T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSTRÜZYON İŞLEMİNDE PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ VE TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

Emrah SÜNKÜR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR

Şubat 2016

T.C.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FENBİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Emrah SÜNKÜR tarafından yapılan "Ekstrüzyon İşleminde Proses Parametrelerinin Etkisinin Sonlu Elemanlar İle Analizi Ve Taguchi Yöntemi İle Optimizasyonu" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyesinin

Ünvanı Adı Soyadı

Başkan: Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Sedat BİNGÖL (DANIŞMAN)

Üye: Yrd. Doç. Dr. Haluk KEJANLI

Tez Savunma Sınav Tarihi: 01/02/2016

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

01/02/2016

Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM

ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu yüksek lisans çalışmasında, gösterdiği anlayışla bana her türlü desteği sağlayan ve beni başarıya yönlendiren saygı değer tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Sedat BİNGÖL'e sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Bugünlere gelmemi sağlayan; maddi, manevi her türlü desteği karşılıksız veren, sevgilerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca tez hazırlama süreci boyunca tüm bilgi ve becerilerini benimle paylaşan, yardımlarda bulunan değerli makine mühendisi arkadaşım Yankı KILIÇGEDİK' e teşekkürü borç bilirim.

Hazırlamış olduğum bu yüksek lisans tezi, "Mühendislik.15.002" proje kodu ile Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (DÜBAP) tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR..... I

İÇİNDEKİLER..... II

ÖZET..... IV

ABSTRACT..... V

ÇİZELGE LİSTESİ..... VI

ŞEKİL LİSTESİ..... VII

KISALTMA VE SİMGELER..... IX

1. GİRİŞ..... 1

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR..... 3

3. MATERYAL ve METOT..... 7

3.1. Ekstrüzyon İşlemi 7

3.1.1. Direkt Ekstrüzyon 7

3.1.2. İndirekt Ekstrüzyon 8

3.1.3. Direkt ve İndirekt Ekstrüzyon Arasındaki Farklar 9

3.1.4. Darbeli Ekstrüzyon Yöntemi..... 10

3.1.5. Hidrostatik Ekstrüzyon Yöntemi..... 11

3.1.5.1. Hidrostatik Ekstrüzyon Yönteminin Avantajları..... 11

3.1.5.2. Hidrostatik Ekstrüzyon Yönteminin Dezavantajları..... 12

3.2. Ekstrüzyon Prosesini Etkileyen Faktörler 12

3.2.1. Ekstrüzyon Türü..... 13

3.2.2. Ekstrüzyon Oranı..... 13

3.2.3. Çalışma Sıcaklığı..... 13

3.2.4. Ekstrüzyon Hızı..... 13

3.2.5. Malzemenin Akma Gerilmesi..... 14

3.3. Direkt ve İndirekt Ekstrüzyonda Ekstrüzyon Kuvvetinin Hesaplanması..... 14

3.4. Alüminyum Ekstrüzyonu..... 16

3.5. Ekstrüzyon İşleminde Malzeme Akışı..... 16

3.6. Ekstrüzyon Hataları 18
3.6.1. Merkez Ayrılması (Ok Ucu) 18
3.6.2. Boru Kusuru 19
3.6.3. Yüzey Çatlaması 19
3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi 19
3.7.1. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları 20
3.7.2. Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları 21
3.8. Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulama Alanları 21
3.8.1. Denge Problemleri 21
3.8.2. Özdeğer Problemleri 22
3.8.3. Yayılma Problemleri 22
3.9. Ekstrüzyon İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi 22
3.10. Sonlu Elemanlar Programının Uygunluğu 24
3.11. Taguchi Metodu 25
3.11.1. Taguchi'nin Kalite Kontrol Sistemi 26
3.11.2. Sinyal/ Gürültü (S/N) Oranı 28
3.11.3. Varyans Analizi 29
3.12. Taguchi Deney Tasarımı İle Modelleme 30
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 33
4.1. Literatür Karşılaştırması 33
4.2. Ekstrüzyon Sıcaklığı Bulguları 33
4.3. Ekstrüzyon Kuvveti Bulguları 45
4.4. Taguchi Bulguları 51
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 53
6. KAYNAKLAR 55
ÖZGEÇMİŞ 59

ÖZET

EKSTRÜZYON İŞLEMİNDE PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN SONLU ELEMANLAR İLE ANALİZİ VE TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE OPTİMİZASYONU

Yüksek Lisans Tezi

Emrah SÜNKÜR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2016

Ekstrüzyon yöntemi, çeşitli geometrilere sahip profillerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir plastik şekil verme yöntemidir. Ekstrüzyon işleminin uygulanması sırasında ürün kalitesine birçok parametre etki etmektedir. Bu parametrelerin etkisinin incelenmesi ve optimizasyonu zaman, işgücü ve enerji maliyetlerini azaltabilmektedir. Yapılan bu çalışmanın amacı da ekstrüzyon işlemindeki üretim parametrelerinin ekstrüzyon kuvveti ve profil sıcaklığı üzerindeki etkisinin incelenmesi ve ekstrüzyon prosesinin optimizasyonudur. Bu kapsamda ilk aşamada, farklı başlangıç biyet, kalıp ve kovan sıcaklıkları ve zımba hızları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile simülasyonlar yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilecek simülasyon sayısı Taguchi yöntemi ile belirlenmiş böylelikle 81 adet olan simülasyon sayısı 9'a indirilmiştir. Simülasyonlar sonlu elemanlar programı Deform 2D programında gerçekleştirilmeden önce sonlu elemanlar programının tutarlılığı literatürden alınan bir çalışma ile mukayese edilmiştir. Mukayese sonucunda bu çalışmadaki simülasyon sonuçlarının kabul edilebilir olduğu görüldükten sonra DEFORM 2D programında gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen veriler ANOVA ile incelenerek her bir proses parametresinin maksimum ekstrüzyon kuvveti ve maksimum sıcaklığa ne kadar etki ettiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Ekstrüzyon, Optimizasyon, Sonlu Elemanlar Analizi, Taguchi Metodu

ABSTRACT

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF EXTRUSION PROCESS PARAMETERS WITH FINITE ELEMENT ANALYSIS AND TAGUCHI METHOD

M. Sc. Thesis

Emrah SÜNKÜR

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINERING

INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

UNIVERSITY OF DICLE

2016

Extrusion method is commonly used for metal forming applications to produce profiles with different shapes. Many parameters effect to the product quality in extrusion process. Investigation and optimization of these parameters can be reduced the producing time, labor and energy cost. The aim of this study is to investigate the effect of process parameters on extrusion load and profile exit temperature for extrusion method. For this purpose, the finite element simulations were performed at the different initial temperatures of billet, die and container, and speed of different ram. The number of finite element simulation were arranged by Taguchi method, so that 9 simulations are performed instead of 81. Before performing all finite element simulations using DEFORM 2D, one of them was performed and compared with the results in literature. The results showed good agreement with the results in literature. After that all 9 simulations were performed and an ANOVA was applied to the results. With this approach, effect of each parameters was determined on maximum extrusion load and temperature.

Key Words: Extrusion, Optimization, Finite Element Analysis, Taguchi

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1.	Malzeme akısını etkileyen faktörler	17
Çizelge 3.2.	Ekstrüzyon parametreleri	23
Çizelge 3.3.	Literatürden alınan veriler	24
Çizelge 3.4.	Varyans analizi hesaplama formülleri	29
Çizelge 3.5.	Taguchi L9 tasarımı	30
Çizelge 3.6.	Taguchi L9 tasarımında faktör numaralarının sayısal değer karşılığı	31
Çizelge 4.1.	Literatür ve simülasyon sonuçları	33
Çizelge 4.2.	Simülasyonlar sonucu elde edilen max. kuvvet ve ekstrüzyon sıcaklığı	45
Çizelge 4.3.	Minimum ekstrüzyon kuvvet için elde edilen S/N oranları	51
Çizelge 4.4.	Minimum profil sıcaklığı için elde edilen S/N oranları	52

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 3.1.	Direk ekstrüzyon yönteminin gösterimi	8
Şekil 3.2	İndirek ekstrüzyon yönteminin gösterimi	8
Şekil 3.3.	(a) Direk ve indirekt ekstrüzyonda oluşan ekstrüzyon kuvvetlerinin gösterimi (b) enerji bölgelerinin ayrımı	9
Şekil 3.4.	Darbeli ekstrüzyon yöntemlerinin şematik gösterimi a) direkt darbeli ekstrüzyon b)indirekt darbeli ekstrüzyon	10
Şekil 3.5.	Hidrostatik ekstrüzyon donanımı	12
Şekil 3.6.	Ekstrüzyonda gözlemlenen dört değişik akış tipinin şematik görünüşü	17
Şekil 3.7	Ekstrüzyon işlemlerinde oluşan hatalar a) ok ucu, b) boru kusuru, c) yüzey çatlaması	18
Şekil 3.8.	Ekstrüzyon prosesinin sonlu elemanlar modeli	23
Şekil 3.9.	Taguchi'nin kalite sistemi	27
Şekil 4.1.	1 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	34
Şekil 4.2.	2 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	34
Şekil 4.3.	3 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	35
Şekil 4.4.	4 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	35
Şekil 4.5.	5 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	36
Şekil 4.6.	6 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	36
Şekil 4.7.	7 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	37
Şekil 4.8.	8 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	37
Şekil 4.9.	9 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları	38
Şekil 4.10.	1 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği	39
Şekil 4.11.	2 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği	40
Şekil 4.12.	3 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği	40
Şekil 4.13.	4 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği	41
Şekil 4.14.	5 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği	41
Şekil 4.15.	6 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği	42

Şekil 4.16. 7 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği 42
Şekil 4.17. 8 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği 43
Şekil 4.18. 9 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği 43
Şekil 4.19. 1 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği 46
Şekil 4.20. 2 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği 46
Şekil 4.21. 3 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği 47
Şekil 4.22. 4 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği 47
Şekil 4.23. 5 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği 48
Şekil 4.24. 6 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği 48
Şekil 4.25. 7 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği 49
Şekil 4.26. 8 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği 49
Şekil 4.27. 9 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği 50

KISALTMA ve SİMGE LİSTESİ

FEM	:	Finite Element Method
FEA	:	Finite Element Analysis
S	:	Sinyal
N	:	Gürültü
S/N	:	Signal / Noise
ANOVA	:	Analysis Of Variance

1. GİRİŞ

Günümüz imalat sektöründe metal ve metal olmayan birçok malzeme, elde edilmesi istenen ürüne göre birçok farklı yöntem ile üretilmektedir. Ekstrüzyon ise gerek farklı malzemeleri işleyebilmesi gerekse binlerce farklı ürün elde edebilirliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yüzyılı aşkın süredir kullanılan ekstrüzyon yöntemi, zamanla kullanım alanlarını genişleterek önemli imalat yöntemlerinden biri haline gelmiştir. Ekstrüzyon yöntemini kullanarak istenilen boyutlarda, yüzey kalitelerinde ve geometrik şekillerde ürün elde edilebilinmektedir. Ekstrüzyonun kullanımı, rekabetin yoğun olduğu mimarlık, otomotiv, küçük makine parçaları, yapı bileşenleri ve havacılık alanlarında talebin artmasından dolayı yaygınlaşmıştır. Bütün bu avantajlarından dolayı hem akademik hem de endüstriyel alanlarda devam eden çalışmalarla ekstrüzyon teknolojisi hakkındaki bilgiler geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Ekstrüzyon yöntemi üzerine yapılan çalışmalar ekstrüzyon kuvvetlerinin optimizasyonu, malzeme akışının iyileştirilmesi, sistemin ekonomikleştirilmesi, proses parametrelerinin optimizasyonu, ürün kalitesinin arttırılması, kalıp ve ekipman optimizasyonu üzerinde yoğunlaşmıştır. Önemli bir imalat yöntemi olan ekstrüzyon işlemi deneysel çalışmalarla sürekli geliştirilmeye ve yenilenmeye çalışılmıştır (Saha 2000).

Son yıllardaki teknolojik gelişmelerin bilgisayar teknolojisini arttırmasıyla beraber araştırma-geliştirme ve üretim analiz işlemlerinde bilgisayar kullanımını arttırmıştır. Bilgisayarların sahip olduğu hesap yeteneğinin gelişimine paralel olarak geliştirilen sonlu elemanlar analizleri, mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmaya başlamıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi, yaklaşık 30 yıldır metal şekillendirme işlemlerinin analizinde kullanılan yararlı bir araçtır. 1940'ların başında geliştirilen Ritz metodunun, ucuz ve verimli bilgisayar teknolojisinin geliştirilmesiyle daha da geliştirilerek sonlu elemanlar yöntemi halini almasıyla söz konusu olan bu gelişme, metal şekillendirme analizine yeni bir yaklaşım getirmiştir. Belirli bir metal şekillendirme yöntemi için sonlu elemanlar metodu ile modelleme yapıldığı zaman kuvvet gereksinimi, hız, gerinim oranı, gerinim ve gerilme alanları elde edilebilir. Sonlu elemanlar metodu ile modelleme yapmanın bu avantajının ekstrüzyon işlemlerinde kullanılması ile birçok yeni ürünün üretimi kolaylaşmış, maliyetler de azalmıştır (Valberg 2010).

Rekabetin yüksek olduğu piyasalarda, isletmelerin varlıklarını devam ettirebilmeleri ve piyasalardaki mevcut durumunu güçlendirebilmeleri için ürün kalite arttırma çalışmalarına

ağırlık vermeleri gerekmektedir. Kalite arttırma ve geliştirme, birçok işletmenin rekabet edebilmesi ve ayakta durabilmesi için en temel görevler haline gelmiştir. Bu amaçla, imalat araçlarında da gelişmeler olmuş ve yeni metotlar ortaya konulmuş, ayrıca yıllarca teoride kalan bazı imalat yöntemleri de uygulamaya geçirilebilmiştir. Bu uygulamalardan biri de, özellikle sanayileşmiş ülkelerde kullanılmakta olan deney tasarım tekniklerdir. Tasarım için teklif edilen istatistiksel deneyler, ürün parametrelerinin ve parametre sayılarının artması sonucu, ürün maliyetinin yükselmesine ve hızlı bir şekilde neticeye ulaşılamadığından dolayı da uygulanabilirliğini tamamen yitirmektedir. Ancak Genichi Taguchi, uzun yıllar boyunca yaptığı araştırmalar sonucunda, çok az deneme ile en iyi sonuçları veren ortogonal dizileri geliştirmiştir.

Ortogonal diziler, faktör seviyelerini, birer birer değiştirmek yerine, aynı anda değiştirmeyi konu almaktadır. Böylece Taguchi yöntemi, istatistik ve diğer alanlarda olduğu gibi üretim sektöründe de uygulama alanı bulmuştur. Taguchi, deneysel tasarıma yönünden önemli bir yenilik getirmemesine rağmen, endüstriyel uygulamalarda yeni fikirler ortaya atarak imalat sektörünce kabul görmesinde büyük katkılarda bulunmuştur (Eşme ve ark. 2006)

Taguchi metodunun esas amacı; kontrol edilebilen parametrelerin belirli seviyelerde zaman ve maliyet bakımından etkin, kontrol edilemeyen parametrelere ise duyarsız ürün ve prosesler tasarlamaktır. Taguchi deney tasarım tekniği; ürünlerin daha kaliteli olmasıyla birlikte, kalite geliştirme çalışmalarında daha az deneme ile daha iyi sonuç elde etme imkânını vermektedir (Ross 1996).

Yapılan bu yüksek lisans çalışmasında öncelikle ekstrüzyon işleminde oluşan sıcaklık ve ekstrüzyon kuvvetlerinin optimizasyonu hedeflenmiştir. Bu kapsamda belirlenen parametreler DEFORM 2D sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiştir. Analiz sayısının çokluğundan dolayı Taguchi deney tasarım metodu uygulanmış ve böylelikle simülasyon sayısı 81 den 9 a indirilmiştir. Simülasyonlar sonucu elde edilen sonuçlar ANOVA (varyans analizi) yöntemiyle incelenmiş ve incelenen 4 ekstrüzyon parametresinin (zımba hızı, başlangıç biyet sıcaklığı, kovan sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı) maksimum ekstrüzyon kuvveti ve maksimum profil sıcaklığı üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Son yıllarda sonlu elemanlar yöntemi mühendislikten sağlık bilimine, inşaat sektöründen mimariye birçok alandaki çalışmalarda kullanılmıştır. Bu kapsamda sonlu elemanlar yönteminin en çok yer aldığı alanlardan biri de imalat yöntemleridir.

Birçok bilim insanı ve araştırmacı tarafından çalışma konusu olarak ele alınan ekstrüzyon yöntemi, sonlu elemanlar yönteminin geliştirilmesi ve birçok sonlu elemanlar yazılımının ortaya çıkması ile popüler bir çalışma konusu haline gelmiştir. Ekstrüzyon işlemi üzerine yapılan bazı araştırmalar sistemin geliştirilmesi, ürün tasarımı analizi üzerine olduğu gibi ekstrüzyon parametrelerinin optimizasyonu üzerine de birçok araştırmalar yapılmıştır.

Proses parametrelerinin etkilerinin tespit edilmesi, uygulanan kuvvetleri azaltma açısından önem taşımaktadır. Önemli bir proses parametresi olan zımba hızının etkisi, literatürde bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Chanda ve ark. (2001), zımba hızının ürünün çıkış sıcaklığına ve kalitesine etkilerini araştırmıştır. Çalışma sonucunda yüksek zımba hızında ürün sıcaklığının yükseldiği ve bunun da üretim kalitesini arttırdığı görülmüştür. Düşük zımba hızında ise ekstrüzyon kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Ekstrüzyon optimizasyonu üzerine yapılan çalışmaların bazılarında sıcaklık kontrolü ile proses optimizasyonu hedeflenmiştir. Bingöl ve Sönmez (2006), yaptıkları çalışmada bildirdiklerine göre Optalex izotermal ekstrüzyon ile nitrojen ile sıcaklık değişimi kontrol altına alınarak sistem verimliliği 10% ile 20% arasında iyileştirilebilmektedir. Bununla birlikte, malzeme kayıpları ise 2% ile 5% arasında azaltılabilmektedir.

Bazı araştırmalar sürekli ekstrüzyonlarda alın kaynağı hakkındadır. Bu çalışmaların birinde Sönmez ve Bingöl (2001), yaptıkları çalışmada alın kaynak bölgesinde zayıf kayma ve gevrek kırılmaların oluştuğunu deneysel olarak göstermişlerdir. Aynı araştırmacılar bir başka çalışmalarında Sönmez ve Bingöl (2002), alüminyum alaşımlarında içi boş profillerde alın kaynağını araştırmış, yaptıkları çalışmada en iyi tane yapısının ekstrüzyon işleminde oluşan yeniden kristalleşmenin tüm malzemede gerçekleşmesiyle mümkün olduğunu belirtmiştir.

Ekstrüzyonda dikiş kaynağı üzerine yapılan bir çalışmada Bingöl ve Keskin (2007), alüminyum ekstrüzyonunda alın kaynağının kalitesini araştırmış, yaptıkları deneysel çalışmalarda alın kaynağının mikro yapısını incelemişlerdir. Dikiş kaynağının oluştuğu bölgelerde sertlik değerinin ana malzemenin sertlik değerinden düşük olduğunu, buna karşın yeterli bir birleşme ile elde edilen dikiş kaynak bölgelerindeki sertlik değerlerinin yeterli olduğunu deneysel olarak göstermiştirler.

Li ve ark. (2003), 1mm/s ile 8 mm/s arasındaki zımba hızlarının çıkış sıcaklığına

etkisini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiş, logaritmik zımba hızının maksimum çıkış sıcaklığı ile doğrusal bir bağı olduğunu belirlemişlerdir. Ekstrüzyon işleminde en önemli hususlardan biri olan kalıp geometrisinin incelendiği çalışmalardan birinde, Bakhshi ve ark. (2006), üst sınır ve levha metotlarını kombine ederek ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kalıp geometrisinin optimizasyonunu üzerine çalışmış, deformasyon sırasında optimum kıvrımlı kalıpta oluşan ekstrüzyon kuvvetlerinin optimum konik kalıptakine göre daha az olduğu sonucuna varmışlardır. Mayavarama ve ark. (2013) ise sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kalıp kanal uzunluğunun optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Atmaca (1996), yaptığı çalışmada endüstride önemli bir yer tutan ekstrüzyon işlemlerinin, genel özellikleri, malzemelerde meydana gelen deformasyonlar, alüminyum ve alaşımlarının ekstrüze kabiliyetleri, alüminyum ekstrüzyon kalıplarının konstrüktif yapıları ve ekstrüzyon presinin hidrolik devre ekipmanları ile bunların boyutlandırılmalarına yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, alüminyum ve alaşımlarına yönelik ekstrüzyon işlemlerinde en iyi verimi alabilmek için göz önünde tutulması gerekli noktalar ortaya konulmuştur. Bununla birlikte, alüminyum ve alaşımlarının metalürjik yapıları ve ekstrüze edilebilirliklerinin incelenmesi sonucunda sıcak ekstrüzyon ile karmaşık kesitli parçaların rahatlıkla üretilebileceği gösterilmiştir.

Tiernan ve ark. (2005), ise yüksek oranlı alüminyum alaşımlarının (AA1100) soğuk ekstrüzyonunun, Sonlu Eleman Analizi ve deneysel uygulamalarla incelenmesi üzerinde çalışmışlardır. Ekstrüzyon işlemi boyunca kalıp açısı, açının azaltılma oranı ve kalıp alanının ekstrüzyon şiddeti üzerinde etkisini tespit etmişlerdir.

Sonlu elemanlar programlarının kullanılarak gerçekleştirilen bazı ekstrüzyon çalışmalarında, sıcak ekstrüzyon işleminde farklı kalıp açılarının etkilerini incelemiştir. Bingöl ve ark. (2015), yaptıkları bu çalışmada 15 ^{o}C, 30 ^{o}C, 60 ^{o}C, 90 ^{o}C, 120 ^{o}C ve 150 ^{o}C kalıp açılarının ekstrüzyon kuvvetlerine etkilerini araştırmış ve 150^{0}C kalıp açısının en düşük ekstrüzyon kuvvetini ve sıcaklığını meydana getirdiğini gözlemlemişlerdir.

Byon (2003), soğuk ve sıcak ekstrüzyonda uygun kalıp tasarımı için yaptığı çalışmada, şekillendirme işlemini karakterize eden iş parçasının ve ürünün şekli, işlem basamakları, kalıplarının ve iş parçalarının şekilleri, sürtünme, sıcaklık, şekillendirme hızı, iş parçasının ve kalıpların malzeme özellikleri gibi çeşitli parametrelerin kontrol değişkeni olarak almış ve bu yönde tasarım yapmıştır. Sıcak ve soğuk şekillendirmede uygun kalıp tasarımı için Euler sonlu elemanlar metodu tabanlı bir yaklaşım kullanan Byon işlem hızı yüksek işlemcili bilgisayarlar kullanılarak tasarımcının deneyimine ve sezgisine bağlı kalmaksızın efektif bir tasarım yapmayı amaçlamıştır.

Öztop (2007), Taguchi deney tasarımı yöntemi kullanılarak alüminyum ekstrüzyon prosesinin parametreleri olan ekstrüzyon hızı, biyet sıcaklığı, ekstrüzyon oranı ve kalıp kılavuz mesafesinin, kalıp ömründe belirleyici olan profil sıcaklığı, zımba kuvveti ve kalıp yüzey basıncı üzerindeki etki dereceleri ve birbirleri ile etkileşimleri irdelemiştir. L8 ortogonal dizimi karmaşık-düzey esasına göre yeniden düzenlenerek ekstrüzyon hızının 3, kılavuz mesafesi, biyet sıcaklığı ve ekstrüzyon oranının 2 düzeyi için bir deney planı oluşturulmuştur. MINITAB Release 13 programı ile yapılan analizlerde profil sıcaklığı için en etkili parametrenin ekstrüzyon hızı, zımba kuvveti ve kalıp yüzey basıncı için en etkili parametrenin ise kılavuz mesafesi olduğu sonucuna varmıştır.

Taguchi yöntemi diğer birçok araştırma konularında kullanılmıştır. Kartal (2015), yaptığı çalışmada, alaşımsız çeliklerin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınmasını Taguchi yöntemi ile incelemiş, böylelikle deney sayısını 27den 9 a düşürerek optimizasyon çalışması yapmıştır. Ayrıca, Chen ve Huang (2007), DEFORM 3D sonlu elemanlar programını ve Taguchi metodunu kullanarak pirinç alaşımlarının çekme işlemi üzerine çalışmışlardır. Nalbant ve ark. (2006), tornalama işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini Taguchi metodunu kullanarak optimize etmişlerdir.

Shojaei ve Fereydoon (2009), ekstrüzyon işleminde poliamid ve fiber glassın mekanik ve morfolojik özelliklerini Taguchi yöntemiyle incelemiştir. Savaşkan ve ark. (2004), matkap uçlarının performans optimizasyonunda Taguchi yöntemini kullanmış ve 27 olan deney sayısını 9 deney sayısı kullanmışlardır.

Yapılan literatür taramasında görüldüğü üzere ekstrüzyon optimizasyonu üzerine birçok araştırma yapılmış, yapılan bu araştırmalarda deneysel çalışmaların yanı sıra sonlu elemanlar programları ve Taguchi metodu kullanılmıştır. Ekstrüzyon prosesi, karmaşık bir üretim yöntemi olması sebebiyle yapılan optimizasyon çalışmaları farklı alanlara yönelmiştir. Ağırlıkla kalıp tasarımı ve sıcaklık optimizasyonu üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu yüksek lisans tezinde, 4 farklı ekstrüzyon parametresi (zımba hızı, başlangıç biyet sıcaklığı, kovan sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı) bir arada incelenerek bunların ekstrüzyon işleminde oluşan maksimum sıcaklık ve maksimum kuvvet üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Ekstrüzyon İşlemi

Ekstrüzyon işlemi, profil üretiminde kullanılan bir yöntem olup bu yöntemde plastik şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olan, biyet adı verilen iş parçasının, sertleştirilmiş çelik kovan içerisine konularak zımba tarafından uygulanan kuvvet ile kalıp boşluğundan geçirilerek ürün elde edildiği bir üretim yöntemidir. Yüzyıldan fazla bir zamandır uygulanan ve kullanımı gittikçe artan bu yöntemde kullanılan biyetler döküm yöntemiyle elde edilen yarı mamullerdir. Biyetin sadece sıkıştırma kuvvetlerine maruz kalmasından dolayı döküm ile elde edilen biyetler ekstrüzyona daha uygundur (Saha 2000).

Ekstrüzyon işlemi prensipte diş macununun sıkılan tüpten çıkarken tüpün ağzının şeklini almasına benzemektedir. Bu işlemle birebir örtüşen ekstrüzyon metodunda biyetler bir tarafında zımbanın, diğer tarafta kalıbın bulunduğu kovan içerisine yerleştirilir. Biyet, zımba tarafından hidrolik veya mekanik bir pres vasıtasıyla kalıbın içerisinden geçmeye zorlanır. Sıkıştırılmaya başlanan biyet ilk olarak kovan boşluğunu doldurmaya başlar. Bu sırada kovan ve kalıp üzerinde yüksek basınç oluşur. Biyet, kalıp boşluğunun sahip olduğu geometriyi almak suretiyle sürekli olarak kalıptan dışarıya çıkar. Ekstrüzyon işleminde kütle ve hacimce bir kayıp yaşanmamakla beraber üretim, biyet tükendikçe yenisi eklenerek sürekli devam eder. Yüksek basınç ve kuvvetlerde çalışan ekstrüzyon işleminde zımbanın kalıba yetişip kalıbı parçalamaması amacıyla biyetin 5 - 10 % kısmı kovan içerisinde bırakılarak zımba ile kalıp arasında bir tampon bölge oluşturulur. Iskarta olarak adlandırılan bu atık parça, daha sonra döküm ocaklarında tekrar biyet haline getirilip kullanılmaktadır. Kullanılan yönteme veya malzemeye göre ekstrüzyon işlemi sıcak veya soğuk olarak uygulanabilinir.

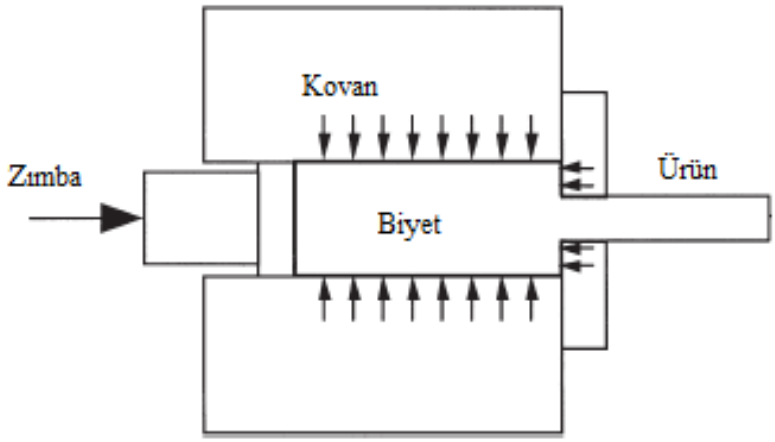
Sıcak ekstrüzyonda biyet, plastik deformasyonun kolaylaşması için önceden ısıtılır. Kullanılan malzemeye göre 400 ile 500 ^{0}C ye kadar farklı sıcaklarda ısıtılan biyete bir yağlayıcı tatbik edilerek zımba ile yapışması önlenir (Çıtak 2002).

3.1.1 Direkt Ekstrüzyon

Kullanımı en yaygın olan ekstürüzyon yöntemi olan direkt ekstürüzyon yönteminde Şekil 3.1.'de gösterildiği gibi biyet, zımba tarafından kalıba doğru sıkıştırılır. Bu yöntemde biyet, zımba ile aynı yönde hareket eder. İşlem sırasında biyet, kovanın iç yüzeyinden kayarak hareket etmektedir. Bu sebepten ötürü oluşan fazla sürtünme, yüksek ekstrüzyon kuvveti oluşmasına neden olur. Direkt ekstrüzyon yönteminde kalıbın sahip olduğu geometriye göre boş ve dolu çubuklar, boru ve profil imalatı yapılabilmektedir. Direkt ekstrüzyon yöntemi 3 bölgeye

ayrılmaktadır.

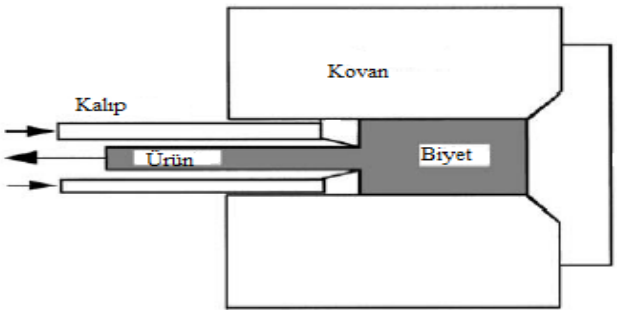
1. Bölge: Biyetin ilk sıkıştırılmaya başlandığı noktadır. Ekstrüzyon kuvveti pik (tepe) noktasına kadar çıkar.
2. Bölge: Basınç sabit bir şekilde azalır. Ekstrüzyon işlemi nispeten daha stabil bir basınçta devam eder. Sabit ekstrüzyon bölgesi olarak da adlandırılır.
3. Bölge: Basınç minimum değere kadar düşer. İşlenmeyen ölü parça sıkıştırılmaya başlandığında basınç tekrar artmaya başlar (Bingöl ve Sönmez 2003).



Şekil 3.1. Direkt ekstrüzyon yönteminin gösterimi (Saha 2000)

3.1.2 İndirekt Ekstrüzyon

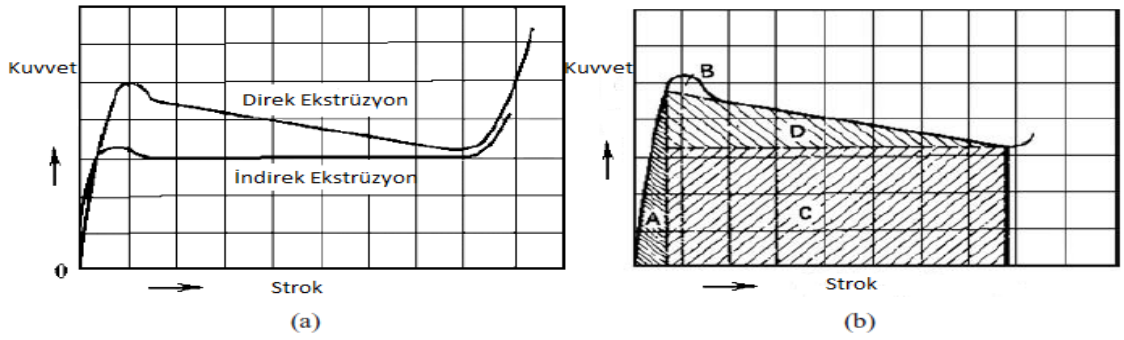
İndirekt ekstrüzyon yönteminde biyet, içi boş olan zımba önüne yerleştirilen kalıp içerisinden akmaya zorlanır. Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi direkt ekstrüzyondan farklı olarak biyet, zımbaya göre ters yönde hareket eder. Zımba ağzında bulunan kalıba doğru harekete geçen biyet malzemesi ile kovan yüzeyi ile arasında sürtünme kuvveti oluşmaz. Kovan yüzeyi ile biyet arasında sürtünme oluşmayacağından dolayı başlangıçtaki ekstrüzyon basıncı direkt ekstrüzyona göre düşüktür.



Şekil 3.2. İndirekt ekstrüzyon yönteminin gösterimi (Saha 2000)

3.1.3 Direkt ve İndirekt Ekstrüzyon Arasındaki Farklar

İndirekt ekstrüzyon, prensipte daha düşük ekstrüzyon kuvvetine ihtiyaç duyması ve kullanılan biyetin uzunluğu boyunca daha fazla deformasyona uğramasından dolayı direkt ekstrüzyona göre daha avantajlı bir üretim yöntemi olarak görülmektedir. Şekil 3.3.'de görüldüğü üzere indirekt ekstrüzyonda ekstrüzyon kuvvetleri direkt ekstrüzyona göre hem daha stabil hem de daha düşüktür. İndirekt ekstrüzyondaki ekstrüzyon kuvvetlerinin nispeten daha az olması, indirekt ekstrüzyon işleminin maliyetini de azaltmaktadır. Fakat indirekt ekstrüzyonda kullanılan zımbaların boşluklu olmaları büyük bir dezavantaj olmakla beraber üretimi planlanan mamülün geometrisine de sınırlama getirmektedir. İndirekt ekstrüzyonun bir diğer dezavantajı ise ekstrüzyon sırasında biyetin kalıptan dışarıya eğimli bir şekilde akma yöneliminin olmasıdır. Bu sebeplerden ötürü imalat sektöründe direkt ekstrüzyon yöntemi daha çok tercih edilmektedir.



Şekil 3.3. (a) Direkt ve indirekt ekstrüzyonda oluşan ekstrüzyon kuvvetlerinin gösterimi (b) enerji bölgelerinin ayrımı (Valberg 2010)

Ekstrüzyon işlemi sırasında gerekli olan ekstrüzyon enerjisi, kuvvet- strok diyagramının altında kalan alana eşittir. Şekil 3.3.'de direkt ekstrüzyon işleminde 4 enerji bölgesi gösterilmektedir. Bunlardan;

A: Biyetin kovan içerisine sıkıştırılması için gereken enerji

B: Biyetin plastik deformasyona başlaması için kullanılan enerji

C: Biyetin birincil deformasyon alanında sıkıştırılması için gereken deformasyon enerjisi

D: Biyetin kovan yüzeyi boyunca hareket etmesinde kullanılan enerji

İndirekt ekstrüzyonda ilk deformasyondan sonra biyet ile kovan arasında sürtünme oluşmadığından dolayı ekstrüzyon kuvveti sabit kalır. Biyetin kovan içerisine basılması gerekmediği için ilave enerjiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu sebepten ötürü indirekt ekstrüzyon işlemi sırasında kuvvet artışı gözlenmemektedir.

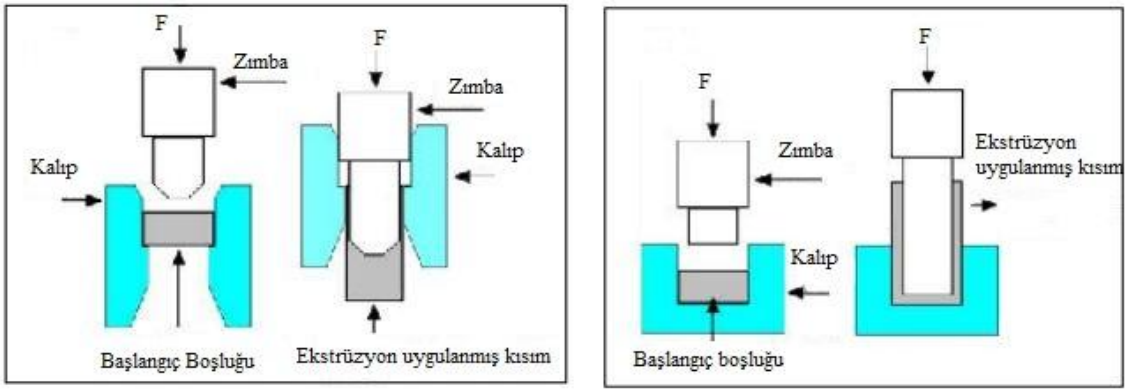
Eşit şartlar altında gerçekleştirilen direkt ve indirekt ekstrüzyonlarda biyet ile kalıp arasındaki sıcaklık artışı indirekt ekstrüzyonda daha azdır. Isı artışı ve transferinin azlığından dolayı indirekt ekstrüzyon işlemi daha yüksek zımba hızlarında gerçekleştirilir. Yinede indirekt ekstrüzyonda ürün kalitesi daha fazla ve yüzey çatlakları daha azdır.

İndirekt ekstrüzyonun sahip olduğu bütün bu avantajlara rağmen direkt ekstrüzyonun kullanımı en yaygın olan ekstrüzyon yöntemidir. Direkt ekstrüzyon yönteminin bu kadar yaygın olmasının en büyük nedeni özellikle birçok boşluğa sahip profillerin üretimine uygun olmasıdır. Buna karşın indirekt ekstrüzyon ise çoğunlukla basit profillerin üretiminde kullanılmaktadır (Kayser ve ark. 2008).

3.1.4 Darbeli Ekstrüzyon Yöntemi

Darbeli ekstrüzyon yöntemi genellikle dönel simetriye sahip içi boş ya da dolu parçaların imalatında kullanılır. Bu yöntemde çapı, imal edilecek tüpün dış çapına eşit olan kovan içine yerleştirilen ekstrüzyon malzemesine, zımba ile basarak biçim verilir. Zımba önündeki ön levhanın çapı, imal edilecek tüpün iç çapına eşittir. Kovan içindeki malzeme zımbanın basıncı ile ön levhanın çevresinden akarak yükselir ve silindirik kap biçimini alır.

Darbeli ekstrüzyon işlemi ile genellikle kısa ve içi boş tüplerin üretimi yapılmaktadır. Şekil 3.4'te ileri ve geri darbeli ekstrüzyon yöntemi şematik olarak verilmektedir. Ürünlerin et kalınlığı çapına göre genellikle çok düşüktür. Ekstrüzyon, direkt veya endirekt olarak uygulanabilir. İşlem genellikle yüksek hızda çalışan mekanik preslerle gerçekleştirilmektedir. Darbeli ekstrüzyonun uygulama alanı bakır, kalay, alüminyum ve kurşun gibi yumuşak metallerle sınırlı kalmaktadır. Bu yöntemle, ilaç sektöründe kullanılan çeşitli tüpler, supaplar ve küçük makine parçaları üretilmektedir.



Şekil 3.4. Darbeli ekstrüzyon yöntemlerinin şematik gösterimi a) direkt darbeli ekstrüzyon b)indirekt darbeli ekstrüzyon (Şentürk 2007)

3.1.5 Hidrostatik Ekstrüzyon Yöntemi

Hidrostatik ekstrüzyon, biyetin kovandan zımba kuvvetiyle değil de basınçlı akışkan vasıtası ile geçirildiği bir üretim yöntemidir. Şekil 3.5.'de şematik olarak gösterilen bu yöntemde biyet, yüksek basınç akışkanı ile çevrilmiştir ve akışkanın basıncı ile ekstrüzyon edilmektedir. Hidrostatik ekstrüzyon yöntemi, sadece plastiklik özelliği az olan metallerin ve alaşımların biçimlendirilmesinde kullanılmayıp; alüminyum ve bakır alaşımlarının biçimlendirilmesinde de kullanılmaktadır. Hidrostatik ekstrüzyon ile klasik ekstrüzyon yöntemleri arasındaki temel farklardan biri, klasik ekstrüzyonda kovan cidarını etkileyen radyal basıncın alaşım ve ekstrüzyon şartlarına bağlı olarak zımba basıncından %20-80 düşük olmasıdır. Hidrostatik ekstrüzyonda ise radyal basınç eksenel basınca eşittir. Daha yüksek basıncın etkisinde kalacaklarından dolayı; takımların, konstrüksiyon ve malzemelerinin seçiminde ve kovan yapımında gerekli özenin gösterilmesi gerekmektedir. Hidrostatik ekstrüzyon yönteminin, diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında kendine has birçok avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır.

3.1.5.1 Hidrostatik Ekstrüzyon Yönteminin Avantajları

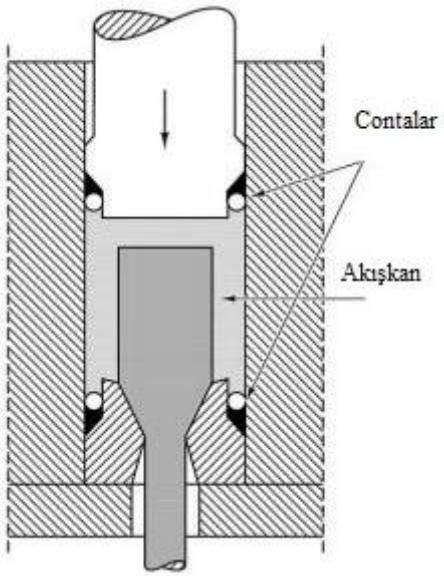
1. Biyet ile kovan arasında sürtünme oluşmadığından işlem başlangıcındaki zımba kuvveti küçülmekte ve ekstrüzyon basıncında bir artış olmaksızın istenilen uzunlukta ürün ekstrüze edilebilmektedir.

2. Biyet ile kalıp yüzeyi arasında oluşan yağ filmi nedeniyle kalıp yüzeyinde sürtünme büyük oranda azalmaktadır. Sert malzemeler soğuk ekstrüzyon edilebilmektedir.

3. Belli limitler içerisinde kalmak şartıyla, boyutları kontrol edilmiş silindirik biyetleri kullanmak şart değildir. Doğrusal olmayan biyetler, sarılmış teller dahi bu yöntemle ekstrüze edilebilmektedir.

4. Azalan ekstrüzyon kuvveti ve kalıp sürtünmesi nedeniyle büyük ekstrüzyon oranlarında çalışılabilmektedir. Yüksek basınçlı akışkan ile çevrili kalıba destek sağlanabilir. Bu nedenle karışık kesitli mamuller ince cidarlı kalıplar içerisinden ekstrüzyon edilebilir.

5. Ekstrüzyon basıncını ve lüzumsuz şekil değiştirmeleri azaltmak için küçük açılı kalıpların kullanımına olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.5. Hidrostatik ekstrüzyon donanımı (DeGarmo 2003)

3.1.5.2 Hidrostatik Ekstrüzyon Yönteminin Dezavantajları

1. Akışkanın sıkıştırılmasıyla yüksek basınçlar oluşur. Yüksek basınç verimi düşürür ve tehlikeli olabilecek kadar büyük miktarda enerji meydana getirir.

2. Biyet, ekstrüzyon edilmeye başlandığında ekstrüzyon hızını kontrol etmek zordur. Bunun neticesinde ekstrüzyon hızı daha da yükselir ve biyette arzu edilmeyen ısınma ve yumuşamalar oluşabilir. Böyle durumlarda sıkı kontroller sağlanmazsa biyet ve akışkan sıvı, kovandan basınçla fışkırabilir.

3. Donanımda çok iyi bir sızdırmazlık sağlanması gerekmektedir.

4. Biyetin bir ön işleme tabi tutulması gerekir.

5. Kalıba aşırı yük gelmemesi için ekstrüzyondan önce biyetin, kalıp deliğine uygun bir koniklikte işlenmesi zorunlu olmaktadır. Döküm biyetler kullanıldığında, biyet yüzeylerinin hatalardan arındırılması gerekmektedir (Sönmez 1989).

3.2 Ekstrüzyon Prosesini Etkileyen Faktörler

Ekstrüzyon işlemini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan; Ekstrüzyon türü, ekstrüzyon oranı, çalışma sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, sürtünme kuvveti ve malzemenin akma gerilmesi gibi bazı faktörler, prosesi daha çok etkilemektedir. Son derece pahalı olan ekstrüzyon düzeneklerinin doğru ve ekonomik şekilde kullanılması arzulanıyorsa bu parametreler hakkında detaylı bilgiye sahip olunması gerekir.

3.2.1 Ekstrüzyon Türü

Üretilmesi planlanan parçanın geometrisi ve kullanılan malzemenin özelliklerine göre birkaç farklı ekstrüzyon yöntemi geliştirilmiştir. Bunlardan en çok bilinen ve tercih edilenleri direkt ve indirekt ekstrüzyondur. Bununla birlikte hidrostatik, darbeli ekstrüzyon yöntemleri de bulunmaktadır. Ayrıca biyet malzemesinin ebat ve mukavemetine göre ekstrüzyon işlemi sıcak veya soğuk olarak gerçekleştirilebilir.

3.2.2 Ekstrüzyon Oranı

Ekstrüzyon oranı biyet kesit alanının toplam ürün kesit alanına olan oranıdır. Çok çıkışlı bir kalıbın ekstrüzyon oranı(R_e),

$$R_e = \frac{A_b}{A_k.n}$$

şeklinde verilir.

Burada, $A_{b=}$biyet kesit alanı, n kalıptan bir kerede çıkan ürün sayısı ve A_k= kalıp boşluğu ya da profil kesit alanıdır. Endüstriyel uygulamalarda sert alaşımlar için 10 ile 35, yumuşak alaşımlar için ise 10 ile 100 arasındaki ekstrüzyon oranları kullanılmaktadır. Bu değerler ürün geometrisine göre değişiklik gösterebilmektedir.

3.2.3 Çalışma Sıcaklığı

Sıcaklık yükseldikçe malzemelerin akma gerilmeleri düşeceğinden şekil değiştirmeleri daha kolaylaşmaktadır, buna karşın başlangıç sıcaklığı yükseldikçe işlem sırasındaki bölgesel sıcaklık artışları malzemede kısmi ergimelere sebep olacağından ulaşılabilecek maksimum ekstrüzyon hızı azalmaktadır. Ekstrüzyon sırasındaki değişiklikler biyet sıcaklığına, biyetten kovana ısı transferine buna ilaveten şekil değişikliği ve sürtünme nedeniyle ısı oluşumuna yakından bağlıdır. Bir alüminyum ekstrüzyon uygulamasında sıcak biyetin ön ısıtılmış kovana yüklenmesi ve ekstrüzyonun başlamasıyla birlikte çok karmaşık ısıl değişimler ortaya çıkmaya başlamaktadır.

3.2.4 Ekstrüzyon Hızı

Bir metalin ekstrüzyon işlemine vereceği tepki deformasyon hızı tarafından etkilenebilmektedir. Zımba hızındaki artış ekstrüzyon basıncında artışa sebep olacaktır. Artan zımba hızıyla ekstrüzyonda oluşan sıcaklık da yükselmektedir. Bunun sebebi, gerinim hızının zımba hızıyla ve oluşan ısı miktarının gerinim hızıyla orantılı olmasıdır. Zımba hızı düştükçe oluşan ısının dağılması daha kolay olacaktır. Alüminyumun ısıl iletkenliğinin yüksek olması nedeniyle bu durum daha belirgin hale gelmektedir. Zımba hızı ile ekstrüzyon hızı arasında,

hacmin korunumu gereğince ekstrüzyon hızı;

$$V_e = V_z . R_e$$

olarak ifade edilebilir. Burada V_z= zımba hızı, R_e= ekstrüzyon oranıdır.

3.2.5 Malzemenin Akma Gerilmesi

Plastik şekil değişikliği sırasında şekillendirme kuvveti ya da gerilmesi parçanın geometrisine, sürtünmeye ve malzemenin akma gerilmesine bağlı olduğundan, akma gerilmesi de ekstrüzyon prosesinde önemli bir kriterdir. Bir malzemenin akma gerilmesi aşağıdaki faktörler tarafından belirlenmektedir;

• Malzemenin bileşimi ve metalürjik yapısı

• Şekillendirme sıcaklığı,

• Şekil değiştirme miktarı veya gerinim

• Gerinim veya deformasyon hızı (Öztop 2007).

3.3 Direkt ve İndirekt Ekstrüzyonda Ekstrüzyon Kuvvetinin Hesaplanması

Ekstrüzyon kuvveti, kullanılan ekstrüzyon yöntemine göre farklı formüller ile hesaplanır. İndirekt ekstrüzyonda biyet ile kovan arasında sürtünme yoktur. Bu durumda indirekt ekstrüzyon basıncı (P_e); Malzemenin mukavemetine, ekstrüzyon oranına ve kalıp geometrisine bağlı olarak değişir. Birim şekil değişimi ε;

$$\varepsilon = \ln R_e = \ln \frac{A_b}{A_k . n}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Sürtünme ve iç şekil değişiminin ihmal edildiği ideal deformasyon şartlarında zımba yüzeyine gelen basınç P;

$$P = \sigma . \ln R_e$$

olarak hesaplanır. Burada işlem soğuk gerçekleştiriliyorsa akma gerilmesi σ yerine ortalama akma gerilmesi σ_{ort} hesaplanmalıdır. Ancak gerçek uygulamalarda gerek şekil değişimi sırasında iç şekil değişimi işini gerekse sürtünme etkisini hesaba katmak gerekmektedir. İndirekt ekstrüzyonda sürtünmenin yokluğunda birim şekil değişimi hesabında aşağıdaki ifadeden yararlanılmaktadır:

$$\varepsilon = a + b . \ln R$$

Burada a = 0.8, b ise kalıp açısına bağlı olarak 1.2 ile 1.5 arasındaki değerleri almaktadır. Zımba yüzeyine gelen basınç ise,

$P = \sigma(a + b.\ln R)$

şeklinde hesaplanmaktadır. Direkt ekstrüzyonda ise sürtünmenin etkisi katılmalıdır. Sürtünme kuvveti;

$$P_s.\left(\frac{\pi.D_o^2}{4}\right) = \mu.P_c.(\pi.D_o.L)$$

Burada μ sürtünme katsayısı, Pc kovan yüzeyine etkiyen basınç, L biyet boyu ve $(\pi.D_o.L)$ biyetin sürtünme yüzeyi alanıdır. En kötü durumda sürtünmenin çok yüksek yani yapışma durumunun geçerli olduğu halde sürtünme gerilmesinin biyet malzemesinin kesme akma gerilmesine (τ) eşit olduğu düşünüldüğünde bağıntı,

$$P_s.\left(\frac{\pi.D_o^2}{4}\right) = \mu.P_c.(\pi.D_o.L) = \tau.(\pi.D_o.L)$$

şeklini alır. Ayrıca kesme akma gerilmesinin malzemenin normal akma gerilmesinin yarısına eşit olduğu varsayılacak olursa sürtünme kaynaklı basınç artışı;

$$P_f = \sigma.\left(\varepsilon + \frac{2.L}{D_o}\right)$$

Kuvvet hesabında bir de kesit faktörü K dikkate alınmalıdır.

$$K = 0{,}98 + 0{,}02\left(\frac{C_x}{C_c}\right)2{,}25$$

Ampirik olarak yukarıdaki gibi tanımlanabilen bu bağıntıda Cx ürün kesitine ait çevre uzunluğu, Cc ise kesit alanının dairesel olarak düşünüldüğünde sanal olarak elde edilecek olan çemberin uzunluğudur. Katsayılar ve üstel ampirik değerlerdir. Bu ilişki $\left(\frac{C_x}{C_c}\right)$ oranının 1 ile 6 değerleri arasında geçerlidir. Bu durumda ekstrüzyon kuvveti:

1. İndirekt Ekstrüzyonda

a. Sıcak İndirekt Ekstrüzyonda

$$F = \sigma.K.\varepsilon.A_0$$

b. Soğuk İndirekt Ekstrüzyonda

$$F = \sigma_{ort.}.K.\varepsilon.A_0$$

olarak hesaplanmaktadır.

2. Direkt Ekstrüzyonda

a. Sıcak Direkt Ekstrüzyonda

$$F = \sigma . K . \left(\varepsilon + \frac{2.L}{D_o}\right) . A_o$$

b. Soğuk Direkt Ekstrüzyonda

$$F = \sigma_{ort.} . K . \left(\varepsilon + \frac{2.L}{D_o}\right) . A_o$$

şeklinde hesaplanmaktadır (Kartal 2015).

3.4 Alüminyum Ekstrüzyonu

Hafif metal ve alaşımları birçok önemli özelliklerinden dolayı ekstrüzyon yönteminde kullanılan malzemelerin başında yer almaktadır. Alüminyum ve alaşımları 300°C ve 600°C sıcaklık aralığında ekstrüzyon edilir. Esas olarak bilinen bütün alüminyum alaşımları ekstrüzyona uygundur. Alüminyum ve alaşımlarının kullanım alanları çok geniş olmakla beraber, esas kullanım alanları inşaat sektörü, taşıt yapımı, yan sanayi olarak da toplanabilir. Mukavemeti yüksek ve soğuk çekilebilir alaşımlardan çubuk ve boru imalinde sertleşme işleminden yaralanılabilir. Eğer toleransların daraltılması isteniyorsa, korozyon gibi nedenlerden dolayı sertleşebilir malzemeler istenmiyor ise, ekstrüzyon ile imal edilemeyen veya ekonomik olarak ekstrüzyon küçük mamul kesitleri isteniyor ise yarı mamul boru, çubuk veya tel şeklinde soğuk olarak çekilir (Bingöl 2001).

3.5 Ekstrüzyon İşleminde Malzeme Akışı

Ekstrüzyon işleminde, genellikle aralıklı bir çalışma yapılmakta, yani ilk biyetin ekstrüzyonundan sonra ikinci biyet kovana yerleştirilmekte ve böylece kovanda sıcaklık farklılıkları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca biyet ile kovan ön levha, kalıp yüzeyi ve kanalında sürtünme oluşmaktadır. Bu durumda biyet ön kısmından biyet sonuna kadar eşit olmayan akış durumları ortaya çıkmaktadır. Farklı akış durumları, ekstrüzyon kuvvetinin değişmesine, malzeme kesiti ve boyunda farklı malzeme özelliklerine ve diğer ekstrüzyon hatalarına sebep olmaktadır. İstenmeyen bu etkenleri ortadan kaldırmak için kovandaki malzeme akışının incelenmesi gerekmektedir.

Ekstrüzyon yönteminde, malzeme akışına ait kanıtlanabilir ilk araştırmalar Tresca ve Obermayer tarafından yapılmıştır. Bu araştırmacılar, plakalardan oluşan kursun silindirler ve değişik renklerde boyanmış plakalardan oluşan kil bloklar kullanmışlardır. Araştırmacılar akma olayını hidrodinamik bir problem olarak düşünmüş ve malzeme hareketinin kesin olarak araştırması için değişik yöntemler geliştirmişlerdir.

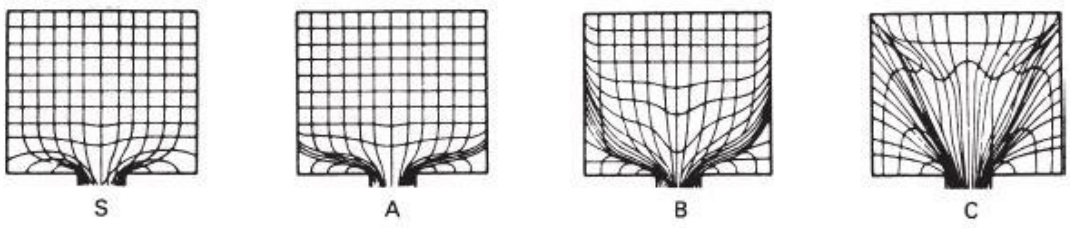
Ekstrüzyon işlemi esnasında malzemenin hareketi yani malzemenin akısı imalatın

kalitesini çok büyük oranda etkilemektedir. Malzeme akısının düzenli veya düzensiz olması mamülün kaliteli veya kalitesiz (çeşitli ekstrüzyon hataları) olmasına sebep olur. Aynı zamanda ekstrüzyon kuvvetlerinin belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır. Malzeme akısına, birinci derecede ekstrüzyon edilen malzemenin özellikleri olmak üzere çok sayıda işlem faktörü etkilemektedir. Çizelge 3.1.' de malzeme akısını etkileyen tüm faktörler verilmiştir (Bingöl ve Sönmez 2003).

Çizelge 3.1. Malzeme akısını etkileyen faktörler

No	Faktörler	Olasılıklar
1	Yöntem	Direkt, indirekt, 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, blok merkezindeki malzemenin blok çevresindeki malzemeye göre daha hızlı akmasına neden olur. Bu durum, daha düzensiz bir malzeme akısına ve ölü bölgelerin artmasına neden olur. Mümkün olduğu kadar, bloğun merkezindeki malzemenin akış hızı ile bloğun çevresindeki malzemenin akış hızı arasındaki farkı azaltmak gerekir. Hız farkları ne kadar azalırsa, malzeme akısı o kadar ideal akış tipine yaklaşır ve ölü bölgeler de azalır. Şekil 3.6.'da tipik akış ve arzu edilen akış gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Ekstrüzyonda gözlemlenen dört değişik akış tipinin şematik görünüşü (Saha 2000)

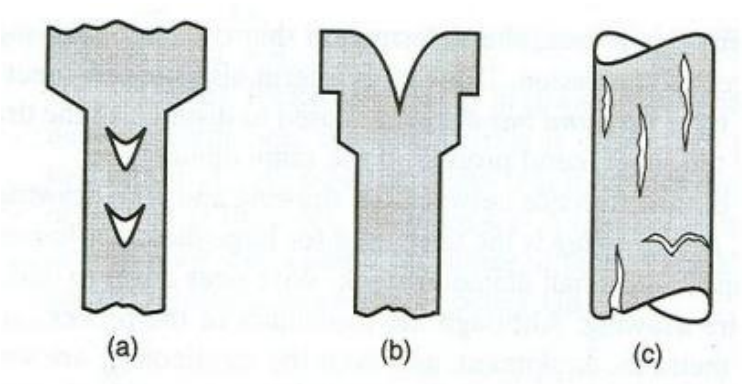
Homojen malzemelerin ekstrüzyonunda, “S” akış örneği kovan ve kalıp ara yüzeyinde sürtünme olmadığı durumlarda meydana gelir. Bu akış tipi genellikle kovan ve kalıbın bütünüyle yağlanmış olduğu durumlarda sağlanır. “A” akış örneği, kovan ile biyet ara yüzeyi değil de kalıp ara yüzeyindeki sürtünme varlığında homojen malzemelerin ekstrüzyonuyla sağlanır. Bu akış örneği indirekt ekstrüzyon için uygundur. Merkezdeki metal dış sınır tabakadaki metalden daha hızlı akar. Biyetin önde olan ucunun köşesinde kalıp yüzü ile kovan duvarı arasında ölü-metal bölgesi diye adlandırılan ayrı bir metal bölgesi oluşur.

“B” akış örneği, hem kovan hem de kalıp ara yüzeyinde sürtünme varlığında homojen malzemelerin ekstrüzyonunda görülür. Bu akış örneği direkt ekstrüzyon prosesleri için uygundur.Uzamış bir ölü metal bölgesi meydana gelir. Bu durumda A akış örneği ile karşılaştırıldığında daha fazla kayma deformasyonu vardır. Ayrıca A akış örneği ile karşılaştırıldığında ekstrüzyon üniform olmayan özelliklere sahiptir.

“C” akış örneği, homojen olmayan malzeme özelliklerine sahip biyetler ya da biyetler içinde üniform olmayan sıcaklık dağılımlarıyla ile sağlanır. Malzemeler kovan içerisinde daha fazla kayma deformasyonlarına maruz kalırlar ve aynı zamanda daha da uzamış ölü-metal bölgesi oluşur (Saral 2005).

3.6 Ekstrüzyon Hataları

Ekstrüzyon işleminde başlıca üç tip kusur oluşumu meydana gelebilir:



Şekil 3.7. Ekstrüzyon işlemlerinde oluşan hatalar a)ok ucu b) boru kusuru c) yüzey çatlaması (Kartal 2015)

3.6.1 Merkez Ayrılması (Ok Ucu)

Şekil 3.7. a'da görüldüğü üzere bu kusur ekstrüzyon sırasında iş parçasının merkez ekseninde oluşan bir çekme gerilme sonucu iş parçasının içinde oluşan çatlaklardır. Eğer gerilmeler büyükse bu kusur meydana gelebilir. Diğer bir deyişle ok ucu hatasının nedeni yetersiz redüksiyondur (şekil değişimi miktarı). Merkez ayrılmasına neden olan diğer faktörler ise; yüksek kalıp açısı, iş parçasındaki kirlilik, düşük ekstrüzyon oranıdır.

Örneğin ekstrüzyon oranının 10'dan düşük olması durumunda işlem sırasında yüzeydeki sürtünme kuvvetleri malzemenin merkezinde ikincil çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Bunun büyük değerler almasıyla merkezde eksen boyunca çatlaklar görülebilir.

3.6.2 Boru Kusuru

Şekil 3.7. b'de gösterilen hata, direkt ekstrüzyonda gerçekleşir. Biyetin sonuna kadar basıldığı durumda ortadan kolayca ve daha fazla akan malzeme merkezde ürünün sonuna doğru boru kusuru oluşumuna neden olur. Bu yüzden biyeti sonuna kadar basmamak ve çapı biyet çapından daha küçük olan bir model blok kullanılarak bu kusuru giderilebilir.

3.6.3 Yüzey Çatlaması

Yağlamanın yetersiz olduğu ve sıcaklığın özellikle yüksek deformasyon hızları nedeniyle arttığı durumlarda Şekil 3.7. c'de görüldüğü gibi yüzey çatlaklarına oluşabilir. Ekstrüzyon işlemlerinde çoğunlukla yatay, hidrolik ekstrüzyon preslerinden yararlanılır. Bu tür presler 500 ile 4000 ton aralığında basma kapasitesine sahiptir. Sıcak ekstrüzyonda biyetlerin ısıtılmasında fırınlardan veya endüksiyon ısıtma donanımından yararlanılmaktadır. Gene sıcak ekstrüzyon işleminde kovanlarda biyetin ısı kaybını önlemek için ısıtma tertibatı da bulunmaktadır. Yardımcı donanım olarak ayrıca ürün çıkışında ani soğutma ve gerdirme üniteleri de kullanılabilmektedir.

3.7 Sonlu Elemanlar Yöntemi

İmal edilmiş konstrüksiyonların kontrolünde zaman kaybına neden olan deneylerin yükünü azaltmak için kullanılan sonlu elemanlar yöntemine dayalı bilgisayar yazılımları günümüzün vazgeçilmez unsurları olmuştur. İnsan karmaşık sistemleri ve davranışları bütünüyle kavrayamadığından dolayı çoğu zaman daha kolaylıkla anlaşılabilen bileşenlerine ya da elemanlarına ayırıp incelemeyi ve sonuçları yeniden birleştirerek o sistem ve davranış hakkında bilgi edinmeyi tercih etmiştir. Bu sebeple karmaşık bir problem, hesaplanması daha

basit alt problemlere bölünerek daha anlaşılır bir hale getirilir. Oluşturulan bu, basit, alt problemler hesaplanıp birleştirilerek esas problemin çözümü gerçekleştirilebilinir. Örneğin; gerilme analizi üzerinde çalışan mühendisler, gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir, küre gibi geometrisi bilinen şekillerle sınırlarlar. Bu elde edilen sonuçlar çoğu kez problemin yaklaşık çözümüdür ve bazen doğrudan bazen de bir katsayı ile düzeltilerek kullanılır (Özbaşlı 2009).

Mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemlerin tam çözümü yerine, kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir. Öyle problemler vardır ki, tam çözüm imkânsız kabul edilerek yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Sonlu elemanlar metodunun kullanılması ve bilgisayarların sanayiye girmesiyle, bugüne kadar ancak pahalı deneysel yöntemlerle incelenebilen bir çok makine elemanının (motor blokları, pistonlar vs.) kolayca incelenebilmesi, hatta çizim esnasında mukavemet analizlerinin kısa bir sürede yapılarak optimum dizaynın gerçekleştirilmesi mümkündür.

Bunlar kararlı durum problemleridir. Kararlı durumda ısı dağılımı, kararlı ses altı hızında akışkan akışı elastik yapıda denge gerilmeleri, elektrostatik alanlar ve kararlı doğru ve alternatif akım problemleri gibi konular bu gruba girer. Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (basınç, sıcaklık, yer değiştirme, gerilme vb.) sonsuz sayıda değere sahiptir. Sürekli ortamın belirli bir bölgesi de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterir. Bu alt bölgede alan değişimi sonlu sayıda bilinmeyeni olan bir fonksiyon ile tanımlanır. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek mertebeden fonksiyon olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri aynı karakteristik özelliği gösteren bölgeler olduğundan bu bölgelere ait olan denklem takımları birleştirilerek bütün sistemi ifade eden lineer denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir. (Solmaz 1990).

Sonlu elemanlar metodunun üç temel niteliği vardır. İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayırır. İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır.

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs.) sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyeni olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da

çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek mertebeden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir (Özbaşlı 2009).

3.7.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları

1. Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir. Karmaşık şekillerin incelenmesinde kolaylıklar sağlar.

2. Bir veya birden çok delik veya köşeleri olan bölgeler kolaylıkla incelenebilir.

3. Değişik malzeme ve geometrik özellikleri bulunan cisimler incelenebilir.

4. Sınır şartları kolayca uygulanabilir.

5. Sonlu elemanlar metodunun hem fiziksel anlamı ve hemde matematik temelleri vardır.

6. Sürekli, süreksiz veya değişken yükler kolaylıkla ele alınabilir.

3.7.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları

1. Sonlu elemanlar metodunun bu günkü seviyesinde, metodun bazı karmaşık olaylara uygulanmasında zorluklar vardır. Örnek olarak; çatlama, kırılma davranışı, temas problemleri, yumuşayan non-lineer malzeme davranışı gibi.

2. Sonlu elemanlar metodu, genellikle büyük bilgisayar belleğine ve zaman gereksinim duyar.

3. Metot ancak malzeme parametreleri iyi tanımlanmışsa gerçekçi sonuçlar verir.

4. Doğru sonuç elde edebilmek için sürekli ortamın çok sayıda elemana bölünmesi ve çok sayıda ki giriş bilgileri hatasız olmalıdır. Programın verileri iyi kontrol edilmelidir.

5. Diğer yaklaşık sayısal yöntemlerde olduğu gibi, sonlu elemanlar metodunda alınan sonuçlar dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir.

Ticari olarak kullanılan analiz programlarının hepsi yukarıda açıklanan sonlu elemanlar modellerine ve prensiplerine göre çalışırlar. Bu programların aralarındaki farklar öncelikle problemi çözme hızı ve ihtiyaç duyduğu bilgisayar kapasitesidir (İrsel 2007).

3.8 Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulama Alanları

Sonlu elemanlar metodunun çok çeşitli mühendislik alanlarında uygulanabilmesi ve bilgisayarlar için genelleştirilmesi, yöntemin, tasarımcılar ve araştırma mühendisleri tarafından benimsenmesine yol açmıştır. Sonlu Elemanlar Metodunun ilk ve en geniş uygulama alanı gerilme analizidir. Makinelerin emniyetli ve ucuz olması için hızlı ve hassas bir gerilme analizi son derece önemlidir. Sonlu Elemanlar Metodu aşağıdaki tip problemlerin çözümünde sıkça kullanılmaktadır:

3.8.1 Denge Problemleri

Bu tip problemlerde sistemin durumu zamanla değişmez. Makine ve inşaat yapılarının gerilme analizleri, katılarda ve sıvılarda karalı sıcaklık dağılımları, sürekli akış problemleri bu gruba girer.

3.8.2 Özdeğer Problemleri

Sınır değer problemleri olarak ta adlandırılırlar. Özdeğer problemlerinde özel ve kritik değerler tahmin edilmelidir. Yapıların stabilitesi, öz titreşimleri, lineer viskoelastik, sönümleme, burkulma, göl ve limanlarda dalgaların serbest titreşimleri, katı ve esnek kaplarda akışkanların çalkalanması gibi problemler bu gruba girerler.

3.8.3 Yayılma Problemleri

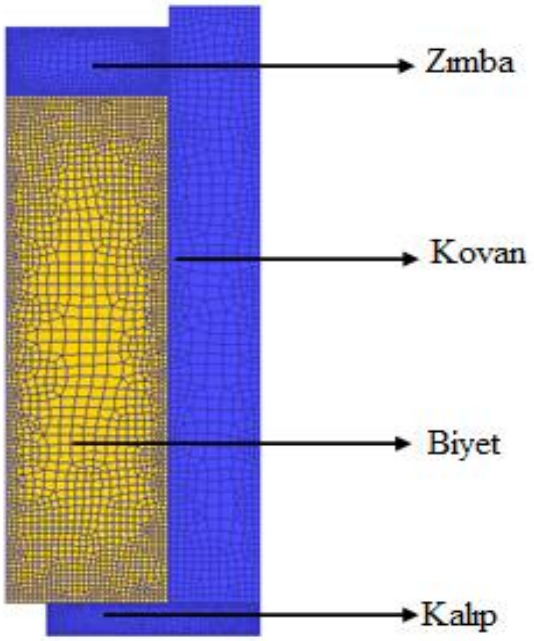
Zamana bağlı problemlerdir. Sistemin ardışık durumları başlangıç şartlarına bağlı olarak belirlenir. Yapıların dalgalara karşı davranışı, katılarda ve sıvılarda ısı geçişi, kararlı olmayan akışlar bu gruba girerler.

3.9 Ekstrüzyon İşleminin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi

Bu çalışmada, son yıllarda mühendislik probleminin çözümünde kullanılan DEFORM 2D sonlu elemanlar yazılımından faydalanılmıştır. İki boyutlu olarak oluşturulan modelin malzeme, geometri ve giriş parametre değerleri için literatürden yararlanılmıştır.

Çalışmada kullanılan model zımba, biyet, kovan ve kalıp olmak üzere 4 ana bileşenden oluşmaktadır. 4 bileşenden biri olan biyet 300 mm uzunluğunda ve 178 mm çapında olup malzemesi AA6061'dir. Ürün profil çapı 45 mm olup ekstrüzyon oranı 15.6'dır. Kullanılan kalıp ise H13 malzemesinden tasarlanmış olup, rijit olarak modellenmiştir. Eksenel simetri koşulundan ötürü modelin yalnızca ½'lik kısmı 2163 adet eleman kullanılarak ağ örgüsü oluşturulmuştur. Simetri kullanılmasından dolayı daha az eleman sayısı ve düğüm noktası

kullanılarak çözüm sürelerinin kısaltılması amaçlanmıştır. Oluşturulan ekstrüzyon modelinin sonlu elemanlar programındaki ağ yapısı Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Ekstrüzyon prosesinin sonlu elemanlar modeli

Ekstrüzyon tasarımının son aşamasında modele uygulanacak olan sınır şartları belirlenmiştir. Bu amaçla biyet, kalıp, kovan sıcaklığı ve ram hızı olmak üzere 4 farklı parametre için 3 farklı değer seçilmiş ve her biri için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Ekstrüzyon parametreleri ve kullanılan değerler Çizelge 3.2.'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Ekstrüzyon parametreleri

Parametreler	**1. seviye**	**2. seviye**	**3. seviye**
Biyet Sıcaklığı (°C)	450	470	490
Kalıp Sıcaklığı (°C)	410	430	450
Kovan Sıcaklığı (°C)	410	430	450
Zımba Hızı (mm/s)	5	7,5	10

3.10 Sonlu elemanlar Programının Uygunluğu

Yapılan bu yüksek lisans tezinde tüm simülasyonlar sonlu elemanlar programı DEFORM 2D ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların gerçekleştirilmesinden önce, kullanılan DEFORM 2D programının uygunluğu ve elde edilecek sonuçların sağlıklı olup olmadığını tespit etmek amacıyla literatürden alınan bir çalışma (Bingöl 2015) ile bir uygunluk simülasyonu yapılmış ve sonuçlar gözlemlenmiştir. Çizelge 3.3.'de literatürden alınan veriler gösterilmiştir; kalıp, kovan ve zımba rijit olarak seçilmiştir.

Çizelge 3.3. Literatürden alınan veriler

Biyet Yarıçapı	178 mm
Profil yarıçapı	45 mm
Ekstrüzyon Oranı	15.6
Biyet Malzemesi	AA6061
Biyet Sıcaklığı	470 ^{O}C
Kovan Sıcaklığı	430 ^{O}C
Kalıp Sıcaklığı	430 ^{O}C
Mesh Sayısı	1056
Düğüm Sayısı	1157
Sürtünme Katsayısı	0,95
Zımba Hızı	7,5 mm/s

Yukarıda belirtilen parametreler ve değerlere göre hazırlanan uygunluk simülasyonundan elde edilen veriler Bulgular ve Tartışma kısmında, Çizelge 4.1. 'de gösterilmiş olup, sonlu elemanlar DEFORM 2D programının tutarlı olduğu anlaşılmıştır.

3.11 Taguchi Metodu

Ekstrüzyon işleminde parametreleri optimize etmek için Taguchi tekniğinin kullanımı alternatif bir yaklaşım olarak devreye girmektedir. Bu yaklaşım ile simülasyonlar gerçekleştirilmeden önce yapılan detaylı değerlendirmelerle gerekli simülasyon sayısını önemli ölçüde azaltmak mümkün olmaktadır.

Taguchi yönteminde parametrelerin etkilerinin değerlendirilmesi, simülasyon sonuçlarının sinyal/gürültü (S/N) oranlarına çevrilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Sinyal/gürültü oranları değerlendirilirken küçük değer iyi, nominal değer iyi ve büyük değer iyi kriterleri arasından uygun olanın belirlenmesi gerekmektedir. Bu kriterlerden hangisi kullanılırsa kullanılsın, elde edilen S/N oranlarının büyük olması simülasyon sonuçlarının iyi olduğuna işaret etmektedir. Bu sebeple simülasyonlarda kullanılan faktör seviyeleri arasından en yüksek S/N oranına sahip olanlar en iyi performansı verecektir. Bununla birlikte varyans analizinin (ANOVA) gerçekleştirilmesiyle faktörler arasından hangilerinin proses üzerinde daha fazla etkiye sahip oldukları da elde edilecek olan grafiklerden anlaşılabilir. Taguchi Deney Tasarımı tekniğine göre yapılacak bir çalışmada izlenecek adımlar aşağıdaki şekildedir:

1. Faktörlerin seçimi ve aralarındaki etkileşimlerin değerlendirilmesi (beyin fırtınası, akış diyagramı, sebep sonuç diyagramı gibi metotlar kullanılarak).

2. Faktörlerin seviyelerinin belirlenmesi

3. Doğru dengeli tasarımın seçimi

4. Faktörlerin ve/veya aralarındaki etkileşimlerin dengeli deney düzenindeki kolonlarla eşleştirilmesi

5. Deneylerin daha önceki adımlarda planlanan şekilde gerçekleştirilmesi

6. Sonuçların analizi

7. Onama deneylerinin yapılması (Savaşkan ve ark. 2004).

Kalite kontrol çalışmalarından yola çıkılarak geliştirilen Taguchi metodu sonraları yeni ürün tasarımı ve ar-ge çalışmalarında da yoğun biçimde kullanılmıştır. Taguchi metodu şu şekilde özetlenebilir;

1. Rekabetin olduğu bir ekonomide kaliteyi sürekli geliştirmek ve maliyetleri azaltmak isletmelerin kalıcılığı için zorunludur. Sürekli bir kalite geliştirme programı ürün hedef değerlerinden sapmaları sürekli azaltmayı içerir.

2. Bir ürünün kalitesine ait önemli bir boyut da o ürünün toplumun bütününde meydana

getirdiği kayıptır. Bir ürünün performansındaki bir sapmadan dolayı tüketicide meydana getirdiği kayıp sapmanın karesi ile orantılıdır.

3. Bir ürünün kalitesi ve maliyeti, ürünün tasarımı ve üretim prosesi tarafından belirlenir. Ürünün imalat öncesini (pazar araştırma, tasarım ve proses geliştirme) ve imalatı esnasında yapılan faaliyetler ile sonrasını ayıran ve bu safhalara sırasıyla Offline ve On-line Kalite Kontrol adlarını veren Taguchi, Şekil 3.9.'daki gibi her iki aşamayı da kendi içlerinde sistem, parametre ve tolerans tasarımı safhalarına bölmüştür.

4. Bir ürünün performansındaki sapmayı azaltmak için ürünün performans karakteristikleri üzerinde etkili olan parametrelerin lineer olmayan etkilerini kontrol altına almak gerekir. İstatistiksel olarak tasarlanan deneyler ürün veya proseslere ait performans sapmalarını azaltmak için kullanılır.

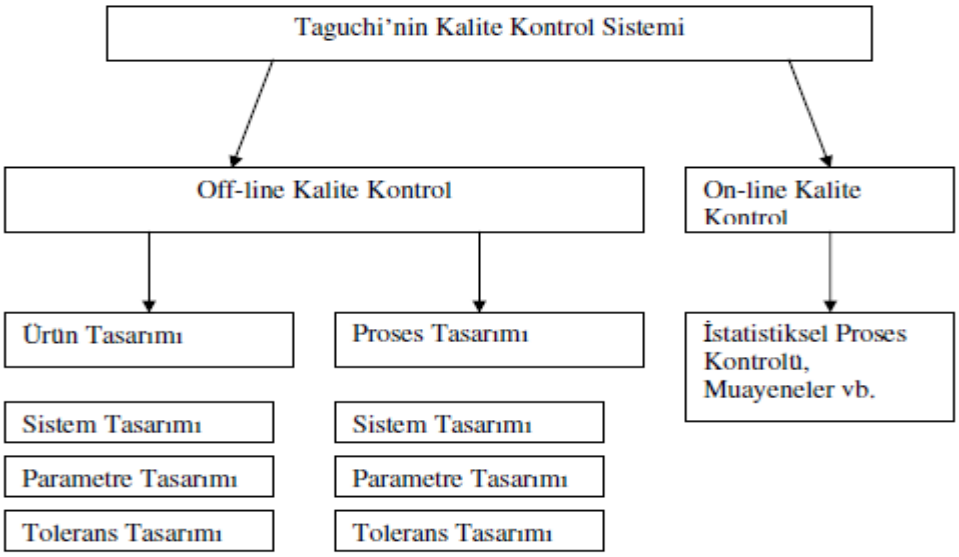
Bu adımların izlenmesi sonucunda proses veya ürün için optimum performansın elde edileceği deney parametreleri belirlenecek, deneyde ele alınan faktörlerin kalite değeri üzerindeki etkisi tahmin edilebilecek ve optimum deney parametreleri sonucunda elde edilebilecek kalite değeri öngörülebilecektir (Öztop 2007).

3.11.1 Taguchi'nin Kalite Kontrol Sistemi

Toplam kalite yönetiminin temelini oluşturan sürekli geliştirme (kaizen) yaklaşımında genel çalışma çerçevesi olarak Deming'in PUKÖ (Planla-Uygula-Kontrol Et-Önlem al) çemberi kullanılır. PUKÖ süreci temelde iyileştirme için deney yapılmasını önermektedir. Mevcut şartlar yerine farklılarını deneyerek üründe gelişme sağlanması hedeflenmektedir.

Taguchi, PUKÖ sürecinde yer alan faaliyetleri iki bölüme ayırmaktadır. Pazar araştırması ile ürün ve üretim prosesinin geliştirilmesi sırasında gerçekleştirilen kalite faaliyetlerini içeren off-line kalite kontrol, üretim başlamadan önce gerçekleştirilen tasarım çalışmalarını kapsar. On-line kalite kontrol ise ürünün imalatı sırasındaki ve imalat sonrasındaki (servis, bakım vb.) kalite kontrol faaliyetleri olup istatistiksel proses kontrolü, test ve muayeneler bu kapsamdaki faaliyetlerdir.

Taguchi Metodu Off-line kalite kontrol içinde ürün ve proses tasarımı aşamalarında kullanılmaktadır. Her iki asama için sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımı alt safhaları geliştirilmiştir. Taguchi'nin kalite sistemi Şekil 3.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Taguchi'nin kalite sistemi

Metodun ilk aşaması olan sistem tasarımı aşamasında ürünün ya da prosesin fonksiyonunu yerine getirebilmesi için gerekli sistemler ve teknolojiler belirlenir. Ürünle ilgili pazarın boyut ve özellikleri, tasarımı ve üretimi için mevcut bilimsel ve mühendislik bilgileri, seçilecek malzeme ve prosesler bu aşamanın konularını oluşturur.

Taguchi'ye göre ürün kalitesinin en belirleyici aşaması parametre tasarımı aşamasıdır. Ürün parametre tasarımı, ürünün malzemesi, formulasyonu, fiziksel ve kimyasal özellikleri için optimum değerlerin belirlenmesi anlamına gelir. Proses parametre tasarımı ise herhangi bir imalat prosesindeki hız, sıcaklık, basınç vb. parametrelerin optimize edilmesidir.

Parametre tasarımında amaç, üründe veya proseste varyasyon yani hedef değerden sapma ya da kalitesizlik yaratan faktörlerin değerlerini, kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini de elimine edecek şekilde, optimal seçerek ürün ve prosesteki varyasyonu minimize etmektir. Taguchi bu amaca yönelik tasarım çalışmasını sağlam tasarım (robust design) olarak adlandırmaktadır.

Parametre tasarımının varyasyonu azaltmada yetersiz kaldığı hallerde tolerans tasarımı uygulanır. Bir ürün veya prosesin tasarlanmasında etkili faktörlerin uygun değerleri belirlense dahi bu parametreler çoğu zaman bir tolerans dahilinde kullanılacak, bu durum da kalite değişkeninde varyasyon oluşturacaktır. Bu toleranslardan kaynaklanan varyasyonların da minimize edilmesi gerekir. Taguchi kayıp fonksiyonu kavramı ile varyasyonun mali bir zarar olarak tüketici ve üreticiye yansıdığı görüşünü ileri sürmüş ve tolerans tasarımına yeni bir boyut getirmiştir (Canıyılmaz 2001).

3.11.2 Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı

Taguchi Deney Tasarımı metodunda kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt, ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranıdır. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder.

S/N oranı, kontrol edilemeyen etkileri (gürültü) mümkün olduğu kadar az tutarak bir üründe veya proseste kararsızlığı azaltan kontrol parametrelerini belirlemek için kullanılır. Sinyal değeri kontrol edilebilir ve ölçülmek istenen gerçek değeri ifade eder. Gürültü faktörü ise kontrol edilemez ve ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder. Uygulamadaki problemler, ulaşılması hedeflenen kalite değerinin türüne göre üç önemli kategoriye ayrılmıştır:

Küçük değer iyi: Kalite değişkeninin değerinin küçük olmasının istendiği problemler bu tip yaklaşımla ele alınır. Kalite değişkeni için bir alt sınır olmayıp değer küçüldükçe tasarım iyileşmektedir.

Büyük değer iyi: Kalite değişkeninin değerinin büyümesinin istendiği problemler bu tip yaklaşımla ele alınır. Kalite değişkeni için bir üst sınır olmayıp değer büyüdükçe tasarım iyileşmektedir.

Nominal değer iyi: Sapmaların iki yönlü olarak değişebildiği boyutsal özellikler gibi kalite değişkeni içeren problemlerde kullanılır. Kalite değişkeninin değerinin önceden belirlenmiş nominal değere yakın olması istenir.

Çalışma kapsamında ölçülen karakteristik değerler ekstrüzyon kuvveti ve ekstrüzyon sıcaklığının en düşük değerde olması istendiğinden ‘’küçük değer iyi’’ yaklaşımına göre hesaplanan S/N oranı kullanılacaktır. Bu yaklaşıma göre S/N oranı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\eta = -10\ log_{10}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right]$$

Burada y ifadesi karakteristik değeri (ekstrüzyon kuvveti ve ekstrüzyon sıcaklığı), n ifadesi ise gerçekleştirilen simülasyon sayısını belirtmektedir. Bütün bu hesaplamalar sonucunda her faktör için belirlenen en yüksek S/N oranı en iyi simülasyon sonucuna, yani ekstrüzyon kuvvetinin ve sıcaklığının en düşük olduğu simülasyon sonucuna işaret eder. Bu aşama tamamlandıktan sonra hesaplanan S/N oranlarından yola çıkarak ANOVA gerçekleştirilecektir (Savaşkan 2004).

3.11.3 Varyans Analizi (ANOVA)

ANOVA test edilen parça gruplarının ortalama performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için kullanılan istatistiksel bir karar üretme aracıdır. Varyans analizi toplam varyasyonu bileşenlerine parçalayan ve serbestlik derecesi, karelerin toplamı, ortalama kareler vb. gibi niceliklerin hesaplanması için kullanılan matematiksel bir tekniktir.

Varyans analizinde faktörlerin farklı seviyelerinin ekstrüzyon kuvveti ve ekstrüzyon sıcaklığı üzerinde ne ölçüde değişikliğe yol açtığı incelenebilmektir. Bununla birlikte elde edilen sonuçların istatistiksel açıdan güvenilirliği de test edilir. Bu amaçla her faktörün karelerinin toplamı hesaplanır. Minitab yazılımı ile hesaplanan bu değerler Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Bağımlı değişken sürekli ölçme düzeyine sahip iken, bağımsız değişken kategoriktir ya da gruplanmıştır. Amaç, bağımsız değişkendeki gruplar boyunca bağımlı değişkene ait ortalama değerlerin birbirinden farklılık gösterip göstermediğini tespit etmektir. Bir bağımsız değişken olduğu durum tek-yönlü varyans analizi (One-Way ANOVA), iki bağımsız değişken olduğu durum ise iki-yönlü varyans analizi (Two-Way ANOVA) olarak adlandırılır. Eğer varyans analizi sonucunda grup ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık tespit edilirse, analizin devamında çoklu karşılaştırma testleri yapılarak hangi gruplar arasında farklılık olduğu tespit edilmeye çalışılır. Toplam varyasyonun bileşenleri, kalite değişkenini etkileyen faktörlerden kaynaklanan varyasyon, etkileşimlerden kaynaklanan varyasyon ve hatalardan kaynaklanan varyasyondur (Canıyılmaz 2001).

Çizelge 3.4. Varyans analizi hesaplama formülleri

Değişimin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	FHesaplanan
Deneme	k-1	KTDeneme	KO Deneme	
Hata	N-k	KT Hata	KO Hata	
Genel	N-1	KT Genel		

3.12 Taguchi Deney Tasarımı ile Modelleme

Ekstrüzyon işleminde proses optimizasyonu, proses parametrelerinin iyi araştırılmasını ve çok sayıda simülasyon yapılmasını gerektirmektedir. Bu amaç doğrultusunda DEFORM 2D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen ekstrüzyon simülasyonlarıyla her bir proses parametresi

için kuvvet-strok ve sıcaklık-strok diyagramlarının elde edilmesi gerekmektedir. Fakat her parametre için ayrı simülasyonların yapılması simülasyon sürelerinin artmasına neden olmaktadır. Tam faktöriyel deney tasarımının uygulanmasıyla toplam simülasyon sayısının yalnızca dokuzda birinin gerçekleştirilmesi ile (81 deney yerine 9 deney) hedeflenen sonuçların elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Çizelge 3.5. Taguchi L9 tasarımı

Faktör Seviyeleri				
	A	B	C	D
Simülasyon	Zımba Hızı	Biyet Sıcaklığı	Kovan Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Çalışma kapsamında toplamda 4 adet parametrenin (Zımba hızı, biyet sıcaklığı, kovan sıcaklığı, kalıp sıcaklığı) 3 seviyeli faktörleri için gerçekleştirilen simülasyonlar neticesinde her bir parametrenin maksimum profil sıcaklığı ve maksimum ekstrüzyon kuvveti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Simülasyonları gerçekleştirilen faktörler ve seviyeleri Çizelge 3.5.'de verilmiştir. Minitab yazılımı tarafından seçilen değerler Çizelge 3.6.'da sayısal değer olarak da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Taguchi L9 tasarımında faktör numaralarının sayısal değer karşılığı

Faktör Seviyeleri				
	A	B	C	D
Simülasyon No	Zımba Hızı (mm/s)	Biyet Sıcaklığı (°C)	Kovan Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)
1	5	450	410	410
2	5	470	430	430
3	5	490	450	450
4	7.5	450	430	450
5	7.5	470	450	410
6	7.5	490	410	430
7	10	450	450	430
8	10	470	410	450
9	10	490	430	410

Çizelge 3.6.'da Taguchi metoduyla belirlenen parametre değerleri DEFORM 2D sonlu elemanlar programında veri olarak girişi yapılmış. Böylelikle simülasyonlar yapılmaya başlanmıştır. Gerçekleştirilen tüm simülasyonlar yaklaşık 300±50 adım (step) kadar gerçekleştirilmiş ve sonra simülasyon sonlandırılmıştır. Her bir simülasyon yaklaşık 3 saat sürmüş olup 4. bölümde gösterilen grafikler, bu program üzerinden "export grafic" komutuyla önce excel ortamına, ardından excel grafiklerine dönüştürülmüştür. Bu grafiklerden maksimum ekstrüzyon kuvveti ve profil sıcaklıkları not alınmış ve varyans analizinde işlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Literatür Karşılaştırması

Sonlu elemanlar programının onaylanması aşamasında DEFORM 2D programına girilen Çizelge 3.2.'deki verilerin sonuçları ve literatür ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 4.1. 'de göstertmiştir. Çizelgeden anlaşılacağı üzere literatür verilerinde Maksimum sıcaklık 525^0C ve maksimum ekstrüzyon kuvveti 5.51 MN'dur. Bu çalışmada kullanılan DEFORM 2D programında elde edilen maksimum sıcaklık 523 ^{0}C ve maksimum ekstrüzyon kuvveti 5.52MN olarak bulunmuştur. Sonuçlar karşılaştırıldığında bu çalışmada elde edilen simülasyon sonuçları ile literatürdeki sonuçlar arasında tutarlılık olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.1. Literatür ve Simülasyon Sonuçları

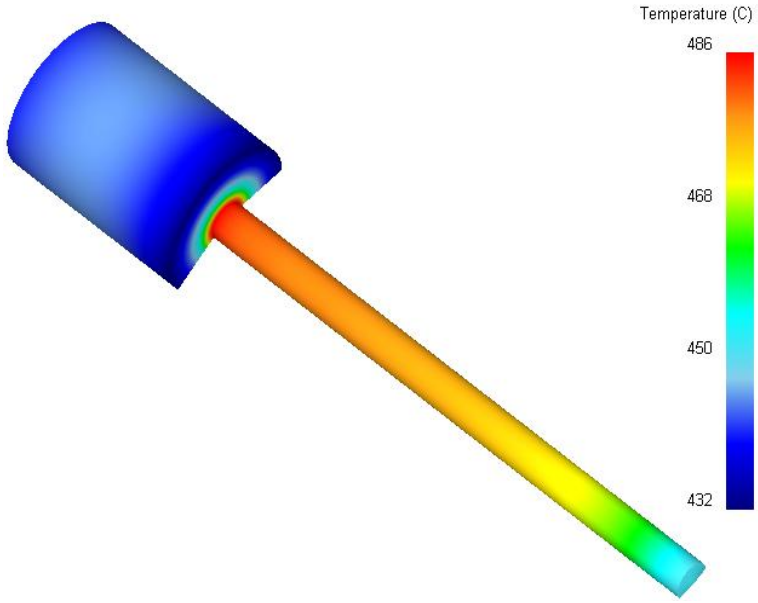
	Zımba Hızı (mm/s)	Biyet Sıcaklığı (^{o}C)	Kovan ve Kalıp Sıcaklığı (^{o}C)	Max Sıcaklık (^{o}C)	Max Kuvvet (MN)
Literatür Verileri	7.5	470	430	525	5.51
Simülasyon Verileri	7.5	470	430	523	5.52

4.2 Ekstrüzyon Sıcaklığı Bulguları

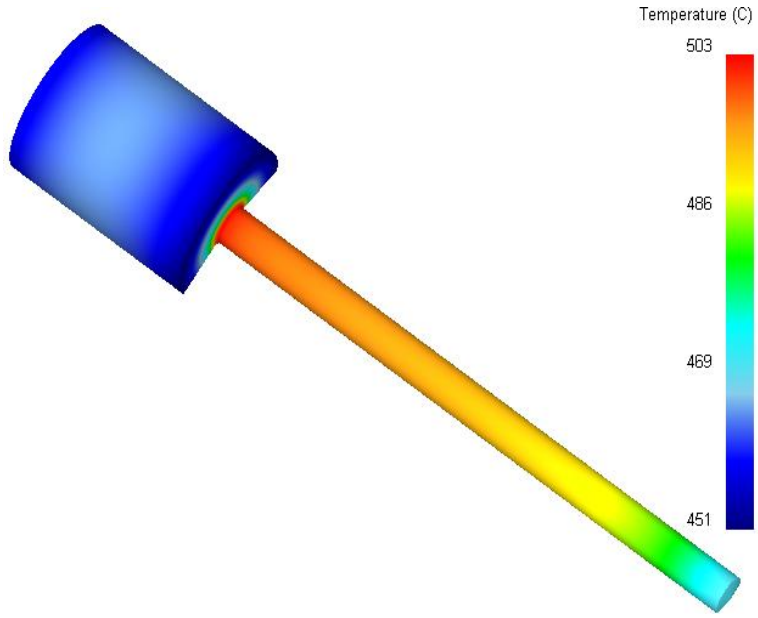
Sonlu elemanlar programı DEFORM 2D ile gerçekleştirilen simülasyonlarda ekstrüzyon sıcaklığı ve ekstrüzyon kuvveti olmak üzere 2 farklı çıktı elde edilmiştir. Aşağıda farklı proses parametrelerinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarında oluşan maksimum profil sıcaklığı ve oluştuğu bölgeler, maksimum profil çıkış sıcaklıkları ve ekstrüzyon kuvveti değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4.1' den 4.9' a kadar olan şekiller ekstürüzyon işleminde meydana gelen ısı değişimini, maksimum ve minimum sıcaklığın olduğu bölgeler gösterilmektedir. Şekil 4.10' dan 4.18' e kadar olan şekiller stroğa bağlı olarak elde edilen sıcaklık grafikleri gösterilmiş olup Şekil 4.19. ile 4.27 arasındaki şekillerde ise stroğa bağlı olarak elde edilen kuvvet grafikleri gösterilmiştir.

Ekstrüzyon sıcaklığı, ekstrüzyon işleminde dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri olmakla beraber uygulamada çoğunlukla düşük ekstrüzyon sıcaklığını tercih etmektedir. Bu konuda en önemli etken biyet malzemesi, biyet ve ürün geometrisidir. Şekil 4.1.

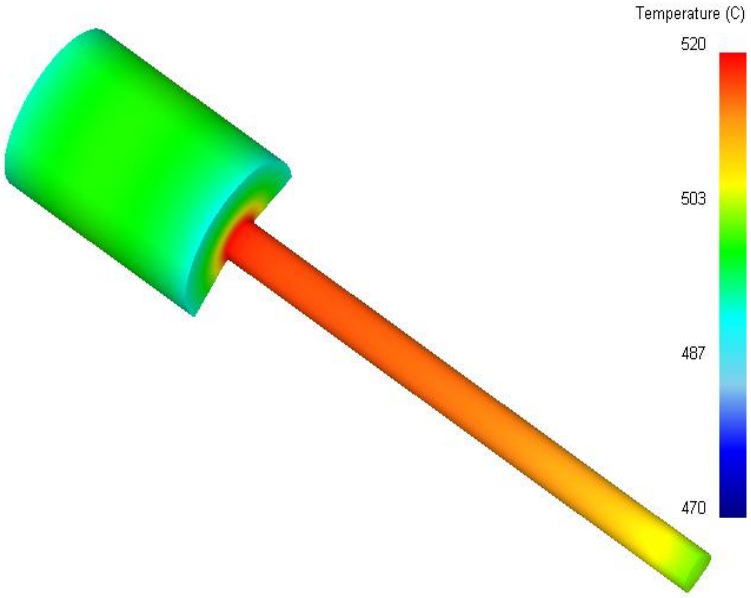
– 4.9.'da DEFORM 2D programından elde edilen şekillerde biyet ve sıcaklık skalası gösterilmiştir. Her bir biyette oluşan maksimum ve minimum sıcaklık bölgeleri ve bu bölgelerin sıcaklık değerleri Şekiller halinde sunulmuştur.



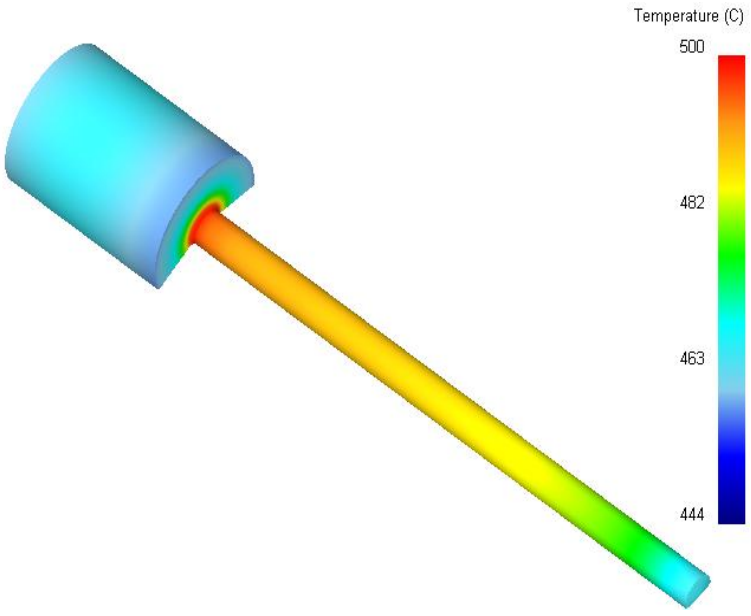
Şekil 4.1. 1 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları



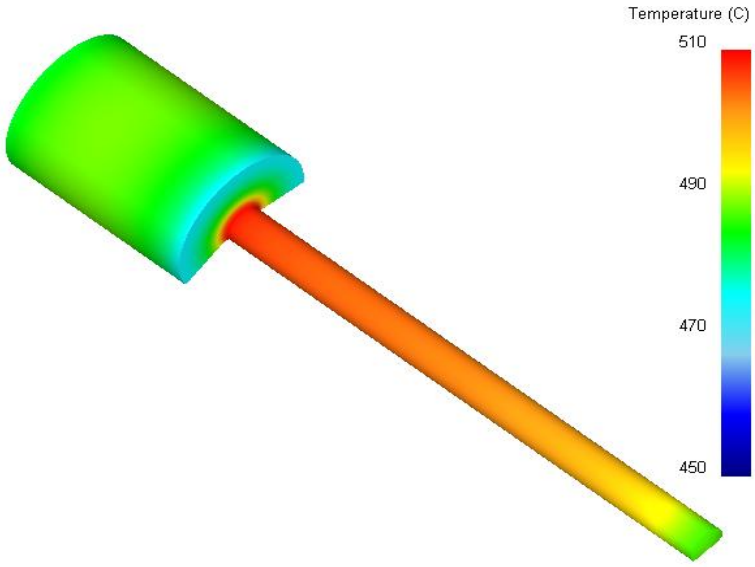
Şekil 4.2. 2 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları



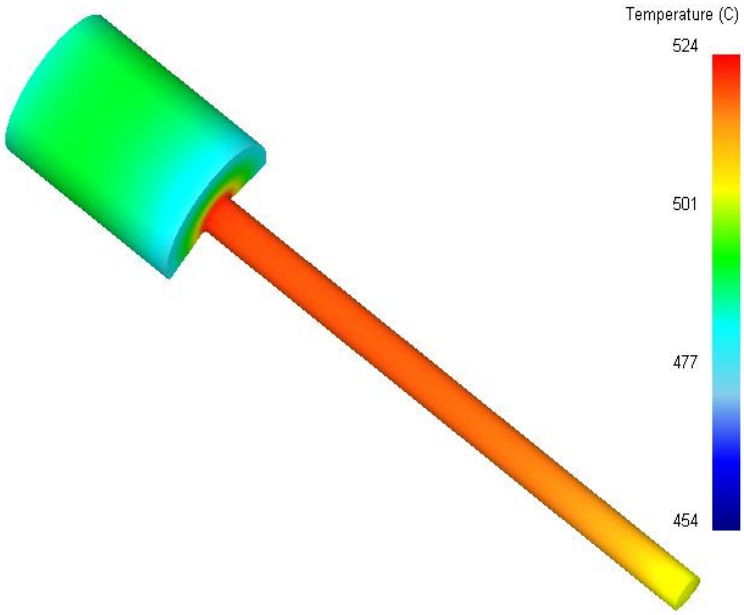
Şekil 4.3. 3 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları



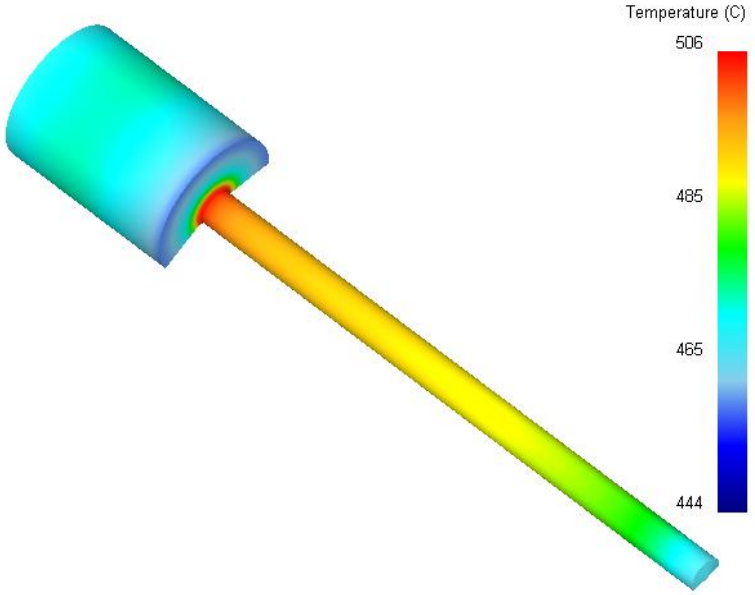
Şekil 4.4. 4 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları



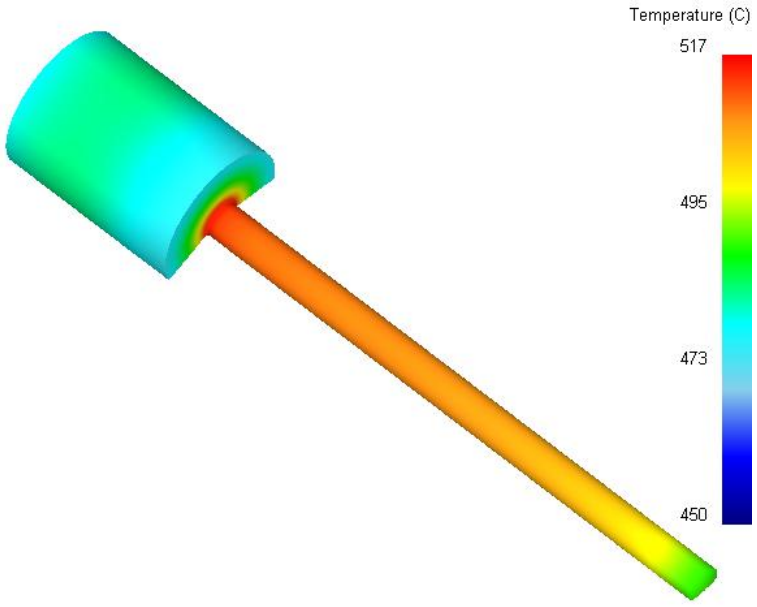
Şekil 4.5. 5 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları



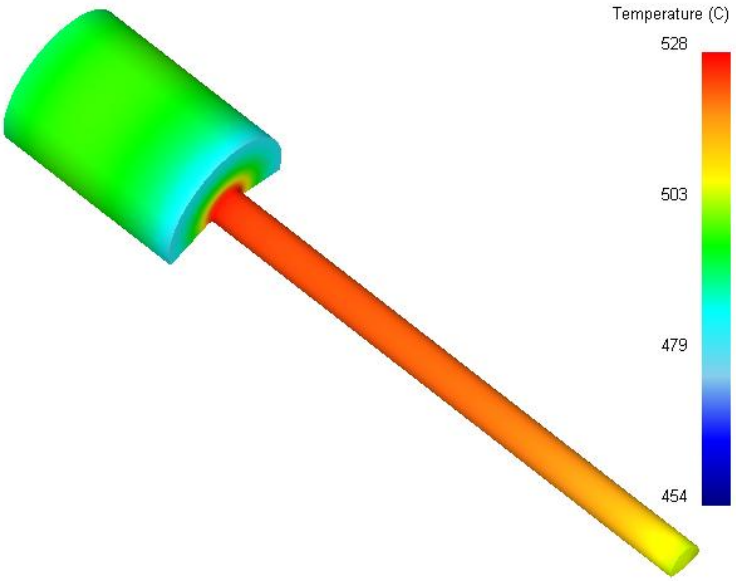
Şekil 4.6. 6 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları



Şekil 4.7. 7 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları



Şekil 4.8. 8 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları



Şekil 4.9. 9 numaralı simülasyona ait profil sıcaklıkları

Şekil 4.1. 'den 4.9.'a kadar görülen simülasyonlarda oluşan sıcaklık değişimi ve gözlemlenen maksimum sıcaklık noktaları gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere ekstrüzyon sürecinde maksimum sıcaklığın oluştuğu nokta kalıp ağzı kısmıdır. Bu bölgede meydana gelen yüksek sürtünme kuvvetleri bölgede oluşan sıcaklığı arttırmaktadır. Yüksek sürtünme ile meydana gelen sıcaklık artışı malzemeyi sünekleştirerek malzeme akışını kolaylaştırır. Böylece ekstrüzyon işleminde gereken ekstürüzyon kuvvetleri azalmaktadır. Fakat aşırı ısınan biyet malzemesi bazı durumlarda ekstrüzyon hatalarına neden olabilir.

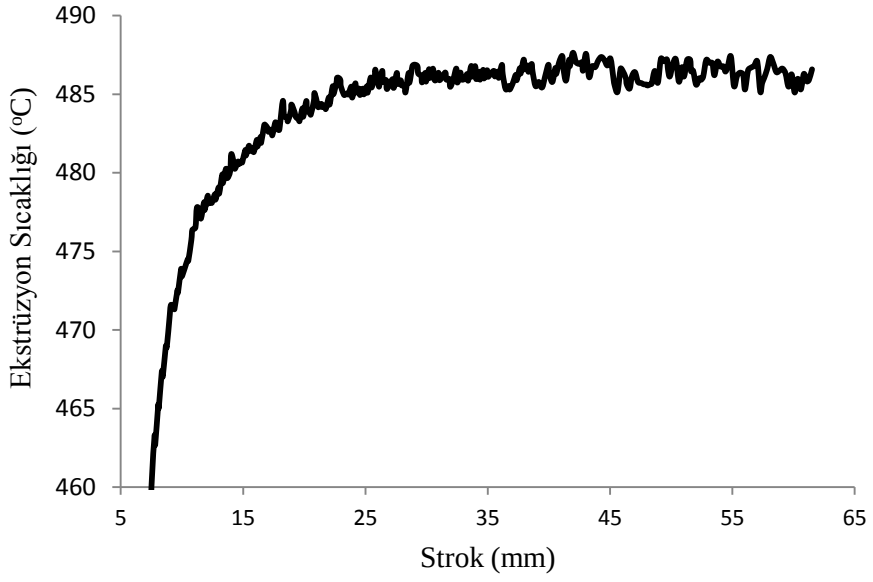
Kalıp ağzında sıcaklığın aşırı arttığı durumlarda biyet, kalıba kaynayıp yapışabilir. Kalıbın kullanılamaz hale geldiği yapışma durumu haricinde aşırı sıcaklık değişimlerinde kalıp genişleyip büzülerek boyut hassasiyetini kaybedebilmektedir. Ayrıca aşırı sıcak malzemenin kalıptan aldığı şekli koruması zorlaşmaktadır. Bu durumlar kalitesiz ürüne, malzeme ve zaman kaybına yol açmaktadır. Bundan dolayı işlem esnasında oluşacak maksimum sıcaklık değerlerinin bu çalışmada gerçekleştirildiği gibi önceden simülasyon ile öngörülmesi önem arz etmektedir. Öte yandan, ekstrüzyon işleminde sıcaklık kontrolü ve ekstrüzyon işleminin sıklığına bağlı olarak haftalık, aylık 3 aylık gibi sürelerde veya belirli bir profil ile üretimin tamamlanmasının ardından kalıp bakımı yapılması önemlidir. Ayrıca kalıp soğutucu sistemler kullanılmakla beraber zımba hızının ve biyet sıcaklığının azaltılmasıyla da sıcaklık kontrolü

yapılabilmektedir.

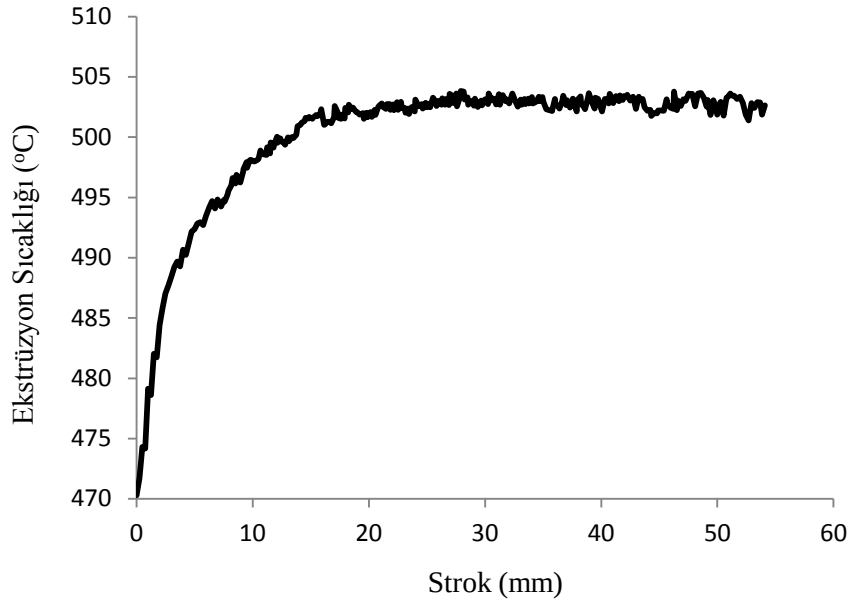
Şekillerde bulunan sıcaklık skalasında ekstrüzyon işlemi boyunca ulaşılan maksimum ve minimum sıcaklık noktaları gösterilmiştir. Cetvel üzerinde gösterilen maksimum ve minimum noktaları, biyetin başlangıç sıcaklığının yüksek veya düşük olmasıyla doğru orantılıdır. Yüksek biyet sıcaklıklarında ve yüksek zımba hızlarında yapılan ekstrüzyon işlemlerinde sistemin ulaştığı maksimum profil sıcaklıkları daha yüksek olduğu görülmektedir.

Tüm simülasyonların grafiklerine bakıldığında ulaşılan maksimum sıcaklığın 528 ^{o}C olduğu görülmüştür. Bunun başlıca nedenleri biyet sıcaklığının belirlenen değerlerdeki en yüksek değer olan 490 ^{o}C olması ve zımba hızının en yüksek değer olan 10 mm/s olmasıdır. Daha önce belirtildiği gibi yüksek zımba hızı ve yüksek malzeme sıcaklıkları yüksek profil sıcaklığına neden olmaktadır.

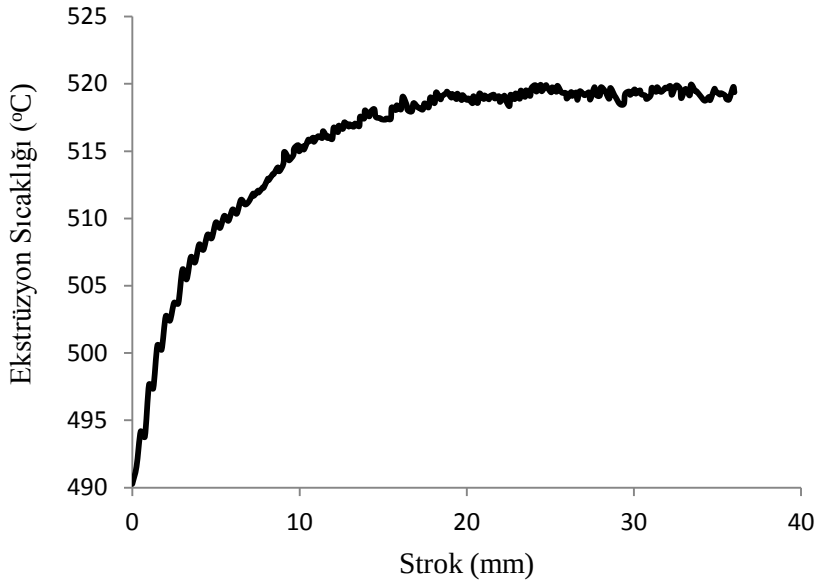
Ayrıca tüm ısı dağılımı şekillerde görüldüğü üzere biyet sıcaklıkları eş dağılımlı değildir. Başlangıçta biyet sıcaklığı düzgün dağılımlı olsa da zımba kuvveti, sürtünme ve sıkışmadan dolayı sıcaklık farklılaşmaya başlamıştır. Benzer durum kovan ve ürün için de geçerlidir. Kovan ve profil sıcaklıkları içeriden dışarıya doğru azalmıştır. Bu durum iç sıcaklığın arttığını göstermektedir.



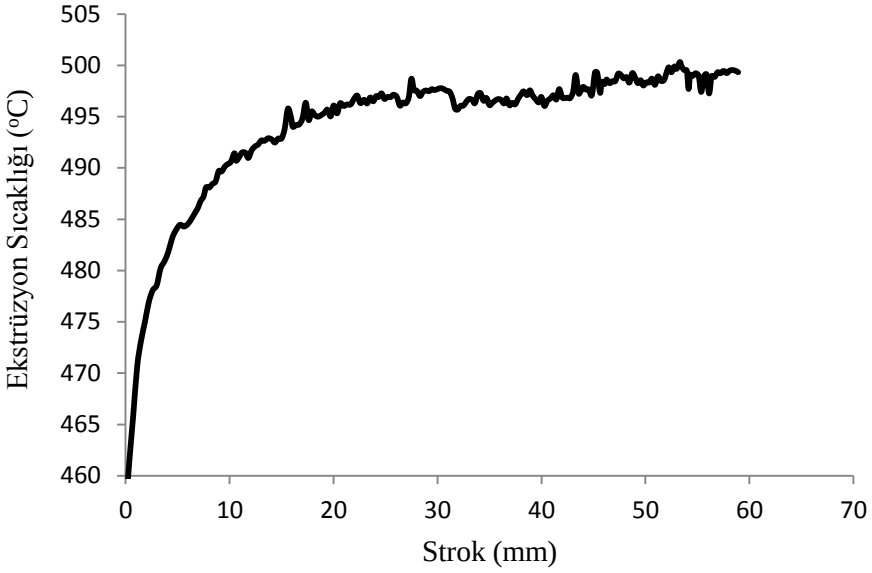
Şekil 4.10. 1 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği



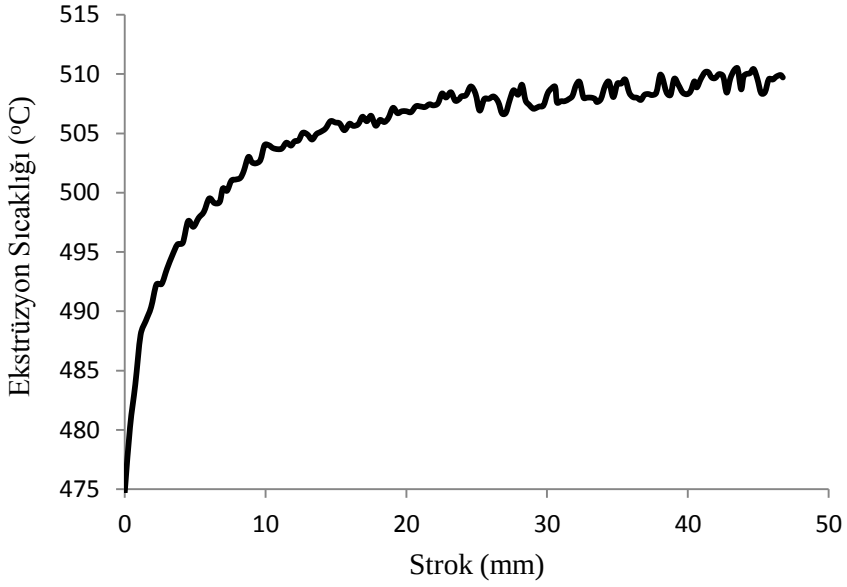
Şekil 4.11. 2 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği



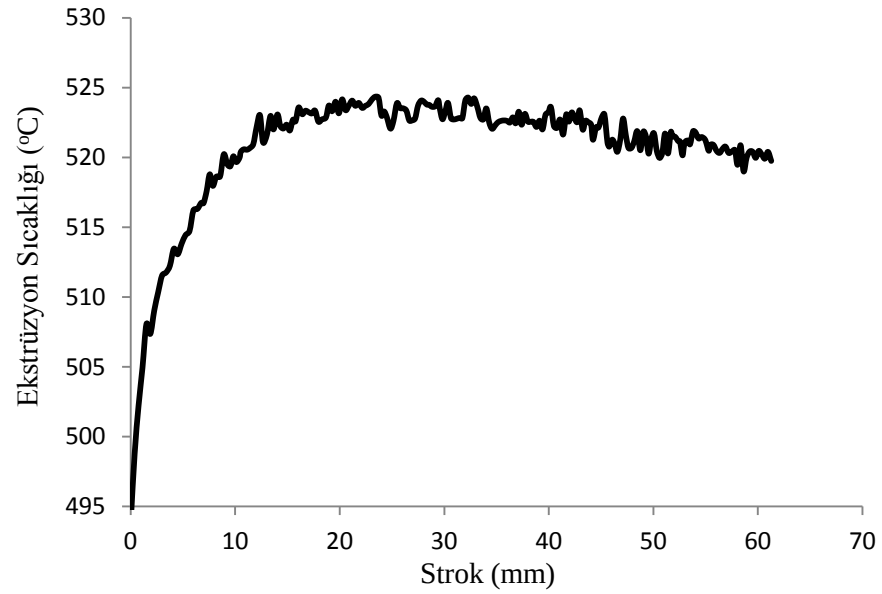
Şekil 4.12. 3 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği



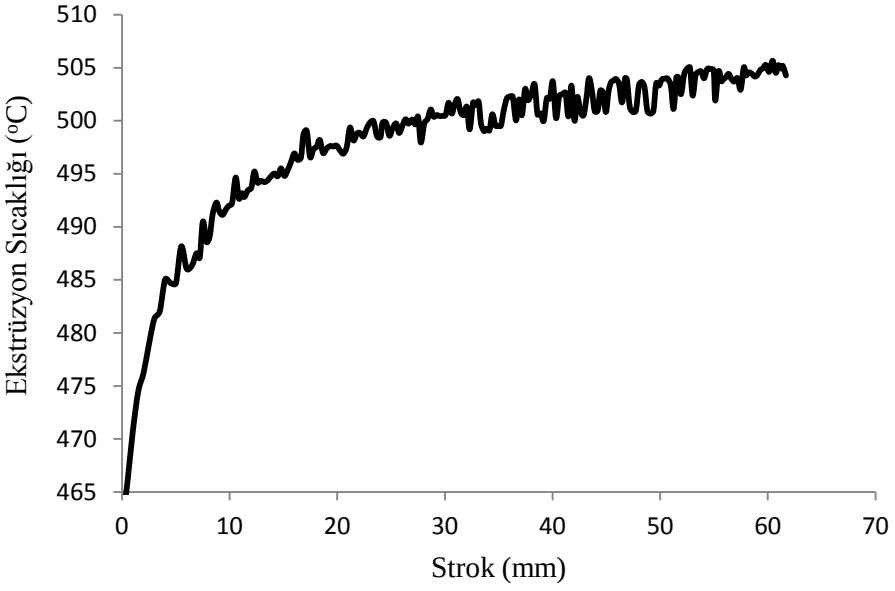
Şekil 4.13. 4 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği



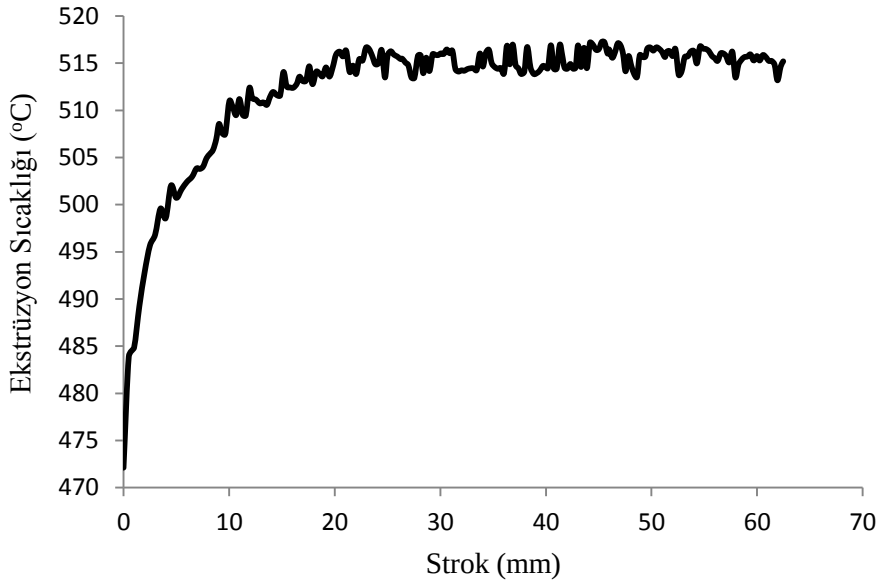
Şekil 4.14. 5 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği



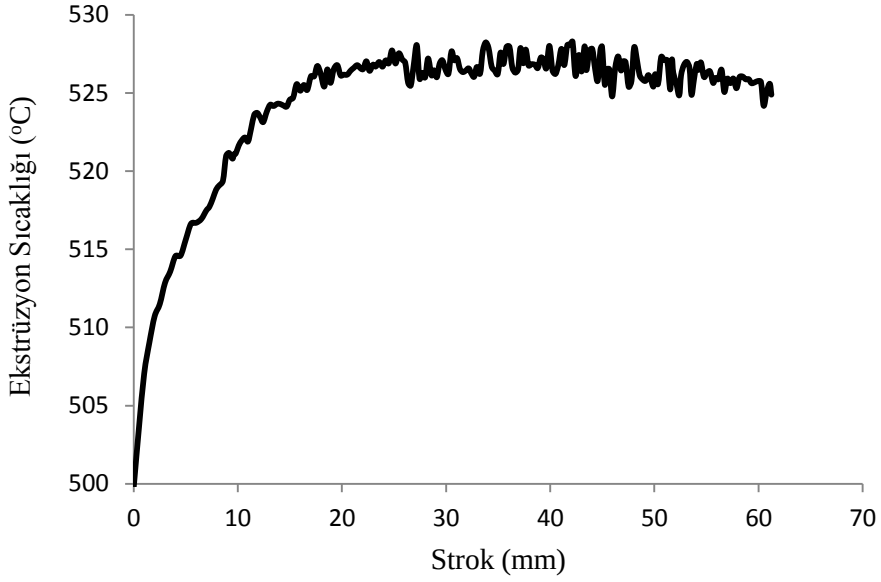
Şekil 4.15. 6 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği



Şekil 4.16. 7 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği



Şekil 4.17. 8 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği



Şekil 4.18. 9 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon sıcaklığı grafiği

Şekil 4.10.'den Şekil 4.18.'e kadar olan kısımda ekstrüzyon sürecinde meydana gelen ısı değişiminin stroğa bağlı değişimi gösterilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere strok başlangıcı ile ekstrüzyon sıcaklığı aniden artmaktadır. Strok süresince bu sıcaklık artış oranı azalmaktadır. Fakat sıcaklık değişimi ekstrüzyon işleminin sonuna kadar devam etmektedir. Sıcaklık artışına neden olan en büyük etmen sürtünmedir. Sürtünmeden kaynaklanan ısı oluşumu ısı transferi il

kovan ve kalıp sıcaklıklarının artmasına neden olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı ekstrüzyon işlemi boyunca sıcaklık değişimi oluşmaktadır.

Gerçekleştirilen ekstrüzyon işlemlerinde yapılan işin büyük bir bölümü sıcaklığa dönüşür. Bu plastik deformasyon sırasında sıcaklık birkaç yüz derecelere kadar çıkabilmektedir. Sıcaklık en önemli ekstrüzyon parametrelerinden biridir. Sıcaklık ekstrüzyon kuvvetlerini azalttığı gibi plastik deformasyonları da kolaylaştırmaktadır. Fakat yüksek sıcaklık malzemenin erimesine sebep olabileceğinden daha yüksek zımba hızlarında çalışılması önünde bir engel teşkil eder. Ekstrüzyon işleminde sıcaklığın değişmesine birçok parametre etki eder. Bunlar;

1. Biyet başlangıç sıcaklığı
2. Belirli bir sıcaklıktaki malzemenin akma gerilmesi ve gerinim oranları
3. Kovan ile biyet, ölü metal ile biyet, biyet ile kalıp arasındaki sürtünmeler
4. Isı transferleri
5. Ekstrüzyon oranı
6. Biyet malzemesi
7. Zımba hızı

Biyet başlangıç sıcaklığı ne kadar yüksek ise proses süresince sıcaklık daha da yüksek olacaktır. Biyet malzemesinin özellikleri sıcak veya soğuk ekstrüzyonlardan hangisinin seçileceğine karar vermede önemli bir etkendir. Sert malzemeler sıcak ekstrüze edilirken sünek malzemeler ılık veya soğuk ekstrüze edilir. Direk ekstrüzyonda biyet kovan ile temas halinde olduğu için hem ekstrüzyon kuvvetlerinin artmasına hem de sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Ayrıca direk ekstrüzyonda daha fazla ölü metal olması biyetin iç sürtünmesini arttırarak sıcaklığı arttırmaktadır.

Çizelge 4.2.'de simülasyonlar sonucu meydana gelen maksimum kuvvet ve sıcaklıklar gösterilmiştir. Çizelgeden anlaşıldığı üzere en yüksek ekstrüzyon sıcaklığı 9 numaralı simülasyonda oluşmuştur. Çizelge 3.5.'den hatırlanılacağı üzere bu simülasyonda zımba hızı ve biyet sıcaklığı 3. değer, kovan sıcaklığı 2. ve kalıp sıcaklığı 1. değer olarak alınmıştır. Bu kapsamda yüksek ekstrüzyon sıcaklığının oluştuğu bu simülasyonda biyet sıcaklığının ve zımba hızının en yüksek değerinin seçildiği görülmüştür. Yapılan bu çalışma kapsamında en düşük ekstrüzyon sıcaklığı arandığı için Çizelge 4.2.'den en düşük ekstrüzyon sıcaklığının olduğu simülasyon olan 1 numaralı simülasyon incelendiğinde, bütün proses parametrelerinin 1. değeri seçildiği, Çizelge 3.5.'den görülmektedir.

Çizelge 4.2. Simülasyonlar Sonucu Elde Edilen Max. Kuvvet ve Ekstrüzyon Sıcaklığı

Parametreler (Girdi)					Sonuçlar (Çıktı)	
	A	B	C	D	N	T
Simülasyon No	Zımba Hızı (mm/s)	Biyet Sıcaklığı (°C)	Kovan Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Max. Ekstrüzyon Kuvveti (MN)	Max. Ekstrüzyon Sıcaklığı (°C)
1	5	450	410	410	5,84	488
2	5	470	430	430	5,34	504
3	5	490	450	450	4,86	520
4	7.5	450	430	450	6	500
5	7.5	470	450	410	5,54	510
6	7.5	490	410	430	5,18	524
7	10	450	450	430	6,19	506
8	10	470	410	450	5,81	517
9	10	490	430	410	5,36	528

4.3 Ekstrüzyon Kuvveti Bulguları

Şekil 4.19. ile Şekil 4.27. arasında ekstrüzyon simülasyonlarından elde edilen, stroğa bağlı kuvvet grafikleri görülmektedir. Ekstrüzyon işlemlerinin ilk stroklarında kuvvetin birden artmakta olduğu görülmektedir. Bu süreçte zımba, biyeti kalıp ağzına itmekte ve biyet, kovan içini doldurmaya başlamaktadır. Grafiklerden görüldüğü üzere direk ekstrüzyon işlemlerinde sistemin ulaştığı maksimum kuvvet noktası genellikle zımbanın biyeti kalıptan geçmeye zorladığı ilk adımlarda oluşmaktadır. Maksimum kuvvet noktası geçildikten sonra ekstrüzyon kuvveti yavaşça azalmaktadır. Ekstrüzyon kuvvetinin gittikçe azalmasında, azalan malzeme miktarı büyük oranda etkiliyken süreç boyunca artan sıcaklık da bir miktar etkilidir.

Ekstrüzyon kuvvetine etki eden parametreler:

1. Ekstrüzyon sıcaklığı

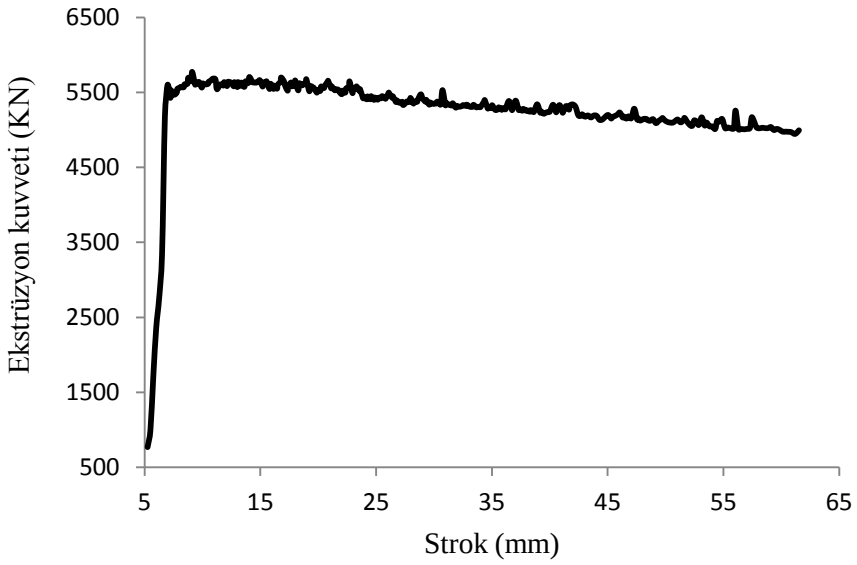
2. Kalıp, biyet, kovan ve teçhizat sıcaklığı

3. Ekstrüzyon oranı

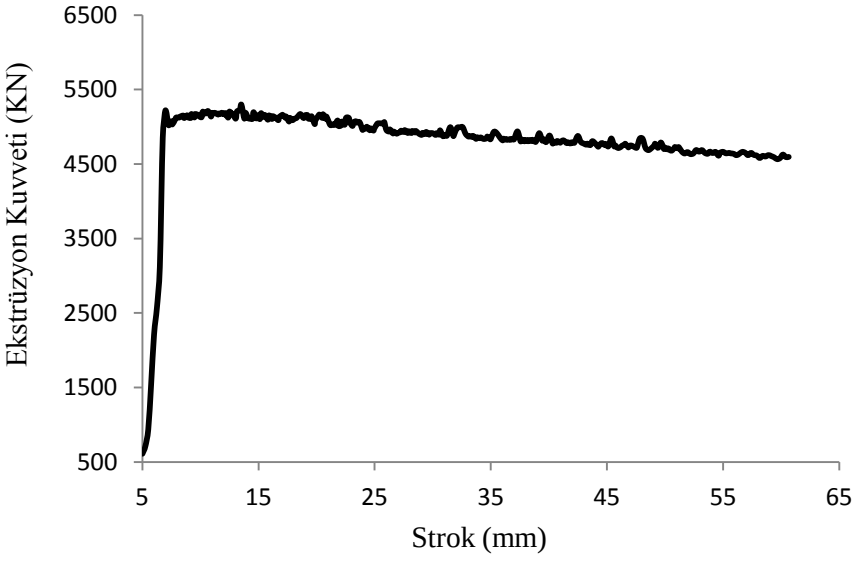
4. Ekstrüzyon hızı

5. Biyet uzunluğu

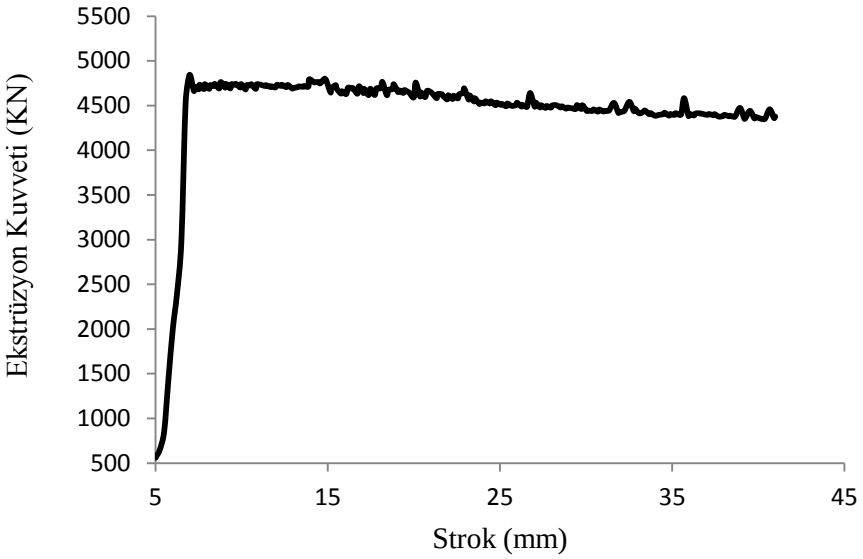
6. Biyet malzemesidir.



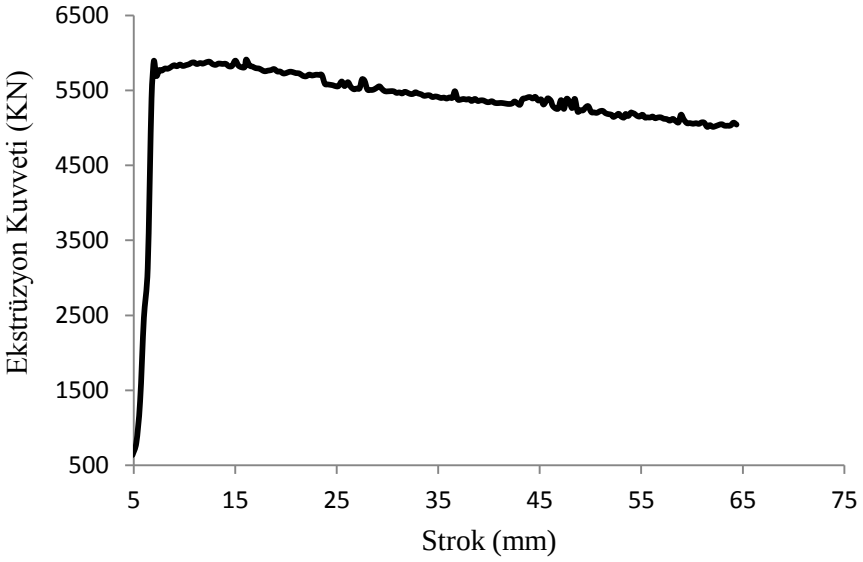
Şekil 4.19. 1 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği



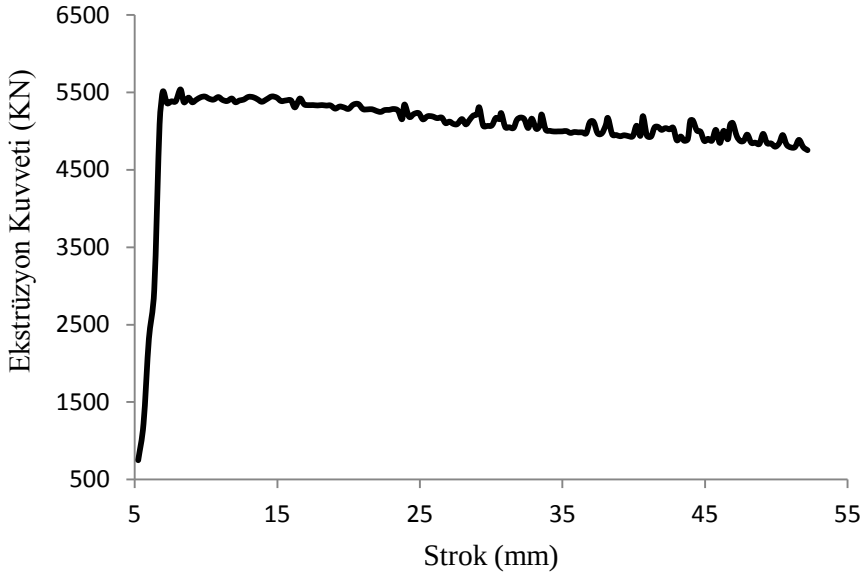
Şekil 4.20. 2 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği



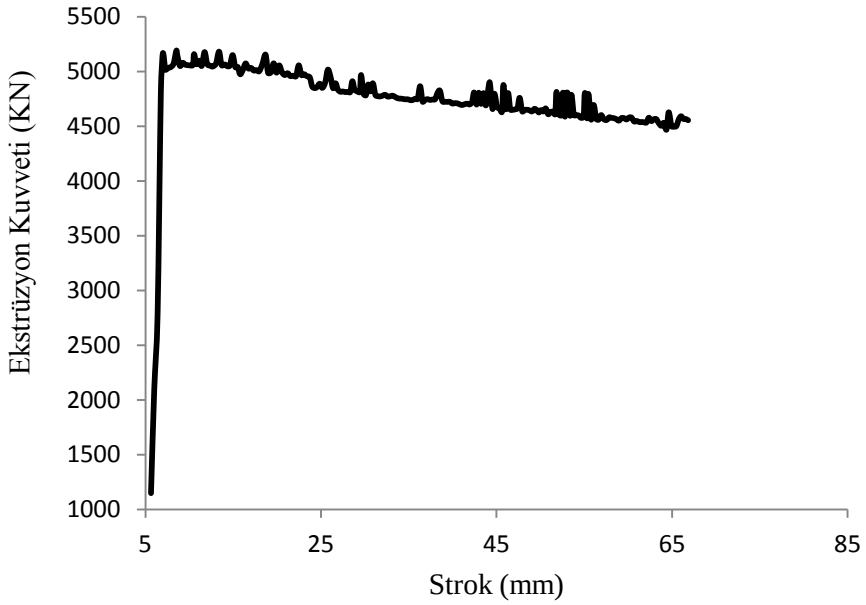
Şekil 4.21. 3 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği



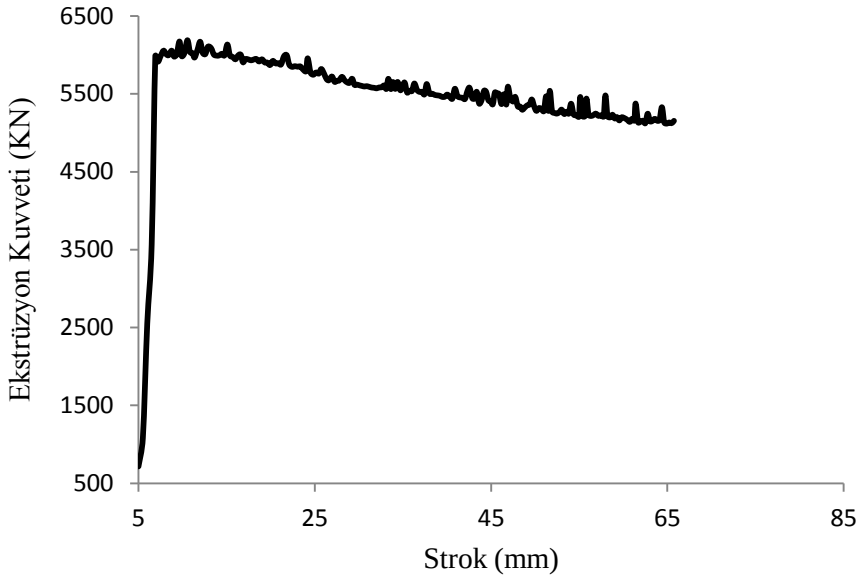
Şekil 4.22. 4 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği



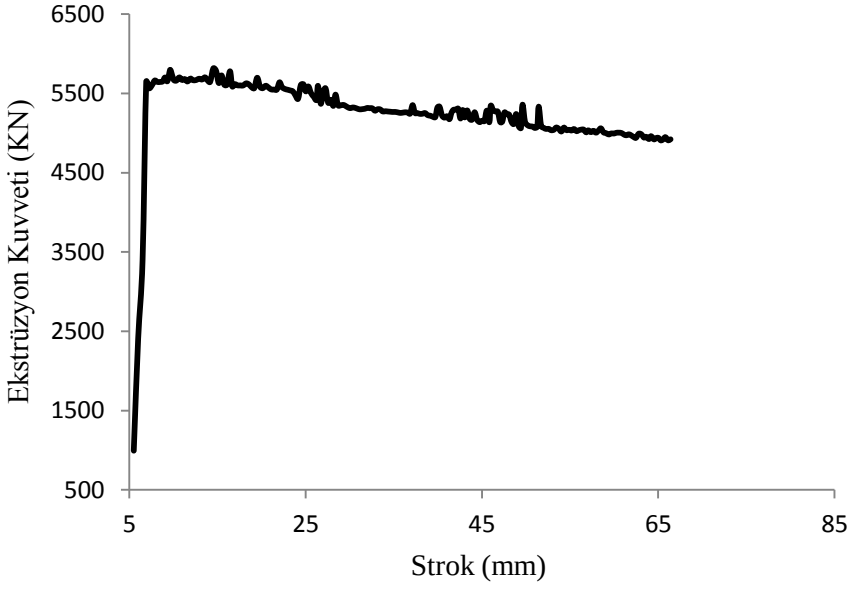
Şekil 4.23. 5 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği



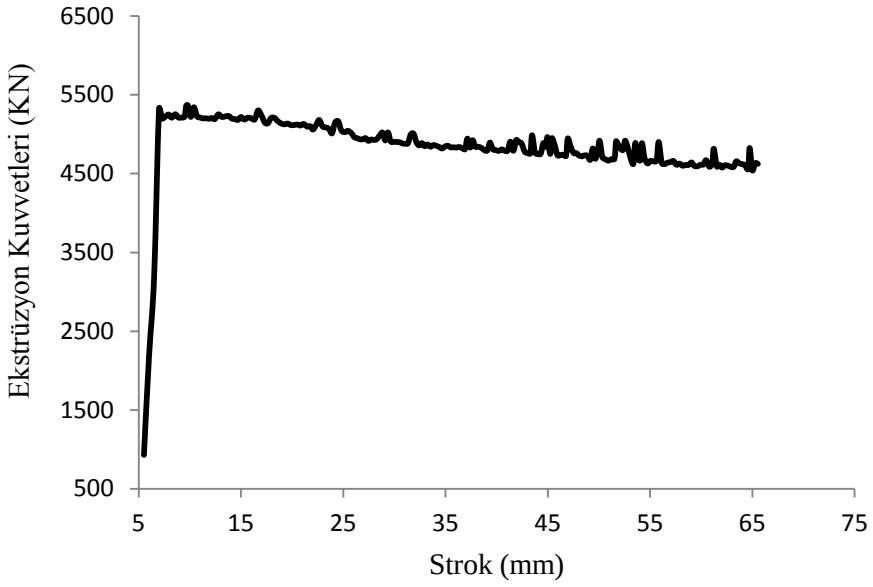
Şekil 4.24. 6 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği



Şekil 4.25. 7 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği



Şekil 4.26. 8 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği



Şekil 4.27. 9 numaralı simülasyona ait ekstrüzyon kuvveti grafiği

Malzemelerin uzunluğu arttıkça şekil değiştirme direnci de artmaktadır. Bu durum ekstrüzyon işlemlerinde de geçerlidir. Bu sebeple uzun biyetlerin ekstrüzyonunda daha fazla ekstrüzyon kuvveti uygulanması gerekir. Malzeme miktarı azaldıkça direnç de azalacağı için ekstrüzyon işleminde kuvvet süreç boyunca azalır.

Biyet malzemesi ekstrüzyon kuvveti üzerine etkiyen bir diğer parametredir. Biyetin gevrek veya sünek yapılı olması ve mekanik özellikleri ekstrüzyon kuvvetinin artmasına veya azalmasına etki etmektedir. Sert ve kırılgan malzemelerin ekstrüzyonunun zor olması ve gereksinim duyulan kuvveti arttırması nedeniyle sıcak ekstrüze edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 4.2. 'de simülasyonlar arasındaki en yüksek ekstrüzyon kuvveti 6190 KN ile 7 numaralı simülasyonda oluştuğu saptanmıştır. 7 numaralı simülasyonda seçilen değerlerden görüldüğü üzere başlangıç sıcaklık değerleri düşük, zımba hızı ise yüksektir. Çizelge 4.2.'de en düşük ekstrüzyon kuvveti ise 4086 KN ile 3 numaralı simülasyonda gözlemlenmiştir. Bu simülasyonda tüm başlangıç sıcaklık değerleri maksimum ve zımba hızı minimum değerdedir.

4.4 Taguchi Bulguları

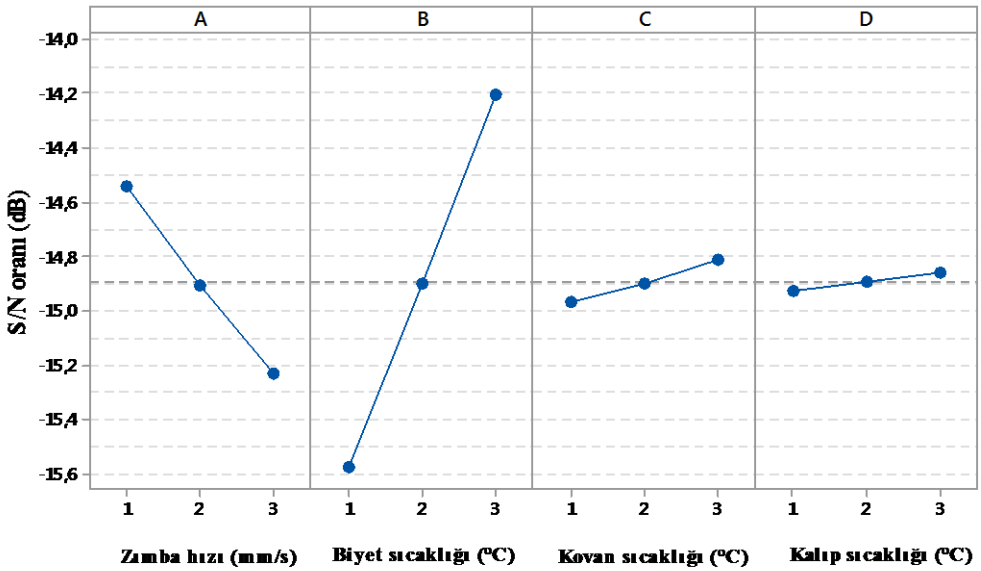
Çizelge 3.5.'de belirtilen Taguchi ortogonal düzenine göre gerçekleştirilen sonlu elemanlar simülasyonları neticesinde her bir parametre için maksimum ekstrüzyon kuvveti ve ekstrüzyon sıcaklığı sonuçları elde edilmiştir.

Şekil 4.3.'de ekstrüzyon kuvveti için elde edilen S/N oranları gösterilmektedir. Grafiklerde belirtilen 1, 2, 3 rakamları parametreler için seçilen değerlerdir. 1 değeri her

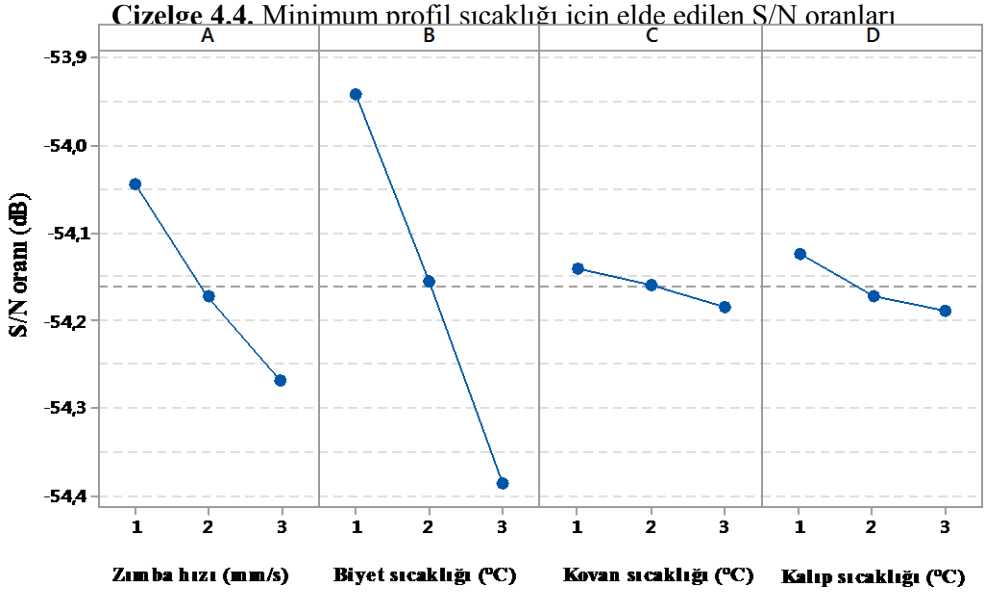
parametrenin en düşük değeri, 2 orta değer ve 3 en büyük değerdir. Örnek verilecek olunursa zımba hızı için 1=5 mm/s, 2=7.5 mm/s ve 3=10 mm/s dir. Çizelge incelendiğinde her parametrenin orta değeri bir hizaya getirilerek yatayda bir çizgi oluşturulmuştur. En küçük en iyidir iyilemesi kullanıldığı varyans analizlerinde elde edilen bu yatay çizginin üstünde kalan noktalar, hedeflenen optimizasyon için en iyi sonucu veren noktalardır. Bu sebeple minimum ekstrüzyon kuvveti için uygun parametre değerleri A1B3C3D3'dür. Yani zımba hızı için 5 mm/s,biyet sıcaklığı için 490 ^{o}C, kovan ve kalıp sıcaklıkları için de 450 ^{o}C 'dir.

Çizelge 4.3. incelendiğinde tüm proses parametrelerinin lineer olarak arttığı veya azaldığı görülmektedir. Parametrelerden en büyük genliğe sahip olanın en etkili parametre olduğu bilindiğinden ekstrüzyon kuvvetin optimizasyonunda en etkili parametrenin biyet sıcaklığı olduğu görülmüştür. Biyet sıcaklığının en yüksek olduğu noktalarda çoğunlukla gerekli ekstrüzyon kuvveti minimumdur. İkinci en etkili proses parametresi zımba hızı olarak görülmektedir. Düşük zımba hızlarında, ekstrüzyonda için gereken kuvvet azaltmaktadır. Zımba hızının artması ekstrüzyon kuvvetini arttıracağı gibi sistemin daha fazla ısınmasına da yol açmaktadır. Oluşacak yüksek ekstrüzyon kuvveti ve sıcaklık hem malzeme profiline ve kalitesine hem de kalıp ve takım ömrüne zararlı etkide bulunmaktadır. Son olarak Çizelge 4.3.'teki verilerinden görüldüğü üzere sisteme en az etki eden parametre kalıp sıcaklığıdır. Her ne kadar az etkiye sahip gibi görünse de kalıp sıcaklığının etkisi de yadsınamaz. Yüksek kalıp sıcaklıklarında kalıp ile biyet arasında yapışma ve kaynamalar olabilmektedir. Bu sebeple kalıp sıcaklığı her ne kadar etkisi az bir parametre gibi görünse de ekstrüzyon hatalarının oluşumunu engellemek için bu parametrenin kontrolü de önemlidir.

Çizelge 4.3. Minimum ekstrüzyon kuvvet için elde edilen S/N oranları



Cizelge 4.4. Minimum profil sıcaklığı için elde edilen S/N oranları



Çizelge 4.4. de minimum profil sıcaklığını elde etmek için oluşturulan S/N diyagramı gösterilmektedir. Kuvvet grafiğinde olduğu gibi sıcaklık grafiğinde de en etkili parametrenin biyet sıcaklığı sonrasında ise zımba hızı olduğu görülmektedir. Şekil 4.3.' den farklı olarak kalıp sıcaklığı kovan sıcaklığına göre minimum profil sıcaklığı üzerinde daha çok etki etmektedir. Minimum ekstrüzyon sıcaklığını elde etmek için seçilmesi gereken parametreler A1B1C1D1 olduğu Çizelge 4.4.'de görülmektedir. Diğer bir deyişle minimum profil sıcaklığının elde edildiği parametre değerleri; zımba hızı için 5 mm/s, biyet sıcaklığı için 450 ^{o}C, kalıp ve kovan sıcaklıkları için ise 410 ^{o}C olduğu durumda minimum profil sıcaklığı elde edilir.

Bu çizelgelerden anlaşıldığı üzere minimum ekstrüzyon kuvveti için yüksek biyet sıcaklığı seçilmesi gerekirken, minimum profil sıcaklığı için düşük biyet sıcaklığı seçilmesi gerekmektedir. Bu sonuç minimum ekstrüzyon kuvveti, minimum profil sıcaklığına ters orantılı olduğunu göstermektedir. Minimum ekstrüzyon kuvvetinin elde edildiği durumlarda yüksek profil sıcaklığı meydana gelirken; minimum profil sıcaklığının hedeflendiği durumlarda ekstrüzyon kuvveti yüksek çıkmaktadır. Bu sebeple üreticiler, biyet malzemesinin özelliklerine ve ürün geometrisine göre profil sıcaklığının mı yoksa ekstrüzyon kuvvetinin mi daha kritik öneme sahip olduğuna karar verip bu konuda öncelik atamaları gerekmektedir.

Bir diğer önemli husus ise küçük ebatlı ürünlerin ekstrüzyonudur. İnce cidarlı malzemelerde biyet çapına bağlı olarak hem yüksek ekstrüzyon oranı yüksektir ve gerekli ekstrüzyon kuvveti fazladır. Üreticinin ekstrüzyon kuvvetinin düşürmek amacıyla proses ve dolayısıyla ürün sıcaklığını arttırılması ise ürünün eriyik ve kusurlu çıkmasına sebep olacağı gibi, kalıp yüzeyine yapışmalara da sebep olabilmektedir. Bu olumsuzlukların bertaraf edilmesi amacıyla kalıp sıcaklığı özel bir tertibat ile sürekli kontrol altında tutulabilinir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu çalışmada ekstrüzyon işlemindeki üretim parametrelerinin ekstrüzyon kuvveti ve profil sıcaklığı üzerindeki etkisinin incelenmesi ve ekstrüzyon prosesinin optimizasyonu hedeflenmiştir. Bu kapsamda ilk aşamada, sonlu elemanlar programı DEFORM 2D programının tutarlılığı literatürden alınan bir çalışma ile mukayese edilmiştir. Mukayese sonucunda bu çalışmadaki simülasyon sonuçlarının kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Çalışmanın ikinci aşamasında simülasyon sayısı Taguchi yöntemi ile belirlenmiş böylelikle 81 simülasyon yapılması gerekirken, bu sayı 9'a indirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında DEFORM 2D programında gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen veriler ANOVA ile incelenerek her bir proses parametresinin maksimum ekstrüzyon kuvveti ve maksimum sıcaklığa ne kadar etki ettiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

Gerçekleştirilen simülasyonlarda gözlemlenen tüm sıcaklıklar üretimde oluşan sıcaklık toleransları içindedir. Yapılan çalışma kapsamında incelenen parametreler arasında profil sıcaklığı için en önemli parametrenin biyet sıcaklığı olduğu daha sonra ise zımba hızı olduğu gözlemlenmiştir. Kalıp ve kovan sıcaklığının profil çıkış sıcaklığına çok düşük oranda etki ettiği görülmüştür. Maksimum ekstrüzyon sıcaklığının 9 numaralı simülasyonda oluştuğu; minimum ekstrüzyon sıcaklığın da 1 numaralı simülasyonda oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu sebeplerden ötürü ekstrüzyon sıcaklığının düşük tutulması istenildiği durumlarda zımba hızı için 5 mm/s, biyet sıcaklığı için 450 ^{o}C, kovan sıcaklığı için 410 ^{o}C ve kalıp sıcaklığı için 410 ^{o}C seçilmesinin uygun olacağı öngörülmüştür.

Ekstrüzyon işleminin gerçekleştirilmesi için gerekli ekstrüzyon kuvvetinin incelendiği grafiklerde gözlemlenen tüm ekstrüzyon kuvvet değerleri üretimde oluşan kuvvet değerleri sınırları içindedir. İncelenen verilerden ekstrüzyon kuvveti oluşumundaki en önemli parametrenin biyet sıcaklığı sonrasında ise zımba hızı olduğu anlaşılmıştır. Kalıp sıcaklığı ve kovan sıcaklığının ekstrüzyon kuvvetine etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen simülasyonlardan 3 numaralı simülasyonda minimum ekstrüzyon kuvveti oluştuğu, 7 numaralı simülasyonda ise maksimum kuvvetin oluştuğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında ekstrüzyon kuvvetinin düşük tutulması istenildiği durumlarda zımba hızı için 5 mm/s, biyet sıcaklığı için 490 ^{o}C, kovan sıcaklığı için 450 ^{o}C ve kalıp sıcaklığı için 450 ^{o}C seçilmesinin uygun olacağı öngörülmüştür.

Ekstrüzyon yönteminde çok fazla proses parametresi bulunması, konu üstünde birçok araştırma yapılmasına sebep olmakla birlikte; yapılan her çalışma ekstrüzyon teknolojisinin küçük bir parçasını inceleyebilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada simülasyon gerçekleştirme sürelerinin uzunluğu sebebiyle Taguchi metoduna başvurulmuş ve simülasyon

sayısı azaltılmıştır. Taguchi metodu, her ne kadar düşük simülasyon sayısı sunarak çalışmayı kolaylaştırsa da; daha fazla simülasyon yapılması, sonuçların daha detaylı olmasını sağlayacaktır. Ayrıca bu çalışmada sadece Al6061 malzemesine göre yapılmış olup, başka malzemeler için sonuçlar farklılık gösterecektir. Üretimde ekstrüzyon yöntemini kullanan imalatçıların, operatör tecrübeleri ve deneme yanılma yöntemine dayanarak üretim yapma eğiliminde olmalarına rağmen; sonlu elemanlar programlarının avantajları görülerek kullanılmaya başlanması ve bu programların kullanımının yaygınlaştırması ile ekstrüzyon yönteminin iyileştirilmesi imalat sektörü için önem arz etmektedir.

6. KAYNAKLAR

1. Atmaca, B., 1996. Alüminyum Ekstrüzyon Prosesi Ve Devre Ekipmanlarının Boyutlandırılması.Yüksek lisans tezi.Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
2. Bakhshi, M., Saboori, M., Noorani, M., Hosseinipour, S.J., 2007. Combined upper bound and slab method, finite element and experimental study of optimal die profile in extrusion. Materials and Design 28 1812–1818
3. Bingöl, S., 2001. Sürekli ekstrüzyonda kaynama olayı ve kaynamaya etki eden faktörlerin araştırılması. Yüksek lisans tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. Bingöl, S., Sönmez, H., 2003. Alüminyum ekstrüzyonunda proses kontrolü. Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu, İzmir
5. Bingöl, S., Sönmez, H., 2006. Developments at temperature control in aluminum extrusion process. 10th International Research/ Expert Conference, 11-15 Eylül 2006 Barcelona.
6. Bingöl, S., Keskin, M.S., 2007. A quality problem in seam welds in aluminum extrusion. Archives of Materials Science and Engineering, 28(7): 397-400.
7. Bingöl, S. 2015. The decreasing of the extrusion time with varying ram speed. Materials and Manufacturing Processes, Taylor & Francis. 30: 1185–1189
8. Bingöl, S., Kılıçgedik, H.Y., Keskin, M.S., 2015. Finite element analysis for different die angles. 56_{th} International Conference of Machine Design Departments, 9-12 Eylül 2015, Slovakya.
9. Byon, S.M., Hwang, S.M., 2003. Die shape optimal design in cold and hot extrusion. 138 (1): 316-324
10. Canıyılmaz, E., 2001. Kalite geliştirmede taguchi metodu ve bir uygulama. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
11. Chanda, T., Duszczyk, J., 2001. A comparative study on iso speed extrusion and isothermal extrusion of al6061 alloy using 3D fem simulation. Journal Material Processing Technology, 114: 145-153
12. Chen, C., Huang, Y., 2007. Design of brass alloy drawing process using taguchi method. Materials Science and Engineering. 464: 135–140
13. Çıtak H., 2002. Investigation of extrudability of different aluminium alloys by using the method of hot extrusion. Yüksek lisans tezi. Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

14. DeGarmo, P.E. Black,J.T., Kohser, R.A., 2003. Materials and Processes in Manufacturing 9th Edition Update Edition
15. Eşme U., Bayramoğlu M., Geren N., Serin H., 2006. Tig kaynağında kaynak dayanımının taguchi metoduyla optimizasyonu. TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi, 26-28 Nisan 2006, Balıkesir.
16. İrsel, G., 2007. Dişli benzeri parçaların ekstrüzyonunda değişik ekstrüzyon oranlı parçaların sonlu elemanlar analizi. Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
17. Kartal, E., 2015. Ekstrüzyon. Erişim: [http://documents.tips/documents/ekstruzyon.html]. Erişim Tarihi:16.10.2015
18. Kayser, T., Parvizian, F., Hortig, C., Svendsen, B., 2008. Advances on extrusion technology and simulating of light alloys. Key Engineering Materials. 367: 117-123.
19. Li, L., Zhou, J., Duszczyk, J., 2004. Prediction of temperature evolution during the extrusion of 7075 aluminium alloy at various ram speeds by means of 3D fem simulation. Journal of Materials Processing Technology 145 (2004) 360–370
20. Li, Q., Smith, C.J., Harris, C., Jolly, M.R., 2003. Finite element investigations upon the influence of pocket die designs on metal flow in aluminum extrusion. Journal of Material Processing Technology, 135: 189-196.
21. Mayavarama, R., Sajja, U., Secli, C., Niranjan, S., 2013. Optimization of bearing lengths in aluminum extrusion dies. Procedia CIRP 12:276 – 281
22. Nalbant, M., Gökkaya, H., Sur, G., 2006. Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. Materials and Design 28: 1379–1385
23. Öztop M. 2007. Taguchi deney tasarımı ile ekstrüzyon prosesinin iyileştirilmesi. Yüksek lisans tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.
24. Özbaşlı, C.Ö., 2015. Bilgisayar Destekli Mühendislik (BİDEM). Erişim: [http://bidem-cae.blogspot.com.tr/search/label/Sonlu%20Elemanlar]. Erişim Tarihi 08.11.2015.
25. Ross, P. J., 1996 Taguchi techniques for quality engineering, McGraw-Hill Press, New York,
26. Saha, P. 2000. Aluminium Extrusion Technology. ASM International Technical Books Committee
27. Saral, R., 2005. Alüminyum ekstrüzyonunda proses kontrol. Yüksek lisans tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

28. Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M., 2004. Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. itüdergisi/d mühendislik, 3(6): 117-128.
29. Shojaei, A., Fereydoon, M., 2009. Taguchi analysis of extrusion variables and composition effects on the morphology and mechanical properties of EPR-g-MA toughened polyamide 6 and its composite with short glass fiber. Materials Science and Engineering. 506: 45–57
30. Solmaz, E., 1990. Sonlu elemanlar metodu yardımıyla kuvvetlerin makine elemanları üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
31. Sönmez, H., (1989), Metal Ekstrüzyonu, Eğitim yayınları A.S. , İstanbul
32. Sönmez, H., Bingöl, S., 2001. Sürekli ekstrüzyonda alın kaynağının araştırılması. II. Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu, 7-9 Kasım 2001, Manisa.
33. Sönmez, H., Bingöl, S., 2002. Alüminyum alaşımlarında içi boş profillerin ekstrüzyonunda dikiş kaynağı. 9. Denizli Malzeme Sempozyumu, 8-10 Mayıs 2002 Denizli.
34. Şentürk, B.S., 2007. Pirinç alaşımlarının ekstrüzyonunda meydana gelen üretim hatalarının tespiti, nedenleri ve çözüm yolları. Yüksek lisans tezi İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
35. Tiernan, P., Hillery, M.T., Draganescu, B., Gheorghe, M., 2005. Modelling of cold extrusion with experimental verification. Journal of Materials Processing Technology 168: 360–366
36. Valberg, H. 2010. Applied metal forming including fem analysis. Cambridge University Press. Norwegian University of Science and Technology

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emrah Sünkür

Doğum Tarihi : 20/02/1990

Doğum Yeri : Diyarbakır/ Eğil

Yabancı Dil : İngilizce

EĞİTİM DURUMU

İlköğretim	100. Yıl Atatürk İ.Ö.O	Aydın/ Söke	1997-2004
Lise	Patnos Anadolu Lisesi	Ağrı/Patnos	2004-2008
Lisans	Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Diyarbakır	2008-2012
Yüksek Lisans	Üniversitesi Fen Bilimleri enstitüsü Makine Mühendisliği A.B.D.	Diyarbakır	2014 - devam ediyor