

**PLASTİK ENJEKSİYON KALIPÇILIĞINDA
KONFORMAL SOĞUTMA KANAL TASARIMI**

Sümevra KULCU



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLASTİK ENJEKSİYON KALIPÇILIĞINDA KONFORMAL SOĞUTMA
KANAL TASARIMI**

Sümevra KULCU
0000-0002-5603-9129

Prof. Dr. Necmettin KAYA
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Sümeýra KULCU tarafından hazırlanan “PLASTİK ENJEKSİYON KALIPÇILIĞINDA KONFORMAL SOĞUTMA KANAL TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Necmettin KAYA

Başkan : Prof.Dr. Necmettin Kaya
0000-0002-8297-0777
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza

Üye : Doç.Dr. Gökhan Sevilgen
0000-0002-7746-2014
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza

Üye : Dr. Öğretim Üyesi İsmail Öztürk
0000-0003-2641-5880
Pamukkale Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
.././....

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

10/01/2022

Sümeysra KULCU

TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Necmettin KAYA
10/01/2022

Sümeyra KULCU
10/01/2022

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PLASTİK ENJEKSİYON KALIPÇILIĞINDA KONFORMAL SOĞUTMA KANAL TASARIMI

Sümeysra KULCU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Necmettin KAYA

Plastik enjeksiyon prosesinin en önemli aşamalarından biri soğutma aşamasıdır. Soğutma sisteminin görevi, ergimiş malzemenin katılaşarak kalıptan çıkmasını sağlamaktır. Konvansiyonel soğutma kanalları parçanın sıcaklığını kontrol etmekte kullanılan en yaygın metottur. Fakat konvansiyonel soğutma kanallarının karmaşık yapılı parçalarda düzgün bir soğuma sağlaması zordur.

Bu çalışmada plastik enjeksiyon ile plastik bir ürünün üretimi için kalıp tasarımı yapılmıştır. Öncelikle konvansiyonel soğutma kanal tasarımı ve simülasyonu yapılmıştır. Bunun için Moldex adlı program kullanılmıştır. Simülasyon sonucu parça kalitesi ve proses parametreleri açısından yorumlanmıştır. Çalışmanın devamında parçanın çevrim süresi ve maliyeti düşürmek için konformal soğutma kanal tasarımı ve enjeksiyon simülasyonu yapılmıştır.

Yapılan simülasyon sonuçları ve proses parametreleri yorumlanarak konvansiyonel kanal tasarımı ve konformal kanal tasarımı yapılan simülasyon sonuçlarına göre karşılaştırılmıştır. Son olarak maliyet açısından her iki kanal tasarımının karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik enjeksiyon, Enjeksiyon kalıbı tasarımı, Soğutma sistemi tasarımı, Konformal soğutma kanal tasarımı, Moldex

2022, viii + 94 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

CONFORMAL COOLING CHANNEL DESIGN IN PLASTIC INJECTION MOLDING

Sümeyra KULCU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Necmettin KAYA

One of the most important stage of plastic injection process is the cooling stage. The task of the cooling system is ensure that molten material solidifies and comes out of the mold. Straight cooling channels are the most common method used to control the temperature of the part. However, straight channels are difficult to provide proper cooling in complex parts.

In this study, a mold design was made for the production of a plastic product by plastic injection. First of all, straight cooling channel design and simulation were done. For this, a program called Moldex was used. The simulation results was interpreted in terms of part quality and process parameters. Then , conformal cooling channel desing and simulation were performed to reduce the cycle time and cost of the part.

The simulation results and process parameters were interpreted. Straight channel design and comformal channel design were compared according to the simulation results. Finally, both channel designs were compared in terms of cost.

Key words: Plastic Injection, Injection mold design, Cooling system design, Conformal Cooling Channel Design, Moldex

2022, viii + 94 pages.

TEŞEKKÜR

“Plastik Enjeksiyon Kalıpcılığında Konformal Soğutma Kanal Tasarımı” adlı tez çalışmamın konu seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesine kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden değerli hocam Prof. Dr. Necmettin KAYA’ya teşekkürlerimi sunarım.

Bana her zaman destek olan anneanneme ve dedeme, çalışmalarım sırasında manevi destek olup, göstermiş oldukları sabır ve anlayıştan dolayı sevgili aileme ve eşime teşekkürlerimi sunarım.

SümeYra KULCU
10/01/2022

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Plastikler (Genel Bilgi)	3
2.1.1. Plastiklerin Sınıflandırılması.....	4
2.1.1.1. Termosetler	5
2.1.1.2. Termoplastikler	6
2.1.1.3. Elastomerler	6
2.2. Plastik Enjeksiyon Makinesi	7
2.2.1. Mengene Kapama Ünitesi	8
2.2.2. Enjeksiyon Ünitesi	9
2.2.3. Kontrol Ünitesi.....	11
2.2.4. Kalıp ve Kalıp Elemanları.....	11
2.3. Plastik Enjeksiyon Prosesi	12
2.3.1. Plastikleştirme	13
2.3.2. Kalıbın Kapatılması	13
2.3.3. Kalıbın Doldurulması.....	14
2.3.4. Ütüleme	14
2.3.5. Tutma	15
2.3.6. Soğutma	15
2.3.7. Kalıptan Çıkarma	15
2.4. Plastik Enjeksiyon Prosesinde Ana Parametreler	16
2.4.1. Sıcaklıklar	16
2.4.1.1 Enjeksiyon Malzemesinin Sıcaklığı.....	16
2.4.1.2 Kalıp Sıcaklığı.....	16
2.4.2. Basınçlar.....	17
2.4.2.1 Enjeksiyon Basıncı.....	17
2.4.2.2 Tutma Basıncı	17
2.4.2.3 Geri Basınç.....	17
2.4.3. Zamanlar	17
2.4.3.1 Doldurma Süresi	18
2.4.3.2 Ütüleme Süresi	18
2.4.3.3 Tutma Süresi	18
2.4.3.4 Soğutma Süresi	18
2.4.3.5 Kalıp Açık Kalma Süresi	18
2.4.4. Hızlar	18
2.4.5. Dört Parametrenin Kullanım Sırası	19
2.5. Plastik Enjeksiyon Kalıpları.....	19
2.5.1. Kalıp Boşluğu (Göz)	20
2.5.2. Erkek Kalıp	20
2.5.3. Dişi Kalıp	20

2.5.4. Yolluk Çeşitleri	21
2.5.4.1. Sıcak Yolluk Sistemi.....	21
2.5.4.2. Soğuk Yolluk Sistemi	22
2.5.5. Soğutma Sistemi	23
2.5.6. İtici Sistemi	24
2.6. Kalıpların Soğutulması.....	24
2.6.1. Soğutma Sistemi İle İlgili Hesaplamalar	28
2.6.1.1. Kalıp İçerisinden Gececek Su Miktarı	28
2.6.1.2. Soğutma Zamanı	29
2.6.2. Soğutma Kanallarının Tasarımı	31
2.6.2.1. Konvansiyonel Soğutma Kanalları	32
2.6.2.2. Komformal Soğutma Kanalları	34
2.7. Enjeksiyon Kalıplarının Üretilmesi.....	35
2.7.1. Konvansiyonel Soğutma Kanalına Sahip Kalıp İmalatı.....	36
2.7.2. Konformal Soğutma Kanalına Sahip Kalıp İmalatı	36
2.7.2.1. Eklemeli İmalat Yöntemi	37
2.7.2.2. Seçimli Lazer Sinterleme	38
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	39
3.1. Plastik Ürün Tasarımı	39
3.2. Plastik Enjeksiyonda Kullanılacak Olan Enjeksiyon Tezgahı	41
3.3. Kalıp Tasarımı.....	43
3.4. Konvansiyonel Soğutma Kanal Tasarımı.....	47
3.4.1. Konvansiyonel Kanallı Kalıpta Dişi ve Erkek Kalıp Yarımı Tasarımı.....	48
3.5. Komformal Soğutma Kanal Tasarımı	50
3.5.1. Konformal Kanallı Kalıpta Dişi ve Erkek Kalıp Yarımı Tasarımı	55
3.6. Konvansiyonel Kanal için Moldex3D ile Enjeksiyon Simülasyonu.....	58
3.7. Konformal Kanal için Moldex3D ile Enjeksiyon Simülasyonu	62
3.8. Moldex Yazılımının Modelin Çözümünde Kullandığı Denklemler	65
3.8.1. Dolum ve Ütuleme Aşamasında Matematiksel Modeller	65
3.8.2. Soğuma Aşamasında Matematiksel Modeller.....	67
3.8.2.1. Döngü-Ortalama Kalıp Sıcaklığı Yaklaşımı	68
3.8.2.2. Tam Geçici Yöntem	68
3.8.3. Soğuma Aşamasında Katı İçin Matematiksel Modeller ve Varsayımlar	69
3.8.3.1. Soğutma Kanalı Ağı Analizi	70
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	72
4.1. Konformal Soğutma Kanalı Tasarım Metodu.....	72
4.2. Konformal Kanalların Üretimi.....	72
4.3. Soğutma Süresi Hesabı	73
4.4. Analiz sonuçları	73
5. SONUÇ	87
KAYNAKLAR	89
EKLER.....	93
EK 1 Plastik Malzemelerin Fiziksel Özellikleri.....	93
ÖZGEÇMİŞ	94

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
a	Kanal-Kavite arası mesafe
b	Kanallar arası
c	Özgöl ısısı
d	Soğutma kanalı çapı, mm
mm	Milimetre
s	Saniye
t_s	Soğuma süresi, s
h	Plastik parça kalınlığı, cm
T	Sıcaklık, °C
Q	Isı, Watt
Q_c	Kalıpta oluşan toplam ısı miktarı, kalori/saat
H	Yok edilmesi gereken toplam ısı miktarı, kalori/saat
q	Plastik ergime ısı miktarı, kalori/saat
C_p	Plastik madde özgül sıcaklık katsayısı
M_p	Kalıplanacak plastik madde miktarı, kg/saat
M_s	Kalıp içerisinden geçmesi gereken su miktarı, kg/saat
T_p	Plastik maddenin kalıplama sıcaklığı, °C
T_M	Kalıp sıcaklığı, °C
T_{SC}	Suyun kalıp içerisinden çıkış sıcaklığı, °C
T_{SG}	Suyun kalıp içerisine giriş sıcaklığı, °C
R	Hacim kalıplarında ısı transferi randımanı
Mpa	Mega Pascal
ρ	Soğutucu akışkanın öz kütlesi , kg/m ³
U	Akışkanın hızı, m/sn
η	Akışkanın dinamik viskozitesi, Pa.s
$\emptyset$	Çap
t	Zaman
p	Basınç
σ	Toplam gerilim tensörü
k	Termal iletkenlik
$\dot{\gamma}$	Kesme hızı
T_w	Kalıp tabanı ve soğutma kanalları arasındaki arayüz sıcaklığı
T_c	Soğutucu sıcaklığı
Nu	Nusselt sayısı
d_o	Islak çevre
k	Termal iletkenlik.
Pr	Prandtl sayısı
$\dot{q}_s$	Soğutma kanalı yüzeyinden gelen ısı akısı
P	Yüzey çevresi
$\bar{h}$	X konumuna kanal girişi noktası içindeki h'nin ortalama değeri
ΔP	Basınç düşüşü
f	Sürtünme faktörü

g	Yerçekimi ivmesi
ΔP_j	Bağlantı basınç düşüşü
K_j	Bağlantı kayıp katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
ABS	Akrilonitril Butadien Stiren
Re	Reynold sayısı
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CAE	Bilgisayar Destekli Mühendislik
CAM	Bilgisayar Destekli Üretim
HRC	Rockwell Sertlik Değeri
PA	Poliamid
PA6	Poliamid 6
PC	Policarbonat
PE	Polietilen
PET	Polietilen Terephalat
PMMA	Polimetilmetakrilat
POM	Polioksimetilen
PP	Polipropilen
PS	Polistiren
PSU	Polysulfon
PTFE	Politetrafloretillen
PVC	Ploivinilklorür
P-V-T	Basınç-Hacim-Sıcaklık
SAN	Stirol Akrl Nitril
TS	Türk Standartları

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Plastiklerin sınıflandırılması	4
Şekil 2.2. Plastik moleküllerin dizilişi	5
Şekil 2.3. Isı-zaman oranına göre erime grafikleri A)Termoplastik ve B)Termosetler	5
Şekil 2.4. Termoplastiklerin zincir yapısı	6
Şekil 2.5. Enjeksiyon makinesi	7
Şekil 2.6. Enjeksiyon makinesi ve kısımları	8
Şekil 2.7. Hiroluk kilitleme sistemi	8
Şekil 2.8. Hidro-mekanik kilitleme sistemi	9
Sekil 2.9. Enjeksiyon ünitesi	10
Şekil 2.10. Enjeksiyon makinesi ocak ve vidası	10
Şekil 2.11. Kontrol ünitesi	11
Şekil 2.12. Enjeksiyon Çevrimi	13
Şekil 2.13. Kalıbın kapatılması	14
Şekil 2.14. Kalıbın Doldurulması	14
Şekil 2.15. Parça Çıkarılması	15
Şekil 2.16. İtici Pimler ile Parça Çıkarılması	15
Şekil 2.17. Enjeksiyon Kalıbı	20
Şekil 2.18. Yolluk sistemi elemanları	21
Şekil 2.19. Sıcak yolluk sistemi elemanları	22
Sekil 2.20. Soğutma kanallarının parça köşelerine etkisi	23
Şekil 2.21. Çevrim süresindeki proseslerin zaman aralıkları	26
Şekil 2.22. Yüzey sıcaklık farkı sebebiyle çarpılmanın oluşumu	27
Şekil 2.23. Kalıp sıcaklığının soğuma zamanına etkisi	30
Şekil 2.24. Soğuma zamanının ürünün et kalınlığına bağlı olarak değişimi	30
Şekil 2.25. Soğutma kanallarının konumları	31
Şekil 2.26. Erkek k kalıp yarımalarında soğutma kanalları	32
Şekil 2.27. Dişi kalıp yarımalarında soğutma kanalları	33
Şekil 2.28. Seri ve Paralel bağlantı tipleri	33
Şekil 2.29. a) a) Konvansiyonel soğutma kanalı , b) Komformal soğutma kanalı	34
Şekil 2.30. Komformal soğutma kanalı uygulamaları	35
Şekil 2.31. Talaşlı ve eklemeli imalat	37
Şekil 2.32. SLS yöntemi (şematik)	38
Şekil 3.1. Tasarlanan plastik parça	39
Şekil 3.2. Parça hacim ve ağırlığının hesaplanması	41
Şekil 3.3. Enjeksiyon işleminde kullanılacak olan tezgahın enjeksiyon ünitesi bilgileri	41
Şekil 3.4. Enjeksiyon işleminde kullanılacak olan tezgahın mengene ünitesi bilgileri	42
Şekil 3.5. Enjeksiyon işleminde kullanılacak olan tezgahın teknik ölçüleri	42
Şekil 3.6. Kalıp elemanları	44
Şekil 3.7. Kalıbın perspektif görünüşü	45
Şekil 3.8. Parça ayırma yüzeyi	46
Şekil 3.9. Kalıbın dişi yarımının perspektif görünüşü	46
Şekil 3.10. Kalıbın erkek yarımının perspektif görünüşü	47
Şekil 3.11. Klasik soğutma kanal tasarımı	48
Şekil 3.12. Kalıbın dişi yarımındaki konvansiyonel soğutma kanallarının görünüşü	49
Şekil 3.13. Kalıbın erkek yarımındaki konvansiyonel soğutma kanallarının görünüşü	49
Şekil 3.14. Kalıp içi konvansiyonel soğutma kanallarının konumu	50

Şekil 3.15. Ofsetlenerek elde edilen referans yüzeyler	51
Şekil 3.16. Ofsetlenerek elde edilen referans yüzeyler için kesit görünüşü.....	52
Şekil 3.17. Dış ofset üzerindeki soğutma kanal eğrileri.....	53
Şekil 3.18. İç ofset üzerindeki soğutma kanal eğrileri.....	53
Şekil 3.19. Kanal kesit profilinin kanal hattı boyunca süpürülmesi	54
Şekil 3.20. Dişi kalıp yarımında soğutma kanallarının elde edilmesi.....	54
Şekil 3.21. Erkek kalıp yarımında soğutma kanallarının elde edilmesi.....	55
Şekil 3.22. Kalıp çekirdekleri a) Dişi kalıp ve b)Erkek kalıp	56
Şekil 3.23. Kalıbın dişi yarımındaki konformal soğutma kanallarının görünüşü	57
Şekil 3.24. Kalıbın erkek yarımındaki konformal soğutma kanallarının görünüşü	57
Şekil 3.25. Konvansiyonel soğutma kanalları.....	58
Şekil 3.26. Plastik parça, yolluk ve soğutma kanallarının tanıtılması (Konvansiyonel)	59
Şekil 3.27. Plastik parça üzerindeki giriş noktası	59
Şekil 3.28. Soğutma kanalları üzerindeki giriş ve çıkış noktaları.....	60
Şekil 3.29. Parça ve konvansiyonel kanalların Mesh görünüşü.....	60
Şekil 3.30. Malzeme seçimi menüsü.....	61
Şekil 3.31. Proses ayarları menüsü	61
Şekil 3.32. Konformal soğutma kanalları	62
Şekil 3.33. Plastik parça, yolluk ve soğutma kanallarının tanıtılması (Konformal)	63
Şekil 3.34. Eriyik giriş noktası.....	63
Şekil 3.35. Soğutma kanalları üzerindeki giriş ve çıkış noktaları.....	64
Şekil 3.36. Parça ve konformal kanalların Mesh görünüşü	64
Şekil 3.37. Enjeksiyon kalıplama için geleneksel yöntemin şematik diyagramı	65
Şekil 3.38. Tipik kalıp sıcaklığı değişim döngüsü	67
Şekil 4.1. Kalıp boşluğunun dolum süresi	73
Şekil 4.2. Konformal kanallı kalıptaki sıcaklık farklılıkları	74
Şekil 4.3. Konvansiyonel kanallı kalıptaki sıcaklık farklılıkları.....	75
Şekil 4.4. Birleşme çizgileri ve eriyik malzemenin akış yönü.....	76
Şekil 4.5. Konformal kanallı kalıpta soğuma sıcaklığı	77
Şekil 4.6. Konformal kanallı kalıpta soğuma sıcaklığı grafiği.....	77
Şekil 4.7. Konvansiyonel kanallı kalıpta soğuma sıcaklığı.....	78
Şekil 4.8. Konvansiyonel kanallı kalıpta soğuma sıcaklığı grafiği.....	78
Şekil 4.9. Konformal kanallı kalıpta eriyik halde kalan bölgeler	79
Şekil 4.10. Konvansiyonel kanallı kalıpta eriyik halde kalan bölgeler.....	80
Şekil 4.11. Konformal kanallı kalıpta enjeksiyon sıcaklığına ulaşma süresi.....	80
Şekil 4.12. Konvansiyonel kanallı kalıpta enjeksiyon sıcaklığına ulaşma süresi	81
Şekil 4.13. Konformal kanallı kalıpta donmuş yüzey oranı.....	81
Şekil 4.14. Konvansiyonel kanallı kalıpta donmuş yüzey oranı	82
Şekil 4.15. Konformal kanallı kalıpta ısı akısı.....	83
Şekil 4.16. Konvansiyonel kanallı kalıpta ısı akısı	83
Şekil 4.17. Konformal kanallı kalıpta maksimum soğuma süresi.....	84
Şekil 4.18. Konvansiyonel kanallı kalıpta maksimum soğuma süresi.....	84
Şekil 4.19. Konformal kanallı kalıpta hacimsel büzülme	85
Şekil 4.20. Konvansiyonel kanallı kalıpta hacimsel büzülme.....	86

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Çok kullanılan plastik hammaddelerin enjeksiyon parametreleri.....	19
Çizelge 2.2. Yaygın kullanılan plastik malzemelerin için uygun kalıp sıcaklıkları.....	25
Çizelge 2.3. Kalıptan çıkarma sıcaklıkları	25
Çizelge 2.4. Parça cidar kalınlığına göre soğutma kanalı boyutları.....	31
Çizelge 2.5. Soğutma kanallarının boyutları.....	34
Çizelge 3.1. ABS malzemesinin fiziksel özellikleri	40
Çizelge 3.2. Kalıp malzemesinin termal özellikleri	43
Çizelge 3.3. Simülasyonda kullanılan enjeksiyon parametreleri	65
Çizelge 4.1. Kalıp çekirdeklerinin yaklaşık üretim maliyetleri	72

1. GİRİŞ

Dünyada plastik kalıplama teknolojisi her geçen gün gelişmektedir. Plastik sektörünün gelişmesi hem maliyet hem de fiziksel açıdan plastiklerin diğer malzemelere göre tercih edilir duruma gelmesini sağlamıştır. Günümüzde plastikler; tıp, havacılık, otomotiv, elektrik-elektronik sanayisinde yoğun olarak kullanılmaktadır.

Plastiklerin tasarımı ve şekillendirilmesi, son birkaç yıldır gelişen CAD programları ile daha hassas ve hızlı tasarımlar yapılmaktadır. CAD programları ile hata ihtimali de en aza indirilmiştir. Günümüzde kalıp tasarımcıları tecrübeleri ve bilgisayar desteği ile farklı tasarımlar yapabilmekte ve üretim öncesinde bu tasarımlarının analizini yaparak sonuçlarını önceden araştırmaktadır.

Enjeksiyon yöntemi plastik parça üretiminde en çok kullanılan ve önemli yöntemlerdendir. Enjeksiyon kalıplama, plastik hammaddeyi tek bir işlem sonucunda ürüne dönüştürdüğü için seri üretime uygundur.

Sanayideki artan rekabet ortamı her geçen gün daha karmaşık parçanın, makine sistemlerinin hızlı ve hassas şekilde kullanılarak, daha ekonomik bir şekilde üretimine gerek duymaktadır. Enjeksiyon yönteminin en önemli avantajlarından birisi, karmaşık parça geometrisine sahip parçalarda dahil olmak üzere ikinci bir işleme ihtiyaç duyulmadan sonuca ulaşmadır. Enjeksiyon kalıbı kalıplanacak parça ölçülerine uygun kavite boşluğu içerisine, ergitilmiş plastik granülün enjekte edilmesi ve soğutulmasını sağlayan sistemdir. Doğru modellenmiş bir kalıbın en kısa zamanda, minimum hatayla daha verimli üretimi sağlayacağı unutulmamalıdır.

Bu çalışmada amaç, karmaşık geometriye sahip bir plastik parça için soğutma kanallarının ürün üzerindeki etkisinin homojen olacak şekilde, soğutma kanallarının tasarımını ve bu soğutma kanallarının analizini gerçekleştirmektir. Ayrıca, soğutma kanalı tasarım etkisiyle çevrim zamanını optimize etmek ve kanal tasarımının homojen soğutma üzerindeki etkilerini bulmaktır.

Kalıptaki soğutma sistemlerinin görevlerinden biri kavite içindeki sıcaklık dağılımını homojen olmasını sağlamaktır. Soğutmanın homojen olması, soğutma kanallarının kaviteye olan uzaklığının eşit olması ve aynı zamanda kanallarının birbirine olan uzaklıklarının eşit olmasına bağlıdır.

Enjeksiyon çevrim süresinde, en çok zaman alan proses soğutmadır. Çevrim süresinin kısaltılabilmesi için soğutmanın homojen olması gereklidir. Kalıp soğutma sisteminin kalıp duvarında yaklaşık homojen bir sıcaklık profilinin oluşumunu sağlayacak şekilde tasarlanması çok önemlidir. Kalıp duvarında oluşan ısının homojen olmasını etkileyen en önemli etken soğutma kanallarının kalıp boşluğuna ve birbirlerine olan uzaklıklarıdır. (Akyüz 1998).

Gerçekleştirilen bu çalışmada, komformal soğutma kanallarının tasarımı yapılmış ve tasarımın doğruluğu ispatlamak amacıyla akış analizleri yapılmıştır. Plastik enjeksiyon kalıbı tasarımında, soğutma kanallarının elde edilecek ürün üzerindeki soğutma etkisinin en homojen olduğu parça şekli ile uyumlu soğutma kanal tasarımı yapılmıştır. Soğutma kanalları bilgisayar destekli tasarım programında tasarlanmıştır. Örnek parçanın tasarımı yine bilgisayar destekli tasarım programı CATIA V5 programında yapılmıştır. Konvansiyonel ve komformal soğutma kanallarının tasarımı ve bu tasarımın doğruluğunu kanıtlamak için enjeksiyon simülasyonları ve analizleri yine bilgisayar ortamında (MOLDEX 3D) gerçekleştirilmiştir. Son olarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda konvansiyonel ve konformal kanal tasarımı karşılaştırılması yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Enjeksiyon yöntemi plastik parça üretiminde en çok tercih edilen üretim yöntemidir. Karmaşık geometriye sahip plastik ürünlerin işlem sonunda tekrar bir işleme gerek duyulmadan seri şekilde üretilmesini sağladığı için enjeksiyon kalıplama işlemi oldukça yaygındır.

Plastiklere belirli bir sıcaklık ve basınç altında şekil vermek mümkündür. Enjeksiyon kalıplama komple bir üretim yönteminin adıdır. Enjeksiyon makinesi, elde edilmek istenen parçaya ait kalıp, mengene ünitesi, enjeksiyon ünitesi ve kontrol ünitesi gibi ekipmanlarından oluşmaktadır.

Enjeksiyon yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir (Akyüz 1998);

- Hızlı bir şekilde parça üretimi gerçekleştirilebilir.
- Yüksek hacimlerde parça üretilebilir.
- Diğer işleme yöntemlerine göre düşük maliyetli olabilir.
- Büyük çoğunlukla son işlem gerektirmez.
- Oldukça farklı şekil ve renkte parça üretilebilir.
- Malzeme kaybının önüne geçilebilir.
- Birçok farklı parça aynı kalıp ve makine kullanılarak üretilebilir.
- Hassas parçalar üretilebilir.

2.1. Plastikler (Genel Bilgi)

Plastik; karbon (C), hidrojen (H), oksijen (O), azot (N) ve diğer organik ya da inorganik elementlerin oluşturduğu monomer adı verilen; basit yapıdaki molekülü gruplardaki bağın koparılarak polimer adı verilen uzun ve zincirli bir yapıya dönüştürülmesi ile elde edilen malzemelere verilen isimdir.(Wikipedia, 2021)

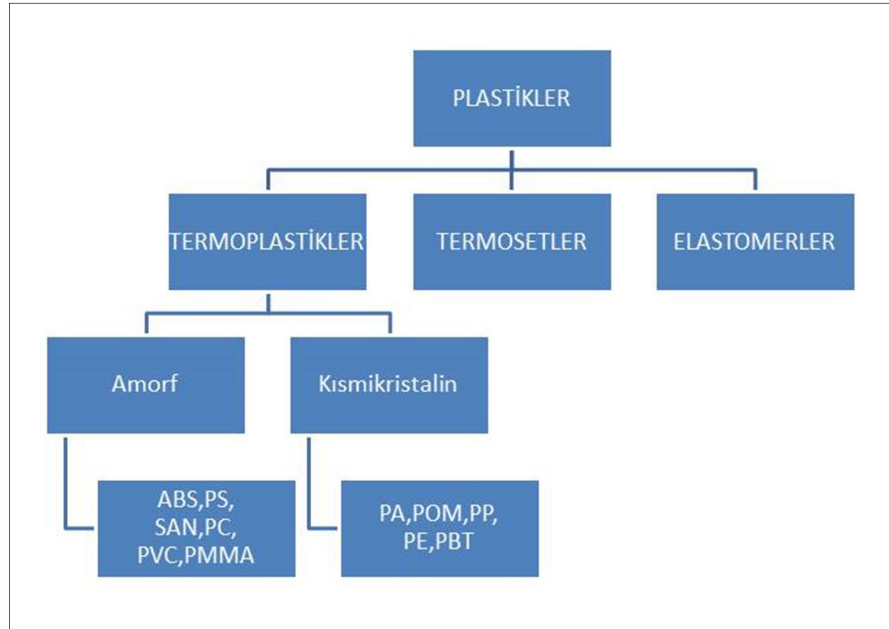
Plastikler, otomotiv, elektronik, oyuncaklar, ev eşyaları vb. alanlarda en çok tercih edilen malzemelerden biridir (Akyüz 1998).

Plastiklerin diğer malzemelere göre gösterdikleri farklı özellikleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Plastikler özgül ağırlıklarının az olması sebebiyle diğer malzemelere göre hafiftir,
- İstenilen özellikleri elde edebilmek için katkı maddeleriyle özellikleri değiştirilebilir,
- İzolasyon malzemesi olarak kullanılırlar,
- Isı iletkenlikleri düşüktür,
- Isı iletim kabiliyeti yaklaşık olarak çeliğin üç yüzde biri kadardır,
- Estetik açıdan iyidir. Birçok plastik türleri istenilen renk ile renklendirilebilir,
- Kolay şekil verilebilirler,
- Yeniden işlenip kullanılır hale gelebilirler,
- Plastiklerin göreceli olarak maliyetleri düşüktür,
- Korozyona ve kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır. (Akyüz 1998, Telli 2009)

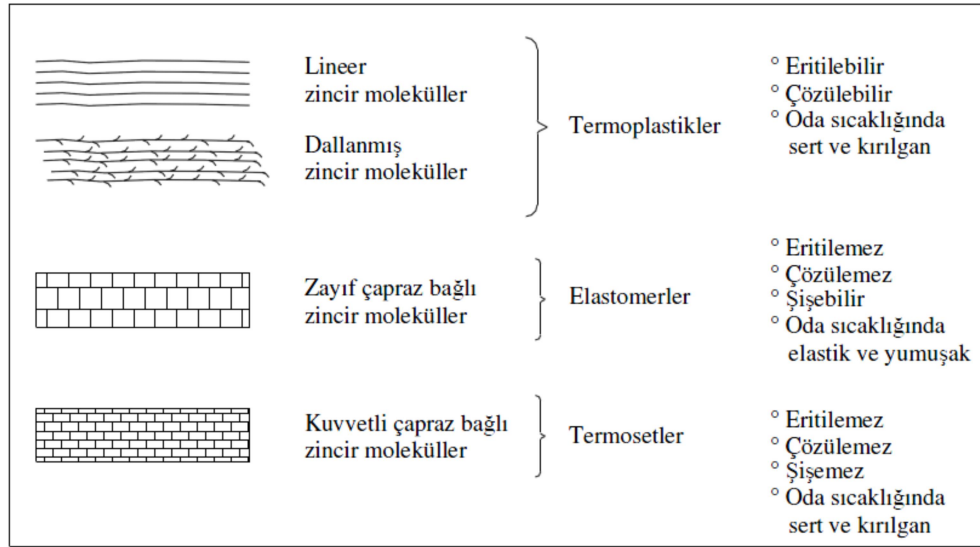
2.1.1. Plastiklerin Sınıflandırılması

Plastik malzemeler; Termoplastikler, Termoset plastikler ve Elastomerler olmak üzere üç sınıfa ayrılırlar (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Plastiklerin sınıflandırılması

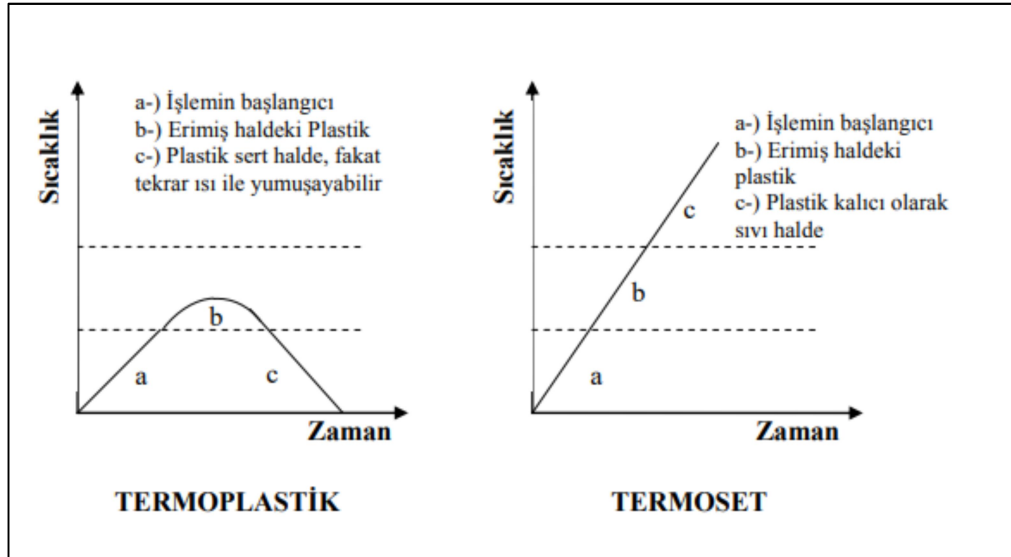
Farklı plastiklerin uzun zincir yapılarının şematik gösterimi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Plastik malzemelerin moleküllerinin dizilişi (Akyüz 1998)

2.1.1.1. Termosetler

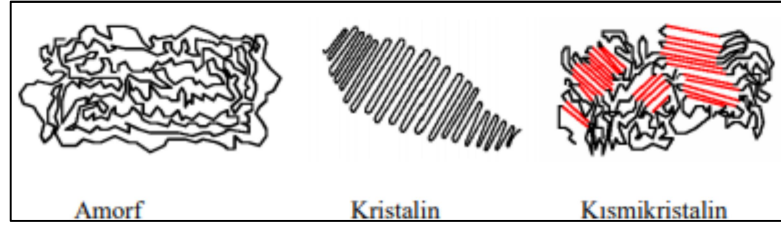
Termoset plastiklerde yumuşama sıcaklığının bozunma sıcaklığından yüksek olması bir defa şekillendirilmek için ısıtıldıklarında polimerleşmelerinin yükselmesine ve büyük oranda çapraz bağlar oluşturmalarına sebep olur. Bu yüzden geri dönüşüm özelliği göstermezler (Koçak 2005-2006, Paksoy 2008).



Şekil 2.3. Isı-zaman oranına göre erime grafikleri A)Termoplastik ve B)Termosetler (Temiz 2004)

2.1.1.2. Termoplastikler

Termoplastikler, moleküller arasında bağlarla birbirlerine bağlanmış lineer veya dallı makromolekül zincirleri ile oluşturduğu plastiklerdir. Termoplastikler tekrardan eriyebilen ve tekrardan istenilen şekil verilen polimerlerdir. Termoplastikler bilenen genel özellikleri çekme dayanımları düşük, sertlik ve çarpma dayanımları yüksek ve oda sıcaklıklarında belli basınçta şekil alabilirler. Termoplastikler molekül yapısına göre Amorf Polimerler ve Kısmi Kristal Yapılı Polimer olarak ikiye ayrılırlar.



Şekil 2.4. Termoplastiklerin zincir yapısı (Pınar 2010)

Bazı termoplastikler şu şekilde sıralanabilir:

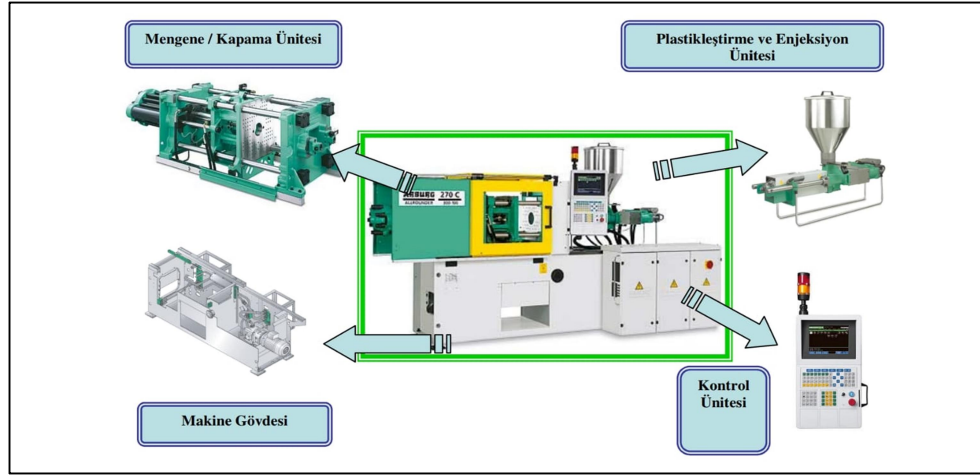
- ABS (Akrilonitril-Bütadien Stiren)
- PC (Polikarbonat)
- PA ((PA6, PA66, PA12 vb. gibi) (Poliamid))
- PVC (PoliVinilKlorür)
- PBT (Poli Butadien Tereftalat)
- PE (PoliEtilen)
- PET (PoliEtilenTerephalat)
- PS (PoliStiren)
- PP (PoliPropilen)
- POM (PoliOksiMetilen)
- PMMA ((Akrilikler)(Polimetil metakrilat))
- SAN (StirenAkrilNitril)
- CA (SelülozAsetat)

2.1.1.3. Elastomerler

Elastomerler, çapraz bağlı bir yapıya sahip ve uzun zincirli yapıdadırlar. Elastomerlerin en önemli özelliği elastik davranışta bulunmasıdır (Evcin 2020).

2.2. Plastik Enjeksiyon Makinesi

Plastik enjeksiyon makinesi, temelde kapalı bir kalıbın içine sıcaklık yardımı ile huniden aldığı eritilmiş plastik ham maddenin yolluk girişinden kalıp gözüne hızlı bir şekilde enjekte edilmesini, sonrasında ütüleme fazı ve tutma fazı ile parçanın boyut ve görsel toleranslarının kabul edilebilir seviyeye getirip ardında da plastiğin katılaşmasını sağladıktan sonra kalıbı açıp ürünü çıkarmak olarak özetlenebilir.

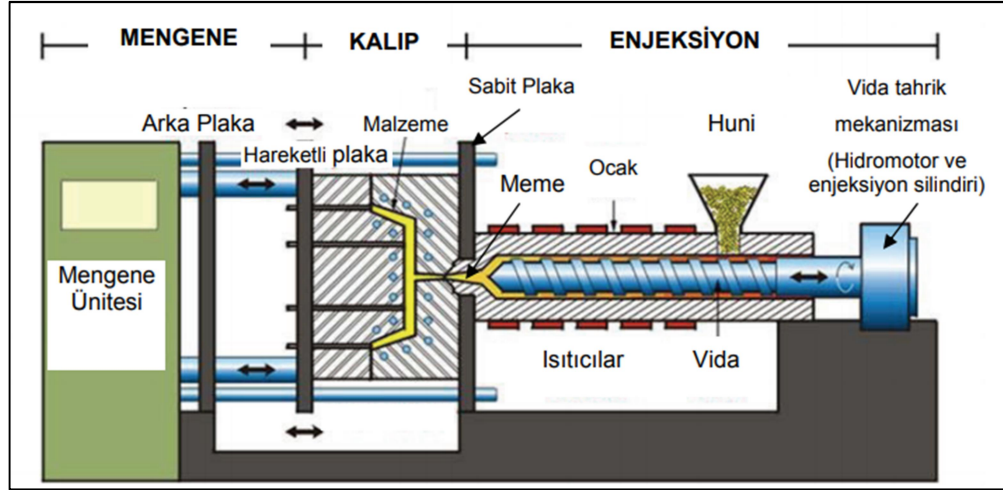


Şekil 2.5. Enjeksiyon makinesi

Plastik enjeksiyon makinaları, pistonlu enjeksiyon makinaları ve vidalı enjeksiyon makinaları olmak üzere iki farklı grupta incelenmektedir. Günümüzde en çok kullanılan ve yaygın olan vidalı enjeksiyon makinalarıdır. Bir enjeksiyon makinesi dört temelden oluşmaktadır. Bunlar;

- Mengene ünitesi
- Enjeksiyon ünitesi
- Kontrol ünitesi
- Kalıp ve kalıp elemanları

Enjeksiyon makinesi ve kısımları Şekil 2.6'de görülmektedir.



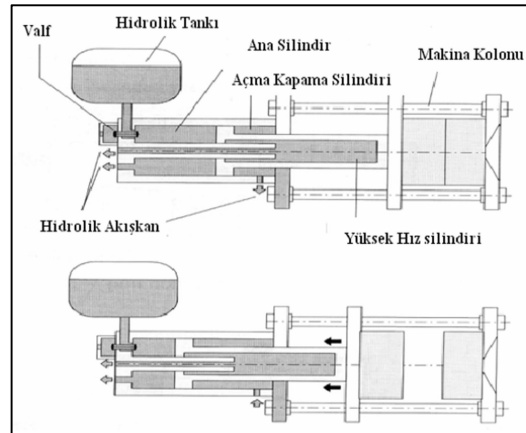
Şekil 2.6. Enjeksiyon makinesi ve kısımları

2.2.1. Mengene Kapama Ünitesi

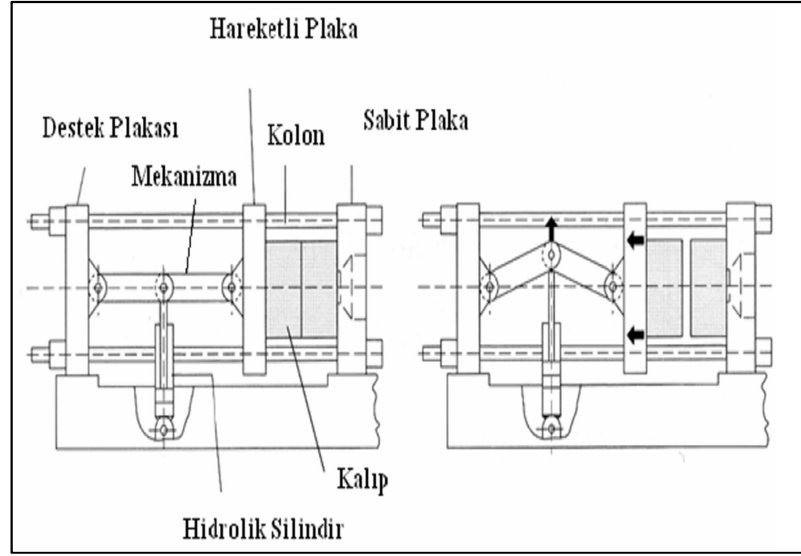
Mengene kapama ünitesi enjeksiyon makinesinin, kalıbı kapatıp açan, kalıbın kapalı kalmasını sağlayarak kalıp ayrımı yüzeyinde çapak oluşmasına izin vermemek için yüksek basınç uygulayan elemanıdır. Üründe son işlem gerektiren çapak oluşumu, zaman kaybına neden olduğu ve dolayısıyla maliyet oluşturduğu için enjeksiyon kalıplama yönteminde hiç istenmeyen durumdur.. Bu sebeple mengene sistemi, gerekli kuvvet uygulayarak kalıbı kapalı tutabilmelidir.

Üç Tıp Kapama (Kilitleme) Sistemi vardır.

- Hirolık Kilitleme Sistemi
- Hidro-Mekanik Kilitleme Sistemi
- Mekanik Kilitleme Sistemi



Şekil 2.7. Hirolık kilitleme sistemi (Abalı 2005)



Şekil 2.8. Hidro-mekanik kilitleme sistemi (Abalı 2005)

2.2.2. Enjeksiyon Ünitesi

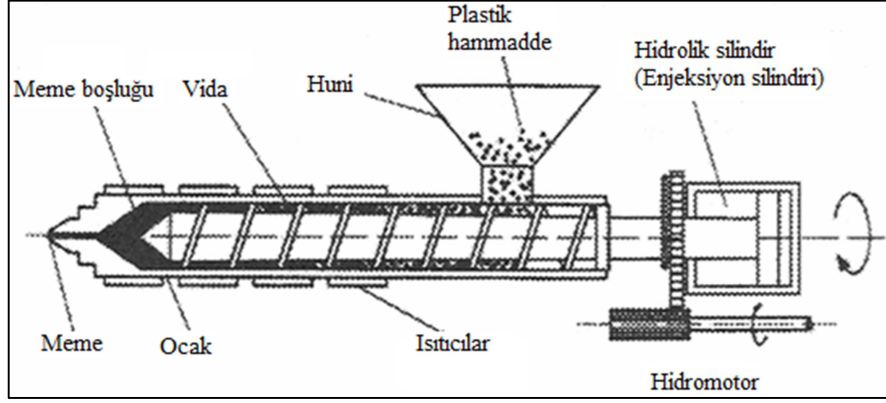
Plastik malzemeyi eritmek ve kalıba enjekte etmek enjeksiyon makinelerinin temel amacıdır. Üretim süresince üretilen her parçanın aynı özelliklere sahip olabilmesi için kalıba her çevrimde aynı miktarda malzeme basılmalıdır. Enjeksiyon ünitesi bu sebeple her tekrarda aynı sıcaklıkta ve homojenlikte malzeme baskısı yapabilmelidir.

Enjeksiyon ünitesi; huni, vida, ısıtıcılar (rezistanslar) ve yolluk memesinden oluşur. Günümüzde en çok kullanılan vidalı enjeksiyon makinalarındaki vida eriyik malzemeyi kalıp boşluğuna ileten piston görevi yapmaktadır.

Vida kendi etrafında dönerken aynı zamanda huniden plastik malzeme alır. Huniden gelen plastik granül ısıtıcılar yardımıyla eriyerek, eriyik plastiği vida gövdesi içinde toplar. Hidrolik basıncı ile vida döner ve vidanın dönmesiyle eriyik plastik ileri doğru ilerleyerek meme boşluğuna depolanır.



Sekil 2.9. Enjeksiyon ünitesi (Arbung Injection Mold, 2021)



Şekil 2.10. Enjeksiyon makinesi ocak ve vidası (Akyüz 1998)

Malzeme meme boşluğuna dolup kalıbı dolduracak seviyeye gelene kadar vida geri gider. Hidrolik piston geri giderken arkasında oluşacak geri basıncı belli bir değerde sabit tutar. Vidanın geri dönme hızı azaltılarak karışımın daha homojen olması sağlanır.

Plastikleştirme işlemi bitip meme boşluğa yeterince malzeme ile dolduktan sonra vida, bir piston gibi yüksek basınçla ileri doğru gider ve plastik malzemeyi meme boşluğundan kalıp içerisine enjekte eder. Meme ucundan çıkarken malzemenin sahip olduğu basınç, enjeksiyon basıncıdır. (Akyüz 1998).

2.2.3. Kontrol Ünitesi

Kontrol ünitesi üzerinde enjeksiyon proses parametrelerinin değişimi ve kontrolü yapılabilmektedir. Enjeksiyon parametreleri basınç, zaman, hız ve sıcaklık olmak üzere dört ana parametreden oluşmaktadır. Bu dört ana enjeksiyon parametresinin doğrudan kontrol ünitesi ile değiştirilebilir. Sekil 2.11’de kontrol ünitesi gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Kontrol ünitesi (Arbung Injection Mold, 2021)

2.2.4. Kalıp ve Kalıp Elemanları

Enjeksiyon yöntemi ile bir parçanın üretilebilmesi için en önemli olan enjeksiyon makinesi parçaları kalıp ve kalıp elemanlarıdır.

Kalıp boşluğuna belirli bir sıcaklık ve basınç altında, plastik malzemenin basılmasıyla bir üretim gerçekteşir. Kalıp genelde iki yarımdan oluşur ve kalıp açılma yüzeyi denilen yerden kalıp ayrılır.

Plastik enjeksiyon kalıplarının üzerindeki önemli kısımları ve kalıp elemanlarının bazıları řu şekilde sıralanabilir;

- Dişi plaka
- Erkek plaka
- İtici
- Geri itici
- Yolluk burcu

- Kolon
- Burçlar
- Destek takozları
- Üst bağlantı plakası
- Alt bağlantı plakası
- İtici plakası
- Merkezleme bileziği
- Kalıp açılma yüzeyi
- Giriş
- Soğutma kanalları

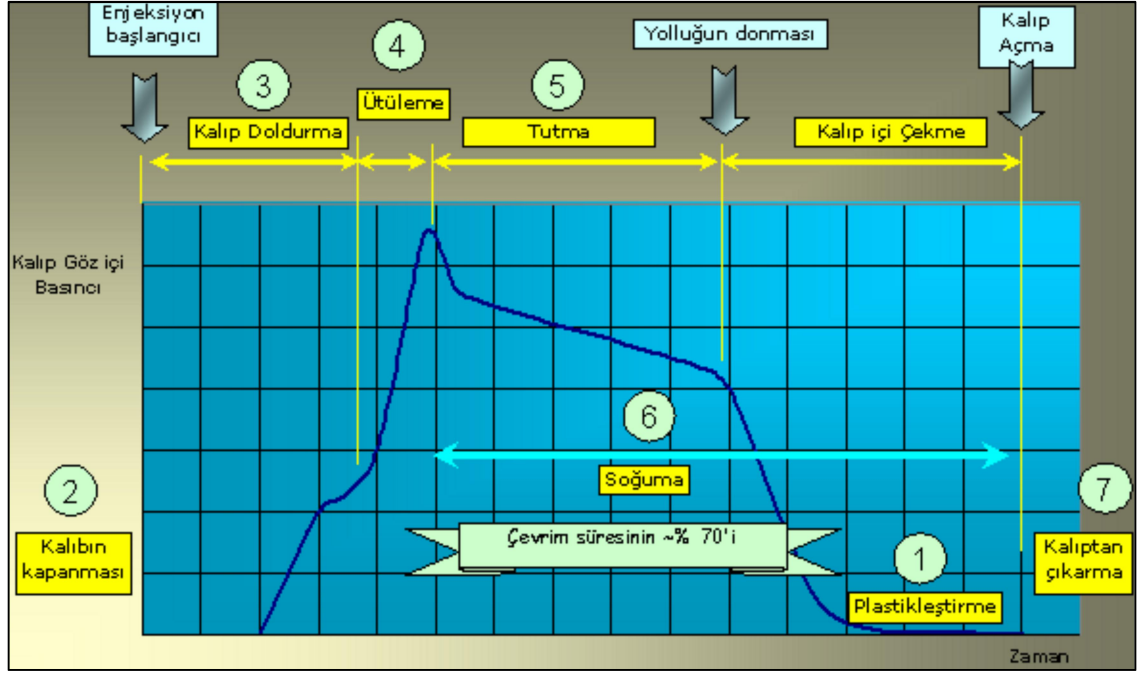
2.3. Plastik Enjeksiyon Prosesi

Enjeksiyon yöntemi, kalıplanacak plastik malzemeyi kalıplama sıcaklığına kadar ısıtmak ve piston yardımı ile meme ve yolluk sisteminden geçirerek ısıtılmış kalıp boşluğuna basınçla enjekte etmek olarak tanımlanabilir. Bu yöntem tüm plastik malzemelere uygulanabilmektedir.

Plastik enjeksiyon çevrimi 7 adımdan oluşmaktadır;

1. Plastikleştirme
2. Kalıbın kapanması
3. Kalıbın doldurulması
4. Ütüleme aşaması
5. Soğuma aşaması
6. Tutma aşaması
7. Parçanın kalıptan çıkarılması

Şekil 2.12' de enjeksiyon çevrim çizelgesi gösterilmiştir.



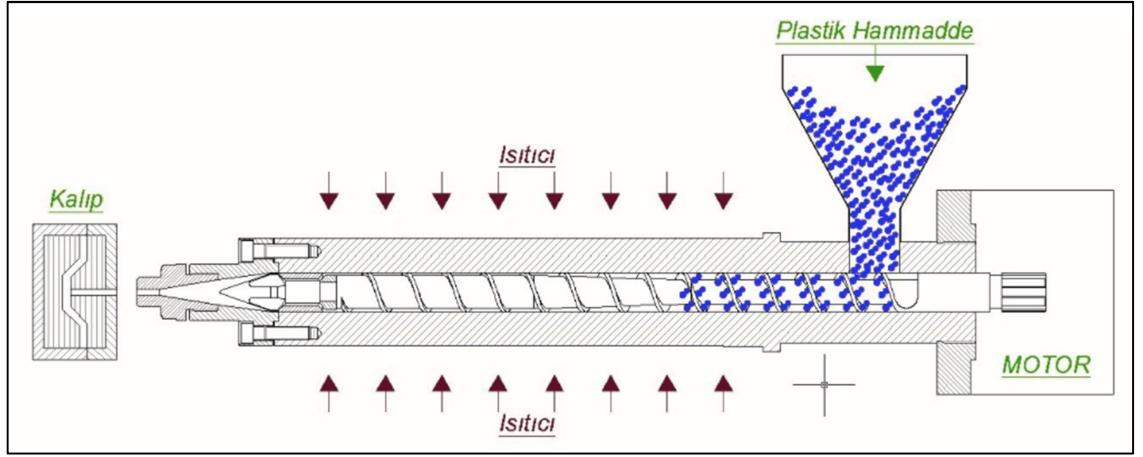
Şekil 2.12. Enjeksiyon Çevrimi

2.3.1. Plastikleştirme

Enjeksiyon prosesinin ilk adımı plastikleştirmedir. Granül halindeki plastik hammaddenin huniye konması ile enjeksiyon prosesi başlatılır. Vida kendi etrafında dönerken aynı zamanda huniden plastik malzeme alır. Huniden gelen plastik granül ısıtıcılar yardımıyla eriyerek, eriyik plastiği vida gövdesi içinde toplar. Hidrolik basıncı ile vida döner ve vidanın dönmesiyle eriyik plastik ileri doğru ilerleyerek meme boşluğuna depolanır (Pınar 2010).

2.3.2. Kalıbın Kapatılması

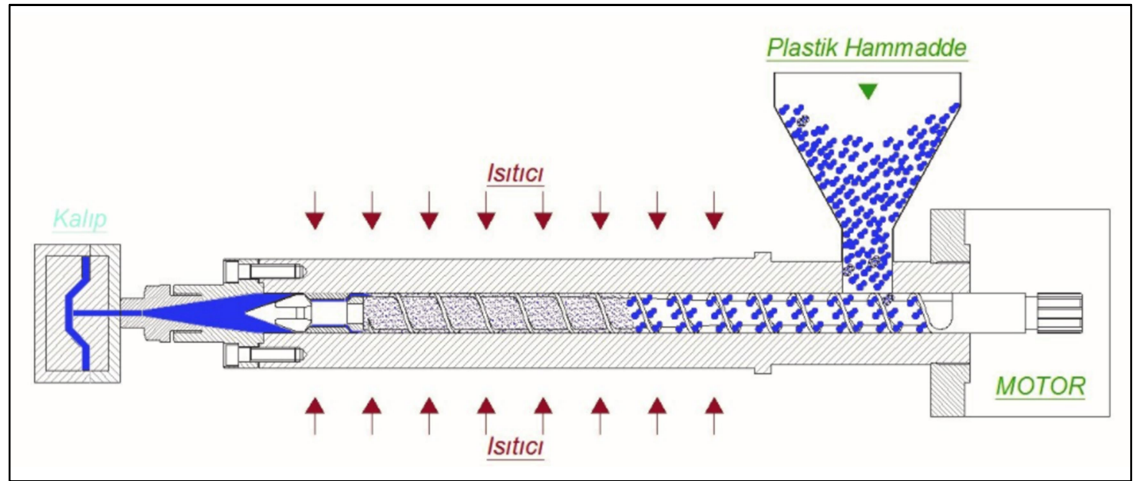
Makinenin mengene ünitesi kalıbın kapatır ve yüksek basınç uygular. Erkek kalıp ve dişi kalıbı kapatıp aralarında kavite boşluğunun oluşmasını sağlar ve yüksek basınç uygulayarak kalıbın açılmasını engeller.



Şekil 2.13. Kalıbın kapatılması

2.3.3. Kalıbın Doldurulması

Kalıp boşluğuna eriyik hammadde sonsuz vidanın piston tarafından ileri itilmesiyle dolmaya başlar. Kalıp boşluğunun doldurulması için gereken enjeksiyon basıncı bu aşamada yükselir. Kalıp boşluğuna iletilen eriyik plastik bu basınç yardımıyla kalıpta sıkışır. Kalıbın sıcaklığına göre daha sıcak olan eriyik plastik soğumaya başlar.



Şekil 2.14. Kalıbın Doldurulması

2.3.4. Ütüleme

Enjeksiyon sırasında basıncın en yüksek uygulandığı aşamadır. Bu proste basınç en yüksekte tutularak kalıbın tam olarak dolması ve kalıpta yer alan tüm detayların dolması sağlanır.

2.3.5. Tutma

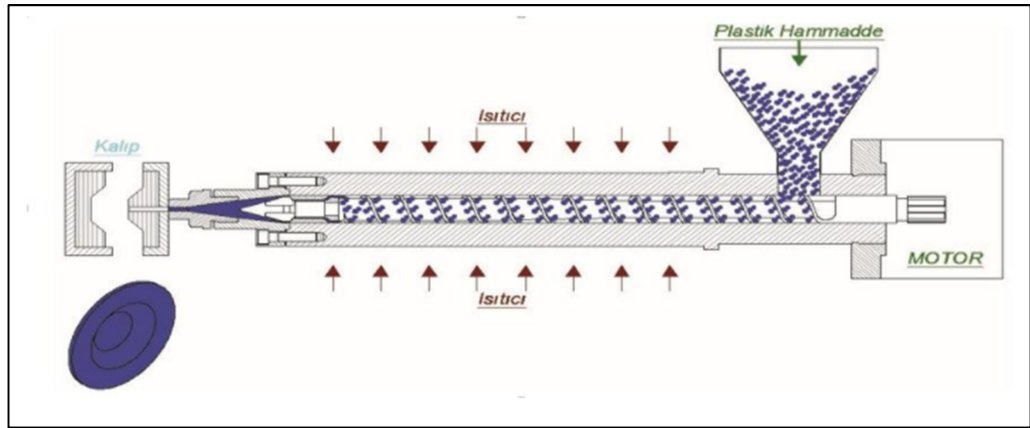
Kalıba göre daha soğuk olan eriyik soğumaya başlayınca çekmeye başlar. Çekmeyi azaltmak için parça kalıp içinde basınç altında bekletilir. Bu basınca tutma basıncı denir. Parça çektikçe içeriye yeni eriyik dolması sağlanır. Tutma aşaması yolluk girişinin donmasına kadar devam eder.

2.3.6. Soğutma

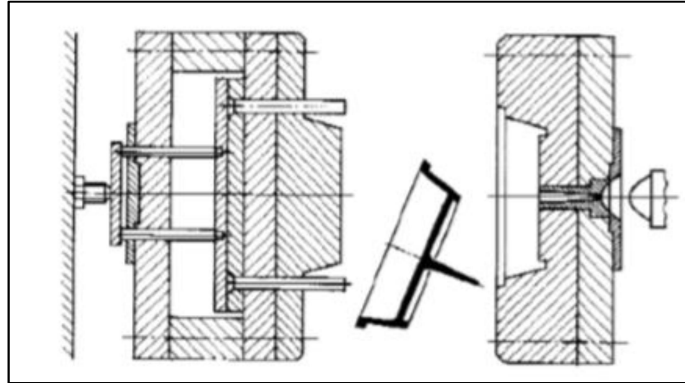
Yolluk donduktan sonra parça kalıp içinde soğur ve çeker. Parçanın soğutulması Vicat Yumuşama Sıcaklığı'na ulaşınca kadar devam eder.

2.3.7. Kalıptan Çıkarma

Soğuyan parça kalıp açıldığında kalıbın hareketli tarafında kalır ve buradaki itici pimler vasıtasıyla ürün kalıptan çıkarılır. Şekil 2.16 'de itici yardımı ile kalıptan çıkarılır.



Şekil 2.15. Parça Çıkarılması



Şekil 2.16. İtici Pimler ile Parça Çıkarılması (Pınar 2010)

2.4. Plastik Enjeksiyon Prosesinde Ana Parametreler

Enjeksiyon yönteminde malzemeye göre, enjeksiyon makinesi üzerindeki kontrol edilebilir parametrelerin ideal değerlerde olması da gereklidir.

Enjeksiyon makinesinin kontrol ünitesini ile değiştirilebilen dört temel değişken parametre vardır. Bunlar;

- Sıcaklık
- Basınç
- Zaman
- Hız

olarak sıralanabilir.

Enjeksiyon parametrelerinin, malzeme özellikleri ve ürün üzerinde kesin etkileri vardır. Kalıp dışında çevre şartlarının ve makine enjeksiyon parametrelerinin bilinmesi de yüksek kalitede ürün üretimi için gerekli ve şarttır (Akyüz 1998, Çetin 2016).

2.4.1. Sıcaklıklar

2.4.1.1 Enjeksiyon Malzemesinin Sıcaklığı

Malzemenin sıcaklığı malzemenin cinsine uygun olmalıdır. Meme ucundaki malzemenin sıcaklığı mutlaka bilinmelidir. Malzeme sıcaklığı için en uygun sıcaklık, tedarikçiler tarafından verilen sıcaklık aralığının tam ortasıdır.

2.4.1.2 Kalıp Sıcaklığı

Enjeksiyonla kalıplama, eriyik plastiği kalıp içine basılıp kalıp boşluğunun şeklini aldıktan sonra şeklini koruyarak soğuyup sertleşmesi temeline dayanır.

Kalıp sıcaklığı, çevrim süresini ve parça yüzeyini etkilediği için kritik değerlerdendir. Sıcak kalıp yüzeylerine plastiğin çok kolay akmasına karşın, plastiğin soğuması ve katılaşp dışarı atılma süresi uzamaktadır. Soğuk kalıp yüzeyinde ise eriyik plastiğin soğuması hızlı olur fakat eriyik plastiğin kavitedeki viskozitesi düşecektir. Buda kalıbı tam dolduramadan soğuyup sertleşebilme durumu söz konusudur. En iyi şartları yakalamak için; kullanılacak plastik hammaddeye, üretilecek plastik parçanın et kalınlığına ve parçanın istenilen kalitesine dikkat etmek gerekmektedir.

Kalıp dolum aşamasında en sıcak eriyik plastik kalıbın yolluk girişinde ve en soğuk plastik yolluk girişinden en uzak noktada olacaktır. Kalıp sıcaklığı iyi belirlenmez ise kalıpta oluşacak sıcaklık farklılıkları parçada enjeksiyon sonunda istenmeyecek gerilmelere ve eriyik birleşim izlerine sebep olacaktır. Bunları önlemek için enjeksiyonda homojen sıcaklık dağılımı sağlamak gerekmektedir. Burada kalıpta tasarlanacak soğutma sistemlerinin uygunluğu çok önemlidir.

2.4.2. Basınçlar

Erimiş plastik malzeme kavite boşluğuna belirli bir basınç ile basılır. Bu basınç ile plastik malzemenin kalıp boşluğunun şeklini alması sağlanır.

2.4.2.1 Enjeksiyon Basıncı

Kalıp boşluğunu doldurmak ve parçayı ütülemek için uygulanır.

2.4.2.2 Tutma Basıncı

Plastik malzemedeki çekmeleri karşılamak ve tam olarak boşluğun şeklini alması için uygulanmaktadır.

2.4.2.3 Geri Basınç

Vida geri hareketine direnç olarak tanımlanmaktadır ve malzemenin sürtünme ile ısıtılmasına yardımcı olmaktadır.

2.4.3. Zamanlar

Bir çevrimin başından sonuna kadar tamamlandığı süreye çevrim süresi denir. Eriyik malzemenin kalıbın içini tamamen doldurması gereklidir.

Malzeme soğumaya başladığında, yeteri kadar katı hale gelir ve bir çevrim süresi tamamlanır. Daha sonra makine bir sonraki çevrim için hazırlanır. Malzeme için asıl önemli olan nasıl soğuduğudur. Çevrim sürelerini düşürmek için minimum zamanlar kullanılmalıdır.

2.4.3.1 Doldurma Süresi

Yalnızca kalıp boşluğunun doldurulması için geçen süredir.

2.2.3.2 Ütuleme Süresi

Sadece kalıp boşluğundaki malzemenin sıkıştırılması için gerekli süredir.

2.4.3.3 Tutma Süresi

Enjeksiyon sonunda parçada oluşacak istenmeyen çekmeyi azaltmak için parça kalıp içinde tutma basıncı altında bir süre bekletilir. Parça çıktıkça içeriye yeni eriyik dolması sağlanır. Tutma aşaması yolluk girişinin de donması ile son bulur.

2.4.3.4 Soğutma Süresi

Kalıbın içinde parçanın soğuyup gerekli rijitliğe sahip oluncaya kadar geçen süredir. Aşağıda soğuma süresi için bir hesaplama yöntemi gösterilmiştir.

$$t_s = \frac{h^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left(\frac{4(T_{ergiyik} - T_{su})}{\pi(T_{cikarma} - T_{su})} \right) \quad (\text{sn}) \quad (2.1)$$

Bir plastik parçanın çıkarma sıcaklığına ulaşabilmesi gerekli minimum soğutma süresi Eşitlik 2.1 ile hesaplanabilir (Kazmer 2007)

2.4.3.5 Kalıp Açık Kalma Süresi

Kalıp açık kalma süresi, kalıbın açılıp iticilerin vurması ile parçanın çıkarılıp kalıbın kapatılma süresinden oluşur. Bu süre minimum olmalı ve değişmemelidir.

2.4.4. Hızlar

Kalıp boşluğunu doldurma hızına enjeksiyon hızı denir. Enjeksiyon hızının yüksek olması kalıp boşluğuna dolacak olan malzemenin düşük viskoziteye sahip olmasını sağlayıp daha hızlı akış sağlayarak doldurulmasını sağlar.

2.4.5. Dört Parametrenin Kullanım Sırası

Enjeksiyon parametrelerinden hızın ilk öncelikli değişken olduğunu bilinmektedir. Enjeksiyon hızı doğrudan eriyik plastiğin viskozitesine bağlıdır. Plastiğin viskozitesi de doldurma basıncına bağlıdır. Enjeksiyon hızında yapılacak değişikliklerin kalıp boşluğunu doldurma kabiliyetine etkisi oldukça fazladır. Değiştirildiğinde diğer parametrelere etkisinin en az olduğu, en kritik parametredir. Basınç hızdan sonra gelen ikinci önemli parametredir. Basınç değişikliği prosese az bir etkiyle kısa zamanda adapte olur.

Zaman enjeksiyon kalıplama yönteminin bir diğer önemli parametresidir. Çevrim süresindeki değişiklik malzemenin ergime sıcaklığına hemen etki eder. Sıcaklıkta yapılan değişiklikler viskoziteyi değiştirir. Viskozitenin değişmesi basıncı ve hıza etkiler.

Son olarak ısı ayarlanması gereken en zor değişkendir. Çünkü plastiğe ısı vermek kolaydır ama aynı zamanda ondan ısıyı almak çok zordur (İçer 2014).

Çizelge 2.1. Çok kullanılan plastik hammaddelerin enjeksiyon parametreleri (Chen 2000)

	Termal yayılma katsayısı (mm ² /s)	Enjeksiyon Sıcaklığı (°C)	Kalıp sıcaklığı (°C)	Parça sıcaklığı (°C)	Enjeksiyon basıncı (bar)
PE	0.11	232	27	52	965
PS	0.09	218	27	77	965
ABS	0.13	260	55	80	1000
ACETAL	0.09	216	93	129	1172
PA	0.1	291	91	129	1103
PC	0.13	302	91	127	1172
PP	0.08	218	38	88	965

2.5. Plastik Enjeksiyon Kalıpları

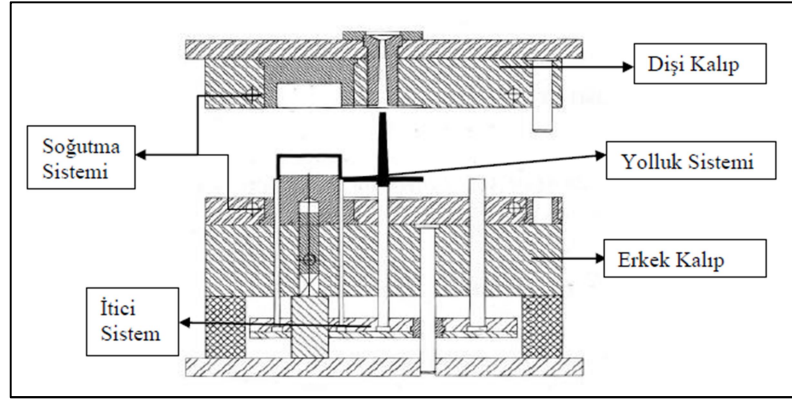
Eriyik plastik hammaddenin içindeki parçanın şeklini oluşturacak olan boşluğa doldurulup sonra katılaştıran bir “takım” dır. Genel hatlarıyla plastik enjeksiyon kalıbını oluşturan parçalar Sekil 3.1 gösterilmiştir. Bir enjeksiyon kalıbının yapmakla yükümlü olduğu görevler şunlardır:

- Kalıp boşluğunu eriyik malzeme ile doldurup parçaya son halini vermek

- Kalıp boşluğunu doldurmuş eriyik malzemeyi soğutmak
- Soğumuş parçayı kalıptan dışarı çıkartmak

Kalıbın görevlerini yerine getiren işlevsel grupları aşağıdaki gibidir:

- Enjeksiyon sistemi
- Soğutma sistemi
- İtici Sistemi



Şekil 2.17. Enjeksiyon Kalıbı (Turaçlı 2003)

2.5.1. Kalıp Boşluğu (Göz)

Kalıp boşluğu, kalp kapandıktan sonra erkek ve dişi kalıp yarımının oluşturduğu boşluktur. Kalıp içinde bir adet kalıp boşluğu var ise buna Tek Gözlü, birden fazla kalıp boşluğu varsa Çok Gözlü kalıp denir.

2.5.2. Erkek Kalıp

Kalıbın erkek kısmı, parçanın iç kısmını oluşturur. Erkek kalıba hareketli plaka da denilmektedir. Parçanın kalıptan çıkarılması için iticiler, erkek kısımda yerleştirilir. Erkek kalıp makinenin hareketli kısmına monte edilir çünkü itici sistemi makinenin hareketli kısmındadır (Turaçlı 2003).

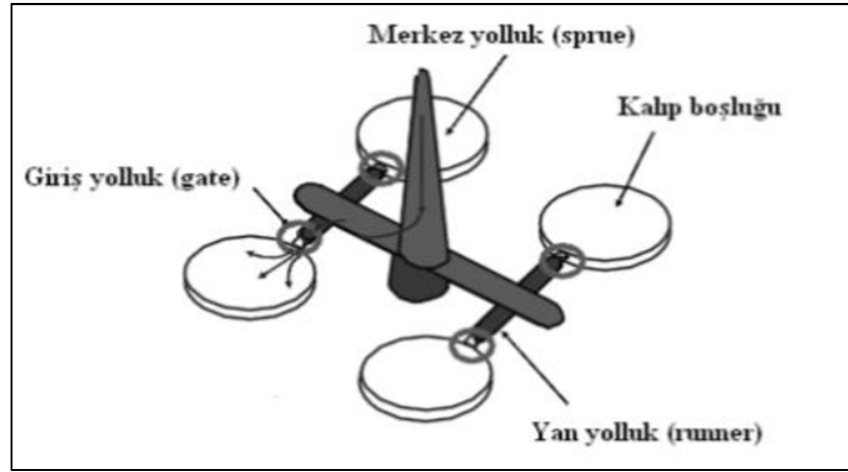
2.5.3. Dişi Kalıp

Basılacak parçanın dış yüzeyini bilirler. Dişi kalıba sabit plaka da denir. Enjeksiyon ünitesi makinenin hareketsiz kısmındadır.

Kalıpta yolluk kısmı genelde dişi kalıp yarımının üzerinde olduğundan, dişi kalıp hareketsiz kısma monte edilir.. Kalıp tasarımı yapılırken itici sistemi erkek kalıba, yolluk(besleme) ünitesi de dişi kalıp tarafına koyulmalıdır. (Turaçlı 2003).

2.5.4. Yolluk Çeşitleri

Erimiş malzemenin enjeksiyondan kalıp içine dolmasını sağlayan kanallara yolluk sistemi denir. Yolluk sistemi toplamda 3 ana parçadan oluşur diyebiliriz. Bunlar merkezi yolluk, yan yolluklar ve giriş yolluğudur. Ürünün kaliteli oluşması ve maliyetinin az olması için yolluk sisteminin uzunluğu dikkate alınmalıdır. Sekil 2.18 yolluk sisteminin elemanları göstermektedir.



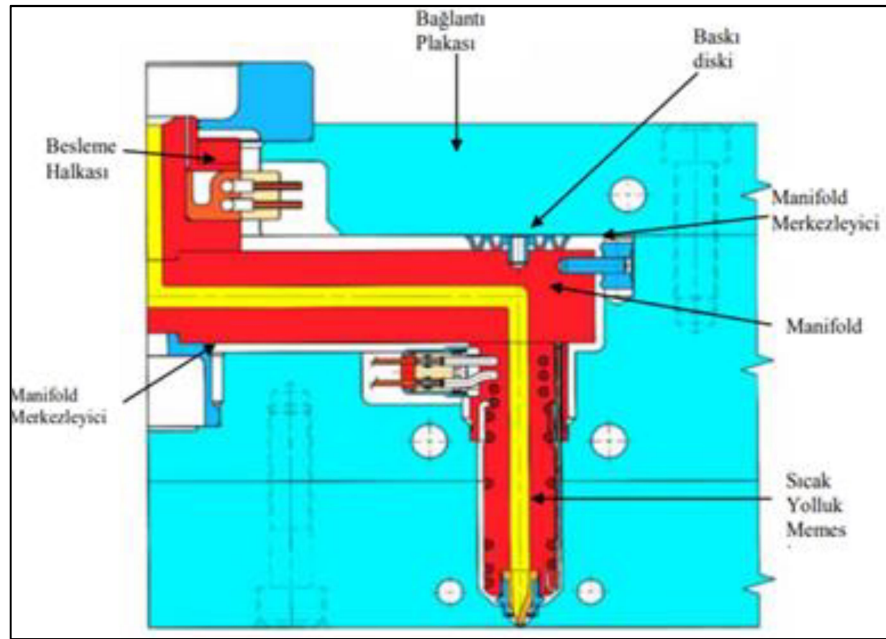
Şekil 2.18. Yolluk sistemi elemanları (Palabıyık 2008)

Yolluk sistemi ürün kalitesi ve ürün başına düşen maliyet ile doğrudan bağlantılıdır. Yolluk kesitinin küçük olması ürün başına düşen maliyeti azaltır. Yolluk sistemi sıcak ve soğuk yolluk olarak iki gruba ayrılır.

2.5.4.1. Sıcak Yolluk Sistemi

Sıcak yolluk yapısı sayesinde enjeksiyon memesinden kalıp içindeki boşluğa kadar erimiş plastiği sıcaklık kaybına uğramadan, en düşük basınç kaybıyla ve hasarsız bir şekilde durdurma ve sisteme istediğimiz bir anda komut verdiğimizde kalıp boşluğuna enjekte edilebilmektedir. Sıcak yolluk yapısı beş yapıdan oluşmaktadır.

Bunlar, sıcaklık kontrol ünitesi, sıcaklık kontrol materyalleri, ısıtıcılar, sıcak yolluk sistemi memesi ve sıcak yolluk dağıtıcısıdır.

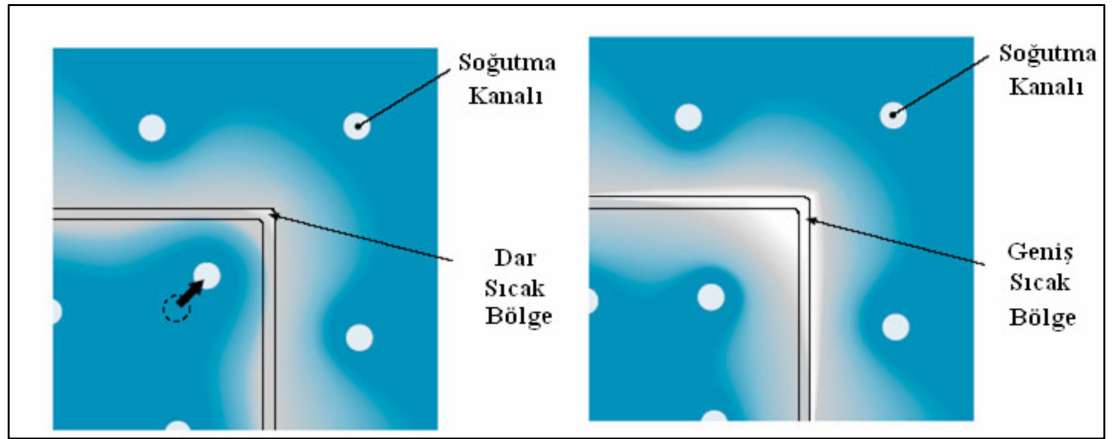


2.5.5. Soğutma Sistemi

Soğutma sisteminin temel yapması gereken iş, eriyik malzemenin katılaşıp kalıptan çıkmasını sağlamaktır. Soğutma işlemi hem parça kalitesini doğrudan etkilediği hem de soğuma süresini doğrudan etkilediği için oldukça önemlidir.

Enjeksiyon esnasında kalıp eriyik plastiğin sıcaklığı ile ısınmaya başlar. Bu sıcaklık artışı kalıbın performansını, parça kalitesini ve çevrim süresini doğrudan etkilemektedir. Seri üretimde aynı kalitede ürün elde edebilmek için aynı kalıpta değerlerin (sabit kalıp sıcaklığı, sabit malzeme sıcaklığı, basınç, hız) sabit tutulması gerekmektedir.

Kalıp sıcaklığının sabit kalabilmesi için dişi ve erkek kalıp yarımlarına yapılacak soğutma kanalları ile soğutulması gerekmektedir.



Şekil 2.20. Soğutma kanallarının parça köşelerine etkisi (Turaçlı 2003)

Yukarıdaki şekilden de anlaşıldığı üzere köşeli parçalarda, köşelere mümkün olduğunca su kanalları koyulmalı ve soğutma kanalları da köşelere yaklaştırılmalıdır. Aksi durumda parça köşelerinde sıcak bölgeler geniş olacak, bu sıcak bölgeler de soğuma esnasında parçada çekmeye ve çarpılmalara sebep olacaktır. Bu durumda önerilen ve yapılması gereken soğutma kanallarının olabildiğince köşelere ve detaylara yakın olması sağlanmalıdır.

2.5.6. İtici Sistemi

Üretilen parçanın enjeksiyon tamamlandıktan sonra kalıptan ayrılmasını sağlayan düzeneğe itici sistemi denir. Şekil 2.16’ da itici sistemi gösterilmiştir.

İtici sistem tasarlanırken, parçaya zarar verilmeden kalıptan ayrılmasına, parça üzerinde iz oluşturmamasına, aynı anda birden çok parçayı dengeli bir şekilde çıkartabilmesine ve soğutma sistemiyle uyumlu çalışabilmesine dikkat edilir. İyi bir itici sisteminde aşağıdaki özellikleri olmalıdır;

- Ürüne zarar vermeden kalıptan ürünü çıkartabilmelidir.
- Parça üzerinde deformasyona neden olmamalıdır.
- Kuvvet dağılımı dengeli olmalıdır.
- İtici pimin istenen konuma ayarlanabilmesine olanak vermelidir.
- Soğutma sistemiyle çakışmadan uyumlu çalışma sağlayabilmelidir (Kafalı 2011)

2.6. Kalıpların Soğutulması

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminde eriyik plastik malzemenin şekillendirildikten sonra tekrar soğutulup katılaştırılması gerekmektedir.

Ergiyik plastiğin kalıp içerisine dolması ile kalıp sıcaklığı sürekli olarak yükselir. Kalıp sıcaklığının yükselmesi plastik malzemenin soğuyarak katılaşması için gereken süreyi önemli ölçüde artıracaktır.

Kalıp sıcaklığının soğuk olması ise ergiyik plastik malzemenin kalıp içine dolum esnasında katılaşarak kalıp boşluğunun tamamen dolmamasına neden olacaktır. Böyle bir durumda çıkan parçaya eksik baskı denir. Ergiyik plastiğin donmadan kalıbın tamamını doldurması için kalıp sıcaklığının belirli bir değerde olması gerekmektedir. En çok kullanılan bazı plastik malzemeler için uygun kalıp sıcaklıkları Çizelge 2.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Yaygın kullanılan plastik malzemelerin için uygun kalıp sıcaklıkları (Menges ve ark. 2013)

Plastik Malzeme	Kalıp sıcaklığı (°C)
ABS	50-80
PP	20-100
POM	40-120
LDPE	20-60
HDPE	40-60
PVC-Yumuşak	20-55
PVC-Sert	20-70
PS	10-80
PA6	60-95
PA66	60-90
PMMA	10-80
PC	85-120

Plastik malzeme Vicat Yumuşama Sıcaklığı'na ulaştınca yeterince katılaşır ve şeklini koruyabilir. Kalıp boşluğundaki plastik malzemenin sıcaklığının Vicat Yumuşama Sıcaklığı'na ulaşması plastik ürünün kalıptan çıkarılabilmesi için gereklidir. Çizelge 2.3'de yaygın kullanılan bazı plastikler için uygun çıkarma sıcaklıkları görülmektedir.

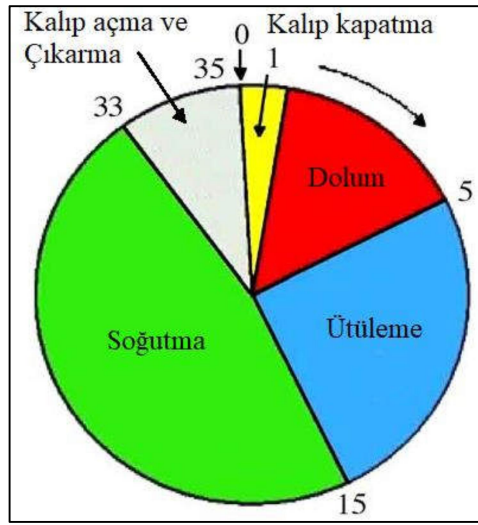
Çizelge 2.3. Kalıptan çıkarma sıcaklıkları (Menges ve ark. 2013)

Plastik Malzeme	Kalıptan çıkarma sıcaklığı (°C)
ABS	60-100
PP	60-100
POM	90-150
LDPE	50-90
HDPE	60-110
PVC-Yumuşak	60-100
PVC-Sert	60-100
PS	60-100
PA6	70-110
PA66	80-140
PC	90-140

Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi; dolum, ütüleme, soğutma gibi sürekli olarak tekrar eden çevrimler halinde gerçekleşmektedir.

Kalıbın kapanmasından bir sonraki kapanmasına kadar geçen süre, kalıplamada bir çevrim süresi olarak anılmaktadır. Çevrim süresi içinde %80'lere kadar varan oranla en uzun süren proses soğutma süresidir (Qiao 2006). Bu nedenle soğutma işleminin verimliliği üretim hızının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Şekil 2.23'te bir çevrim süresindeki zaman aralıkları gösterilmiş olup çevrim süresini etkileyen en büyük etkenin soğutma süresi olduğu görülmektedir. Soğutma sisteminin performansı doğrudan çevrim süresinin kısalmasını sağlamaktadır.

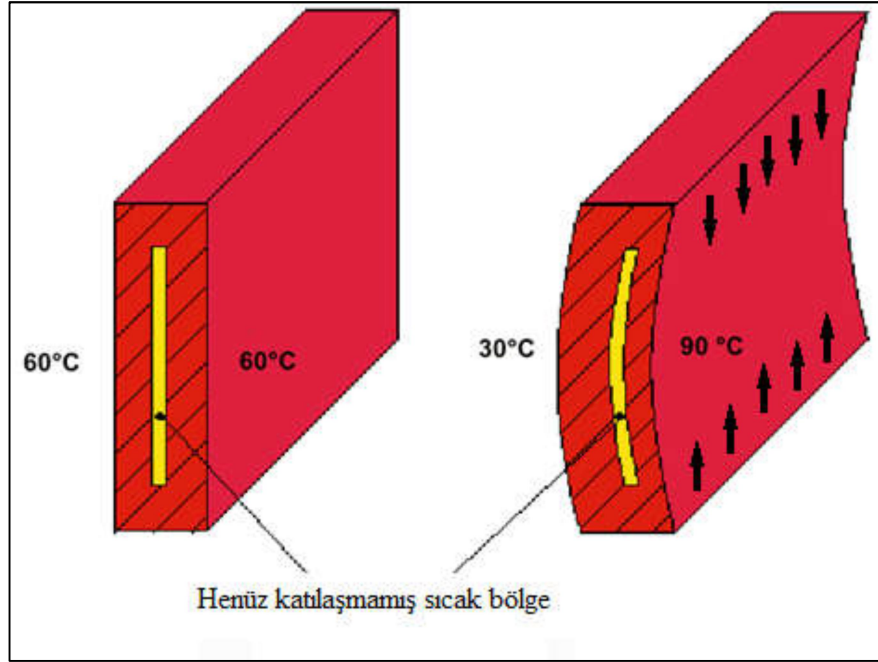


Şekil 2.21. Çevrim süresindeki proseslerin zaman aralıkları (Dimla 2005)

Plastik enjeksiyon kalıplamada soğutma süresinin kısa olmasının ve plastik ürün kalitesi açısından homojen bir sıcaklık dağılımının da sağlanması kritik öneme sahiptir. Isınarak ergiyik hale gelen plastik malzeme genişler. Kalıp içine basılan malzeme soğurken tekrar büzülür. Plastik malzemenin çekme oranları; malzeme cinsine, ergiyik sıcaklığına, basınç dağılımına, kristalleşme oranına, neme, katkı maddelerine ve soğutma hızına bağlıdır (Koyun 2005).

Soğuma ile birlikte plastik parça üzerindeki çekme davranışının düzensiz olması parça geometrisinin bozulmasına neden olacaktır. Kalıp üzerindeki soğutma sisteminden beklenen parçanın tüm bölgelerinin eşit hızda soğutulmasını sağlamasıdır. Aksi halde erken soğuyan bölgelerdeki çekme işlemi sona ermişken sıcak bölgeler çekmeye devam eder, plastik parça çarpılır (Demirci ve Altan 2020).

Şekil 2.22’de farklı sıcaklık dağılımı nedeniyle plastik parça üzerindeki oluşan çarpılma görülmektedir (Mayer 2005, Bocigave ark. 2010).



Şekil 2.22. Yüzey sıcaklık farkı sebebiyle çarpılmanın oluşumu (Mayer 2005)

Plastik enjeksiyon kalıplama işleminin seri olarak yapılabilmesi ve üretilen her parçada aynı kalitenin sağlanabilmesi için uygun bir soğutma sistemi gereklidir.

Soğutma sisteminin tasarımında kanal boyutları, kanalların konumu önemli rol oynamaktadır. Etkili bir soğutma sistemi için bu tasarım parametrelerine uygun tasarım yapılmalıdır. İyi bir soğutma iyi bir soğutma sistemi tasarımına bağlıdır (Çınar 2006).

Kalıpta soğutma sistemi tasarımı homojen olmalıdır. Homojen soğutma, akışkanın kalıba girip ve çıktığı noktalarda sıcaklık değişmelerinin en aza olması anlamına gelmektedir. Soğutma ortamının kalıp yüzeyinde eşit bir sıcaklık dağılımı gösterecek şekilde olmalıdır (Akyüz 1998).

Soğutma suyu kirlilerden temizlenmiş olmalıdır. Su içerisinde bulunan kireç zamanla, soğutma kanallarının içinde birikmeye başlar ve kanallarda tıkanmalarına sebep olur. Bu durum kalıpta soğutma verimliliğini düşürecektir.

2.6.1. Soğutma Sistemi İle İlgili Hesaplamalar

Uygun soğutmanın sağlanabilmesi için kalıplanacak malzemenin özellikleri, parçanın şekli, kalıbın yapısı, transferi yapılacak ısı miktarının bilinmesi gerekir. Kalıp soğutma için gerekli olan soğutma suyu debisi ve soğutma yükünü bulmak için aşağıdaki formülден yararlanabiliriz (Malzeme özellikleri için Bkz. EK-1) (<http://www.etisanisi.com.tr/tr.html>, 2021, Ekren 2007).

2.6.1.1. Kalıp İçerisinden Geçecek Su Miktarı

Su ile soğutmalı kalıplama işlemlerinde, kalıplanacak plastik miktarına bağlı olarak kalıp içerisinden geçmesi gereken su miktarı aşağıdaki formüllerle bulunur.

Kalıpta oluşan toplam ısı miktarı;

$$Q_C = M_p [C_p(T_p - T_M) + q] \text{ kalori/saat} \quad (2.2)$$

Yok edilmesi gereken toplam ısı miktarı;

$$H = R \times M_s (T_{SC} - T_{SG}) \text{ kalori/saat} \quad (2.3)$$

Soğutmanın gerçekleşebilmesi için kalıp içerisinden geçen su miktarı, kalıpta oluşan toplam ısı miktarı (Q_C) ile yok edilmesi gereken ısı miktarı (H) birbirine eşitlenir (Uzun 1984).

Buna göre; $Q_C = H$ veya

$$M_p [C_p(T_p - T_M) + q] = R \cdot M_s (T_{SC} - T_{SG}) \quad (2.4)$$

Eşitliği yazılabilir.

Bu iki eşitlikten yararlanılarak bir saatte kalıplanacak plastik ham madde miktarı ve kanalların içinden geçmesi gereken su miktarı bulunur. Bir saatte kalıplanabilecek plastik madde miktarı;

$$M_p = \frac{H}{C_p(T_p - T_M) + q} \text{ kg} \quad (2.5)$$

Bir saatte kalıp içerisinde geçmesi gereken su miktarı;

$$M_s = \frac{Q_c}{K(T_{SC} - T_{SG})} \text{ kg / saat} \quad (2.6)$$

Soğutmanın verimli olabilmesi için, soğutma kanallarında ilerleyecek sıvının, türbülanslı akış yapması gerekmektedir. Akışın türbülanslı olduğunu anlayabilmek için Reynolds sayısına bakılmalıdır. Reynolds sayısı 2.7 bağıntısıyla bulunabilir.

$$Re = \frac{\rho U d}{\eta} > 2300 \quad (2.7)$$

Burada;

ρ = soğutucu akışanın öz kütlesi (su 1000kg/m³),

η = akışkanın dinamik viskozitesidir (su için 1.793e-3 Pa.s'dir.)

2.6.1.2. Soğutma Zamanı

Enjeksiyon işleminin maliyetini arttıran en önemli etken parça başına düşen enjeksiyon zamanıdır. Çevrim zamanını etkileyen en uzun zaman, parçayı kalıptan almak için gerekli olan sıcaklığa kalıbın soğutulması için geçen zamandır.

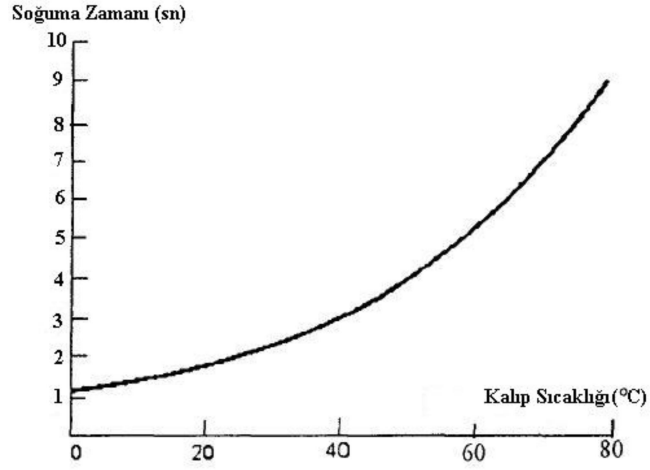
Parçayı kalıptan çıkış sıcaklığına ulaşılması esnasında geçen süreyi etkileyen etmenler;

- Ürünün et kalınlığı
- Polimer ile kalıp sıcaklığı arasındaki fark
- Ürünün kalıptan alınması için gerekli olan zamanla kalıp sıcaklığı arasındaki fark

Minimum soğuma süresi aşağıdaki formül ile hesaplanabilir. (Injection Handbook 1988)

$$t_s = \frac{h^2}{\pi^2 \alpha} \ln \left(\frac{4(T_{ergiyik} - T_{su})}{\pi(T_{cikarma} - T_{su})} \right) \quad (\text{sn}) \quad (2.8)$$

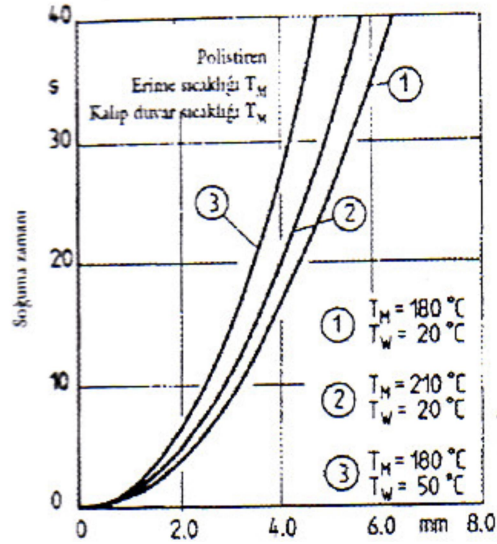
Formül 2.8'den yola çıkarak Şekil 2.23'de kalıp sıcaklığının soğuma süresine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Kalıp sıcaklığının soğuma zamanına etkisi

Parça et kalınlığının soğuma süresini belirlemedeki etkisi eşitlik (2.1)'den görülmektedir. Eşitlikte t_s , h^2 ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Buna bağlı olarak, gerekli soğuma zamanını belirlemede aşağıdaki eşitlik de sıklıkla kullanılmaktadır.

$$t_s = (2 \sim 3)s^2 \quad (2.9)$$



Şekil 2.24. Soğuma süresinin ürünün et kalınlığına bağlı olarak değişimi.

Sekil 2.24'de ürünün et kalınlığının soğuma zamanına etkileri görülmektedir (Akyüz 1998).

2.6.2. Soğutma Kanallarının Tasarımı

Kalıp soğutma işlemi yeterli ve uygun şekilde yerleştirilecek soğutma kanalları ile sağlanır. Bu kanalların yerleşimi kalıbın şekli ile uyumlu olmalıdır.

Soğutma kanallarının kalıp yüzeyinden olan uzaklığı arttıkça ısı transferinin veriminde azalma olur ve kanallar arası mesafe arttıkça kalıp yüzeyindeki sıcaklık dağılımı değişir (Öz 1988).

Soğutma kanallarının çapı

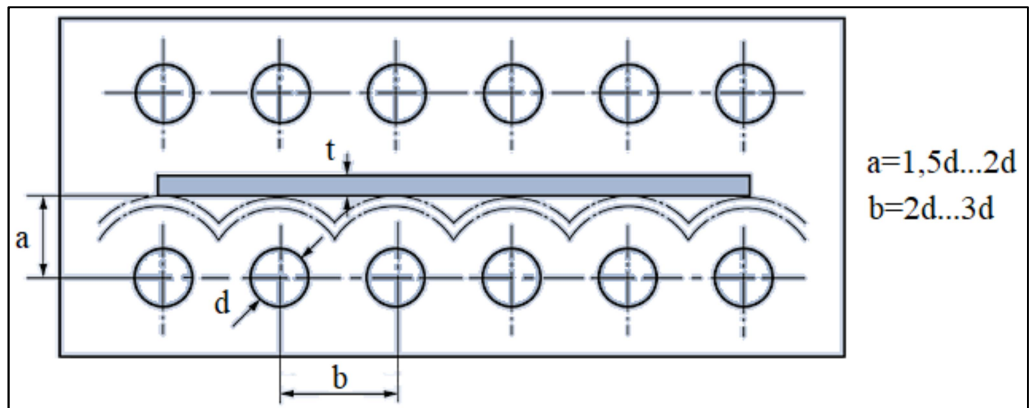
Kanal çapı, kanalın kalıp boşluğuna uzaklığı ve kanalların birbirine uzaklıkları belirlenirken kalıplanan plastik parçanın cidar kalınlığı dikkate alınmaktadır (Tang ve ark. 1997, Wang ve ark. 2011, Khanve ark. 2014, Wang ve ark. 2015). Çizelge 2.4'te parça kalınlığına bağlı soğutma kanalı boyutları gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Parça cidar kalınlığına göre soğutma kanalı boyutları (Güneş 2005)

Cidar Kalınlığı, mm	Kanal Çapı, mm
0-2	8-10
2-4	10-12
4-6	12-15

Soğutma kanalı ile kalıp oyuğu arasındaki mesafe

Şekil 2.25'de belirtildiği gibi soğutma kanallarının kalıp boşluğuna olan uzaklığı kanal çapının 1,5-2 katı olarak seçilmelidir (a = kanal-kalım arası mesafe).



Şekil 2.25. Soğutma kanallarının konumları

Soğutma kanalları arasındaki mesafe

Soğutma kanallarının birbirine olan uzaklığı belirlenen kanal çapının 2-3 katı olacak şekilde seçilmelidir (b =kanallar arası mesafe). Özetle soğutma kanallarının hesabı Tablo 2.5’de görülen değerlere göre yapılmaktadır.

Çizelge 2.5. Soğutma kanallarının boyutları

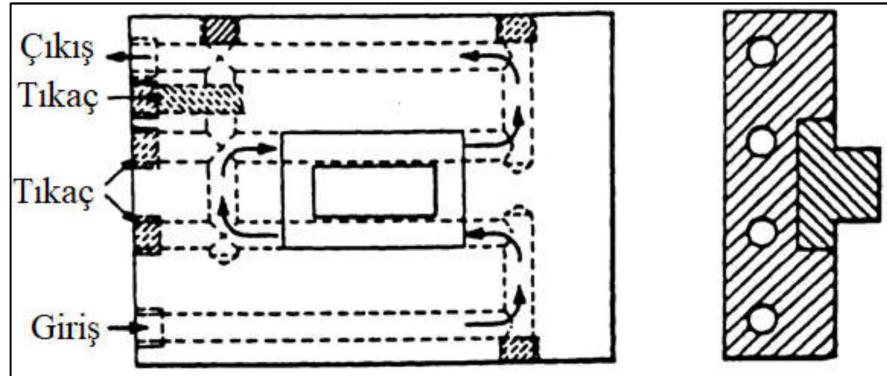
Cidar kalınlığı s (mm)	Kanal çapı d (mm)	Kanallar ile kavite boşluğu arasındaki mesafe a (mm)	Kanallar arası mesafe b (mm)
0-2	8-10	$(1,5-2).d$	$(2-3).d$
2-4	10-12		
4-6	12-15		

2.6.2.1. Konvansiyonel Soğutma Kanalları

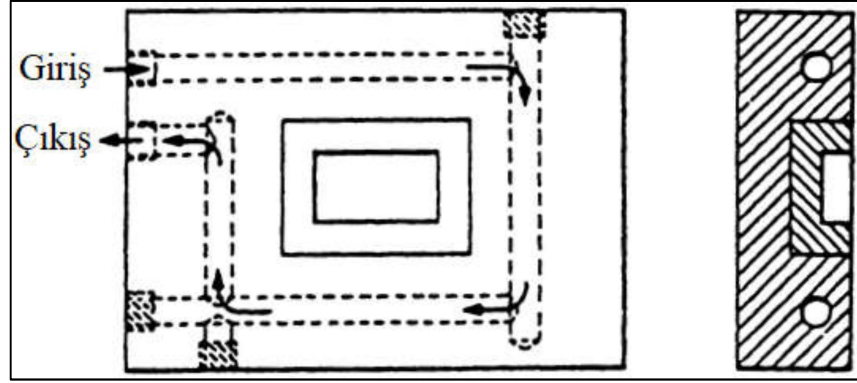
Plastik enjeksiyon kalıplarının soğutulması, kalıp boşluğu çevresinden geçen kanallardan soğuk su geçirilerek kalıp üzerindeki ısının uzaklaştırılması yolu ile yapılmaktadır.

Kalıp plakalarının soğutulması için en yaygın kullanılan yöntem, kalıp plakalarının kapalı bir su devresi oluşturacak şekilde matkapla delinmesidir. Bu yöntem ucuz ve pratik olduğu için tercih edilir. Delme işleminden sonra gerekli olmayan delik çıkışları tıkaçlar vasıtası ile kapatılır.

Dişi ve erkek kalıp yarımlarında ayrı ayrı soğutma devreleri oluşturulmalıdır. Şekil 2.26 ve Şekil 2.27’de dişi ve erkek kalıp yarımlarının soğutma kanalları gösterilmiştir (Turaçlı 2000).



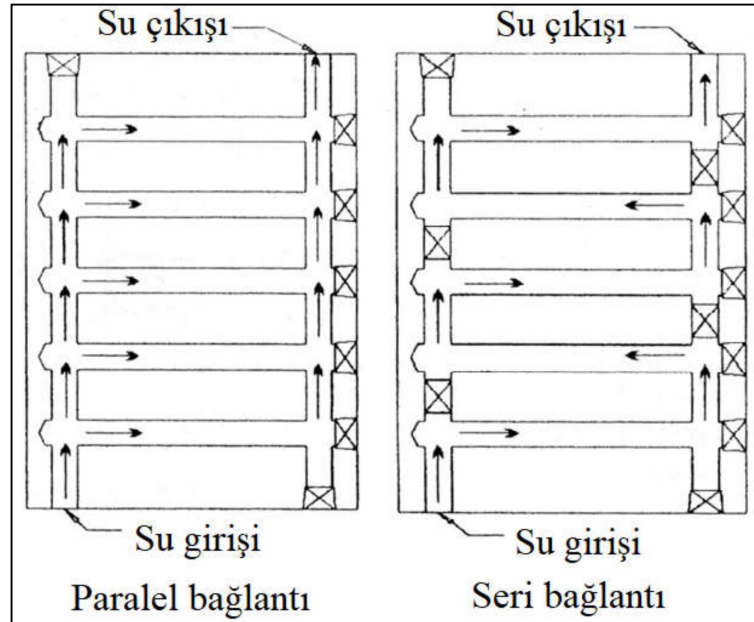
Şekil 2.26. Erkek kalıp yarımlarında soğutma kanalları



Şekil 2.27. Dişi kalıp yarımlarında soğutma kanalları

Düzlemsel kalıp plakalarının soğutulmasında kullanılan soğutma kanallarının iki tip bağlantı yöntemi söz konusudur (Şekil 2.28). Seri bağlantıda tek girişten giren su çıkışa kadar tek akış yolunu takip etmektedir. Bu bağlantı tipinde toplam akış yolunun uzaması nedeniyle basınç kayıpları artmaktadır.

Paralel bağlantı tipinde tek girişten giren su, kanallar içerisinde birden fazla akış dallarına ayrılmaktadır. Paralel bağlantı tipinde akış boyunca basınç kayıpları daha düşüktür.



Şekil 2.28. Seri ve Paralel bağlantı tipleri

2.6.2.2. Komformal Soğutma Kanalları

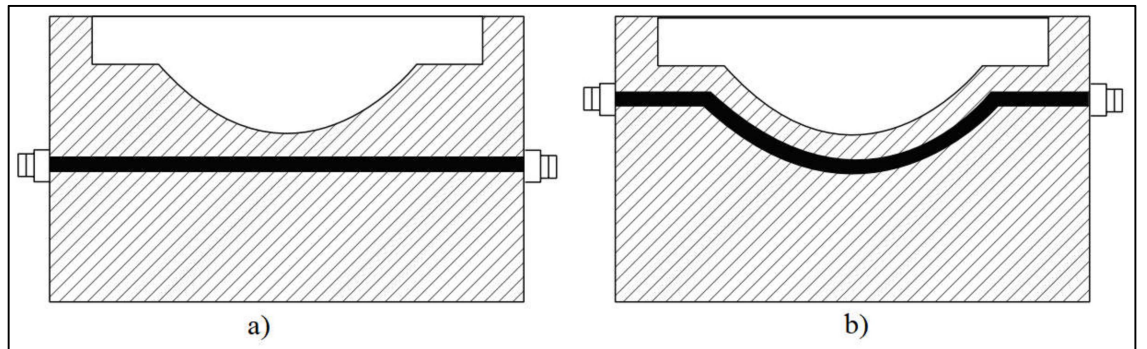
Soğutma işlemi gerçekleşirken plastik malzemenin tüm bölgelerinin eşit bir soğutma hızı ile soğuması istenir. Katılaşma hızının farklı bölgelerde değişken olması plastik parça üzerinde çekmeye ve çarpılmaya neden olmaktadır. Çevrim süresini etkileyerek üretim hızını ve ürün kalitesini doğrudan etkilediği için soğutmaevresi çok kritik bir safhadır (Dimla 2005, Yadeğari ve ark. 2016).

Yaygın olarak kullanılan soğutma işlemi, kalıp boşluğuna yakın olan kalıp plakasının delinmesiyle elde edilen soğutma kanalları ile sağlanır. Bu yöntem doğrusal kalıp boşluğu yüzeyleri için uygun olmasına rağmen karmaşık yüzeyli parçalara düzenli ve homojen soğutma sağlamaz (Sachs ve ark. 2000).

Homojen olmayan soğutma parçada eğrilme, çökme ve düzensiz çekme gibi sorunlara neden olur (Hassan ve ark.2012)

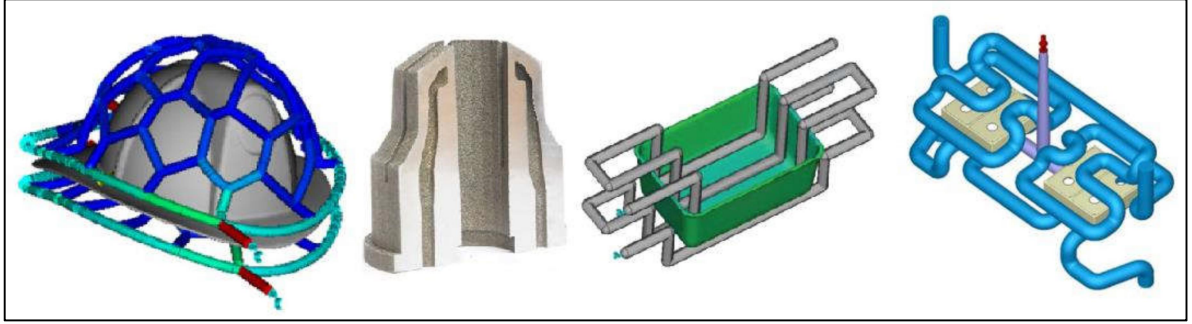
Eş sıcaklık dağılımının iyi olmadığı kısa soğutma süresine sahip bir soğutma sistemi ya da eş sıcaklık dağılımının iyi olduğu ancak uzun zaman alan bir soğutma işlemi tercih edilmeyen durumlardır (Parkve Kwon 1998).

Kalıp boşluğu ile soğutma kanalı arasındaki mesafenin bölgelere göre değişiyor olması ısı aktarımının da farklı bölgelerde farklı olmasına neden olmaktadır (Şekil 2.29). Soğutma veriminin artırılması için soğutma kanallarının kaviteyi uyumlu olarak takip eden konformal soğutma kanalları tercih edilen bir başka kanal tipidir (Khan ve ark. 2014).



Şekil 2.29. a) Konvansiyonel soğutma kanalı , b) Komformal soğutma kanalı

Konformal soğutma kanalları ile kalıp boşluğu arasındaki mesafe düzgün şekilde korunduğu için tüm bölgelerdeki ısı aktarımı eşit olup kalıp yüzeyinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilebilmektedir. Gelişen imalat teknolojileri sayesinde karmaşık formlu parçalar için şekil uyumlu soğutma kanallarının üretimi mümkündür. Şekil 2.30'de şekil uyumlu soğutma kanalları ile yapılmış çeşit uygulama örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.30. Konformal soğutma kanalı uygulamaları (Khan ve ark. 2014, Park ve ark. 2020, Wang ve ark. 2011, Kitayama ve ark. 2018).

2.7. Enjeksiyon Kalıplarının Üretilmesi

Elde edilecek ürüne direkt etkileyen kalıp imalatı oldukça hassas ve teknik işçilik gerektirmektedir. Bilgisayar yazılımlarıyla modelleme, çizim ve işleme gerektiren üretim sürecidir.

Plastik kalıp çelikleri; plastik malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan, diğer takım çeliklerinden farklı olarak korozyon dayanımı, parlatılabilirliği ve desen alma kabiliyeti yüksek olan; krom, mangan, molibden, nikel, vanadyum ve alüminyum gibi alaşım elementleri içeren takım çelikleridir. Bu çeliklerde genellikle karbon oranı ve diğer alaşım elementleri miktarı diğer takım çeliklerine nazaran daha düşüktür. Kullanılan plastik hammaddenin cinsine göre plastik kalıp çeliği seçilmelidir.

Plastik kalıp çelikleri genellikle ön sertleştirilmiş olarak kullanılırlar. Bunun nedeni ise ısıtılma işleminden sonra kalıp yüzeyinde oluşabilecek boyutsal değişimin önüne geçebilmektir. Ön sertleştirilmiş çelikler işlendikten sonra tekrar ısıtılma işlemi gerek kalmaksızın kullanılabilirler.

Bu çalışmada konvansiyonel soğutma kanalı ve konformal soğutma kanalı yapıldığı için ikisinin üretim yöntemleri anlatılacaktır.

2.7.1. Konvansiyonel Soğutma Kanalına Sahip Kalıp İmalatı

Plastik kalıp imalatı işlemlerinde CNC, torna, freze, dalma erezyon vb. makineler tercih edilmektedir. Enjeksiyon kalıpları genellikle sert çelik kullanılarak üretilir. Geometrik şekillerde olurlar ve uzun süre dayanıklı malzemelerdir.

Üretilen parçaya ait tasarım verileri kalıp tasarımcılarına iletilir. Kalıp tasarımı parçaya göre bilgisayar ortamında gerçekleştirilir(Koyun 2005).

Kalıbın ana gövdesini oluşturan çekirdek kısmı veya merkez kısmı CNC, Freze, Torna, Erezyon, gibi makinelerde işlenir. Çekirdek parça işlenirken kalıbın mekanik işleyişini yerine getirecek olan maçalar, iticiler, kolon pimleri gibi paralel olarak hazırlanır.

Tüm bu işlemlerin bitiminde kalıp; parlatma, ısıtma işlemi vs gibi işlemlere tabi tutulur (Mubaş Metal, 2018).

Biten kalıplar kontrol edilir. Uygun olan kalıplardan deneme baskısı alınır. Elde edilen parçanın üretim resmine göre ölçümleri yapılır. Boyut ölçümleri dışında, bu numunelerin tümünde; renk, parlaklık, çapak, çöküntü, göz no vurulup vurulmadığı, işaretleme, çizik, kırılabilirlik, hammadde, şişkinlik, simetriklik, montaj uygunluğu kontrolleri yapılır. Yapılan boyut ve fiziki kontrol sonucunda uygun bulunması halinde kalıp onayı verilir (Koyun 2005).

2.7.2. Konformal Soğutma Kanalına Sahip Kalıp İmalatı

Eklemeli imalat (AM) olarak bilinen son on yılda metal parçalar üretmek için yeni teknolojiler geliştirilmiştir. Bunlar arasında seçici lazer sinterleme (SLS), karmaşık geometrilere sahip metal tozlarından nesneler üreten benzersiz toz tabanlı teknolojilerdir. Mekanik özellikler, takım çeliğinkiyle karşılaştırılabilir (Yadroitsev ve Smurov 2011).

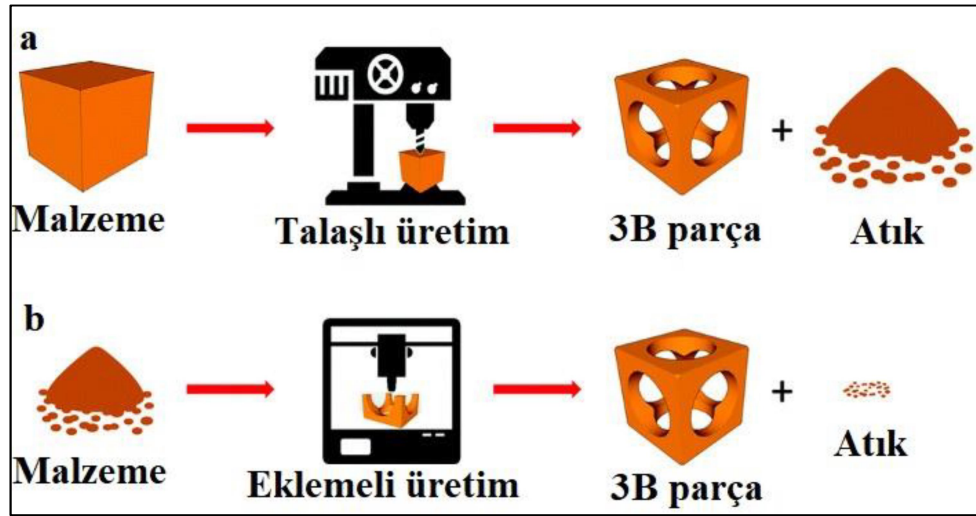
SLS teknikleri kullanılarak, ürün geometrisine uygun soğutma kanalları üretilir. Bu karmaşık kanallar konformal soğutma olarak bilinir.

Konformal soğutma kanalları ile bir plastik parçanın üretim süresinin daha kısa ve daha iyi bir ürün özellikleri elde edilmesi beklenir (Wang ve ark 2011, Dimitrov ve Moammer 2010).

Metal tozlarından eklemeli imalat ile üretim yapan tezgahların maliyetleri oldukça yüksektir. Bu nedenle, plastik enjeksiyon kalıbı için konformal soğutmanın faydaları, SLS kullanılarak kalıp imalatından önce belirlenmelidir (Hassan ve ark. 2010).

2.7.2.1. Eklemeli İmalat Yöntemi

Eklemeli üretim yöntemi, geleneksel talaşlı üretim yöntemlerinden (Şekil 2.31.a) farklı olarak, metal, plastik, kompozit ve organik malzemeler kullanılarak objelerin üç boyutlu (3B) geometrik verilerine göre oluşturulan katmanların birbiri üzerine dizilmesiyle istenilen şeklin üretilmesi yöntemidir (Şekil 2.31.b). Bu yöntem aynı zamanda katmanlı üretim olarak da adlandırılır.



Şekil 2.31. Talaşlı ve eklemeli imalat (Jamie 2019)

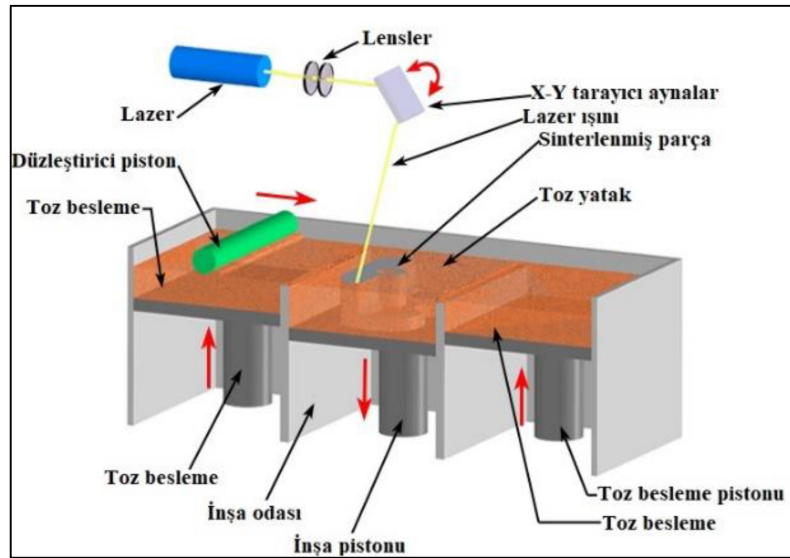
Model, katmanlara ayrıştırıldıktan sonra üç boyutlu yazıcı yardımıyla katman katman bir parçaya dönüştürülmektedir. Eklemeli üretim sayesinde, tasarımda oldukça kolaylık sağlanmakta ve üretimi oldukça zor olan parçalar kısa sürede rahatlıkla üretilmektedir (Gibson ve ark. 2016, Badiru ve ark. 2017, Brandt 2017, Milewski 2017).

2.7.2.2. Seçimli Lazer Sinterleme

Gelişen imalat teknolojileri sayesinde geleneksel matkap delikleri yerine gelişmiş imalat teknolojileri sayesinde farklı şekillerde soğutma kanalları oluşturmak mümkündür. Konformal kanal üretmenin olasılıklardan biri metal lazer sinterleme teknolojisidir. Seçici Lazer Sinterleme (SLS) Eklemeli üretim çeşitlerinden biridir. Metal lazer sinterleme teknolojisinin gelişmesi ile konformal soğutmalı, istenilen geometriye en etkin soğutmaya sahip soğutma kanalları oluşturmak mümkündür.

Şekil 2.32’de SLS yönteminin şematik görünüşü verilmiştir. Seçici Lazer Sinterleme (SLS), parça oluşturmak için katman katman ince tozların yayıldığı ve sinterlendiği bir eklemeli üretim işlemidir. Toz, inşa alanını tamamen kaplayan düzgün bir yüzey oluşturmak için bir düzleştirici silindir ile eşit şekilde dağıtılır ve yayılır. Odaklanmış bir lazer ışını daha sonra toz katmanına tam olarak yönlendirilir ve parçanın enine kesitini tarar. Her katman üretildikten sonra, bir rulo yatak üzerine taze bir toz tabakası yayılır ve işlem, parça tamamlanana kadar tekrar eder (Vaezive ark. 2013).

SLS yöntemi ile plastik ve birçok çeşit metal tozu (Ti6Al4V, AlSi10Mg, Maraging çeliği, 316L gibi) işlenebilir ve uygulama alanını çok genişler (Bineli, Peres, Jardini ve Filho 2011,Duman ve Kayacan 2017, Yakout, Elbestawi ve Veldhuis 2018, Kayacan ve Yılmaz 2019) .



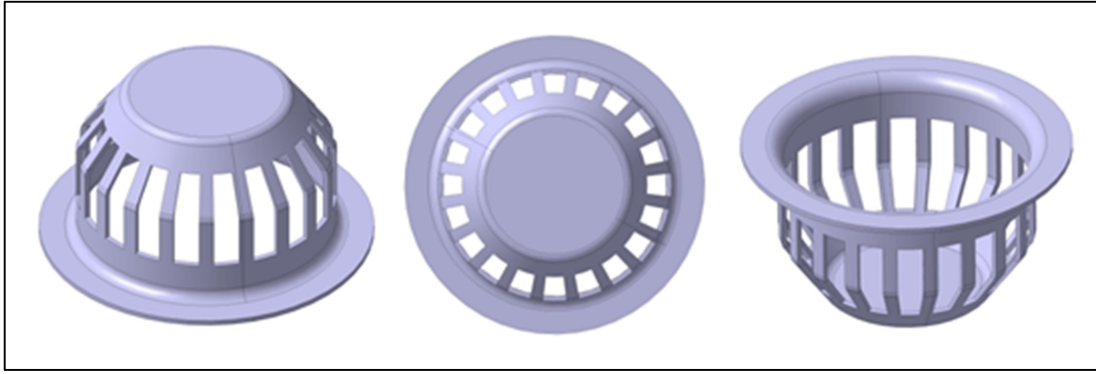
Şekil 2.32. SLS yöntemi (şematik) (Anderl ve ark. 2017)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Gerçekleştirilen bu çalışmada karmaşık geometriye sahip bir parça için etkin soğutma yöntemlerinin tasarımı, analizi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Etkin soğutma için parça yüzeyini takip eden konformal soğutma kanal tasarımı önerilmiştir. İlk olarak, CATIA programında parça tasarımı yapılmıştır. Kullanılacak malzemenin çekme oranı dikkate alınarak kalıp tasarımı yapılmıştır. Daha sonra geleneksel yöntem olan konvansiyonel soğutma kanal tasarımı ve etkin soğutmanın daha iyi olduğu konformal soğutma kanal tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımların enjeksiyon simülasyonları için Moldex yazılımı kullanılmıştır.

3.1. Plastik Ürün Tasarımı

Bu çalışma için, Şekil 3.1’de görülen düz soğutma kanallarının uyumlu bir şekilde takip edemeyeceği dairesel geometriye sahip bir plastik parça (filtre) tasarımı yapılmıştır. Parça boyutları $\varnothing 180 \times 90$ mm boyutundadır. Cidar kalınlığı tüm bölgelerde eşittir ve kalınlık değeri 3 mm’dir. Plastik parçanın 3D modellemesi CATIA programında tamamlanmıştır.



Şekil 3.1. Tasarlanan plastik parça

Plastik parça malzemesi ABS (Akrilonitril Butadien Stiren) olarak seçilmiştir. Bir termoplastik çeşidi olan ABS; darbeye ve sıcaklığa dayanıklı, iyi yüzey kalitesine sahiptir. ABS malzemen gösterdiği iyi fiziksel özellikler sebebiyle tercih edilmiştir.

Elektronik aletler, otomobil parçaları ve beyaz eşya alanında plastik parçaların imalatında kullanılır. ABS malzemesine ait genel fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

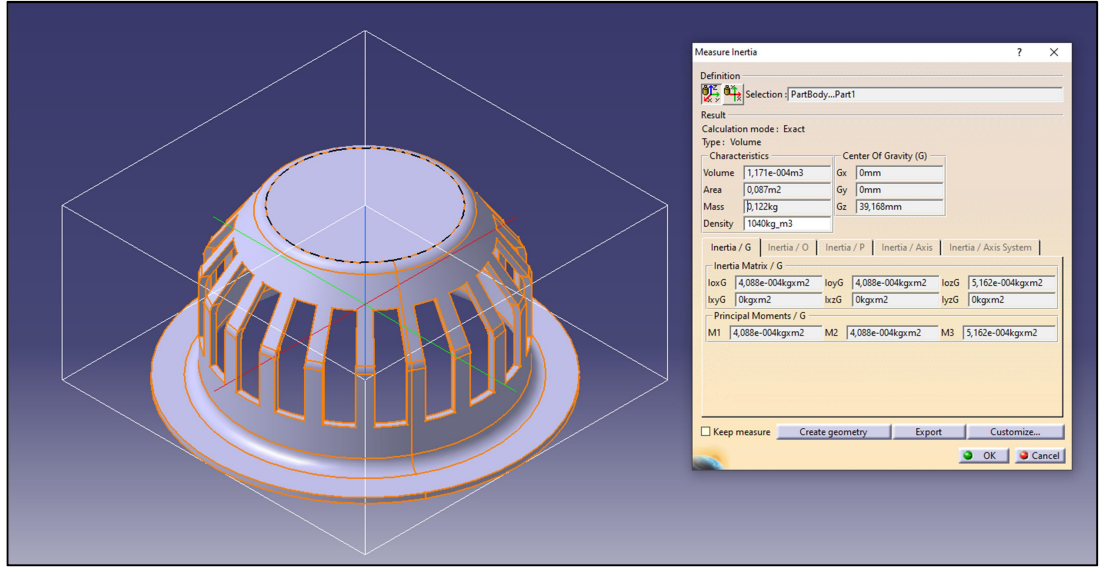
Çizelge 3.1. ABS malzemesinin fiziksel özellikleri (LG Chem, 2021)

Özellik	HF380
Özgül Ağırlık, 23°C	1.04 g/cm ³
Çekme Oranı, 23°C, 3.2mm , 23°C	% 0.5
Ergiyik akış indeksi (220°C/10kg)	42 g/10dk
Kurutma Sıcaklığı	70 ~ 80 °C
Kuruma Süresi	2 ~ 4 sa
Kalıplama Sıcaklığı	210 ~ 240 °C
Kalıp Sıcaklığı	40 ~ 70 °C
Vicat yumuşama sıcaklığı	94 °C
Kalıptan çıkarma sıcaklığı	90 °C

Parça (filtre) 230 °C erime sıcaklığına ve % 0.5 çekme oranına sahip ABS HF380 seçilmiştir. 180 mm alt ve 90 mm üst çapa sahip plastik parçanın yüksekliği 90 mm'dir. Malzeme yoğunluğu 1.04 g/cm³ ve parça hacmi 117,3 cm³ olan parçanın ağırlığı 122 g olarak hesaplanmıştır.

Parçaya ait teknik özellikler;

Hammaddesi	ABS HF380
Erime Sıcaklığı	230 °C
Çekme oranı	% 0.5
Et kalınlığı	3 mm
Parça Hacmi	117,3 cm ³
Malzeme Yoğunluğu	1.04 g/cm ³
Parça Ağırlığı	122 g
Alt Çapı	180 mm
Yükseklik	90 mm



Şekil 3.2. Parça hacim ve ağırlığının hesaplanması

3.2. Plastik Enjeksiyonda Kullanılacak Olan Enjeksiyon Tezgahı

Parça ağırlığı ve hacmi göz önünde bulundurularak tasarlanan parçayı basabilecek güçte enjeksiyon makinesi seçilmelidir. Enjeksiyon işleminde kullanılacak olan makine Ekin – 120 Orion olarak belirlenmiştir. Ekin-120 Orion makinesinin teorik enjeksiyon hacmi 40 mm vida çapı için 251 cm³'tür. Tasarlanan parçanın hacmi yaklaşık 120 cm³ olup seçilen makine tasarlanan parçayı üretebilmek için uygundur. Makineye ait teknik bilgilerin verildiği teknik resimler aşağıda verilmiştir. (Ekin Makine, 2021)

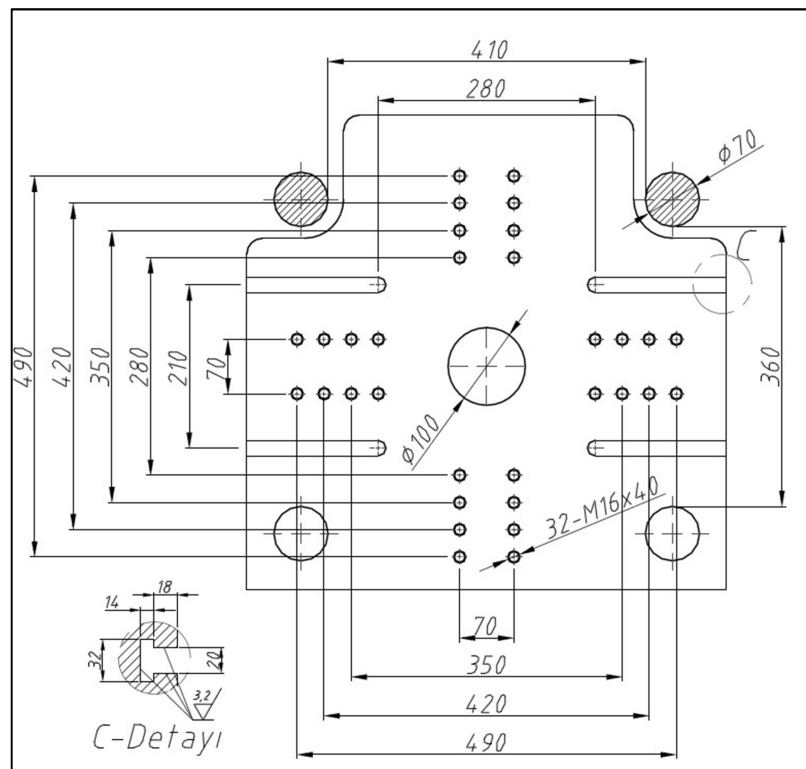
Enjeksiyon Ünitesi Injection Unit					
Makina Modeli Machine Model		Birim Unit	A	B	C
Vida Çapı	Screw Diameter	mm	35	40	45
Vida Boy / Çap Oranı	Screw L/D Ratio	L/D	22,8	20	17,8
Teorik Enjeksiyon Hacmi	Shot Size	cm ³	192	251	318
Enjeksiyon Ağırlığı (PS)	Injection Weight (PS)	g	177	231	292
Enjeksiyon Oranı	Injection Rate	g/s	80	105	130
Plastikleştirme Kapasitesi	Plasticizing Capacity	g/s	12	15	20
Enjeksiyon Basıncı	Injection Pressure	Mpa	245	190	154
Vida Devir Hızı	Screw Speed	Rpm	0-280		
Vida Stroğu	Screw Stroke	mm	200		

Şekil 3.3. Enjeksiyon işleminde kullanılacak olan tezgahın enjeksiyon ünitesi bilgileri

Makine seçiminde bir diğer önemli özellik ise kolonlar arası mesafedir. Tasarlanacak kalıp boyutları makinenin kolonlar arası mesafe ölçüsüne uygun olmalıdır. Seçilen enjeksiyon makinesinin kolonlar arası mesafesi 410x360 mm olup tasarlanan kalıp boyutları 350x350 mm için uygundur.

Mengene Ünitesi Clamping Unit			
Mengene Kapama Kuvveti	Clamping Force	kN	1200
Mengene Stroğu	Toggle Stroke	mm	550
Kolonlar Arası Mesafe	Space Between Tie Bars	mm	410x360
Max. Plaka Ağırlığı	Max. Daylight	mm	675 (750)
Min. Kalıp Kalınlığı	Min. Mould Hight	mm	125(200)
İtici Stroğu	Ejector Stroke	mm	140
İtici Kuvveti	Ejector Force	kN	40
İtici Sayısı	Ejector Number	PC	1

Şekil 3.4. Enjeksiyon işleminde kullanılacak olan tezgahın mengene ünitesi bilgileri



Şekil 3.5. Enjeksiyon işleminde kullanılacak olan tezgahın teknik ölçüleri

3.3. Kalıp Tasarımı

Kalıp tasarımında dikkate alınacak önemli bilgiler; parça bilgisi, parçanın hangi malzemeden üretileceği ve kullanılacak enjeksiyon makinesinin özellikleridir. Hacimsel olarak parça boyutları, parça malzemesi ve ağırlığı kalıp boyutlarını etkilemektedir.

Yukarıda verilen parça, parça malzemesi ve enjeksiyon makinesi bilgileri doğrultusunda kalıp ölçüleri, kalıp tipi, kalıp göz adedi, plastik parçanın alınma şekli, kalıp malzemeleri ve yolluk tipi belirlenir.

Kalıp göz adedi : Parça boyutları açısından kalıp tek gözlü olarak tasarlanmıştır.

Kalıp ölçüleri : Kalıbın boyutları 350x350 olarak belirlenmiştir.

Kalıp tipi : Standart kalıp tipi tasarlanmıştır.

Kalıp malzemeleri: P20 takım çeliği seçilmiştir.

Kalıp malzemesinin termo-fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Kalıp malzemesinin termal özellikleri (Çelik Metal ,2021)

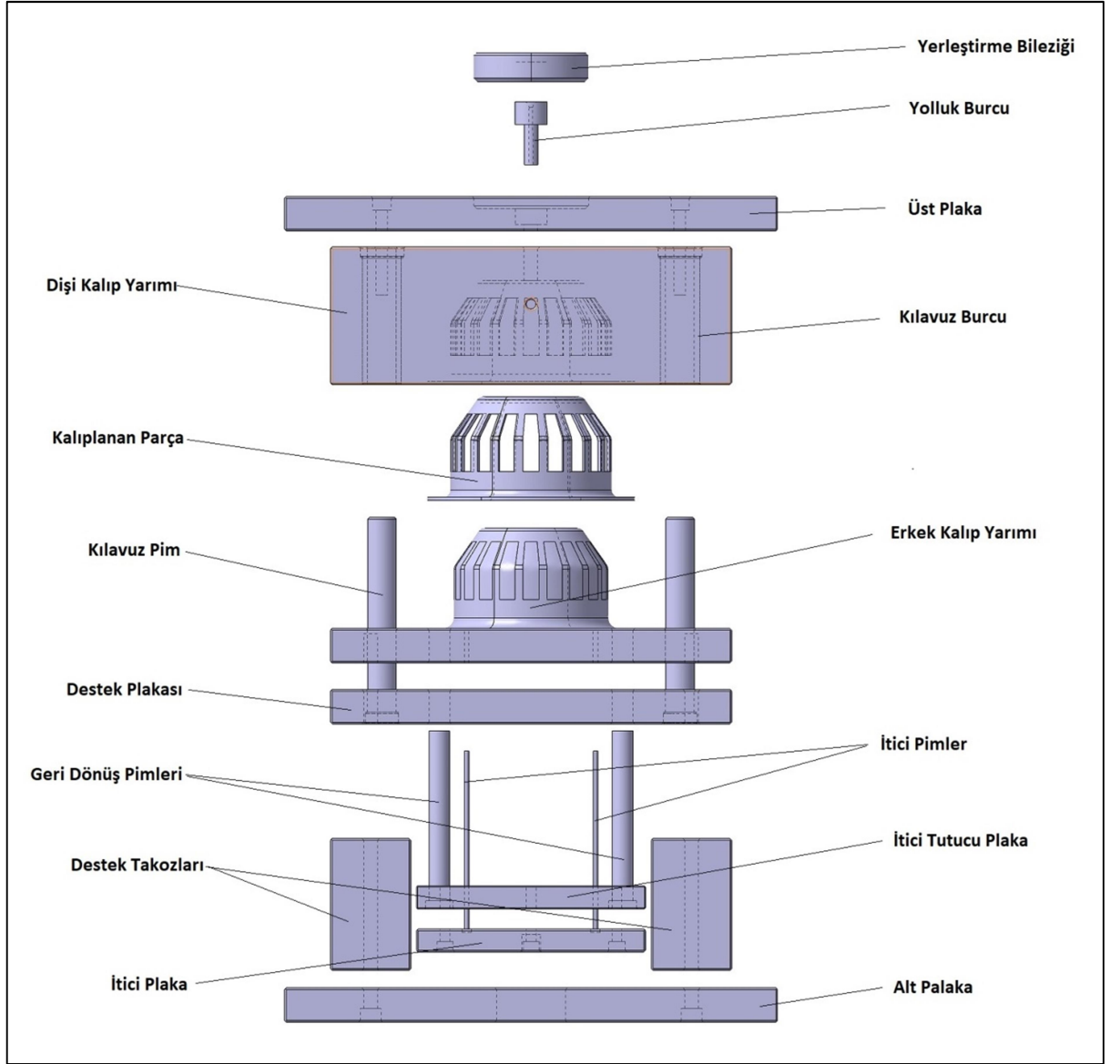
Kalıp malzemesi	Takım Çeliği P-20
Yoğunluk, kg/m ³	7800
Özgül ısı, J/kg.°C	460
Isıl İletkenlik, W/m.°C	29

Yolluk Tipi: Soğuk yolluk ile merkezden tez göze dağıtılacaktır.

Parçanın alınma şekli : Plastik parçanın kalıptan çıkarılabilmesi için dört adet itici pim kullanılmıştır.

Soğutma Tipi: Yaygın olarak kullanılan su ile soğutma sağlanacaktır.

Kalıp elemanları, bir kalıbın üzerinde bulunan tüm parçalardır. Bunlar; dişi kalıp, erkek kalıp, itici pimleri, yolluk burcu, yerleştirme bileziği, alt plaka, üst plaka, destek, destek takozları, itici plakaları vb. elemanlardır. Şekil 3.6’da kalıp elemanları gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Kalıp elemanları

Kalıp elemanlarını sıralarsak:

Yerleştirme bileziği: Yolluk burcu ile enjeksiyon memesinin aynı merkezde (eksende) çalışmasını sağlar.

Yolluk burcu: Enjeksiyon memesinden gelen eriyik plastik malzemenin, kalıba aktarılmasını sağlar.

Üst plaka: Kalıbın, mengene ünitesine bağlanmasına yarar.

Dişi plaka: Ürünün dış kısmına biçim verir.

Burç: Kılavuz pimlerin çalışırken zarar görmemesi için (sürtünmeden aşınmaması) daha yumuşak malzemeden yapılan elemanlardır.

Kalıp boşluğu: İçine dolan eriyik plastik malzemeye son şeklini verip ürün haline gelmesini sağlayan boşluktur.

Erkek kalıp yarımı: Ürünün iç kısmına (delik vb.) biçim verir.

Kılavuz pim: Kalıp yarımlarının (hareketli-sabit kalıplar) aynı ekseninde çalışmasını sağlar.

İtici pim: Kalıp boşluğundaki ürünün dışarı atılmasını sağlar.

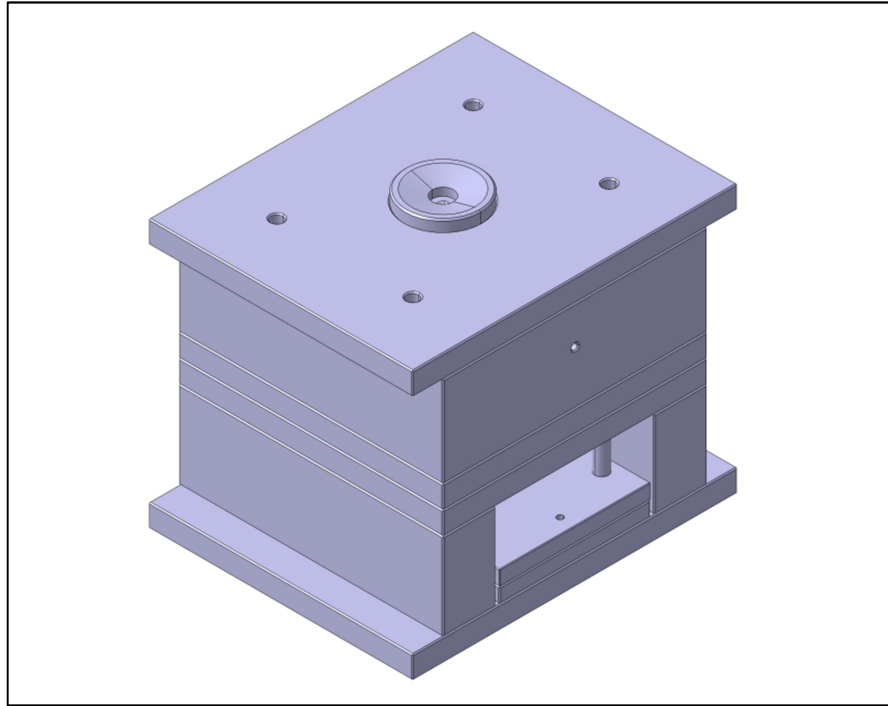
Geri dönüş pimi: Kalıp yarımlarının kapanması sırasında itici pimlerin zarar görmemesini sağlar.

İtici tutucu plaka: İtici pimlerin takıldığı plakadır.

İtici plaka: İtici pimlerin desteklenmesinde kullanılır.

Alt plaka: Kalıbın, mengene ünitesine bağlanmasına yarar.

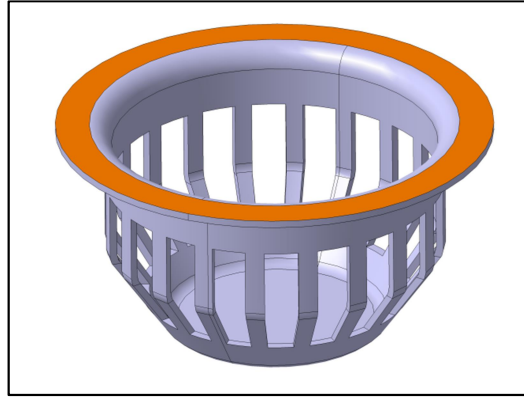
Destek: İtici pimlerin çalışmasını sağlamak için gerekli olan mesafeyi oluşturur.



Şekil 3.7. Kalıbın perspektif görünüşü

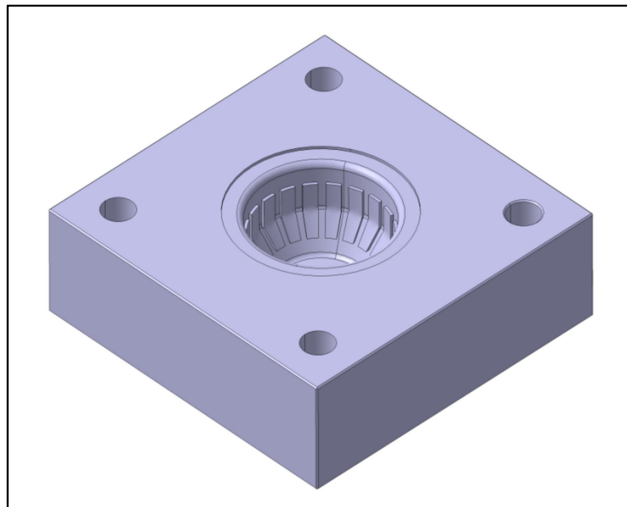
Kalıp tasarımı Catia V5 programında gerçekleştirilmiştir. Öncelikle ABS malzeme için çekme payı 0.5 olarak alınıp Scale komutu ile parça 1.005 büyütülmüştür. Bu sayede kalıptan çıkan parçanın ortam sıcaklık farkından dolayı büzülmesi hesaba katılarak kalıp tasarımı yapılmıştır.

Kalıp tasarımında çekme payının hesaplanması ve tasarıma dahil edilmesi çok büyük önem taşı. Çekme payı kalıp tasarımı dikkate alınarak tamamlandığında, işlem sonunda istenilen parça boyutları elde edilir. Üretim sonunda parçanın boyutsal olarak istenilen toleranslarda olması müşteri memnuniyeti sağlar. Kalıp tasarımına başlarken öncelikle kalıp ayırım çizgisi belirlenmelidir. Kalıp ayırım çizgisi, imalinin düşündüğümüz plastik parçanın kalıbının dişi ve erkek kalıp boşluklarının birleştiği çizgidir. Parça ayırma yüzeyi(çizgisi) Şekil 3.8’deki yüzey seçilmiştir.



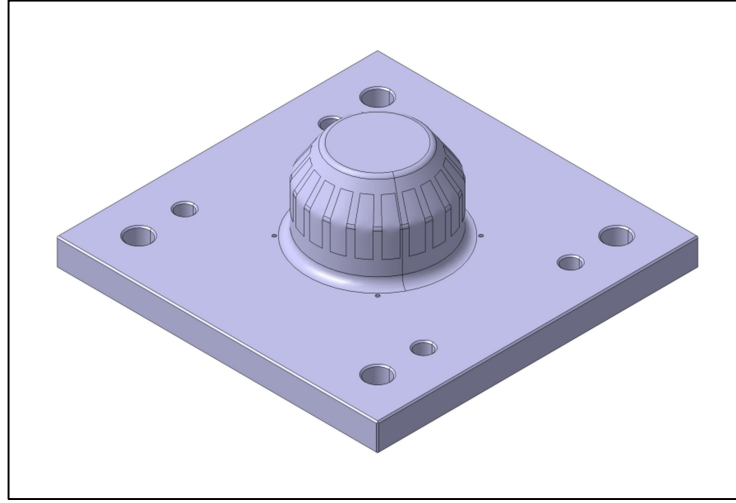
Şekil 3.8. Parça ayırma yüzeyi

Kalıp ayırım yüzeyi ve kalıp boyutlarına karar verildikten sonra parçanın ana hatlarını oluşturacak olan dişi ve erkek kalıp elemanlarının tasarımı yapılır. Bu çalışmada analizi yapılacak parça için kalıp erkek yarımı ve dişi yarımı Şekil 3.9 e Şekil 3.10’daki görüldüğü tasarlanmıştır.



Şekil 3.9. Kalıbın dişi yarımının perspektif görünüşü

Kalıp dişi yarımı parçanın dış yüzeyini oluşturarak kalıp elemanıdır. Erkek kalıp yarımı ise parçanın iç kısmını oluşturur.

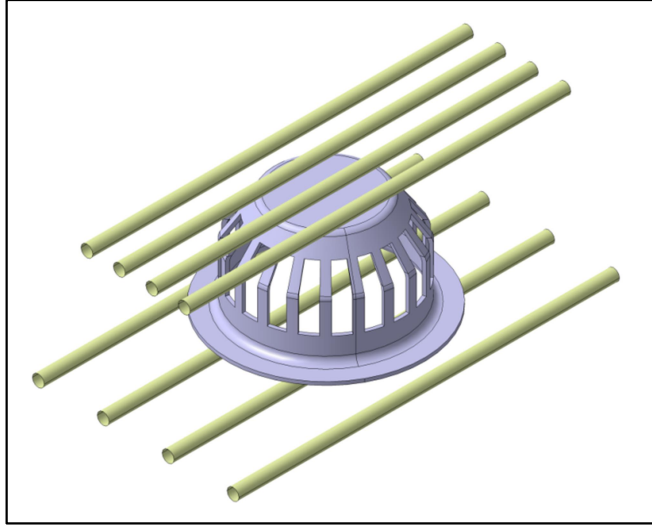


Şekil 3.10. Kalıbın erkek yarımının perspektif görünüşü

Ayrıca dişi ve erkek kalıp plakaları üzerinde kalıbı merkezlemek için kullanılan kılavuz pim ve kılavuz burç için delikler açılmıştır. Erkek kalıp üzerinde merkezleme deliklerinin yanı sıra parçanın kalıptan çıkmasını sağlayacak itici pimler ve kalıp yarımlarının kapanması sırasında itici pimlerin zarar görmemesini sağlayan geri vurucu pimler için delikler açılmıştır.

3.4. Konvansiyonel Soğutma Kanal Tasarımı

Konformal soğutma kanallarıyla kıyaslayabilmek için öncelikle doğrusal (klasik) soğutma kanal tasarımı yapılmıştır. Konvansiyonel kanallar plastik enjeksiyon kalıplarının soğutulmasında kullanılan en yaygın soğutma kanallarıdır. Çok yaygın kullanılmasına rağmen karmaşık şekilli parçaların homojen olarak soğutulması için elverişli değildir. Konvansiyonel kanallar geleneksel yöntem olan derin delme işlemleriyle oluşturulduğu için doğrusaldır. Şekil yüzeyini takip etmesi zordur. Endüstriyel olan ve şekil yüzeyini takip edemeyen kanal tasarımı Şekil 3.11’te gösterilmiştir.



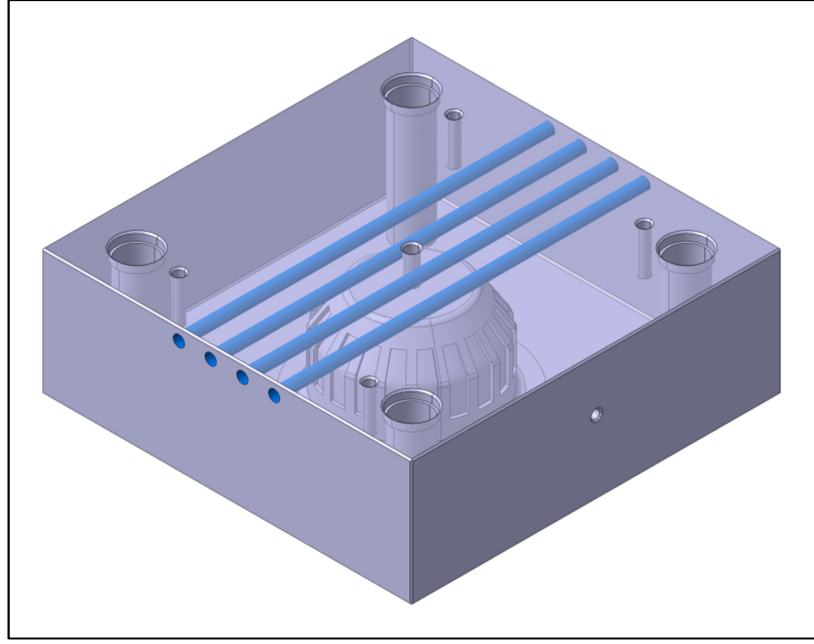
Şekil 3.11. Klasik soğutma kanal tasarımı

Soğutma kanallarının tasarımına başlayabilmek için öncelikle oluşturulacak kanalların boyutları belirlenmelidir. Soğutma kanallarının çapı parça cidar kalınlığına göre Çizelge 3.3 11 mm olarak belirlenir. Daha sonra bu kanalların birbirine ve kanalların kavite boşluğuna olan uzaklığı belirlenmelidir. Kanalların birbirine uzaklıkları kanal boyutunun 2 veya 3 katı olmalıdır. Bu çalışmada kanallar arası mesafe 30 mm seçilmiştir. Kanal ile kavite boşluğu arasındaki mesafenin ise kanal boyutunun 1,5 veya 2 katı olması gerektiğinden 18 mm olarak belirlenmiştir.

3.4.1. Konvansiyonel Kanallı Kalıpta Dişi ve Erkek Kalıp Yarımı Tasarımı

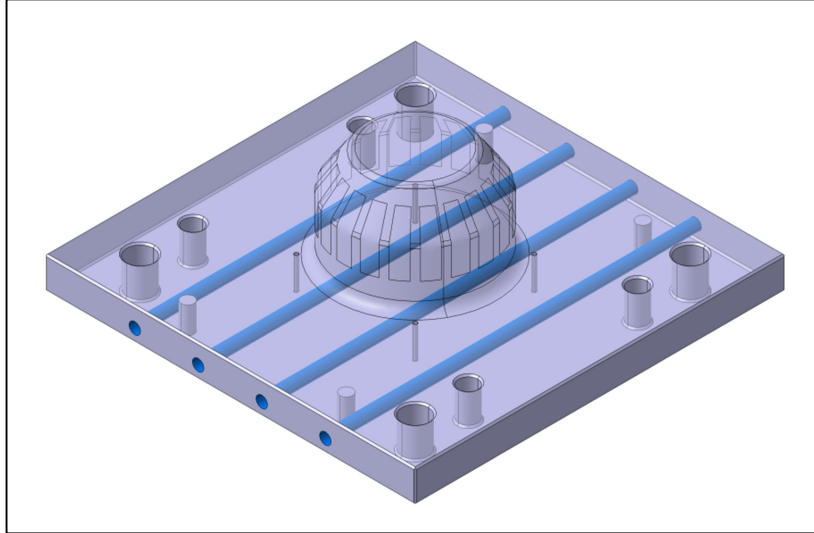
Konvansiyonel soğutma kanalları ile ilgili ölçülerin kararı verildikten sonra soğutma kanalları tasarlanan kalıp yarımlarına CATIA tasarım programında uygulanmıştır. Konvansiyonel soğutma kanalları, belirlenen konum ve ölçülerde kalıp yarımlarında delinmiştir.

Dişi kalıp için konvansiyonel soğutma kanal tasarımı yapılırken eriyik malzemenin kalıba giriş noktası dikkate alınmıştır. Eriyik malzemeyi kavite boşluğuna taşıyan enjeksiyon memesinden sağ ve soldan 7'şer mm boşluk kalacak şekilde soğutma kanalları konumlandırılmıştır. Şekil 3.12'de dişi kalıp yarımların konvansiyonel soğutma kanalları gösterilmiştir.

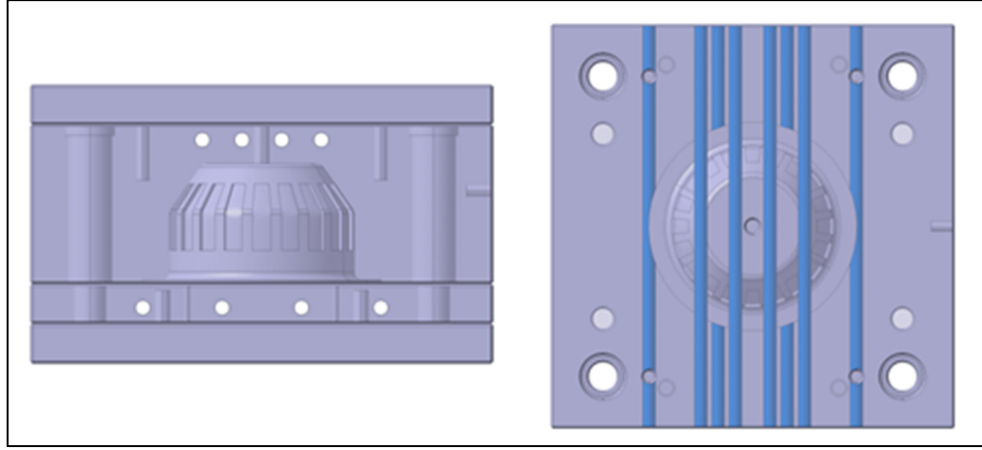


Şekil 3.12. Kalıbın dişi yarımındaki konvansiyonel soğutma kanallarının görünüşü

Erkek kalıp için konvansiyonel kanallar tasarlanırken kalıp bağlantı noktalarına ve itici pimlerinin konumuna dikkat edilmiştir. Çünkü soğutma kanalları, bağlantı noktaları ve iti pimler ile çakışmamalıdır. Şekil 3.13'te erkek kalıp yarımların konvansiyonel soğutma kanalları gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Kalıbın erkek yarımındaki konvansiyonel soğutma kanallarının görünüşü



Şekil 3.14. Kalıp içi konvansiyonel soğutma kanallarının konumu

3.5. Konformal Soğutma Kanal Tasarımı

Plastik enjeksiyon kalıplamada kalıbın, homojen sıcaklık dağılımı göstererek etkin bir şekilde soğutulabilmesi için soğutma kanallarının kalıp içerisinde en uygun biçimde konumlandırılması kritik öneme sahiptir. Soğutma kanallarının kalıp boşluğuna uzaklığı, ergiyik plastik malzeme üzerindeki ısıнын soğutma suyuna transfer hızı üzerinde önemli bir role sahiptir.

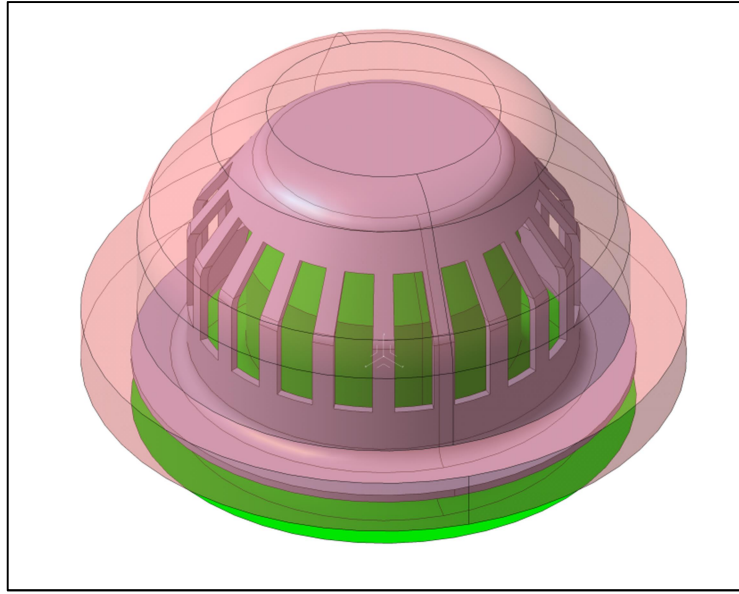
Plastik parçanın tüm bölgelerinde homojen ve etkin bir soğutma sağlanabilmesi için soğutma kanalı ile kavite boşluğu arasındaki mesafenin sürekli olarak sabit tutulmasına gereklidir. Soğutulmak istenen geometrinin şekline uygun bir soğutma sistemi ile yapılan soğutma şekil uyumlu soğutma (konformal) olarak anılmaktadır. Konformal soğutma kanallarında kanal kalıp boşluğu arası mesafenin sabit bir değerde tutulması gibi soğutma kanallarının birbirlerine olan mesafenin de sabit olarak korunması gerekmektedir. Bu sayede plastik parçanın tüm bölgelerini eşit sıklıkta saran soğutma kanalları oluşturulabilir (Göktaş 2021).

Ofset mesafelerinin belirlenerek parça yüzeylerinin ofsetlenmesi

Parçanın tüm yüzeylerinde homojen soğuma sağlayabilmek için parçanın hem iç hem dış yüzeyini takip eden soğutma kanalları tasarlanmıştır. Soğutma kanallarının kaviteye olan uzaklığını sabit tutabilmek için öncelikle parçanın iç ve dış yüzeyleri belirlenen ölçü doğrultusunda ofsetlenmiştir.

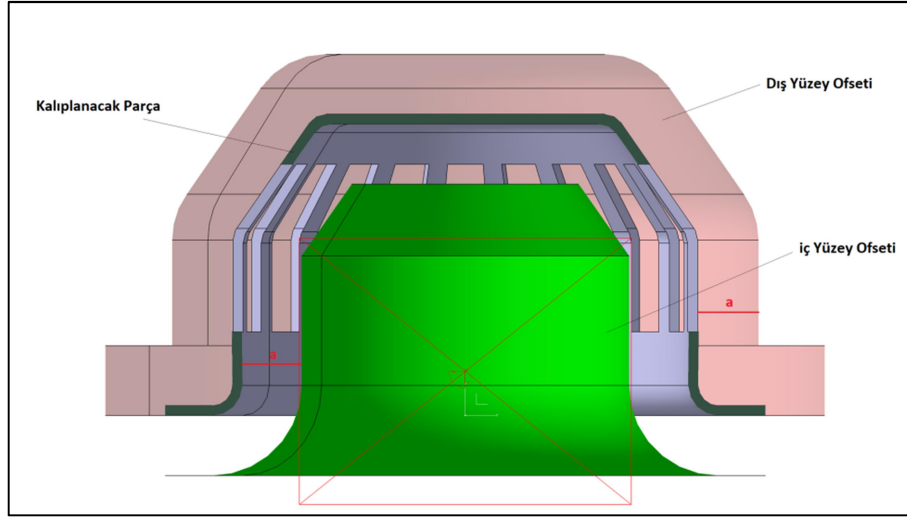
Böylelikle kanalların kaviteye olan uzaklıkları tüm bölgelerde sabit tutulmuştur. Yüzeyin ofsetleme mesafesi (a) soğutma kanalının eksenini ile kalıp boşluğu arasındaki mesafeyi belirlemektedir. Konformal kanal boyutları plastik parçanın cidar kalınlığına göre belirlenmiştir. (bkz. Çizelge 3.3). Kanal çapı 11 mm, kanalların birbirlerine uzaklıkları 25 mm ve kanal ile kalıp boşluğu arası mesafe 18 mm'dir.

Soğutma kanallarının kalıp boşluğuna sabit bir uzaklıktaki konumda yer alması için plastik parçanın hem iç hem de dış yüzeyleri belirlenen mesafe kadar ofsetlenmiştir. İki ayrı ofset yüzeyi oluşturulmuştur (Şekil 3.15 ve Şekil 3.16). Şekil uyumlu soğutma kanalının merkezi bu yüzeyler üzerinde yer almaktadır. İki ayrı ofset yüzeyi üzerinde dış ve iç olarak iki farklı soğutma kanalı tasarlanmıştır. Böylelikle parça hem içten hem de dıştan homojen soğuması sağlanarak daha kaliteli parça elde etmek amaçlanmıştır.



Şekil 3.15. Ofsetlenerek elde edilen referans yüzeyler

Ayrıca soğutma kanallarının parça yüzeylerin tamamen sarması daha hızlı bir soğuma sağlayacağından çevrim süresinin azalacağı öngörülmüştür. Çevrim süresi plastik enjeksiyon kalıplama işleminde önemli yer tutar. Çevrim süresini kısaltmak maliyete olumlu etki sağlayacağından istenen ve üzerinde çalışılan bir konudur.



Şekil 3.16. Ofsetlenerek elde edilen referans yüzeyler için kesit görünüşü

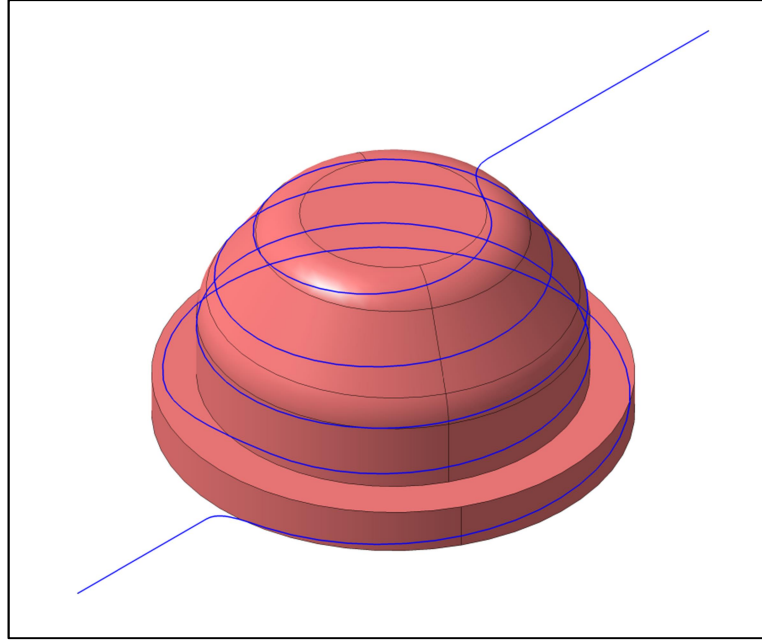
Ofsetlenen yüzeyler üzerinde soğutma kanallarının çizilmesi

Soğutma kanallarının merkez hatlarının oluşturulması için ofset yüzeyi üzerinde yer alan ve birbirlerine sabit uzaklıktaki eğrilerin elde edilmesi gerekmektedir.

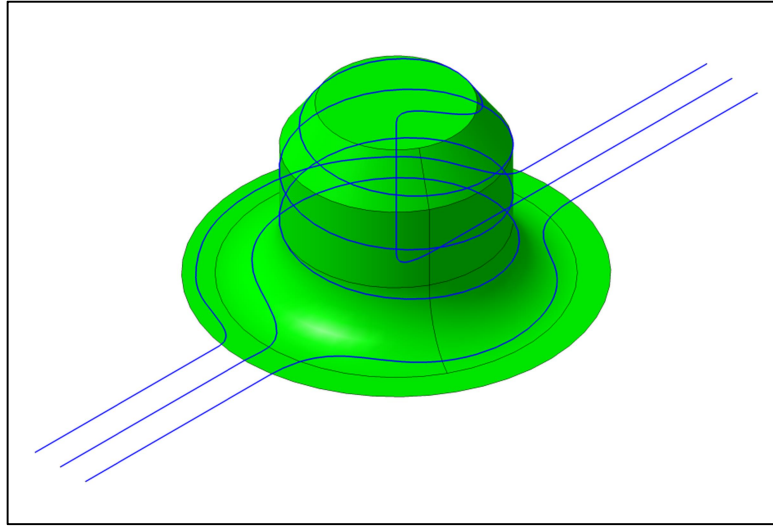
Eğriler arası mesafe (b) soğutma kanallarının merkezi arasındaki mesafeyi belirlemek için cidar kalınlığı ve kanal çapına göre seçilmektedir (bkz. Şekil 2.30). Bu mesafe ile soğutulmak istenen yüzey üzerindeki kanal sıklığı düzenlenmiş olur. Elde edilen eğriler soğutma hatlarının elde edilmesi için kullanılmaktadır.

Soğutma kanallarının çapı 11 mm, kanalların birbirine uzaklıkları 25 mm ve kanal ile kalıp boşluğu arasındaki mesafe 18 mm olarak belirlenmiştir. Kanalların kavite boşluğunu sabit tutabilmek için kanalların merkez hatlarının üzerinde olacak olan yüzeyi elde etmek için parça yüzeyleri 18 mm ofsetlenmiştir. Daha sonra bu yüzeyler üzerinde birbirine 25 mm uzaklıkta olan eğriler çizilmiştir. Böylelikle konformal soğutma hatları belirlenmiştir.

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 da parça ofset yüzeyini takip eden soğutma hatları gösterilmiştir.



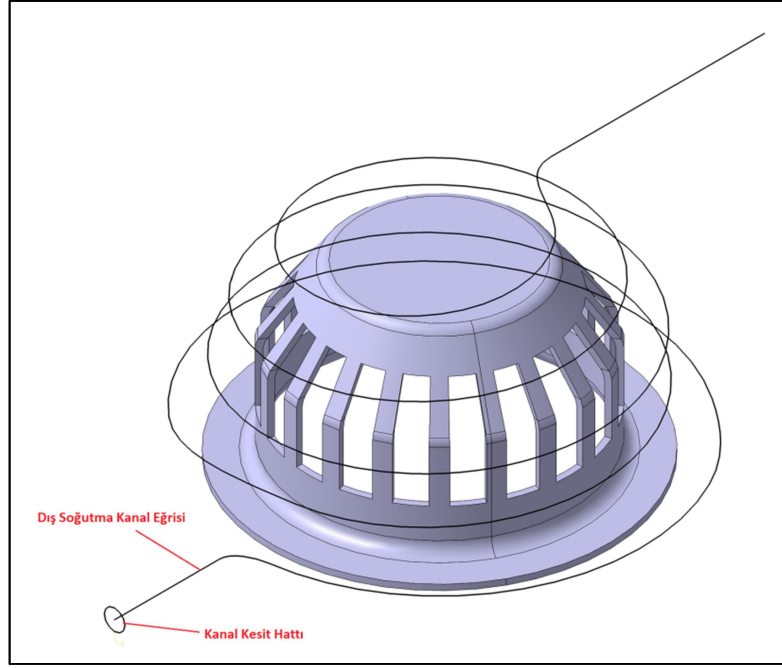
Şekil 3.17. Dış ofset üzerindeki soğutma kanal eğrileri



Şekil 3.18. İç ofset üzerindeki soğutma kanal eğrileri

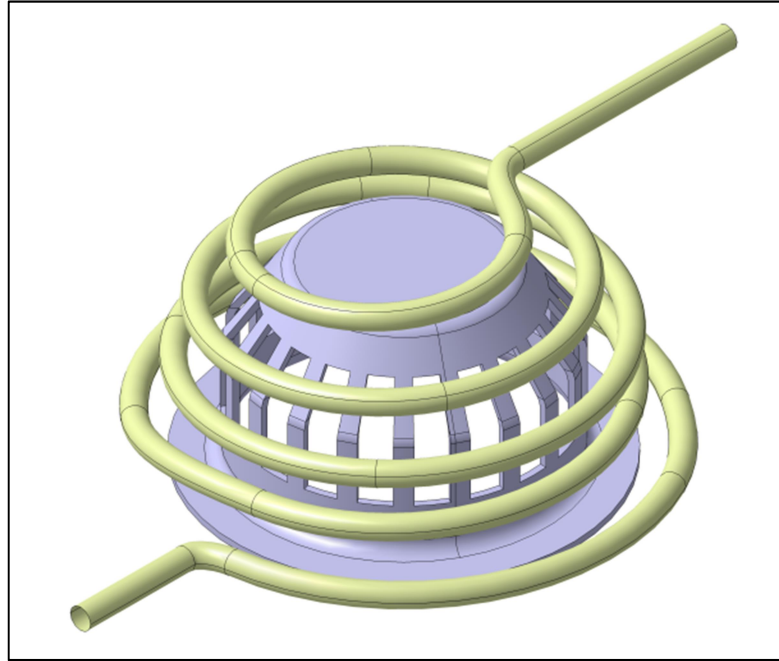
Kanal kesit profilinin kanal hattı boyunca süpürülmesi

Elde edilen hatlar ile kanal kesit profili soğutma hattı boyunca süpürülerek soğutma kanalına dönüştürülür (Şekil 3.19, Şekil 3.20 ve Şekil 3.21). Böylece kalıp boşluğunu sabit bir uzaklıkta, parça yüzeyini uyumlu bir şekilde takip eden soğutma kanalları elde edilmiş olur. Kalıbın her iki yarımı için aynı metot kullanılarak şekil uyumlu soğutma kanalları tasarlanmıştır.

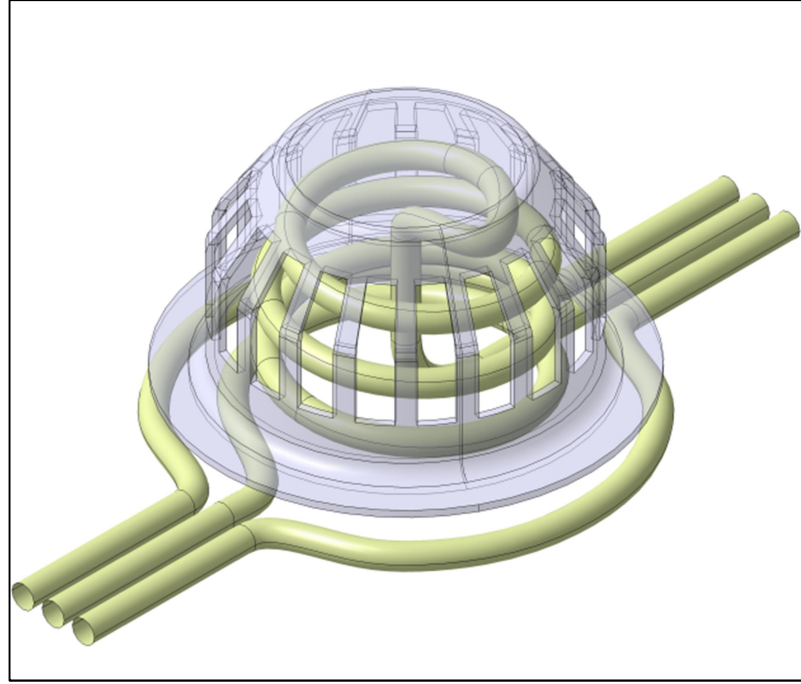


Şekil 3.19. Kanal kesit profilinin kanal hattı boyunca süpürülmesi

Oluşturulan kanal yüzeyleri Şekil 3.20 ve 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Dişi kalıp yarımında soğutma kanallarının elde edilmesi



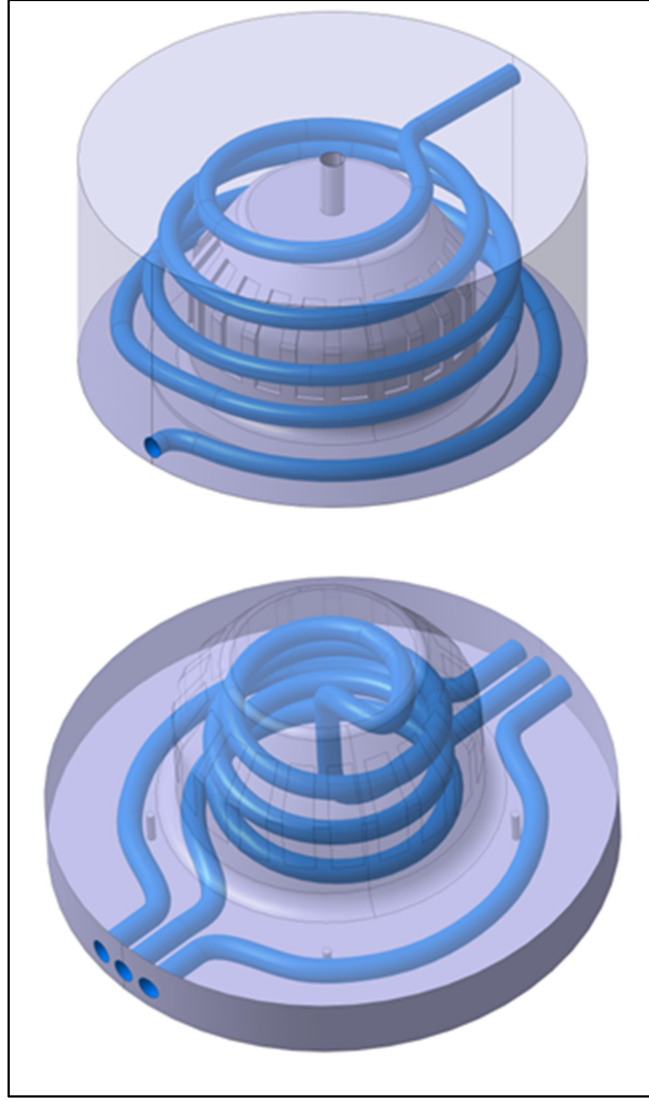
Şekil 3.21. Erkek kalıp yarımında soğutma kanallarının elde edilmesi

3.5.1. Konformal Kanallı Kalıpta Dişi ve Erkek Kalıp Yarımı Tasarımı

Konvansiyonel soğutma kanalları kalıpları matkap ile delinerek üretilebilmektedir. Konformal soğutma kanallarının üretimi matkapla delerek oluşturulamayacağı için eklemeli imalat yöntemi mi tercih edilmiştir.

Kalıp boyutları eklemeli imalat prosesine göre büyük olduğu için konformal kanallı kalıp, montajlanabilir kalıp çekirdeği şeklinde tasarlanmıştır. Kalıp çekirdekleri, SLS yönteminde kullanılan cihazların yatak ölçülerine uygun şekilde oluşturulmuştur. Dişi kalıp çekirdeğinin boyutu Ø250x140 mm olarak ayarlanmıştır. Erkek kalıp boyutları ise Ø 250x120 mm olarak ayarlanmıştır.

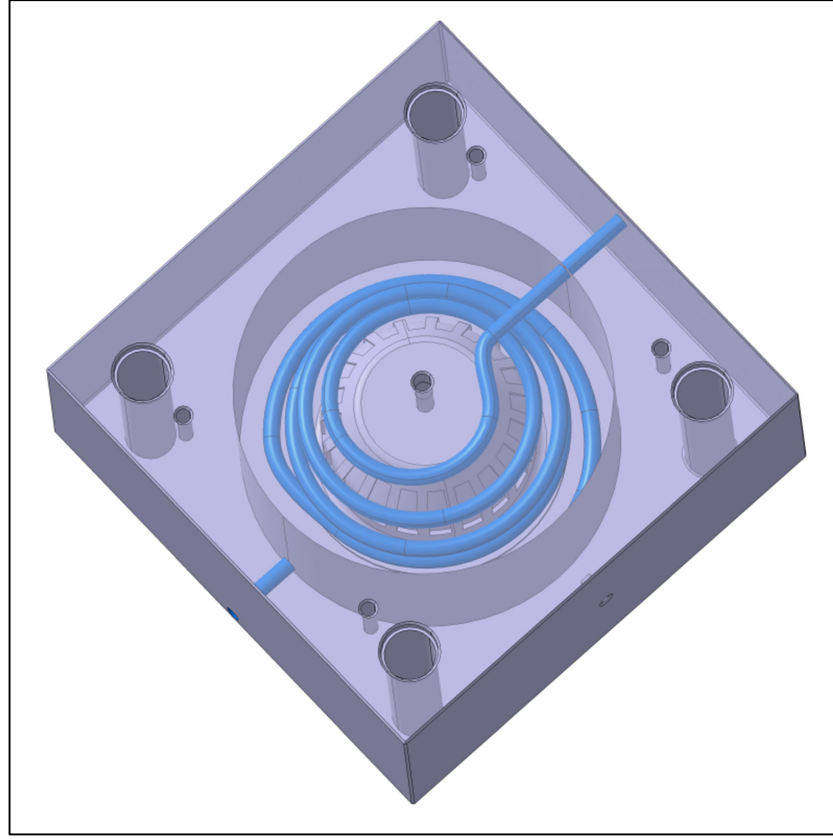
Konformal soğutma kanalları, belirlenen konum ve ölçülerde kalıp çekirdeklerinde boşaltma yapılmıştır. Şekil 3.22’de erkek ve dişi kalıp çekirdeklerinde konformal soğutma kanalları gösterilmiştir.



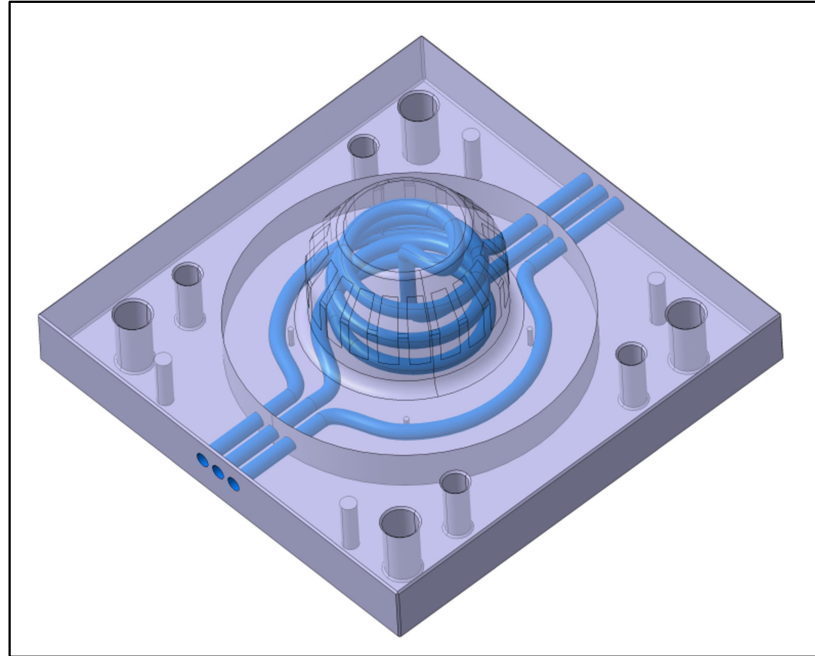
Şekil 3.22. Kalıp çekirdekleri A) Dişi kalıp ve B) Erkek kalıp

Kalıp çekirdekleri oluşturulduktan sonra bu çekirdeklerin oturacağı dış ve erkek kalıp plakaları tasarlanmıştır. Kalıp plakaları 350x350 mm boyutundadır. Merkezinde 250 mm çapında 20 mm derinliğinde boşaltma yapılmıştır.

Kalıbı merkezlemek için kullanılacak kılavuz pim ve kılavuz burç için delikler açılmıştır. Şekil 3.23 ve Şekil 3.24’de erkek ve dişi kalıp elemanlarında konformal soğutma kanalları gösterilmiştir.



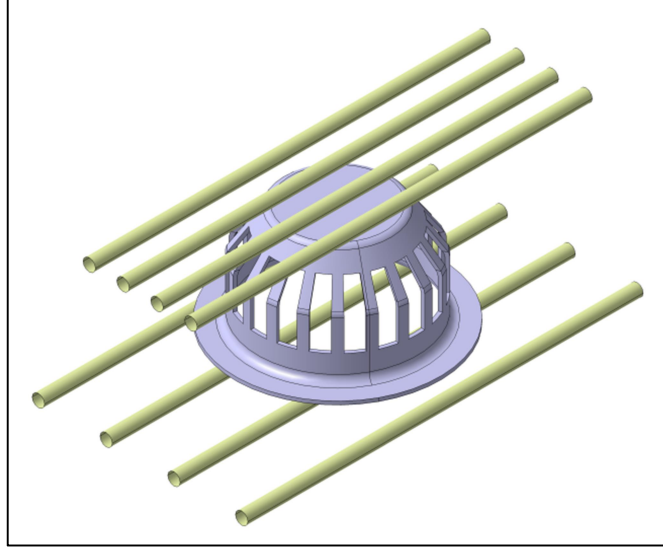
Şekil 3.23. Kalıbın dişi yarımındaki konformal soğutma kanallarının görünüşü



Şekil 3.24. Kalıbın erkek yarımındaki konformal soğutma kanallarının görünüşü

3.6. Konvansiyonel Kanal için Moldex3D ile Enjeksiyon Simülasyonu

Konformal ve konvansiyonel soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıplarının soğutma etkinliklerinin karşılaştırılması için Moldex analizi kullanılarak dolum, ütüleme, soğuma ve çarpılma analizleri yapılmıştır.



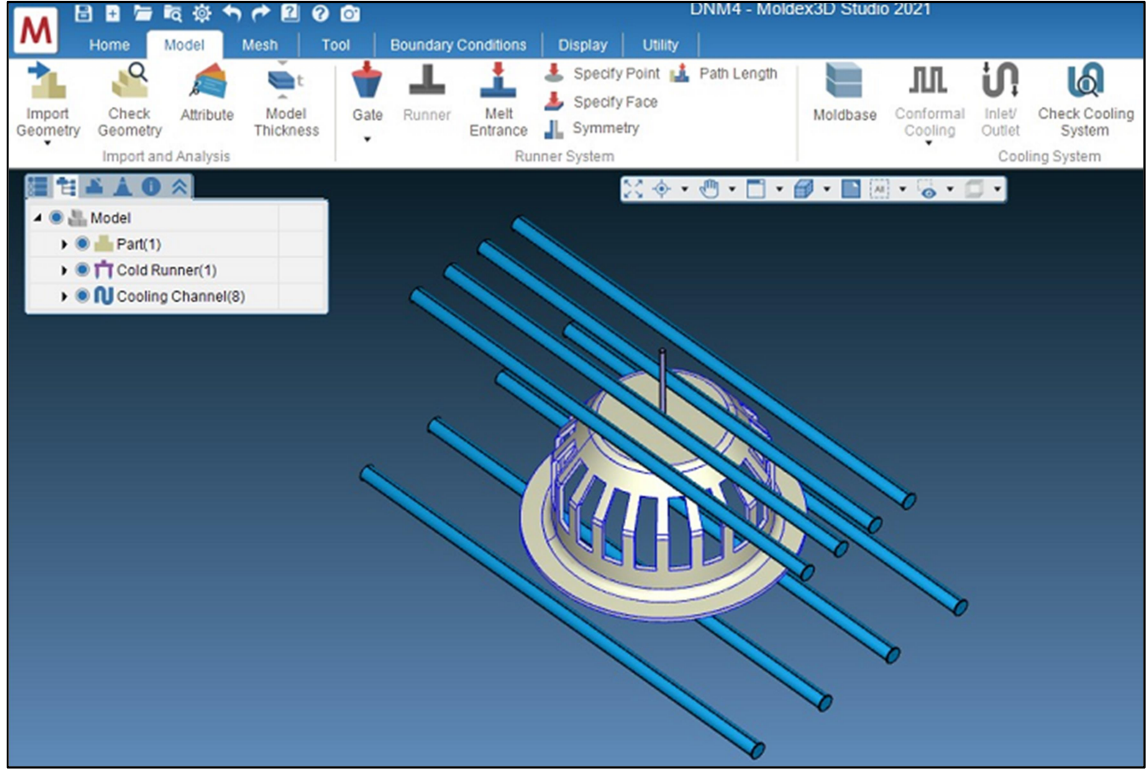
Şekil 3.25. Konvansiyonel soğutma kanalları

Enjeksiyon simülasyonu için uygulanan işlemler sırasıyla;

- 1- CATIA V5 programında çizilen parça, step olarak kaydedilir ve Moldex programına “import” edilmiştir.
- 2- Tasarlanan yolluk ve soğutma kanal çizgileri igs dosyası olarak kaydedilir. Daha sonra Moldex programına “import” edilmiştir.

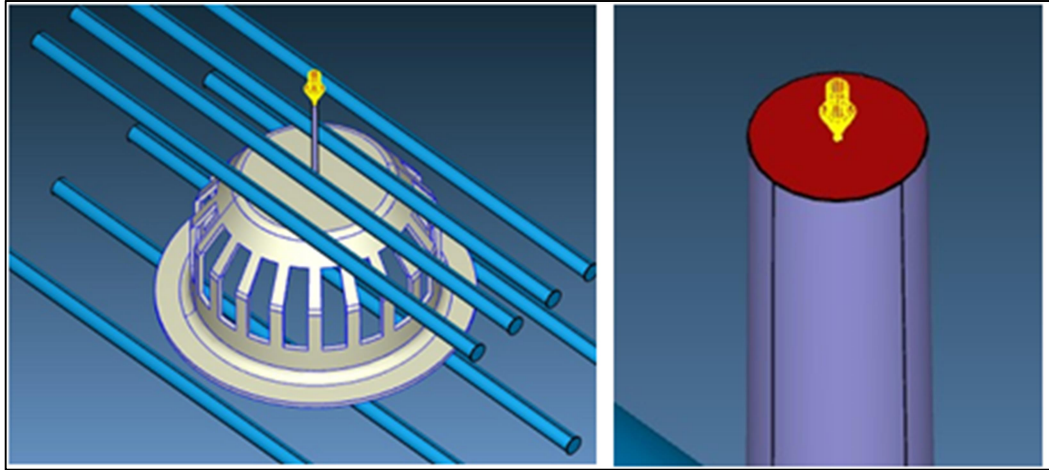
İmport edilen parçaların Moldex programına tanıtılması gerekir.

- 3- Moldex’e aktarılan parça, yolluk ve soğutma kanallarının “Attribute” komutu ile tanımlanması yapılır.



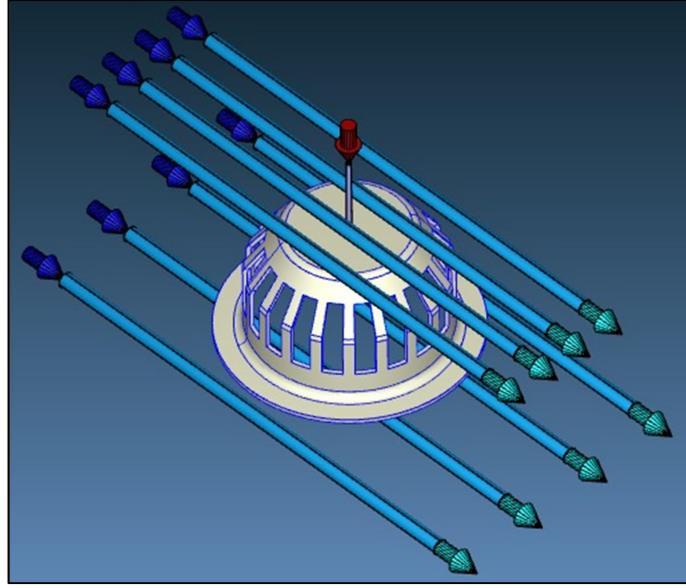
Şekil 3.26. Plastik parça, yolluk ve soğutma kanallarının tanıtılması (Konvansiyonel)

- 4- Dolum analizinde, yolluk kanalının girişine bir adet giriş noktası eklenmiştir (Şekil 3.27).



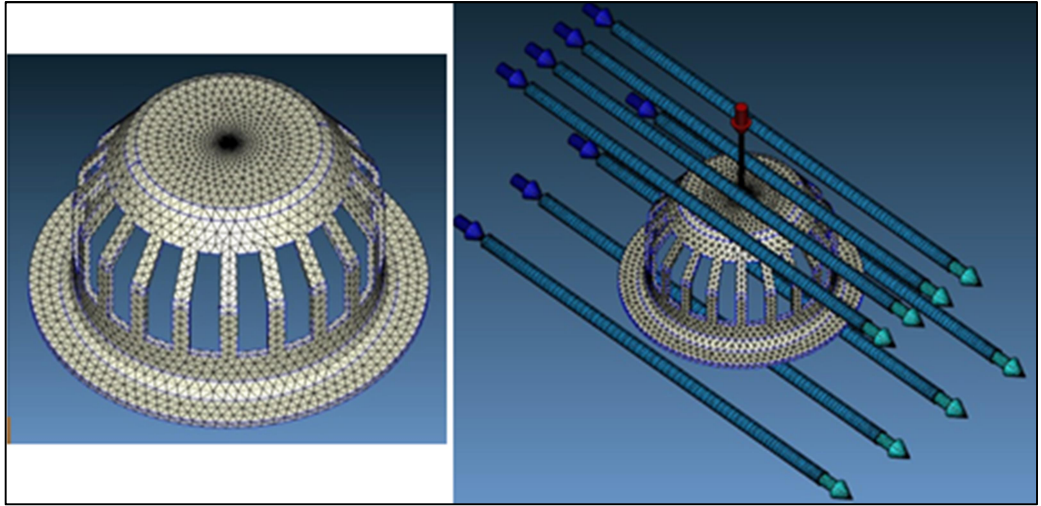
Şekil 3.27. Plastik parça üzerindeki giriş noktası

- 5- Kalıbın her iki yarımı için soğutma kanalı uçlarında giriş (inlet) ve çıkış (outlet) noktaları belirlenmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. Soğutma kanalları üzerindeki giriş ve çıkış noktaları

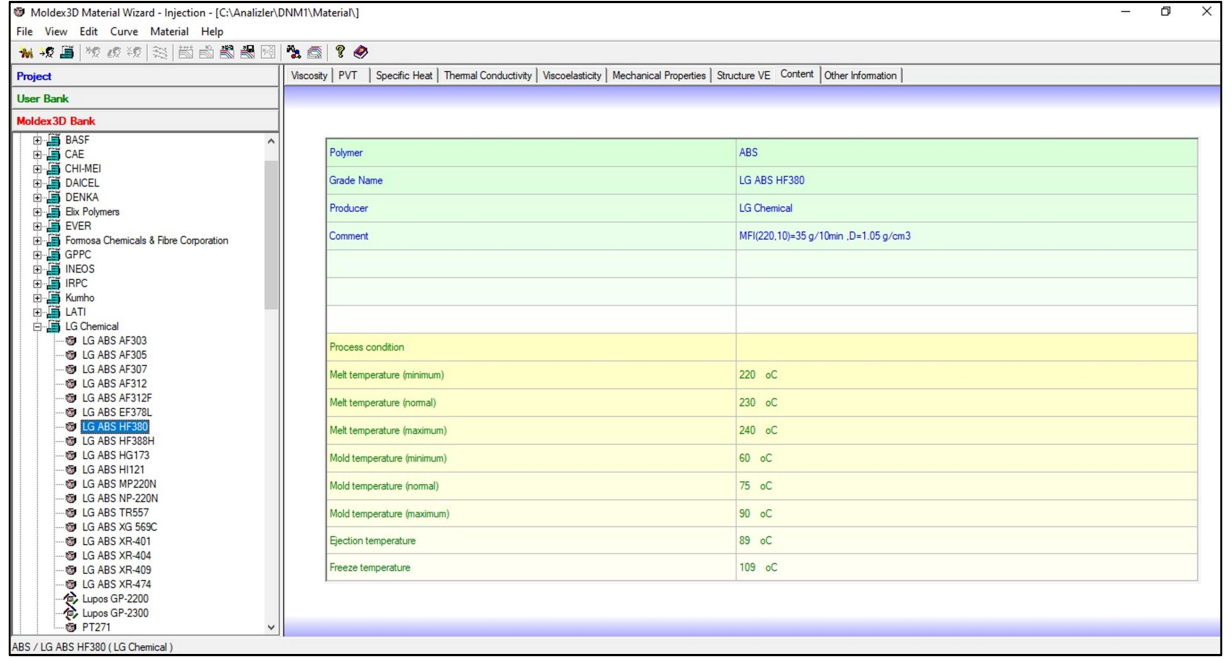
- 6- Modelin üç boyutlu olarak çözümlenebilmesi amacıyla Mesh işlemi yapılır. Parçaya 3 katmanlı Boundary Mesh uygulanmıştır. Şekil 3.29’de mesh görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.29. Parça ve konvansiyonel kanalların Mesh görünüşü

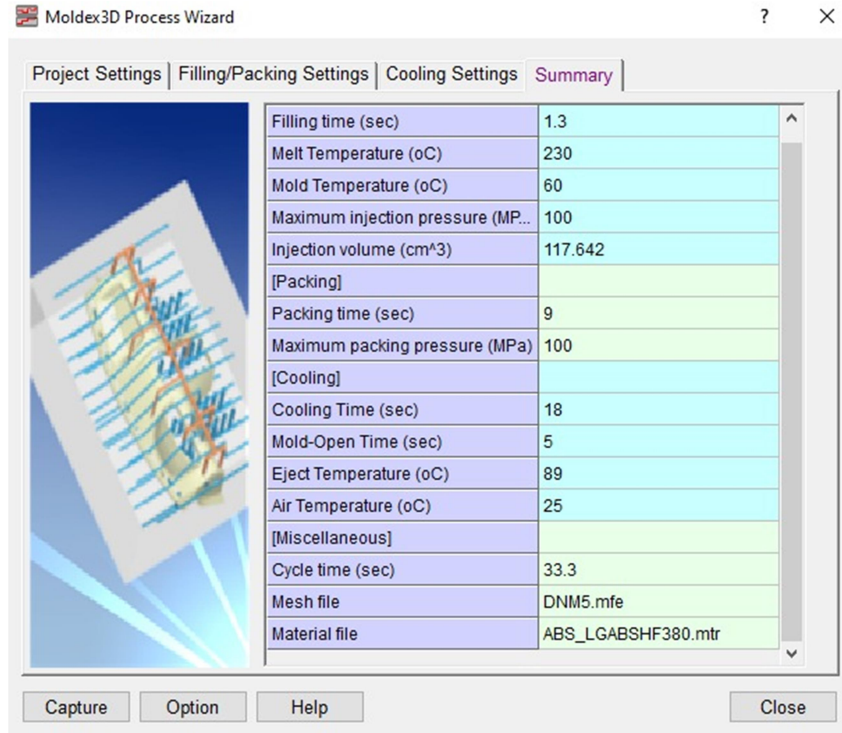
Daha sonra malzeme tanımlanması gerekir. Moldex programı bir çok plastik malzemenin bulunduğu geniş bir malzeme ver tabanına sahiptir.

- 7- Moldex veri tabanından malzeme olarak ABS HF380 seçilmiştir. Malzeme seçimi menüsü Şekil 3.30’da verilmiştir.



Şekil 3.30. Malzeme seçimi menüsü

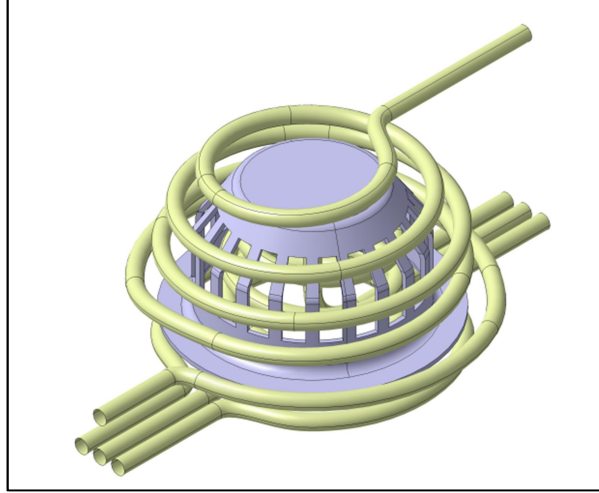
8- Proses ayarları yapılır. Proses ayarları menüsü Şekil 3.31’da gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Proses ayarları menüsü

- 9- Analizlerde “ zamana bağılı ısı transferi hesaplayan kalıp sıcaklığının çevrim süresince değişken olarak kabul edildiğı “Transient Analysis 3” hesaplama yöntemi seçilmiştir.

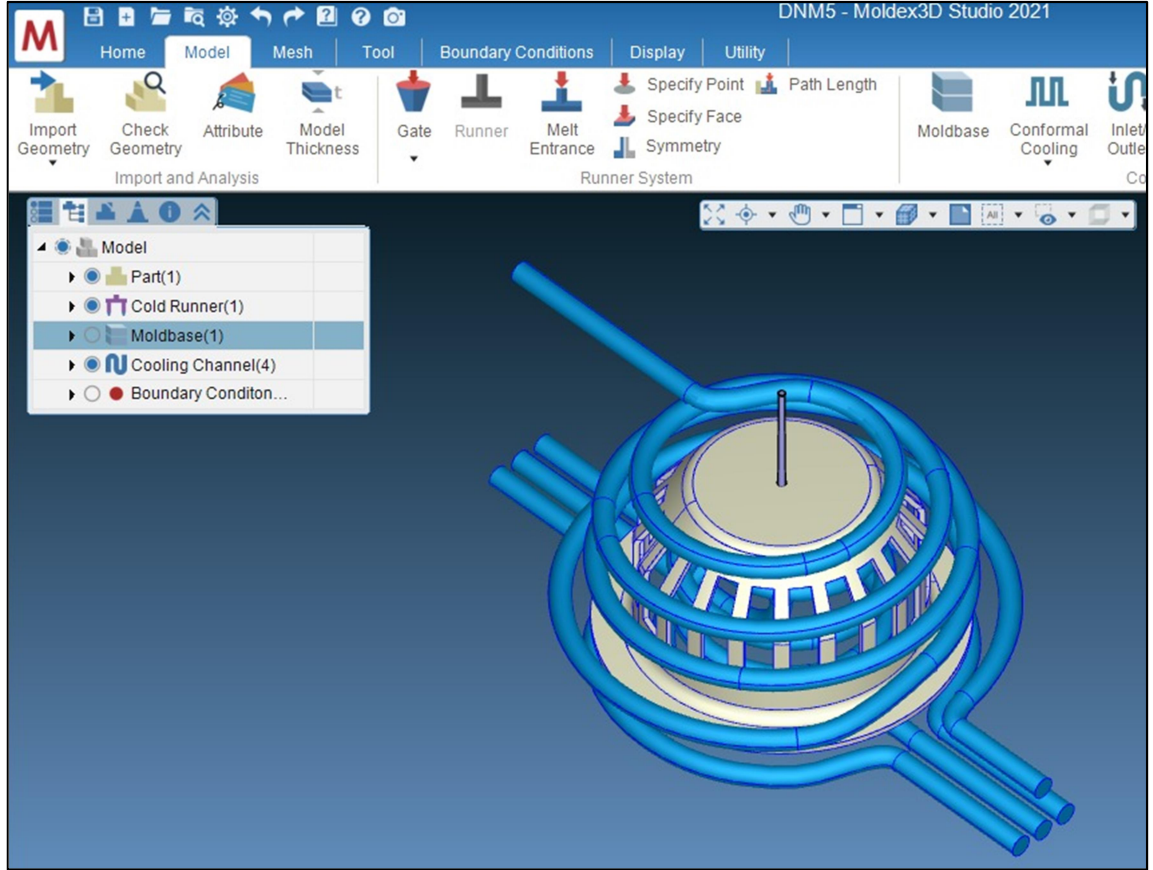
3.7. Konformal Kanal için Moldex3D ile Enjeksiyon Simülasyonu



Şekil 3.32. Konformal soğutma kanalları

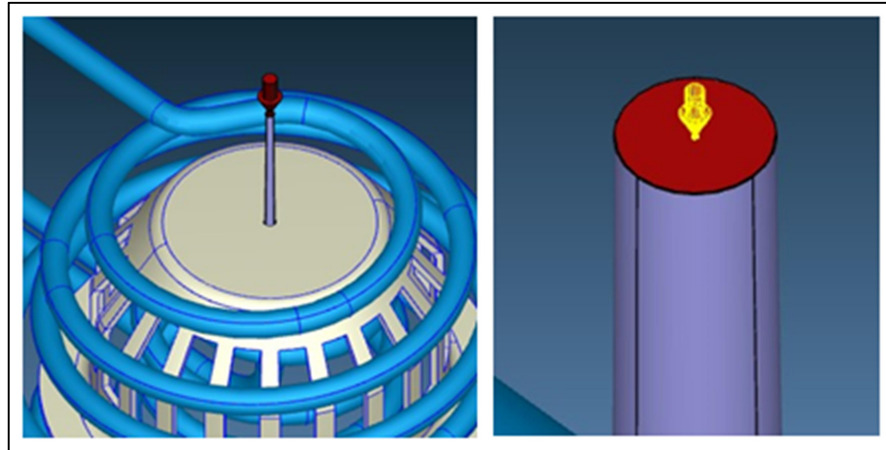
Enjeksiyon simülasyonu yine konvansiyonel kanallı simülasyondaki aynı işlem adımları uygulanmıştır. Bunlar;

- 1- CATIA V5 programında çizilen parça, step olarak kaydedilir ve Moldex programına “import” edilmiştir.
- 2- Tasarlanan yolluk ve soğutma kanal çizgileri igs dosyası olarak kaydedilir. Daha sonra Moldex programına “import” edilmiştir.
- 3- Moldex’e aktarılan parça, yolluk ve soğutma kanallarının “Attribute” komutu ile tanımlanması yapılır.



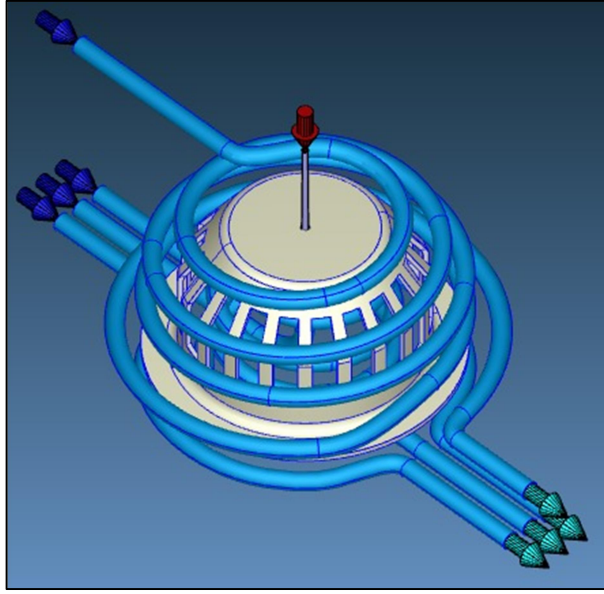
Şekil 3.33. Plastik parça, yolluk ve soğutma kanallarının tanıtılması (Konformal)

4- Dolum analizinde, yolluk kanalının girişine bir adet giriş noktası eklenmiştir.



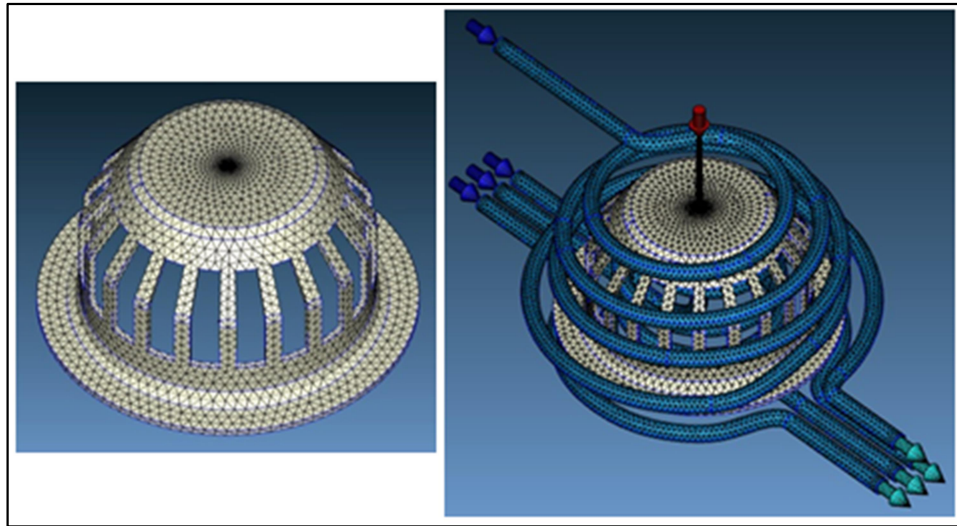
Şekil 3.34. Eriyik giriş noktası

5- Kalıbın her iki yarımını için soğutma kanalı uçlarında giriş (inlet) ve çıkış (outlet) noktaları belirlenmiştir (Şekil 3.35).



Şekil 3.35. Soğutma kanalları üzerindeki giriş ve çıkış noktaları

- 6- Modelin üç boyutlu olarak çözümlenebilmesi amacıyla Mesh işlemi yapılır. Parçaya 3 katmanlı Boundary Mesh uygulanmıştır. Şekil 3.36’da mesh görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.36. Parça ve konformal kanalların Mesh görünüşü

- 7- Daha sonra Moldex veri tabanından malzeme olarak ABS HF380 seçilmiştir.
 8- Proses ayarları Çizelge 3.3’teki gibi yapılmıştır.

- 9- Analizlerde “zamana bağılı ısı transferi hesaplayan kalıp sıcaklığının çevrim süresince değişken olarak kabul edildiği “Transient Analysis 3” hesaplama yöntemi seçilmiştir.

Parça kalitesi ve proses parametreleri açısından konvansiyonel ve korformal soğutma kanallarını kıyaslayabilmek adına iki simülasyonda da aynı enjeksiyon parametreleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Simülasyonda kullanılan enjeksiyon parametreleri

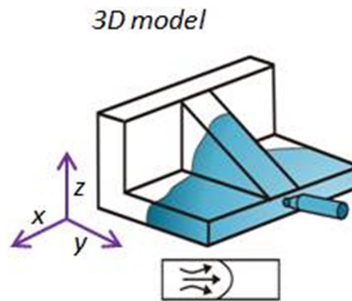
Parametreler	Değer
Eriyik sıcaklığı, °C	230
Çıkarma Sıcaklığı, °C	89
Kalıp Sıcaklığı, °C	60
Enjeksiyon Basıncı, Mpa	100
Ütuleme Basıncı, Mpa	100
Kalıp Açık Kalma Süresi, s	5
Dolum Süresi, s	1,3
Ütuleme Süresi, s	9
Soğutma Süresi, s	18

Belirlenen parametreleri iki farklı kanal uygulanacak simülasyonlardan elde edilecek analiz sonuçlarına göre yorumlamaya yardımcı olacağından aynı tutulmuştur.

3.8. Moldex Yazılımının Modelin Çözümünde Kullandığı Denklemler

3.8.1. Dolum ve Ütuleme Aşamasında Matematiksel Modeller

Plastik eriyik sıkıştırılmaz viskoz bir sıvı olarak kabul edilir.



Şekil 3.37. Enjeksiyon kalıplama için geleneksel yöntemin şematik diyagramı

Doldurma işleminde hem plastik eriyik hem de havanın zayıf sıkıştırılabilir olduğu varsayılır. Polimer eriyiğinin Genelleştirilmiş Newton Akışkanı (GNF) olduğu varsayılır. Bu nedenle, izotermal olmayan 3B akış hareketi aşağıdakilerle matematiksel olarak tanımlanabilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} - \boldsymbol{\sigma}) = \rho \mathbf{g} \quad (3.2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (3.3)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3.4)$$

Burada

$\mathbf{u}$ = hız vektörü,

T = sıcaklık,

t = zaman,

p = basınç,

$\boldsymbol{\sigma}$ = toplam gerilim tensörü,

ρ = yoğunluk,

η = viskozite,

k = termal iletkenlik,

C_p = özgül ısı

$\dot{\gamma}$ = kesme hızı.

Ayrıca polimerik özelliğin uygun fonksiyon ile açıklanması gerekir. Bu durumda, polimer eriyiğinin viskozitesini tanımlamak için Arrhenius sıcaklık bağımlılığına sahip modifiye-Cross modeli kullanılır:

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_o(T)}{1 + (\eta_o \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (3.5)$$

Burada;

$$\eta_0(T) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad (3.6)$$

η = güç yasası indeksi, η_0 = sıfır kesme viskozitesi, $\dot{\gamma}^*$ = sıfır kesme hızı ile viskozite eğrisinin güç yasası bölgesi arasındaki geçiş bölgesinin parametresidir.

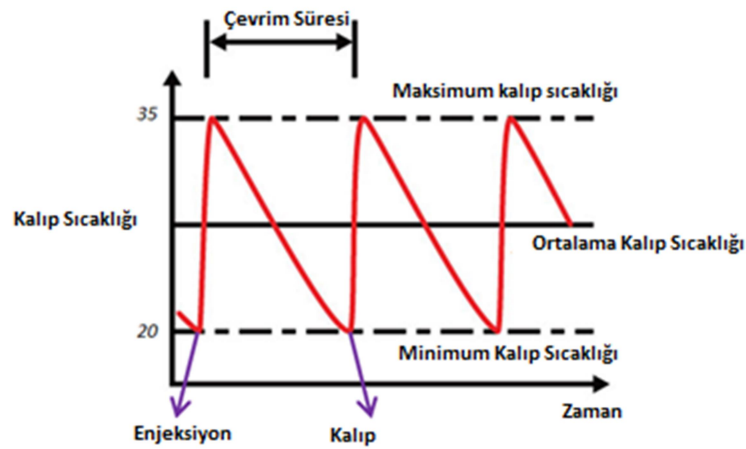
Eriyik cephesinin gelişimini izlemek için bir hacim oranı fonksiyonu f tanıtıldı. Burada $f=0$ hava fazı, $f=1$ polimer eriyik fazı olarak tanımlanır ve daha sonra eriyik cephesi $0 < f < 1$ olan hücreler içinde bulunur. f 'nin zaman içindeki ilerlemesi aşağıdaki taşıma denklemi tarafından yönetilir:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (uf) = 0 \quad (3.7)$$

Akış hızı veya enjeksiyon basıncı, kalıp girişinde belirtilir. Kalıp duvarında kayma olmadığı varsayılır. Hacim oranı fonksiyonunun hiperbolik taşıma denklemi için yalnızca giriş sınır koşulunun gerekli olduğuna dikkat edilmelidir.

3.8.2. Soğuma Aşamasında Matematiksel Modeller

Gerçekte, kalıp sıcaklığı işleme sırasında zamanla periyodik olarak dalgalanır ve kararlı durumda bir döngü hareketi olarak gösterecektir. Bu nedenle, Cool modülü hem döngü ortalamalı kalıp sıcaklığı yaklaşımını hem de tam geçici yöntemleri destekler.



Şekil 3.38. Tipik kalıp sıcaklığı değişim döngüsü

3.8.2.1. Döngü-Ortalama Kalıp Sıcaklığı Yaklaşımı

Kalıp soğutma sıvısı, geleneksel kalıp soğutmasını gerçekleştirdiğinde, döngü-ortalama kalıp sıcaklığı yaklaşımı, makul analiz sonucunu etkin bir şekilde sağlar.

Bir döngü-Ortalama sıcaklık dağılımı, kararlı-durum Laplace denklemi çözülerek elde edilebilir:

$$k_m \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (3.8)$$

Burada $\bar{T}$ = döngü ortalama kalıp sıcaklığı, k_m = kalıp tabanı termal iletkenliği, x, y ve z Kartezyen koordinatlarıdır.

Kabuk plastiği ve kalıp tabanının yakınındaki ısı transferi fenomeni, tek boyutlu bir Poisson denklemi ile yönetilebilir.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} \right) \quad (3.9)$$

Burada ρ = yoğunluk, C_p = belirtilen ısı, T = sıcaklık, t = zaman, k = termal iletkenlik.

3.8.2.2. Tam Geçici Yöntem

Kalıp, ısıtma çubuğu veya Variotherm İşlemi gibi enjeksiyonlu kalıplama işlemleri sırasında kalıp ısıtma ve soğutma gerçekleştirmek için bir miktar soğutucu veya ısıtma ortamına sahip olduğunda, döngü-ortalama kalıp sıcaklığı yaklaşımı artık kalıp sıcaklığı tahmini için uygun değildir. Daha iyi yöntem, zaman zaman tam geçici kalıp sıcaklığı davranışını simüle etmektir.

Geçici kalıp sıcaklık dağılımı aşağıdaki denklemle elde edilebilir:

$$k_m \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right) = \rho C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} \quad (3.10)$$

Kalıp, ısıtma çubuğu veya Variotherm İşlemi gibi enjeksiyonlu kalıplama işlemleri sırasında kalıp ısıtma ve soğutma gerçekleştirmek için bir miktar soğutucu veya ısıtma ortamına sahip olduğunda, döngü-ortalama kalıp sıcaklığı yaklaşımı artık kalıp sıcaklığı tahmini için uygun değildir. Daha iyi yöntem, zaman zaman tam geçici kalıp sıcaklığı davranışını simüle etmektir.

Geçici kalıp sıcaklık dağılımını aşağıdaki denklemle elde edilebilir:

$$k_m \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right) = \rho C_m \frac{\partial T_m}{\partial t} \quad (3.11)$$

T_m kalıp sıcaklığı, k_m kalıp tabanı termal iletkenliği, x , y ve z Kartezyen koordinatlarıdır.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.12)$$

ρ yoğunluk, C_p belirtilen ısı, T sıcaklıktır, t zaman, k termal iletkenliktir.

3.8.3. Soğuma Aşamasında Katı İçin Matematiksel Modeller ve Varsayımlar

Soğutma kanalı analizi için kuvvet taşınımı sınır koşulu uygulanır. Isı akısı matematiksel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\dot{q} = h_f (T_w - T_c) \quad (3.13)$$

Burada h_f = ısı transfer katsayısı, T_w = kalıp tabanı ve soğutma kanalları arasındaki arayüz sıcaklığı ve T_c = soğutucu sıcaklığıdır.

$$h_f = \frac{Nu \cdot k}{d_o} \quad (3.14)$$

Burada Nu = Nusselt sayısı, d_o = ıslak çevre, k = termal iletkenlik.

Akışın tamamen geliştiğini ve soğutma kanalı yüzeyinin pürüzsüz olduğunu varsayılır.

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^n \quad (3.15)$$

Isıtma için $n = 0.4$, soğutma için $n = 0.3$, Re Reynolds sayısı, Pr Prandtl sayısıdır.

Genellikle, hem normal soğutma kanalı analizi hem de soğutma kanalı ağ analizi, soğutma sistemi performans değerlendirmesi içindir.

3.8.3.1. Soğutma Kanalı Ağı Analizi

Normal soğutma kanalı analizi aşağıdaki varsayıma dayanmaktadır. (a) Soğutma sıvısı kanallarının verimi iyidir ve (b) Soğutma sıvısı sıcaklığındaki artış ihmal edilebilir düzeydedir. Önceki varsayıma göre, soğutucu sıcaklığı, yukarıdaki denklemler gibi tanımlanabilecek normal soğutma kanalı analizinde çevrim fırlatma süresi boyunca sabit bir değer olarak kabul edilir.

Soğutma kanalı ağ analizinde soğutucu sıcaklığındaki bir artış dikkate alınmalıdır. Bir borudaki akış tamamen kapalı olduğundan, boru boyunca her konumda ortalama soğutma sıvısı sıcaklığını $T_c(x)$ hesaplamak için bir enerji korunum denklemi kullanılır. Ek olarak, toplam taşınım ısısı $q_{dönş}$, kanal girişi ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkı ile ilgilidir. Enerji korunumu teorisine dayanarak, sıkıştırılamaz sıvılar için diferansiyel konveksiyon denklemi aşağıdaki gibi listelenir:

$$dq_{conc} = \dot{m}c_p dT_c \quad (3.16)$$

Bir diferansiyel eleman için şu şekilde ifade edilebilir:

$$dq_{conv} = q_s'' P dx \quad (3.17)$$

Burada q_s'' = soğutma kanalı yüzeyinden gelen ısı akısı ve P = yüzey çevresi.

İki denklemi yerine koyarsak:

$$\frac{dT_c}{dx} = \frac{q_s'' P}{\dot{m}c_p} = \frac{P}{\dot{m}c_p} h(T_s - T_m) \quad (3.18)$$

$T_c(x)$ 'in çözümü yüzey termal durumuna bağlıdır. Moldex3D soğuk çözücünde “Sabit yüzey sıcaklığı” koşulu dikkate alınır. Bu nedenle, sıcaklık dağılımı şu şekilde tanımlanabilir:

$$\frac{T_s - T_c(x)}{T_s - T_{c,i}} = \exp\left(-\frac{Px}{\dot{m}c_p} \bar{h}\right) \quad T_s = \text{constant} \quad (3.19)$$

$\bar{h}_x$ konumuna kanal girişı noktası içindeki h'nin ortalama değeridir.

Soğutma kanallarının toplam ısı transfer hızı aşığıdaki gibi ifade edilebilir.

$$q_{conv} = \dot{m}c_p((T_s - T_{c,i}) - (T_s - T_{c,o})) = \dot{m}c_p(\Delta T_i - \Delta T_o) \quad (3.20)$$

Darcy-Weisbach denklemi ile simüle edilen normal soğutma kanalının basınç düşüşü şu şekilde gösterilir:

$$\frac{\Delta P}{\nu} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3.21)$$

ΔP =basınç düşüşü, ν =özgül ağırlık, f =sürtünme faktörü, D =kanal çapı, V =ortalama hız ve g =yerçekimi ivmesi.

Ek basınç kaybıyla ilgili olarak, bağlantı kaybı şu şekilde açıklanabilir:

$$\frac{\Delta P_J}{\nu} = K_J \frac{V^2}{2g} \quad (3.22)$$

Burada ΔP_J = bağlantı basınç düşüşü, ν =özgül ağırlık, K_J =bağlantı kayıp katsayısı, V =ortalama hız ve g =yerçekimi ivmesi.(Moldex Support,2022)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Konformal Soğutma Kanalı Tasarım Metodu

Konformal soğutma kanallarının tasarımı için sistematik bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem parça iç ve dış yüzeylerinin ofsetlenmesi ile elde edilen yüzey üzerinde soğutma kanallarının oluşturulmasıdır. Soğutma kanalları, ofsetlenen bu yüzeyler üzerinde birbirine eşit uzaklıkta olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu yöntem ile hem kanalların kavite boşluğuna olan uzaklığı hem kanalların birbirine uzaklığı sabit tutulmuştur.

4.2. Konformal Kanalların Üretimi

Bu çalışmada, konformal soğutma kanallarına sahip kalıp çekirdeklerinin üretimi için 3B metal yazdırma yöntemi olan SLS yöntemi kullanılmıştır. İnce katmanlar halinde serilen toz metal parçacıklarının lazer ile sinterlenerek birleştirilmesi esasına dayanan bu yöntem ile karmaşık geometriye sahip soğutma kanallarının imalatı mümkündür.

Çizelge 4.1’de konvansiyonel kanala sahip kalıp çekirdeklerinin talaşlı imalat yöntemi ile üretimi, konformal soğutma kanallarına sahip kalıp çekirdeklerinin SLS metal yazdırma yöntemi ile üretiminde karşılaşılan yaklaşık maliyetler görülmektedir. Talaşlı imalat ile üretilecek konvansiyonel kanala sahip kalıp için 30.12.2021 tarihinde alınan fiyat 15.000 TL’dir. SLS 3B metal yazdırma yöntemi ile üretilecek dişi ve erkek kalıp çekirdekleri için 05.01.2022 tarihinde alınan fiyat 12.800 Euro’dur. Diğer kalıp elemanlarının fiyatlarının eklenmesiyle konformal kanala sahip kalıp maliyeti 205.000 TL’yi bulmaktadır. Konformal kanala sahip kalıp üretimi konvansiyonel kanala sahip kalıp imalatına göre yaklaşık olarak 14 kat daha yüksek maliyete sahiptir.

Çizelge 4.1. Kalıp çekirdeklerinin yaklaşık üretim maliyetleri

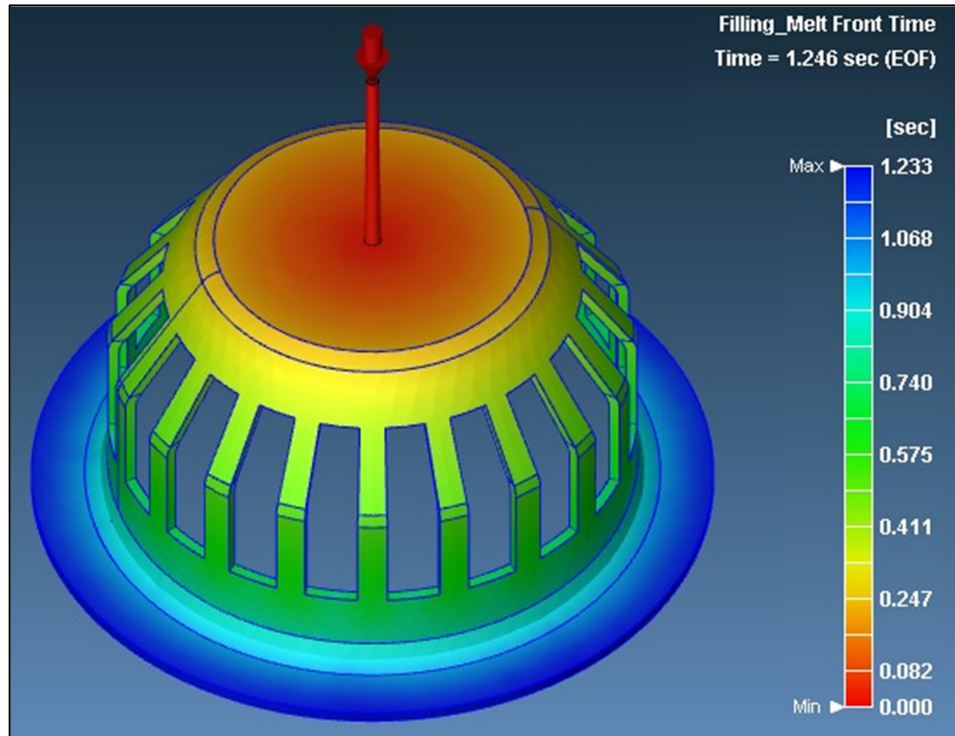
Üretim Yöntemi	Talaşlı İmalat	SLS (3B Metal Yazdırma)
Kanal Tipi	Konvansiyonel	Konformal
Maliyet	15.000 TL	205.000 TL

4.3. Soğutma Süresi Hesabı

Soğutma süresi, 3mm cidar kalınlığına sahip plastik parça için Eşitlik 2.9’de ifade edilen formül kullanılarak pratik olarak hesaplandığında 18 s değeri elde edilmiştir. Her iki soğutma kanal tasarımı için soğutma ve ütüleme süreleri aynı tutulmuştur.

4.4. Analiz sonuçları

Konformal ve konvansiyonel soğutma kanallarına sahip plastik enjeksiyon kalıplarının soğutma etkinliklerinin parça kalitesi açısından karşılaştırılması için Moldex analizi kullanılarak dolum, ütüleme, soğuma ve çarpılma analizleri yapılmıştır. Konformal ve konvansiyonel doğrusal olmak üzere iki farklı kanal tipi için analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi konformal kanala sahip kalıpta, kalıp boşluğu 1,246 s’de tamamen dolmuştur. Kalıp boşluğunun yolluk girişinden itibaren tüm bölgelerde dolum zamanı renk skalası şeklinde görülmektedir. Kırmızı renkli kısımlar parçanın ilk dolmaya başladığı yerdir. Mavi renkli kısımlar ise parçada en son dolan kısımlardır.

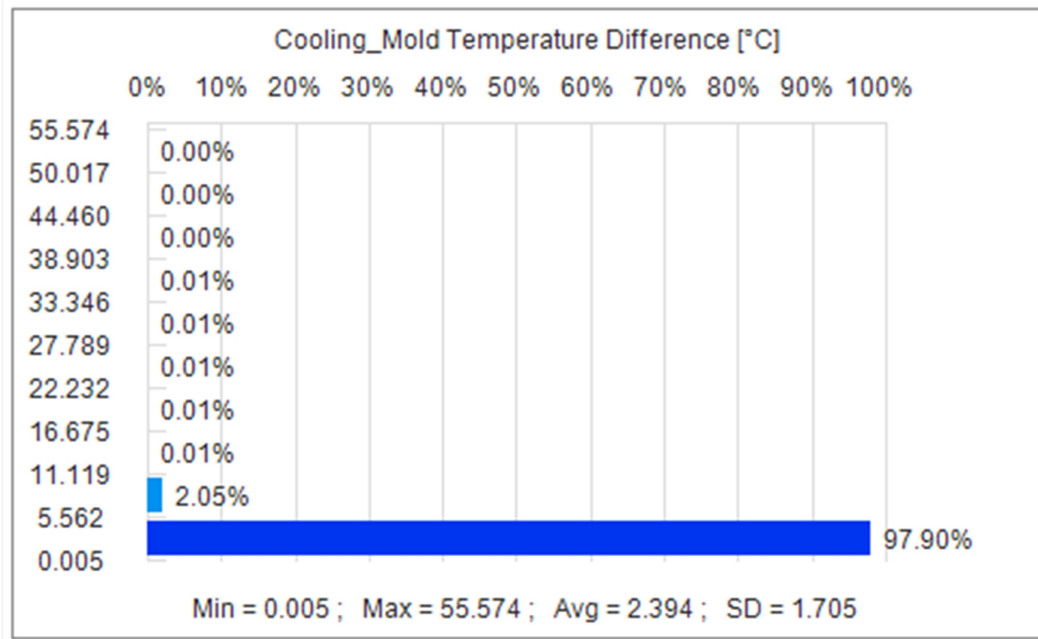


Şekil 4.1. Kalıp boşluğunun dolum süresi

Konvansiyonel kanala sahip kalıbın kalıp boşluğu 1,266 s’de dolmuştur. Her iki kanal içinde aynı kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon parametreleri kullanıldığı için dolum süreleri birbirine oldukça yakındır.

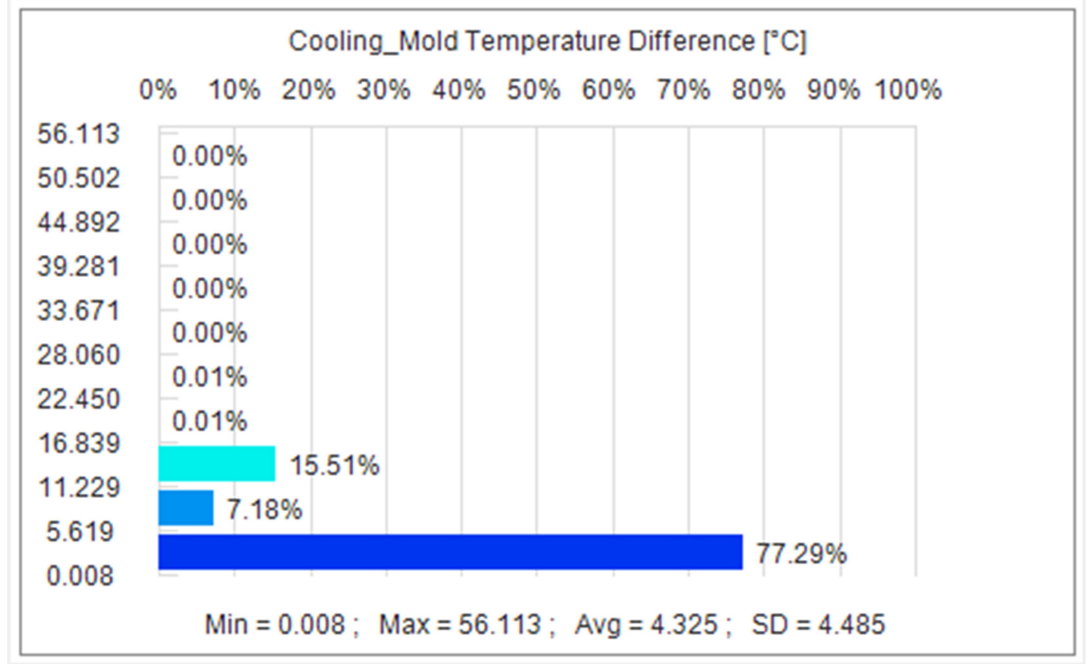
Her iki kalıp için de 9 s ütüleme ve 18 s soğutma yapılmıştır. Yapılan dolum, ütüleme, soğuma ve çarpılma analizleri sonucu aşağıdaki verilere ulaşılmıştır.

Şekil 4.2’de konformal kanala sahip kalıptaki sıcaklık farklılıkları gösterilmiştir. Konformal kanallı kalıbın yüzeyindeki sıcaklık farkları, %98 oranda 5,5 °C’nin altında kalmış. Sıcaklık farkının düşük olması kalıp yüzeyinde çok sıcak veya çok soğuk bölgelerin olmadığı anlamına gelir. Yani konformal kanala sahip kalıpta homojen bir sıcaklık dağılımı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. Konformal kanallı kalıptaki sıcaklık farklılıkları

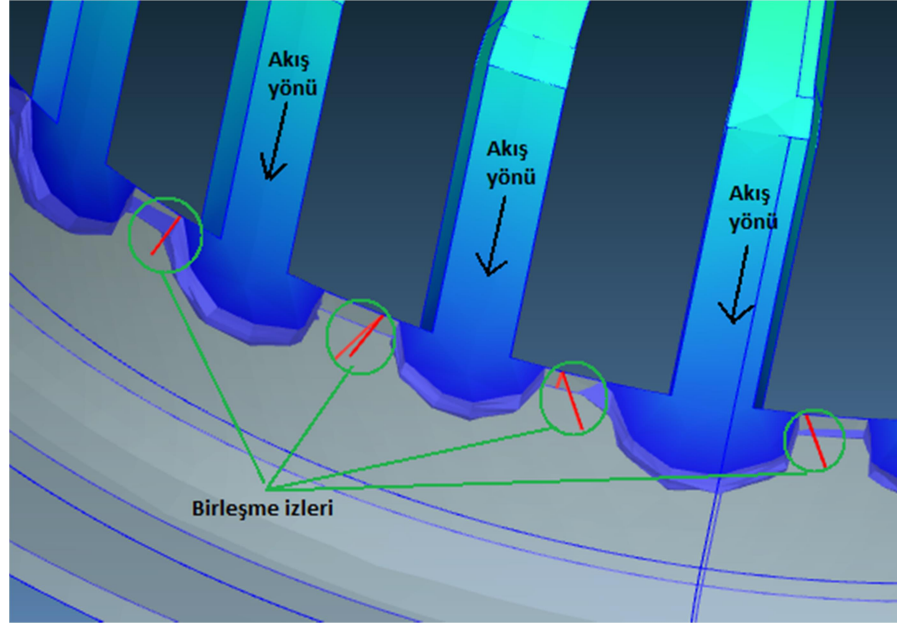
Konvansiyonel kanallı kalıpta ise kalıp sıcaklığında 5,5 °C’den daha yüksek sıcaklık farkı görülmüştür (Şekil 4.3).Sıcaklık farkının yüksek olması kalıbın bazı bölgelerinin daha sıcak bazı bölgelerinin daha soğuk olduğu anlamına gelmektedir. Konvansiyonel kalıp homojen olmayan sıcaklık dağılımı göstermektedir.



Şekil 4.3. Konvansiyonel kanallı kalıptaki sıcaklık farklılıkları

Kalıplardaki sıcaklık dağılımı, enjeksiyon sırasında eriyik malzemenin sıcaklığını, eriyik sıcaklığı malzemenin viskozitesini etkiler. Malzeme viskozitesi de eriyik malzemenin akış hızını etkiler. Sonuç olarak kalıp sıcaklığı dolaylı yoldan olsa da malzeme akış hızını etkiler. Kalıbın sıcak yüzeylerinde malzeme daha hızlı akarken soğuk yüzeylerde akış yavaşlayacaktır. Homojen olmayan kalıp yüzeylerinde akış bazı bölgelerde hızlı gerçekleşirken bazı bölgelerde yavaşlayacaktır. Enjeksiyon hızındaki yavaşlık birleşme izlerine neden olacaktır.

İki veya daha fazla akış hattının birleştiği ve kaynaştığı yerlerde oluşan çizgilere birleşme izleri denir. Tasarlanan filtre parçasındaki dar kesitlerdeki akış yönü ve burada oluşacak olan birleşme çizgileri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



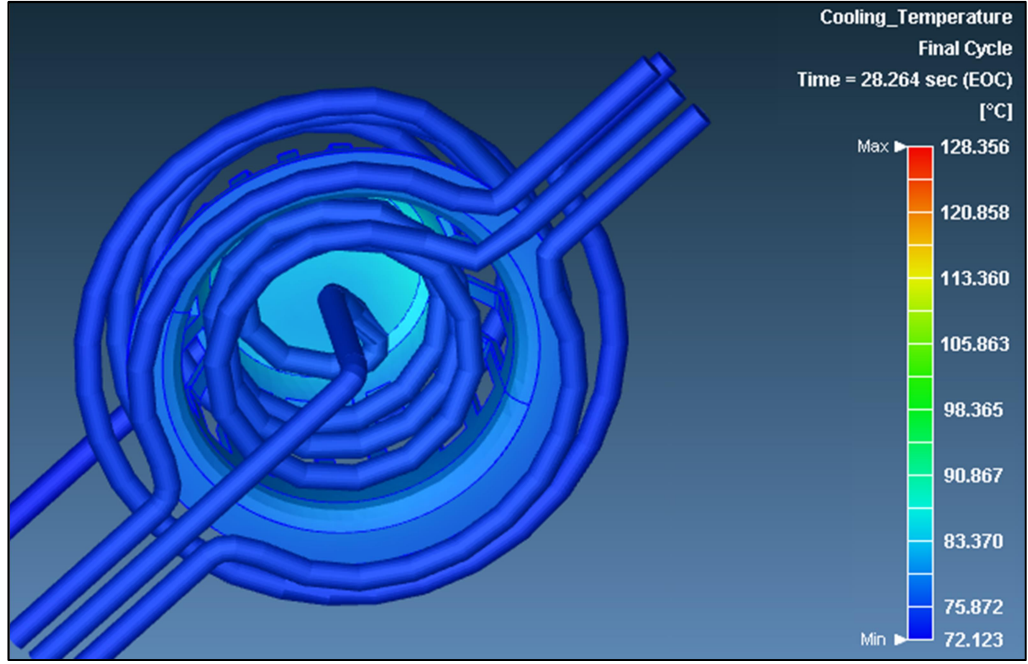
Şekil 4.4. Birleşme çizgileri ve eriyik malzemenin akış yönü

Birleşme izleri birleşme bölgeleri ne kadar soğuk olursa o kadar belirgin olurlar. Birleşme izlerinin sıcaklığı kadar birleşme açısının da önemi büyüktür. İki akışı yönünün beraber akarak yan yana gelip birleşip devam etmeleri istenir. Eğer iki akışın tam karşılıklı çakışarak birleşmesi istenmeyen bir durumdur. Birleşme açısı 0° ve 130° arası değişebilir. Birleşme açısının 0° olması iki akış yönünün dik olarak karşılaştığı anlamına gelmektedir. Yani ne kadar düşük birleşme açısı var ise daha az güçlü bir birleşme olmaktadır.

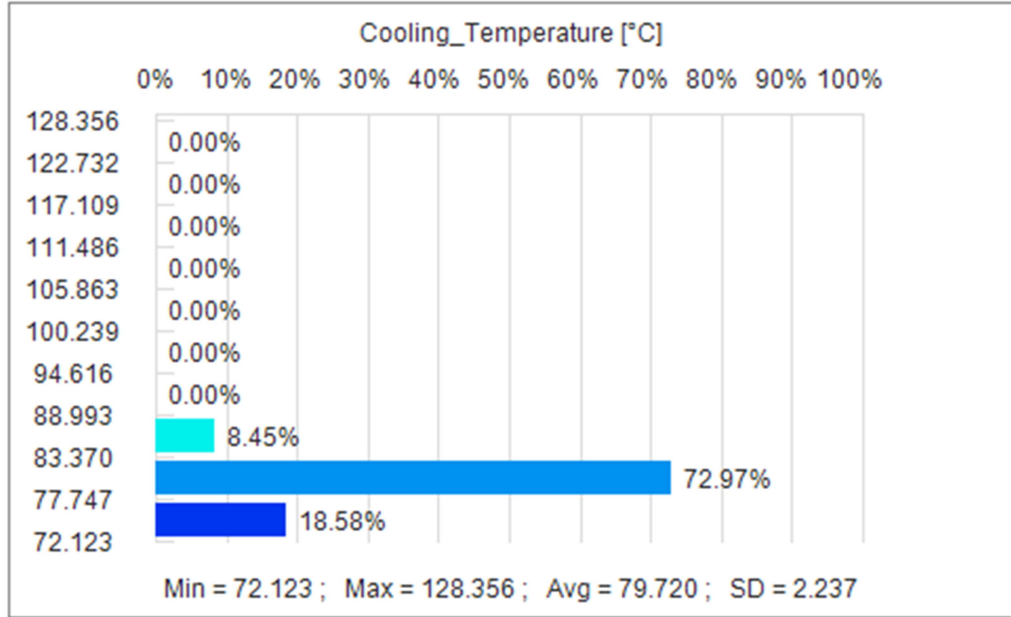
İki kalıptan çıkan parçalardaki akış birleşme izleri kıyaslandığında, konformal kanallı kalıpta daha homojen bir kalıp sıcaklığı olduğundan birleşme izlerinin hepsi birbirine yakın sıcaklıklarda ve daha düzgün şekilde gerçekleşeceği görülmüştür.

Dolayısıyla homojen bir soğutmanın parçanın yüzey kalitesine doğrudan bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Soğutma evresine geçildiğinde konformal kanallı kalıptaki parçanın sıcaklığının $72-89^\circ\text{C}$ 'nin arasında olduğu analiz sonucunda elde edilmiştir. (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6) Parça yüzeyinin %73'ü soğuma sonunda $78-83^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahiptir. Şekil yüzeyini içten ve dıştan takip eden konformal kanallar sayesinde parçada eşit bir soğuma gerçekleşmiştir. Şekil 4.5'te soğuma zamanı renk skalası verilmiştir.



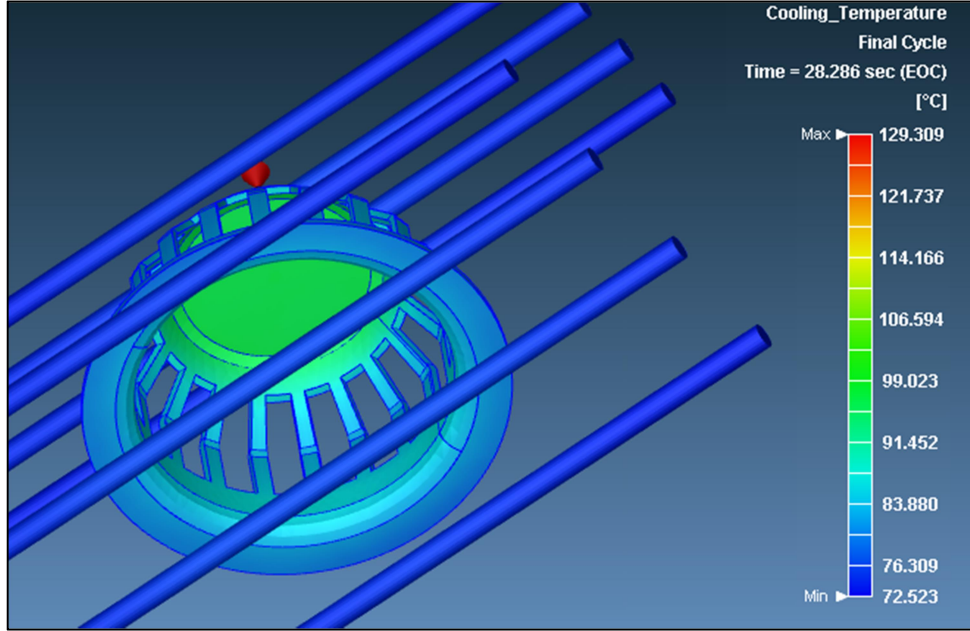
Şekil 4.5. Konformal kanallı kalıpta soğuma sıcaklığı



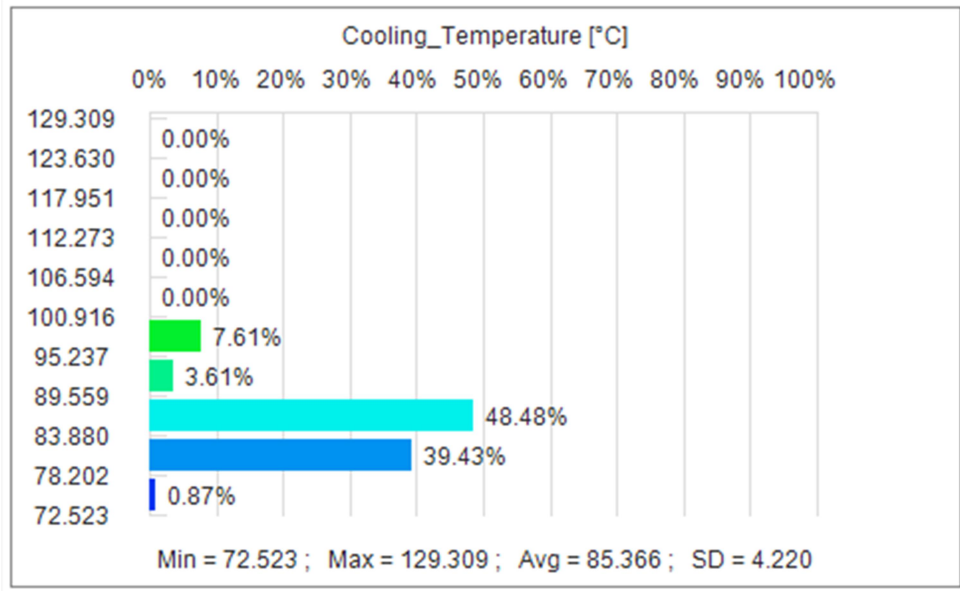
Şekil 4.6. Konformal kanallı kalıpta soğuma sıcaklığı grafiği

Konvansiyonel kanallı kalıptaki parça sıcaklığının 100 °C'ye vardığı görülmüştür. Enjeksiyon sonucunda parçanın % 11'unun kalıptan çıkarma sıcaklığından (89 °C) fazla olduğu Şekil 4.8'de görülmektedir. Soğuma zamanının renk skalasının verildiği Şekil 4.7'de parçanın iç yüzeyinin sıcak kaldığı anlaşılmaktadır.

Konvansiyonel kanalların yalnızca parçanın altından ve üstünden geçebildiği için parçanın iç kısmının daha sıcak kalacağı öngörülmüştü. Yapılan analiz sonuçları bu tahmini doğrulamıştır.



Şekil 4.7. Konvansiyonel kanallı kalıpta soğuma sıcaklığı

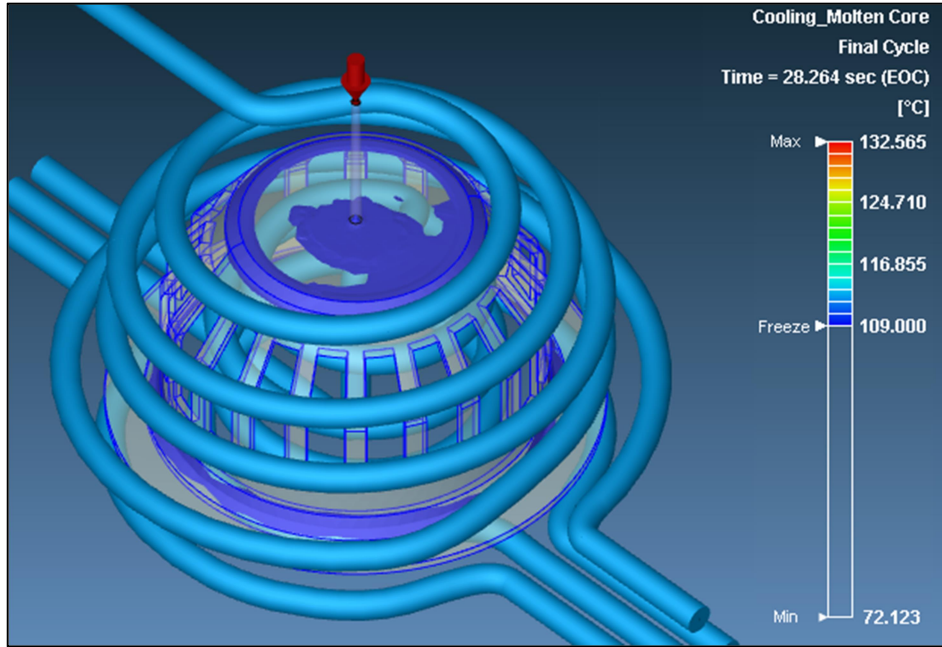


Şekil 4.8. Konvansiyonel kanallı kalıpta soğuma sıcaklığı grafiği

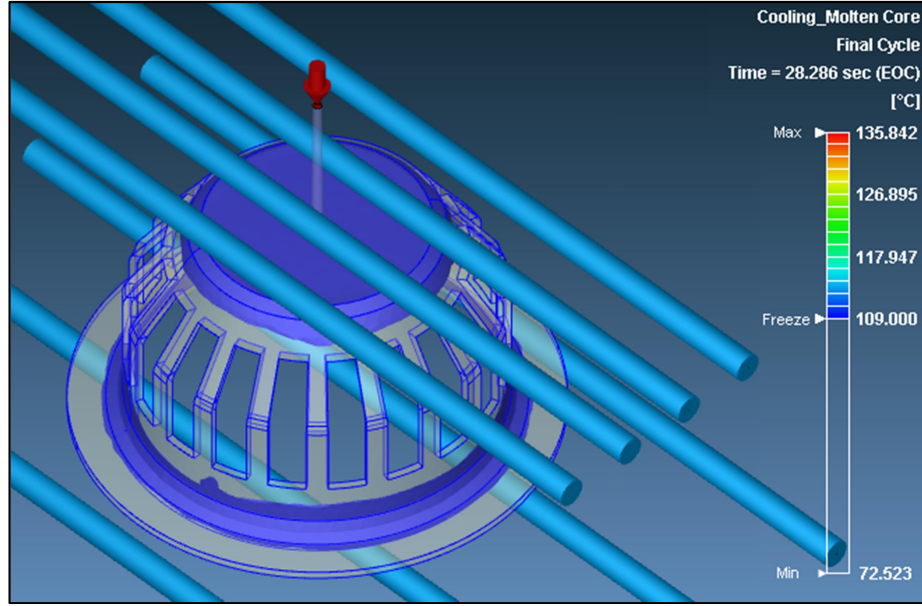
Konvansiyonel kanallı kalıptaki homojen olmayan sıcaklık dağılımının bir diğer etkisini parça yüzeyinde kalan tam donmamış eriyik bölgelerden de anlayabiliriz.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da kalıplardan çıkacak parçalar üzerinde tam donmamış eriyik bölgeler görülmektedir. Konvansiyonel kalıptan çıkacak parça üzerinde eriyik halde kalacak bölge, konformal kanallı kalıptan çıkacak parçadaki eriyik bölgeye göre daha geniş alana sahiptir.

Parça üzerinde kalan eriyik bölgelerin konumu ve sıcaklığı önemlidir. Soğutma sonunda eriyik kalan bu bölgeler parça kalıptan çıkınca soğumaya devam edeceği için parçada çekmeye veya çökmeye sebep olacaktır. Eriyik kalacak bölgelerin değerlendirilmesi istenilen parça yüzey kalitesi açısından önemlidir. Yapılacak değerlendirmelere göre bu bölgelerde daha kaliteli bir soğutmanın yolları araştırılmalıdır.



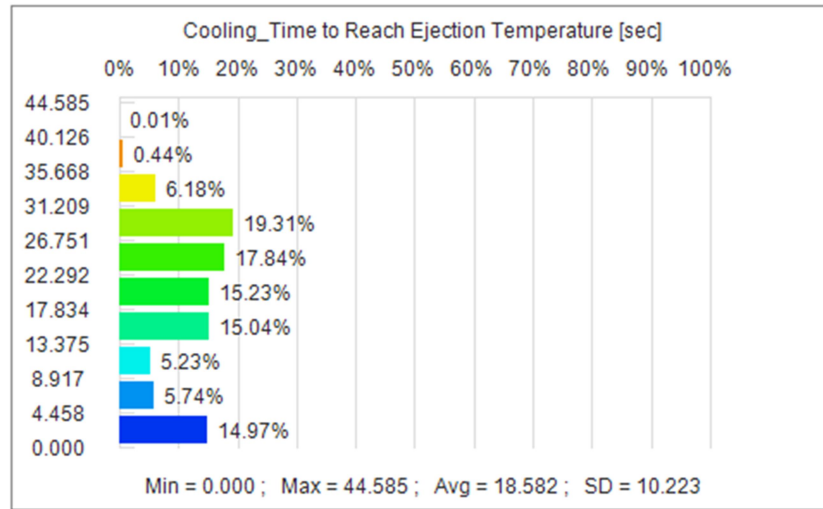
Şekil 4.9. Konformal kanallı kalıpta eriyik halde kalan bölgeler



Şekil 4.10. Konvansiyonel kanallı kalıpta eriyik halde kalan bölgeler

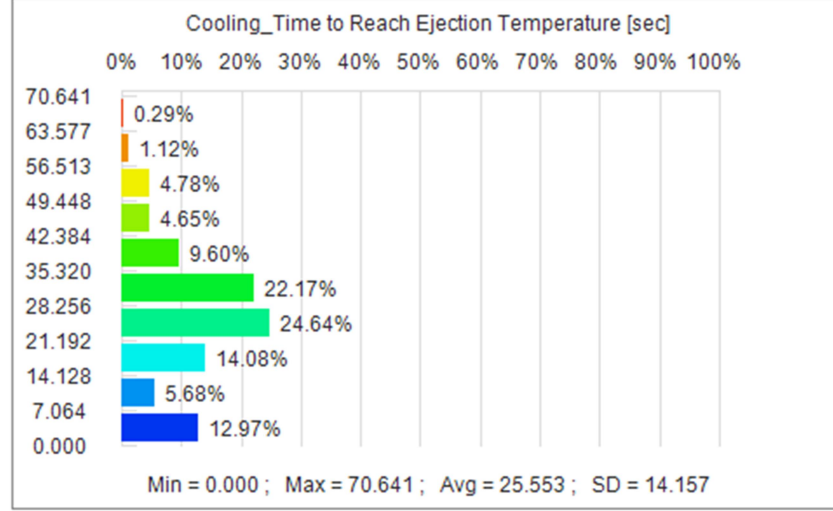
Konvansiyonel kanallı kalıptan çıkacak olan parçada enjeksiyon sonunda kalıptan çıkarma sıcaklığının (89 °C) üzerinde kalan donmamış eriyik yüzeylerin daha geniş alana sahip olduğu analizler sonucu elde edilmiştir. Çıkarma sıcaklığı üzerinde kalan bölgelerin fazla olması, parçanın daha sıcak olduğunu ve oda sıcaklığına ulaşması için geçecek olan sürenin daha fazla olacağı sonucunu vermektedir.

Enjeksiyon sıcaklığına ulaşma sürelerine baktığımızda konformal kanallı kalıpta 40 s'nin altındadır. (Şekil 4.11)



Şekil 4.11. Konformal kanallı kalıpta enjeksiyon sıcaklığına ulaşma süresi

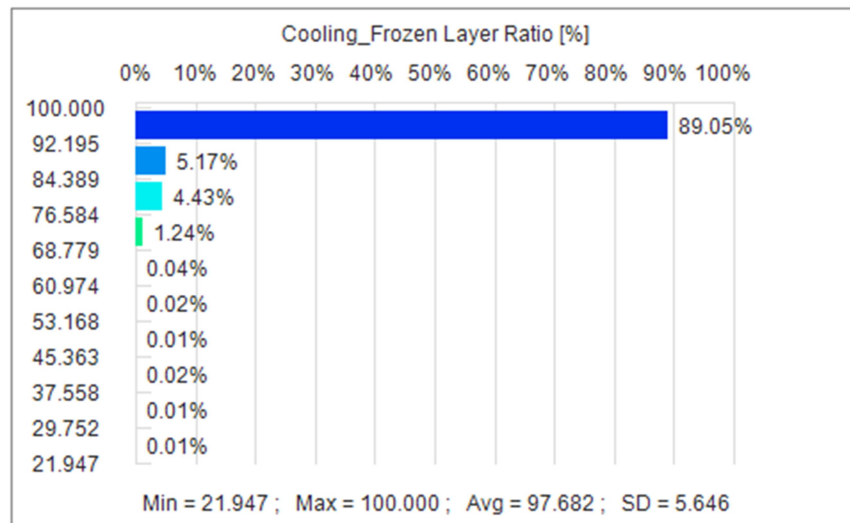
Konvansiyonel kanallı kalıpta ise parçanın enjeksiyon sıcaklığına ulaşma süresi 64 s'lere ulaşmaktadır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Konvansiyonel kanallı kalıpta enjeksiyon sıcaklığına ulaşma süresi

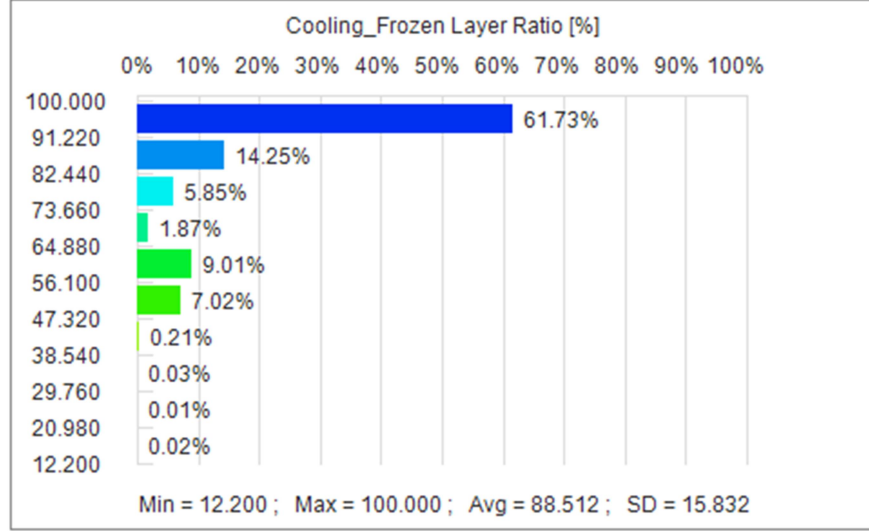
Konvansiyonel kanala sahip kalıptan çıkacak parçanın enjeksiyon sıcaklığına gelme süresi, konformal kanala sahip kalıptan çıkacak parçaya kıyasla % 60 daha fazla süreye ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Konformal kanallı kalıpta donmuş yüzey oranı %90'a yakındır. Homojen soğumanın parçadaki donmuş yüzey oranına etkisi oldukça yüksektir.



Şekil 4.13. Konformal kanallı kalıpta donmuş yüzey oranı

Konvansiyonel kanallı kalıpta donmuş yüzey oranı % 60'larda kalmıştır. Konvansiyonel kanallar eşit soğuma sağlayamadığı için parçada enjeksiyon sonunda halen sıcak olan bölgeler kalmaktadır.



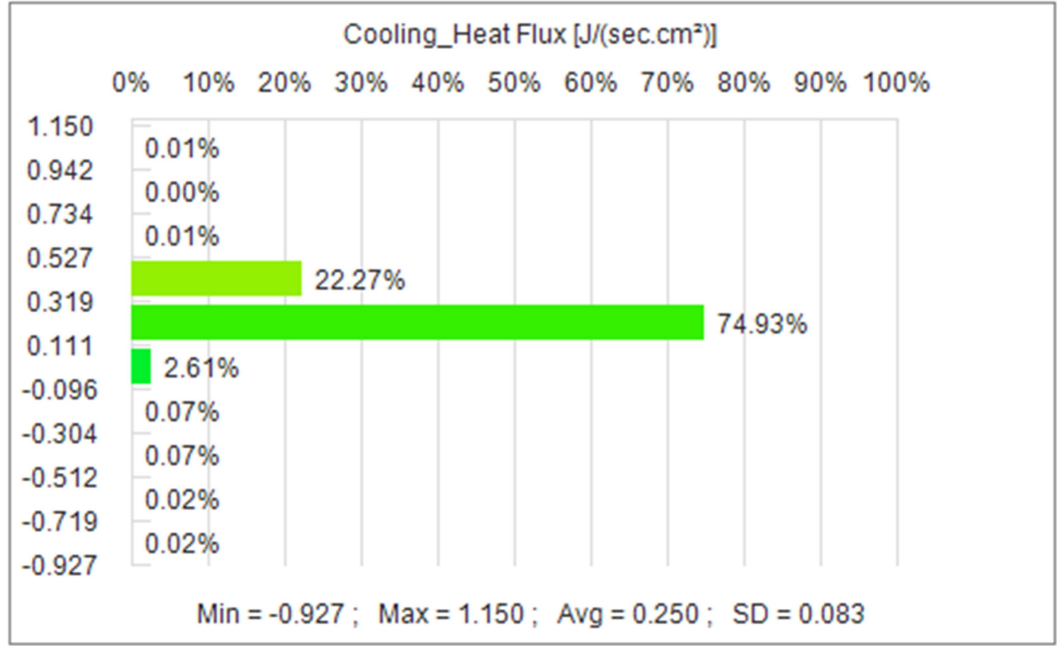
Şekil 4.14. Konvansiyonel kanallı kalıpta donmuş yüzey oranı

33 s belirlenen çevrim süresi sonucunda elde edilen verilere göre, konvansiyonel kanalların analizi yapılan filtrenin soğuması için yeterli ve verimli olmayacağı anlaşılmıştır.

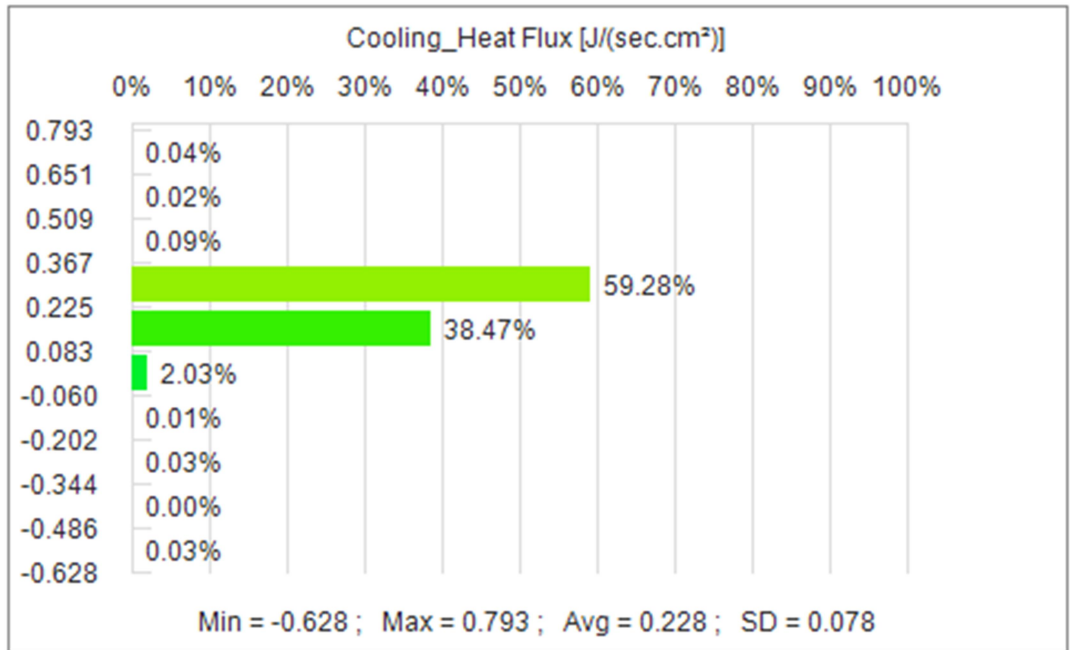
Konformal kanallı kalıpta donmuş yüzey oranının fazla olması konvansiyonel kanallı kalıba göre daha homojen ve daha fazla soğumanın olduğunu göstermektedir. Homojen bir soğumanın daha kaliteyi yüzey vereceği sonucu açıktır. Elde edilecek üründe kaliteli yüzey tercih edileceği için konformal kanalların kullanımı daha uygundur.

Soğutma kanallarının verimliliğini kıyaslayabilmek için parça/kalıp yüzeyinin ısı akısına bakmak gerekir. Bu değer, parça-kalıp arayüzünün birim alanı (akı) başına ısı yayılım oranı anlamına gelir.

Konformal kanallı kalıpta ısı akısı ortalama $0.250 \text{ J}/(\text{s.cm}^2)$ iken konvansiyonel kanallı kalıpta ortalama $0.228 \text{ J}/(\text{s.cm}^2)$ 'dir.



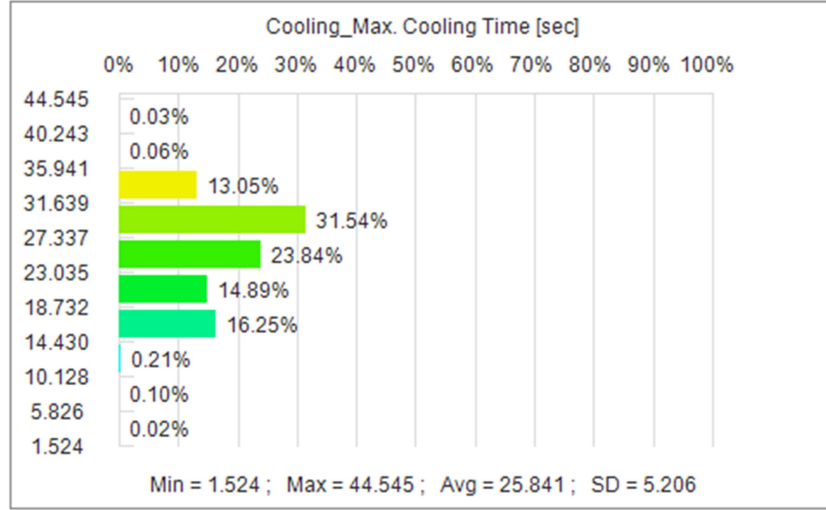
Şekil 4.15. Konformal kanallı kalıpta ısı akısı



Şekil 4.16. Konvansiyonel kanallı kalıpta ısı akısı

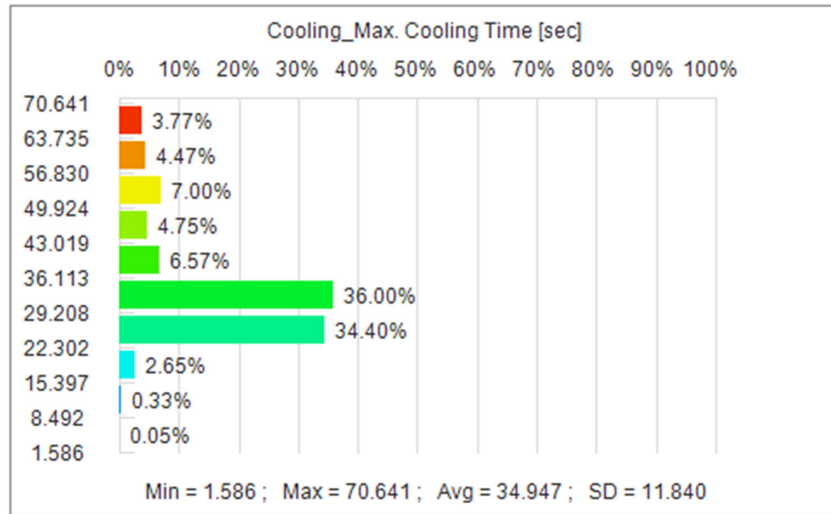
Isı akısının fazla olması soğutma kanallarının verimliliğini göstermektedir. Konformal kanallar ile konvansiyonel kanallara göre daha verimli bir soğuma elde edilmiştir. Daha verimli soğuma soğuma çevrim süresini doğrudan ve olumlu şekilde etkilemektedir.

İki kanal tipi için ideal olan soğuma süreleri analizler sonucu elde edilmiştir. Konformal kanallı kalıpta ideal maksimum soğuma süresi 44,5 s gözlemlenmiştir.



Şekil 4.17. Konformal kanallı kalıpta maksimum soğuma süresi

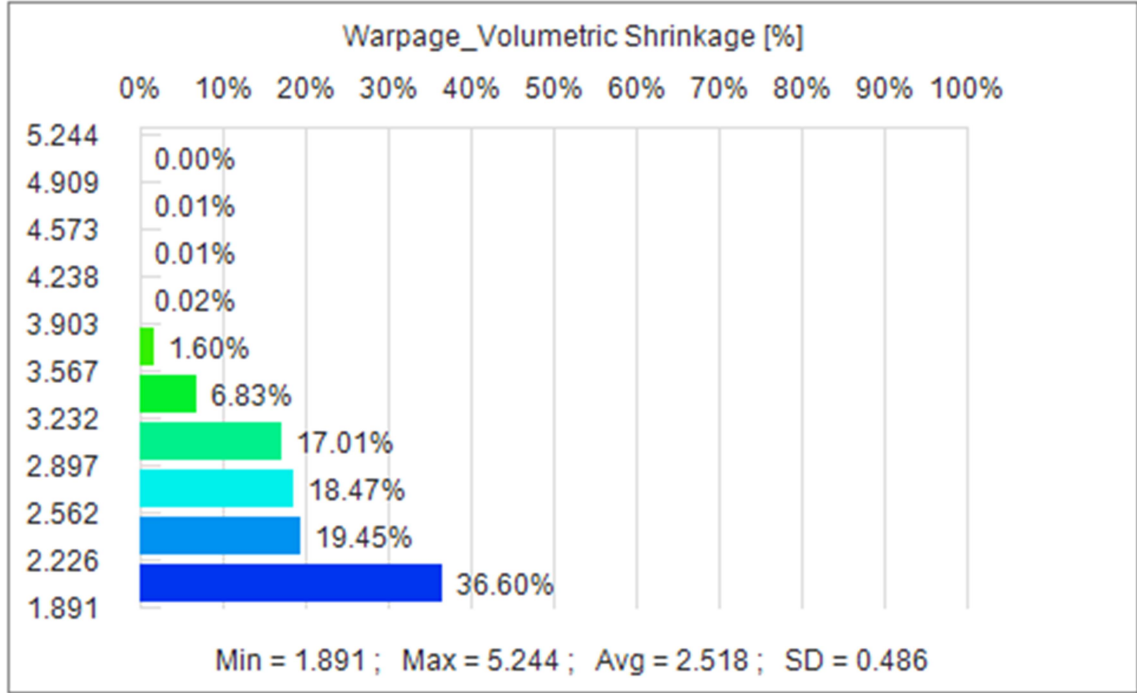
Konvansiyonel kanallı kalıpta maksimum soğuma süresi ise 70 s'yi bulmaktadır.



Şekil 4.18. Konvansiyonel kanallı kalıpta maksimum soğuma süresi

Kıyaslama yapabilmek adına iki akış simülasyonu için de çevrim süresi 33 s olarak belirlenmişti. Fakat analizler sonucu konvansiyonel kanala sahip kalıptaki parçanın soğuması için ihtiyaç duyduğu sürenin 70 s olduğu görülmüştür. Konvansiyonel kanala sahip kalıptaki parçanın tahmin edildiği gibi daha geç soğuyacağı analizler sonucu doğrulanmıştır (Şekil 4.18).

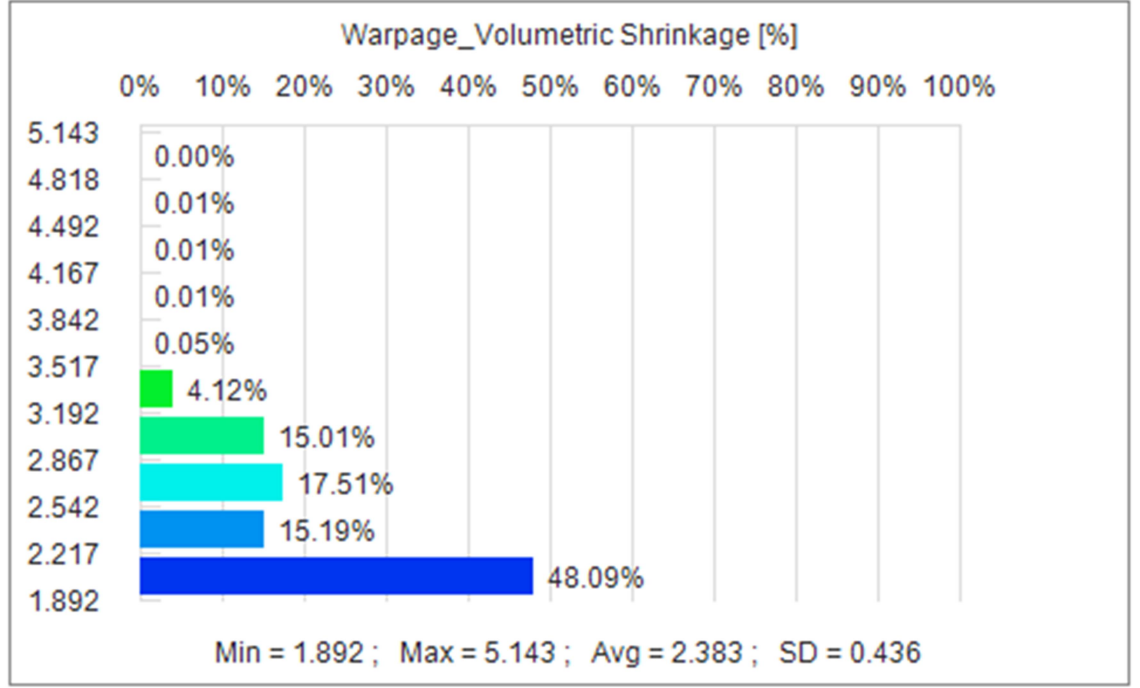
Daha fazla soğuma süresine ihtiyaç duyması belirlediğimiz çevrim süresi (33 s) sonucunda konvansiyonel kanala sahip kalıptaki parçada Şekil 4.11’de görüldüğü gibi sıcak bölgeler kalacağını ve parçanın kalıptan çıktığında soğumaya devam edeceğini gösterir. Kalıbın dışında devam eden soğuma, parçada çarpılmaya sebep olacaktır. Analizler sonucu konvansiyonel kanallı kalıpta hacimsel büzülmenin ortalama % 2,51 olduğu elde edilmiştir.



Şekil 4.19. Konvansiyonel kanallı kalıpta hacimsel büzülme

Parçada oluşacak boyutsal farklılıklar enjeksiyon kalıplamada istenmeyen bir durumdur. Enjeksiyon sonunda istenilen boyut ve yüzey kalitesi toleranslarında parça elde etmek istenir. Soğuma süresi ve soğuma sistemini verimliliği parça boyut ve yüzey kalitesi için çok önemlidir.

Daha verimli soğuma sağlayan konformal kanallı kalıpta hacimsel büzülme parçanın yaklaşık yarısında % 2,2'nin altında gözlenip, ortalama hacimsel büzülme %2,38'dir.



Şekil 4.20. Konformal kanallı kalıpta hacimsel büzülme

5. SONUÇ

Bu çalışmada, plastik enjeksiyon kalıpcılığında konformal soğutma kanallarının soğutma verimliliğine ve parça kalitesine etkileri incelenmiştir. Enjeksiyon kalıpcılığında, daha kısa sürede daha kaliteli ürün elde edilmesi amaçlanmıştır. Dairesel geometriye sahip Ø180x90 mm boyutlarında bir plastik parça için çalışma yapılmıştır. Parça cidar kalınlığı tüm bölgelerde eşit olup 3 mm'dir. Parça malzemesi olarak geniş kullanım alanına sahip ABS malzeme tercih edilmiştir.

Kalıp yüzeyini belirli bir mesafede takip eden ve birbirlerine belirli bir mesafede konumlanan soğutma kanallarının tasarımı yapılmıştır. Konformal soğutma kanallarının verimliliğini karşılaştırmak için konvansiyonel soğutma kanal tasarımı da yapılmıştır.

Enjeksiyon süreçlerinin analizi için Moldex programı kullanılarak konformal ve konvansiyonel soğutma kanalları için akış simülasyonları yapılmıştır. Parça kalitesi ve soğutma verimliliği bakımından kıyaslama yapabilmek için akış simülasyonları aynı parametrelerde gerçekleştirilmiştir.

İki farklı kanal için gerçekleştirilen akış simülasyonlarının çevrim süreleri 33 s olarak belirlenmiştir. Fakat daha kaliteli parça elde edebilmek için konformal kanallı çevrimde ideal çevrim süresi 40 s iken konvansiyonel kanallı kalıpta ideal çevrim süresi 70 s'ye ulaşmaktadır.

Aynı parametreler ile gerçekleştirilen simülasyonlardan alınan sonuç, konformal soğutma kanallarının konvansiyonel soğutma kanallarına göre daha homojen ve daha verimli bir soğutma sağladığını kanıtlamıştır. Konformal soğutma kanallarının sağladığı homojen soğutmanın çevrim süresini kısaltacağı ve parçada oluşabilecek çarpılma ve çökme gibi yüzey ve boyut deformasyonlarını azaltacağı görülmüştür.

Analiz sonucunda konformal kanala sahip kalıp ile daha kısa sürede daha kaliteli ürün elde edilebileceği görülmüştür. Daha kısa sürede soğuma daha kısa çevrim sürelerini, daha kısa çevrim süreleri de daha hızlı üretim sağlamaktadır.

Plastik enjeksiyon kalıplama genellikle seri yapılan bir imalat yöntemidir. Enjeksiyon çevrim süreleri maliyeti ciddi şekilde etkilemektedir. Çevrim süresinin düşmesi parça maliyetini de düşürecektir. Konformal soğutma kanalları sayesinde daha kısa sürede, daha fazla ve daha kaliteli ürün edilecektir.

Konformal kanallı kalıpların üretim maliyetinin alınan fiyat tekliflerine göre konvansiyonel kanallı kalıpların üretim maliyetinden fazla olduğu görülmüştür. Ancak konformal soğutma kanallarının sağladığı homojen sıcaklık dağılımı ve hızlı soğutma ile daha düşük çevrim süreleri ve daha kaliteli yüzeye sahip ürün elde edebilecek olmak bu maliyet farkını göz ardı edilebilir kılmaktadır. Hızlı ve kaliteli soğutmanın seri üretimde değeri büyüktür.

KAYNAKLAR

- Abalı, B.E., Koçak, M. 2005. *Plastik Enjeksiyon Kalıbı Tasarımı*, Lisans tezi, İstanbul, 141 s.
- A. B. Badiru, V. V. Valencia, D. Liu 2017. *Additive Manufacturing Handbook*. New York: CRC Press.
- A. R. R. Bineli, A. P. G. Peres, A. L. Jardini, and R. M. Filho. 2011. “Direct Metal Laser Sintering (DMLS): Technology for Design and Construction of Microreactors”, 6th Brazilian Conference on Manufacturing Engineering, Caxias do Sul, Brazil.
- Agazzi, A., Sobotka, V., LeGoff, R., Jarny, Y. 2013. *Optimal cooling design in injection moulding process A new approach based on morphological surfaces*, Applied Thermal Engineering 52, 170-178.
- Akyüz, Ö. F. 1998. *Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş*. İstanbul: Pagev Yayınları, 45-89.
- Arburg Injection Mold. *Arburg Injection moulding machines in operation worldwide*, 12 Kasım 2021 tarihinde <http://www.arburg-injection-moulding-machines.com> adresinden erişildi.
- Bayer Engineering Polymers Design Guide, 2004. *Mold Design*
- B. Duman, and M. C. Kayacan. 2017. “Doğrudan Metal Sinterleme/Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini”, SDU Teknik Bilimler Dergisi, vol. 7, no. 1, pp. 12-28.
- Boci'ga, E., Jaruga, T., Lubczynska, K., and Gnatowski, A. (2010). *Warpage of injection moulded parts as the result of mould temperature difference*. Archives of Materials Science and Engineering,
- Buldu, L. 2007. *Enjeksiyon Parametrelerinin Bazı Mühendislik Plastiklerinin Akış Uzunluğuna Etkisinin Araştırılması*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Butafl Klima Ltd. teknik ürün tanıtım yazısı, “Kalıp-Yağ Soğutmasının İşletme Maliyetlerine Etkileri, ürün tanıtı 15 Ekim 2021 tarihinde <http://www.kalipdunyasi.com.tr/tr/urun.asp?ID=27&Grup=> adresinden erişildi.
- Çelik Metal ürün tanıtımı 15 Kasım 2021 tarihinde <https://www.celikmetal.com.tr/urunlerimiz/detay/1-2311> adresinden erişildi.
- Çetin, A. 2016. *Katkı maddelerinin ve enjeksiyon parametrelerinin plastik ürünün mekanik özelliklerine ve UV direncine etkisinin deneysel araştırılması*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- ÇINAR Y. 2006. “Plastik enjeksiyon kalıpcılığında verimlilik ve maliyet”, http://www.kalip.net/b2b/kb/tr/index.php?page=index_v2&id=35&c=2, “Taybor Mak. Kalıp San.”
- D. Jamie, “3D Printing vs CNC Machining: Which is Best for Prototyping” Mar. 16, 2018. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/>. [Accessed Dec. 14, 2019].
- Demirci, U., Altan, M., Ternane, F., Benachour, M., Sebaa, F., Benachour, N., Yaman, S., Çakır, O., Dzhemalyadinov, R., and Skakun, V. (2020). *Warpage Analysis of Injection Molded Thin-Walled Chassis Part by RSM and FEM*. Journal Of Advances in Manufacturing Engineering, 1(2), 63-70.
- Dimla, D., Camilotto, M., and Miani, F. (2005). *Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools*. Journal of Materials Processing Technology, 164, 1294-1300.

Dimitrov, D., & Moammer, A. 2010. *Investigation towards the impact of conformal cooling on the performance of injection moulds for the packaging industry*. Journal for New Generation Sciences, 8(1), 29-46. Retrieved in 14 June 2014, from http://reference.sabinet.co.za/webx/access/electronic_journals/newgen/newgen_v8_n1_a3.pdf

Doç. Dr. Evcin A., *Polimer Malzemeler*, 15 Ekim 2021 tarihinde <http://blog.aku.edu.tr/evcin/files/2017/05/10-polimer-uygulamaları-elastomerler.pdf>, adresinden erişildi.

Ekin Makine ürün tanıtımı 20 Kasım 2021 tarihinde <https://ekinmakina.com/wp-content/uploads/online-katalog.pdf> adresinden erişildi.

EKREN O. 2007 “*Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Soğutma*”, Soğutma Dünyası Dergisi Sayı 39,ESSİAD.

ETİSAN Firması Uygulama örneği, “*Plastik Kalıp Soğutma Sistemi Uygulaması*”, <http://www.etisanisi.com.tr/tr.html> , Erişim 2021

Wikipedia. *Plastik*, 11 Kasım 2021 tarihinde <https://tr.wikipedia.org/wiki/Plastik> adresinden erişildi.

Göktaş, M. 2021. *Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Tabakalı Obje İmalatı Yöntemi İle Şekil Uyumlu Soğutma Kanalı Üretimi Ve Deneysel İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara

Güneş, A.T., 2005. *Plastik Enjeksiyon Kalıpları*, Ankara: Makine Mühendisleri Odası

Hassan, H., Regnier, N., Pujos, C., Arquies, E., Defaye, G. 2010. *Modelling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding*, Applied Thermal Engineering, 30(13),1547-1557.

I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker 2015 *Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. Oxford: Springer.

Injection Handbook, 1988

İçer, E. 2014. *Bilgisayar Destekli Plastik Enjeksiyon Kalıbı Tasarımı Ve Tasarım Esaslarına Göre İmalatı*, Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

J. O. Milewski, 2017. *Additive Manufacturing of Metals, From Fundamentals Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants and Custom Jewelry*. Cham: Springer Series in Materials Science.

Joseph C. 2000. *Design For Injection Molding*, Ph.D.,PE,

Kafalı M. S. 2011. *Bilgisayar Destekli Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri,Yüksek Lisans Tezi.

Khan, M., Afaq, S.K., Khan, N.U., and Ahmad, S. 2014. *Cycle time reduction in injection molding process by selection of robust cooling channel design*. International Scholarly Research Notices, 2014,

Kitayama, S., Tamada, K., Takano, M., and Aiba, S. 2018. *Numerical optimization of process parameters in plastic injection molding for minimizing weldlines and clamping force using conformal cooling channel*. Journal of Manufacturing Processes, 32, 782-790.

Koçak, M., Abalı, B.E. 2005-2006. *Plastik Enjeksiyon Kalıbı Tasarımı, Bitirme Tasarım Projesi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Koyun, Ç. 2005. *Bilgisayar Destekli Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı ve Analizi*, Yüksek Lisans Tezi,Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Köse, E. 2006. *Plastik enjeksiyonda proses ve kalıp kaynaklı sorunların giderilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 43s.
- LG Chem ürün tanıtımı, *ABS ABS HF38020* Kasım 2021 tarihinde [https://ravagosp.com/DATASHEET/ABS/LG%20CHEM/LG%20ABS%20HF%20380%20\(NATURAL\).pdf](https://ravagosp.com/DATASHEET/ABS/LG%20CHEM/LG%20ABS%20HF%20380%20(NATURAL).pdf) adresinden erişildi.
- M. Brandt 2017. *Laser Additive Manufacturing*, Materials, Design, Technologies and Applications. Duxford: Woodhead Publishing.
- M. Vaezi, H. Seitz, and S. Yang. 2013. “A Review on 3D Micro-Additive Manufacturing Technologies”, International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, vol. 67, pp. 1721-1754,.
- M. Yakout, M. A. Elbestawi, and C. Veldhuis. 2018. “A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies”, Solid State Phenomena, vol. 278, pp. 1-14.
- M. Y. Kayacan, and N. Yılmaz. 2019. “DMLS ile Eklemeli İmalatta Dengesiz Sıcaklık Dağılımı ve Parçaya Etkilerinin Araştırılması”, Academic Platform Journal of Engineering and Science, Vol. 7, no.1, pp. 79-94.
- Mayer, S. 2005. *Optimised mould temperature control procedure using DMLS*. EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd, 1-10.
- Menges, G., Michaeli, W., and Mohren, P. 2013. *How to make injection molds*: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Menges, G., Mohren, P. 1993. *How to Make Injection Molds*, Newyork.
- Mubaş Metal. (2018,25 Aralık) *Kalıp Üretimi Nedir?* 10 Kasım 2021 tarihinde https://www.mubasmetal.com/b_kalip-uretimi-nedir_2_tr.html adresinden erişildi
- Öz, U. 1997. *Bilgisayar Destekli Plastik Enjeksiyon Kalıp Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Paksoy, Ö. 2008. *Plastik Enjeksiyon Prosesinde Elyaf Yönlenmesinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,223984.
- Moldex Support, Matematiksel Modeller ve Varsayımlar, 12 Mart 2022 tarihinde http://support.moldex3d.com/2021/en/4-4-2_mathematicalmodelsandassumptions.html adresinden erişildi.
- Palabıyık, M. 2008. *Polimer esaslı kompozitler ile konstrüksiyon*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 48s.
- Park, S. and Kwon, T. 1998. *Optimal cooling system design for the injection molding process*. Polymer Engineering & Science, 38(9), 1450-1462.
- Park, H.S., Dang, X.P., Nguyen, D.S., and Kumar, S. 2020. *Design of advanced injection mold to increase cooling efficiency*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 7(2), 319-328.
- Pınar, E., 2010. *Plastik enjeksiyon yöntemiyle imalatta hataların tespiti ve proses şartlarının optimizasyon uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 4s.
- Qiao, H. 2006. *A systematic computer-aided approach to cooling system optimal design in plastic injection molding*. International Journal of Mechanical Sciences, 48(4), 430-439
- R. Anderl, H. J. Schmid, M. Kage, and M. C. H. Karg, 2017. *Additive Manufacturing*, Acatech-National Academy of Science and Engineering, GERMANY, 2017.
- Sachs, E., Wylonis, E., Allen, S., Cima, M., Guo, H. 2000. *Production of Injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process*, Polym Eng Sci, 40, 5, 1232-47.

- Sánchez, R., Aisa, J., Martinez, A., Mercado, D. 2012. *On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding*, Measurement 45, 1051–1056.
- Tang, L.Q., Chassapis, C., and Manoochehri, S. 1997. *Optimal cooling system design for multi-cavity injection molding*. Finite Elements in Analysis and Design, 26(3), 229-251.
- Telli, S. 2009. *PP Malzemelerin Geri Dönüşümlerinde Elde Edilen Ürünlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- Temiz, V. 2004. *Plastik malzemelerle konstrüksiyon*. Ders Notları.
- T. S. Srivatsan, and T. S. Sudarsan 2016. *Additive Manufacturing, Innovations, Advances and Applications*. New York: CRC Press..
- Turaçlı, H., 2000. *Enjeksiyon Kalıpları İmalatı*, İstanbul: Pagev Yayınları.
- Turaçlı, H. 2003. *Enjeksiyon Kalıpları İmalatı*, Seçkin Yayınevi, İstanbul, 198 s.
- Uzun, İ. 1984. *Hacim Kalıpcılığı*, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul.
- Wang, Y., Yu, K.M., and Wang, C.C.L. 2015. *Spiral and conformal cooling in plastic injection molding*. Computer-Aided Design, 63, 1-11.
- Wang, Y., Yu, K.M., Wang, C.C., and Zhang, Y. 2011. *Automatic design of conformal cooling circuits for rapid tooling*. Computer-Aided Design, 43(8), 1001-1010.
- Wang, Y., Yu, K., Wang, C. 2015. *Spiral and conformal cooling in plastic injection molding*, Computer-Aided Design, 63, 1–11.
- Web, *Plastik Kalıp Çelikleri* 10 Kasım 2021 tarihinde <https://malzemebilimi.net/plastik-kalip-celikleri.html>, adresinden erişildi.
- Wu, T., Jahan, S., Kumaar, P., Tovar, A., El-Mounayri, H., Zhang, J., Acheson, D., Brand, K., Nalim, R. 2015. *A Framework for Optimizing the Design of Injection Molds with Conformal Cooling for Additive Manufacturing*, Procedia Manufacturing, 1, 404-415.
- Xu, X., Sachs, E., Allen, S. 2001. *The Design of Conformal Cooling Channels in Injection Molding Tooling*, Polymer Engineering and Science, 41, No. 7.
- Yadegari, M, Masoumi, H., and Gheisari, M. 2016. *Optimization of Cooling Channels in Plastic Injection Molding*. International Journal of Applied Engineering Research, 11(8), 5777-5780.
- Yadroitsev, I., & Smurov, I. 2011. *Surface morphology in selective laser melting of metal powders*. Physics Procedia, 12(part A), 264-270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.034>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sümeyra KULCU
Doğum Yeri ve Tarihi : 08/09/1995- BURSA
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Anadolu Lisesi
Lisans : Uludağ Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Grammer Koltuk Sistemleri Anonim Şirketi/Mart 2019-)

İletişim (e-posta) : sumeyrakulcu7@gmail.com

Yayınları : -