştirilmesinin asıl amacı olmuştur. Böylece GİP modelinin geliştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, GİP modelinin ekstrüzyon oranı, kalıp giriş açısı ve ıstampanın hareketi ile oluşan strok olmak üzere üç ana girdi parametresi vardır.

GİP Modelinin kullanımında ve hazırlanmasında beş önemli aşama vardır İlk aşama; GİP'e girilecek olan uygunluk (fitness) fonksiyonunun belirlenmesidir. Modelin oluşturulmasında ilk aşamada kullanılan denklem;

$$f_i = \sum_{j=1}^{c_i} (M - |C_{i,j} - T_j|) \quad (3.1)$$

Burada M=seçim aralığı; $C_{i,j}$=Bireysel kromozomlar tarafından dönüştürülen değer (i: uygun durumlar için, j: uygun olmayan durumlar için), T_j= en uygun durum için hedef değer. $|C_{i,j} - T_j|$ (doğruluk) 0.01'den küçük veya eşitse, doğruluk sıfıra eşittir ve $f_i = f_{max}$ = CiM'dir. Bu durumda, M = 100 alınır ve bu nedenle f_{max} = 1,000 kullanılır. Bu uygunluk fonksiyon türünün avantajı, sistemin kendisi için en uygun (optimum) çözümü üretebilmedir. (Ferreira, 2001).

İkinci önemli aşama, kromozomları oluşturmak için F fonksiyon ve T terminal kümesini seçmektir. Bu problemde terminal seti, bağımsız değişkenden, yani F = f {α, E, d} oluşur. Uygun fonksiyon kümesinin seçiminde gerekli tüm fonksiyonları içerecek şekilde iyi bir tahmin yapılır. Bu durumda dört temel aritmetik işlem (+, −, *, /) ile bazı temel matematiksel fonksiyonlar (1/x, $x^{1/2}$, $x^{1/3}$, $x^{1/4}$, x^2, x^3) kullanılmıştır.

Üçüncü aşamada, kromozomal yapıyı, yani baş kısmın uzunluğu ve gen sayısını belirlemektir. Dördüncü önemli aşama, bağlantı fonksiyonunu seçmektir (toplama, çıkarma, çarpma bölme). Beşinci önemli aşama ise, varyasyon ve oranlarından kaynaklı olan genetik operatör setini seçmektir. Tüm genetik operatörlerin kombinasyonları (mutasyon, transpozisyon ve rekombinasyon) En uygun GİP modelinin parametrelerin bir birleşimi kullanılmıştır (Güven and Günal 2008).

Bu çalışmada GİP modelini oluşturmak için yapılan denemelerden sonra baş uzunluğu h=8 ve kromozom başına 5 gen seçilmiştir. Bağlantı fonksiyonu olarak da toplama kullanılmıştır. Son olarak tüm genetik operatörlerin birleşimi genetik operatörler kümesi olarak kullanılmıştır. GİP modelinin eğitim parametreleri Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3. 12. Ekstrüzyon işlemi için uygun GİP modelinin parametreleri

Parametre	Parametrenin Tanımı	Parametrenin Seti
P_1	Kromozomlar	40
P_2	Kafa Sayısı	8
P_3	Gen Sayısı	5
P_4	Bağlantı Fonksiyonu	*
P_5	Fonksiyon Seti	+, -, x, /, √, pow, 10^x, log, exp, ln, 1/x, x2, x3, x4,x5, 2√, 3√, 4√, 5√
P_6	Mutasyon Oranı	0,00138
P_7	Tek Noktalı Rekombinasyon	0,00277
P_8	Çift Noktalı Rekombinasyon	0,00277
P_9	Evrilme Oranı	0,00546
P_{10}	Aktarma Oranı	0,00546
P_{11}	Uygun Fonksiyon Hata Oranı	R^2, RMSE, RRSE, MAE

3.4.3. GİP Modelinin Oluşturulması

Bu çalışmada GİP Modelinin oluşturulmasında birbirinden bağımsız üç parametrenin (α: kalıp giriş açısı, E: ekstrüzyon oranı, d: ıstampanın hareketi ile oluşan strok) toplamda 315 verisi kullanılmıştır. Toplam 315 verinin % 80'i (235) eğitim amaçlı, % 20'si (63) ise test amaçlı olacak şekilde kullanılmıştır. Test amaçlı olarak belirlenen bu 63 veri, ilk etapta programa verilmemiştir. Bu veriler programın yaptığı hesaplamaların karşılaştırılması için kullanılmıştır. Oluşturulan GİP Modelinin performansı R^2 ve RMSE değerleriyle ölçülmektedir;

$$R^2 = \left(\frac{\sum xy}{\sum x^2 \sum y^2}\right)^2 \tag{3.2}$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum(x-y)}{n}\right)^{1/2} \tag{3.3}$$

Bu denklemlerde; x: gözlemlenen değerler, y: tahmin edilen değerler, n: örneklerin sayısı olarak tanımlanmıştır.

Önerilen GİP Formülasyonundaki model, iyi kurgulanmış literatürdeki model sonuçlarına dayanmaktadır. Şekil 3.29 ve Şekil 3.31'de görüldüğü gibi ölçülen ve GİP Modelimizde ortaya çıkan tahmin değerleri grafiklerinin birbirine yakın olması ekstrüzyon kuvveti hesabında son derece iyi performans sergilediği sonucuna varılmıştır.

3.4.4. GİP Modelinin Çalıştırılması

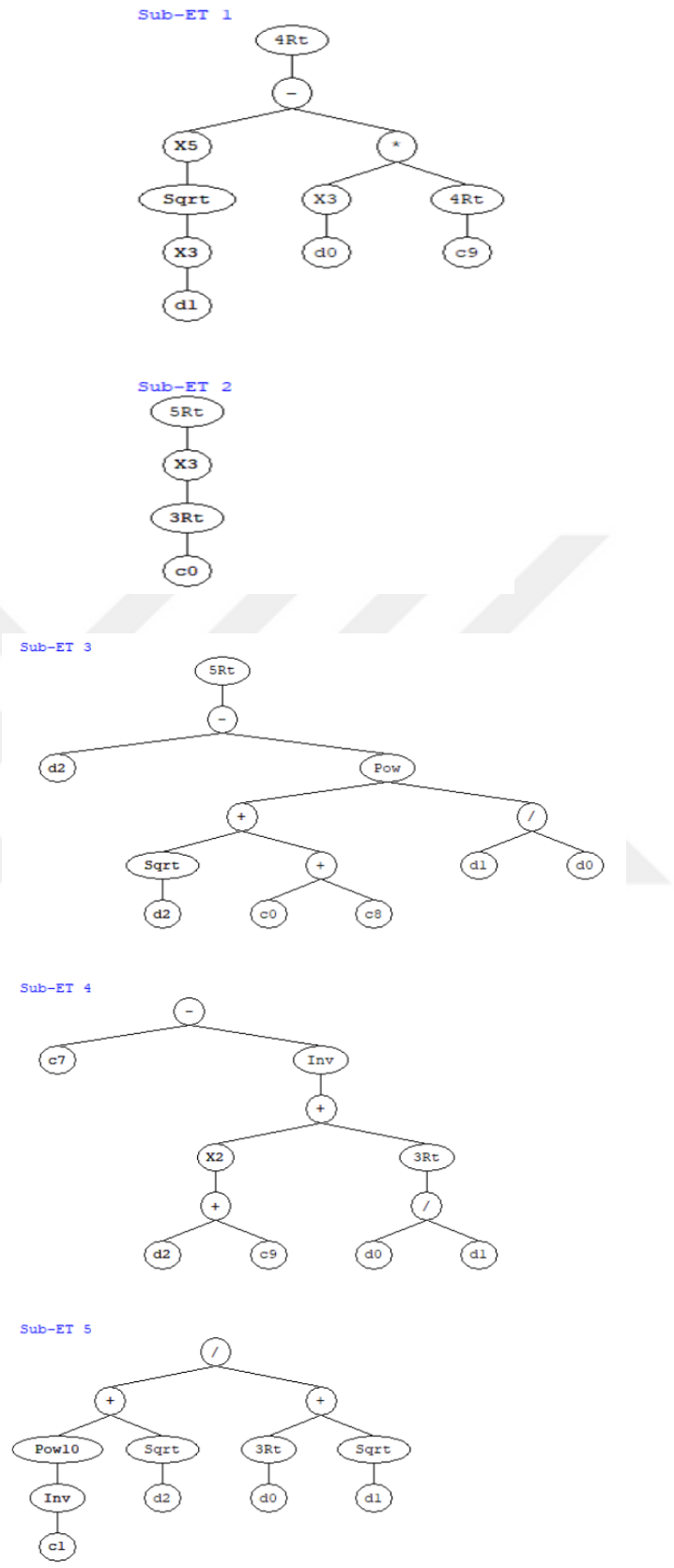
Kromozom sayısı, baş uzunluğu ve gen sayısı sırasıyla 40, 8, 5 olduğu durumda önerilen 3 girdili ve bir çıktılı en iyi GİP formülasyonu için ifade ağacı (ET) Şekil 3.28'de verilmiştir. Model' de eğitim seti için R^2 =0,9834, RMSE: 14853,31 ve test seti için R^2 =0,9795, RMSE: 15964,46 olarak elde edilmiştir. Model için elde edilen formül:

$$F = \left(\sqrt[4]{\left(\left(\sqrt{d[1]^3}^5\right) - \left((d[0]^3) * \sqrt[4]{G1C9}\right)\right)}\right) * \left(\sqrt[5]{\left(\sqrt[3]{G2C0}\right)^3}\right) * \left(\sqrt[5]{\left(d[2] - \left(\left(\left(\sqrt{d[2]}\right) + (G3C0 + G3C8)\right)^{d[1]/d[0}\right)\right)}\right) * \left(G4C7 - \left(1/\left((d[2] + G4C9)^2 + \left(\sqrt[3]{d[0]/d[1]}\right)\right)\right)\right) * \left(\left(\left(\left(1/G5C1\right)^{10}\right) + \left(\sqrt{d[0]}\right)\right) \Big/ \left(\left(\sqrt[3]{d[0]}\right) + \left(\sqrt{d[1]}\right)\right)\right) \quad (3.4)$$

Bu sabit formülasyonda; G1C9 = 6,561673; G2C0 = -11,473353; G3C0 = 4,675740; G3C8 = -5,113320; G4C7 = -6,408590; G4C9 = -5,712843; G5C1 = 0.293034' tür. GİP formulasyonundaki gerçek değişkenler d[0]=α, d[1]=E, d[2]=d olarak ifade edilmiştir. İlgili değerler yerine bırakıldıktan sonra denklemin son hali:

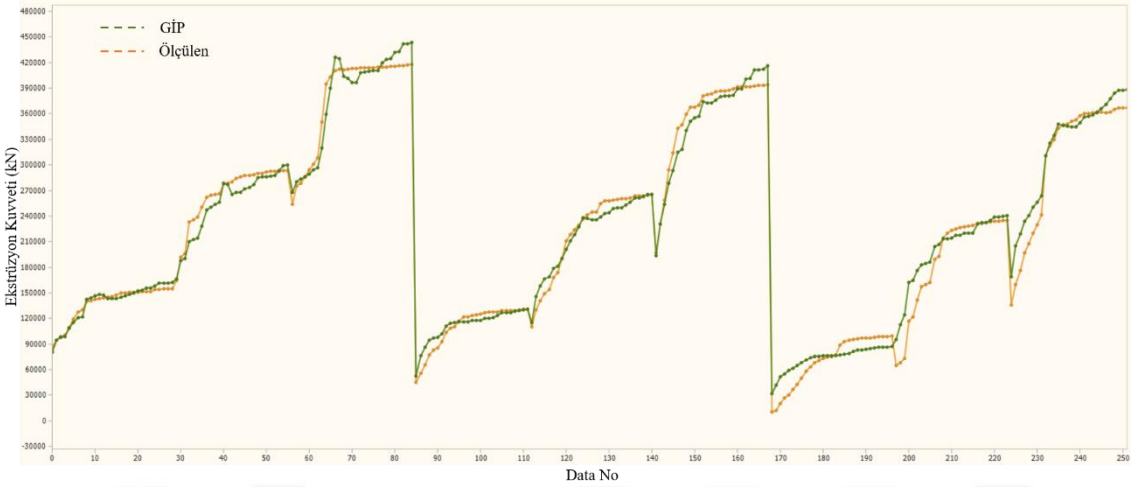
$$F = \left(\sqrt[4]{\left(\left(\sqrt{E^3}^5\right) - \left((\alpha^3) * \sqrt[4]{6,561673}\right)\right)}\right) * \left(\sqrt[5]{\left(\sqrt[3]{-11,473353}\right)^3}\right) * \left(\sqrt[5]{\left(d - \left(\left(\left(\sqrt{d}\right) + (4,675740 + (-5,113320))\right)^{E/\alpha}\right)\right)}\right) * \left((-6,408590) - \left(1/\left((d + (-5,712843))^2 + \left(\sqrt[3]{\alpha/E}\right)\right)\right)\right) * \left(\left(\left(\left(1/0.293034\right)^{10}\right) + \left(\sqrt{\alpha}\right)\right) \Big/ \left(\left(\sqrt[3]{\alpha}\right) + \left(\sqrt{E}\right)\right)\right) \quad (3.5)$$

Bu modelde ekstrüzyon kuvveti (F); kalıp giriş açısı (α), ekstrüzyon oranı (E), ve ıstampanın hareketi ile oluşan strok (d) parametrelerinden etkilenmiştir. Bu denklem, toplamda 3 bağımsız değişkeni içermektedir.



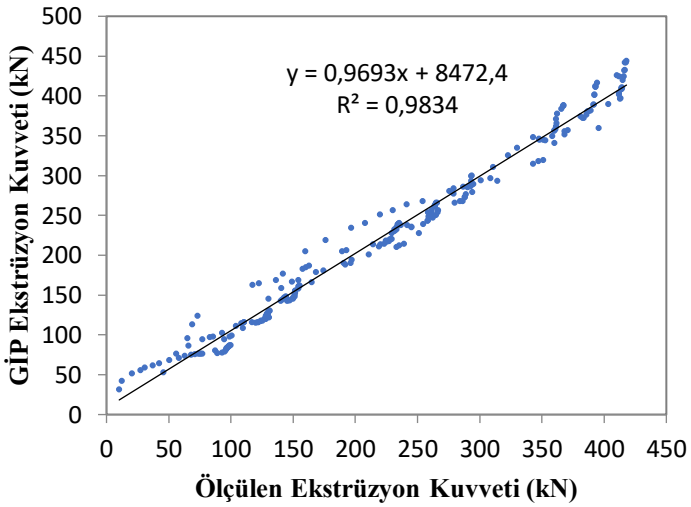
Şekil 3. 28. Oluşturulan GİP Modeli için ifade ağacı (ET)

Eğitim için;



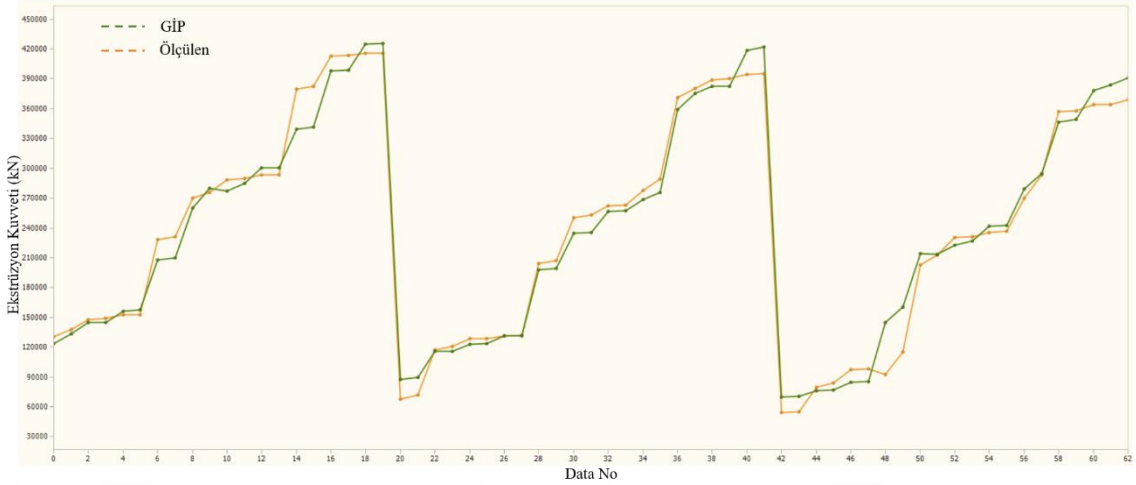
Şekil 3. 29. GİP Model'nin eğitim aşamasındaki model değerleri ile gerçek değerlerin karşılaştırılması

Şekil 3.30'da R^2: 0,9834 olarak hesaplanmıştır.



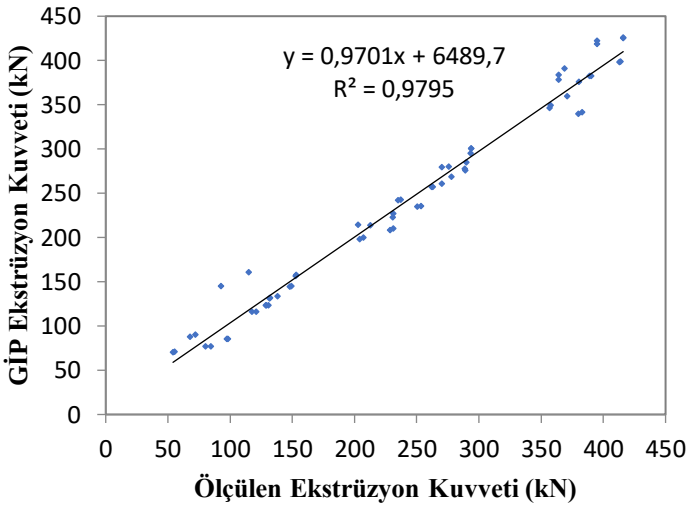
Şekil 3. 30. Eğitim seti için tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması

Test için;



Şekil 3. 31. GİP Model'nin test aşamasındaki model değerleri ile gerçek değerlerin karşılaştırılması

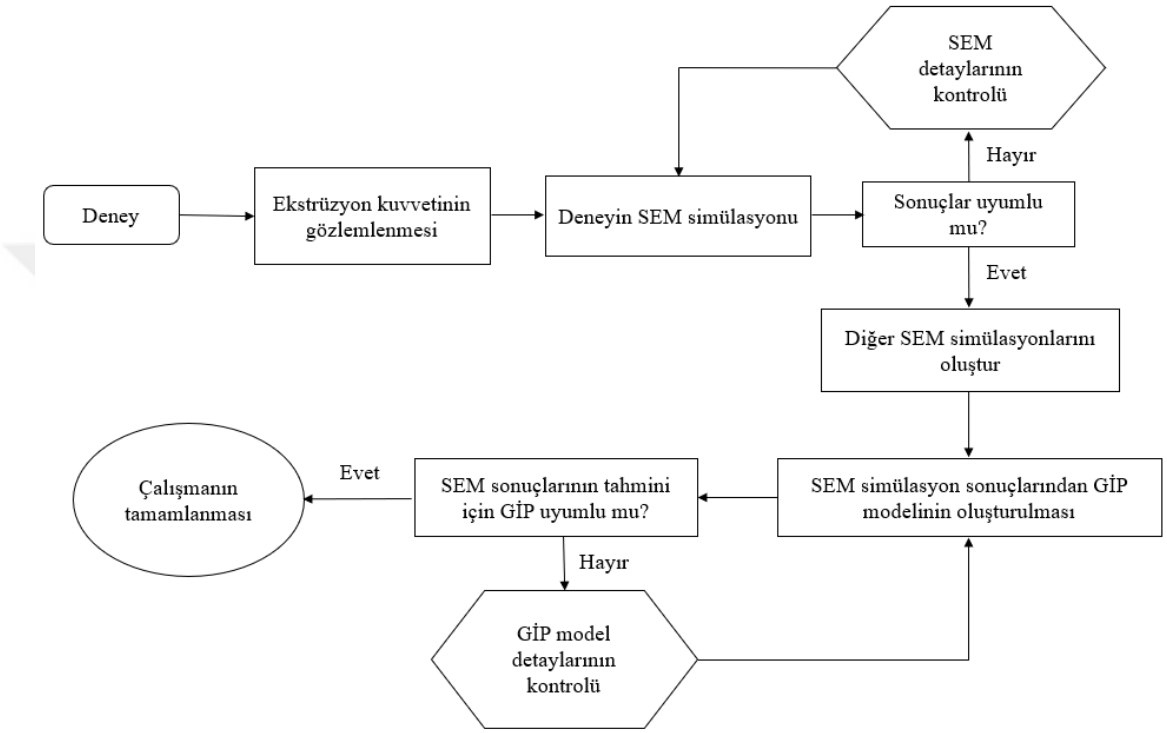
Şekil 3.32'de R^2: 0,9795 olarak hesaplanmıştı.



Şekil 3. 32. Test seti için tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

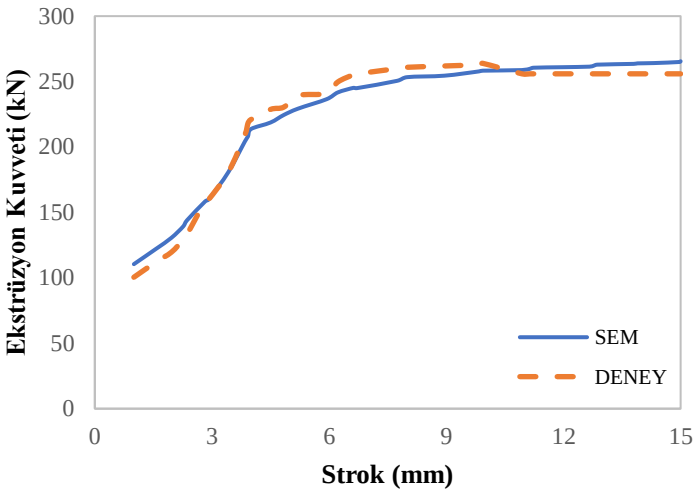
Bu çalışma ile ekstrüzyon işleminde oluşan ekstrüzyon kuvveti değişimlerinin sonlu elemanlar metodu, gen ifadesi ile programlama ile tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Kalıp geometrisinin ekstrüzyon işlemine etkisini incelemek için gerçekleştirilen adımlar Şekil 4.1.'deki akış şemasında gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. Çalışmanın akış şeması

4.1. Sonlu Elemanlar Simülasyonunun Deneysel Doğrulaması

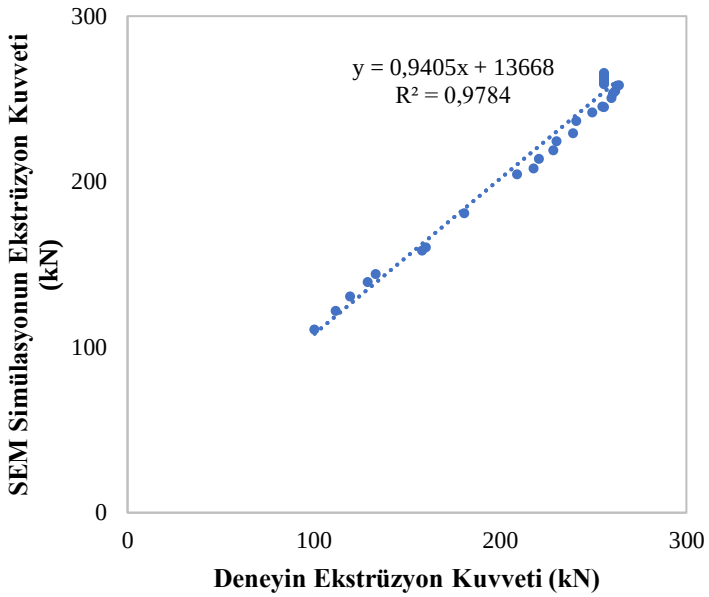
Ekstrüzyon oranı 4, giriş açısı 10^o ve kanal uzunluğu 9 mm'ye sahip kalıp ile ekstrüzyon deneyi yapıldı. Deney özelliklerini içeren SEM simülasyonu yapıldı. Deneydeki diğer koşullar, yukarıdaki deneysel çalışmada (alt başlık 3.2.) açıklanmıştır. Bu çalışmada, deneysel çalışmada elde edilen ekstrüzyon kuvveti sonuçları DEFORM-3D sonuçları ile karşılaştırmak için kullanılmıştır. Deneysel olarak ölçülen ve DEFORM-3D simülasyonlarından elde edilen ıstampa hareketi boyunca oluşan ekstrüzyon kuvvetinin karşılaştırılması Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 2. Deneysel ve SEM ile simüle edilmiş ekstrüzyon kuvveti

Şekil 4.2.'de, deney sonuçlarının, aynı koşullarda yapılan SEM simülasyon sonuçları ile iyi uyuştuğu görülmektedir.

Şekil 4.3.'te deneysel ekstrüzyon kuvveti ile simülasyon sonucunda elde edilen ekstrüzyon kuvveti arasındaki doğrusal ilişkide ~ 1'e yakın R^2 değeri elde edildiği gözlemlenmiştir. R^2'nin 1'e yakın bir değer çıkması Deney ile SEM arasında bir uyum olduğunu göstermektedir.

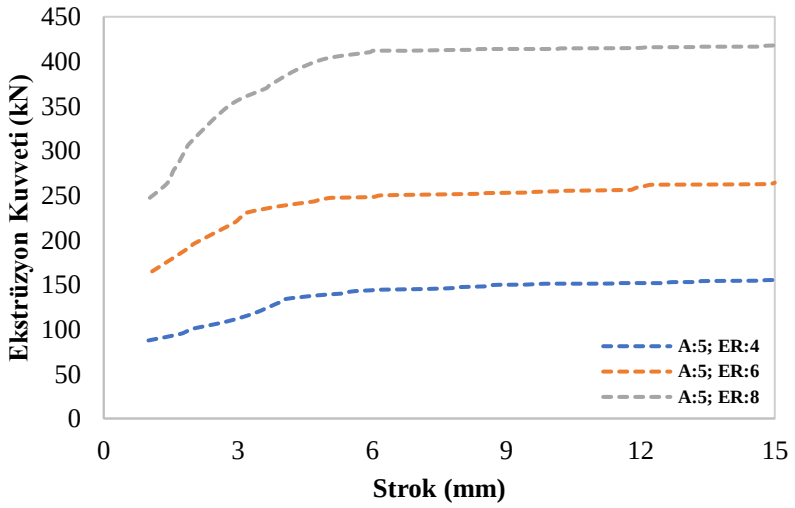


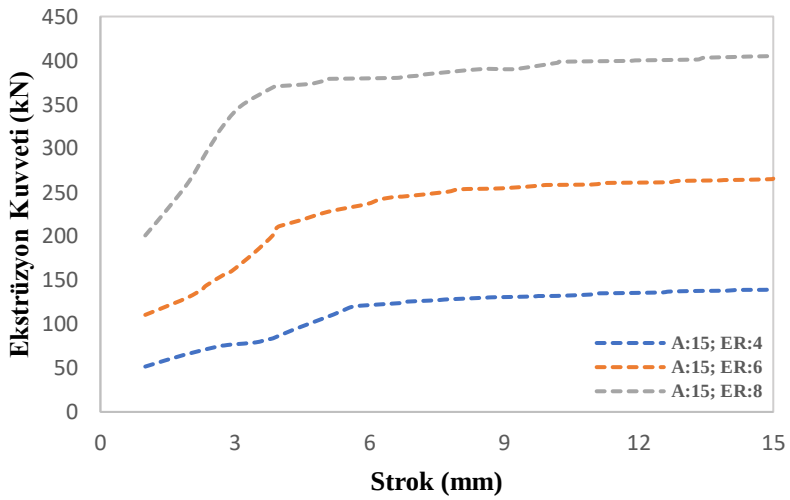
Şekil 4. 3. Deney ve SEM simülasyonunun ekstrüzyon kuvveti arasındaki karşılaştırma

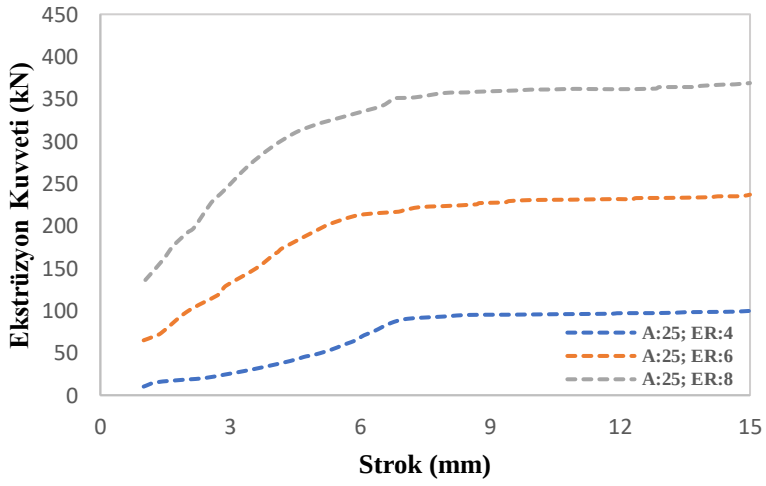
4.2. Kalıp Geometrisinin Ekstrüzyon Kuvveti Üzerindeki Etkisi

Çizelge 3.9.'da gösterildiği gibi kalıp giriş açısını (A) ve ekstrüzyon oranını (ER) değişken alarak iki girdi parametresi ile toplam 9 simülasyon gerçekleştirildi. Aynı kalıp giriş açısı 5^{o} için üç ekstrüzyon oranı 4, 6 ve 8 ile ekstrüzyon kuvveti değişimini değerlendirdiğimizde ekstrüzyon kuvvetinin ekstrüzyon oranı ile arttığını ve 8 ekstrüzyon oranı için maksimum olduğu Şekil 4.4'te görülmektedir. Aynı değerlendirme kalıp giriş açıları 15^{o} ve 25^{o} kalıplar içinde gözlenmiştir. Ekstrüzyon oranındaki artış ekstrüzyon kuvvetindeki artışı belirgin bir şekilde etkilemektedir. Çünkü daha geniş bir alandan daha dar kesitli bir alana malzeme akışını sağlayabilmemiz için daha yüksek kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır.

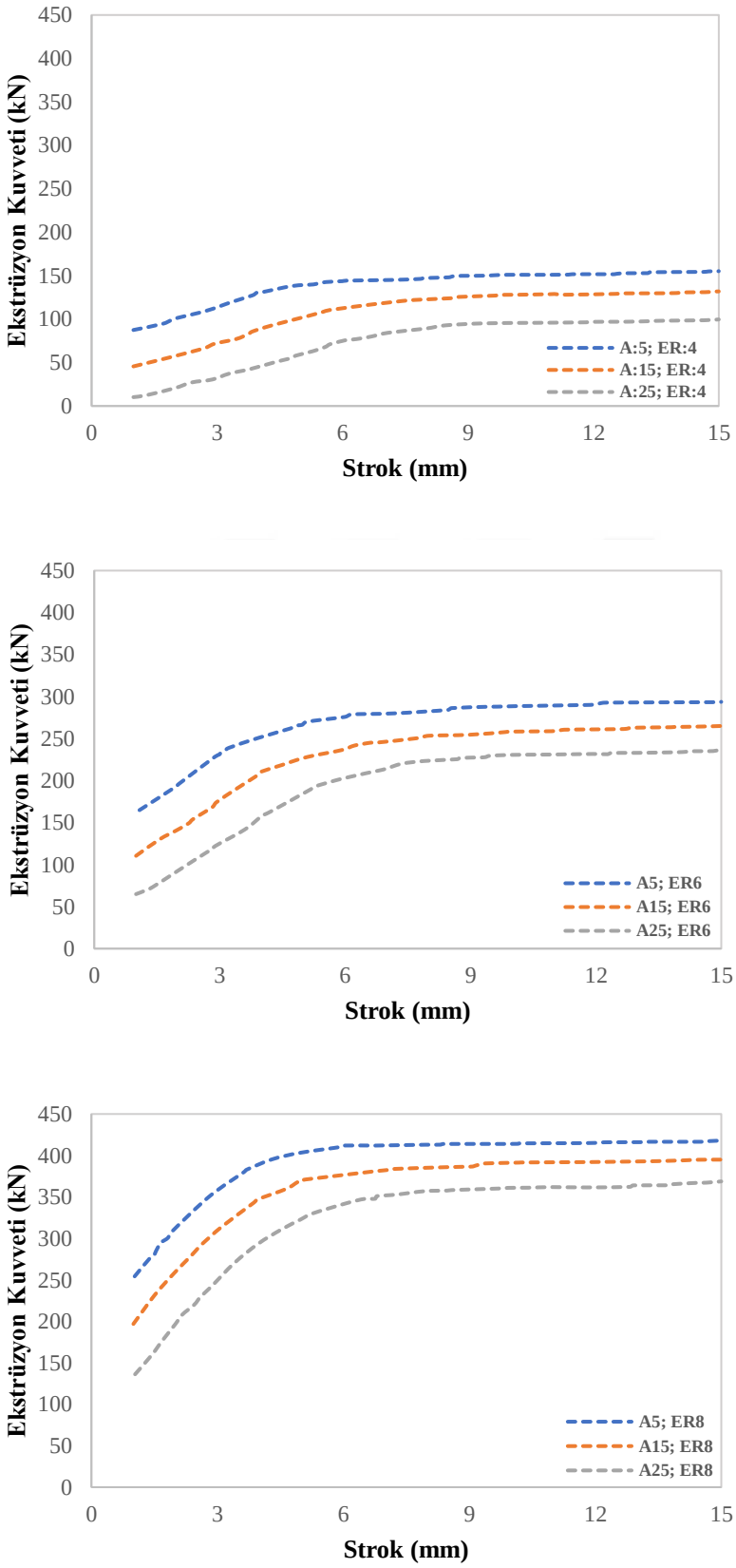
Kalıp giriş açısı ile ekstrüzyon kuvvetinin değişimi Şekil 4.5.'te gösterilmiştir. Ekstrüzyon oranını 4 olarak sabit tutularak yapılan değerlendirmede kalıp giriş açısını artmasıyla ekstrüzyon kuvvetini azalttığı gözlemlenmiştir. Diğer ekstrüzyon oranlarıyla kıyasladığımızda da aynı durum söz konusudur. Kalıp giriş açısını azaltılması ekstrüzyon kuvvetinin artmasında bariz bir etkidir çünkü kalıp girişi daha düşük iken biyeti kalıptan çıkarmak için daha yüksek kuvvet gerekmektedir.







Şekil 4. 4. Farklı ekstrüzyon oranı ile ekstrüzyon kuvvetinin değişimi



Şekil 4. 5. Farklı kalıp giriş açısı ile ekstrüzyon kuvvetinin değişimi

4.3. DEFORM-3D ve GİP'in Tahmini Ekstrüzyon Kuvveti Arasındaki Karşılaştırma

GİP Model'ine ait grafikler 3.4.4. GİP Modelinin Çalıştırılması başlığı altında verilmiştir. Bu grafikler ve veriler incelendiğinde modelin güvenilir olduğu ve iyi bir performans gösterdiği açıkça görülmektedir. Şekil 3.29. ve Şekil 3.31.'de eğitim ve test aşamasındaki model değerleri ile gerçek değerler karşılaştıran grafiklere bakıldığında değerler arasında ciddi bir sapma görülmemiştir. Şekil 3.30. ve Şekil 3.32. eğitim ve test seti için tahmin edilen değerlerin ölçülen değerlerle karşılaştırılması ait grafikleri incelendiğinde ise grafikler iyi sonuçlar verdiği okunmaktadır. Bu sonuçlar da modelin düzgün çalıştığını göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, AZ31 magnezyum alaşımı ürünler ekstrüzyon edilirken kalıp geometrisindeki önemli parametrelerden ekstrüzyon oranı ve kalıp giriş açısının ekstrüzyon kuvvetine etkisini incelemektir. Bu inceleme aşamasında yapılan deneyden ve DEFORM 3D'de yapılan simülasyon sonuçları ile DEFORM 3D'nin doğruluğu, DEFORM 3D'den alınan sonuçlarla GİP'te yapılan modelleme ile de GİP'in doğruluğu değerlendirilmiştir. Çalışmadan çıkarılan sonuçlar ve öneriler maddeler halinde özetlenmiştir;

- Yapılan deney ve DEFORM 3D simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında DEFORM 3D'de yapılan simülasyon sonuçlarının gerçeğe çok yakın değerler verdiği görülmektedir. Bu da Deney ve DEFORM 3D arasında bir uyum olduğunu göstermektedir.

- Ekstrüzyon kuvvetini en çok etkileyen ana parametrenin ekstrüzyon oranı olduğu görülmektedir. Artan ekstrüzyon oranı beklenen ekstrüzyon kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. Fakat bu normal soruna ek olarak, ıstampa hareketi maksimum ekstrüzyon kuvvetinin oluştuğu belirli bir noktaya geldiğinde aşırı bir artış gözlemlenmektedir.

- Kalıp giriş açısının da ekstrüzyon kuvvetini etkileyen bir diğer parametre olduğu gözlemlenmiştir. Kalıp giriş açısı daha düşük iken biyeti kalıptan çıkarmak için daha yüksek kuvvet gerektirmektedir.

- Kalıp geometrisinin değişiminin ekstrüzyon kuvveti üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir.

- GİP ile yapılan modelleme sonuçları ise sonlu eleman modellemesinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslandığı zaman uyum içinde olduğu tespit edilmiştir.

- Bu çalışmadan sonra yapılacak olan çalışmalarda farklı kalıp kanal uzunluğundaki kalıpların ekstrüzyon üzerine etkileri incelenebilir.

6. **KAYNAKLAR**

Alharthi, N., Bingöl, S., Ventur, A., Misiolek, W. Analysis of extrusion welding in magnesium alloys – numerical predictions and metallurgical verification. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. Procedia engineering 81, 658-663.

Altınbalık, T., Bingöl, S., Ayer, Ö. 2015. Simulation of Lateral Extrusion of Spline Form Based on the Software DEFORM-3D. Applied Mechanics and Materials 729, 149-154.

Attari, V. 2012. Enhancement of the low temperature deformation ability of magnesium alloys, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü, Ankara, iii.

Ayer, Ö. 2012. Düz Dişlilerin İmalat Yöntemi Optimizasyonu ve Analizler, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya, 104.

Ayer, Ö., Bingöl, S., Altınbalık, T. 2015. Artificial Neural Network Modeling of Injection Upsetting Load. Applied Mechanics and Materials 729, 155-160.

Ayer, Ö. 2018. A forming load analysis for extrusion process of AZ31 magnesium. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 29(2019) 741−753.

Ayer. Ö., Bingöl, S., Karakaya, İ. An extrusion simulation of an aluminum profile by porthole die. Vibroengineering PROCEDIA, Vol. 27, 2019, p. 139-144.

Başaran, D. 2010. Alüminyum Ekstrüzyonda Fireyi Azaltacak Kalıp Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 31.

Bingöl, S. 2001. Sürekli Ekstrüzyonda Kaynama Olayı ve Kaynamaya Etki Eden Faktörlerin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 5.

Bingöl, S. 2006. Çeşitli Ekstrüzyon Şartlarında Üretilen Alüminyum Alaşımı Ürünlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 28-30.

Bingöl, S., Keskin, M.S. 2007. Effect of different extrusion temperature and speed on extrusion welds***. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*** 23 (2), 39-43

Bingöl, S., Ayer, Ö., Altınbalık, T. 2014. Extrusion load prediction of gear-like profile for different die geometries using ANN and FEM with experimental verification. ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 76:983–992.

Bingöl, S. 2015. The Decreasing of the Extrusion Time with Varying Ram Speed. ***Materials and Manufacturing Processes***, 30: 1185–1189.

Bingöl, S., Bozacı, A. 2015. Experimental and Numerical Study on the Strength of Aluminum Extrusion Welding. ***Materials*** 8 (7), 4389-4399.

Bingöl,S., Misiolek, W. 2015. Prediction of the True Stress of ZE20 Magnesium Alloy at Different Temperatures and Strain Rates. ***Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*** 61 (10), 610-617.

Bingöl, S., Kılıçgedik., H.Y., Keskin, M.S., Altınbalık, T. 2015. Finite Element Analysis of Hot Extrusion Process for Different Die Angles. 56th International Conference Of Machine Design Departments, Beladice Slavakia.

Bingöl, S., Kılıçgedik., H.Y. 2015. Application of gene expression programming in hot metal forming for intelligent manufacturing. Neural Computing & Applications, London: Springer.

Bingöl, S. 2016. Estimation Of Maximum Extrusion Temperature In Direct Extrusion. International Scientific Conference, 18-19 November 2016, Gabrovo. 161-165.

Bingöl, S. 2016. Kalıp girişinin ekstrüzyon edilebilirlik üzerindeki etkisi. ***Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi***, Cilt(8): 159-167.

Bingöl, S. 2018. Gen İfadesiyle Programlama Kullanılarak Ekstrüzyon Sıcaklığının Tahmin Edilmesi. International Congress on Engineering and Arhitecture, 14-16 Kasım 2018, Alanya. 1444-1449.

Castle, A.F. 2006. Basic Principles of Extrusion. Editörler; Bauser,M. Sauer, G. Siegert, K. Extrusion, Second Edition. ASM International, 1, America.

Castle, A.F. 2006. Extruded Products. Editörler; Bauser,M. Sauer, G. Siegert, K. Extrusion, Second Edition. ASM International, 10-14, America.

Castle, A.F. 2006. Material Flow in Direct Hot Extrusion, Second Edition. ASM International, 66-69, America.

Castle, A.F. 2006. Comparison of the Indirect Hot Extrusion Process with Direct Hot Extrusion. Editörler; Bauser,M. Sauer, G. Siegert, K. Extrusion, Second Edition. ASM International, 109, America.

Castle, A.F. 2006. Extrusion of Materials with Deformation Temperatures between 300 and 600 ºC. Editörler; Bauser,M. Sauer, G. Siegert, K. Extrusion, Second Edition. ASM International, 203, America.

Ferreira, C. 2001. Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems. ***Complex Systems***, 13 (2): 87-129.

Ferreira C. 2004. Gene expression programming and the evolution of computer programs. In: L.N. de Castro & F.J. Zuben, eds. Recent developments in biologically inspired computing. New York: Idea Group Publishing, pp. 82–103.

Ferreira, C. 2006. Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence, 2nd Ed., Springer-Verlag, Germany.

Güven, A., Günal M. 2008. Genetic Programming Approach for Prediction of Local Scour Downstream of Hydraulic Structures**.** ***Journal Of Irrigation and Drainage Engineering***, 134(2): 241-249.

Hatunoğlu, B. 2010. Genetik Programlama, ODTÜ Bilgisayar Topluluğu Elektronik Dergisi.

Oral, Ş. O. 2017. Genetik İfadeli Programlama İle Taşkın Öteleme Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 25-27.

Önen, F. 2014. Prediction of scour at a side-weir with GEP, ANN and regression models. ***Arab J Sci Eng*** 39(8):6031– 6041

Önen, F., Aslan B. 2017. Applıcatıon Of Genetıc Expressıon Programmıng In Urban Drınkıng Water. ***Middle East Journal of Technic***, Vol(2): 143-155.

Saha, P.K. 2000. Aluminium Ekstrüzyon Technology, ASM International, The Material International Society, America.

Sarıdemir, M. 2016. Metakaolin ve silis dumanı içeren betonların basınç dayanımının gen ifadeli programlama ile tahmin edilmesi. ***Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi***. 23(3): 238-244.

Sönmez, H. 1989. Metal Ekstrüzyonu. Eğitim Yayınları A.Ş., İstanbul.

Yıldız, B. 2017. Derin Çekme İşleminde Kalıp Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 21-25.

Zasadzinski, J. 1996. Convex Dies for Aluminum Extrusion, Procedings of the 6th International Aluminum Extrusion Technology Seminar Papers, Chicago.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
ADI VE SOYADI	Tuğçe Cemre PAÇAL
ÖĞRENCİ NO	17818201
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2020-2021
YARIYIL	☒ Güz ☐ Bahar
ANABİLİM DALI	Makine mühendisliği Anabilim Dalı
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	Kalıp Geometrisinin Ekstrüzyon İşlemi Üzerine Etkisi

İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ	
RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	78
BENZERLİK ORANI	% 11
RAPORLAMA TARİHİ	01/04/ 2021

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 78 sayfalık kısmına ilişkin, 01/04/2021 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 11 'tir.

Uygulanan filtrelemeler:

☐Kabul/Onay sayfaları hariç,
☒Kaynakça hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

(Öğrencinin Adı Soyadı) Tuğçe Cemre PAÇAL
01.04.2021

Doç. Dr. Sedat BİNGÖL **Tez Danışmanı** 01.04.2021	Prof. Dr. Vedat ORUÇ **Anabilim Dalı Başkanı** 01.04.2021