

**T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CAM ELYAF TAKVİYELİ PA 6.6 NİN ENJEKSİYON
PROSESİNİN SİMÜLASYON YOLUYLA ANALİZİ**

Gazi Başar KOCABAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. M. Emin ERDİN**

**KASIM 2014
ÇORUM**

Gazi Başar KOCABAŞ tarafından hazırlanan “Cam Elyaf Takviyeli PA 6.6’nın Enjeksiyon Prosesinin Simülasyon Yoluyla Analizi” adlı tez çalışması 28.11.2014 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans / ~~Doktora~~ tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Halil AYKUL (Başkan)

Yrd. Doç. Dr. M. Emin ERDİN (Danışman)

Yrd. Doç. Dr. Ali ÖZGEDİK (Üye)

Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 08.12.2014.. tarih ve 2014/10.. sayılı kararı ile Gazi Başar KOCABAŞ’ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans / ~~Doktora~~ derecesi alması onanmıştır.


Prof. Dr. Ali KILIÇARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BEYANI

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.



Gazi Başar KOCABAŞ

CAM ELYAF TAKVİYELİ PA 6.6 NİN ENJEKSİYON PROSESİNİN SİMÜLASYON YOLUYLA ANALİZİ

Gazi Başar KOCABAŞ

HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2014

ÖZET

Makina elemanları imalatı, otomotiv yedek parçaları, inşaat, mekanik tesisat ve kimya sektörü gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılan plastiklerin sanayideki kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Yüksek darbe dayanımına ve kimyasal dirence sahip olan plastik malzemelerin cam ve karbon elyafı gibi malzemelerle takviye edilmesi sayesinde mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, plastiklerin kullanım alanlarının ve kullanım oranlarının artışına katkı sağlamaktadır. Plastik enjeksiyon kalıplama plastikler için en yaygın imalat yöntemidir. Enjeksiyon aşamaların herbirinin etkin şekilde uygulanması plastik enjeksiyon kalıplama işleminin veriminin ve elde edilen ürünlerin kalitesinin artırılması açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada, otomotiv yan sanayiinde kullanılan bir ara soğutma sistemine ait cam elyaf takviyeli polyamid (PA) 6.6 matrisli bir kazanın plastik enjeksiyon kalıplama ile imalatının simülasyon yolu ile analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle plastik enjeksiyon kalıplama işlemine ait giriş ve çıkış parametreleri ortaya koyulmuştur. Daha sonra enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon sonrası parçadaki basınç dağılımı, sıcaklık artışı, maksimum kayma gerilmesi bölgeleri ve değeri, kayma oranı, donmuş tabaka oranı, soğuma süresi, çökme izleri, dolum kolaylığı ve çevrim süresinin değişimi sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Sonuçlar değerlendirilerek uygun enjeksiyon şartları belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: plastik enjeksiyon, polyamid 6.6, cam elyaf takviyeli kompozit, kalıp akış analizi

SIMULATION BASED ANALYSIS OF GLASS FIBER REINFORCED PA 6.6 INJECTION PROCESS

Gazi Başar KOCABAŞ

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2014

ABSTRACT

Usage areas of plastics which are commonly used in many industries such as machine component manufacturing, automotive side industry, construction, mechanical installation and chemistry increases day by day. Reinforcement of plastics, which have high impact strength and chemical resistance, with materials like glass and carbon fibers contribute the increase of usage areas and rates of them by improving their mechanical properties. Plastic injection molding is the most common manufacturing method for plastics. Implementing injection stages is extremely important for increasing the efficiency of plastic injection molding process and product quality. In this study, simulation based analysis of manufacturing of an automotive side industry intercooler system boiler made from glass fiber reinforced polyamide (PA) 6.6 with plastic injection molding is realized. For this purpose, input and output parameters of plastic injection molding process are presented at first. Afterwards, variation of pressure distribution, temperature increase, maximum shear stress regions and value, shear rates, frozen layer rates, cooling interval, sink marks, ease of filling and cycle interval depending on injection interval are investigated with finite element analyses. Appropriate injection conditions are determined with the evaluation of results.

Keywords: plastic injection, polyamide 6.6, glass fiber reinforced composite, mold flow analysis

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bana yol gösteren, bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, teővik ve destekleri ile her zaman bana yardımcı olan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. M. Emin ERDİN'e, engin bilgi ve tecrübelerini paylaőtıđı için Haluk TATAR'a, yardımlarından dolayı Yetsan A.Ő. Genel Müdürü M. Akif YETİK'e ve Ultra Polimer A.Ő.'ye en içten teőekkürlerimi sunarım.

Hitit Üniversitesi BAP Birimi'ne MUH03.13.004 no'lu projeye verdikleri destekten dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca maddi manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim ailem ve değerli eőim Buket BULUT KOCABAŞ'a teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. PLASTİKLER.....	6
2.1. Plastiklerinin Sınıflandırılması.....	6
2.1.1. Termosetler.....	6
2.1.2. Termoplastikler.....	7
2.2. Polyamidler.....	9
2.2.1. PA 6 ve PA 6.6 'nın özellikleri.....	10
2.3. Katkı Maddeleri.....	12
2.3.1. Takviyeli plastikler.....	12
2.3.2. Elyaf takviyeli plastiklerin kullanım alanları.....	13
2.3.3. Plastik takviye malzemesi olarak kullanılan elyaf türleri.....	13
2.3.4. Cam elyaf.....	13
2.4. Plastik Enjeksiyon Kalıplama İşlemi.....	16
2.5. Plastik Enjeksiyon Kalıpları.....	19
2.5.1. Kalıp konstrüksiyonu.....	21

2.5.2. Enjeksiyon kalıplarındaki yolluk sistemleri	22
3. AKIŞIN MATEMATİKSEL MODELİ	25
4. SONLU ELEMAN ANALİZİ.....	30
4.1. Sonlu Eleman Yöntemi	32
4.2. Analiz Prosedürü	34
4.2.1. Malzeme.....	34
4.2.2. Eleman boyutunun belirlenmesi.....	35
4.2.3. Yolluk konum ve geometrisinin belirlenmesi	37
4.2.4. Kalıp sıcaklığının belirlenmesi	40
4.3. Enjeksiyon Analizi	41
4.3.1. Enjeksiyon basıncı	41
4.3.2. Enjeksiyon sonunda sıcaklık artışı	43
4.3.3. Kayma gerilmesi	44
4.3.4. Kayma oranı	46
4.3.5. Donmuş tabaka oranı.....	47
4.3.6. Soğuma süresi	49
4.3.7. Çökme izleri	51
4.3.8. Dolum kolaylığı	52
4.3.9. Çevrim süresi	53
4.4. Enjeksiyon süresi	53
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. PA 6 ve PA 6.6 üreticileri ile ticari isimleri	11
Çizelge 2.2. Polyamidlerin ergime sıcaklıkları	12
Çizelge 2.3. Başlıca cam elyaf türlerinin kimyasal bileşimleri.....	14
Çizelge 2.4. Cam elyaf türlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	15
Çizelge 2.5. PA 6.6 ile PA 6.6-GF30'un mekanik özellikleri.....	16
Çizelge 4.1. Dell Precision T7500 (v3) iş istasyonu özellikleri.....	34
Çizelge 4.2. Ultramid A3WG6 SolidWorks veritabanı bilgileri.....	35
Çizelge 4.3. Eleman boyutuna bağlı olarak analiz sonuçları	36
Çizelge 4.4. Yolluk geometrisinin çıkış parametrelerine etkisi	38
Çizelge 4.5. Kalıp sıcaklığının analiz sonuçlarına etkisi	40
Çizelge 4.6. Enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon parametrelerinin değişimi.....	54
Çizelge 4.7. Enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon basıncı ile donmuş tabaka oranının yüzdelerdeki değişimleri	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Termoplastiklerin performans üçgeni	7
Şekil 2.2. (a) Amorf ve (b) yarı kristalin termoplastiklerin yapısı	9
Şekil 2.3. Plastik enjeksiyon makinası	17
Şekil 2.4. Enjeksiyon aşamaları: (a) kapama, (b) enjeksiyon, (c) soğutma, (d) çıkarma	18
Şekil 2.5. Enjeksiyon işleminin parametreleri	18
Şekil 2.6. Kalıpların sınıflandırılması	19
Şekil 2.7. Kalıbın (a) hareketli ve (b) sabit kısımları	20
Şekil 2.8. Değişik enjeksiyon kalıpları	20
Şekil 2.9. Kalıp konstrüksiyonu	21
Şekil 2.10. İç hareket elemanlı bir kalıbın (a) açık ve (b) kapalı hali	22
Şekil 2.11. Soğuk yolluk sistemi	23
Şekil 2.12. Sıcak yolluk sistem kesiti	24
Şekil 4.1. Ara soğutucu sistemi	30
Şekil 4.2. Ara soğutucu sistemi kazanı	30
Şekil 4.3. Sonlu eleman tipleri	33
Şekil 4.4. Sonlu eleman ağ yapısı	33
Şekil 4.5. Modelin sonlu eleman yapısı: (a, b) yerel eleman küçültme yapılmamış, (c, d) yerel küçültme yapılmış	37
Şekil 4.6. Uygun yolluk konumu	39
Şekil 4.7. Elyaf dağılımı	39
Şekil 4.8. Ergimiş malzemenin zamana bağlı olarak kalıp içerisindeki ilerleyişi	41
Şekil 4.9. Enjeksiyon sonrası basınç dağılımı	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. Enjeksiyon süresine bağlı olarak basınç farkının değişimi.....	43
Şekil 4.11. Enjeksiyon sonrası sıcaklık artışı.....	43
Şekil 4.12. Enjeksiyon süresine bağlı olarak sıcaklık artışının değişimi	44
Şekil 4.13. Maksimum kayma gerilmesi bölgeleri.....	45
Şekil 4.14. Enjeksiyon süresine bağlı olarak maksimum kayma gerilmesinin değişimi.....	45
Şekil 4.15. Kayma oranı analizi	46
Şekil 4.16. Enjeksiyon süresine bağlı olarak kayma oranının değişimi.....	47
Şekil 4.17. Donmuş tabaka oranı	47
Şekil 4.18. Donmuş tabaka oranı analizi.....	48
Şekil 4.19. Enjeksiyon süresine bağlı olarak donmuş tabaka oranının değişimi	49
Şekil 4.20. Soğuma süresi analizi	50
Şekil 4.21. Enjeksiyon süresine bağlı olarak soğuma süresinin değişimi.....	50
Şekil 4.22. Çökme izlerinin dağılımı	51
Şekil 4.23. Enjeksiyon süresine bağlı olarak çökme izlerinin değişimi.....	52
Şekil 4.24. Dolum kolaylığı analizi.....	52
Şekil 4.25. Enjeksiyon süresine bağlı olarak çevrim süresinin değişimi	53

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. PA6.6-GF30 granüller	31
Resim 4.2. Ara soğutma kazanının fotoğrafı	31

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A_c	Akışa Dik Kesit Alanı
Al₂O₃	Alüminyum Oksit
B₂O₃	Boron Oksit
BaO	Baryum Oksit
C	Karbon
CaO	Kalsiyum Oksit
Cl	Klor
D	İç Çap
f	Sürtünme Faktörü
F	Flor
F₂	Flor
Fe₂O₃	Demir Oksit
g	Yerçekimi İvmesi
H	Hidrojen
h_k	Toplam Yük Kaybı
J	Joule
K₂O	Potasyum Oksit
K_k	Yerel Kayıp Katsayısı
L	Uzunluk
Li₂O	Lityum Oksit
m	Kütle
MgO	Magnezyum Oksit
N	Azot
Na₂O	Sodyum Oksit
O	Oksijen
P	Basınç

Simgeler	Açıklama
Re	Reynolds Sayısı
S	Kükürt
Si	Silisyum
SiO₂	Silisyum Oksit
t	Zaman
TiO₂	Titanyum Oksit
\vec{v}	Hız Vektörü
V_{ort}	Ortalama Hız
W	Watt
ZnO	Çinko Oksit
ZrO₂	Zirkonyum Oksit
ϵ/D	Bağlı Pürüzlülük
ρ	Yoğunluk
$\vec{\nabla}$	Diverjans Operatörü
μ	Dinamik Viskozite
ν	Kinematik Viskozite

Kısaltmalar	Açıklama
1B	Bir Boyutlu
2B	İki Boyutlu
3B	Üç Boyutlu
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
EP	Epoksi
GB	Giga Bayt
GF	Cam Elyaf
GHz	Giga Hertz
GPa	Giga Paskal
kh	Kontrol Hacmi
MHz	Mega Hertz
MPa	Mega Paskal

Kısaltmalar**Açıklama****MF**

Melamin Formaldehit

PA

Polyamid

PC

Poli Karbonat

PE

Poli Etilen

PEEK

Polieter Eter Keton

PET

Polietilen Tereftalat

PF

Fenol Formaldehit

PMMA

Polimetil Metakrilat

PP

Poli Propilen

PS

Poli Stiren

PTFE

Poli Tetrafloroetilen

PVC

Poli Vinil Klorür

rpm

Devir/Dakika

SAN

Stiren Akrilonitril

SB

Stiren Bütadien

µm

Mikrometre

1. GİRİŞ

Plastik esaslı malzemelerin endüstriyel alanda kullanımını her geçen gün daha da artmaktadır. Cam elyaf takviyeli Polyamid (PA) 6.6 kompozit malzemeler de dişli, cıvata, o-ring, takoz, yatak, mil, burç, kasnak ve otomotiv yan sanayii gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tip malzemelerin imalatında plastik enjeksiyon kalıplama en sık kullanılan yöntemdir. Plastik enjeksiyonla üretilen parçaların kalitesi pek çok parametreye bağlıdır. Bunlar malzeme ve işlem parametreleri olarak gruplandırılır. Optimum parametrelerin belirlenmesinde deneme yanılma, matematiksel analiz ve bilgisayar simülasyonu gibi yöntemler kullanılabilir. Bilgisayar simülasyonu doğrulandığı takdirde en hızlı, ekonomik ve etkin çözümdür.

Plastik malzemelerin kullanımının artmasıyla birlikte plastik enjeksiyon yöntemiyle kalıplama işlemi de her geçen gün daha yaygın hale gelmektedir. Buna bağlı olarak enjeksiyon malzemesinin kimyasal yapısı ve mekanik özellikleri, uygulanan ısı işlemler, kullanılan yolluğun türünün, konumunun ve geometrisinin belirlenmesi ve kalıp boyutlandırma gibi konularda yapılan çalışmalar da artarak devam etmektedir. Plastik enjeksiyon kalıplamada en uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi üretim hızı, ürün kalitesi ve maliyet açısından son derece önemlidir (Chen ve ark. 2009a). Enjeksiyon malzemesi, yolluk türü, konumu ve geometrisi ve kalıp sıcaklığı gibi giriş parametreleri belirlendikten sonra enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon sonrası parçadaki basınç dağılımı, sıcaklık artışı, maksimum kayma gerilmesi bölgeleri ve değeri, kayma oranı, donmuş tabaka oranı, soğuma süresi, çökme izleri, dolun kolaylığı ve çevrim süresi gibi çıkış parametrelerinin optimizasyonu ürün kalitesinin iyileştirilmesi, üretim hızının artırılması ve maliyetin düşürülmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Literatürde plastik enjeksiyon kalıplama konusunda pek çok matematiksel, deneysel, simülasyon tabanlı ve sayısal çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Chen ve ark. (2009a) plastik enjeksiyon kalıplamada işlem parametrelerinin optimizasyonunda Taguchi yöntemi ile sınır ağları ve genetik algoritmaları birleştiren etkin bir istatistiksel esnek hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir.

Kuram ve ark. (2013) enjeksiyon parametrelerinin cam elyaf takviyeli PA 6'nın mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini Taguchi yöntemini kullanarak matematiksel olarak incelemişlerdir. Enjeksiyon parametresi olarak malzemenin yeniden işleme sayısını, ergime ve kalıp sıcaklıklarını, enjeksiyon ve tutma basınçlarını kullandıkları çalışmalarında, mekanik özelliklerin her tekrar işleme sonrası azaldığını gözlemlemişlerdir.

Özçelik ve Erzurumlu (2006) ince kabuk yapılı plastik parçaların çarpılma davranışını sonlu eleman, yapay sinir ağı ve genetik algoritma yöntemleriyle inceleyerek matematiksel sonuçlarla simülasyon tabanlı sonuçları karşılaştırmışlardır. Giriş parametreleri olarak kalıplama ve ergime sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve süresi, soğuma süresi, yolluk tipi ve giriş konumunu kullandıkları çalışmalarında özellikle enjeksiyon basıncı ve süresi ile kalıp ve ergime sıcaklıklarının çarpılma üzerinde oldukça büyük etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Öktem ve ark. (2007) ince kabuk yapılı bir parçanın plastik enjeksiyon kalıplamada işlem parametrelerinin çarpılma üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında Taguchi optimizasyon tekniğinden ve MoldFlow sonlu eleman yazılımından faydalanmışlardır. Analiz sonuçlarına göre parçaların çarpılma ve çekme davranışlarında iyileşmeler olduğunu belirlemişlerdir.

Apichartpattanasiri ve ark. (2001) çalışmalarında PA 6.6'nın enjeksiyon işleminde kalıp sıcaklığının yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini imal ettikleri dişli çark üzerinde aşınma deneyleri gerçekleştirerek incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre aşınma miktarının başlangıçta yüksek olup zamanla azaldığını gözlemlemişlerdir. Aşınmanın başlangıcında sürtünme katsayısının ve aşınma miktarının kalıplama

sıcaklığından önemli ölçüde etkilendiğini, ilerleyen aşamalarda ise aradaki farkın oldukça azaldığını tespit etmişlerdir.

Santos ve ark. (2007) elyaf yüzdesinin, boyutunun ve malzemeye uygulanan işlemlerin enjeksiyon kalıplama ile imal edilmiş PA 6 matrisli bitkisel ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin çekme, eğilme, darbe ve ısı çarpılma dayanımları üzerindeki etkilerini mekanik ve ısı deneyleri ile incelemişlerdir. Daha düşük yoğunluğa sahip bitkisel takviyeli malzemelerin darbe ve ısı çarpılma dayanımlarının cam elyaf takviyeli malzemeyle benzer olduğunu gözlemlemişlerdir.

Tang ve ark. (2006) bir plastik enjeksiyon kalıbının tasarımını ve ısı analizini yaptıkları çalışmalarında ısı artık gerilmelerin parça çarpılması üzerindeki etkilerini incelemek üzere kalıp tasarımı yapmış ve LUSAS Analyst ticari sonlu eleman yazılımı ile analizler gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarından soğuma kanalları etrafında çekme gerçekleştiğini ve bunun da çarpılmaya neden olduğunu belirlemişlerdir.

Yang ve Yokoi (2003) çalışmalarında plastik sandviç enjeksiyon kalıplamada malzeme akışının dinamik görsel analizini yüksek basınca dayanıklı bir cam kalıp kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları deneylerle ergimiş malzemenin farklı enjeksiyon hız ve sıcaklıklarındaki akış davranışını inceledikleri çalışmalarında, tasarımın dengelenmesinin akış açısından önemini tespit etmişlerdir. Ayrıca malzemenin iç kısımları üzerinde enjeksiyon hızının önemli seviyede, kalıp sıcaklığının ise düşük seviyede etkileri olduğunu belirlemişlerdir.

Chen ve ark. (2009b) ince kabuk yapılı plastik parçaların en uygun enjeksiyon kalıplama işlem parametrelerini gerçekleştirdikleri simülasyon ve deneylerle incelemişlerdir. Simülasyon ve deney sonuçlarına göre ergime sıcaklığının ve enjeksiyon basıncının ince kabuk yapılı plastik parçaların enjeksiyonunda en etkin parametreler olduğunu belirlemişlerdir.

Selmi ve ark. (2011) yönlendirilmemiş kısa cam elyaf takviyeli polyamidlerin iki eksenli akma, pekleşme ve akış simülasyonlarını gerçekleştirmiş ve elde ettikleri sonuçları yönlendirilmiş elyaf takviyeli malzemelerin davranışları ile karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre izotropik pekleşme ve plastik akış düzgünlüğünün ortadan kalktığını belirlemişlerdir.

Gerber ve ark. (2006) plastik enjeksiyon kalıplamada ergime sıcaklığı kontrolü için bilgisayarlı akışkanlar dinamiği analizleri gerçekleştirdikleri çalışmalarında sıcaklık kontrolünün olumlu etkilerini görmüş ve kullandıkları yöntemin fiziksel deneylerle karşılaştırıldığında önemli zaman kazançları sağladığını belirlemişlerdir.

Seow ve Lam (1997) çalışmalarında Fortran kodu kullanarak MoldFlow ticari programı için plastik enjeksiyon işleminde akış optimizasyonu yapmak üzere kalıp boşluğunun dengelenmesi açısından uygun kalınlığı belirleyecek özgün bir yöntem geliştirmişlerdir.

Wang ve ark. (2014) plastik enjeksiyon kalıplama işlem parametrelerinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Optimizasyon sonucunda malzemenin basma özelliklerini iyileştirmeyi hedefledikleri çalışmalarında, MoldFlow analizleri sonucunda yaklaşık % 12'lik bir iyileşme gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Teixeira ve ark. (2013) enjeksiyon kalıplama ile imal edilen % 40 uzun cam elyaf takviyeli PA 6.6 parçaların mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde kontrollü akış kısıtlamalarının etkilerini deneysel olarak incelemiş ve matematiksel olarak doğrulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre malzemede yüksek seviyede anizotropi olduğunu ve buna bağlı olarak çekme dayanımının önemli ölçüde iyileştiğini, darbe dayanımının ise anizotropiden etkilenmediğini belirlemişlerdir. Elyaf takviyeli malzemenin mekanik özelliklerini otomotiv sektöründe ikame olarak kullanılabileceği metalik malzemelerin mekanik özellikleri ile karşılaştırmışlardır.

Song ve ark. (2007) ultra ince cidarlı plastik parçaların kalıplanmasında enjeksiyon işlem parametrelerinin etkilerini araştırdıkları çalışmalarında bu işlem için uygun bir kalıp tasarlamış ve imal etmişlerdir. Taguchi yöntemi ve sayısal simülasyonlar kullanarak enjeksiyon oranı ve basıncı, ergime sıcaklığı, ölçü boyu ve parça kalınlığının kalıplama işlemi üzerindeki etkilerini incelemişler, yüksek ergime sıcaklığı ve enjeksiyon basıncının ultra ince cidarlı parçaların kalıplanmasında gerekli olduğunu belirlemişlerdir.

Kurt ve ark. (2009) deneysel çalışmalarında plastik enjeksiyon kalıplamada enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığının ürün kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişler ve bu parametrelerin ürünün boyutsal hassasiyeti üzerinde önemli etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bu tez çalışmasında öncelikle plastik malzemeler hakkında temel bilgiler verilmiş, sınıflandırmaları yapılmış, polyamidler ve takviye malzemelerinin özellikleri belirtilmiş, plastik enjeksiyon kalıplama işlemi ve parametreleri açıklanmış ve ergimiş plastiğin kalıp içinde akışını formülize etmede kullanılan matematiksel bağıntılar özetlenmiştir.

Daha sonra plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile imal edilen PA 6.6 esaslı kütlece % 30 cam elyaf takviyeli (PA6.6-GF30) bir ara soğutucu kazanının katı modeli oluşturularak sonlu eleman yöntemi ile enjeksiyon işleminin analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilerek öneriler sunulmuştur.

2. PLASTİKLER

Plastikler, monomer denilen kimyasal moleküllerden meydana gelen, yüksek molekül ağırlığına ve zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir. Bir monomer, polimerizasyon yoluyla başka monomerlerle birleşerek çok uzun zincir şeklinde bir makromolekül meydana getirmektedir. Böylece çeşitli monomerler veya monomer dizilişleri kullanılarak çeşitli tipte plastikler elde edilmektedir. Kimyasal bakımdan plastikler, herhangi bir polimer gibi başka elementlerin atomları ile bağlanmış karbon atomlarından meydana gelmektedir. Plastikleri imal etmek için bilinen 100'den fazla elementten sadece 8'i kullanılmaktadır. Bunlar; Karbon (C), Hidrojen (H), Azot (N), Oksijen (O), Flor (F), Silisyum (Si), Kükürt (S) ve Klor (Cl)'dir (Akkurt, 2007).

Plastikler, metal ve ahşaptan farklı özelliklere sahip, yüksek molekül ağırlığında sentetik malzemeler olup oda sıcaklığında katı halde bulunan, ısı ve basınç yardımıyla mekanik veya kimyasal yolla şekillendirilip kalıplanabilen organik ve polimer esaslı maddeler olarak tanımlanabilir (Ataşimşek, 2006).

2.1. Plastiklerin Sınıflandırılması

Plastikler temelde ısıya karşı gösterdikleri davranışlara göre başlıca iki ana gruba ayrılırlar. Bunlar, termosetler ve termoplastiklerdir.

2.1.1. Termosetler

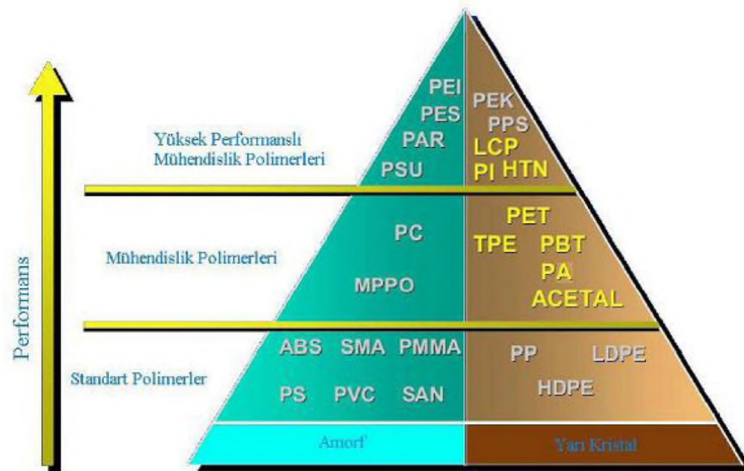
Termosetler, ısı ile işlemle bir defa istenilen şekli alabilen plastiklerdir. Tekrar ısıtıldıklarında şekillendirilemezler. Ayrıca bu malzemeler çözünmezler. Termosetler polikondansasyon reaksiyonu ile elde edilir ve genellikle çapraz bağlı bir yapıya sahiptirler. Bu plastiklerde polimerizasyon işlemi, malzemeyi ihtiva eden monomerlerin bir araya getirildiği reaktörde başlar ve kalıplama işlemi sırasında tamamlanır (Akkurt, 2007). Fenol formaldehit (PF), melamin formaldehit (MF),

epoksiler (EP), doymamış polyesterler (UP, UPE) önemli termoset polimerlerdir (Saçak, 2005).

2.1.2. Termoplastikler

Termoplastikler, ısı ve basınç altında yumuşayarak akan, bu durumda herhangi bir şekil alabilen ve soğutulduğunda sertleşen plastiklerdir. Ayrıca tekrar ısıtıldıklarında tekrar yumuşar, şekil alabilir ve soğutulduklarında sertleşirler. Bu işlemler sırasında hiçbir kimyasal değişikliğe uğramazlar (Akkurt, 2007). Polyamid (PA), polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinil klorür (PVC) ve polistiren (PS) yaygın olarak kullanılan termoplastik karakterli polimerlerden bazılarıdır (Saçak, 2005).

Polimer zincirleri, polimer örgüsü içerisinde düzenli bir şekilde istiflenerek kristal yapıya bölgeler oluşturabilmektedir. Ancak büyüklüklerinden dolayı polimer zincirlerinin tamamı bir düzen içerisinde yönlendirilerek tam kristal yapı oluşturamadıklarından, bölgesel kristallenme gözlenir. Bu nedenle termoplastikler moleküler yapılarına göre genel olarak amorf ve yarı kristalin polimerler şeklinde ikiye ayrılırlar. Çeşitli amaçlar için kullanılan endüstriyel polimerler amorf veya yarı kristal haldedir (Saçak, 2005). Şekil 2.1’de performanslarına göre amorf ve yarı kristalin termoplastiklerin sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.1. Termoplastiklerin performans üçgeni (Yıldırım, 2009)

Amorf polimerler

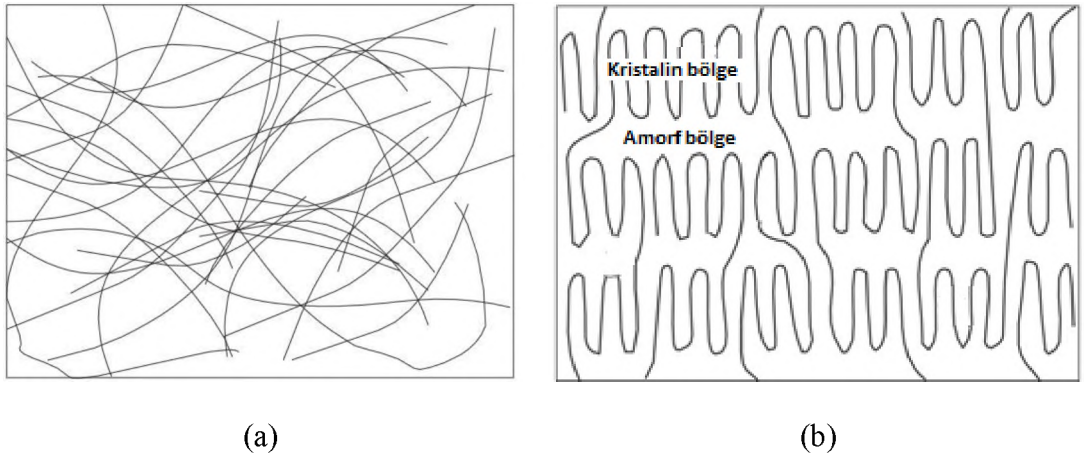
Amorf yapıdaki molekül zincirleri, birbirine göre gelişigüzel karışık bir şekilde bulunurlar. Amorf yapıya sahip olan plastiklerin (PVC, ataktik PS, polimetil metakrilat (PMMA), akrilonitril bütadien stiren (ABS), polikarbonat (PC), polifenilen oksit, stiren akrilonitril (SAN), poliakrilat, poliizopren, stiren bütadien (SB), polibütadien vb.) çoğunda çekme yüklerinin etkisi altında, molekül zincirleri çekme yönünde bir yönlenme göstermektedirler. Bu olaya yönlenme özelliği denilmektedir ve bu özelliğe sahip amorf yapılar daha yüksek çekme dayanımına sahiptirler (Akkurt, 2007). Bu tür polimerler, birkaç istisna dışında (ABS, SB vb.) yarı saydam veya tamamen şeffaf (PC, PS, SAN, PMMA vb.) görünümündedirler (Anonim, 2007).

Yarı kristalin polimerler

Kristalin polimerik yapılarda polimer zincirinin tamamı belli bir düzene girmiş ve kristallenmiştir. Ancak polimerlerde % 100 kristallenme mümkün olmadığı için kristalin özellik gösteren polimerler yarı kristalin polimerler olarak adlandırılmaktadırlar. Yarı kristalin polimerler (PE, sindiyotaktik polistiren (PS), PP, polietilen tereftalat (PET), polibütilen tereftalat, PA, polieter eter keton (PEEK), polifenilen sülfür, politetrafloroetilen (PTFE), kevlar vb.) yer yer düzenli kafes yapısı (kristalin bölgeler) gösterirken, diğer bölümler amorf özellik göstermektedirler. Az dallanmış moleküllerde, kristalizasyon derecesi çok dallanmış moleküllere göre daha fazladır. Bu yüzden çapraz bağlanmış PE, düz PE'ye göre daha az kristalizasyon derecesine sahiptir. Kristalizasyon derecesi arttıkça yoğunluk, sertlik ve kararlılık gibi bir çok özellik artar. Yarı kristalin polimerler opak olup renklendirici veya katkı maddesi katılmadan bile buğulu bir görünüme sahiptirler. Sadece ergime noktaları aşıldığında kristalin bölgelerin ergimesi nedeniyle yarı şeffaf veya şeffaf hale gelirler (Anonim, 2007).

Kristalin yapının özellikleri, amorf yapının özelliklerinden bir hayli farklıdır. Kristalin yapı daha rijit olmakla beraber, daha yüksek ve daha belirgin bir ergime

sıcaklığına, daha yüksek çekme, sürünme ve ısı dayanımına sahiptir. Daha yüksek ergime viskozitesinden dolayı imalatı daha zordur. Ayrıca kalıplamada daha büyük bir şekil değiştirme gösterir. Cam lifleri veya başka katkı maddeleri ilave edildiğinde, kristalin yapının özellikleri önemli ölçüde değiştirilebilir. Amorf yapı daha yumuşak ve tok olup ergime sıcaklığı, çekme dayanımı ve yoğunluğu daha düşüktür. Amorf polimerlerin imalatı daha kolaydır, ancak kalıp içerisinde kristalin yapılar kadar kolay akmazlar (Akkurt, 2007).



Şekil 2.2. (a) Amorf ve (b) yarı kristalin termoplastiklerin yapısı (Anonim, 2007)

2.2. Polyamidler

Polyamidler yüksek kristal yapıya sahip, bünyesinde amid grubu bulunduran ve molekül ağırlığı yüksek lineer polimerlerdir. Sert ve dayanıklı olan polyamidlerin birçok çeşidi vardır. PA 6, PA 6.6, PA 6.10, PA 11 ve PA 12 bunların en bilinenleri olup PA 6 ve PA 6.6 en çok kullanılanlarıdır (Ataşimşek, 2006). Bu polyamid türlerinden başka özel amaçlar için üretilen PA 4.6 ve PA 8 bulunmaktadır (Kaya, 2007).

Polyamidler doğal olarak protein, yün ve ipek formlarında bulunurlar. Nylon ve Kevlar gibi çeşitli ticari isimler altında yapay olarak üretilen polyamidlerin kullanımının yaygın olduğu alanlar arasında araç lastiklerindeki kord bezleri, tekstil ürünleri, diş fırçası kılları, olta ipleri, ağ ve fileler, hava yastıkları, manifoldlar ve

benzin tankları gibi otomotiv yedek parçaları, tırmanış ipleri, çeşitli makina parçaları, paraşütler, gitar telleri, tenis ve squash raket telleri sayılabilir (Kıralp ve ark., 2006).

Polyamidler; enjeksiyon, ısıll şekillendirme, ekstrüzyon, rotasyon kalıplama ve enjeksiyon şişirme ile imal edilebilmektedir (Kaya, 2005).

2.2.1. PA 6 ve PA 6.6'nın özellikleri

PA 6 ve PA 6.6, kristal yapıya ve yüksek molekül ağırlığına sahip polimerlerdir. Yapıları esasında hem amorf hem de kristal bölgelere sahiptir. Özellikleri daha çok kristal yapıya bağlı olup kristal yapının amorf yapıya oranı arttıkça iyileşir. Kristal yapı oranının fazla olması, darbe dayanımı dışında kalan tüm mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlar. Kristal yapı oranı, ergimiş polimerin soğutulma hızıyla bağlantılı olup, çok hızlı soğutulduğunda kristal yapı oranı düşük olur (Ataşimşek, 2006).

PA 6 ve PA 6.6 kimyasal yapılarından dolayı, bir miktar rutubet emerler. Emilen rutubet plastikleştirici gibi davranır. Emilen rutubet polimerin çekme ve kopma dayanımı ile sertliğini azaltırken darbe dayanımını artırır. Bu nedenle PA 6 ve PA 6.6'dan yapılan parçaların uygulamadaki darbe dayanımları kalıptan çıkartıldıklarından oldukça yüksektir. Sıcaklık artışıyla PA 6 ve PA 6.6'nın özelliklerinde, amorf yapının sıcaklıkla değişmesi nedeniyle değişiklikler olur. Sıcaklık artışıyla çekme ve kopma dayanımı ile sertlik değerleri azalırken, darbe dayanımı artar (Ataşimşek, 2006).

Katkı maddeleri PA 6 ve PA 6.6'nın özelliklerini iyileştirirler. Isı dengeleyiciler polyamidlere ısıll kararlılık ve dış etkenlere karşı dayanıklılık sağlar. Molibden disülfid ve grafit aşınmaya karşı direnç sağlarken kendi kendine yağlama özelliği de verir. Karbon siyahı dış etkenlere karşı dayanıklılık sağlar. Cam elyafı ve titanyumdioksit gibi inorganik dolgu maddeleri, PA 6 ve PA 6.6'ya boyutsal kararlılık sağlar, mekanik özellikleri iyileştirir ve ısıll bozunma sıcaklığını yükseltir (Ataşimşek, 2006).

PA 6 ve PA 6.6 diğer plastiklerle karşılaştırıldığında, yağlayıcılara karşı daha dayanıklıdır. Kimyasal çözücülere karşı dayanıklı olup, formik asit ve asetik asit gibi asitlerden etkilenmezler. Yüksek sıcaklıklarda fenollere karşı direnç gösteremezler. Çok iyi elektriksel yalıtkanlıklarından dolayı, elektrik sektöründe geniş kullanım alanına sahiptirler (Ataşımşek, 2006). Polyamidler tornada kolay işlenebilmektedir. PA esaslı ince filmlerin çok yüksek çekme ve darbe dayanımı ile uzama kabiliyeti vardır. Gaz ve kokuları geçirmezler (Kaya, 2005).

PA 6.6 kalıplanabilen polyamidlerin en önemlisidir. Polyamid 6.6'nın ısıya, ışığa ve suya karşı dayanıklı, atmosferik şartlara karşı korunmuş ve kolay işlenebilen türleri mevcuttur (Kaya, 2005).

Çizelge 2.1'de yaygın olarak kullanılan PA 6 ve PA 6.6 malzemelerinin üreticileri ve ticari isimleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. PA 6 ve PA 6.6 üreticileri ile ticari isimleri (Kaya, 2005)

Üretici Firma	Ticari İsmi ve Türü
BASF-Almanya	Ultramid A,B (Polyamid 6 ve 6.6)
Bayer-Almanya	Durethan (Polyamid 6)
Emser-Werke-İsviçre	Grilon (Polyamid 6)
Organics-Fransa	Rilsan (Polyamid 6)
ICI -İngiltere	Maranyl (Polyamid 6 ve 6.6)
Du Pont-Amerika	Zytell (Polyamid 6 ve 6.6)
Snia Viscasa-İtalya	Sniamid (Polyamid 6)

Polyamidler, barındırdıkları kopolimerin diziliş düzenine göre AABB ve AB grubu şeklinde sınıflandırılırlar. Çizelge 2.2'de AABB ve AB grubu PA türlerinin ergime sıcaklıkları verilmiştir.

Çizelge 2.2. Polyamidlerin ergime sıcaklıkları (Kaya, 2005)

AABB Grubu	Ergime Sıcaklığı (°C)	AB Grubu	Ergime Sıcaklığı (°C)
Polyamid 4.6	295	Polyamid 4	265
Polyamid 6.6	260	Polyamid 6	215
Polyamid 6.8	246	Polyamid 11	190
Polyamid 6.10	220	Polyamid 12	179
Polyamid 6.12	217		

2.3. Katkı Maddeleri

Pratikte plastikler, saf organik halde veya bazı özelliklerini iyileştirmek amacıyla reçine veya katkı maddeleri ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Takviye yapıldıktan sonra oluşan bileşime, çeşitli teknolojilerle istenilen şekil verilmektedir. Plastiklerin özelliklerini değiştirmek için katkı malzemesi olarak; başka polimer reçineleri, cam veya karbon elyafları, dolgu malzemeleri, yumuşatıcılar, dengeleyiciler, yağlayıcılar renk vericiler, alevlenme önleyiciler ve çapraz bağ oluşturucular kullanılır (Akkurt, 2007).

2.3.1. Takviyeli plastikler

Plastikler çekme, darbe ve ısı dayanımı, boyut kararlılığı gibi özelliklerini iyileştirmek için başka malzemelerle takviye edilir.

Plastikler, tek başlarına kalıplandıkları takdirde özellikleri zayıf kalmaktadır. Özellikle termoset plastiklerin üstün kimyasal dayanımlarına rağmen, mekanik dayanımlarının düşük olması, elyaf malzemeler ile takviye edilmelerini gerektirmektedir. Ayrıca, plastiklerin ısıl ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve boyutsal kararlılıkların sağlanması, plastiklerin değişik malzemeler kullanılarak takviye edilmesi ile mümkün olmakta ve böylelikle üstün nitelikli plastik esaslı kompozit malzemeler elde edilebilmektedir (Anonim, 2014a).

2.3.2. Elyaf takviyeli plastiklerin kullanım alanları

Elyaf takviyeli plastikler otomotiv, elektrik, elektronik, büro ve ev aletleri, denizcilik, kimya, inşaat ve havacılık sektörlerinde metallere oranla çok daha hafif olmaları ve korozyona uğramamaları nedeni ile ikame malzemesi olarak her geçen gün daha yaygın şekilde kullanılmaktadır (Anonim, 2014a).

Havacılık sektöründe özellikle hafifliğin ve yüksek mekanik dayanımın arandığı uygulamalarda takviye malzemesi olarak karbon ve/veya aramid elyafı; plastik matris malzemesi olarak epoksi ve PEEK gibi daha yüksek fiziksel özellikli plastikler kullanılmaktadır (Anonim, 2014a).

2.3.3. Plastik takviye malzemesi olarak kullanılan elyaf türleri

Plastiklerin takviye edilmesi amacı ile cam, aramid, seramik ve karbon elyaf türleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu takviye malzemelerinin türlerine ve kullanım oranlarına göre değişik özellikler elde edilebilmektedir. Değişik takviye malzemeleri ile takviye edilen plastik türlerine göre değişik özelliklerde takviyeli plastikler elde edilebilmektedir. Cam elyafı ile gerek termosetler, gerek termoplastikler takviye edilebilir ve genel olarak elyaf takviyeli kompozit malzeme olarak adlandırılırlar (Anonim, 2014a).

2.3.4. Cam elyaf

Kompozisyonlarına bağlı olarak, değişik cam elyaf türleri bulunur. Bunlar içinde “E” cam elyafının en başta geldiği görülmektedir. Elektriksel ve mekanik özellikleri ile maliyetinin iyi bir denge oluşturması sayesinde, bu kalsiyum alüminosilikat bileşiminin, kullanılan toplam cam elyaf takviye malzemeleri içindeki pazar payı % 90 seviyesindedir (Anonim, 2013a).

“E-CR” camı, “E” camının modifiye edilmiş şekli olup, asitlere karşı dayanım sağlamak amacı ile kompozisyonunda bor içermemektedir. “E-CR” cam elyafı,

genellikle kimyasal dayanım istenen tank ve boru imalatında kullanılmaktadır (Anonim, 2013a).

Yüksek mekanik dayanım aranan ürünler için kullanılan cam elyaf türleri Amerika'da "S" camı, Avrupa'da "R" camı olarak adlandırılmaktadır. Kompozitin dayanımını ve rijitliğini artıran bu tür cam elyafı havacılık, uzay ve askeri alanlarda, yüksek teknik performans gereksinimi nedeni ile kullanılmaktadır. Nakliye, spor ve dinlenme alanlarında da belirli ürün gruplarında yüksek mekanik dayanım sağlayan bu tür kompozitler kullanılmaktadır (Anonim, 2013a).

Bunların dışında, mükemmel dielektrik özellikler taşıyan ve elektronik endüstrisinde sıkça kullanılan "D" cam elyafı ve özellikle yüzey tüllerinde kullanılan kimyasal dayanımlı "C" cam elyafı da önemli elyaf türlerindedir (Anonim, 2013a). Çizelge 2.3'te başlıca cam elyaf türlerinin kimyasal bileşimleri görülmektedir.

Çizelge 2.3. Başlıca cam elyaf türlerinin kimyasal bileşimleri (Anonim, 2014b)

Kimyasal Bileşim (%)	Cam Türü							
	A	C	D	E	ECR	AR	R	S-2
SiO ₂	63-72	64-68	72-75	52-56	54-62	55-75	55-60	64-66
Al ₂ O ₃	0-6	3-5	0-1	12-16	9-15	0-5	23-28	24-25
B ₂ O ₃	0-6	4-6	21-24	5-10	-	0-8	0-0,35	-
CaO	6-10	11-15	0-1	16-25	17-25	1-10	8-15	0-0,2
MgO	0-4	2-4	-	0-5	0-4	-	4-7	9,5-10
ZnO	-	-	-	-	2-5	-	-	-
BaO	-	0-1	-	-	-	-	-	-
Li ₂ O	-	-	-	-	-	0-1,5	-	-
Na ₂ O+K ₂ O	14-16	7-10	0-4	0-2	0-2	11-21	0-1	0-0,2
TiO ₂	0-0,6	-	-	0-1,5	0-4	0-12	-	-
ZrO ₂	-	-	-	-	-	0-18	-	-
Fe ₂ O ₃	0-0,5	0-0,8	0-0,3	0-0,8	0-0,8	0-5	0-0,5	0-0,1
F ₂	0-0,4	-	-	0-1	-	0-5	0-0,3	-

Çizelge 2.4'te başlıca cam elyaf türlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.4. Cam elyaf türlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri (Anonim, 2014b)

Fiziksel/Mekanik Özellikler	Cam Türü							
	A	C	D	E	ECR	AR	R	S-2
Yoğunluk (g/cm ³)	2,44	2,52	2,12	2,58	2,72	2,70	2,54	2,46
Kırılma Endeksi	1,538	1,533	1,465	1,558	1,579	1,562	1,546	1,521
Yumuşama Noktası (°C)	705	750	771	846	882	773	952	1056
Tavlama Noktası (°C)	-	588	521	657	-	-	-	816
Çekme Dayanımı (MPa)								
-196 °C	-	5380	-	5310	5310	-	-	8275
23 °C	3310	3310	2415	3445	3445	3241	4135	4890
371 °C	-	-	-	2620	2165	-	2930	4445
538 °C	-	-	-	1725	1725	-	2140	2415
Elastisite Modülü (GPa)								
23 °C	68,9	68,9	51,7	72,3	80,3	73,1	85,5	86,9
538 °C	-	-	-	81,3	81,3	-	-	88,9
% Uzama	4,8	4,8	4,6	4,8	4,8	4,4	4,8	5,7

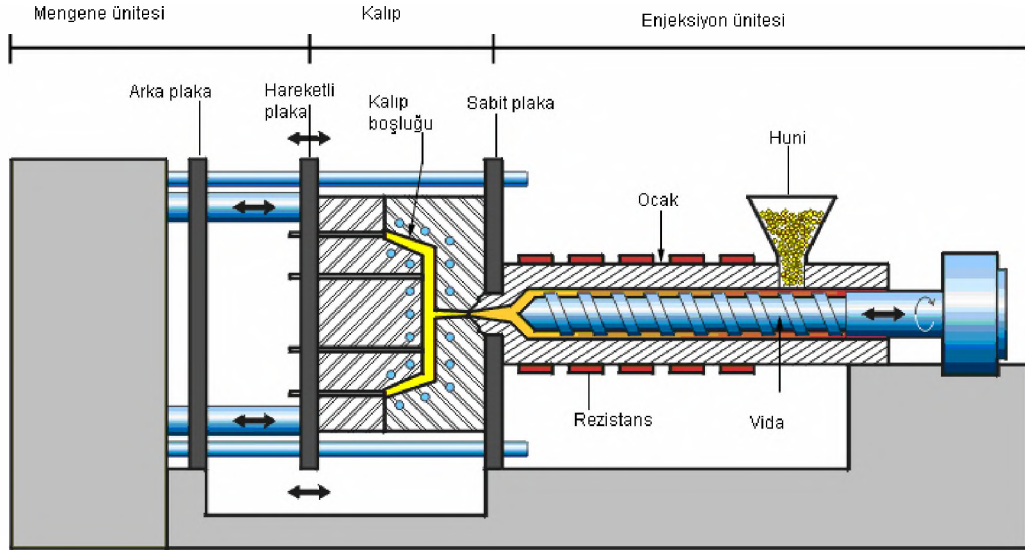
Çizelge 2.5'te PA 6.6 ile PA6.6-GF30 matrisli kompozitin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 2.5. PA 6.6 ve PA6.6-GF30'un mekanik özellikleri (Akkurt, 2007)

	PA 6.6	PA6.6-GF30
Yoğunluk (g/cm ³)	1,13-1,15	1,37-1,39
Çekme Kopma Dayanımı (MPa)	65-86	160-210
Çekme Elastisite Modülü (GPa)	2-2,8	10-11
Çekme Kopma Dayanımı (%)	60-300	2-3
Eğilme Kopma Dayanımı (MPa)	80-105	200-260
Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	2,8	7,8-9,1
Çentikli Darbe (N/mm)	15-20	-
Eğilmede Bükülme Sıcaklığı (°C)	66-110	245-260
Lineer Isıl Genleşme (°C \times 10 ⁻⁵)	8-10	2,3-4,0
Isıl İletkenlik (W/mK)	0,17-0,24	0,5
Su Emme (%/gün)	0,8-1,6	0,6-0,8

2.4. Plastik Enjeksiyon Kalıplama İşlemi

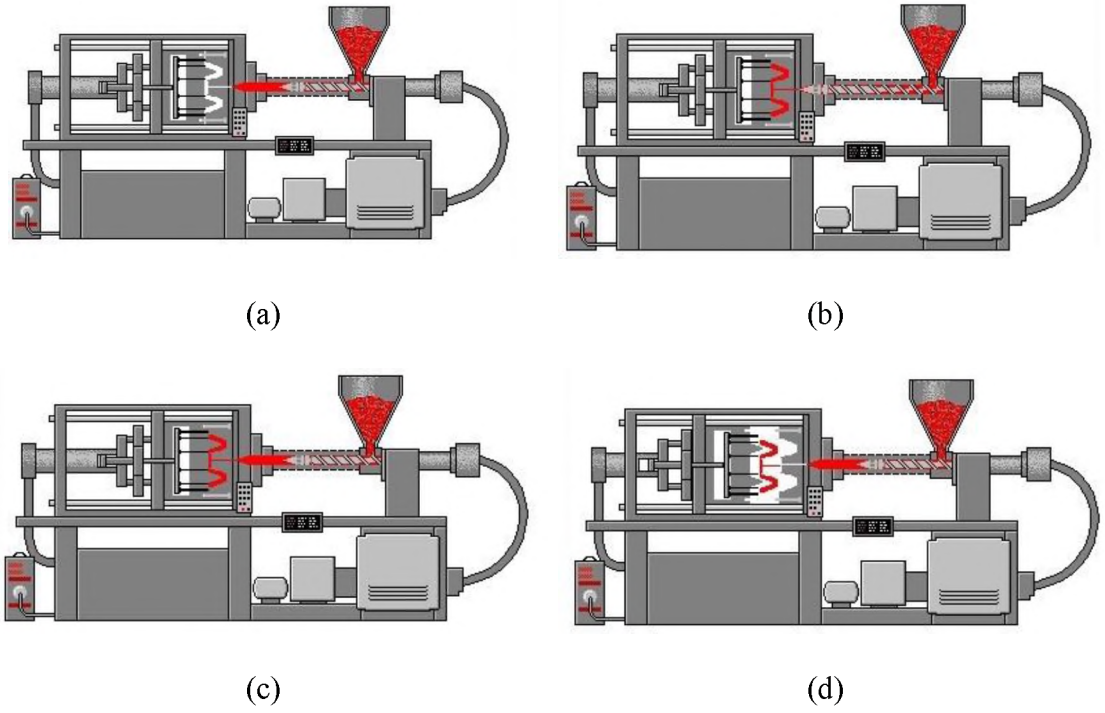
Enjeksiyon kalıplama, plastik malzemelerin ergitilip akışkan hale getirildikten sonra soğuk veya nispeten sıcak bir kalıp içerisinde basınç altında şekillendirilip, ardından soğutulurak katılaştırılması prensibine dayanan plastik işleme yöntemidir. Cep telefonu kapakları gibi çok detaylı ve küçük parçaların yanı sıra piknik sandalyesi gibi kaba ve büyük parçaların üretiminde de kullanılabilir. Özellikle kısa sürede çok sayıda parça üretme imkânı ve tam otomatik olarak işletilebilme gibi özellikleri sayesinde plastik sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılan bir işleme yöntemidir. Enjeksiyonla kalıplama, gerek enjeksiyon makinasının gerekse kalıp üretiminin pahalı olmasına rağmen aynı parçadan seri ve tam otomatik olarak çok sayıda üretilmesi halinde çok ekonomik bir yöntemdir (Kıralp ve ark., 2006). Şekil 2.3'te plastik enjeksiyon makinası ve kısımları şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.3. Plastik enjeksiyon makinası (Özmen, 2007)

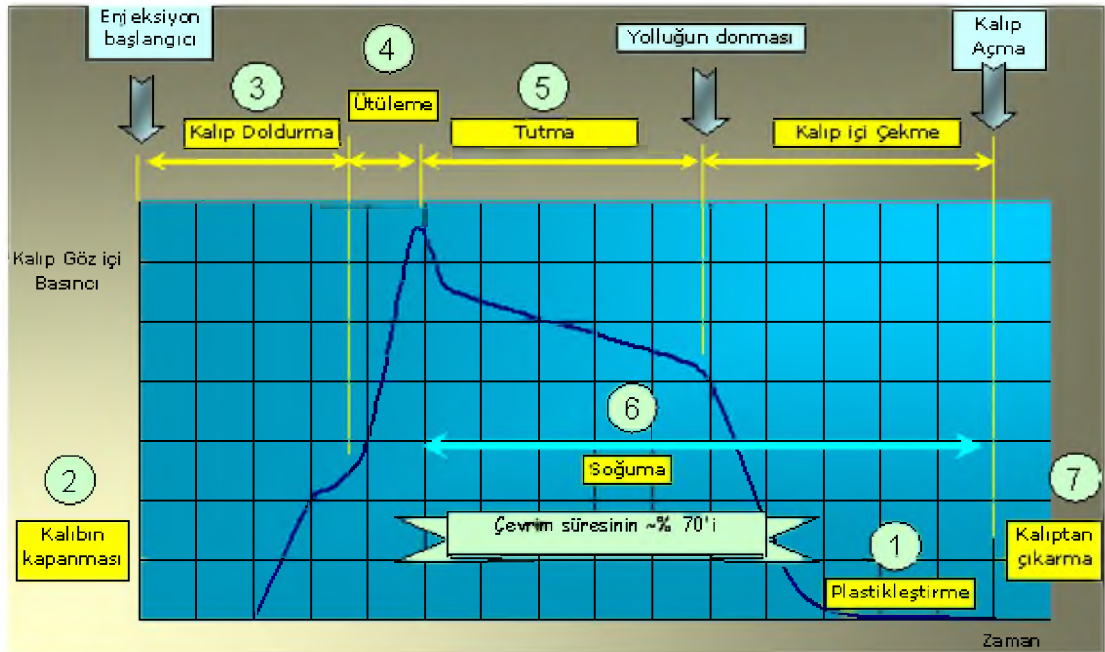
Plastik enjeksiyon makinasının çalışma prensibi

Prensip olarak enjeksiyon işlemi toz veya granül şeklinde bulunan reçinenin besleme hunisinden silindire aktarılması ve burada ısıtılarak ergimiş hale getirilmesi (Şekil 2.4.a), aynı anda silindirin içinde bulunan sonsuz vidanın dönerek malzemeyi silindirin ön kısmına taşıması ve burada toplanan malzemenin vidanın aksenal hareketi ile ergimiş reçineyi yüksek basınçla meme kanalı ve yolluktan kalıbın boşluğuna sevk etmesi (Şekil 2.4.b), parça halini alan reçinenin soğuyuncaya kadar baskı altında tutulması (Şekil 2.4.c) ve katılaştıktan sonra hareketli plakanın geri hareketi ile kalıbın açılması sonucu parça iticilerin yardımı ile dışarıya çıkarılması (Şekil 2.4.d) şeklinde ifade edilebilir. Kalıbın açılması sırasında vida geriye çekilir, parça çıktıktan sonra kalıp kapanır ve yeni bir iş için huniden silindire reçine aktarılır (Akkurt, 2007). Bu işlemin tamamına bir enjeksiyon çevrimi denir.



Şekil 2.4. Enjeksiyon aşamaları: (a) kapama, (b) enjeksiyon, (c) soğutma, (d) çıkarma

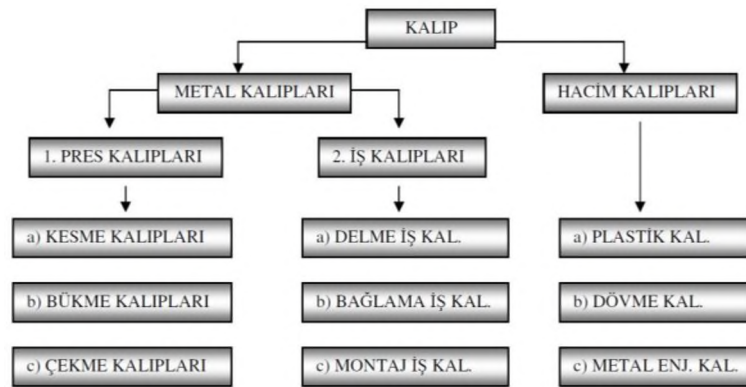
Şekil 2.5'te bir plastik enjeksiyon kalıplama çevrimi boyunca kalıp içindeki basıncın değişimi görülmektedir.



Şekil 2.5. Enjeksiyon işleminin parametreleri (Koyun, 2005)

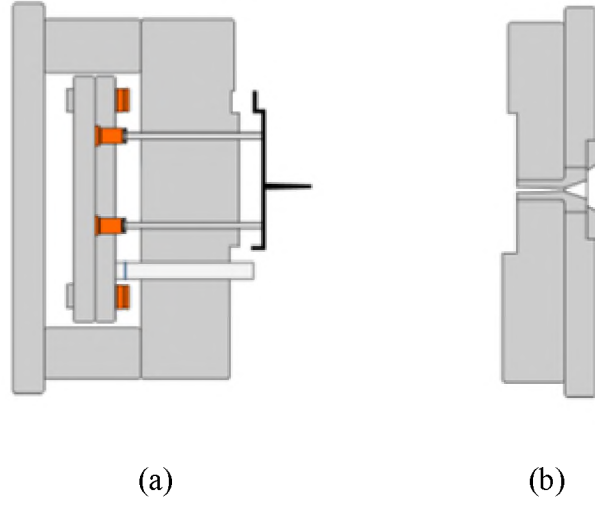
2.5. Plastik Enjeksiyon Kalıpları

Plastik enjeksiyon kalıpları çok sayıda özdeş parçayı seri olarak üretmeye yarayan araç şeklinde tanımlanır. Bir kalıbın tasarlanması, yapımı ve plastik enjeksiyon makinasına bağlanması oldukça maliyetli olmakla birlikte bir plastik enjeksiyon çevriminde hızlı şekilde çok sayıda parça imal edilmesi ürün maliyetlerini düşürmektedir (Köse, 2006). Şekil 2.6’da plastik enjeksiyon kalıplarının kalıpçılık alanındaki yeri görülmektedir.



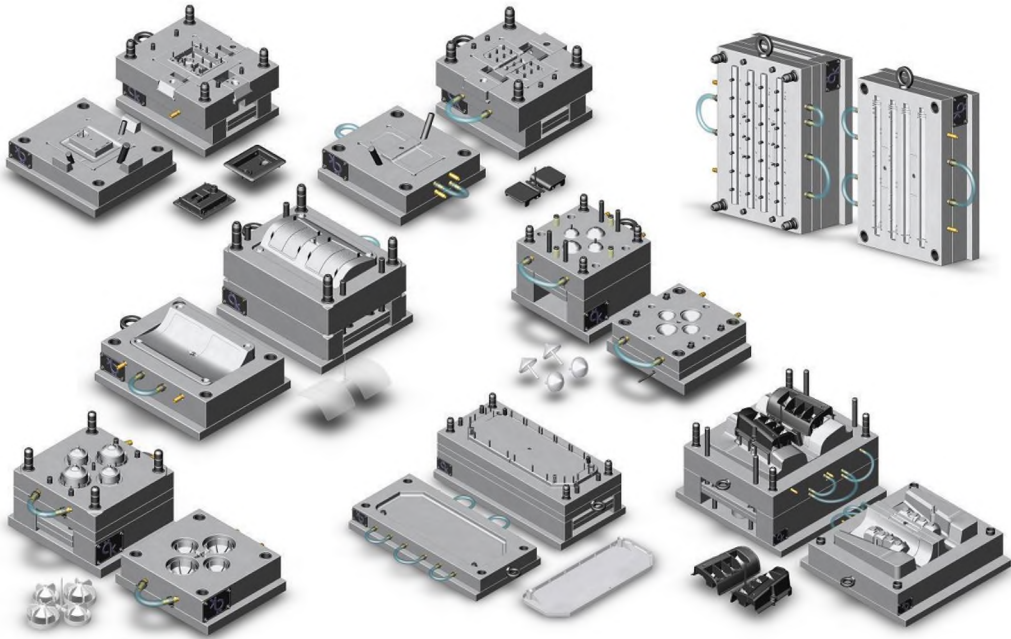
Şekil 2.6. Kalıpların sınıflandırılması (Köse, 2006)

Plastik enjeksiyon kalıpları üretilecek parçaya göre çok çeşitli şekillerde olabilir. Bununla birlikte tüm kalıpların ortak elemanları bulunur. Genelde standart bir enjeksiyon kalıbı, dişi olarak adlandırılan sabit ve erkek olarak adlandırılan hareketli kısımlardan meydana gelir (Akkurt, 2007). Şekil 2.7’de kalıbın hareketli ve sabit kısımları şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.7. Kalıbın (a) hareketli ve (b) sabit kısımları

Şekil 2.8’de değişik uygulamalara ait plastik enjeksiyon kalıp örnekleri görülmektedir.



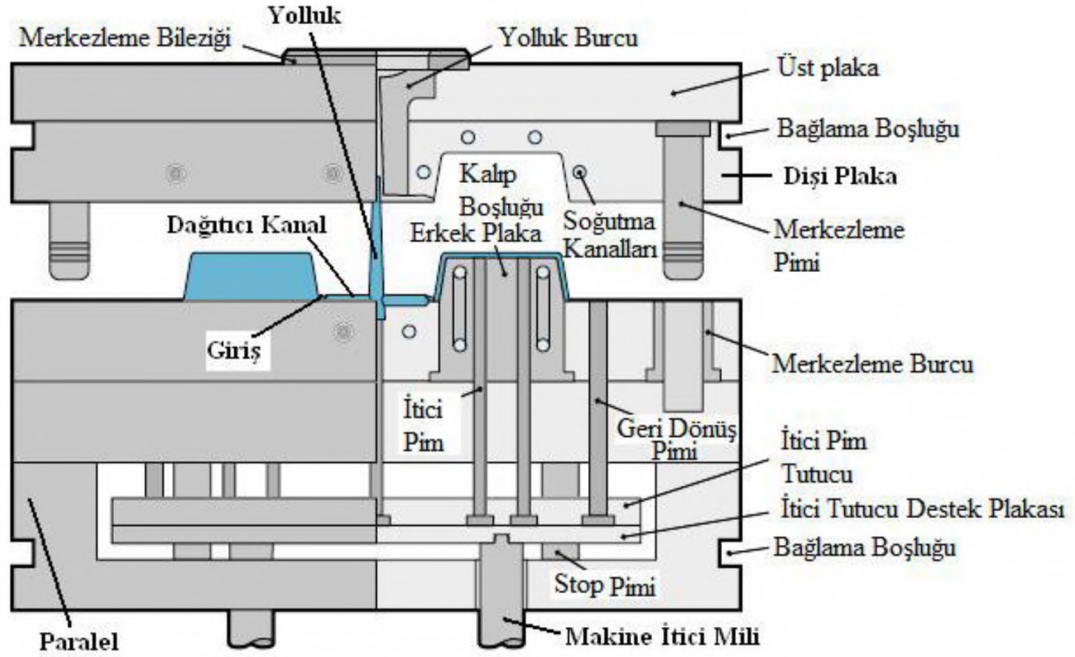
Şekil 2.8. Değişik enjeksiyon kalıpları

Plastik enjeksiyon kalıplamada kaliteli bir parça elde etmek için işlem parametrelerinin yanı sıra uygun kalıp tasarımı da son derecede önemlidir. Bununla birlikte, kalıbın içindeki boşluk parça şeklini ifade ettiğinden kalıp tasarımında

parçanın katı modeli dikkate alınır. Başka bir deyişle, kalıp tasarımı ile parça modeli iç içedir. Bu nedenle bilinçli bir kalıp tasarımı için enjeksiyon makinasının özellikleri, kalıp konstrüksiyonu, kalıbın boşluk sayısı, yolluk sistemi, ağız tasarımı, kalıbın ısıtılma veya soğutulma durumu, parça çıkarma sistemi, kalıp malzemesi, yüzey kalitesi ve gaz çıkış sistemi çok iyi bilinmelidir (Akkurt, 2007).

2.5.1. Kalıp konstrüksiyonu

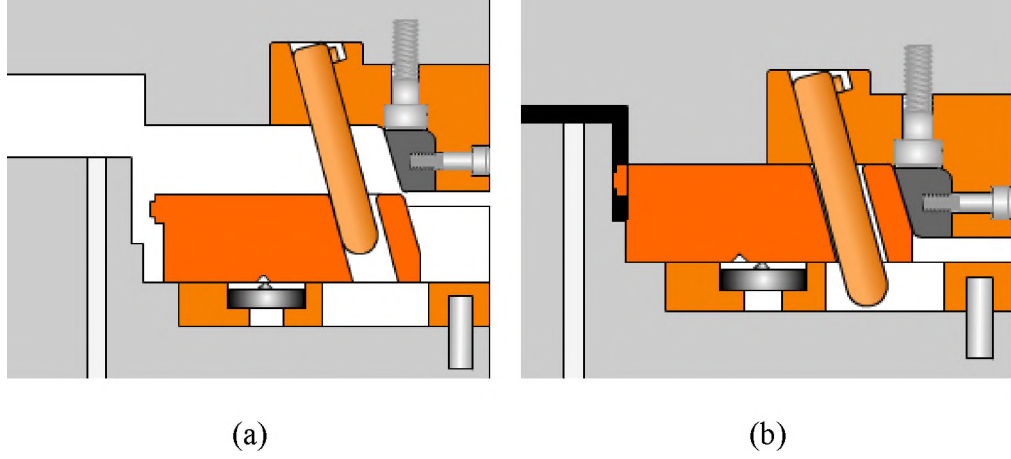
Bir plastik enjeksiyon kalıbı pek çok ana ve yardımcı elemandan oluşur. Şekil 2.9'da örnek bir kalıbın erkek ve dişi kısımlarına ait tüm elemanlar görülmektedir.



Şekil 2.9. Kalıp konstrüksiyonu (Buldu, 2007)

Daha karmaşık tasarıma sahip maçalı kalıplarda kızak, kama sistemleri gibi iç veya maça hareket elemanları ve birçok ayırım yüzeyleri bulunur. İç hareket elemanları manuel, mekanik, hidrolik, pnömatik veya elektromekanik sistemlerle hareket ettirilebilir. Şekil 2.10'da kızak şeklinde bir kam içeren kalıp geometrisi görülmektedir. Kam, kam pimleri tarafından hareket ettirilir (Akkurt, 2007). Açılı pimler 20° ile 50° arasında bir eğim açısına sahiptirler. Kızakların stroğu, pimlerin

eğim açısına ve boyuna bağlıdır. Kızaklar genellikle yaylıdır ve dayamalar tarafından sonraki kalıplama işlemi için uygun pozisyonda tutulurlar (Ataşimşek, 2006).



Şekil 2.10. İç hareket elemanlı bir kalıbın (a) açık ve (b) kapalı hali

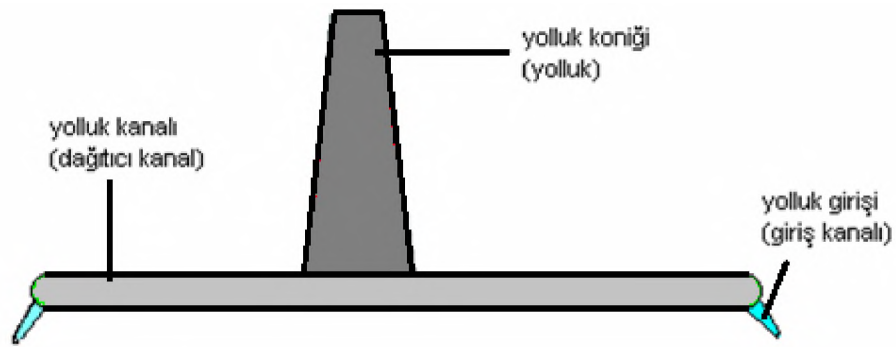
2.5.2. Enjeksiyon kalıplarındaki yolluk sistemleri

Yolluk sistemi ergimiş reçinenin enjeksiyon makinasının memesinden kalıp içinde bulunan boşluklara dağıtılmasını sağlayan bir kanallar sistemidir. Yolluk sisteminden geçerken reçine, basıncın düşmesine neden olan, bir takım hidrolik dirençlerle karşılaşır. Yolluk içinde bulunan daralmalar, köşeler ve yolluk yüzeyinin kalitesi gibi engeller basıncın daha çok düşmesine neden olurlar. Bu nedenle yolluk sisteminin doğru tasarımı, kalıp konstrüksiyonunda çok büyük önem taşımaktadır. Hidrolik dirençlerin azaltılması için en uygun önlem yolluk burcunun ve yollukların olabildiğince kısa tutulmasıdır. Bunun yanı sıra yolluk sistemlerinin doğru tasarımında ergimiş reçinenin boşluklara düzgün olarak dağıtılması, çok boşluklu sistemlerde boşluk ve ağızların dengeli biçimde doldurulması, minimum ıskarta, parçanın kolay çıkarılması, minimum enerji kullanımı ve çevrim süresinin düşürülmesi gibi hususlara dikkat edilmesi gerekir (Akkurt, 2007).

Soğuk yolluklu kalıplar

Genel olarak soğuk yolluk sistemi; yolluk konisi, yolluk kanalı ve yolluk girişinden meydana gelir. Tek gözlü kalıplarda ise yolluk sistemi sadece yolluk konisinden oluşur (Anonim, 2013b).

Ergimiş plastik yolluklardan geçerek kalıp boşluğuna ulaşır. Katılaştıran plastiğin hareketli yarısı kalıpla birlikte yolluktan kolay çıkması için, yolluk kesik bir koni şeklinde tasarlanır. Koni açısı genelde 2° ile 6° arasındadır. Yolluk genelde bir burç içinde bulunur. Bu burç doğrudan sabit plakanın bulunduğu kalıba takılır (Akkurt, 2007). Şekil 2.11’de basit bir yolluk sistemi görülmektedir.



Şekil 2.11. Soğuk yolluk sistemi (Anonim, 2013b)

Yolluk sistemi tasarlanırken; yolluk ölçülerinin parça boyutları dikkate alınarak belirlenmesi, ütüleme işleminin gerçekleşebilmesi için yolluğun diğer kesitlerden önce sertleşmemesi, yolluğun kalıptan kolayca ve güvenli şekilde çıkması ve dağıtıcı kanalların basınç kaybını azaltarak akışı hızlandıracak boyutlarda olmasına dikkat edilmesi gerekir.

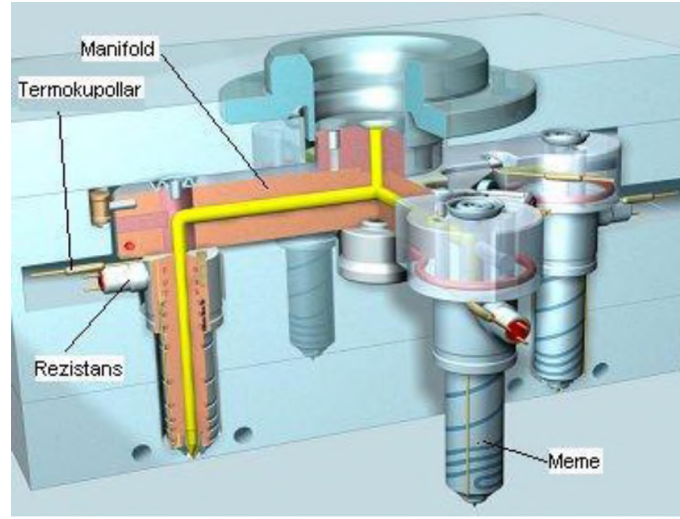
Sıcak yolluklu kalıplar

İdeal bir enjeksiyon işleminde, kalıplanan parçanın mümkün olduğunca homojen yoğunlukta olması ve yolluk ve çapaklardan arındırılmış bir şekilde çıkması istenir. Bu şekilde sağlanan malzeme tasarrufu azımsanmayacak düzeydedir. Sıcak yolluk sistemli kalıplarda yolluk etrafına yerleştirilen rezistans, yolluğun belli bir sıcaklıkta

tutulmasını sağlayarak yollukların parçayla çıkmasını önler. Bu tip kalıpların tasarımı daha karmaşık olduğundan daha pahalıdır ve tecrübe gerektirir. Parça çıktıktan sonra çapakların ve yollukların temizlenmesi için gereken işçilik masrafları da sıcak kalıplamada düşmektedir (Köse, 2006).

Sıcak yolluk sistemi, klasik yolluklu bir kalıbın haricinde ek birtakım donanımlardan meydana gelmektedir. Genel hatlarıyla bunlar sıcak yolluk dağıtıcı, sıcak yolluk memesi, ısıtıcılar ve ısı kontrol elemanları şeklinde dört ana gruba ayrılır.

Bu dört ana gruba ek olarak sıcak yolluk malzeme filtresi ve enerjinin verimli kullanılmasını sağlayan yalıtım malzemesi de bulunabilir. Şekil 2.12’de sıcak yolluk sisteminin kesiti görülmektedir (Anonim, 2013c).



Şekil 2.12. Sıcak yolluk sistem kesiti (Çınar, 2005)

3. AKIŞIN MATEMATİKSEL MODELİ

Plastiklerin akış analizleri kütle, momentum ve enerjinin korunumu prensipleri dikkate alınarak gerçekleştirilir. Doğrusal zincirlere sahip ergimiş plastiklerin akışı basınç, hız ve sıcaklığın yanı sıra kayma hızı, viskozite ve yoğunluk parametrelerinin de etkisi altındadır. Plastikler kimyasal yapıları nedeniyle sıcaklıkla genişirken, basınç karşısında sıkışma özelliği gösterirler. Plastiklerin viskoziteleri de kendine has karakteristik bir yapıdadır. Bu nedenlerle plastiklerin akışını ifade eden bağıntılar diferansiyel formda olup çözümleri oldukça karmaşıktır. Diferansiyel formdaki temel denklemlerin analitik çözümleri için bazı yöntemler geliştirilmiş ise de, analitik çözümler tek boyutta sınırlı kaldığından, plastiklerin akış simülasyonunun ve dinamiğinin incelenmesinde pek kullanılmamıştır. Analitik çözümün uygun olmadığı bu akış türünde, diferansiyel ifadeler için çok çeşitli sayısal çözümler geliştirilmiştir. Karmaşık yapıda olan ergimiş plastiklerin akışlarının incelenmesinde, belirli kabuller yapılarak diferansiyel ifadeler sadeleştirilip uygun sınır şartlarına göre çözümlenebilmektedir. Bu bağlamda Hele-Shaw yaklaşımı olarak bilinen modelde, temel denklemler belirli kabuller yapılarak sadeleştirilmektedir. Hele-Shaw yaklaşımında akışkanın sıkıştırılmaz olduğu kabul edilir (Gültaş, 2004).

Kütle korunumu ilkesine göre;

$$\frac{dm_{kh}}{dt} = \sum_{giren} \dot{m} - \sum_{çıkan} \dot{m} \quad (3.1)$$

olup burada; m, kütleyi; t, zamanı ve kh, kontrol hacmini ifade etmektedir. Kütleli debi ise;

$$\dot{m} = \rho V_{ort} A_c \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada; ρ , akışkanın yoğunluğunu; V_{ort} , ortalama hızı ve A_c , akışa dik kesit alanını ifade eder.

Bu denklem, kontrol hacminin içerisindeki kütlenin zamana bağlı değişim hızı ile kontrol yüzeyinden olan net kütle geçişinin toplamının sıfıra eşit olduğunu ifade eder (Çengel ve Cimbala, 2008).

Sıkıştırılamaz akışkanlar için süreklilik denklemi;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada; $\vec{\nabla}$, diverjans operatörü, \vec{V} ise hız vektörünü ifade eder. Sıkıştırılamaz akışkanlar için Navier-Stokes ifadesi;

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V} \quad (3.4)$$

şeklinde olup burada; P, basıncı; g, kütlelesel kuvvetleri; μ , dinamik viskoziteyi ifade eder. Sıkıştırılamaz akışkanlar için süreklilik denklemi (Eş. 3.3.) kartezyen koordinat sisteminde açık formda;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada; u, v, w sırasıyla x, y, z doğrultularındaki hız bileşenleridir. Sıkıştırılamaz akışkanlar için Navier-Stokes (Eş. 3.4.) denkleminin üç boyutlu zamana bağlı ifadesinin x, y, z bileşenleri sırasıyla;

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.8)$$

Akışkanın sıkıştırılmaz ve katı cisim cidarında yüzeye paralel olduğu kabulü ile μ/ρ terimi sabit olacağından eşitliklerin her iki tarafı ρ ile bölünürse; Eş. 3.6, Eş. 3.7 ve Eş. 3.8 sırasıyla;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.11)$$

şeklinde sadeleştirilebilir. Burada; ν , kinematik viskoziteyi ifade eder.

Akışın sürekli rejimde olduğu kabulüyle zamana göre türev ve kinematik viskozite sıfır olacağından Euler Enerji Denklemi'nin x, y, z bileşenleri sırasıyla;

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x \quad (3.12)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y \quad (3.13)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g_z \quad (3.14)$$

eşitleri ile ifade edilir. Ergimiş plastiğin kalıp içindeki akışında sürtünme, genişleme, daralma ve yön değiştirme gibi nedenlerle önemli enerji kayıpları ortaya çıkar. Kayıplar sürekli ve yerel kayıplar olarak iki başlıkta toplanır. Toplam yük kaybı;

$$h_{K,\text{toplam}} = h_{K,\text{sürekli}} + h_{K,\text{yerel}} \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilir. Bir boru içindeki akışta sürtünmeden kaynaklanan kayıplar sürekli dir. Sürekli kayıplar; akışkan yoğunluğu ve viskozitesi, boru çapı ve uzunluğu, boru iç yüzeyinin pürüzlülüğü ve akış hızına bağlı olup;

$$h_{K,\text{sürekli}} = f \frac{L}{D} \frac{V_{\text{ort}}^2}{2g} \quad (3.16)$$

şeklide ifade edilir. Burada; f, sürtünme faktörü; L, boru uzunluğu; D, boru iç çapı; V_{ort} , akışın ortalama hızını ve g ise yerçekimi ivmesidir.

Yaygın olarak kullanılan bir borulama sisteminde akışkan, borulara ek olarak birçok bağlantı elemanı, vana, dönüş, dirsek, T, giriş, çıkış, genişleme ve daralmalardan geçer. Bu elemanlar akışkanın düzgün akışını kesintiye uğratıp akışı ayırdıkları ve akışın karışmasına yol açtıkları için ilave kayıplara neden olurlar. Bu tür kayıplara yerel kayıplar adı verilir (Çengel ve Cimbala, 2008). Yerel kayıplar;

$$h_{K,\text{yerel}} = K_K \frac{V_{\text{ort}}^2}{2g} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilir. Burada; K_K , yerel kayıp katsayısını ifade eder.

Kalıp boşluğunun karmaşık olduğu ve akışın tek yönde olmadığı durumlarda genelde akış türbülanslı olur. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş; geometri, yüzey pürüzlülüğü, akış hızı, yüzey sıcaklığı, akışkan türü gibi pek çok parametreye bağlıdır. Osborne Reynolds, 1880'li yıllarda yaptığı ayrıntılı deneylerden sonra, akış rejiminin temelde akışkandaki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranına bağlı olduğunu keşfetmiştir. Bu orana Reynolds Sayısı (Re) denir. Reynolds sayısı boyutsuz olup dairesel borudaki iç akış için;

$$\text{Re} = \frac{F_{\text{atalet}}}{F_{\text{viskoz}}} = \frac{V_{\text{ort}} D}{\nu} = \frac{\rho V_{\text{ort}} D}{\mu} \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilir (Çengel ve Cimbala, 2008). Burada; V_{ort} , ortalama akış hızını; D , geometrinin karakteristik uzunluğunu ifade eder.

İç akışta Reynolds sayısı ve sürtünme faktörü arasındaki ilişki;

laminer akış ($\text{Re} < 2320$) için,

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (3.19)$$

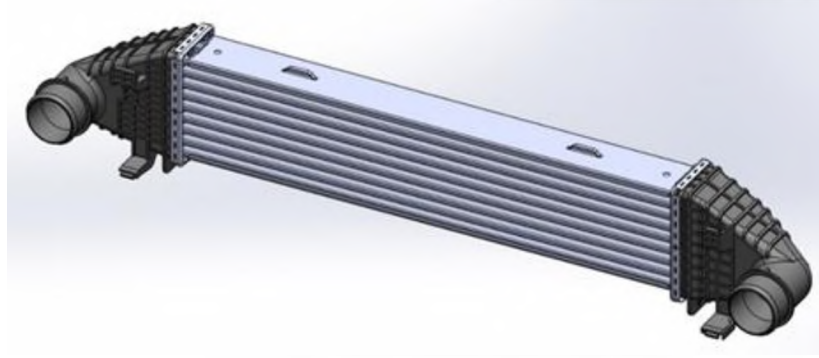
şeklinde ifade edilir. Geçiş akış ($2320 < \text{Re} < 4000$) ve türbülanslı akış ($\text{Re} > 4000$) için ise,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, ε/D ortalama pürüz yüksekliğinin boru çapına oranı olan bağıl pürüzlülüğü ifade eder.

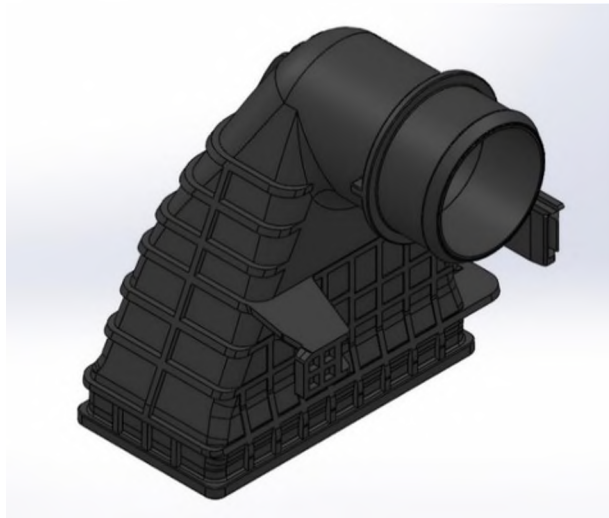
4. SONLU ELEMAN ANALİZİ

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe kullanılan bir ara soğutucu sistemine ait kazanın plastik enjeksiyon kalıplama ile imalatı sonlu eleman yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analizde yolluk konum ve geometrisinin uygun değerleri belirlenmiş; enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon sonrası parçadaki basınç dağılımı, sıcaklık artışı, maksimum kayma gerilmesi bölgeleri ve değeri, kayma oranı, donmuş tabaka oranı, soğuma süresi, çökme izleri, dolum kolaylığı ve çevrim süresinin değişimi incelenmiştir. Şekil 4.1’de ara soğutucu sisteminin üç boyutlu katı modeli görülmektedir.



Şekil 4.1. Ara soğutucu sistemi

Şekil 4.2’de sisteme ait kazanın üç boyutlu katı modeli görülmektedir.



Şekil 4.2. Ara soğutucu sistemi kazanı

Parçanın imalatı BASF (Ultra Polimer) firmasından tedarik edilen Ultramid A3WG6 (Anonim, 2014c) ticari isimli kütlege % 30 cam elyaf içeren PA6.6-GF30 malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Resim 4.1’de plastik enjeksiyon işlemine tabi tutulan PA6.6-GF30 granüller görülmektedir.



Resim 4.1. PA6.6-GF30 granüller

Resim 4.2’de imalatı yapılan ara soğutma sistemine ait PA6.6-GF30 malzemeli kazanın fotoğrafı görülmektedir.

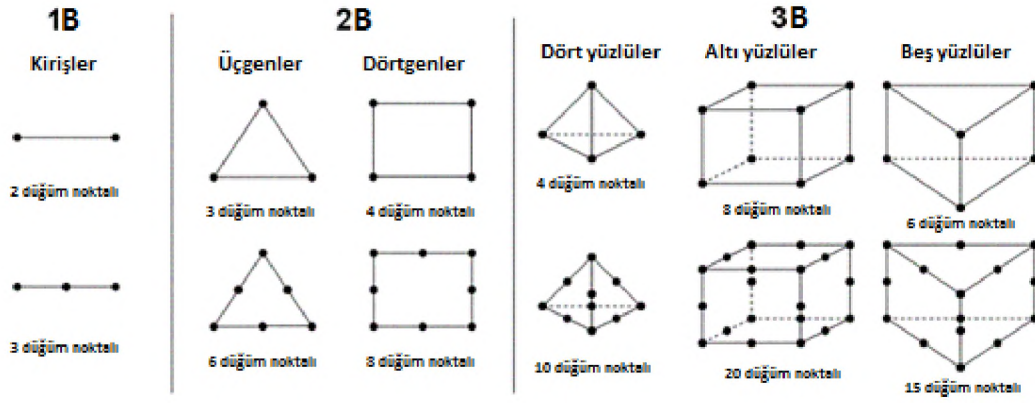


Resim 4.2. Ara soğuma kazanının fotoğrafı

4.1. Sonlu Eleman Yöntemi

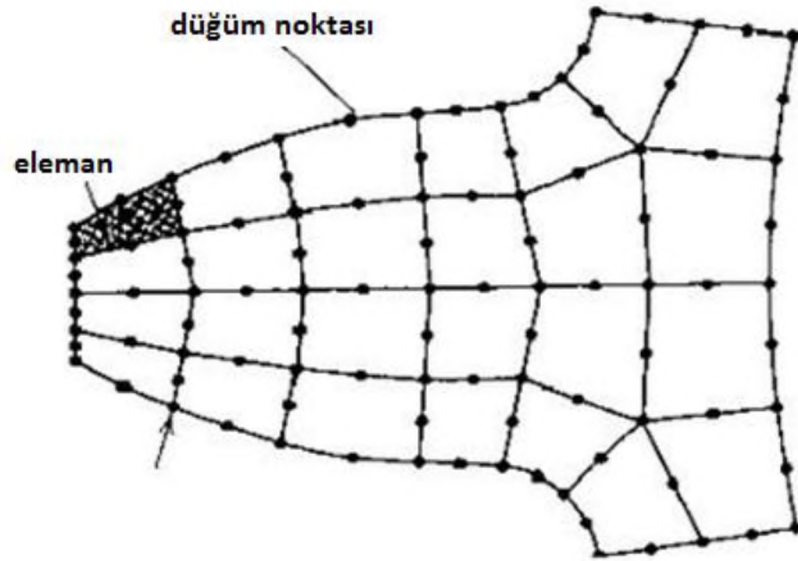
Analitik olarak çözülmesi zor olan karmaşık problemler uygun şekilde modellenebildikleri takdirde sayısal yöntemler kullanılarak çözülebilirler. Örneğin, dış kuvvet etkisi altındaki karmaşık geometriye sahip bir cisimde ortaya çıkan gerilme veya deformasyonların analitik olarak hesaplanması oldukça zordur. Bu gibi durumlarda sayısal yöntemler işlemin matematiksel boyutunu kolaylaştırır, ancak hesap yükü genellikle artar. Ayrıca optimizasyon problemleri gibi durumlarda hesaplama işlemlerinin defalarca tekrarlanması gerekebilir. Bu gibi durumlarda, bilgisayar desteği problemin çözümünü son derece kolaylaştırır. Sonlu eleman yöntemi mühendislik problemlerinin sayısal çözümünde oldukça etkili ve esnek bir yaklaşımdır (Özyılmaz, 2011).

Sonlu eleman yöntemi problemin modelinin oluşturulması, çözüm için kullanılacak mekanik ilkelerin belirlenmesi, modele ait malzeme parametrelerinin atanması, modelin sonlu elemanlara bölünmesi, dış yüklerin uygulanması, sınır şartların ve etkileşimlerin tanımlanması gibi adımlardan oluşur. Optimum eleman sayısının belirlenmesi sonlu eleman çözümünde son derece önemlidir. Sonlu eleman sayısının artırılması çözümün hassasiyetini artırır, ancak özellikle üç boyutlu problemlerde eleman boyutunun yarıya indirilmesi eleman sayısını sekiz katına çıkaracağından problemin çözüm süresini de aynı oranda artırır. Genellikle kritik olan bölgelerde küçük boyutlu elemanlar kullanarak diğer bölgelerde eleman boyutunun büyük tutulması eleman sayısının azaltılmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Çünkü kritik bölgelerde daha hassas çözüme ihtiyaç duyulur. Örneğin, bir delikli plakta delik çevresinde veya içinden yoğun akış olan bir boruda dirsek bölgesinde eleman yoğunluğu artırılmalıdır (Özyılmaz, 2011). Eleman sayısının yanında, doğru eleman tipinin seçimi de elde edilen sonucu etkiler. Aynı model içerisinde farklı eleman tipleri kullanılabilir. Şekil 4.3'te sonlu eleman yönteminde kullanılan çeşitli eleman tipleri görülmektedir.



Şekil 4.3. Sonlu eleman tipleri (Anonim, 2014d)

Modelin sonlu elemanlara bölünmesinde düğüm noktalarından yararlanılır. Şekil 4.4'te iki boyutlu bir dişli modelinin 8 düğüm noktalı dörtgen elemanlara ayrılması görülmektedir.



Şekil 4.4. Sonlu eleman ağ yapısı

4.2. Analiz Prosedürü

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminde ergimiş malzemenin kalıp boşluğunu doldurması sırasında malzeme akışının analizinde model olarak kalıp boşluğu kullanılmıştır. Akış analizlerinde SolidWorks üç boyutlu katı modelleme ticari paket programının plastik parça ve enjeksiyon kalıp tasarımında kullanılan Plastics Premium modülü kullanılmıştır. Bu modül tasarımın ilk aşamalarından itibaren üretim hatalarının öngörülmesini ve önlenmesini sağlayan bir araçtır (Anonim, 2014e). Analizler Dell Precision T7500 (v3) modeli iş istasyonunda yürütülmüştür. İş istasyonunun özellikleri Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. Dell Precision T7500 (v3) iş istasyonu özellikleri

Kasa	1 100 Watt
İşlemci	Çift Intel Xeon X5650 (12 Çekirdek, 2,66 GHz)
Chipset	Intel 5520
İşletim Sistemi	Windows 7 Pro 64bit
Bellek	96 GB DDR3 ECC 1 333MHz
Sabit Disk	2 TB (7 200 rpm) SATA3
Ekran Kartı	2.5 GB nVidia Quadro 5000

4.2.1. Malzeme

Plastik enjeksiyon işleminde BASF üretici firmasına ait Ultramid A3WG6 ticari isimli PA6.6-GF30 malzeme kullanılmış olup fiziksel, mekanik ve enjeksiyon kalıplama özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Ultramid A3WG6 SolidWorks veritabanı bilgileri (SolidWorks, 2013)

Ticari İsmi: BASF/Ultramid A3WG6	
Yoğunluğu	1,36 g/cm ³
Elyaf Yüzdesi	% 30
Maksimum Ergime Sıcaklığı	317 °C
Minimum Ergime Sıcaklığı	270 °C
Maksimum Kalıp Sıcaklığı	90 °C
Minimum Kalıp Sıcaklığı	70 °C
Kalıptan Çıkarma Sıcaklığı	255 °C
Camsı Geçiş Sıcaklığı	267 °C
Özgül Isı	2 890 J/(Kg-K)
Isıl İletkenlik	0,125 W/(m-K)
Paralel Elastisite Modülü	11 GPa
Normal Elastisite Modülü	4,6 GPa
Paralel Poisson Oranı	0,4
Normal Poisson Oranı	0,57
Paralel Isıl Genleşme Katsayısı	0,000024 1/°C
Normal Isıl Genleşme Katsayısı	0,000071 1/°C
Ergime Akış Oranı	4 cm ³ /dk
Maksimum Kayma Gerilmesi	0,495 MPa
Maksimum Kayma Oranı	60 600 s ⁻¹

4.2.2. Eleman boyutunun belirlenmesi

Sonuçların gerçek değere yakınsadığı eleman sayısının belirlenmesi için analiz işlemleri eleman sayısı kademeli olarak artırılarak tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre 4 mm eleman boyutuna sahip model kullanılmış ve model geometrik olarak karmaşık yapıda olduğu, keskin köşe ve kenarlar içerdiği için yerel olarak eleman boyutu küçültülmüştür. Elde edilen modelde düğüm noktası sayısı 48 234, eleman sayısı ise 96 464 olmuştur. Çizelge 4.3'te farklı eleman boyutları kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin sonuçları görülmektedir. Sonuç

olarak model 96 464 adet üçgen kabuk sonlu elemana bölünmüştür. Şekil 4.5'te plastik kazanın nihai sonlu eleman modeli görülmektedir.

Çizelge 4.3. Eleman boyutuna bağlı olarak analiz sonuçları

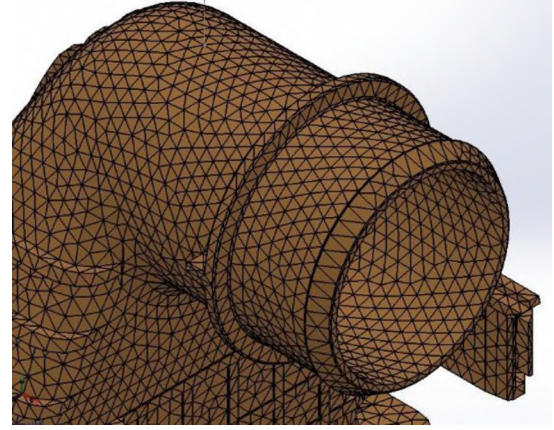
Eleman özellikleri						Analiz sonuçları	
EB	ES	KE	ÇKE	TDN	TES	MEB	DTO
Yerel eleman boyutu küçültme yok							
6,0	10 006	10,20	2,69	7 321	14 638	23,15	0,3968
5,5	11 909	10,18	2,15	8 222	16 440	23,69	0,3368
5,0	14 409	5,48	1,84	9 541	19 078	23,64	0,3147
4,5	17 789	5,88	1,24	11 179	22 354	23,49	0,2500
4,0	22 515	4,58	0,86	13 256	26 508	24,32	0,3143
3,5	29 407	2,40	0,60	16 302	32 600	24,22	0,3483
3,0	40 027	1,59	0,45	21 114	42 224	24,31	0,3490
Yerel eleman boyutu küçültme var							
6,0	10 006	0,88	0,69	29 965	59 926	23,69	0,5405
5,5	11 909	0,83	0,61	34 500	68 996	24,23	0,5569
5,0	14 409	0,73	0,53	39 973	79 942	23,79	0,5318
4,5	17 789	0,81	0,48	43 936	87 868	23,96	0,5472
4,0	22 515	0,71	0,40	48 234	96 464	24,07	0,5569
3,5	29 407	0,54	0,36	54 756	109 508	24,06	0,5608
3,0	40 027	0,30	0,32	60 806	121 608	23,94	0,5120

EB: Eleman Boyutu (mm), ES: Eleman Sayısı (-), KE: Kötü Eleman (%), ÇKE: Çok Kötü Eleman (%), TDN: Toplam Düğüm Noktası (-), TES: Toplam Eleman Sayısı (-), MEB: Minimum Enjeksiyon Basıncı (MPa), DTO: Donmuş Tabaka Oranı (-)

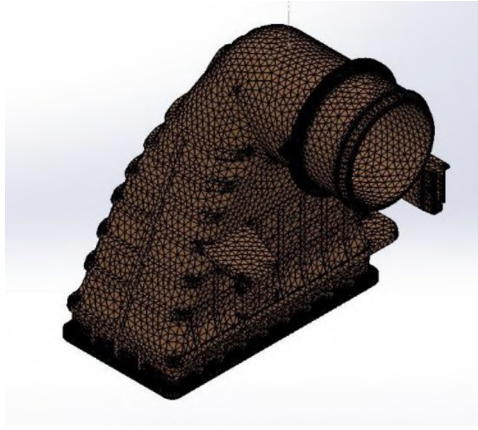
Şekil 4.5'te 4 mm eleman boyutu ile yerel eleman boyutu küçültme işleminin yapıldığı ve yapılmadığı durumlarda modelin sonlu elemanlara bölünmüş halleri görülmektedir.



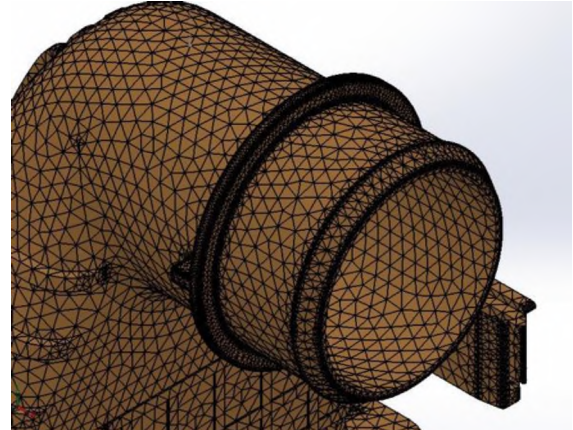
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.5. Modelin sonlu eleman yapısı: (a, b) yerel eleman küçültme yapılmamış, (c, d) yerel küçültme yapılmış

4.2.3. Yolluk konum ve geometrisinin belirlenmesi

Yolluğun konumu, malzemenin kalıbın uç kısımlarını aynı anda doldurması açısından son derece önemlidir. Yolluğun geometrisi ise kalıbın girişi ile uç kısmı arasındaki basınç farkını, diğer bir ifadeyle işlemi gerçekleştirebilmek için gerekli enjeksiyon basıncını belirler. Bu nedenle öncelikle yolluk konum ve geometrisinin uygun değerlerinin belirlenmesi gerekir. Kalıba ergimiş plastiğin girişi için en uygun bölge dairesel boru şeklindeki bağlantı bölgesi olup, dairesellik nedeniyle yolluk alt çapının olabildiğince küçük tutulması gerekmektedir. Buna bağlı olarak ergimiş plastiğin akışını zorlaştıracığından yolluk üst çapının çok dar olmaması için koniklik

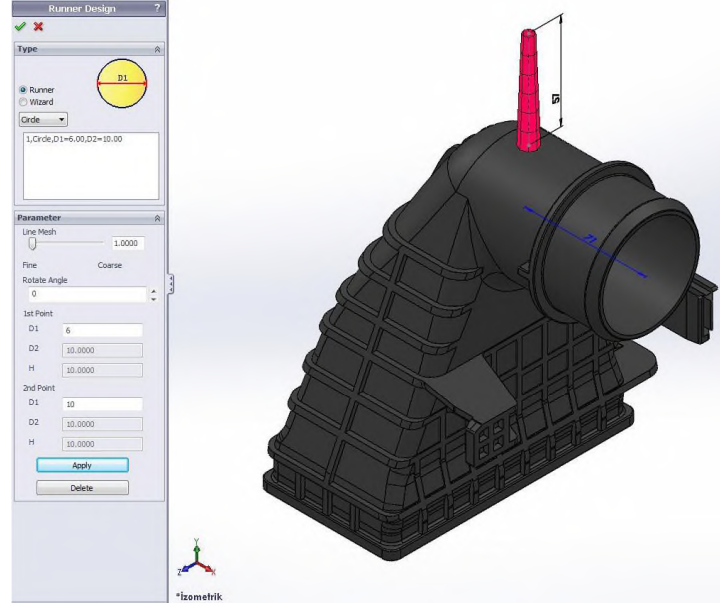
önerilen minimum değer olan 2° seçilmiştir. Çizelge 4.4'te yolluk geometrisi ile basınç farkı, kayma gerilmesi ve kayma oranının değişimi görülmektedir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda en düşük basınç farkı, kayma gerilmesi ve kayma oranı değerlerini verdiği için yolluk üst çapı 6 mm, yolluk alt çapı 10 mm, yolluk boyu 57 mm ve yolluk açısı 2° belirlenmiştir.

Katkısız malzemeler ile imal edilen parçalarda görülen etkilerin tamamı cam elyaf takviyeli parçalarda da gözlenmektedir. Ancak elyaf takviyeli plastikler kullanılarak gerçekleştirilen tasarımlarda elyafın yönlenme doğrultusu ürünün mekanik özelliklerini etkilemektedir. Yapıdaki elyaf takviyeleri malzemenin akış yönü doğrultusunda yönlenmekte ve böylece doğal olarak parçanın farklı eksenlerde farklı mukavemet özellikleri göstermelerine sebep olmaktadır. Bu durumda akış yönünü belirleyen etkenler elyaf takviyeli polimerlerden üretilmiş parçaların dayanım özelliklerini de belirlemektedir. Bu etkenlerden en önemlisi yolluk giriş noktasının konumudur. Kısa elyaf takviyeli malzemeler ile imalat yapılacağı zaman kalıp tasarımı sırasında yolluk girişinin kozmetik, ekonomik, ve üretim verimliliği gibi etkilerinin yanı sıra bu durumun da dikkate alınması gereklidir. Yanlış yerleştirilen yollukların konumunun seri imalat aşamasında değiştirilmesi oldukça maliyetlidir. Bu nedenle, tasarım aşamasındayken bu durumun dikkate alınması önemli avantajlar sağlar (Paksoy, 2008).

Çizelge 4.4. Yolluk geometrisinin çıkış parametrelerine etkisi

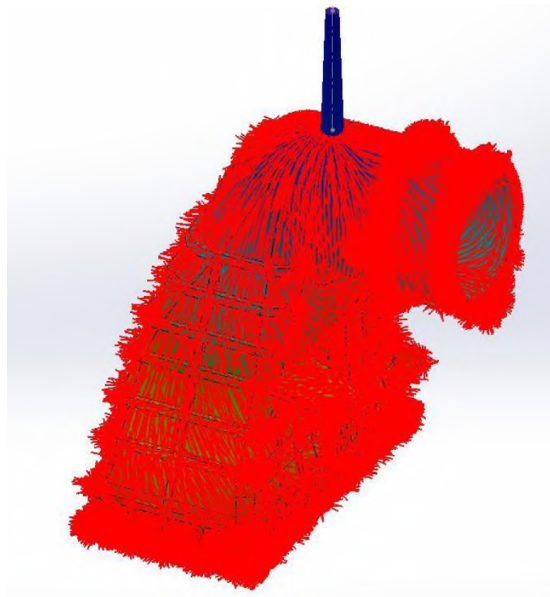
Giriş Parametreleri				Çıkış Parametreleri		
Yolluk Üst Çapı (mm)	Yolluk Alt Çapı (mm)	Yolluk Boyu (mm)	Yolluk Açısı ($^\circ$)	Basınç Farkı (MPa)	Kayma Gerilmesi (MPa)	Kayma Oranı (s^{-1})
6	10	57	2	24,07	0,40	5 361
5	10	71,5	2	29,99	0,44	6 778
4	8	57	2	35,65	0,48	12 420
4	9	71,5	2	37,76	0,49	13 220
4	10	85,5	2	39,25	0,49	14 040

Şekil 4.6’da kalıbın etkin bir şekilde doldurulabilmesi için uygun yolluk konumu görülmektedir.



Şekil 4.6. Uygun yolluk konumu

Şekil 4.7’de yolluktan giren ergimiş malzemenin kalıp boşluğunu içindeki akışına bağlı olarak malzeme içindeki cam elyafların yönlenmeleri görülmektedir. Malzemenin dayanım değerleri elyafların yönlendiği doğrultuda artmaktadır.



Şekil 4.7. Elyaf dağılımı

4.2.4. Kalıp sıcaklığının belirlenmesi

Ergimiş malzemenin kalıba enjeksiyonundan önce PA, PC gibi bazı malzemeler için kalıp ısıtılırken PP, ABS gibi bazılarında ise kalıp soğutulur. Bunun için genellikle kalıp içerisinde istenilen sıcaklıkta su, yağ gibi akışkanlar geçirilerek kalıbın her noktasında ısının homojen olarak dağılması istenir.

Ultramid A3WG6 için kalıp sıcaklığının 70 ile 90 °C arasında olması istenmektedir (Bkz. Çizelge 4.2). Çizelge 4.5'te belirtilen aralıktaki değişik kalıp sıcaklıkları için basınç farkı, kayma gerilmesi, kayma oranı ve donmuş tabaka oranı değerleri görülmektedir. Buna göre uygun kalıp sıcaklığının düşük değerlere karşılık gelen 90 °C olduğu anlaşılmaktadır.

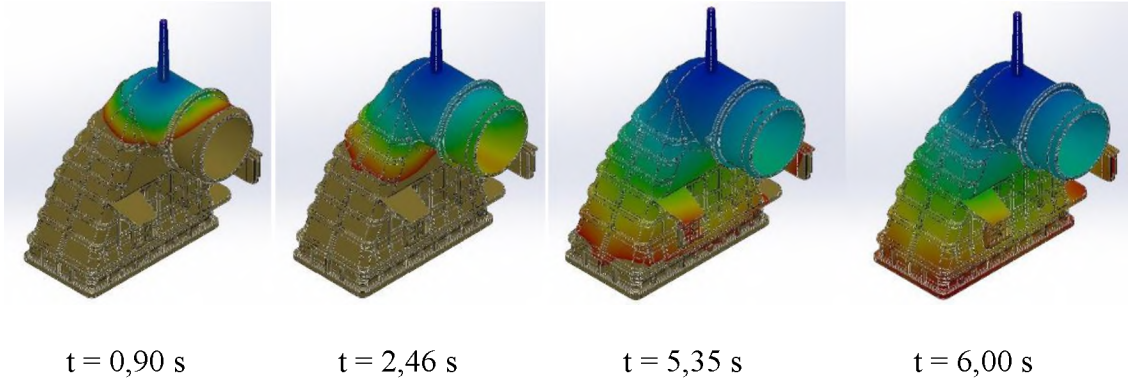
Çizelge 4.5. Kalıp sıcaklığının analiz sonuçlarına etkisi

Giriş Parametresi		Çıkış Parametreleri		
Kalıp Sıcaklığı (°C)	Basınç Farkı (MPa)	Kayma Gerilmesi (MPa)	Kayma Oranı (s ⁻¹)	Donmuş Tabaka Oranı (-)
70	24,45	0,41	5 850	0,6399
75	24,36	0,41	5 701	0,6399
80	24,27	0,40	5 597	0,6399
85	24,17	0,40	5 465	0,6399
90	24,07	0,40	5 361	0,5569

Yukarıda açıklanan çalışmalar sonucunda PA6.6-GF30 türündeki Ultramid A3WG6 isimli malzemenin plastik enjeksiyon kalıplama işlemindeki akış analizini gerçekleştirmek için oluşturulan modelde 4 mm boyutunda ve yerel eleman küçültme uygulanarak 96 464 adet üçgen kabuk sonlu eleman kullanılmasına, kalıp sıcaklığının 90 °C olmasına, yolluk üst çapının 6 mm, yolluk alt çapının 10 mm, yolluk boyunun 57 mm ve yolluk açısının 2° olmasına karar verilmiştir.

4.3. Enjeksiyon Analizi

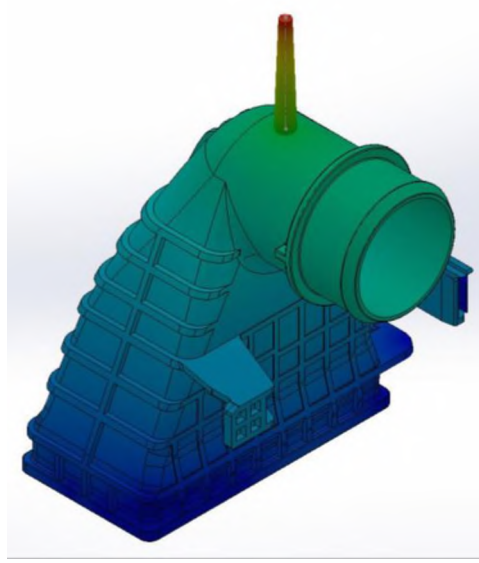
Yukarıda belirtilen giriş parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon sonrası parçadaki basınç dağılımı, sıcaklık artışı, maksimum kayma gerilmesi bölgeleri ve değeri, kayma oranı, donmuş tabaka oranı, soğuma süresi, çökme izleri, dolum kolaylığı ve çevrim süresinin değişimi incelenerek en uygun enjeksiyon süresi belirlenmiştir. Enjeksiyon süresi, kalıp kapatıldıktan sonra ergimiş malzemenin kalıp boşluğunu tamamen doldurması için gereken süreyi ifade eder. Bu süre enjeksiyon basıncına, malzemenin viskozitesine, yolluk tasarımına, kalıp boşluğunun hacmine ve karmaşıklığına bağlıdır. Şekil 4.8’de ergimiş plastiğin kalıp boşluğunda ilerleyişi zamana bağlı olarak görülmektedir. Burada; mavi bölgeler enjeksiyon başlangıcını, kırmızı bölgeler ise akışın ön kısmını ifade etmektedir.



Şekil 4.8. Ergimiş malzemenin zamana bağlı olarak kalıp içerisindeki ilerleyişi

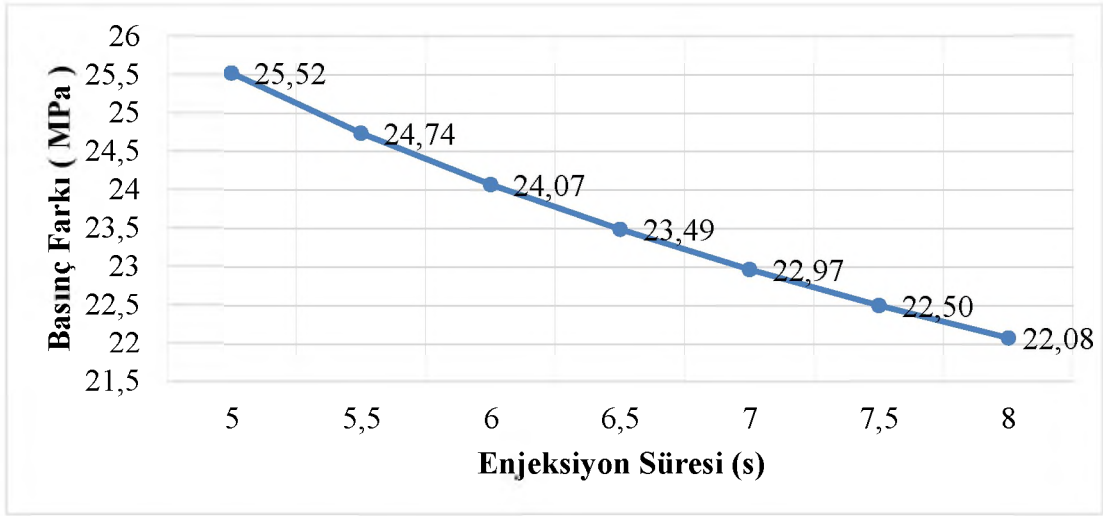
4.3.1. Enjeksiyon basıncı

Kalıp boşluğunun ergimiş plastik ile enjeksiyonu tamamlandığında, kalıbın en uç noktasında basınç sıfır iken yolluk girişinde basınç maksimum değere ulaşır. Bu değer, teorik olarak gerekli minimum enjeksiyon basıncını ifade eder. Şekil 4.9’da enjeksiyon sonrasında kalıp boşluğundaki basınç dağılımı görülmektedir. Minimum enjeksiyon basıncının değerinin mümkün olduğunca düşük olması istenir.



Şekil 4.9. Enjeksiyon sonrası basınç dağılımı

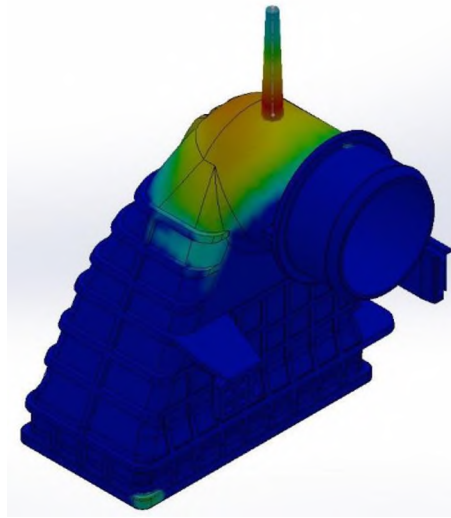
Enjeksiyon hızının ve akış sırasındaki enerji kayıplarının yüksek olması durumunda gerekli enjeksiyon basıncı artar. Enjeksiyon hızının düşük olması durumunda ise kalıp boşluğu doldurulmadan ergimiş plastik kalıp çeperlerinden katılaşmaya başlar. Akıştaki enerji kayıpları ise daha çok parça geometrisinin karmaşıklığına ve akışın düzgünlüğüne bağlıdır. Analizi gerçekleştirilen parçada çok sayıda feder bulunduğundan minimum enjeksiyon basıncı yüksek olmaktadır. Minimum enjeksiyon basıncı; ergimiş plastiğin sıcaklığı yükseltilerek ve geometrideki karmaşıklık azaltılarak düşürülebilir. Minimum enjeksiyon basıncını etkileyen diğer bir faktör ise parça et kalınlığıdır. Parçanın et kalınlığı azaldıkça gerekli olan enjeksiyon basıncının değeri artmaktadır (Kocabaş ve Erdin, 2014). Şekil 4.10’da enjeksiyon süresine bağlı olarak basınç farkının değişimi görülmektedir.



Şekil 4.10. Enjeksiyon süresine bağlı olarak basınç farkının değişimi

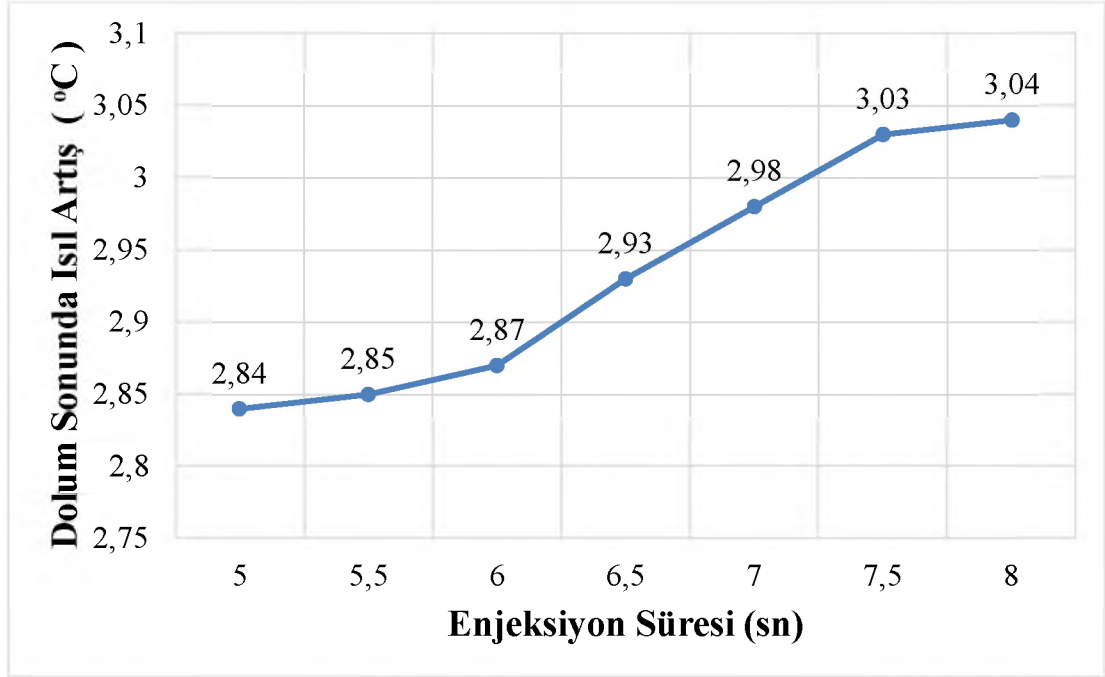
4.3.2. Enjeksiyon sonunda sıcaklık artışı

Dolum sonrasında kalıbı dolduran malzemenin farklı bölgelerinde sıcaklık genellikle aynı olmaz. Bunun nedeni ergimiş plastiğin dar kesitlerden geçerken kendi kendini ısıtmasıdır. Ayrıca enjeksiyon hızı ve malzeme özellikleri de ortaya çıkan sıcaklık artışında etkilidir. Genel olarak, 30 °C'ye kadar olan sıcaklık artışları kabul edilebilir (SolidWorks, 2013). Daha yüksek seviyedeki sıcaklık farkları reçine içinde bozulma ve ayrışmalara neden olarak ürün kalitesini olumsuz etkiler. Şekil 4.11'de enjeksiyon süresine bağlı olarak dolum sonrası sıcaklık artışının değişimi görülmektedir.



Şekil 4.11. Enjeksiyon sonrası sıcaklık artışı

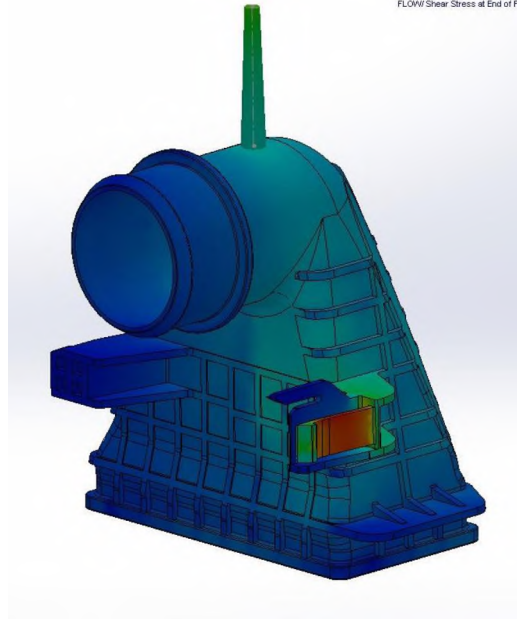
Sıcaklık artışı en çok kalıp boşluğunun dar olduğu yerlerde görülmektedir. Şekil 4.12'de enjeksiyon süresine bağlı olarak sıcaklık artış değerlerinin değişimi görülmektedir. Ortaya çıkan sıcaklık artışı oldukça sınırlı düzeyde olup enjeksiyon süresinden fazla etkilenmemektedir.



Şekil 4.12. Enjeksiyon süresine bağlı olarak sıcaklık artışının değişimi

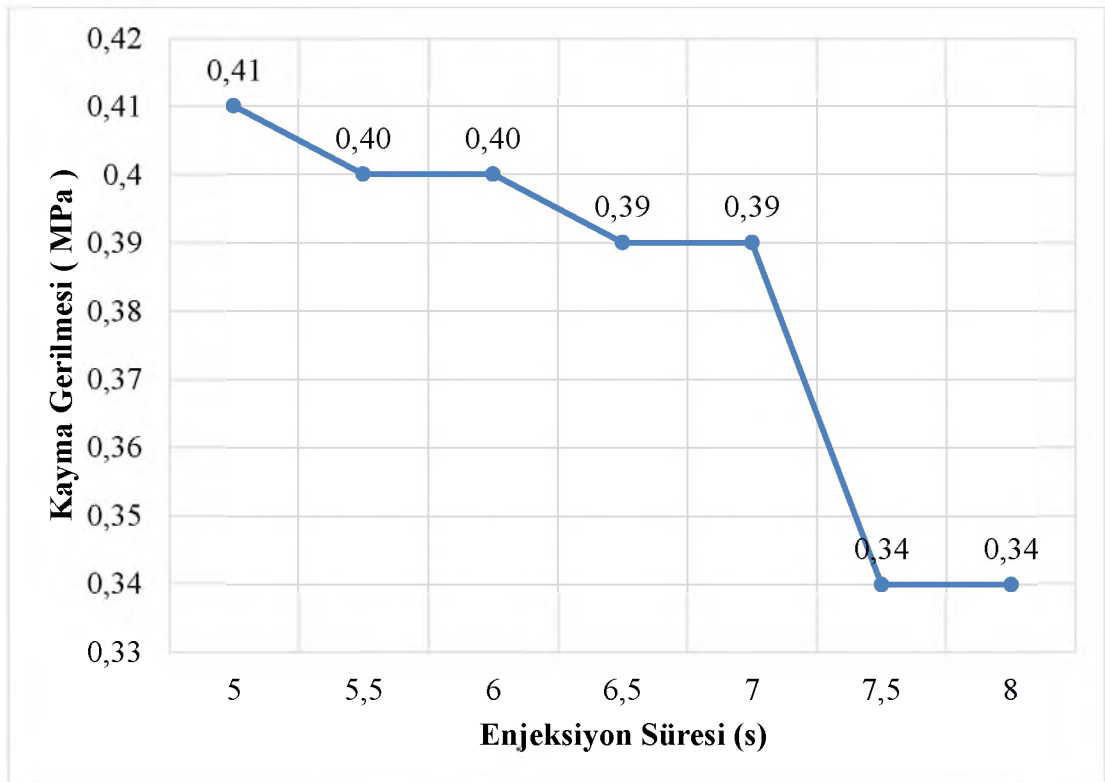
4.3.3. Kayma gerilmesi

Ergimiş plastiğin kalıp içinde akışı sırasında kalıp yüzeyleri ile teması nedeniyle yüzeylerde kayma gerilmeleri ortaya çıkar. Enjeksiyon süresinin azalması akış hızını artırarak kayma gerilmelerinin büyümesine neden olur. Ortaya çıkan kayma gerilmelerinin yüksek olması durumunda elde edilen ürünün yüzey kalitesi düşük olur. Bu nedenle maksimum kayma gerilmelerinin emniyet sınırlarının altında olması gerekir. Ultramid A3WG6 için kayma gerilmesi emniyet sınırı 0,495 MPa olarak belirtilmiştir (Bkz. Çizelge 4.2). Belirlenen yolluk geometrisinde, söz konusu enjeksiyon sürelerinde ortaya çıkan maksimum kayma gerilmelerinin 0,34~0,41 MPa olduğu, parçanın yalnızca belirli bir kaç bölgesinde artış gösterdiği ve malzemenin emniyet sınırlarını aşmadığı görülmektedir. Şekil 4.13'te maksimum kayma gerilmelerinin ortaya çıktığı bölgeler görülmektedir.



Şekil 4.13. Maksimum kayma gerilmesi bölgeleri

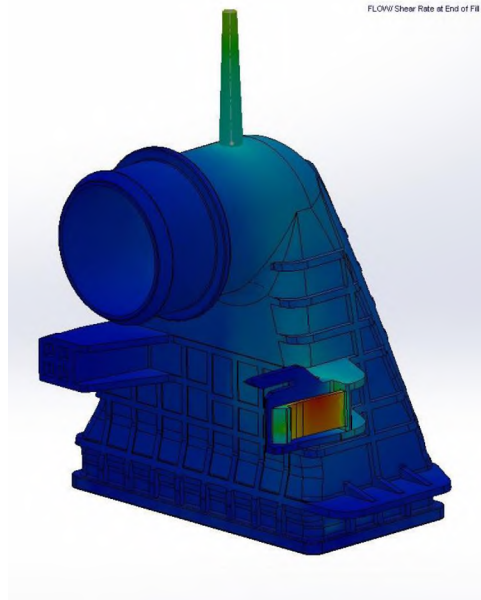
Şekil 4.14'te enjeksiyon süresine bağlı olarak maksimum kayma gerilmelerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 4.14. Enjeksiyon süresine bağlı olarak maksimum kayma gerilmesinin değişimi

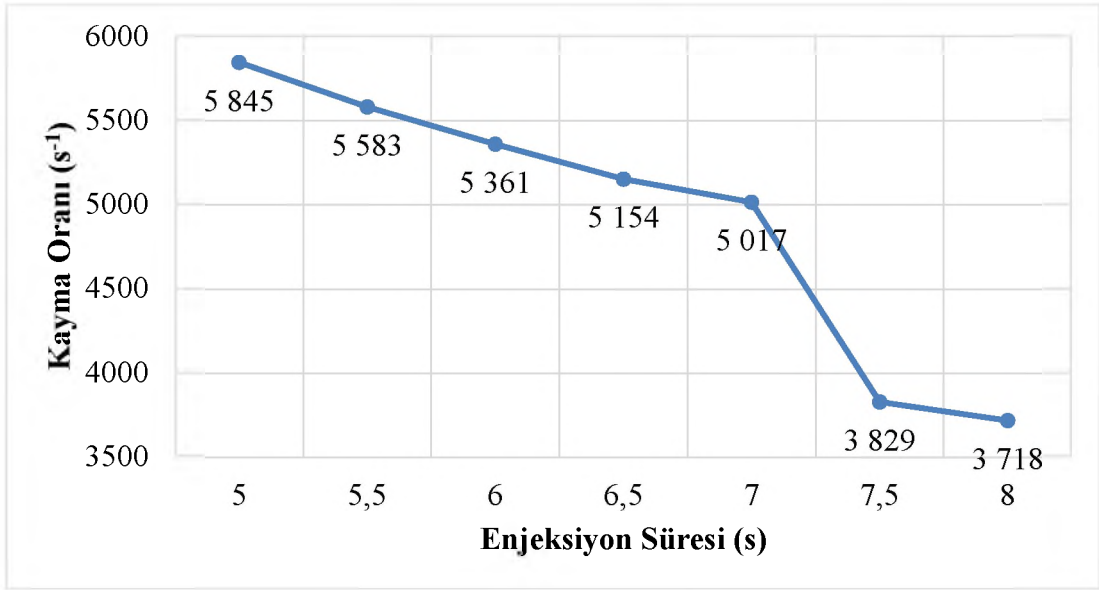
4.3.4. Kayma oranı

Kayma oranı, kayma deformasyonlarının birim zamandaki değişimi şeklinde tanımlanır. Buna göre, hız gradyeninin sıfır olduğu durumda kayma oranı da sıfır değerini alır. Enjeksiyon süresinin azalması akış hızını artırdığından kayma oranının da artmasına neden olur. Şekil 4.15'te analiz sonucunda parça üzerinde kayma oranının değişimi görülmektedir. Kayma oranı kayma gerilmesi değerleri ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu nedenle, maksimum kayma gerilmelerinin ortaya çıktığı bölgelerde kayma oranı da maksimum değerlere ulaşmaktadır.



Şekil 4.15. Kayma oranı analizi

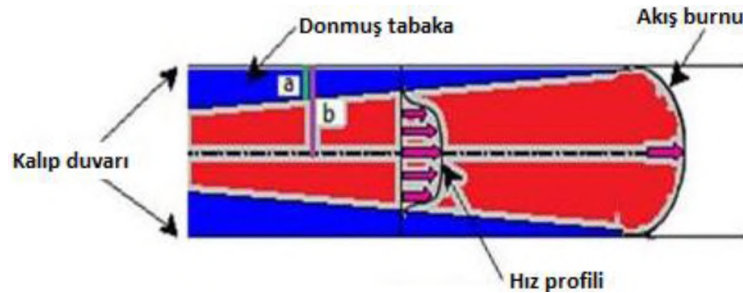
Kalıp duvarlarına yakın olan bölgelerde katılaşma daha önce olacağından, bu bölgelerde kayma oranının düşük olması istenir. Aksi takdirde, söz konusu bölgelerde yüzey kalitesi düşük olur. Ultramid A3WG6 için kayma oranının maksimum kabul edilebilir değeri $60\ 600\ s^{-1}$ olarak belirtilmiştir (Bkz. Çizelge 4.2). Şekil 4.16'da enjeksiyon süresine bağlı olarak kayma oranının değişimi görülmektedir. Kayma oranının maksimum değeri $5\ 845\ s^{-1}$ olup, emniyet sınırının oldukça altındadır.



Şekil 4.16. Enjeksiyon süresine bağlı olarak kayma oranının değişimi

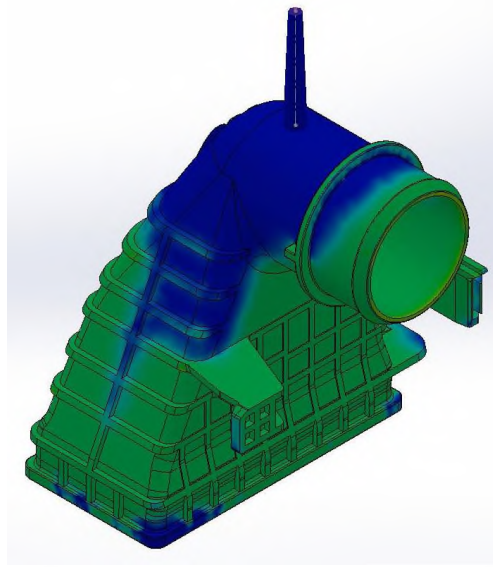
4.3.5. Donmuş tabaka oranı

Ergimiş malzemenin kalıba giriş sıcaklığı 270 °C'nin üzerinde olup, kalıp sıcaklığı 90 °C olduğundan soğuma meydana gelir. Bu nedenle, camsı geçiş sıcaklığının altına inilen bölgelerde katılaşma meydana gelir. Bu duruma donmuş tabaka oluşumu denir. Donmuş tabakalar öncelikle kalıp yüzeyine temas eden bölgelerde oluşur. Donmuş tabaka oranı, donmuş tabaka kalınlığının toplam kesit kalınlığına oranını ifade eder. Şekil 4.17'de akış sırasında ergimiş malzemenin donmuş tabakaya dönüşümü şematik olarak görülmektedir. Akışın uç kısmından uzaklaştıkça donmuş tabaka kalınlığı ve buna bağlı olarak donmuş tabaka oranı artmaktadır. Donmuş tabaka kalınlığı 0 ile 1 arasında değerler alır. Değerin 1'e yaklaşması akışkanın geçeceği alanın çok daralmasına ve akışa karşı bir direnç oluşmasına neden olur.



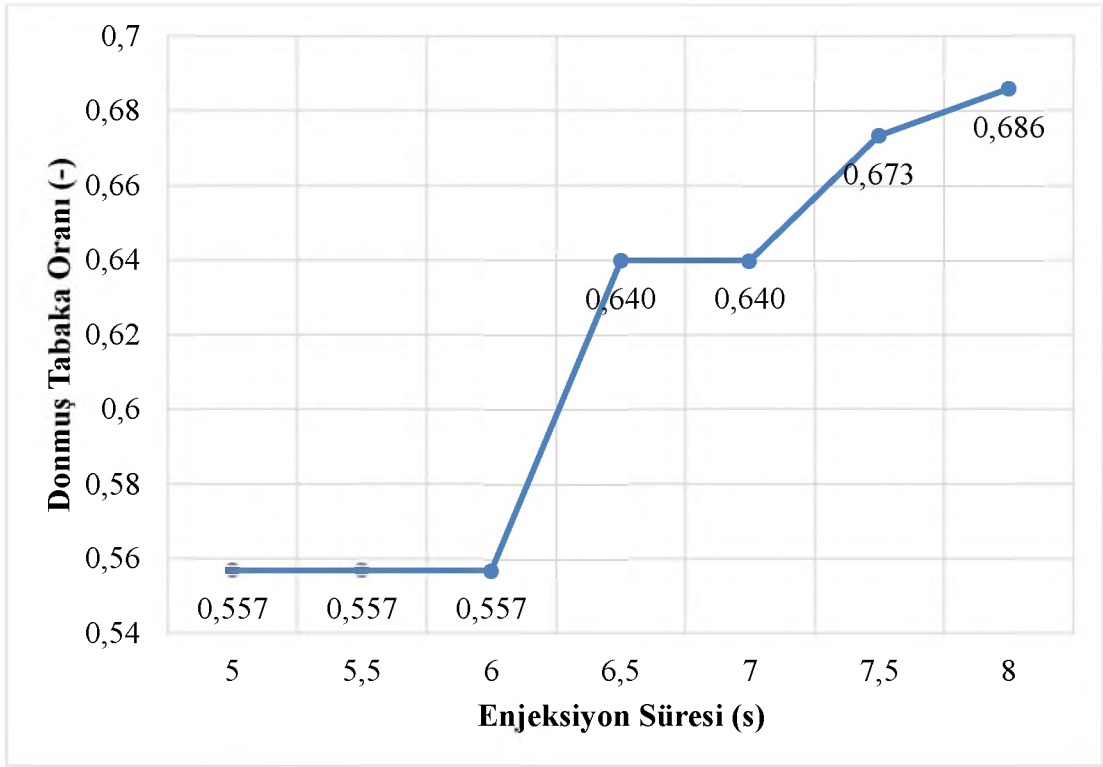
Şekil 4.17. Donmuş tabaka oranı (SolidWorks, 2013)

Özellikle dolum aşamasının başlangıcında donmuş tabaka kalınlığının artması dolumun gerçekleşmesini zorlaştırır ve gerekli enjeksiyon basıncını artırır. Buna bağlı olarak; sıcaklık artışı, maksimum kayma gerilmesi ve kayma oranı değerleri de artış gösterir. Enjeksiyonun süresinin uzaması katılaşmaya yardımcı olacağından donmuş tabaka kalınlığını artırır (Buldu, 2007). Şekil 4.18’de donmuş tabaka oranının model üzerindeki değişimi görülmektedir. Donmuş tabaka oranının en yüksek olduğu bölgeler kalıbın uç kısımları olup bu bölgelerde akışkan ilerleyişi olmadığından ergimiş malzeme akışını olumsuz etkilememektedir.



Şekil 4.18. Donmuş tabaka oranı analizi

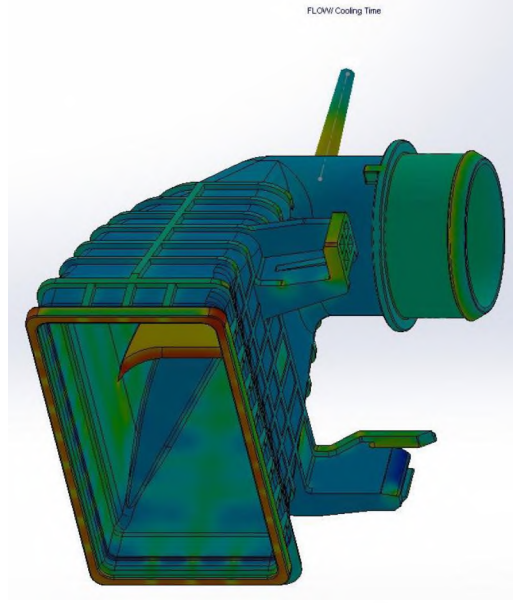
Şekil 4.19’da enjeksiyon süresine bağlı olarak donmuş tabaka oranının değişimi görülmektedir. Enjeksiyon süresi arttıkça donmuş tabaka oranı artmakta ve akışı olumsuz etkileyecek boyutlara ulaşmaktadır.



Şekil 4.19. Enjeksiyon süresine bağlı olarak donmuş tabaka oranının değişimi

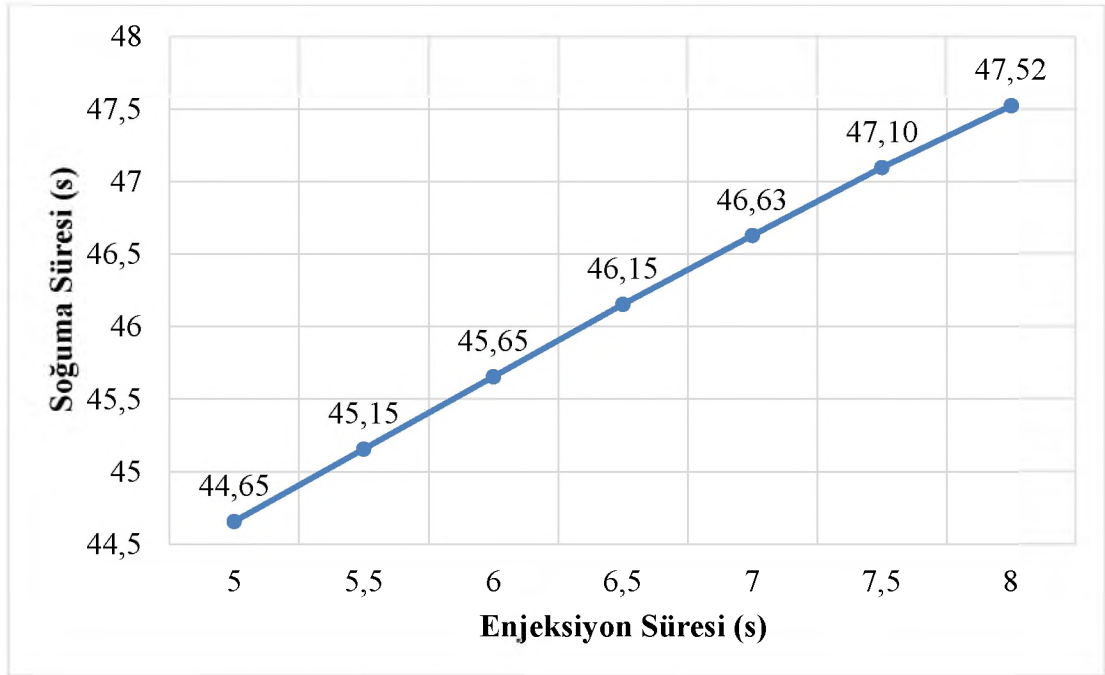
4.3.6. Soğuma süresi

Soğuma süresi, kalıp dolm ve ütleme işlemleri tamamlandıktan sonra kalıp açma aşamasına kadar süren, tutma ve kalıp içi çekme aşamalarından oluşur. Soğuma süresi sonunda parçanın en az % 90'ı kalıptan çıkarma sıcaklığının (Bkz. Çizelge 4.2) altında olmalıdır. Böylece parça katılaştı ve kalıptan çıkarılabilir duruma gelmiş olur. Soğuma süresi toplam enjeksiyon çevrim süresinin % 80 ila 90'ını kapsar. Soğuma süresini belirleyen en önemli iki parametre kalıp ve ergime sıcaklıklarıdır. Kalıp ve ergime sıcaklıkları arttıkça soğuma süresi ve buna bağlı olarak enjeksiyon çevrim süresi artar. Şekil 4.20'de parçanın farklı bölgelerinin soğuma sürelerini değişimi görülmektedir.



Şekil 4.20. Soğuma süresi analizi

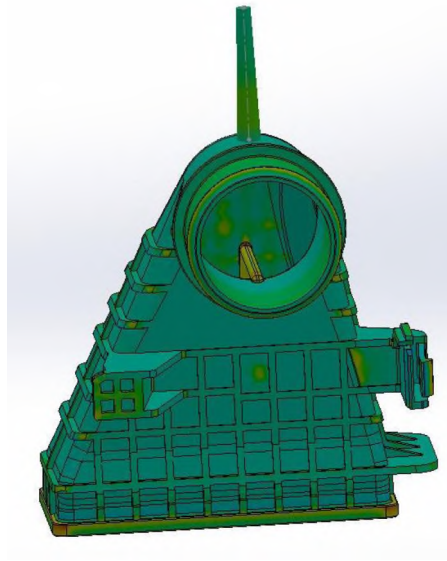
Şekil 4.21’de enjeksiyon süresine bağlı olarak soğuma sürelerinin değişimi görülmektedir. Enjeksiyon süresindeki artış soğuma süresinin de yaklaşık aynı miktarda artmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.21. Enjeksiyon süresine bağlı olarak soğuma süresinin değişimi

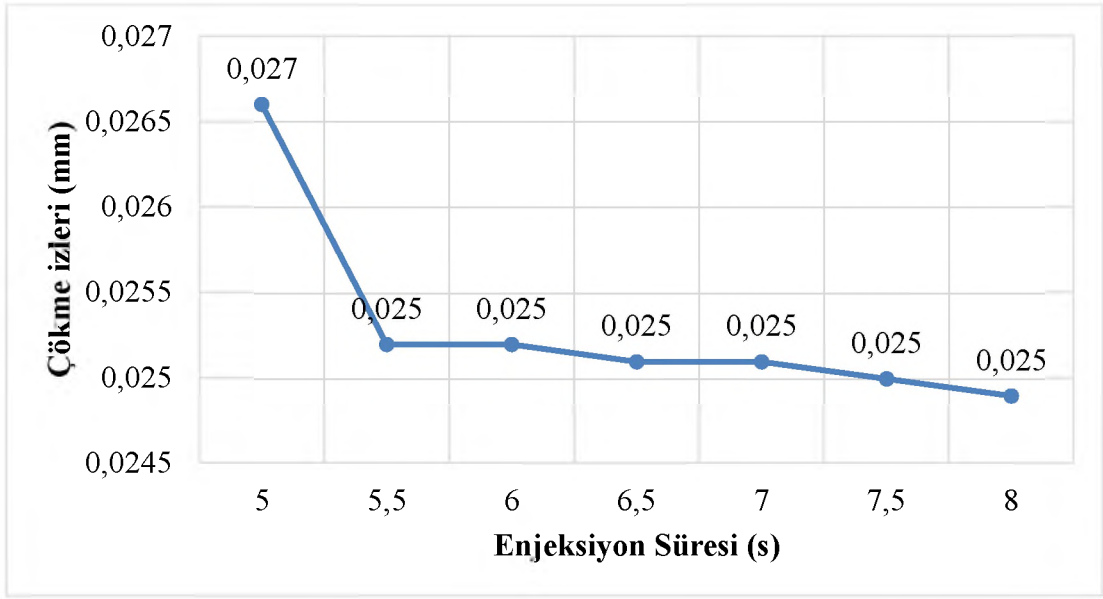
4.3.7. Çökme izleri

Çökme izleri plastik enjeksiyon kalıplamada, farklı kalınlıktaki kesitlerin farklı hızlarda soğuması ve dış yüzeylerden daha geç soğuyan iç bölgelerin katılaştığı yüzeyleri kendine doğru çekmesi sonucu oluşan çöküntülerdir. Çökme izleri parça yüzey kalitesini olumsuz etkilediğinden istenmeyen durumlardır. Çökme izlerinin oluşumunu azaltmak için kalıbı mümkün olduğunca homojen kesitli ve ergimiş malzeme akışını kalın kesitlerin ince olanlardan daha önce dolmasını sağlayacak şekilde tasarlamak gerekir (Koyun, 2005). Bu nedenle plastik enjeksiyon kalıplamada yolluk konumu her zaman kalın kesitli bölgelerde olur. Şekil 4.22’de çökme izlerinin parça üzerinde yoğunlaştığı bölgeler görülmektedir.



Şekil 4.22. Çökme izlerinin dağılımı

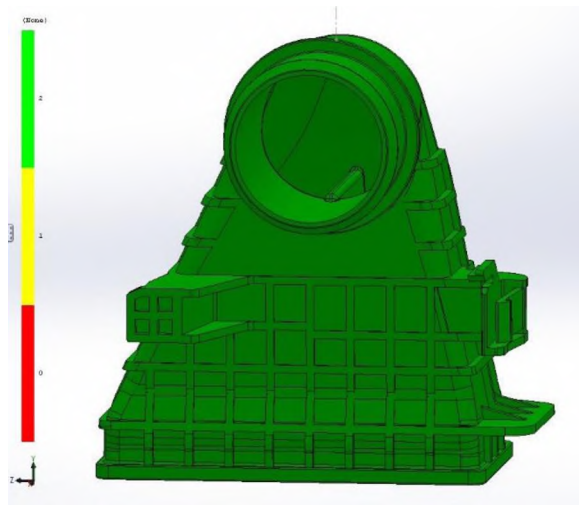
Şekil 4.23’te enjeksiyon süresine bağlı olarak çökme izlerinin derinliklerinin maksimum değerleri görülmektedir. Çökme izleri enjeksiyon süresine bağlı olarak önemli bir değişiklik göstermemektedir. 25 µm civarındaki değerler genellikle parçanın kenarlarında ortaya çıkmıştır ve yüzey kalitesini olumsuz etkileyecek seviyede değildir.



Şekil 4.23. Enjeksiyon süresine bağlı olarak çökme izlerinin değişimi

4.3.8. Dolum kolaylığı

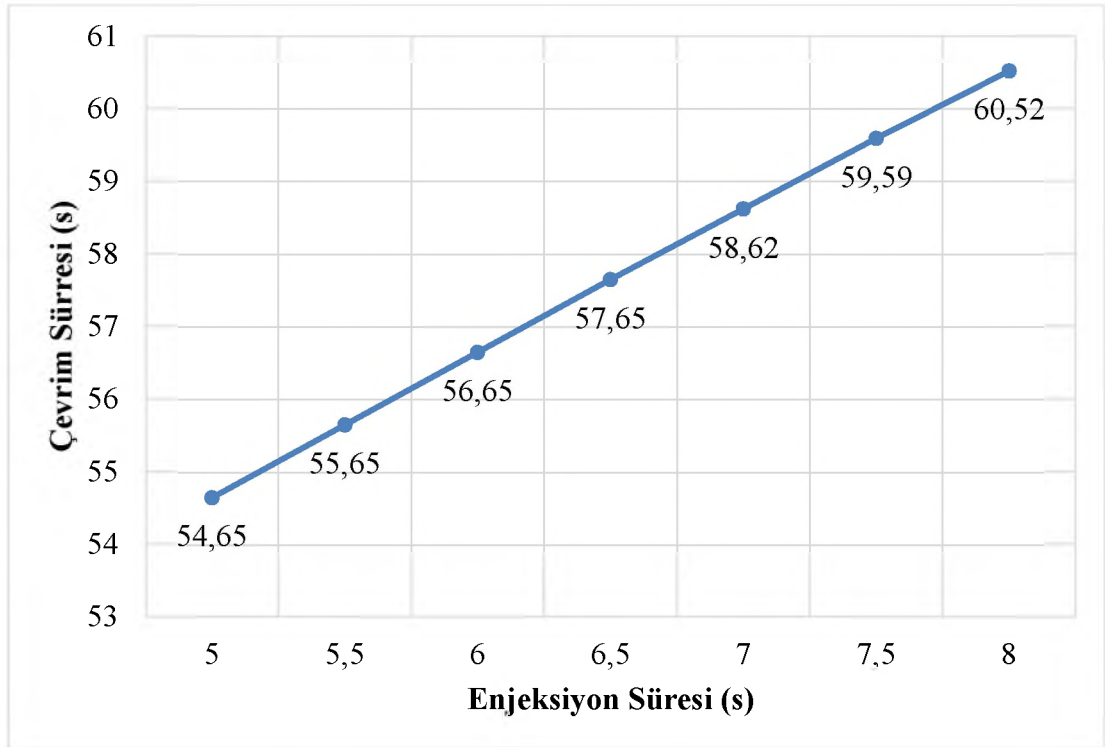
Dolum kolaylığı; parça geometrisine, enjeksiyon malzemesinin özelliklerine ve yolluk tasarımına bağlı olarak kalıbın belirtilen enjeksiyon süresinde sözkonusu enjeksiyon basıncı ile doldurulup doldurulamayacağını ifade eder. Şekil 4.24'te parçanın dolum kolaylığı analiz sonuçları görülmektedir. Buna göre, parçanın tamamının öngörülen enjeksiyon basıncı ile kolaylıkla doldurulabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.24. Dolum kolaylığı analizi

4.3.9. Çevrim süresi

Çevrim süresi bir enjeksiyon kalıplama işleminin başlaması ile tamamlanması arasında geçen zamana denir. Bir enjeksiyon çevrimi tamamlandığında, sistem yeni bir çevrim için hazır hale gelir. Bu nedenle, enjeksiyon çevrim süresi bir parçanın imalat süresini ifade eder. Çevrim süresi kısaltıldığı ölçüde parçanın imalat hızı artacağından imalat maliyeti düşer. Enjeksiyon, ütüleme ve soğuma sürelerine bağlı olarak değişen çevrim süresi ekonomik açıdan son derece önemlidir. Şekil 4.25'te enjeksiyon süresine bağlı olarak çevrim süresinin değişimi görülmektedir. Buna göre, enjeksiyon süresindeki her bir saniyelik artış soğuma süresini de yaklaşık bir saniye artırdığından çevrim süresi toplamda iki saniye artmaktadır.



Şekil 4.25. Enjeksiyon süresine bağlı olarak çevrim süresinin değişimi

4.4. Enjeksiyon süresi

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminin en önemli aşamalarından biri yolluk ağzından enjekte edilen ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurmasıdır. Bu aşamaya

enjeksiyon aşaması denir. Enjeksiyon aşaması sırasında ergimiş malzemenin ilerleyişinin belirli bir hız aralığında ve laminer bir şekilde gerçekleşmesi, ortaya çıkacak ürünün kalitesi ve mekanik özellikleri açısından son derece önemlidir. Ergimiş plastiğin kalıp boşluğunu doldurma hızının uygun değerlerde seçilmemesi durumunda kayma gerilmeleri, ısıl değişkenlikler ve çökmeler istenmeyen değerlere ulaşabilir. Bu çalışmada, enjeksiyon süresi analizlerinin gerçekleştirildiği değer aralığı belirlenirken donmuş tabaka kalınlığının akışı engellediği, laminer akışın ortadan kalkarak kaynak çizgilerinin ve çökme izlerinin belirginleştiği ve kayma gerilmelerinin emniyet sınırlarını aştığı şartlar göz önünde bulundurulmuştur. Çizelge 4.6'da tüm çıkış parametrelerinin enjeksiyon süresine bağlı olarak değişimi görülmektedir.

Çizelge 4.6. Enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon parametrelerinin değişimi

	Enjeksiyon Süresi (s)						
	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
Enjeksiyon Basıncı (MPa)	25,52	24,74	24,07	23,49	22,97	22,50	22,08
Sıcaklık Artışı (°C)	2,84	2,85	2,87	2,93	2,98	3,03	3,04
Kayma Gerilmesi (MPa)	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,34	0,34
Kayma Oranı (s⁻¹)	5 845	5 583	5 361	5 154	5 017	3 829	3 718
Donmuş Tabaka Oranı (-)	0,557	0,557	0,557	0,640	0,640	0,673	0,686
Soğuma Süresi (s)	44,65	45,15	45,65	46,15	46,63	47,10	47,52
Çökme İzleri (mm)	0,027	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Çevrim Süresi (s)	54,65	55,65	56,65	57,65	58,62	59,59	60,52

Enjeksiyon süresinin minimum ve maksimum değerleri belirlenirken yüzey kalitesinin düşük olmaması açısından önemli olan kayma gerilmesi ve oranı değerlerinin emniyet sınırlarını aşmamasına dikkat edilmiştir (Bkz. Çizelge 4.2). Kayma gerilmesinin ulaştığı maksimum değerler ile seçilen kalıp ve enjeksiyon sıcaklıklarına bağlı olarak, çökme izleri de oldukça sınırlı düzeyde kalmıştır. Soğuma ve çevrim süreleri, enjeksiyon süresi ile doğrusal olarak değişmektedir. Ayrıca ortaya çıkan sıcaklık artışları ihmal edilebilecek kadar düşük seviyelerde kalmıştır. Buna göre, enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon basıncı ile donmuş tabaka oranının

değişimi incelenerek optimum bir enjeksiyon süresi belirlenebilir. Çizelge 4.7’de enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon basıncı ile donmuş tabaka oranının yüzdelerik değişimleri görülmektedir.

Çizelge 4.7. Enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon basıncı ile donmuş tabaka oranının yüzdelerik değişimleri

Enjeksiyon Süresi (s)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
Enjeksiyon Basıncı (MPa)	25,52	24,74	24,07	23,49	22,97	22,5	22,08
Yüzdelerik Değişim (%)	-	-3,06	-2,71	-2,41	-2,21	-2,05	-1,87
Donmuş Tabaka Oranı (-)	0,557	0,557	0,557	0,64	0,640	0,673	0,686
Yüzdelerik Değişim (%)	-	0,00	0,00	15	0,00	5	2

Çizelge 4.7’ye göre, enjeksiyon süresinin artışıyla enjeksiyon basıncında azalan oranda bir düşüş görülmektedir. Enjeksiyon süresinin artışıyla donmuş tabaka oranındaki artış ise doğrusal değişmemektedir. Enjeksiyon süresi 6 s’den 6,5 s’ye çıktığında donmuş tabaka oranında % 15’lik ani bir artış meydana gelmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, otomotiv yan sanayiinde kullanılan bir ara soğutma sistemine ait cam elyaf takviyeli polyamid (PA) 6.6 matrisli bir kazanın plastik enjeksiyon kalıplama ile imalatının simülasyon yolu ile analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle plastik enjeksiyon kalıplama işlemine ait giriş ve çıkış parametreleri açıklanmış; yolluk konum ve geometrisinin uygun değerleri basınç farkı, kayma gerilmesi ve kayma oranı değerleri dikkate alınarak belirlenmiş; belirlenen değerler, kalıp sıcaklığı ve malzeme özellikleri esas alınarak enjeksiyon süresine bağlı olarak enjeksiyon sonrası parçadaki basınç dağılımı, sıcaklık artışı, maksimum kayma gerilmesi bölgeleri ve değeri, kayma oranı, donmuş tabaka oranı, soğuma süresi, çökme izleri, dolum kolaylığı ve çevrim süresinin değişiminin incelenmesinde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

- Enjeksiyon süresinin artmasıyla gerekli minimum enjeksiyon basıncı düşmektedir. Buna bağlı olarak parçanın imalatı için gerekli plastik enjeksiyon makinasının kapasitesi, ilk yatırım maliyeti ve enerji tüketimi düşmektedir.
- Parça geometrisinin karmaşıklaşması ve et kalınlığının azalması minimum enjeksiyon basıncını artırmaktadır. Ergimiş malzemenin sıcaklığı yükseltilecek ve geometrideki karmaşıklık azaltılarak gerekli basınç düşürülebilmektedir.
- Enjeksiyon süresi arttıkça dolum sonrası sıcaklık artışında yükselme meydana gelmektedir. Ancak analiz edilen parçada söz konusu yükselme ihmal edilebilir seviyede kalmıştır.
- Enjeksiyon süresindeki artış ortaya çıkan kayma gerilmelerini azaltmaktadır. Analizde kullanılan enjeksiyon sürelerinde maksimum kayma gerilmeleri emniyet sınırının altında kalmıştır.

- Enjeksiyon süresindeki azalma akış hızını artırdığından kayma gerilmesiyle birlikte kayma oranını da artırmakla beraber akışın kalıp içerisindeki ilerlemesini olumsuz yönde etkilememiştir.
- Enjeksiyon süresindeki artış donmuş tabaka oranını artırmaktadır. Özellikle dolum aşamasının başlangıcında donmuş tabaka kalınlığının artması dolunun gerçekleşmesini zorlaştırmakta ve gerekli enjeksiyon basıncını artırmaktadır.
- Enjeksiyon süresindeki artış soğuma süresini artırmaktadır. Gerçekleştirilen analizlerde enjeksiyon süresindeki artışın soğuma süresini de yaklaşık aynı miktarda artırdığı görülmektedir.
- Gerçekleştirilen analizlere göre çökme izleri enjeksiyon süresine bağlı olarak önemli bir değişiklik göstermemektedir. 25 µm civarındaki değerler genellikle parçanın kenarlarında ortaya çıkmıştır ve yüzey kalitesini olumsuz etkileyecek seviyede değildir.
- Gerçekleştirilen dolum kolaylığı analizlerinin tümünde ergimiş malzemenin kalıp boşluğunu sorunsuz bir şekilde doldurabildiği görülmüştür.
- Enjeksiyon süresindeki her bir saniyelik artış soğuma süresini de yaklaşık bir saniye artırdığından çevrim süresi toplamda iki saniye artmaktadır. Bu durum imalat hızı ve parça maliyeti üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır.
- Enjeksiyon süresindeki artış ile donmuş tabaka oranının değişimi incelendiğinde, en uygun enjeksiyon süresinin 6 s olduğu görülmüştür.
- Enjeksiyon süresinin azalmasıyla imalat hızı artmaktadır. Plastik enjeksiyon kalıplamada imalat hızını artıran faktörler genel olarak ürün kalitesini düşürmektedir. Bu nedenle işlem ve malzeme parametrelerinin doğru belirlenmesi hem ucuz hem de kaliteli ürün elde edilmesi açısından son derece önemlidir.

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminde malzeme, kalıp ve işleme ait pek çok parametreye bağlı karmaşık mekanizmalar içermektedir. Bu nedenle, öncelikle kalıp sıcaklığı, ergimiş malzeme sıcaklığı, yolluk tipi, konumu ve geometrisinin belirlenerek giriş parametrelerinin azaltılması gerçekleştirilecek analizlerin değerlendirilmesini ve yorumlanmasını kolaylaştıracaktır. Parça geometrisindeki karmaşıklıklar, çok ince kesitler ve kesitlerde ani değişiklikler ergimiş malzemenin akışını ve kalıbın doldurulmasını olumsuz etkilediği için tasarım mümkün olduğunca basit ve homojen yapıda olmalıdır.

KAYNAKLAR

- Akkurt, S., 2007. Plastik Malzeme Bilimi Teknolojisi ve Kalıp Tasarımı. Birsen Yayınevi, İstanbul, 552 s.
- Anonim, 2007. Enjeksiyon Kılavuzu. Arburg Plastik Enjeksiyon Makinaları Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti, İstanbul, 88 s.
- Anonim, 2013a. Cam Elyafı ve Diğer Elyaf Takviye Malzemeleri, http://www.camelyaf.com.tr/kutuphane/detay.aspx?SectionID=AmiB%2fxzL_oG8UqeoA%2ftiNbA%3d%3d&ContentID=yJFLKGOYQZgT%2bXLRtaBuhQ%3d%3d (05.11.2013).
- Anonim, 2013b. Plastik teknoloji enjeksiyon makinelerinde üretim-1, http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/plastik/moduller/enjeksiyon_makinelerinde_uretim1.pdf (10.01.2013).
- Anonim, 2013c. Plastik teknoloji enjeksiyon makinelerinde üretim-3, http://hbogm.meb.gov.tr/modulerprogramlar/kursprogramlari/plastik/moduller/enjeksiyon_makinelerinde_uretim3.pdf/ (12.01.2013).
- Anonim, 2014a. Elyaf takviyeli plastikler nerelerde kullanılır, http://www.adasevim.com/plastik_nedir.htm (10.03.2014).
- Anonim, 2014b. High strength glass fibers, http://www.agy.com/wp-content/uploads/2014/03/High_Strength_Glass_Fibers-Technical.pdf (14.03.2014).
- Anonim, 2014c. Ultramid® A3WG6 BASF Corporation - Polyamide 66, <http://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?I=26119&U=0&E=14474> (13.10.2014).
- Anonim, 2014d. Stochastic Simulation and Lagrangian Dynamics, <http://stochasticandlagrangian.blogspot.com.tr/2011/07/what-does-shape-function-mean-in-finite.html> (27.10.2014).
- Anonim, 2014e. SolidWorks Plastics Yazılımı, <http://solidworks.com.tr/sw/newsdisplay.htm?articleindex=1AE41009FD86114FF6FA1ACC7A6781C7> (27.10.2014).
- Apichartpattanasiri, S., Hay, J.N., Kukureka, S.N., 2001. A study of the tribological behaviour of polyamide 66 with varying injection-moulding parameters. Wear. 251, 1557-1566.
- Ataşımşek, S., 2006. Plastik ve Metal Kalıpcılık Teknikleri. Birsen Yayınevi, İstanbul, 448 s.

- Buldu, L., 2007. Enjeksiyon Parametrelerinin Bazı Mühendislik Plastiklerinin Akış Uzunluğuna Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Chen, W.C., Fu, G.L., Tai, P.H., Deng, W.J., 2009a. Process parameter optimization for MIMO plastic injection molding via soft computing. *Expert Systems with Applications*, 36, 1114-1122.
- Chen, C.P., Chuang, M.T., Hsiao, Y.H., Yang, Y.K., Tsai, C.H., 2009b. Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis. *Expert Systems with Applications*, 36, 10752-10759.
- Çengel, Y.A., Cimbala, J.M., 2008. Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları. İzmir Güven Kitabevi, İzmir, 938 s.
- Çınar, Y., 2005. Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Sıcak Yolluk Sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gerber, A.G., Dubay, R., Healy, A., 2006. CFD-based predictive control of melt temperature in plastic injection molding. *Applied Mathematical Modelling*, 30, 884-903.
- Güldaş, A., 2004. Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Ergimiş Plastik Akışının Matematiksel Modellenmesi ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaya, F., 2005. Ana Hatlarıyla Plastikler ve Katkı Maddeleri. Birsen Yayınevi, İstanbul, 294 s.
- Kıralp, S., Özkoç, G., Erdoğan, S., Çamurlu, P., Baydemir, T., Doğan, M., 2006. Plastikler. ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 125 s.
- Kocabaş, G.B., Erdin M.E., 2014. Cam elyaf takviyeli polyamid 6.6 nın enjeksiyon prosesinin sonlu eleman analizi. 1. Uluslararası Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Sempozyumu (ISIDE14), 8-9 Mayıs, Karabük, 87-92.
- Koyun, Ç., 2005. Bilgisayar Destekli Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Köse, E., 2006. Plastik Enjeksiyonda Proses ve Kalıp Kaynaklı Sorunların Giderilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Kuram, E., Tasci, E., Altan, A.İ., Medar, M.M., Yilmaz, F., Ozcelik, B., 2013. Investigating the effects of recycling number and injection parameters on the mechanical properties of glass-fibre reinforced nylon 6 using Taguchi method. *Materials and Design*, 49, 139-150.
- Kurt, M., Kamber, O.S., Kaynak, Y., Atakok, G., Girit, O., 2009. Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Materials and Design*, 30, 3217-3224.
- Öktem, H., Erzurumlu, T., Uzman, I., 2007. Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part. *Materials and Design*, 28, 1271-1278.
- Özçelik, B., Erzurumlu, T., 2006. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, 171, 437-445.
- Özmen, M.E., 2007. Plastik Enjeksiyonda Parça Yüzeyini İzleyen Soğutma Kanalları İle Parça Soğumasının Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özyılmaz, E., 2011. Üst Çene Tasarımı ve Dental İmplantların Statik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
- Paksoy, Ö., 2008. Plastik Enjeksiyon Prosesinde Elyaf Yönlenmesinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Saçak, M., 2005. Polimer Teknolojisi. Gazi Kitabevi, Ankara, 431 s.
- Santos, P.A., Spinace, M.A.S., Fermodselli, K.K.G., Paoli, M.A.D., 2007. Polyamide-6/vegetal fiber composite prepared by extrusion and injection molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(12), 2404-2411.
- Selmi, A., Doghri, I., Adam, L., 2011. Micromechanical simulations of biaxial yield, hardening and plastic flow in short glass fiber reinforced polyamide. *International Journal of Mechanical Sciences*, 53, 696-706.
- Seow, L.W., Lam, Y.C., 1997. Optimizing flow in plastic injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 72, 333-341.
- SolidWorks, 2013. *Plastics Premium Modülü Malzeme Veritabanı*.

- Song, M.C., Liu, Z., Wang, M.J., Yu, T.M., Zhao, D.Y., 2007. Research on effects of injection process parameters on the molding process for ultra-thin wall plastic parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 668-671.
- Tang, S.H., Kong, Y.M., Sapuan, S.M., Samin, R., Suleiman, S., 2006. Design and thermal analysis of plastic injection mould. *Journal of Materials Processing Technology*, 171, 259-267.
- Teixeira, D., Giovanela, M., Gonella, L.B., Crespo, J.S., 2013. Influence of flow restriction on the microstructure and mechanical properties of long glass fiber-reinforced polyamide 6.6 composites for automotive applications. *Materials and Design*, 47, 287-294.
- Wang, Y., Kim, J., Song, J., 2014. Optimization of plastic injection molding process parameters for manufacturing a brake booster valve body. *Materials and Design*, 56, 313-317.
- Yang, W.M., Yokoi, H., 2003. Visual analysis of the flow behavior of core material in a fork portion of plastic sandwich injection molding. *Polymer Testing*, 22, 37-43.
- Yıldırım, V., 2009. Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Soğuk Yolluk Parametrelerinin Ürün Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KOCABAŞ, Gazi Başar
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 19.02.1987 – Amasya
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (530) 345 34 23
e-mail : gazibasara@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Hitit Üniversitesi/Makine Mühendisliği Bölümü	2010
Lise	Turhal Cumhuriyet Lisesi	2004

İş Deneyi

Yıl	Yer	Görev
2011-	Özel Sektör	Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Kocabaş, G.B, Erdin M.E., 2014. Cam elyaf takviyeli polyamid 6.6 nın enjeksiyon prosesinin sonlu eleman analizi. I. Uluslararası Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Sempozyumu (ISIDE14), 8-9 Mayıs, Karabük, 87-92.