T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KALIN CİDARLI HDPE (YYPE) MALZEMELERİN PLASTİK ENJEKSİYON YÖNTEMİYLE KALIPLANMASINDA SOĞUTMA PARAMETRELERİNİN PARÇA KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet DAĞLI

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ahmet DEMİRER

Temmuz 2021

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KALIN CİDARLI HDPE (YYPE) MALZEMELERİN PLASTİK ENJEKSİYON YÖNTEMİYLE KALIPLANMASINDA SOĞUTMA PARAMETRELERİNİN PARÇA KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammet DAĞLI

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 13/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Doç.Dr. Ahmet DEMİRER	BAŞARILI
Üye: Öğr.Üyesi Erdal KARADENİZ	BAŞARILI
Üye: Öğr.Üyesi Mustafa AKÇİL	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Muhammet DAĞLI

13/07/2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, çalışmalarım boyunca katkı ve yardımlarıyla da beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Ahmet DEMİRER'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hiçbir zaman desteklerini ve hoşgörülerini esirgemeyen, hocalarıma ve eğitim hayatım boyunca hep yanımda olan aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN ..... **ii**
TEŞEKKÜR ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
KISALTMALAR ..... **iv**
SİMGELER ..... **v**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **vi**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **vii**
ÖZET ..... **ix**
SUMMARY ..... **x**

BÖLÜM 1.
GİRİŞ **1**
1.1. Tezin Amacı 3

BÖLÜM 2.
PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİ **4**
2.1. Plastik Enjeksiyon Kalıplama Prosesi 4
2.1.1. Sıkıştırma (Mengene) ünitesi 5
2.1.2. Plastikleştirme (Hammadde alma, Eriyik hazırlama) 5
2.1.3. Enjeksiyon 6
2.1.4. Ütüleme 6
2.1.5. Soğutma 7
2.1.6. Kalıp açma ve parça çıkarma 7
2.2. Enjeksiyon Kalıplamanın Prosesinden Kaynaklı Problemler 8
2.2.1. Çekme 8
2.2.2. Çarpılma 11

BÖLÜM 3.
ENJEKSİYON KALIPLAMADA SOĞUTMA SİSTEMİ **14**
3.1. Soğutma Kanalı Türleri 20

3.1.1. Paralel soğutma kanalları 20
3.1.2. Seri soğutma kanalları 20
3.1.3. Alternatif soğutma sistemleri 21
3.1.3.1. Bölmeler 22
3.1.3.2. Fıskiyeler (Kabarcıklar) 23
3.1.3.3. Termal pimler 23
3.2. İnce Çekirdeklerin Soğutulması 24
3.3. Büyük Çekirdeklerin Soğutulması 25
3.4. Soğutma Silindiri Göbekleri 26
3.5. Soğutma Sistemi Hesaplamaları 26
3.6. Konformal Soğutma Sistemleri 28
3.7. Enjeksiyon Kalıplarının Soğutulmasında Kullanılan Akışkanlar 29

BÖLÜM 4.
DENEYSEL ÇALIŞMA 31
4.1. Malzeme 31
4.2. Yöntem 34
4.2.1. Plastik enjeksiyon makinesi özellikleri 34
4.2.2. Parça giriş noktası analizi 35
4.2.3. Kalıp ve soğutma sistemi tasarımları 37
4.2.4. Enjeksiyon kalıplama 41
4.2.5. Lazer ölçüm cihazı ile boyutsal ölçü kontrolleri 43
4.2.6. Sertlik değerlerinin incelenmesi 43
4.2.7. Mukavemet değerlerinin incelenmesi 44

BÖLÜM 5.
SONUÇLAR VE TARTIŞMA 46
5.1. Bilgisayar Destekli Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 46
5.2. Çekme Miktarı Sonuçları 47
5.3. Üç Boyutlu Lazer Ölçüm Cihazı ile Boyutsal Çarpılma Miktarı Sonuçları 50
5.4. Sertlik Değeri Sonuçları 54
5.5. Çekme Deneyi Sonuçları 54

BÖLÜM 6.
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER 58
6.1. Genel Sonuçlar 58
6.2. Öneriler 59

KAYNAKLAR 61

KISALTMALAR

PE : Polietilen

MFI : Erime Akış İndeksi

PE100 : Polietilen 100

CAD : Bilgisayar Destekli Tasarım

HDPE (YYPE): Yüksek Yoğunluklu Polietilen

POM : Polioksimetilen

CAE : Bilgisayar Destekli Mühendislik

KST : Klasik Soğutma Tasarımı

GST : Geliştirilmiş Soğutma Tasarımı

KSÜ : Klasik Soğutmalı Ürün

GSÜ : Geliştirilmiş Soğutmalı Ürün

SİMGELER

t_c : Soğutma Süresi (saniye)

s : Duvar Kalınlığı (mm)

a : Termal Yayılma (mm^2/s)

T_M : Erime Sıcaklığı, (° C)

T_W : Duvar Sıcaklığı, (° C)

T_D : Kesit üzerindeki Ortalama Sıcaklık (° C)

η : Soğutma Sıvısı Viskozitesi

ρ : Soğutma Sıvısı Yoğunluğu (kg/m^3)

V : Soğutma Sıvısı Hızı (m/s)

D : Kanal Çapı (mm)

Re : Reynolds Sayısı

T_g : Camsı Geçiş Sıcaklığı (° C)

P : Basınç (MPa)

V : Özgül hacim (m^3/kg)

T : Sıcaklık (° C)

v : Soğutma Sıvısı Kinematik Vizkositesi (m^2/s)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 : Bazı malzemelerin ve akışkanların ısı iletim katsayıları 30
Tablo 3.2 : Bazı akışkanların ısı iletim katsayıları 30
Tablo 4.1 : YYPE (Eltex TUB121 PE100) teknik özellikleri. 32
Tablo 4.2 : Enjeksiyon makinesi teknik özellikleri. 34
Tablo 4.3 : Enjeksiyon kalıbı ve soğutma tasarımlarının teknik özellikleri. 40
Tablo 4.4 : Kalıp şartlandırıcı cihazı teknik özellikleri. 41
Tablo 4.5 : Klasik ve Geliştirilmiş soğutma sistemi ile elde edilen numunelerin proses şartları. 41
Tablo 4.6 : Geliştirilmiş soğutma tasarımında farklı ütüleme sürelerine göre deney şartları. 42
Tablo 4.7 : Üç boyutlu lazer ölçüm cihazının teknik özellikleri. 43
Tablo 4.8 : Çekme test cihazının teknik özellikleri. 45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 : Polimerlerin performans piramidi. 2
Şekil 2.1 : Plastik enjeksiyon makine şeması. 4
Şekil 2.2 : Plastik enjeksiyon makine şematik diyagramı. 5
Şekil 2.3 : Plastikleştirme aşaması. 6
Şekil 2.4 : Enjeksiyon aşaması. 6
Şekil 2.5 : Ütüleme ve kalıptan çıkarma aşaması. 7
Şekil 2.6 : Enjeksiyon kalıplamanın aşamaları. 8
Şekil 2.7 : Enjeksiyon proses parametrelerinin ve tasarımın çekmeye etkisi. 9
Şekil 2.8 : Amorf ve kristal polimerlerin PvT diyagramları.. 10
Şekil 2.9 : Amorf ve yarı (kısmi) kristalin malzemelerin çekme miktarı grafikleri. . 11
Şekil 2.10 : Soğutmanın çarpılmaya etkisi. 12
Şekil 2.11 : Cidar kalınlığının çarpılmaya etkisi. 13
Şekil 2.12 : Açısal çarpılma diyagramı. 13
Şekil 3.1 : Plastik enjeksiyon çevrimi şematik diyagramı. 15
Şekil 3.2 : Plastik enjeksiyon döngüsünün oransal grafiği . 15
Şekil 3.3 : Soğutma kanallarının parça köşelerine yaklaştırılması ile sıcak bölgelerin soğutulması. 16
Şekil 3.4 : Soğutma kanallarının geometrik yapısı ve pozisyonlarının şematik gösterimi. 17
Şekil 3.5 : Önerilen soğutma kanalları ve parçaya olan uzaklık mesafeleri. 18
Şekil 3.6 : Soğutma kanal tasarımı ve konumu. 18
Şekil 3.7 : Bir enjeksiyon kalıplama makinesi için tipik bir soğutma sistemi. 19
Şekil 3.8 : Kalıp plakalarına tutturulmuş bir soğutma kanalı düzeneği. 19
Şekil 3.9 : Paralel soğutma kanalı düzeneği. 20
Şekil 3.10 : Seri soğutma kanalı düzeneği. 21
Şekil 3.11 : Bölmeli (baffle), Kabarcıklar (bubbler) ve Termal pimli (thermal Pin) soğutma sistemleri. 22
Şekil 3.12 : Soldaki helezon, Sağdaki spiral bölmeli soğutma sistemi görünümü . .. 22
Şekil 3.13 : Soldaki kabarcık göbeğe vidalanmış, Sağdaki kabarcık büyütülmüş maça soğutma sistemi görünümü. 23
Şekil 3.14 : Termal pim ısı transfer verimlilik görünümü. 24
Şekil 3.15 : Termal pim şematik gösterimi. 24
Şekil 3.16 : İnce bir çekirdeğin hava soğutması. 25
Şekil 3.17 : İnce bir çekirdeği soğutmak için yüksek termal iletkenlik malzemesi kullanımı. 25
Şekil 3.18 : Büyük çekirdeği soğutmak için sarmal bölme kullanımı. 26
Şekil 3.19 : Ortadan kabarcıklı çift sarmal. 26
Şekil 3.20 : Konformal soğutma tasarımı görseli. 28
Şekil 4.1 : YYPE-PE100 PVT diyagramı. 33
Şekil 4.2 : Deney numunesinin ölçüleri. 33
Şekil 4.3 : Enjeksiyon makinesi görseli. 34

Şekil 4.4 : Enjeksiyon giriş noktası analizi. 35
Şekil 4.5 : (a) Eriyik sıcaklığı 200 ºC (b) Eriyik sıcaklığı 210 ºC. 36
Şekil 4.6 : Eriyik sıcaklığı 220 ºC. 36
Şekil 4.7 : Eriyik sıcaklığına bağlı dolum basınçlarının analiz sonuçları. 37
Şekil 4.8 : Yolluk tasarımı hesaplamaları. 37
Şekil 4.9 : Parça için yolluk tasarımı. 38
Şekil 4.10 : Klasik soğutma sistemli tasarım. 38
Şekil 4.11 : KST'de soğutma kanallarının üç boyutlu görünümü. 39
Şekil 4.12 : KST'de soğutma kanallarının üç boyutlu görünümü. 39
Şekil 4.13 : (a) GST'de soğutma kanalları üç boyutlu görünümü. (b) maça (çekirdek) soğutması için sarmal bölme tasarımı üç boyutlu görünümü... 40
Şekil 4.14 : Deneysel çalışma kapsamında elde edilen numune görselleri. 42
Şekil 4.15 : Parça üzerinden sertlik deneyi için alınan numune görünümü. 43
Şekil 4.16 : Shore D Sertlik ölçüm cihazı görseli. 44
Şekil 4.17 : Çekme testi deney numunesi ölçüleri (ISO 527-2 Tip 1A). 44
Şekil 4.18 : Çekme testi deneyi için hazırlanan numune görselleri. 45
Şekil 5.1 : Klasik soğutma tasarımında, analiz sonucunda parça üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı. 46
Şekil 5.2 : Geliştirilmiş soğutma tasarımında, analiz sonucunda parça üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı. 46
Şekil 5.3 : (a) KST'de maksimum soğuma süresi grafiği. (b) GST'de maksimum soğuma süresi grafiği. 47
Şekil 5.4 : % Çekme oranları için ölçüm noktaları. 48
Şekil 5.5 : KST ve GST % Çekme oranları (Çevrim süresi:360s, Enj. sıc. 210 ^{o}C).. 49
Şekil 5.6 : Farklı ütüleme sürelerine göre % Çekme oranları (Enj. sıc. 210 ^{o}C). 49
Şekil 5.7 : Numunelerde meydana gelen çarpılma şekli ve yönleri. 50
Şekil 5.8 : Lazer ölçüm cihazı ile ölçülen numune görseli. 50
Şekil 5.9 : Klasik soğutma sistemli numunenin CAD datası ile karşılaştırılması..... 51
Şekil 5.10 : Geliştirilmiş soğutma sistemli numunenin CAD datası ile karşılaştırılması. 51
Şekil 5.11 : Düzlemlerdeki çarpılma grafiği (Çevrim süresi 360 s, Enj. sıc. 210ºC). 52
Şekil 5.12 : GST'de farklı ütüleme sürelerine göre düzlemlerdeki çarpılma grafiği (Çevrim süresi 360 s, Enj. sıc. 210ºC). 53
Şekil 5.13 : Ütüleme süresine bağlı serlik değeri sonuçları. 54
Şekil 5.14 : GST' de ütüleme süresine bağlı çekme mukavemeti deney sonuçları. .. 55
Şekil 5.15 : Ütüleme süresine bağlı numune ağırlık değişim sonuçları. 56

KALIN CİDARLI HDPE (YYPE) MALZEMELERİN PLASTİK ENJEKSİYON YÖNTEMİYLE KALIPLANMASINDA SOĞUTMA PARAMETRELERİNİN PARÇA KALİTESİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde plastik kalıplama teknolojisi gün geçtikçe büyük bir hızla gelişmektedir. Plastik sektörünün gelişmesi ve plastikler üzerine yapılan araştırmaların artmasıyla birlikte hem maliyet hem de fiziksel açıdan, plastikler metallere göre birçok alanda tercih edilir bir hale gelmiştir. Plastik enjeksiyon ile üretim tekniğinin hızlı ve ucuz, imalat bakımından çok rekabetçi olması, tasarımcıları ve üreticileri çok daha kalın cidarlı parçaları da bu teknikle üretmeye zorlamıştır. Bu kalınlıklar doğal olarak çeşitli imalat ve enjeksiyon proses risklerini de beraberinde getirmektedir.

Bu teknikle üretilen parçaların kalitesine; proses şartları, kalıp tasarımı ve polimer malzemelerin özellikleri etki etmektedir. Özellikle kalın cidarlı parçaların imalatında kalıp tasarımının en önemli aşaması olan soğutma sisteminin tasarımı çok önemli bir yer tutmaktadır. Enjeksiyon işlemi sonrasında gerek kalıptan hemen çıktıktan sonra gerekse ortam sıcaklığına düşürüldükten sonra üretilen parçalarda toleransları aşan çekme ve çarpılma problemleri meydana gelmektedir. Uygun bir soğutma tasarımı ürün üzerindeki çekme, çarpılma ve çökme gibi ürünün kalitesine yönelik özellikleri olumlu yönde etkilemektedir. Bu çalışmada, YYPE (Yüksek yoğunluklu polietilen) malzemeden tesisatlarda kullanılan kalın cidarlı ekleme parçası ele alınmıştır. Aynı kalıp üzerinden ve aynı proses parametreleriyle klasik ve geliştirilmiş soğutma sistemi tasarımı karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Soğutma sisteminin geliştirilmesinde "Moldex3D''akış analiz programından yararlanılarak soğutma kanallarının konumları ve olası çekme ve çarpılmalar belirlenmiştir. Enjeksiyon sonrasındaki ölçüsel kontroller neticesinde numunelerdeki çekme ve çarpılma değerleri incelenmiştir. Geliştirilmiş soğutma tasarımı (GST) klasik sisteme göre boydaki çekmede %12, çarpılmada ise %48 daha düşük oranlar gözlenmiştir. Ayrıca geliştirilmiş soğutma sisteminde ütüleme sürelerinin arttırılması ile parça kalitesindeki pozitif değişimler incelenmiştir. Aynı çevrim süresi ve basınçlar kullanılarak dört farklı ütüleme süresi (110-160-200-250s) kullanılmış ve kalıpta boyuna çekmelerde ortalama %37, çarpılmalarda ise %57,64 düşme tespit edilmiştir. Aynı zamanda ütüleme süresinin artması numunelerdeki kütlesel artışla beraber mekanik mukavemette de %7,16 oranında artış olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enjeksiyon kalıplama, Kalıp soğutma sistemi, Çekme ve Çarpılma, Moldex3D analiz programı.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF COOLING PARAMETERS ON PARTS QUALITY IN THE MOLDING OF THICK-WALLED HDPE (HDPE) MATERIALS BY PLASTIC INJECTION

SUMMARY

Today, plastic molding technology is developing rapidly day by day. With the development of the plastics industry and the increase in research on plastics, plastics have become preferred in many areas compared to metals in terms of both cost and physical aspects. The fact that the production technique with plastic injection is fast and inexpensive and very competitive in terms of manufacturing has forced designers and manufacturers to produce much thicker-walled parts with this technique. These thicknesses naturally bring along various manufacturing and injection process risks.

The quality of the parts produced with this technique; process conditions, mold design and properties of polymer materials affect. The design of the cooling system, which is the most important part of mold design, especially in the production of thick-walled parts, has a very important place. After the injection process, shrinkage and distortion problems that exceed the tolerances occur in the parts produced either immediately after exiting the mold or after being lowered to ambient temperature. A suitable cooling design positively affects the quality of the product, such as shrinkage, distortion and collapse. In the experimental study, the thick-walled joining part used in HDPE (High density polyethylene) material installations was discussed. The classical and advanced cooling system design was tested comparatively on the same mold and with the same process parameters. In the development of the cooling system, the positions of the cooling channels and possible shrinkage and distortions were determined by using the "Moldex3D" flow analysis program. As a result of the dimensional checks after injection, the tensile and distortion values of the samples were examined. Improved cooling design (GST) was observed to be 12% lower in length shrinkage and 48% lower in distortion compared to the classical system. In addition, the positive changes in the quality of the parts were investigated by increasing the ironing times in the improved cooling system. By using the same cycle time and pressures, four different packing times (110-160-200-250s) were used and an average decrease of 37% in draft lengths and 57.64% reduction in distortion was detected. At the same time, it was determined that the mechanical strength increased by 7.16% with the increase in the packing time and the mass increase in the samples.

Keywords: Injection molding, Mold cooling system, Shrinkage and Warpage, Moldex3D analysis program.

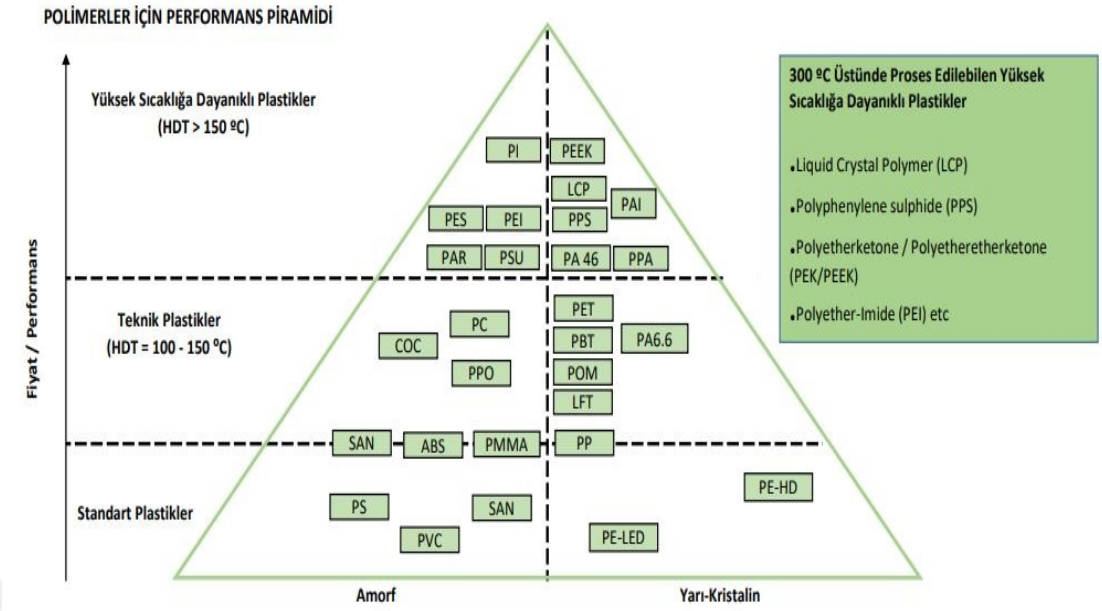
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Plastikler, endüstride özellikle son yirmi yılda hızlı bir gelişme göstermiş ve imalat sektöründe vazgeçilmez bir malzeme olarak ağırlığını hissettirmiştir. Neredeyse tüm sanayi dallarında ve bir çok uygulamada, alternatif malzeme olarak kullanılan plastikler, çelik ve diğer metal malzemelerin yerini almaya başlamıştır. Plastiklerde yaşanan bu gelişmeler sonrası, plastik konusunda eğitilmiş, bilgi ve tecrübe sahibi insanların varlığına olan ihtiyacı da arttırmıştır. Sadece malzeme bilgisiyle sınırlı olmayan bu ihtiyaç, aynı zamanda bu malzemelerin şekillendirilmeleriyle de ilgilidir [1-4].

Polimerler, termal özellikleri yönünden termosetler, termoplastikler ve elastomerler olarak üç gruba ayrılırlar.

Termoplastikler, hayatımızın her alanına farklı biçimlerde girmektedirler. Otomotiv alanından yapı alanına sağlık alanından ambalaj, elektronik, tekstil, paketleme, beyaz eşya , doğalgaz ve içme suyu taşımacılığına, arıtma sistemleri, ısıtma-soğutma sistemlerinden, tarım uygulamaları, rafineriler ve biogaz tedariğine kadar pek çok alanda termoplastik malzemeler kullanılmaktadır.

Her alanda plastiklerin seçilmesinin başlıca nedenleri vardır. Bu nedenler kullanım alanına göre malzemelerin mekanik, kimyasal, fiziksel ve termal özelliklerine göre belirlenmektedir. Örnek olarak YYPE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)'den üretilen boru ve ekleme parçaları esneklik, yüksek ömür ve korozyon direnci, yorgunluk direnci, servis ömrü, kullanım kolaylığı vb. özelliklerinden dolayı sıvı ve gazların taşınmasında çelik boruların yerine kullanılmaktadır. Şekil 1.1'de polimerlerin performans piramidi verilmiştir.



Şekil 1.1 : Polimerlerin performans piramidi [5].

Bu piramidin, dikey ekseninde fiyat/performans, yatay ekseninde ise amorf ve yarı kristalin özelliklere göre polimerler sınıflandırılmıştır.

Bu piramidin en alt basamağında, yüksek yoğunluklu polietilen, poli(metilmetakrilat), poli (vinil klorür), akrilonitril-bütadien-stiren kopolimeri, polistiren, polipropilen, düşük yoğunluklu polietilen gibi polimerler bulunmaktadır. Bu türdeki polimerler ticari olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Piramidin orta basamağında, mühendislik polimerleri yer almaktadır. Bu grupta polioksimetilen, poliamid, poli (etilen teraftalat), polibütenler, polikarbonatlar gibi polimerler yer almaktadır. Bu tip polimerler otomobil parçaları, elektrik-elektronik parçalar, dişli parçalar ve mil yatakları gibi parçaların imalatında kullanılmaktadırlar. Tokluk, sertlik ve düşük sürtünme gibi üstün mekanik özelliklere sahiptirler. Isıl dayanım yönünden diğer polimerlere göre daha yüksek değerlere sahiptirler.

Piramidin en üstünde ise poliimid, polieteremid, polietereterketon, polieter sülfon, polifenilen sülfit gibi polimerler bulunmaktadır. Bu grup yüksek sıcaklığa dayanıklı polimer tipleridir. Bu tip polimerlere, yüksek performans polimerleri denilmektedir. Termal, mekanik, elektriksel, kimyasal ve optik özellikler bakımından üstün performans göstermektedirler.

1.1. Tezin Amacı

Termoplastik parça üretim teknolojisindeki hızlı ilerleme ve değişimlerle birlikte termoplastik ürün kullanımı günümüzde artarak devam etmektedir. Termoplastiklerin imalatında plastik enjeksiyon yöntemi ve enjeksiyon kalıpları en başta yer almaktadır. Plastik enjeksiyon üretim tekniğinin hızlı, rekabet avantajı sağlaması üretici ve tasarımcıları her türden parçaları bu teknikle üretmeye zorlamaktadır. Bu teknikte parça geometrisi açısından imkanların geniş ve esnek olmasına rağmen parça cidar kalınlıklarında ise limitler bulunmaktadır. Literatürde soğutma tekniği açısından parça cidar kalınlıkları 1,5 mm ile 6 mm arasındadır. Bu değerlerin üzerindeki parçalar için tavsiye edilen soğutma kanal çapı mevcut değildir. İnce cidarlı parçalar genelde 0,3 mm'den başlarken kalın cidarlı parçalar 6 mm'den başlamaktadır.

Özellikle yüksek mekanik ve basınç dayanımı gerektiren, plastik parçaların kullanıldığı alt yapı sektöründe, cidar kalınlıkları 70 mm'leri bulabilmektedir. Yüksek cidar kalınlı parçaların enjeksiyon yöntemiyle üretimi ciddi sorunlar oluşturmaktadır. Bu sorunların çözümünde genelde yüksek enjeksiyon basınçları ve uzun çevrim süreleri uygulanır. Genel enjeksiyon üretim tekniğine uymayan bu kalın cidarlı parçaların çekme ve çarpılmaları aşırı düzeyde gerçekleşmektedir. Ürün kalitesini etkileyen bu sorunlar endüstride enjeksiyon proses parametreleri ve soğutma sistem tasarımlarıyla bertaraf edilmeye çalışılmaktadır.

Bu tez çalışmasında kalın cidarlı plastik parçaların enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretiminde, parça kalitesini olumsuz yönde etkileyen çekme ve çarpılmaların giderilmesinde; kalıp soğutma tasarımları ve proses şartları optimize edilerek bu hataların minimum düzeye indirilmesi hedeflenmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde daha çok ince cidarlı parçalar üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kalın cidarlı ve kendi içerisinde de farklı kalınlık dağılımlarına sahip parçalar üzerine yapılan çalışmalara pek rastlanmamaktadır. Bu çalışmanın enjeksiyonla üretilecek kalın cidarlı parçaların üretiminde kaliteyi etkileyen boyutsal ve şekilsel sorunların giderilmesine ışık tutacağı düşünülmektedir.

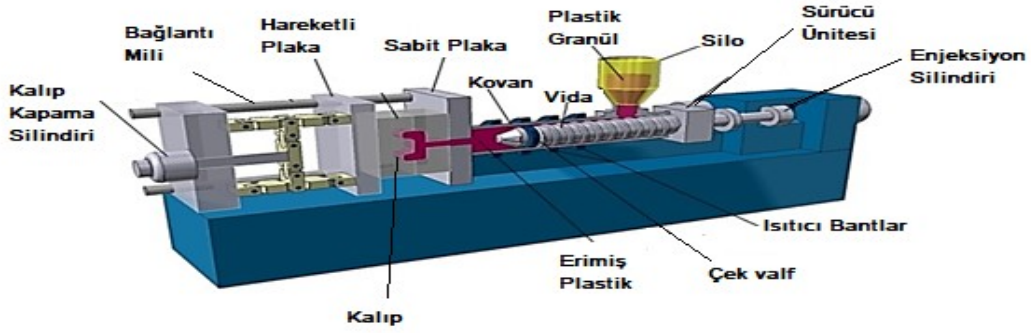
BÖLÜM 2. PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA YÖNTEMİ

Polimerler, kullanılacağı alana bağlı olarak pek çok üretim yöntemi ile şekillendirilmektedir. Belirlenen herhangi bir plastik malzeme için uygun olan imalat yöntemi, plastiğin cinsine, şekline, parça adedine ve maliyetine bağlıdır. Günümüzde plastik ürünlerin imalatı için en çok uygulanan teknik enjeksiyon kalıplamadır. Plastik enjeksiyon üretim tekniğinin, parçada ikincil bir işlem gerektirmemesi, hızlı ve ucuz bir imalat açısından çok rekabetçi olması, plastik endüstrisinde büyük bir avantaj sağlamaktadır.

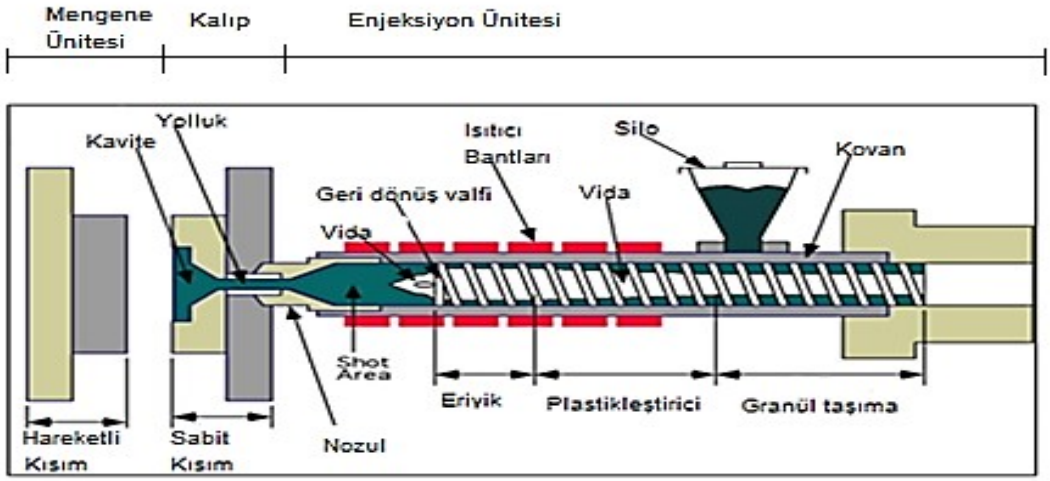
2.1. Plastik Enjeksiyon Kalıplama Prosesi

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, granül halindeki plastik hammaddenin ısı verilerek, ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta, doldurulması istenen kalıp boşluğuna belirli bir basınçla enjekte edilmesi ve belirlenen süre içerisinde soğutulup kalıptan çıkarılması esasına dayanır.

Bir enjeksiyon kalıplama makinesinin üç boyutlu örneği Şekil 2.1'de ve şematik diyagramı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Plastik enjeksiyon makine şeması [6].



Şekil 2.2 : Plastik enjeksiyon makine şematik diyagramı [7].

Plastik enjeksiyon prosesi incelendiğinde, bir plastik enjeksiyon parçasının imalat süreci şu aşamalardan oluşmaktadır.

2.1.1. Sıkıştırma (Mengene) ünitesi

Enjeksiyon kalıplama makinesi 2 üniteye, yani bir kapama ünitesi (mengene) ve bir enjeksiyon ünitesine bölünmüştür. Kapama ünitesi, enjeksiyon ve soğutma esnasında kalıbı basınç altında tutma işlevindedir. Daha basit bir ifadeyle plastik enjeksiyon kalıbının iki tarafını (dişi ve erkek) birleştiren ünitedir. Kalıbı kapatma, kilitleme ve açma kabiliyetine sahiptir. Kapama (mengene) üniteleri, enjeksiyon basıncı plastiği kapalı kalıba ittiğinde, oluşan kuvvetlere karşı kalıbı kapalı tutmak için kullanılmaktadır.

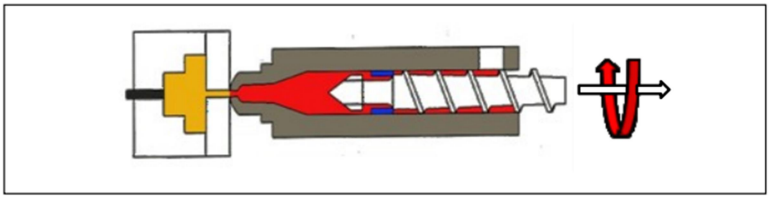
Enjeksiyon kalıplama makineleri genellikle makinenin oluşturabileceği maksimum kilitleme kuvvetine göre sınıflandırılırlar. Bu kilitleme kuvveti, kalıp içindeki plastik eriyiğin iç basıncı nedeniyle kalıbın açılmasını önlemek için iki kalıbın yarısını bir araya getiren kuvvettir [8].

2.1.2. Plastikleştirme (Hammadde alma, Eriyik hazırlama)

Plastik enjeksiyon çevriminin ilk adımı olan hammadde alma bir diğer ismi ile plastikleştirme, granül veya toz halindeki hammaddenin enjeksiyon makine silosuna konması ile başlar. Silodan sonsuz vidaya aktarılan hammadde, vidanın dönme sırasında sürtünme ile açığa çıkan sıcaklık ve vidada bulunan ısıtıcıların etkisiyle

erimeye başlar. Eriyen hammadde vida boşluğuna ulaşır, hammadde kalıba iletilmek için hazır hale gelir. Plastikleştirme aşaması, vida boşluğunda biriken plastiğin vidayı geriye itmesi sonucunda geri itilme, otomatik olarak durmasıyla ve böylece silindire alınan malzeme miktarıyla ayarlanmasıyla tamamlanmaktadır.

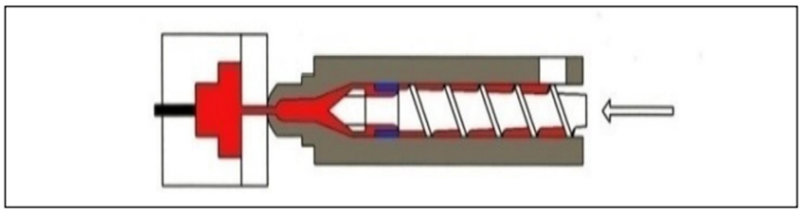
Burada en önemli sıcaklık, gerçek eriyik sıcaklığıdır. Yani boşluğa enjekte edilmeden önce malzemelerin ısıtılması gereken sıcaklıktır. Tüm malzemeler, verimli bir şekilde işlenebilecekleri ve optimum mekanik özelliklerini koruyabilecekleri bir sıcaklık aralığına sahiptir ve optimum değerlerin yakalanması için bu aralıklarda çalışmaları gereklidir [8].



Şekil 2.3 : Plastikleştirme aşaması [8].

2.1.3. Enjeksiyon

Enjeksiyon sürecinde, eriyik hale gelen plastik malzeme, enjeksiyon makinesinin ucundaki bir memeden geçerek, kalıp yolluğu vasıtası ile kalıbın içine doldurulur. Bu işlem esnasındaki basınç ve hız, hidrolik motor vasıtasıyla kontrol edilmektedir.



Şekil 2.4 : Enjeksiyon aşaması [8].

2.1.4. Ütüleme

Ütüleme süreci, soğumaya başlayan eriyik hammaddenin, ısıl büzülme' den (çökme) dolayı meydana gelebilecek hava boşluklarına, akış izlerine ve deformasyona engel olabilmek için belirlenen basınç altında kalıba eriyik hammadde enjekte etmeye

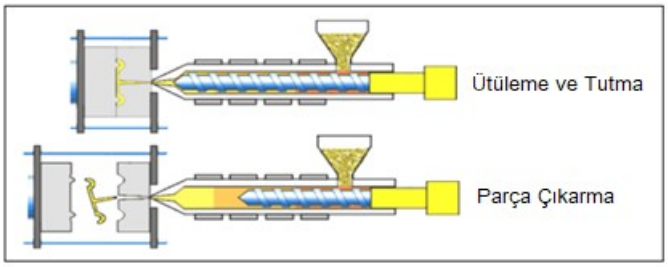
devam etme işlemidir. Ütüleme süreci, enjeksiyon (normal enjeksiyon) işleminden sonra başlamaktadır. Çünkü eriyik hammadde kalıp duvarına değdiği andan itibaren soğumaya başlamaktadır ve eriyik hammadde tam soğumadan ütüleme sürecinin uygulanması gereklidir. Bu sürecin işlem süresi, kullanılan hammaddenin özelliğine, parça ebatlarına ve ağırlığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

2.1.5. Soğutma

Soğutma süresi, eriyik hammaddenin kalıp boşluğunda yeterli rijitliğe ve katılaşmaya sahip oluncaya kadar geçen süredir. Kalıp soğutulur ve içerisindeki plastik ürünün donması sağlanır. Soğuma süresi içerisinde, yeniden vida dönmeye başlar ve geri giderken bir daha ki sefere basılacak malzeme kadar mal alınmaya başlanır.

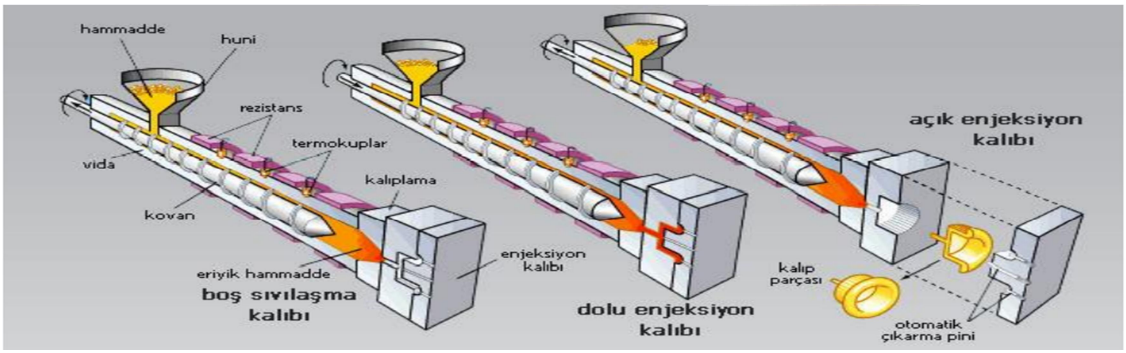
2.1.6. Kalıp açma ve parça çıkarma

Katılaşan eriyik parça, kalıp açıldığında kalıbın hareketli tarafında kalır. Kalıp yapısına göre buradaki iticiler veya maçalar yardımıyla bitmiş ürün kalıbın hareketli tarafından çıkarılır.



Şekil 2.5 : Ütüleme ve kalıptan çıkarma aşaması [8].

Enjeksiyon kalıplama döngüsündeki aşamalar Şekil 2.6'da verilen görseldeki gibi özetlenmiştir:



Şekil 2.6 : Enjeksiyon kalıplamanın aşamaları [5].

2.2. Enjeksiyon Kalıplamanın Prosesinden Kaynaklı Problemler

Plastik enjeksiyon üretim yöntemi, granül halindeki plastik hammaddenin ısı etkisiyle eritilerek kalıplanması ve şekillendirilmesi prosesidir. Proses gereği parça kalitesi üzerinde birtakım sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Bu sorunlar; hammadde, kalıp ve makine (proses) kaynaklı olabilmektedir.

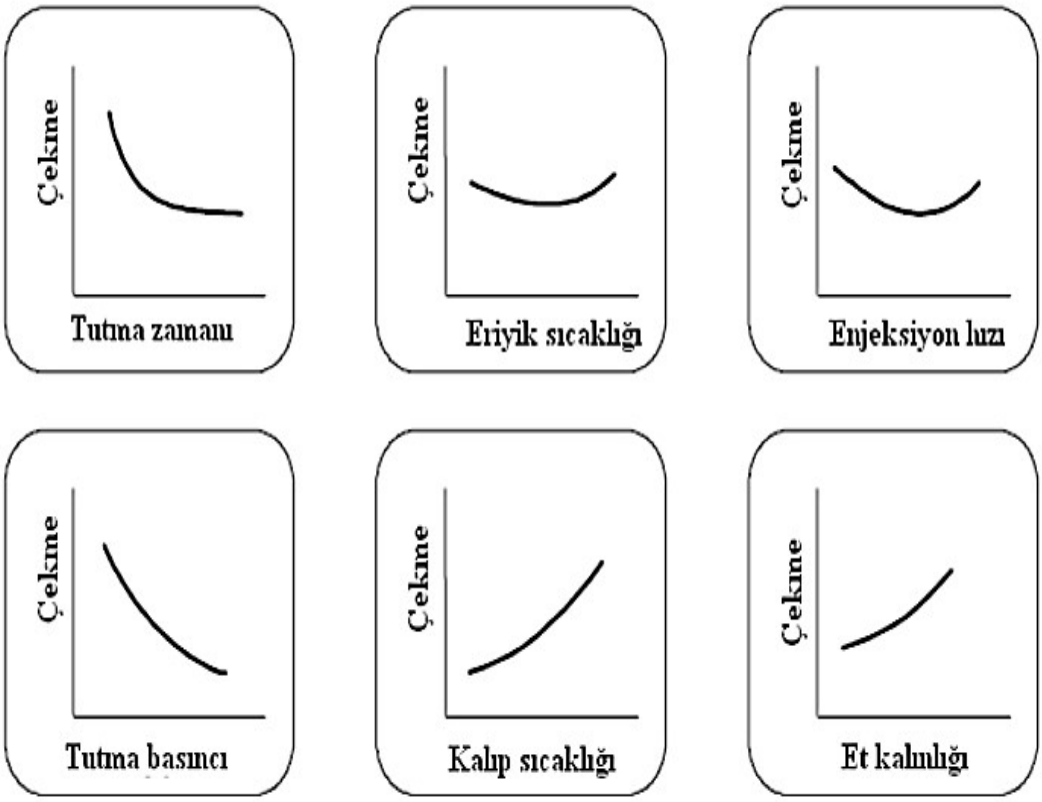
Bu çalışmada enjeksiyon kalıplamada parçada oluşan çekme ve çarpılma davranışlarının parça kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2.2.1. Çekme

Çekme veya kalıp çekmesi, nihai parçanın üretilmesi için oluşturulan kalıp boşluğu ölçüleri ile nihai parçanın gerçek boyutları arasındaki farktır. Çekme, hacimsel ve doğrusal olarak iki geniş sınıflandırma ile karakterize edilebilir [9,10].

Plastik malzemeler, kalıplama esnasında yüksek ısıl genleşme katsayıları nedeniyle soğuma aşamasında önemli bir çekme etkisi göstermektedirler. Bu nedenle kalıp kavitesi, nihai ölçüsünden çekme payı oranı kadar büyük yapılmaktadır. Hacimsel çekmeyi, kullanılan plastik malzeme türü, parça geometrisi, kalıp tasarımı ve enjeksiyon proses parametreleri etkilemektedir. Ergiyik plastik, kalıp kavitesine düşük basınçlarda sevk edilir. Bu sırada, kalıp cidarına temas eden ergiyik malzeme soğumaya başlamaktadır. Plastiğin özgül hacmi sıcaklıkla azaldığı için katılaşmış plastik, kalıp içerisinde erimiş olana göre daha az yer kaplar ve bunun sonucunda çekme gözlenmektedir. Parça kalınlığı, çekme oranı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Parça cidar kalınlık miktarı arttıkça, çekme miktarı da doğal olarak

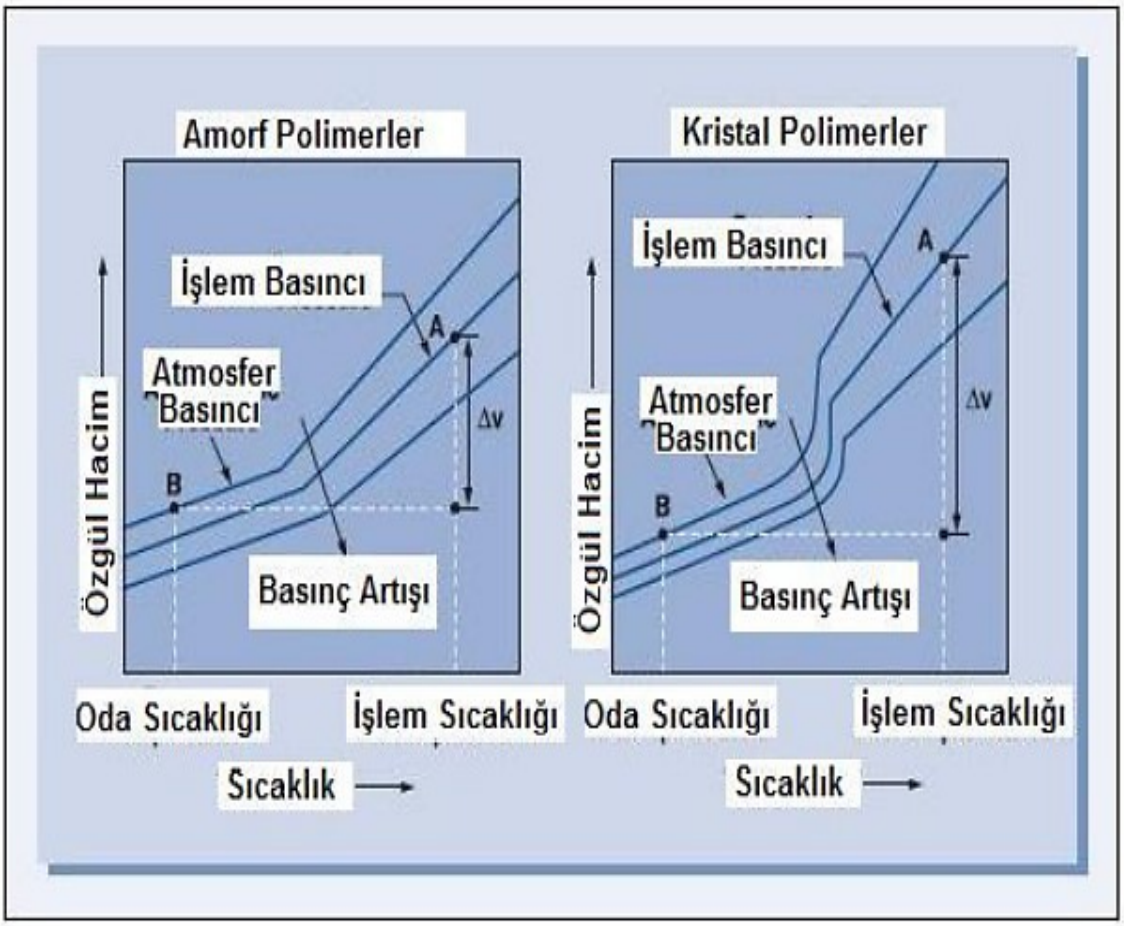
artmaktadır. Soğuma esnasında, üst kısımlar katılaşırken iç kısımlarda hala sıcak plastik bulunmaktadır. Bu durum sıcaklık farklarından dolayı çarpılmalara neden olmaktadır. Enjeksiyon proses parametrelerinin çekmeyi nasıl etkilediği grafiklerle Şekil 2.7"de gösterilmiştir [11].



Şekil 2.7 : Enjeksiyon proses parametrelerinin ve tasarımın çekmeye etkisi [11].

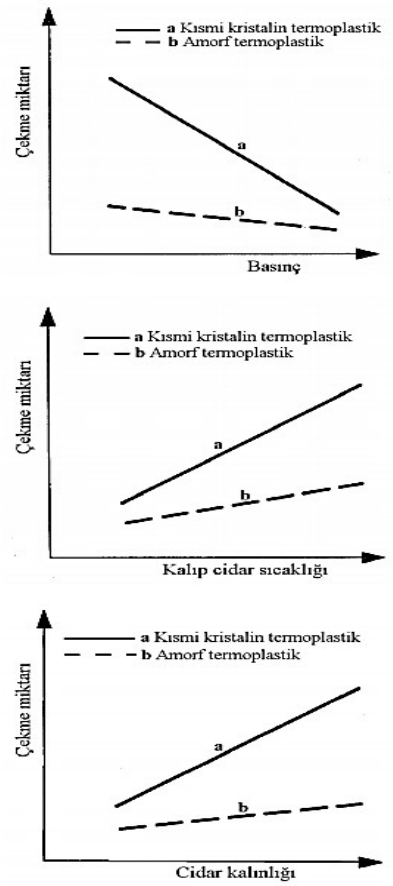
Yarı-kristal malzemeler, genellikle ısıl çekmeye karşı meyillidirler; amorf malzemeler ise daha düşük çekme miktarlarına meyillidir. Kristal malzemeler faz değişim sıcaklık değerinden düşük bir sıcaklıkta soğutulursa, moleküller daha düzenli bir şekilde sıralanır ve kristal halini alırlar. Diğer yandan bu değişim fazında, amorf malzemelerin mikro yapısı değişmemektedir. Bu farklılık, enjeksiyon esnasında (A noktası), atmosfer basıncında oda sıcaklığında (B noktası) yarı-kristal malzemelerin, amorf malzemelere oranla daha yüksek bir değerde özgül hacme sahip olmalarına neden olmaktadır [12,13].

Şekil 2.8'de amorf ve kristal polimerlerin PvT diyagramları verilmiştir.



Şekil 2.8 : Amorf ve kristal polimerlerin PvT diyagramları [13].

Kalıp cidar sıcaklığı ile çekme değerleri arasındaki doğrusal ilişki de cidar sıcaklığının düzenli bir şekilde olması gerekmektedir. Kalıp cidar kalınlığı için de benzer ifadeler kullanılabilir. Yarı (kısmi) kristalin ve amorf malzemelerin çekme miktarları önemli ölçülerde birbirinden farklıdır. Şekil 2.9'da amorf ve yarı (kısmi) kristalinlerde basınç, kalıp cidar sıcaklığı ve cidar kalınlığı ile çekmenin değişim grafiği gösterilmiştir. Amorf malzemelerin kalıplanmasında çarpılma olasılığının daha düşük olduğu söylenebilir.



Şekil 2.9 : Amorf ve yarı (kısmi) kristalin malzemelerin çekme miktarı grafikleri [14].

2.2.2. Çarpılma

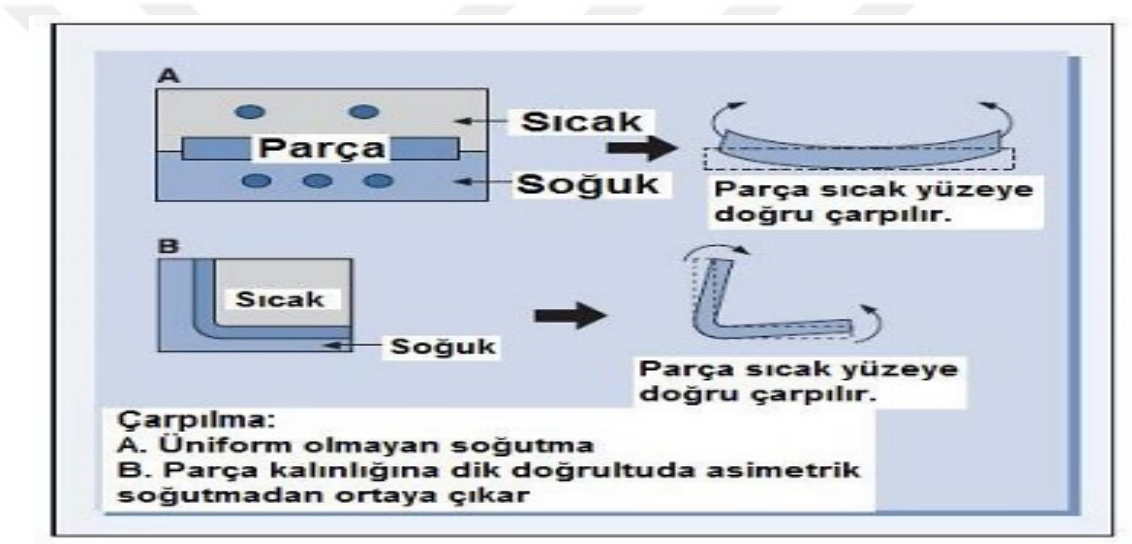
Parçanın, farklı bölgelerinde, farklı yönlerinde, farklı miktarda, farklı zamanlarda oluşan çekmedir. Yani plastik enjeksiyon tekniği ile üretilen parçanın geometrisinin, arzu edilen şeklinin bozulmasıdır. Enjeksiyonla kalıplanan parçada, kalıcı gerilmeler sonucunda farklı çekmeye uğraması nedeniyle çarpılma oluşur. Çekme değişkenliği molekül yapısı ve elyaf (fiber) yönelimleri, parça içerisinde sıcaklık değişimleri, dengesiz doldurma veya parça cidar kalınlıklarına bağlı soğuma esnasındaki farklı basınç seviyelerine bağlıdır. Bunun dışında dengesiz veya yetersiz soğutma, parçada çarpılmalara neden olmaktadır [13].

Kalıplanan parçada oluşan iç gerilmeler ve değişken hacimsel çekmeler de çarpılmaya neden olmaktadır. Parça tasarımında farklı et kalınlık dağılımları

bulunuyorsa kalın kesitler ince kesitlere göre daha geç soğuyacaktır ve farklı çekme süreleri parçada iç gerilmeler oluşturacaktır [11,15].

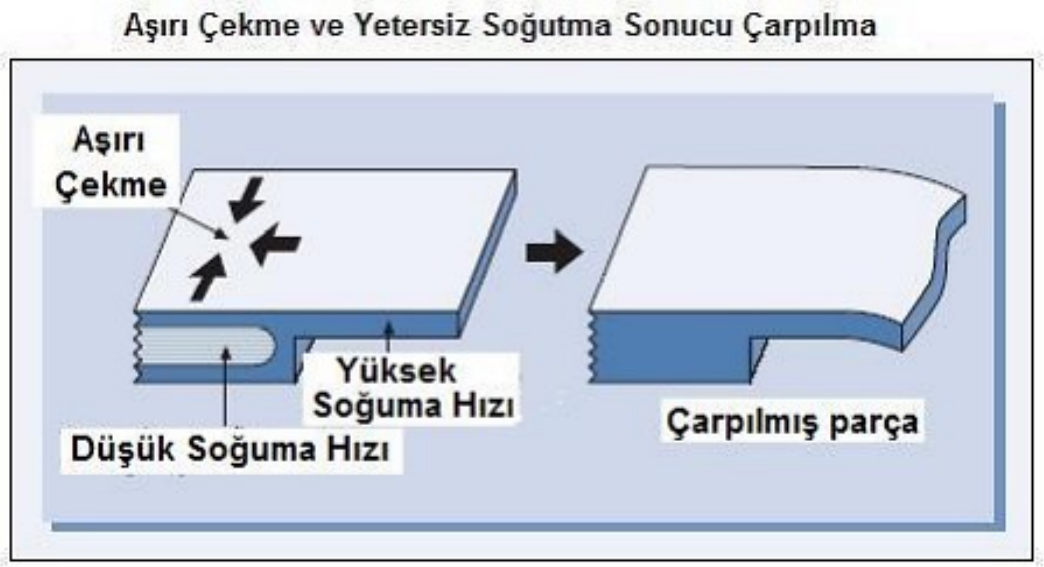
Soğutma ve hacimsel çekmeler dışında, enjeksiyon proses parametrelerinin dengesizliği ve akışın düzensizliği de çarpılmalara neden olmaktadır. Bu faktörler takip eden sayfalarda irdelenmiştir.

Soğutmanın Etkisi: Parçadaki homojen olmayan soğuma ve parça tasarımındaki erkek ve dişi kalıp yarılarındaki parça kalınlıklarındaki asimetrik yapı soğumada farklı çekme değerlerine neden olabilir. Malzeme soğuyarak cidardan merkeze doğru değişken bir şekilde çekmeye uğrar. Bunun sonucunda da kalıptan çıkarıldıktan sonra burulmaya uğrar [13].



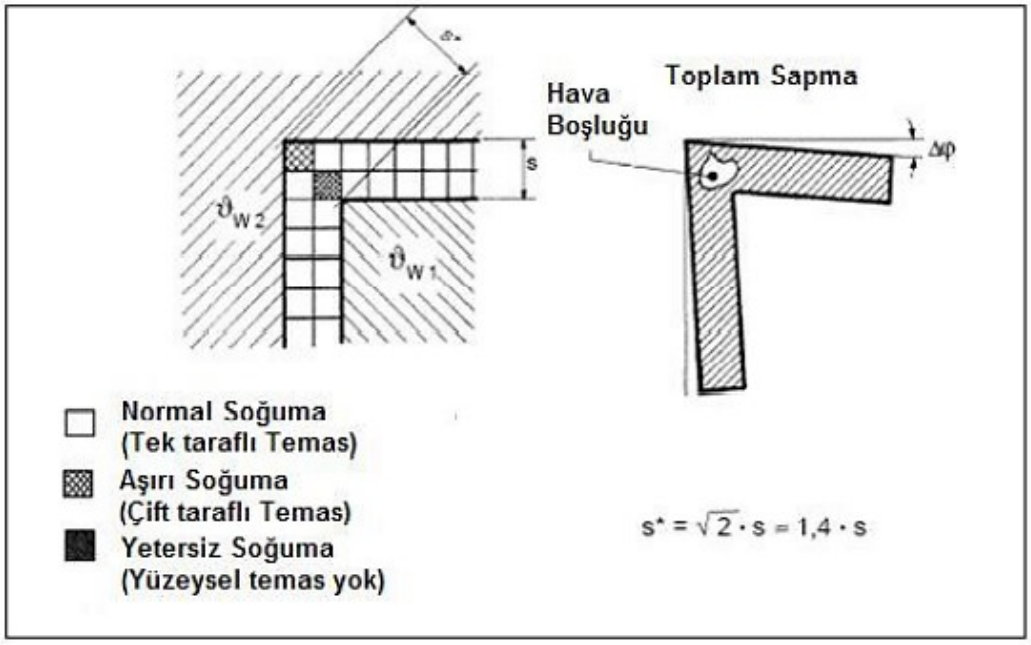
Şekil 2.10 : Soğutmanın çarpılmaya etkisi [13].

Cidar Kalınlığının Etkisi: Cidar kalınlığının artması ile çekme oranı da artmaktadır. Parça burulmasının en büyük nedeni, katkısız termoplastik malzemelerde üniform olmayan cidar kalınlığından kaynaklanan çekme farkıdır. Farklı soğutma oranları ve kristalizasyon seviyeleri özellikle değişken cidar kalınlığına bağlı olarak cidar kesitlerinde meydana gelmektedir. Yüksek kristalizasyon seviyesinden dolayı ve yavaş soğuma bölgelerinde görülen yüksek seviyeli hacimsel çekme sonucunda, değişken çekme ve bunun sonucunda burulma görülür (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : Cidar kalınlığının çarpılmaya etkisi [13].

Açısal Çarpılma: Aynı cidar kalınlıklarına rağmen ($\upsilon_{w1} = \upsilon_{w2}$) parçanın soğuması, farklı kalıp cidarı temas yüzeyleri nedeniyle farklılık gösterir.



Şekil 2.12 : Açısal çarpılma diyagramı [16].

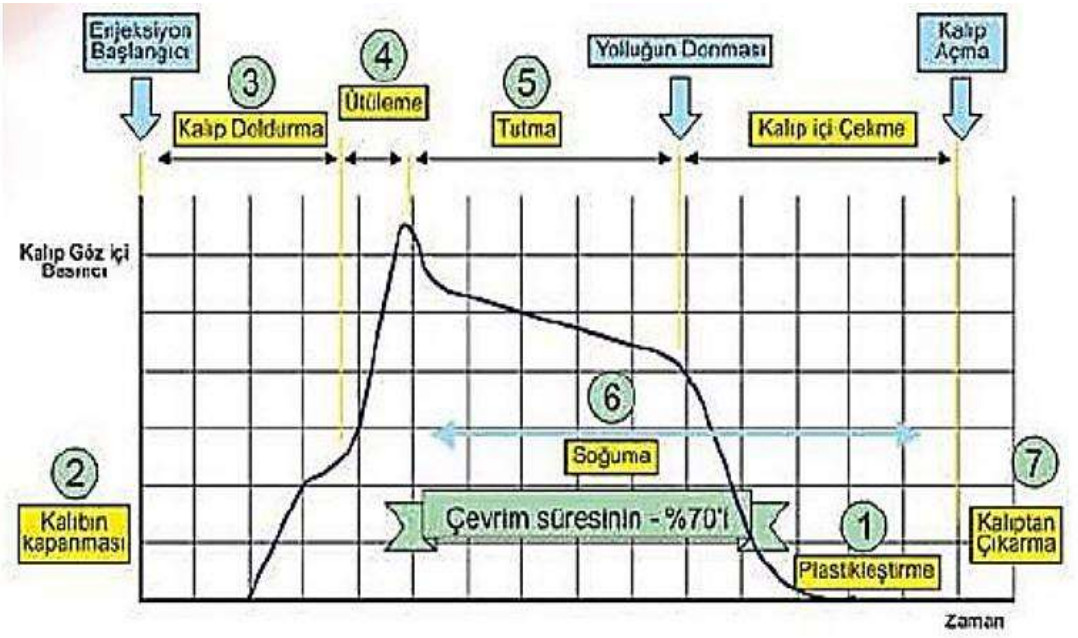
Bu nedenle kalıp cidarı temas yüzeylerinin farklı sıcaklık değerlerinde soğutulması açısal çarpılmayı azaltacaktır.

BÖLÜM 3. ENJEKSİYON KALIPLAMADA SOĞUTMA SİSTEMİ

Günümüzde, plastik parçaların imalatında yaygın olarak kullanılan üretim yöntemlerinin başında plastik enjeksiyon yöntemi gelmektedir. Plastik enjeksiyon üretim yöntemi, granül halindeki plastik hammaddenin ısı etkisiyle eritilerek kalıplanması ve şekillendirilmesi prosesidir. Plastik enjeksiyon üretim yöntemi, yüksek hacimlerde karmaşık geometrilere sahip parçaların hızlı bir şekilde üretilebilmesi, düşük maliyet, ikincil işlemlere gereksinim duymama, değişik renk-yüzey ve geometrilerde parça üretimi, malzeme firelerinin çok düşük seviyede olması, düşük ölçü toleranslarıyla çalışabilme imkânı sağlamaktadır.

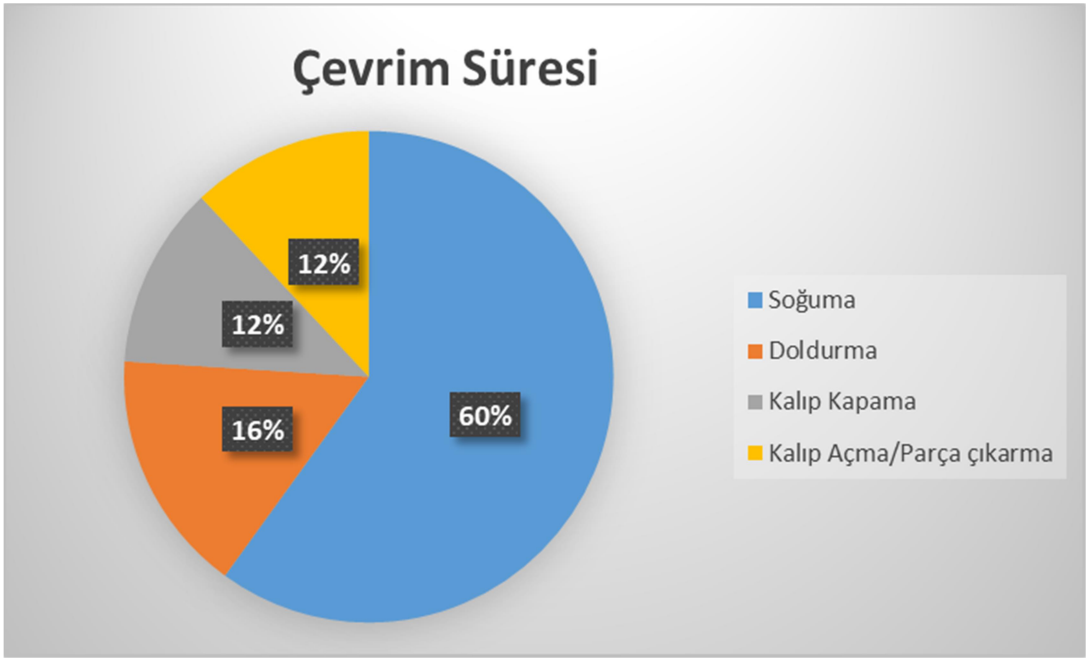
Plastik enjeksiyon üretim yöntemi, plastik parçaların ve ürünlerin imalatı için kalıp kullanımını gerektirir. Plastik enjeksiyon kalıpları, bir plastik parçanın üretim sürecinde en önemli bileşendir çünkü çevrim süresini ve ürünün kalitesini etkilemektedir. Plastik parçaların optimum özellikleri, yalnızca doğru kalıp sıcaklığı ve soğutma sisteminin verimli kullanımında elde edilebilmektedir.

Soğutma zamanı, plastik enjeksiyon çevrim sürecinde en önemli zamandır. Plastik malzemenin katılaştığı noktaya kadar, soğuması için gereken bir süredir. Soğutma aşaması enjeksiyonla aynı anda başlamaktadır. Çünkü eriyik enjeksiyon işleminin başından itibaren soğuk kalıp duvarı ile karşılaştığında soğumaya başlar. Soğutma süresi, iç malzeme yapısından etkilenir. Daha yüksek soğutma hızı, malzemenin iç yapısını ve dolayısıyla mekanik özelliklerini iyileştirebilir. Bununla birlikte, daha uzun soğutma süreleri boyutsal kararlılığı artırabilir ancak döngü süresi üzerinde olumsuz etki yaratır [17].



Şekil 3.1 : Plastik enjeksiyon çevrimi şematik diyagramı [5].

Bir plastik enjeksiyon kalıplama işlemi sırasındaki soğutma süresi, toplam çevrim süresinin yaklaşık üçte ikisi kadardır. İyi tasarlanmış bir soğutma tasarımı, kalıplama süresini düşürebilir ve üretkenliği yüksek bir seviyede artırabilmektedir. Yetersiz soğutma sistemi tasarımı ise, kalıplama sürelerini uzatarak, üretim maliyetlerini de artırabilmektedir. Ayrıca kalıp sıcaklığının ürün büzülme-çekmesine, boyutsal kararlılığına, çarpılmaya, deformasyona, iç gerilmeye ve yüzey kalitesine büyük etkisi olmaktadır.



Şekil 3.2 : Plastik enjeksiyon döngüsünün oransal grafiği [18].

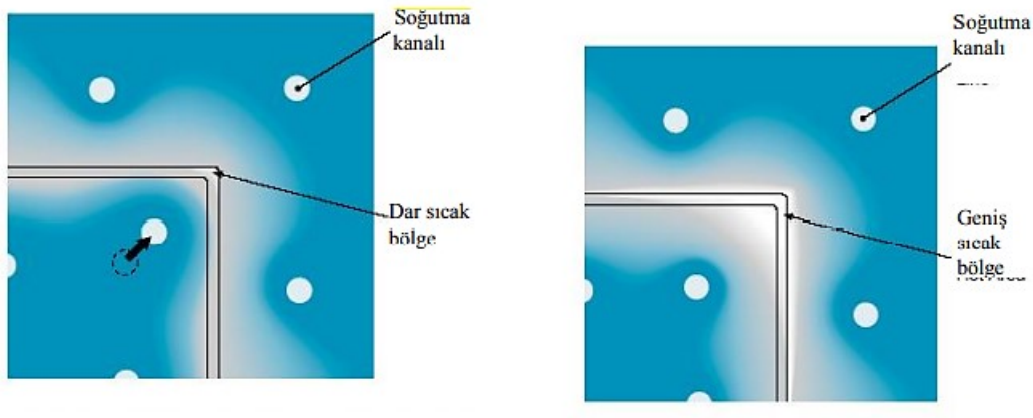
Özetlemek gerekirse kalıp sıcaklığı; mekanik özellikler, çekme, çarpılma, yüzey kalitesi ve çevrim süresi gibi unsurlar üzerinde temel etkiye sahiptir.

Genel olarak soğutma kanalları, delme veya frezeleme gibi kaba işlemlerden elde edilirler. Kaba işlenmiş iç yüzeyler, türbülanslı akışı arttırarak, daha iyi bir sıcaklık değişimi sağlamaktadır. Türbülanslı akış, türbülanssız akışa göre yaklaşık olarak 3-5 kat daha iyi bir soğutma performansı sağlamaktadır. Soğutma kanalları, kalıp boşluğuna (cavity) mümkün olduğunca yakın konumlandırılarak, birbirileri arasındaki merkez uzaklıkları da eşit tutulmalıdır (Şekil 3.3). Soğutma kanalları tasarlanırken, kalıp çeliklerinin mekanik dayanımı da göz önünde bulundurulmalıdır [14].

Homojen olarak tasarlanan soğutma sistemleri, parça üzerindeki artık gerilmeleri azaltmaktadır. Bunun sonucunda boyutsal doğruluğu ve kararlılığı koruyarak parça kalitesini iyileştirmektedir.

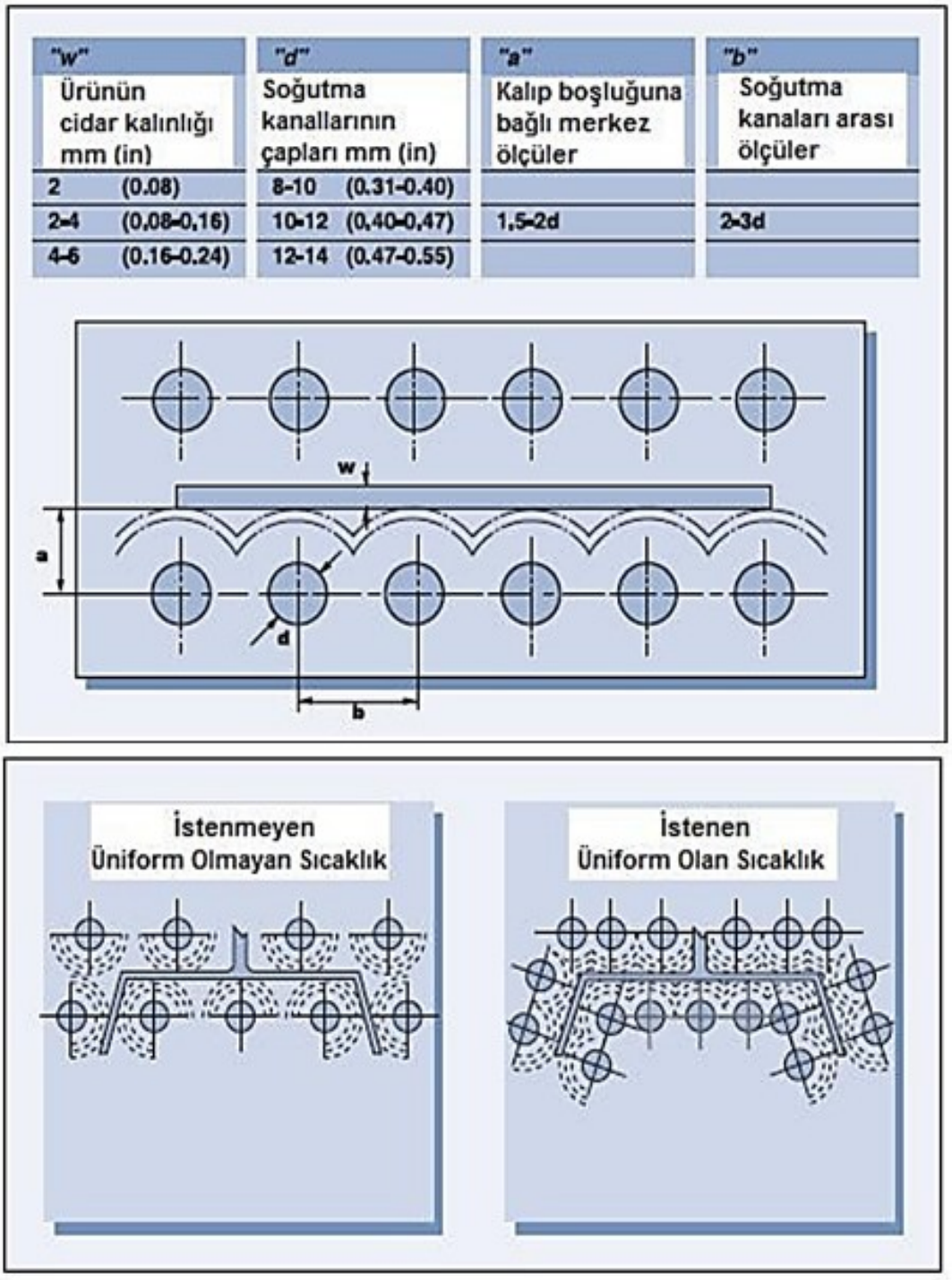
Kalıbın dolumu esnasında en sıcak erimiş plastik, kalıp girişindedir ve en soğuk erimiş plastik ise, yolluk girişinden en uzak noktadadır. Soğutma sıvısının sıcaklığı, bu kanallardan geçtikçe artar, bundan dolayı baskı esnasında eşit soğuma sağlamak için, kalıbın sıcak bölgelerine soğuk sıvı, parçanın soğuk bölgelerine sıcak sıvı girişi sağlamak gereklidir.

Özellikle parçaların köşe kısımlarında et kalınlıkları fazla olduğu için sıcaklık o kısımlarda daha yüksek değerlerdedir. Bu bölgelerin soğutulması için soğutma kanalları olabildiğince yaklaştırılmalıdır.

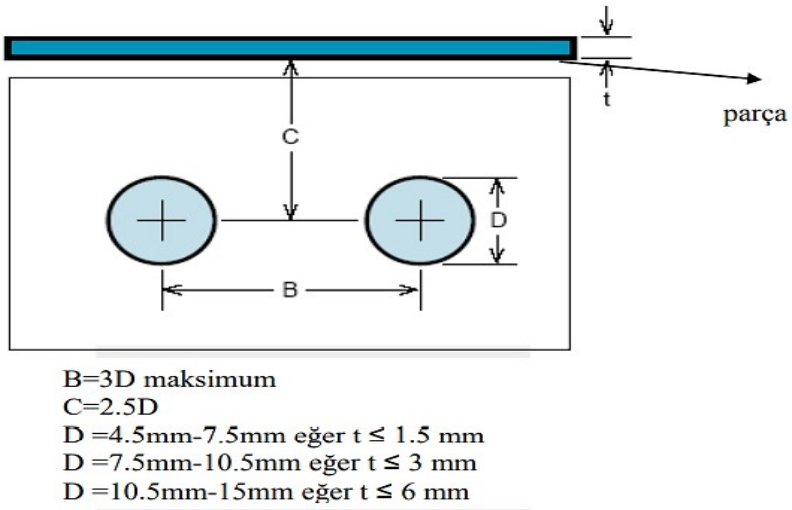


Şekil 3.3 : Soğutma kanallarının parça köşelerine yaklaştırılması ile sıcak bölgelerin soğutulması [19].

Literatürde soğutma kanal tasarımları ve yerleşimleriyle ilgili olarak üç farklı yaklaşım bulunmaktadır. Soğutma kanalı tasarım ölçüleri parçanın cidar kalınlığına göre değişim göstermektedir. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de verilen ilk iki yaklaşımda, 1,5 mm ile 6 mm arasındaki cidar kalınlıkları için önerilen soğutma kanal tasarımları verilmiştir.

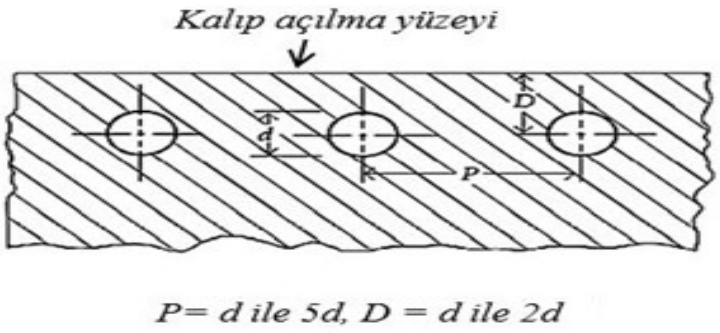


Şekil 3.4 : Soğutma kanallarının geometrik yapısı ve pozisyonlarının şematik gösterimi [14].



Şekil 3.5 : Önerilen soğutma kanalları ve parçaya olan uzaklık mesafeleri [19].

Üçüncü yaklaşımda ise bir cidar kalınlık sınırlaması olmaksızın tavsiye edilen soğutma kanal tasarımları Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 : Soğutma kanal tasarımı ve konumu [20].

Soğutma kanalı çapı (d), kalıp açılma (boşluk) yüzeyi ile soğutma kanalı merkezine olan mesafe (D) ve kanallar arasındaki mesafe (P) gösterilmiştir. Soğutma kanal çapları genelde 10-14 mm arasında değişmektedir.

Tasarımda, (D) değerinin çelik malzemeler için (d) değerine eşit, berilyum malzemeler için (d) değerinin bir buçuk katı ve alüminyum malzemeler için (d) değerinin iki katı olması tavsiye edilmektedir [20].

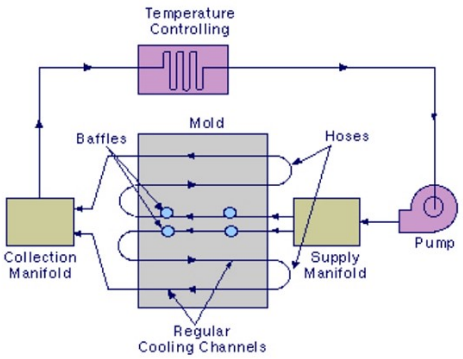
Bu tez çalışmamızda kullanılan numunenin cidar kalınlık dağılımı 10 ila 20 mm arasındadır. Bu nedenle deneysel çalışma kapsamında soğutma kanal tasarımları üçüncü yaklaşıma göre hesaplanarak yapılmıştır.

Soğutma sistemi komponentleri genel olarak aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

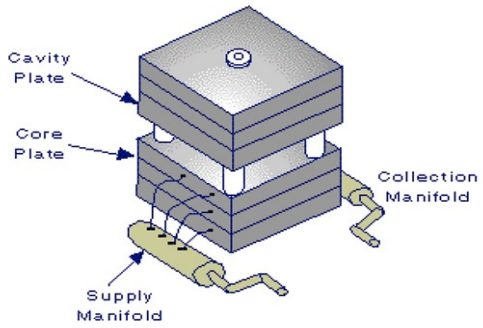
- Sıcaklık Kontrol Ünitesi
- Pompa
- Besleme Manifoldu
- Hortumlar
- Kalıp Üzerindeki Soğutma Kanalları
- Toplama Manifoldu

Bu sistemlerde kalıp, sıcak polimer eriyiğinden, ısının dolaşan soğutucu akışkan tarafından uzaklaştırıldığı bir ısı eşanjörü olarak düşünülebilir [21].

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de soğutma sisteminin bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Bir enjeksiyon kalıplama makinesi için tipik bir soğutma sistemi [21].

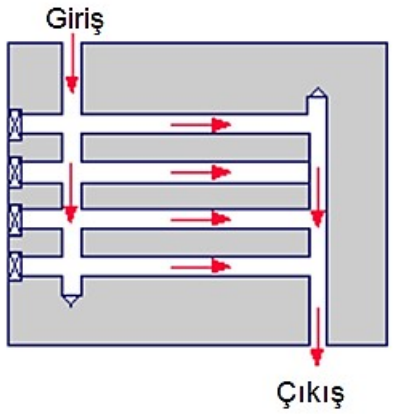


Şekil 3.8 : Kalıp plakalarına tutturulmuş bir soğutma kanalı düzeneği [21].

3.1. Soğutma Kanalı Türleri

3.1.1. Paralel soğutma kanalları

Paralel soğutma kanalları, bir tedarik manifoldundan bir toplama manifolduna düz bir şekilde delinmektedir. Paralel tasarımın akış özelliklerinden dolayı, çeşitli soğutma kanalları boyunca akış hızı, her bir soğutma kanalının akış direncine bağlı olarak farklı olabilir. Bu değişen akış hızları, soğutma kanallarının ısı aktarım verimliliğinin birbirinden farklı olmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, kalıbın soğutulması, paralel bir soğutma kanalı konfigürasyonu ile muntazam olmayabilir. Tipik olarak, kalıbın boşluk ve çekirdek taraflarının her birinin kendi paralel soğutma kanal sistemleri vardır. Sistem başına soğutma kanalı sayısı, kalıbın boyutuna ve karmaşıklığına göre değişim göstermektedir.

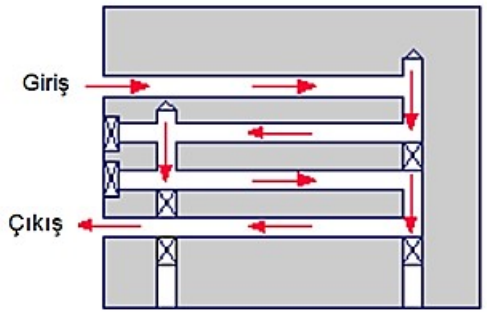


Şekil 3.9 : Paralel soğutma kanalı düzeneği [21].

3.1.2. Seri soğutma kanalları

Soğutucu girişinden çıkışına tek bir döngüde bağlanan soğutma kanallarına seri soğutma kanalları denir. Bu tip soğutma kanalı konfigürasyonu en yaygın olarak tavsiye edilen ve kullanılan konfigürasyondur. Tasarım gereği, soğutma kanalları tek tip boyutta ise, soğutma sıvısı (tercihen) türbülanslı akış hızını tüm uzunluğu boyunca koruyabilir. Türbülanslı akış, ısının daha etkili bir şekilde aktarılmasını sağlar. Bununla

birlikte, soğutma sıvısı tüm soğutma kanalı yolu boyunca tüm ısıyı toplayacağından, soğutucunun sıcaklık artışını en aza indirmeye özen gösterilmelidir. Genel olarak, giriş ve çıkıştaki soğutucunun sıcaklık farkı genel amaçlı kalıplar için 5ºC ve hassas kalıplar için 3ºC içinde olmalıdır. Büyük kalıplar için, soğutma kanalı yapılandırması tek tip soğutma sıvısı sıcaklığı ve dolayısıyla tek tip kalıp soğutması sağlamak için birden fazla seri soğutma kanalı gerekebilir.

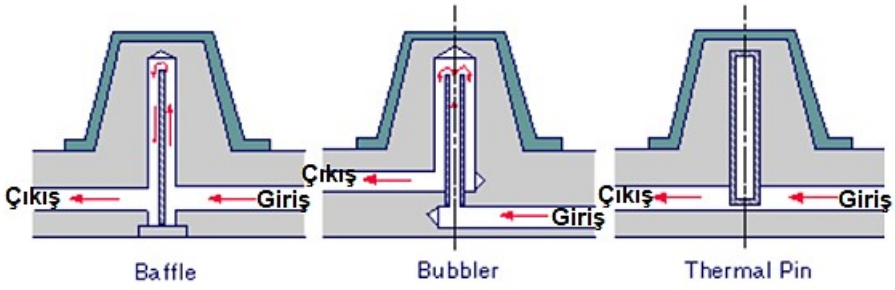


Şekil 3.10 : Seri soğutma kanalı düzeneği [21].

Plastik enjeksiyon kalıplarında erkek çelik olarak adlandırılan kısmın soğutulması genellikle daha zordur. Çünkü kalıbın bu kısmında itici pimler, hareketli maçalar gibi detaylar bulunmaktadır. Erkek çeliğin derinliği fazla ise dengeli ve verimli soğutma yapabilmek için farklı soğutma teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler alternatif soğutma sistemleri konu başlığı altında incelenecektir.

3.1.3. Alternatif soğutma sistemleri

Bölmeler ve kabarcıklar, soğutma sıvısı akışını normalde soğutma eksikliği olan alanlara yönlendiren soğutma hatlarının bölümleridir. Soğutma kanalları tipik olarak kalıp boşluğu ve göbeği boyunca delinir. Ancak kalıp, normal soğutma kanallarını barındırmak için çok uzak alanlardan oluşabilir. Bu alanların parçanın geri kalanıyla aynı şekilde soğutmak için alternatif yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler Bölmeler, Kabarcıklar veya Termal pimlerdir [21].

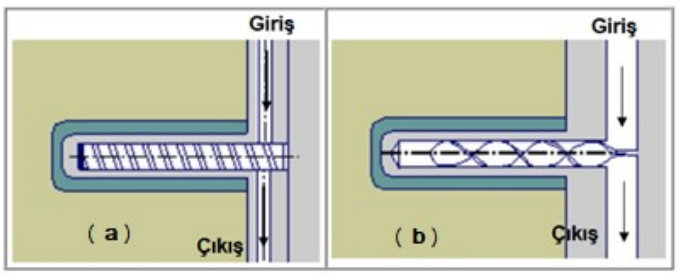


Şekil 3.11 : Bölmeli (baffle), Kabarcıklar (bubbler) ve Termal pimli (thermal Pin) soğutma sistemleri [21].

3.1.3.1. Bölmeler

Bölme, aslında bir soğutma kanalını iki yarı dairesel kanala ayıran bir deliciyle ana soğutma hattına dik olarak açılan soğutma kanalıdır. Soğutucu, kanadın bir tarafında ana soğutma hattından akar, uç etrafında dönerek bölmenin diğer tarafına döner ve ardından ana soğutma hattına geri akar. Kısacası baffle yani bölmeli sistemde, soğutma deliği ikiye bölünecek şekilde araya plaka konulur ve soğutucu akışkanın bu plakanın üstünden diğer tarafa geçmesi sağlanır. Bu yöntem, soğutma sıvısı için maksimum kesit sağlamaktadır. Ancak bölücüyü tam olarak merkeze monte etmek kolay değildir. Soğutma etkisi ve bununla birlikte çekirdeğin bir tarafındaki sıcaklık dağılımı, diğer taraftakinden farklı olabilmektedir.

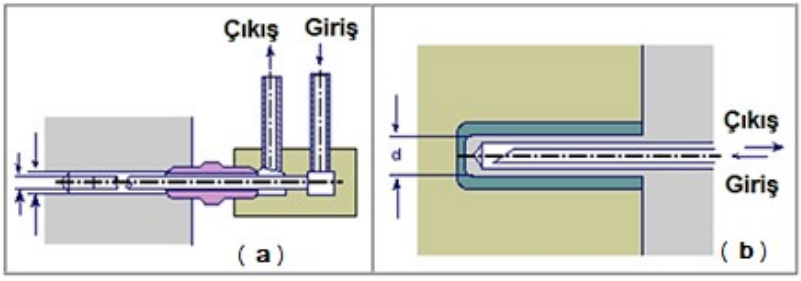
Örneğin, Şekil 3.12'de gösterildiği gibi sarmal bölme, soğutucuyu bir sarmal şeklinde uca ve geri taşır. Bu soğutma sistemi 12 ila 50 mm çaplar için kullanışlıdır ve çok homojen bir sıcaklık dağılımı sağlamaktadır [21].



Şekil 3.12 : (a) Helezon, (b) Spiral bölmeli soğutma sistemi görünümü [21].

3.1.3.2. Fıskiyeler (Kabarcıklar)

Kabarcıklar, deliğin küçük bir tüple değiştirilmesi dışında bir bölmeye benzemektedir. Soğutucu, tıpkı bir çeşme gibi borunun altına akar ve üstten kabarcıklar çıkar. Soğutucu daha sonra, soğutma kanallarından akışına devam etmek için borunun dışında aşağı doğru akar. Özellikle ince çekirdeklerin, en etkili bir şekilde soğutulması kabarcıklar ile sağlanır. Her ikisinin de çapı, her iki kesitte de akış direnci eşit olacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu şartı sağlamak için, iç çap dış çapın 0,707 katı olacak şekilde kullanılmalıdır. Kabarcıklar, ticari olarak da piyasada mevcuttur ve Şekil 3.13'te (a) gösterildiği gibi genellikle göbeğe vidalanarak kullanılmaktadır. 4 mm çapa kadar, çıkışın enine kesitini büyütmek için boru uçta eğimli olmalıdır ve bu teknik Şekil 3.13 'te (b) gösterilmektedir. Kabarcıklar sadece maça soğutması için değil, aynı zamanda delinmiş veya frezelenmiş kanallarla donatılamayan düz kalıp bölümlerini soğutmak için de kullanılabilmektedirler [22].



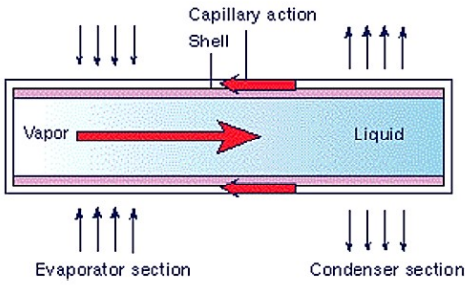
Şekil 3.13 : (a) Kabarcık göbeğe vidalanmış, (b) Kabarcık büyütülmüş maça soğutma sistemi görünümü [21].

Hem bölmeli hem de kabarcıklı sistemlerde, akış alanları daraldığı için akış direnci artmaktadır. Bu nedenle, bu sistemlerin boyutlarının tasarlanmasında dikkat edilmelidir.

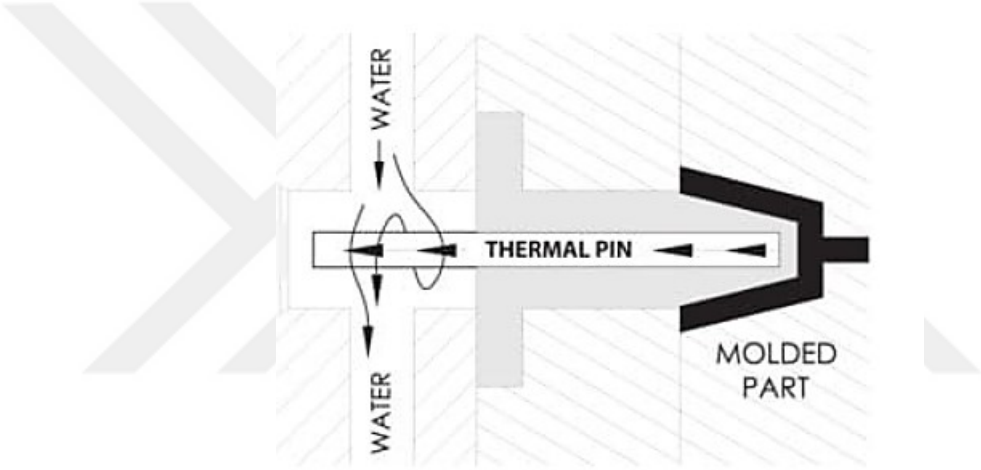
3.1.3.3. Termal pimler

Termal pimler, bölmelere ve kabarcıklara alternatif bir yöntemdir. Termal pim, içerisine sıvı doldurulmuş sızdırmaz bir silindirdir. Şekil 3.14'te gösterildiği gibi sıvı, kalıp çeliğinden ısı çekerken buharlaşmakta ve ısıyı soğutucuya saldıkça yoğunlaşmaktadır. İyi bir ısı iletimi için, termal pim ve kalıp arasında hava boşluğu olması önlenmeli veya

oldukça iletken bir dolgu macunu ile doldurulmalıdır. Termal bir pimin ısı aktarım verimliliği, bir bakır borunun hemen hemen on katıdır [22].



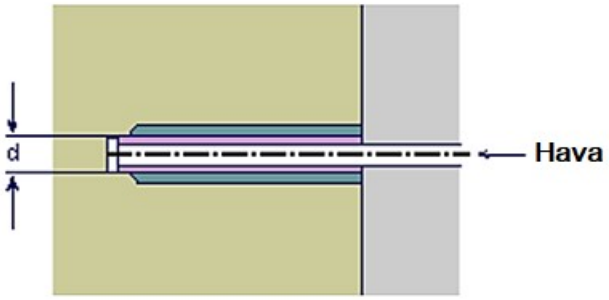
Şekil 3.14 : Termal pim ısı transfer verimlilik görünümü [21].



Şekil 3.15 : Termal pim şematik gösterimi [22].

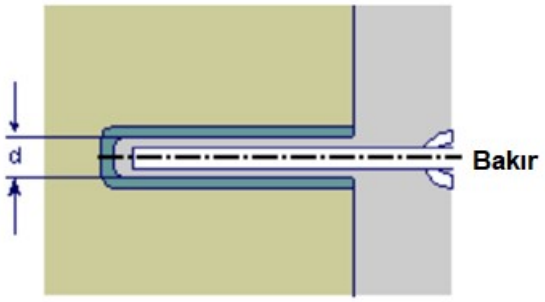
3.2. İnce Çekirdeklerin Soğutulması

Çapın veya genişliğin 3 mm'den az, olduğu durumlarda yalnızca hava ile soğutma mümkün olmaktadır. Şekil 3.16'da gösterildiği gibi, kalıp açma sırasında göbeklere dışarıdan hava üflenir veya içeriden merkezi bir delikten akar. Bu yöntem kuşkusuz, kalıp sıcaklığının korunmasına izin vermemektedir.



Şekil 3.16 : İnce bir çekirdeğin hava soğutması [21].

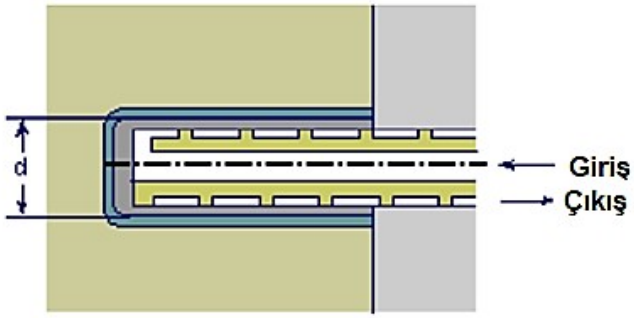
5 mm'den küçük ince çekirdeklerin, daha iyi soğutulması bakır veya berilyum-bakır malzemeler gibi, yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerden yapılmış uçlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu teknik, Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Bu tür parçalar, göbeğe bastırarak takılır ve mümkün olduğu kadar büyük bir enine kesite sahip olan tabanları ile bir soğutma kanalına uzanacak şekilde kullanılır [21].



Şekil 3.17 : İnce bir çekirdeği soğutmak için yüksek termal iletkenlik malzemesi kullanımı [21].

3.3. Büyük Çekirdeklerin Soğutulması

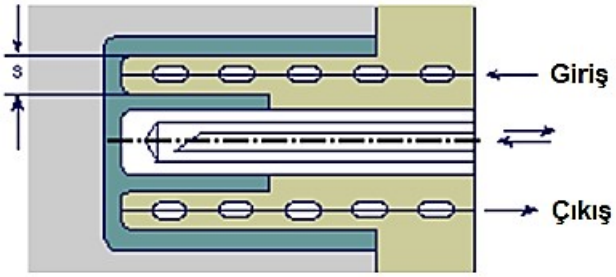
Büyük yani 40 mm ve üzeri çekirdek çapları için doğru bir soğutma sıvısı taşınması sağlanmalıdır. Bu durum, soğutucunun göbeğin ucuna merkezi bir delikten ulaştığı ve bir spiral aracılığıyla çevresine yönlendirildiği deliklerle yapılabilir. Şekil 3.18'de gösterildiği gibi, göbek ve uç arasında, çıkışa sarmal bir şekilde yerleştirilir. Bu tasarım, göbeği önemli ölçüde zayıflatabilmektedir.



Şekil 3.18 : Büyük çekirdeği soğutmak için sarmal bölme kullanımı [21].

3.4. Soğutma Silindiri Göbekleri

Silindir çekirdeklerinin ve diğer yuvarlak parçaların soğutulması, Şekil 3.19'da gösterildiği gibi çift sarmal ile yapılmalıdır. Soğutucu akışkan, bir sarmalda göbek ucuna akar ve başka bir sarmalda geri döner. Tasarım kısıtlamaları nedenleriyle, bu durumda çekirdeğin duvar kalınlığı minimum 3 mm olmalıdır [21].



Şekil 3.19 : Ortadan kabarcıklı çift sarmal [21].

3.5. Soğutma Sistemi Hesaplamaları

Kalıptan ısıyı çıkarmak, enjeksiyon kalıbının temel bir gereksinimidir. Her çevrimde kalıp, enjekte edilen malzemeyi eriyik sıcaklığından püskürtme sıcaklığına soğutmak için bir ısı eşanjörü görevi görür. Enjeksiyon kalıbından ısı, akışkan bir soğutucunun kalıp plakaları boyunca, özellikle boşluklar ve maçalar boyunca kesilen kanallardan

dolaştırılmasıyla uzaklaştırılır. Bu nedenle doğru bir ısı transferi için soğutma kanal tasarımlarının optimum şekilde yapılmasına dikkat edilmelidir.

Soğutma kanalı tasarımında bir diğer önemli nokta, soğutucu akışkanın laminer akıştan ziyade türbülanslı olmasını sağlamaktır. Kalıptan uzaklaştırılan ısının miktarı, soğutucu akışkanın hızıyla ilişkilidir. Isı transfer miktarı, akışkanın laminer akıştan türbülanslı akışa geçmesiyle artmaktadır. Laminer akışta, akışkanın sadece kanal çeperlerine yakın olan bölgeleri kanal çeperleriyle temas halindedir, türbülanslı akışta ise daha fazla akışkan çeperlere temas etmektedir. Bu durum ısı transferini arttırmaktadır. Akışın rejimi, laminer veya türbülanslı olması, boyutsuz bir sayı olan Reynolds sayısı ile belirlenir (Denklem 3.1) [23].

$$Re = \frac{VD}{v} \tag{3.1}$$

D = soğutma kanal çapı (m)

V = soğutma sıvısı hızı (m/s)

v = soğutma sıvısı kinematik viskozitesi (m^2/s)

Dairesel kesitli bir kanal geometrisi için, Reynolds sayısı> 2300 olduğunda türbülanslı akış meydana gelir. Türbülans arttıkça soğutma sisteminin ısı transfer katsayısı artmaya devam etmektedir. Bu nedenle soğutma kanalları için Reynolds sayısının tasarım sınırı> 5000 ve tercihen 10.000'e eşit olmalıdır. Soğutucunun hacimsel akış hızı sabit kalırsa, kanalın boyutunu küçültmek Reynolds sayısını artırabilir. Bu durum daha büyük bir kanalın her zaman daha iyi soğutma ile sonuçlanması gerektiğini düşünmek için doğal dürtüye ters düşer. Su ile karşılaştırıldığında daha yüksek viskoziteleri nedeniyle yağlar veya antifriz çözeltileriyle türbülanslı akış elde etmek daha zordur [23].

Teorik minimum soğutma süresi Denklem (3.2)' den hesaplanabilir. Denklem (3.2) 'deki s 2 terimi ile kanıtlandığı üzere parçanın kalınlığı soğutma süresi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir [24].

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 a} \ln\left[\frac{8}{\pi^2}\frac{(T_M - T_W)}{(T_D - T_W)}\right] \tag{3.2}$$

t_c = Soğutma süresi, (s)

s = Cidar (et) kalınlığı, (mm)

a = Termal yayılma , (mm^2/s)

T_M = Erime sıcaklığı, (°C)

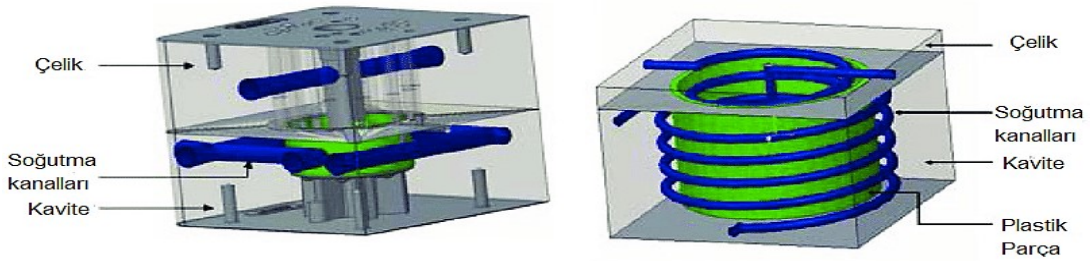
T_W = Duvar sıcaklığı, (°C)

T_D = Kesit üzerindeki ortalama sıcaklık, (°C)

3.6. Konformal Soğutma Sistemleri

Yukarıdaki bölümde geleneksel soğutma tasarımları hakkında bilgiler verilmiştir. Plastik enjeksiyon kalıplama teknolojisinin gelişmesiyle birlikte serbest biçimli ve karmaşık geometrili parçalar da bu yöntem ile üretilmeye başlanmıştır. Artan rekabetle birlikte özellikle girift parça geometrilerine sahip parçaların üretimleri enjeksiyon kalıplama ile daha kolay ve cazip hale gelmiştir.

Geleneksel olarak, düz soğutma kanalları, serbest biçimli parçalarda tek tip ve etkili soğutmayı önler. Bu parçaların karmaşık yapıları nedeniyle geleneksel soğutma tasarımları etkili soğutmayı önler. Katmanlı üretim teknolojisinin gelişmesiyle uyumlu soğutma kanalları, soğutucu akışının kalıplanmış parçanın geometrisini takip edebilmesi ve bu şekilde ısıyı kalıp boşluğundan soğutma kanalına verimli bir şekilde aktarması anlamına gelir. Konformal soğutma kanallarının bir başka ek avantajı, soğutma süresinin azalmasının yanı sıra parçanın yüzey sıcaklığındaki dağılımı iyileştirmesidir. Soğutma işleminde verimlilik, daha sonra parça ile soğutma sıvısı akışı arasındaki termal değişim sürecini en üst düzeye çıkaran optimum bir kanal sistemi tasarlanarak elde edilir [24,25].



Şekil 3.20 : Konformal soğutma tasarımı görseli [26].

3.7. Enjeksiyon Kalıplarının Soğutulmasında Kullanılan Akışkanlar

Enjeksiyon kalıplamada, kalıplama işleminin sıcaklığını düzenlemek ve kesme nedeniyle oluşan aşırı ısıyı gidermek için soğutma sistemleri kullanılır. Genellikle su veya basınçlı hava soğutma sistemi şeklinde standart iki yöntem kullanılmaktadır.

Su soğutma işleminde su, kalıp boşluğunun hemen dışına ve kalıbın giriş noktalarından geçen bir hat üzerinden akmaktadır. Bu soğutma hattı, aynı zamanda bir pompa ve soğutucu veya ısı eşanjörü içeren kapalı devre bir sisteme bağlanmakta ve belirlenen sıcaklık değerlerinde su pompalayarak çalışmaktadır. Dişi ve erkek kalıp yarımları içerisine açılan soğutma kanallarından geçen suyun birleşim bölgelerinden kalıp içerisine kaçmasını önlemek için geçiş yolları üzerinde bulunan delikler tapa ile körlenerek kapatılır. Kalıp destek plakaları arasındaki su kaçaklarını da önlemek için dairesel kesitli salmastralar kullanılır. Su soğutma sisteminin uygun olmadığı veya su soğutmanın kalıp ve kalıplanan parçaya zarar verdiği durumlarda, kalıp basınçlı hava ile soğutulur. Bu soğutma sisteminde basınçlı hava, kalıp içerisine açılan soğutma kanallarını dolaşarak kalıptan ayrılmaktadır. Basınçlı hava kullanılan soğutma sisteminde soğutma etkisi, su soğutmalı sisteme göre daha yavaştır. Bu nedenle hava soğutma sistemi daha çok et kalınlığı düşük (ince cidarlı) ve kalıp sıcaklığının çok fazla değişmediği kalıplama işlemlerinde kullanılır [27].

Bunların dışında üçüncü bir alternatif olarak da ısı transfer yağları kullanılmaktadır. Bu soğutma işlemi, yağ soğutucu eşanjörler tarafından yapılır. Genellikle soğutma kulesi veya chillerden gelen suyun, makine tarafından gelen sıcak yağ ile çarpışmasıyla gerçekleştirilir.

Doğada ısı iletimi en yüksek olan sıvılardan biri sudur. Suyun ısı iletim katsayısı yağlara göre çok yüksektir. İletimle ısı aktarımı durgun bir ortamda gerçekleşir, birbirleriyle temas halindeki moleküllerin kafes yapısındaki titreşimler sayesinde ısı bir sonraki moleküle taşınır. Tablo 3.1'de bazı akışkanların ısı iletim katsayıları verilmiştir. Taşınımla ısı aktarımı ise temel olarak moleküllerin kitleler halinde hareketinden kaynaklanır. İki farklı sıcaklıktaki yüzey arasında hareket halindeki akışkan bu hareketi sırasında ısı taşınımını sağlar.

Tablo 3.1 : Bazı malzemelerin ve akışkanların ısı iletim katsayıları [28].

Akışkan	Isı İletim Katsayısı (W/m.K)
Gazlar	0,002...0,2
Yağlar	0,1...1,0
Su	0,5...0,7
Sıvı Metaller	10,0...100
Metal Olmayan Katılar	0,3...3,0

Plastik enjeksiyon kalıbında iki türde ısı transferi gerçekleşir. İlk olarak, eriyik plastikten kalıbın çelik yüzeyine ısı radyasyonu ile ısı girişi, ikinci olarak da kalıbın çelik yüzeyinden soğutucu akışkana doğru taşınım (konveksiyon) ile ısı çıkışıdır [29].

Soğutma sistemlerinde dikkat edilmesi gereken bir husus da kullanılan akışkanların ısı taşınım katsayılarıdır. Isı taşınım katsayısı ne kadar yüksekse ısı taşınım miktarı da o kadar yüksek olur. Bu durum daha iyi bir ısı transferini sağlayarak, kalıplanan parçada oluşan enjeksiyon problemlerini ve çevrim sürelerini de azaltmaktadır.

Bazı akışkanların ısı taşınım katsayıları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 : Bazı akışkanların ısı iletim katsayıları [28].

Akışkan	Isı Taşınım Katsayısı ($W/m^2.K$)	
	Doğal Isı Taşınımı	Zorlanmış Isı Taşınımı
Gazlar	5...30	30...300
Yağlar	5...100	30...3.000
Su	30...300	300...10.000
Sıvı Metaller	50...5 000	500...20.000
Kaynayan Su	2.000...20.000	3.000...100.000
Yoğuşan Su Buharı	3.000...30.000	3.000...200.000

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE-YYPE) malzemeden üretilen yüksek et kalınlıklı "T" ekleme parçasının enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmesinde yaşanan, soğutma kaynaklı üründe kalite problemlerinin, deneysel olarak incelenmesi ve problemlerin giderilmesi hedeflenmektedir. Bu bağlamda, yüksek cidar kalınlıklarına sahip ürünlerin plastik enjeksiyon kalıplarındaki soğutma sistemlerinin tasarımları ele alınmıştır. Klasik ve geliştirilmiş soğutma sistemi ile yapılan deneysel çalışmalar iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İki farklı soğutma sisteminin numune üzerindeki ölçü (çekme) ve şekil değişimlerine (çarpılmalara) olan etkileri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada numune, yeraltı su ve doğalgaz tesisatlarında kullanılan yüksek cidar kalınlıklarına sahip T ekleme parçası olup enjeksiyon yöntemiyle elde edilmektedir. Elde edilen numuneler hem klasik hem de geliştirilmiş soğutma sistemine sahip tek gözlü bir kalıpta basılarak, parça kalitesi üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

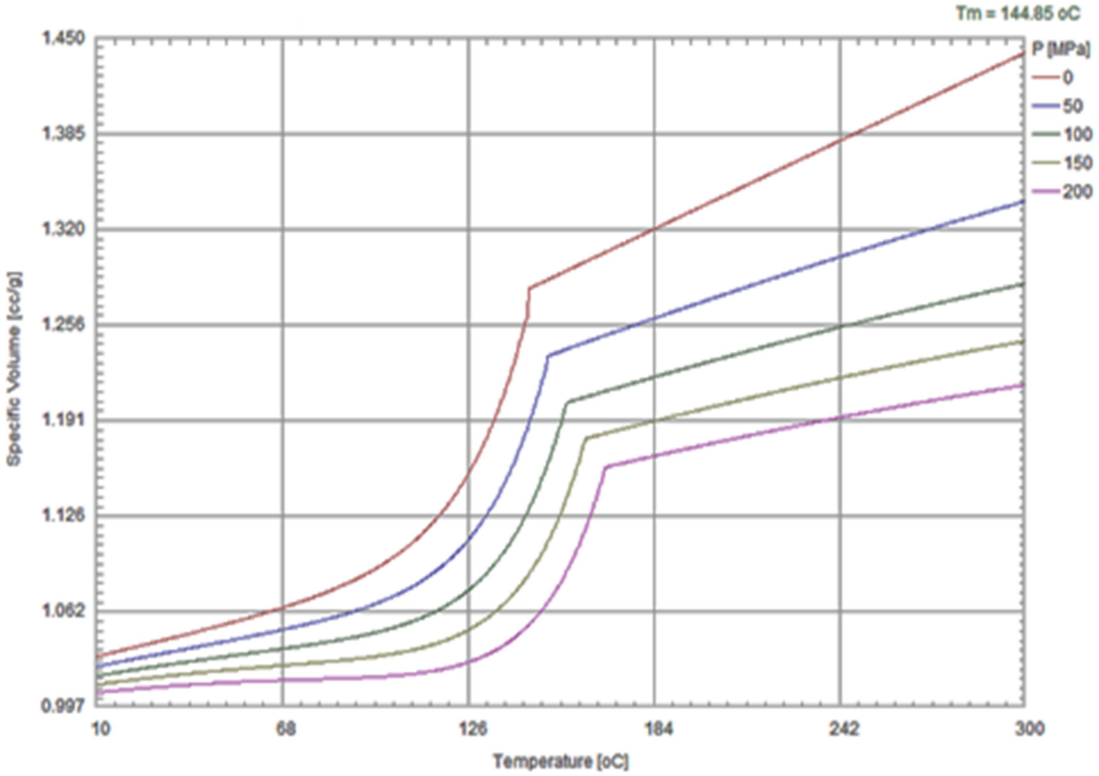
4.1. Malzeme

Yüksek Yoğunluklu Polietilen (YYPE) malzemenin geliştirilmiş bir türü olan PE100, günümüzde doğalgaz ve içme suyu taşımacılığından, arıtma sistemlerine, ısıtma-soğutma sistemlerinden, tarım uygulamaları, rafineriler ve biyogaz tedariğine kadar boru veya ekleme parçalarında kullanılmaktadır.

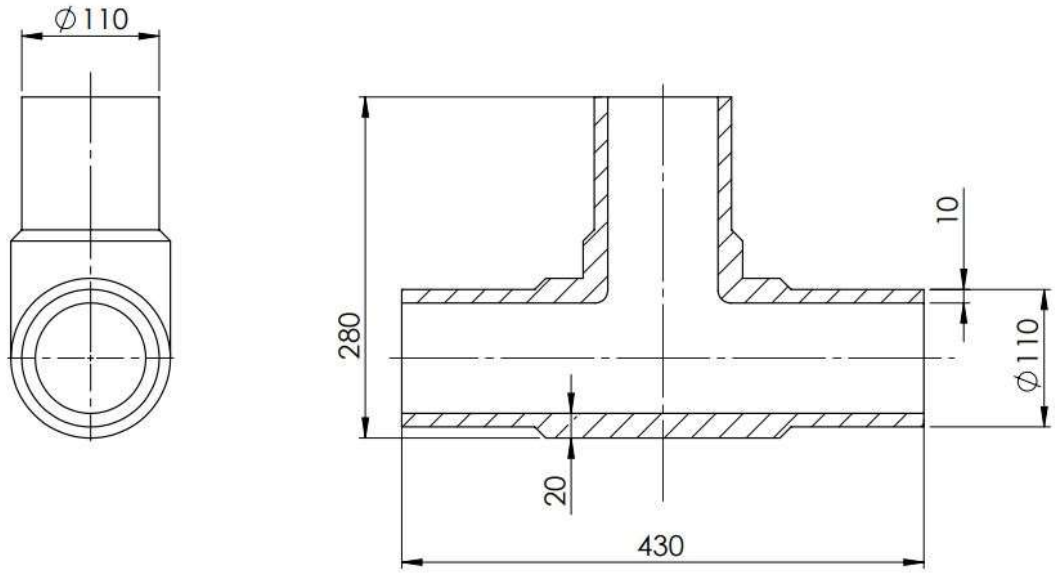
Deneysel çalışma kapsamında plastik enjeksiyon yöntemiyle basılan polimer malzeme karbon siyahı katkılı ve granül yapıda olup farklı katkı ve dolgu maddesi içermeyen orijinal ham maddedir. Kullanılan malzemenin teknik özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Malzemeye ait PvT diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir. Deney numunesi olarak alt yapı çalışmalarında kullanılan "T" ekleme parçası belirlenmiştir (Şekil 4.2).

Tablo 4.1 : YYPE (Eltex TUB121 PE100) teknik özellikleri.

Özellik	Tipik Değeri	Birim	Test Metodu
Yoğunluk	959	kg/m³	ISO 1872-1/ISO 1183-1
Erime Akış Hızı (190°C/5 kg)	0,3	g/10 dak	ISO 1133-1
Elastiklik Modülü	1.100	MPa	ISO 527-2
Kopmada Uzama	>600	%	ISO 527-2
Çekme Dayanımı	25	MPa	ISO 527-2
Karbon Siyahı Oranı	2	%	ASTM D1603
Oksidasyon İndüksiyon Süresi (210°C)	>20	dak	ISO 11357-6
Vicat Yumuşama Sıcaklığı (10N)	128	°C	ISO306/A50
Yavaş Çatlak Büyümesine Direnç	1.000	saat	ISO 13479
Kalıpta Çekme Oranı	2,0-3,0	%	-
Termal İletkenlik (20°C)	0,45	W/m.K	-
Sertlik (Shore D)	60	-	ISO 868
Proses Sıcaklığı	190-240	°C	-



Şekil 4.1 : YYPE-PE100 PVT diyagramı [30].



Şekil 4.2 : Deney numunesinin ölçüleri.

4.2. Yöntem

Yapılan deneysel çalışmada plastik enjeksiyon kalıplarında kullanılan soğutma sistemi tasarımları ile elde edilen numunelerin parça kalitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışma yöntemi sırasıyla altı adımdan oluşmaktadır.

- Parça giriş noktası analizi,
- Enjeksiyon kalıbı ve soğutma sistemi tasarımı,
- Enjeksiyon kalıplama işlemi,
- Lazer ölçüm cihazı ile boyutsal ölçü kontrolü,
- Sertlik değerlerinin incelenmesi,
- Çekme mukavemet değerlerinin incelenmesidir.

Enjeksiyonla kalıplama işleminde farklı ütüleme sürelerinin çekme ve çarpılmadaki etkisi de ayrıca tez çalışmasında ele alınmıştır.

4.2.1. Plastik enjeksiyon makinesi özellikleri

Deneysel çalışma kapsamında Krauss Maffei KM500 enjeksiyon makinesi kullanılmaktadır.

Tablo 4.2 : Enjeksiyon makinesi teknik özellikleri.

Enjeksiyon Kapasitesi (gr)	Kapama Kuvveti (kN)	Vida Çapı (mm)	Enjeksiyon Basıncı (MPa)
3.500	5.000	110	150



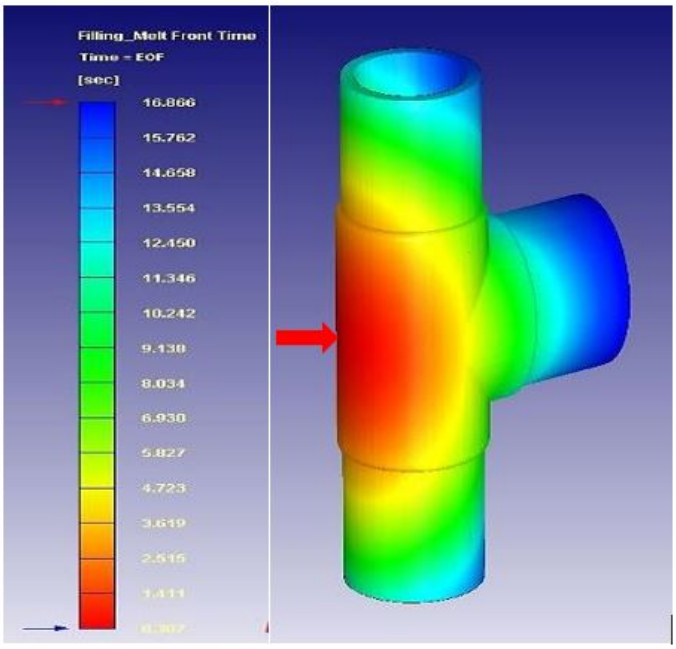
Şekil 4.3 : Enjeksiyon makinesi görseli.

4.2.2. Parça giriş noktası analizi

Parçanın geometrik yapısına ve seçilen malzemeye göre dengeli bir akış dağılımı, parça sıcaklık dağılımları, soğutma tasarımlarının optimizasyonu, çekme ve çarpılma davranışları Moldex3D® analiz programı ile yapılmıştır.

Moldex3D®, plastik enjeksiyon sistemleri için geliştirilmiş olan bir CAE (Bilgisayar Destekli Mühendislik) kalıplama simülasyon yazılımıdır. Bu analiz programında, geliştirilmiş soğutma sistemine sahip kalıbın 3d malzeme akışı, basınç düşüşü, birleşme izi, gaz boşlukları, sıcaklık dağılımları, soğuma süresi, çekme ve çarpılma analizleri vb. gibi proses optimizasyonu yapılmıştır.

Parçanın geometrik yapısına ve seçilen malzemeye göre dengeli bir akış sağlanması amacıyla giriş bölgesi tayini yapılmıştır (Şekil 4.4).

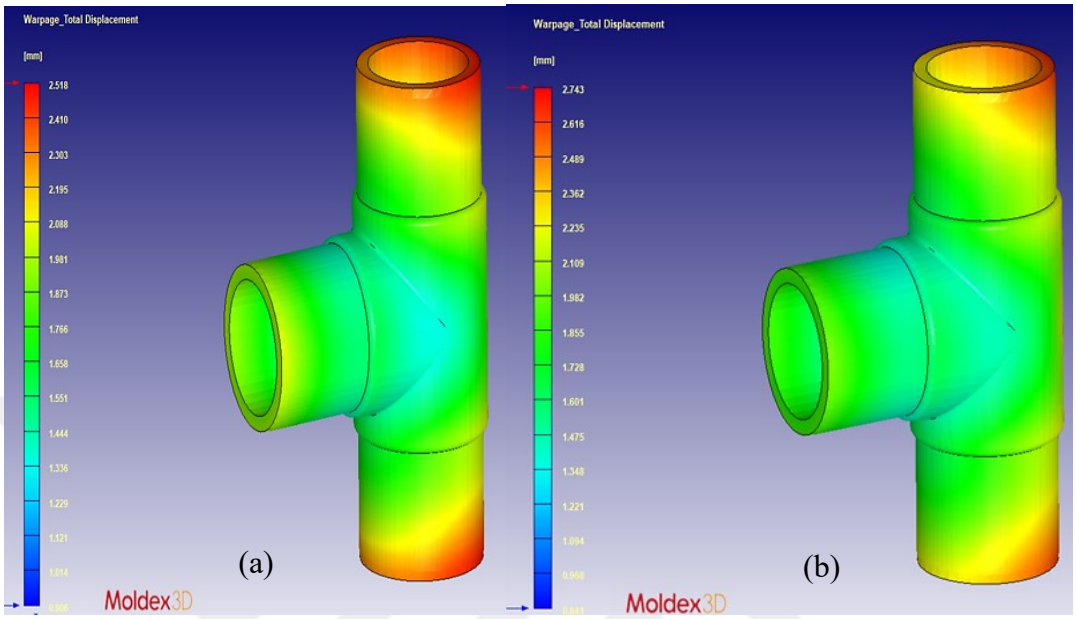


Şekil 4.4 : Enjeksiyon giriş noktası analizi.

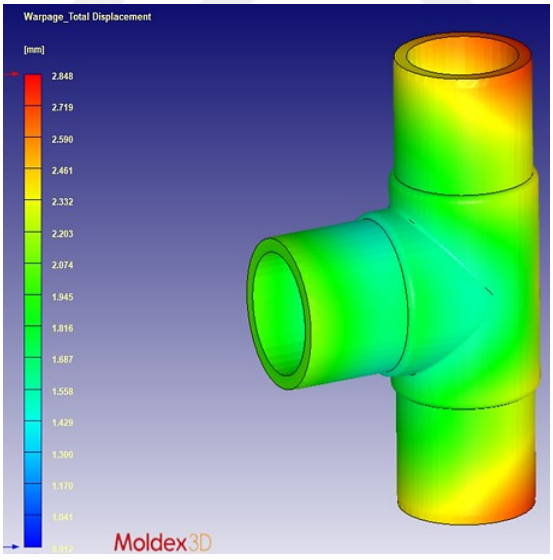
Analiz sonuçlarına göre belirlenen giriş noktası sonrası, izlenecek adım yolluk tasarımlarının yapılmasıdır.

Kullanılacak malzemenin proses sıcaklık çalışma aralığı 190-240ºC olarak tedarikçi tarafından verilmiştir. Önerilen çalışma sıcaklığı minimum ve maksimum sıcaklıkların ortalama değerlerine yakın bir değerde çalışılmasıdır. Geliştirilmiş soğutma

tasarımında, optimum eriyik sıcaklığının belirlenmesi amacıyla analiz programında, 200, 210 ve 220 ºC olmak üzere 3 farklı sıcaklık değerlerinde analizler gerçekleştirilerek çarpılma değerleri incelenmiştir (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6).



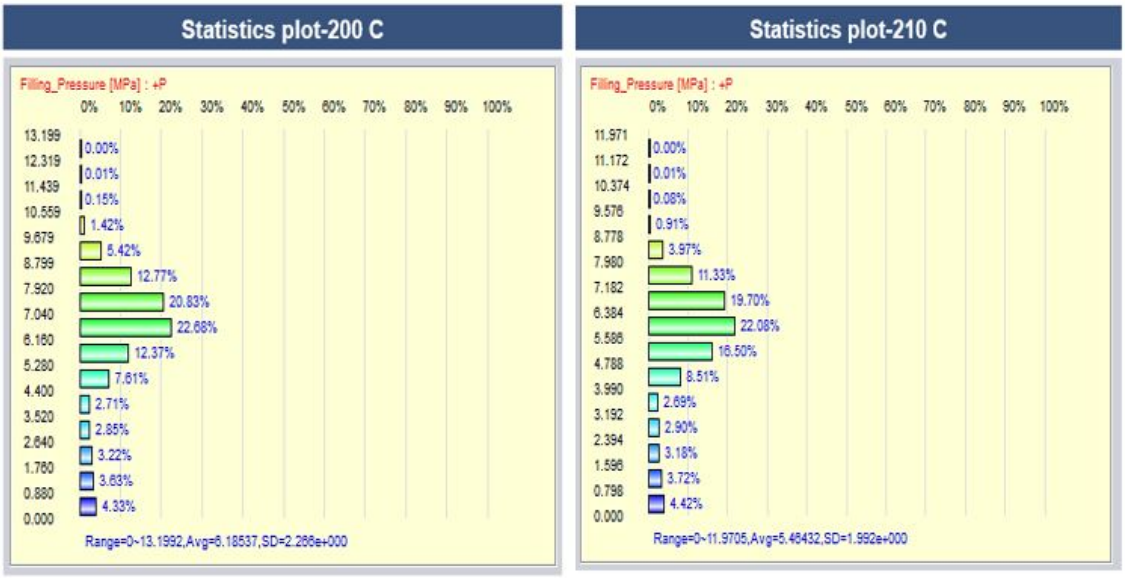
Şekil 4.5 : (a) Eriyik sıcaklığı 200 ºC (b) Eriyik sıcaklığı 210 ºC.



Şekil 4.6 : Eriyik sıcaklığı 220 ºC.

Analiz sonuçlarına göre çarpılma değerleri incelendiğinde 200ºC'deki eriyik sıcaklığı çarpılma sonuçlarının daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 4.5 (a)). Ancak 200 ºC eriyik sıcaklığında eriyik malzemenin daha rahat yürütülmesi için enjeksiyon

basınçlarını arttırmak gerekmektedir. 200ºC'deki basınç değeri 210ºC'dekine göre daha fazla olduğu analiz sonuçlarında ortaya çıkmıştır.

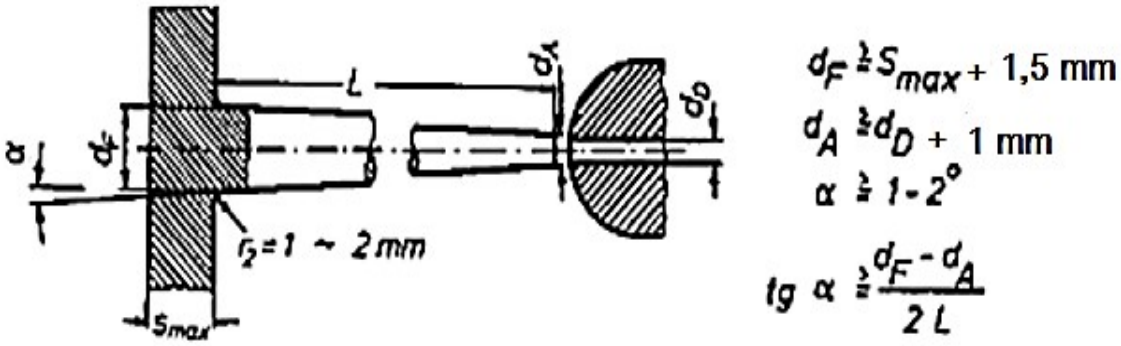


Şekil 4.7 : Eriyik sıcaklığına bağlı dolum basınçlarının analiz sonuçları.

Basınçların yüksek olması enjeksiyon makinesinin enerji sarfiyatını arttırarak daha yüksek üretim maliyetleri doğuracaktır. Bu nedenle eriyik sıcaklığı 210ºC seçilmiştir.

4.2.3. Kalıp ve soğutma sistemi tasarımları

Yolluk, enjeksiyon memesinden gelen eriyik malzemenin kalıp kavitesine akmasını sağlar. Şekil 4.8'de yolluk tasarımına ait hesaplamalar verilmiştir.



Şekil 4.8 : Yolluk tasarımı hesaplamaları [5].

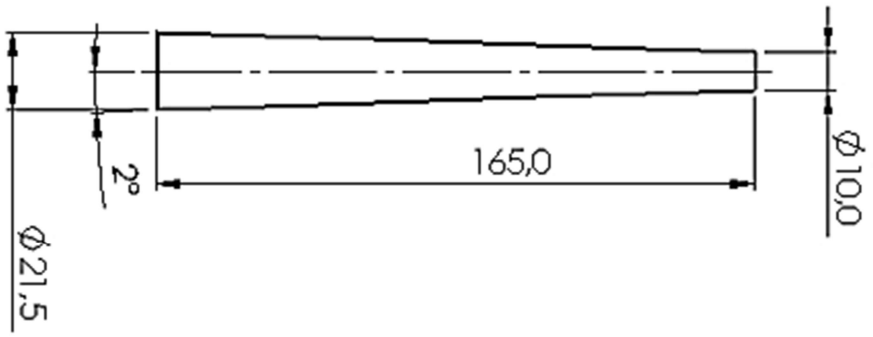
Deney parçası için yolluk tasarımı hesaplamaları şu şekildedir:

S_{max} : 20 mm, d_D : 8 mm,

d_A : 10 mm, d_F : 20+1,5=21,5 mm,

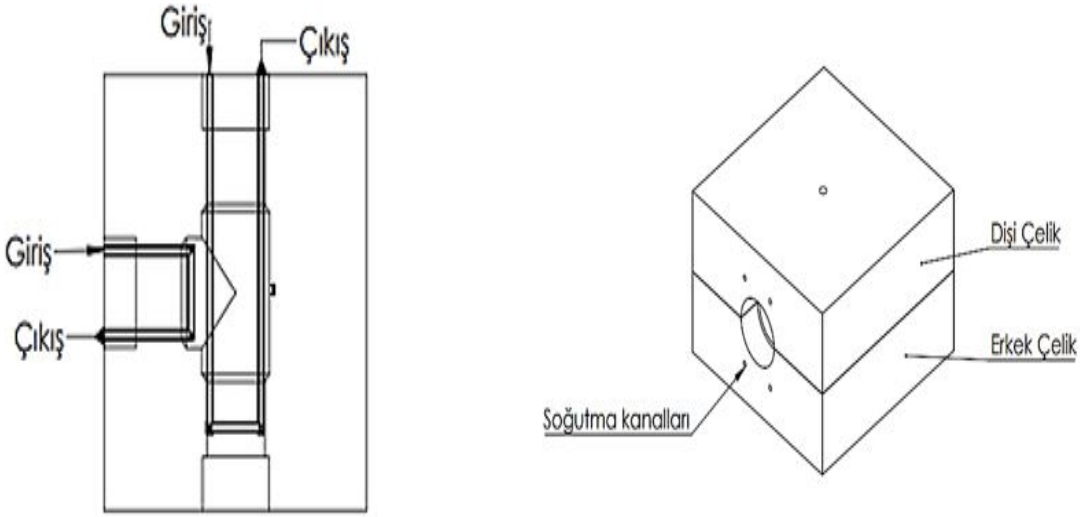
L : 165 mm.

Bu hesaplama ölçülerine göre yolluk tasarımı Şekil 4.9'da yapılmıştır.

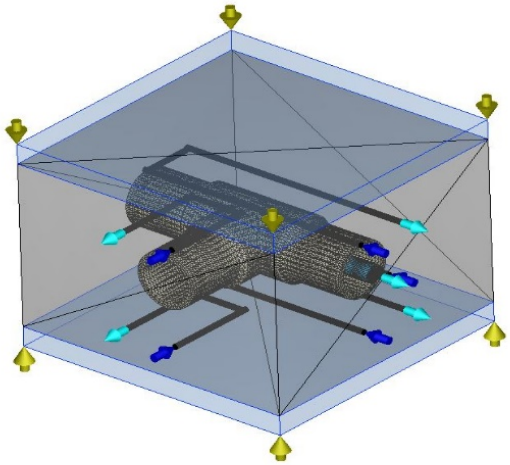


Şekil 4.9 : Parça için yolluk tasarımı.

Deneysel çalışmada kullanılan kalıbın soğutma sistemi ilk olarak klasik tasarlanmış olup, bu sistemde su dolaşımı plakalarda iki giriş, iki çıkış şeklinde yapılmaktadır (Şekil 4.10).

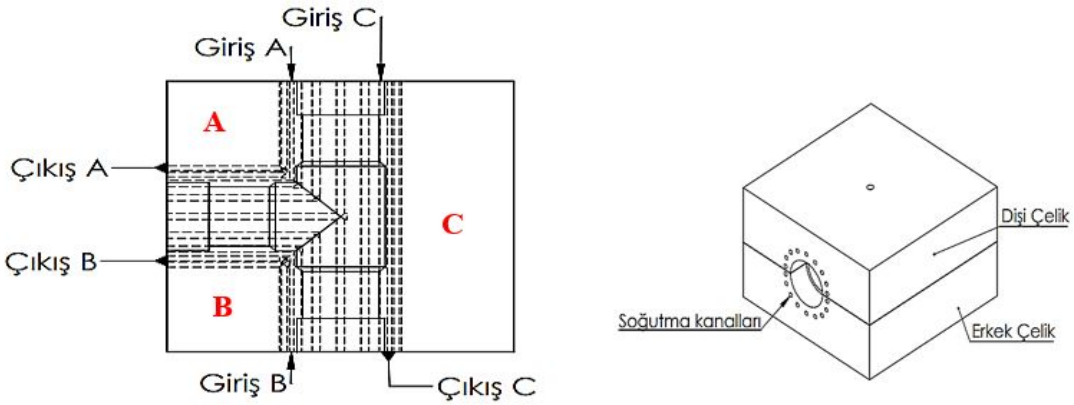


Şekil 4.10 : Klasik soğutma sistemli tasarım.



Şekil 4.11 : KST'de soğutma kanallarının üç boyutlu görünümü.

Geliştirilmiş soğutma sisteminde, erkek plakada A bölgesinde 3 giriş 3 çıkış, B bölgesinde 3 giriş 3 çıkış ve C bölgesinde de 3 giriş ve 3 çıkış şeklinde toplamda 9 giriş 9 çıkışlı bir soğutma kanal tasarımı yapılmıştır. Aynı şekilde dişi plakada da aynı soğutma giriş çıkışları yapılarak parçayı homojen bir şekilde çevreleyen bir yapı mevcuttur. Soğutma kanalları klasik sistemdeki gibi uzun bir kanal hattı boyunca yapılmayıp daha kısa yoldan ve her bölgeyi ayrı ayrı soğutacak şekilde açılmıştır. Özellikle yüksek et kalınlığına sahip orta bölgeyi soğutmak için C bölgesinde oluşturulan 3 giriş 3 çıkış şeklinde düz bir hat açılmıştır. Bu durum suyun ısınmasını da önleyeceği için parçayı daha fazla soğutması düşünülmektedir (Şekil 4.12). Tablo 4.3' de klasik ve geliştirilmiş soğutma sistem tasarımlarının teknik özellikleri verilmiştir.

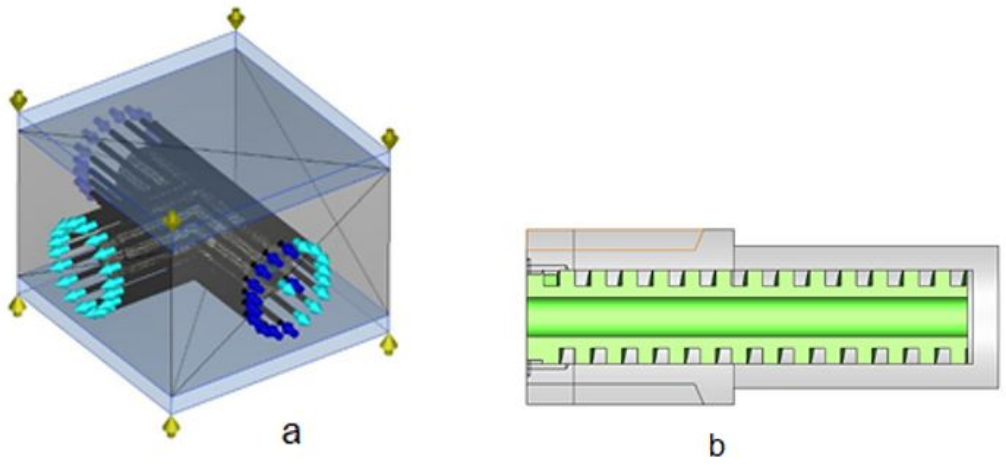


Şekil 4.12 : KST'de soğutma kanallarının üç boyutlu görünümü.

Tablo 4.3 : Enjeksiyon kalıbı ve soğutma tasarımlarının teknik özellikleri.

Deneysel çalışma	Soğutma sıvısı	Kalıp malzemesi	Soğutma kanal çapı Ø d (mm)	Kalıp boşluğuna olan mesafe D (mm)	Soğutma kanalları arası ölçüler P (mm)	Reynolds Sayısı
Klasik soğutma sistemli tasarım	su	DIN1.2738	10	25	60	7.000
Geliştirilmiş soğutma sistemli tasarım	su	DIN1.2738	12	12	24	8.400

Yapılan kalıp tasarımında maça çekirdeklerinin soğutulmasında sarmal bölme tasarımı kullanılmıştır.



Şekil 4.13 : (a) GST'de soğutma kanalları üç boyutlu görünümü. (b) maça (çekirdek) soğutması için sarmal bölme tasarımı üç boyutlu görünümü.

Soğutucu akışkanın soğutulmasında chiller cihazı kullanılmıştır. Chiller cihazları, soğutucu gazın buharlaştırıcı ve kompresörden kazandığı enerjiyi, yoğuşturucu üzerinden atıp suyu soğuturlar.

Deneysel çalışma kapsamında, kalıbın soğutulmasında akışkan olarak su kullanılmıştır. Suyun sıcaklık kontrolü Frigel kalıp şartlandırıcısı tarafından yapılmıştır.

Tablo 4.4 : Kalıp şartlandırıcı cihazı teknik özellikleri.

	Ticari Adı	Teknik Özellikleri
	Frigel	Çift ısı kontrollü, -5°C ile +90°C aralığında çalışma sıcaklığı, ± 0,5°C sıcaklık hassasiyeti

4.2.4. Enjeksiyon kalıplama

Deneysel çalışma iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada iki farklı soğutma sistemi aynı proses şartlarında gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise geliştirilmiş soğutma sistemi tasarımda ütüleme süreleri arttırılarak ütüleme süresinin parça çekme ve çarpılmasına olan etkisi araştırılmıştır. İki çalışma sonucunda numunelerin çarpılma değerleri incelenmiştir.

İlk aşamada deneyler Tablo 4.5' de verilen şartlarda hem klasik (KST) hem de geliştirilmiş (GST) soğutma sistemli kalıpta aynı proses koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.5 : Klasik ve Geliştirilmiş soğutma sistemi ile elde edilen numunelerin proses şartları.

Kalıp Sıcaklığı (±2ºC)	Çevrim Süresi (s)	Soğuma Süresi (s)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (bar)	Ütüleme Süresi (s)	Enj. Sıcaklığı (ºC)	Enj. Ocak Sıcaklıkları (ºC)
40	360	220	80	60	110	210	210-205-200-190

İkinci aşamada ise geliştirilmiş soğutma sistemi ile ütüleme süreleri arttırılarak numuneler elde edilmiştir. Deneyde kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklıkları, ütüleme basıncı ve soğuma süresi sabit tutulmuştur (Tablo 4.6).

Tablo 4.6 : Geliştirilmiş soğutma tasarımında farklı ütüleme sürelerine göre deney şartları.

Geliştirilmiş Soğutma Sisteminde Prosesler	Çevrim Süresi (s)	Ütüleme Süresi (s)	Soğuma Süresi (s)	Enjeksiyon Basıncı (bar)	Ütüleme Basıncı (bar)	Kalıp Sıcaklığı (±2ºC)	Enj. Sıcaklığı (ºC)	Enj. Ocak Sıcaklıkları (ºC)
Deney-1	360	160	170	80	60	40	210	210-205-200-190
Deney-2	360	200	130	80	60	40	210	210-205-200-190
Deney-3	360	250	80	80	60	40	210	210-205-200-190



Şekil 4.14 : Deneysel çalışma kapsamında elde edilen numune görselleri.

4.2.5. Lazer ölçüm cihazı ile boyutsal ölçü kontrolleri

Lazer ölçüm cihazı ile kalıplanan numunelerin fiziksel geometrik ölçümleri ile numunenin tasarım datası (ölçüleri) karşılaştırılmıştır. Ölçü kontrolleri sonunda numunede meydana gelen çekme miktarları ve çarpılma değerleri belirlenmiştir. Farklı parametreler ile basılmış olan numune ürünler kıyaslanarak optimum sonuçlar için doğrulamalar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.7 : Üç boyutlu lazer ölçüm cihazının teknik özellikleri.

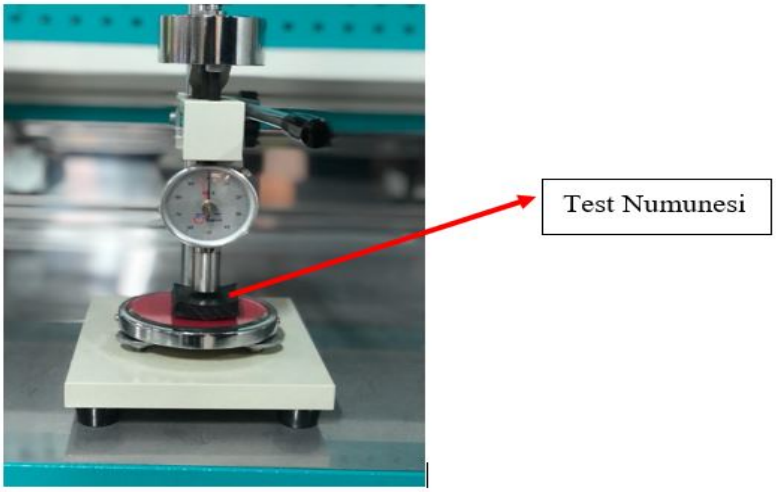
	Ticari Adı	Teknik Özellikleri
	HEXAGON ABSOLUTE ARM	RS5 Lazer Tarayıcı,7 Eksen, ± 0,001 mm hassasiyet

4.2.6. Sertlik değerlerinin incelenmesi

Deneysel çalışma kapsamında klasik ve geliştirilmiş soğutma tasarımlarından elde edilen numunelerin iki farklı bölgesinden parçalar alınarak sertlik değerleri incelenmiştir. 20x20x10mm ebatlarında parçalar kesilerek test numuneleri oluşturulmuştur. Her parametreden minimum 5 numune alınmış olup, 10 adet parçanın sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak yazılmıştır.



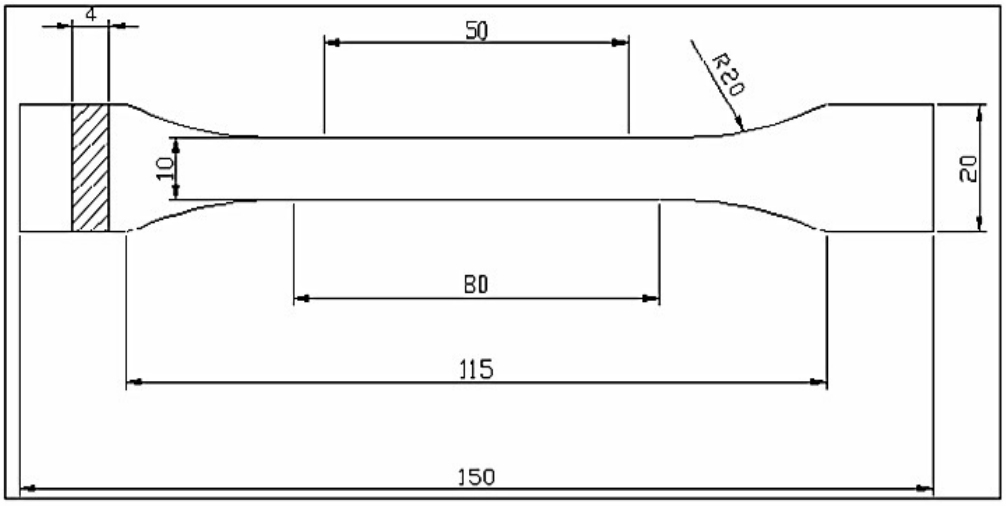
Şekil 4.15 : Parça üzerinden sertlik deneyi için alınan numune görünümü.



Şekil 4.16 : Shore D Sertlik ölçüm cihazı görseli.

4.2.7. Mukavemet değerlerinin incelenmesi

Deneysel çalışma kapsamında elde edilen parçalardan çekme test numuneleri alınarak mukavemet değerleri incelenmiştir. Bu kapsamda aşağıda verilen ölçüler, ISO 527-2'ye göre Tip 1-A deney numunesi için geçerli olan standart ölçüleridir.



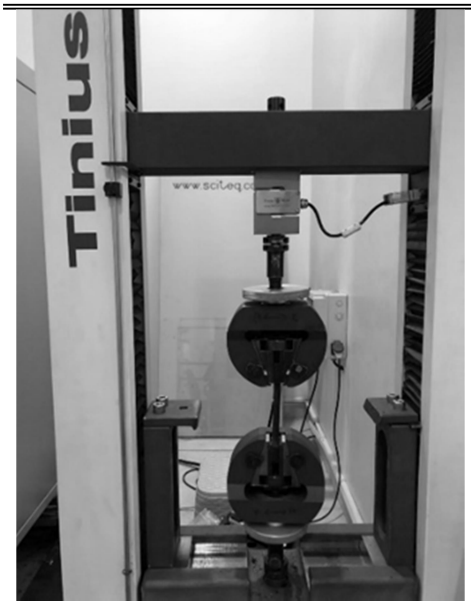
Şekil 4.17 : Çekme testi deney numunesi ölçüleri (ISO 527-2 Tip 1A) [31].



Şekil 4.18 : Çekme testi deneyi için hazırlanan numune görselleri.

Hazırlanan deney numuneleri, Tablo 4.8'de teknik özellikleri verilen cihazda test edilmiştir.

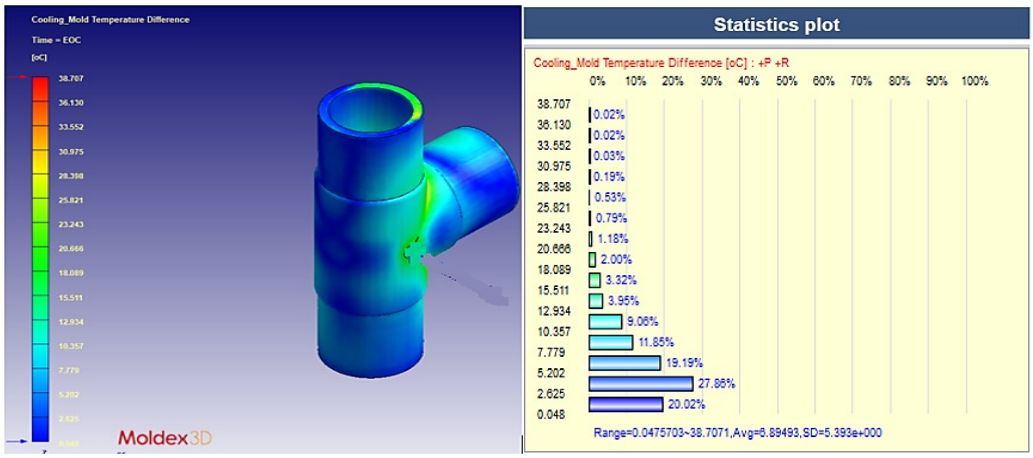
Tablo 4.8 : Çekme test cihazının teknik özellikleri.

	Ticari Adı	**Teknik Özellikleri**
	TINIUS OLSEN	2000 kN, PLC kontrollü

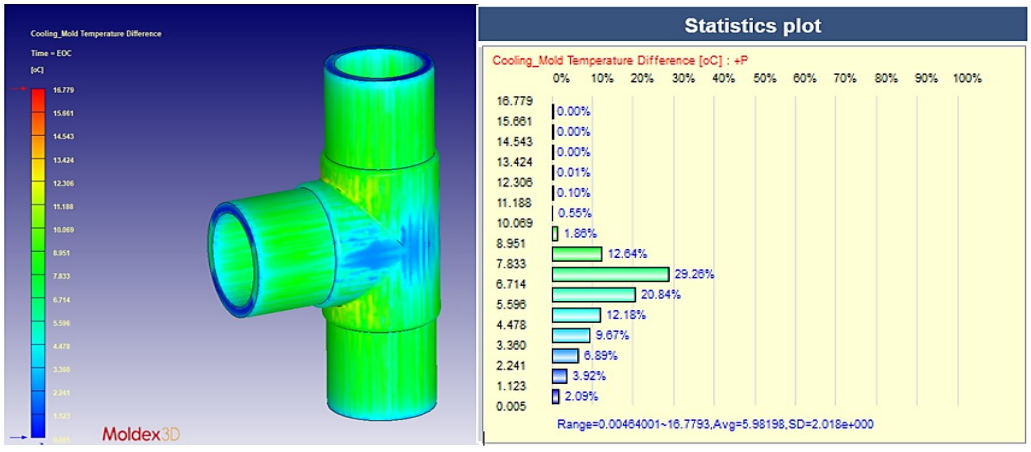
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Bilgisayar Destekli Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Klasik ve geliştirilmiş soğutma tasarımlarında, soğutma analizleri sonucunda parça üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



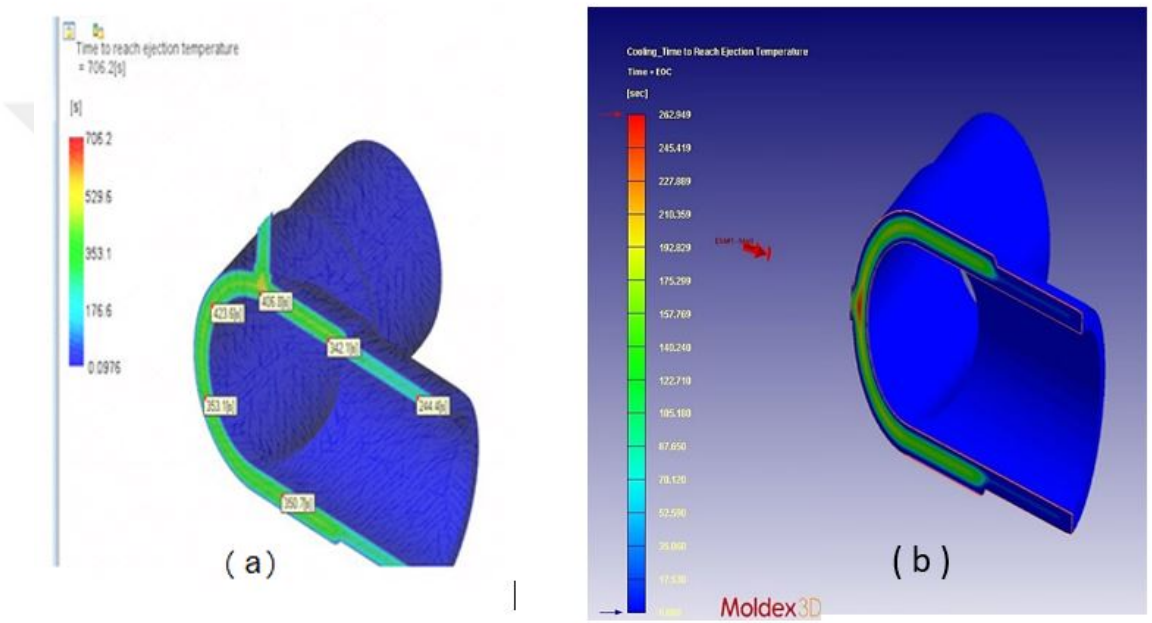
Şekil 5.1 : Klasik soğutma tasarımında, analiz sonucunda parça üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.2 : Geliştirilmiş soğutma tasarımında, analiz sonucunda parça üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı.

Aynı proses şartlarına göre analiz edilen klasik ve geliştirilmiş soğutma tasarımlarında, parça üzerindeki sıcaklık dağılımları geliştirilmiş soğutma tasarım yapısında %57,9 oranında düştüğü görülmüştür.

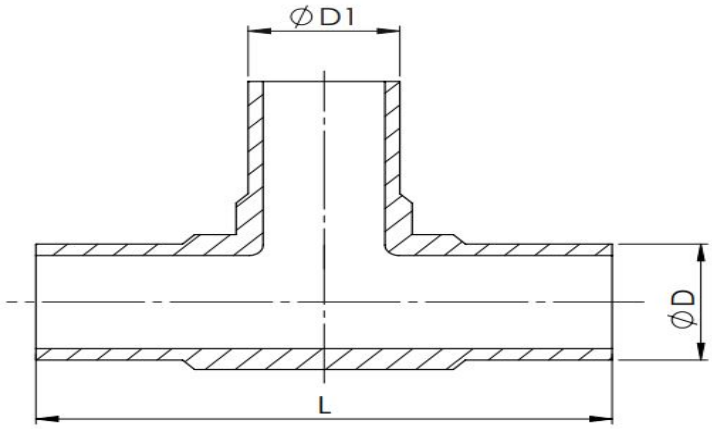
Ayrıca Şekil 5.3'te parçanın tamamen donması yani soğuması için gerekli sürelere ait grafikler verilmiştir. Kalın cidara sahip bölge, klasik tasarımda 706. saniyelerde, geliştirilmiş tasarımda ise 262,9 saniyede tamamen soğuyabilmektedir. Bu durumda %62,74 oranında bir iyileşme sağlanmıştır.



Şekil 5.3 : (a) KST'de maksimum soğuma süresi grafiği. (b) GST'de maksimum soğuma süresi grafiği.

5.2. Çekme Miktarı Sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında numuneler oda sıcaklığında çekme miktarları 0,01 mm hassasiyetinde dijital kumpas ile ölçülmüştür. Ölçümlerde yirmi dört saat sonra yapılan ölçü kontrollerindeki değerler dikkate alınmıştır. Ölçüm iki noktadan yapılarak, L ve çap (D) ölçüsünde % çekme değerleri incelenmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 : % Çekme oranları için ölçüm noktaları.

Numunelerin %çekme oranı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır. Deneysel çalışma kapsamında D1 çap ölçüsü dikkate alınmamıştır.

Düzlemsel yüzey için;

L_K: 430 mm (Kalıp boşluğundan alınan numune boyu uzunluğu)

L: Numunenin düzlem uzunluğu (mm)

$$\textbf{Boydaki \% ÇekmeOranı} = (L_K - L).100/L_K \quad (5.1)$$

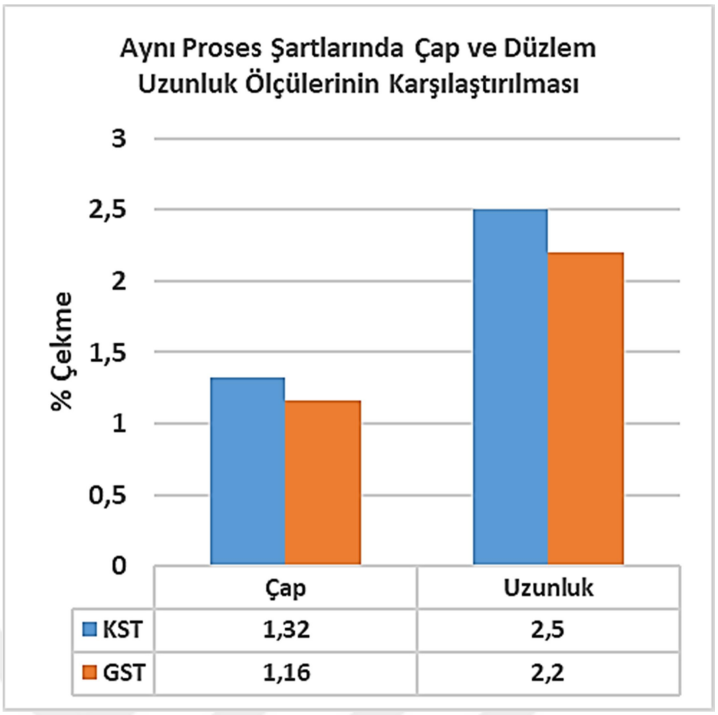
Çaptaki ölçümler için;

D_K: 110 mm (Kalıptan alınan çap ölçüsü)

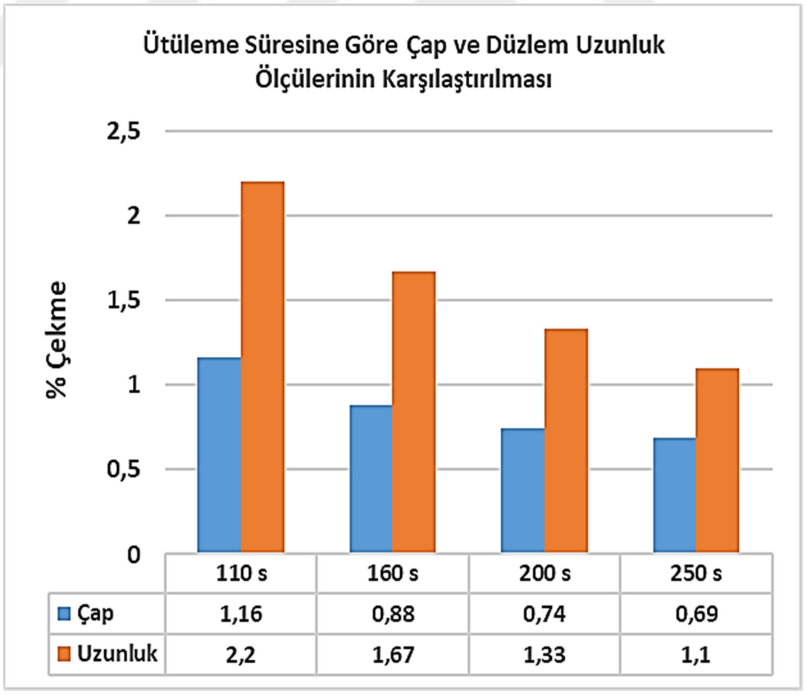
D: Numuneden alınan çap ölçüsü (mm)

$$\textbf{Çaptaki \% ÇekmeOranı} = (D_K - D).100 / D_K \quad (5.2)$$

Deneysel çalışma kapsamında klasik ve geliştirilmiş soğutma tasarımlarının her birinden minimum 5'er adet numune ölçümü yapılmış olup ortalamaları alınmıştır. Bu iki ölçünün klasik ve geliştirilmiş soğutma sistemleri arasındaki çekme değerleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Şekil 5.6'da ise geliştirilmiş soğutma sisteminde farklı ütüleme sürelerindeki çekme oranları verilmiştir.



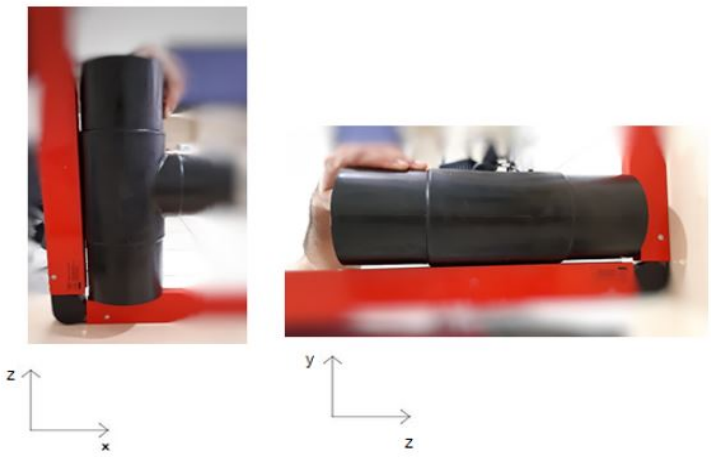
Şekil 5.5 : KST ve GST % Çekme oranları (Çevrim süresi:360s, Enj. sıc. 210 ^{o}C).



Şekil 5.6 : Farklı ütüleme sürelerine göre % Çekme oranları (Enj. sıc. 210 ^{o}C).

5.3. Üç Boyutlu Lazer Ölçüm Cihazı ile Boyutsal Çarpılma Miktarı Sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında numunelerde, kalıplama sonrasında Şekil 5.7'de görüldüğü gibi çarpılmalar meydana gelmektedir.



Şekil 5.7 : Numunelerde meydana gelen çarpılma şekli ve yönleri.

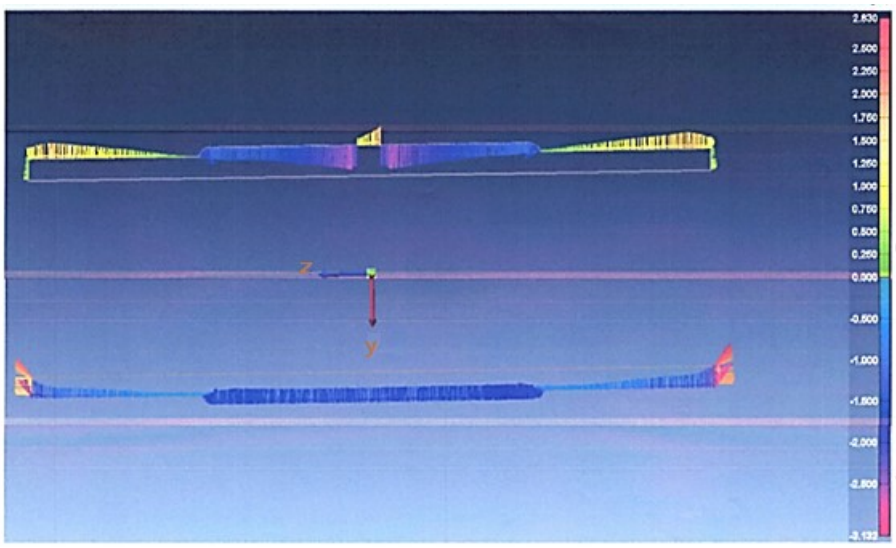
Numunelerin çarpılma miktarları 3 boyutlu lazer ölçüm cihazı ile tarama yapılarak, deneysel numuneler ile tasarlanan nihai parçanın CAD datası üzerinden çarpılma miktarları kontrol edilmiştir.

Deneysel çalışma kapsamında klasik ve geliştirilmiş soğutma tasarımlarının her birinden minimum 5'er adet numune ölçümü yapılmış olup ortalamaları alınmıştır.



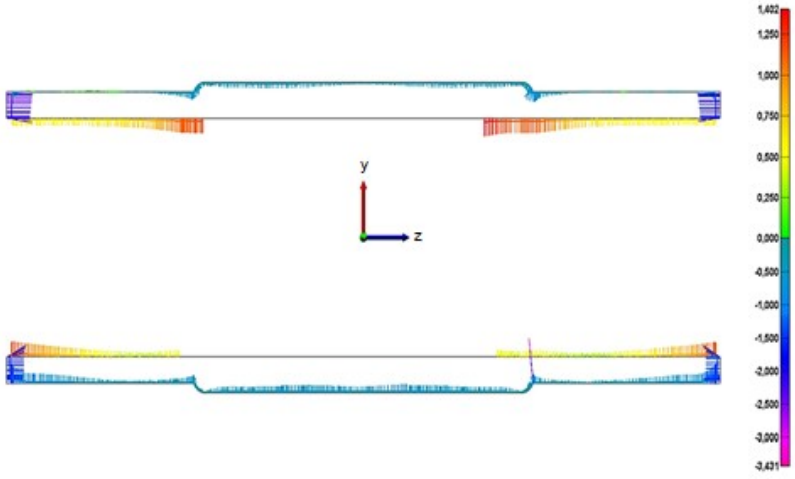
Şekil 5.8 : Lazer ölçüm cihazı ile ölçülen numune görseli.

Yapılan ölçümlerde klasik soğutmalı parçanın uçlardan içeri doğru çektiği ve orta bölgesinde bir sehim oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.9). Toplamda 2,8 mm'lik bir çarpılma görülmüştür.



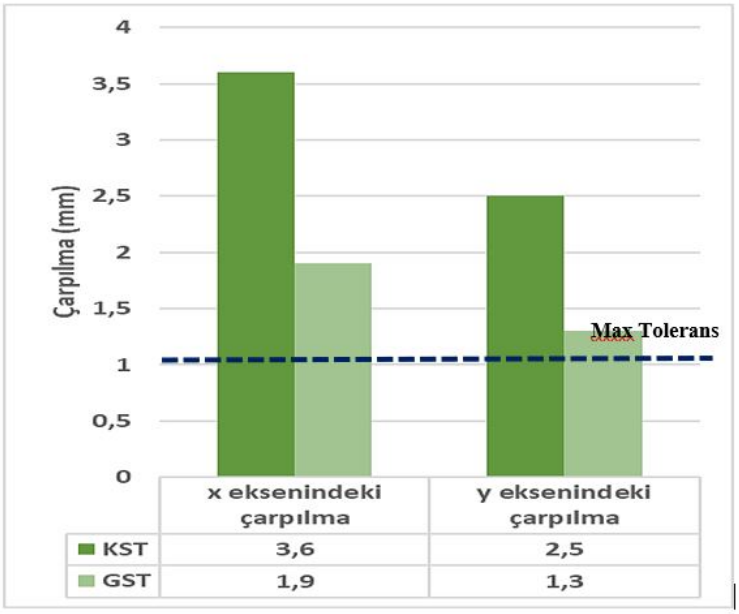
Şekil 5.9 : Klasik soğutma sistemli numunenin CAD datası ile karşılaştırılması.

Aynı proses şartlarında, geliştirilmiş soğutma tasarımında üründe sehim ve toplam çekme miktarının klasik sisteme oranla yaklaşık %50 düştüğü görülmüştür (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 : Geliştirilmiş soğutma sistemli numunenin CAD datası ile karşılaştırılması.

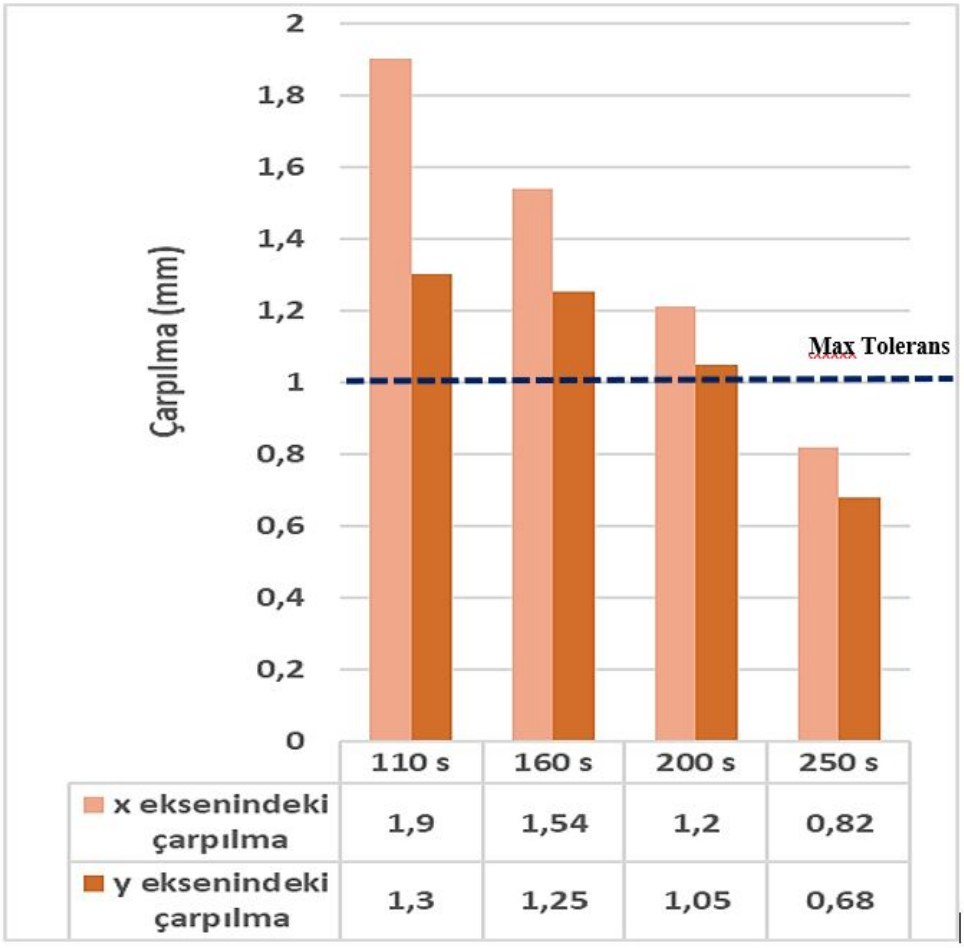
Tablo 4.5'de belirtilen deney şartlarına göre elde edilen numunelerin, belirlenen düzlemlerde çarpılma miktarlarının ortalama değerleri Şekil 5.11' e verilmiştir.



Şekil 5.11 : Düzlemlerdeki çarpılma grafiği (Çevrim süresi 360 s, Enj. sıc. 210 ^{o}C).

Aynı proses şartlarında geliştirilmiş soğutma tasarımında çarpılma miktarının klasik sisteme göre yaklaşık %50 oranında azaldığı görülmüştür. Bu oran soğutma sisteminin ne kadar etkili olduğunu göstermektedir. Parçanın homojen bir şekilde soğutulması, numunenin farklı eksenlerde aynı oranda bir çarpılmasını sağlamaktadır. Bu numune için kabul toleransı x ve y düzlemlerinde maksimum 1 mm'dir. Şekil 5.12'de çıkan sonuçlara göre çarpılma değerleri tolerans dışındadır ancak klasik sisteme göre yaklaşık %50 oranında azalma sağlanmıştır.

İlk aşamada mevcut proses parametreleriyle, iki farklı soğutma sistemi ile elde edilen numunelerin sonuçlarına bakılmıştır. İkinci aşama olarak geliştirilmiş soğutma tasarımında, çevrim süresi 360 s olarak sabit tutulup, ütüleme süresi arttırılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Tablo 4.6). Çarpılma ve çekmeyi azaltmak için parça kalıp içinde ütüleme basıncı altında ütüleme süresi boyunca bekletilir. Parça çektikçe içeriye yeni eriyik dolması sağlanır. Ütüleme süresi yolluk girişinin donmasına kadar devam eder. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışma sonuçları Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12 : GST'de farklı ütüleme sürelerine göre düzlemlerdeki çarpılma grafiği (Çevrim süresi 360 s, Enj. sıc. 210 ^{o}C).

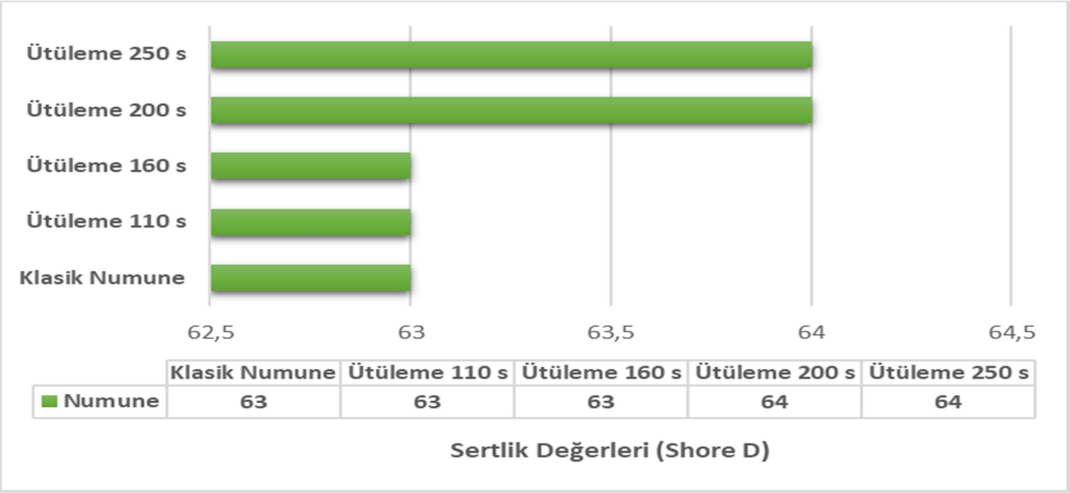
Ütüleme süresinin artması çarpılma miktarını azaltmıştır. Geliştirilmiş soğutma sisteminde ilk duruma göre, ütüleme süresinin 250 s'ye çıkarılması numune kabul toleranslarını sağlamıştır.

Yapmış olduğumuz deneysel çalışmada bilhassa yüksek cidar kalığına sahip YYPE malzemelerde çekme ve çarpılmaların azaltılmasına çalışılmıştır. Literatürede uygun olarak geliştirilen konformal soğutma sistemlerinin ve ütüleme süresinin parça kalitesine doğrudan ilişkisi olduğu görülmüştür. Çevrim süresini aynı tutarak sadece ütüleme süresini arttırmak çekme ve çarpılma oranlarını yaklaşık olarak %50'ye kadar azalttığı tespit edilmiştir.

5.4. Sertlik Değeri Sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında Tablo 4.5'de verilen aynı proses şartlarında KST ve GST 'lerden elde edilen ürünlerin Shore D yöntemi ile ölçülen sertlik değerlerinin aynı olduğu gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmanın ikinci aşaması olarak geliştirilmiş soğutma tasarımında ütüleme süreleri arttırılarak bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda oluşan sertlik değerleri Şekil 5.13'te verilmiştir.

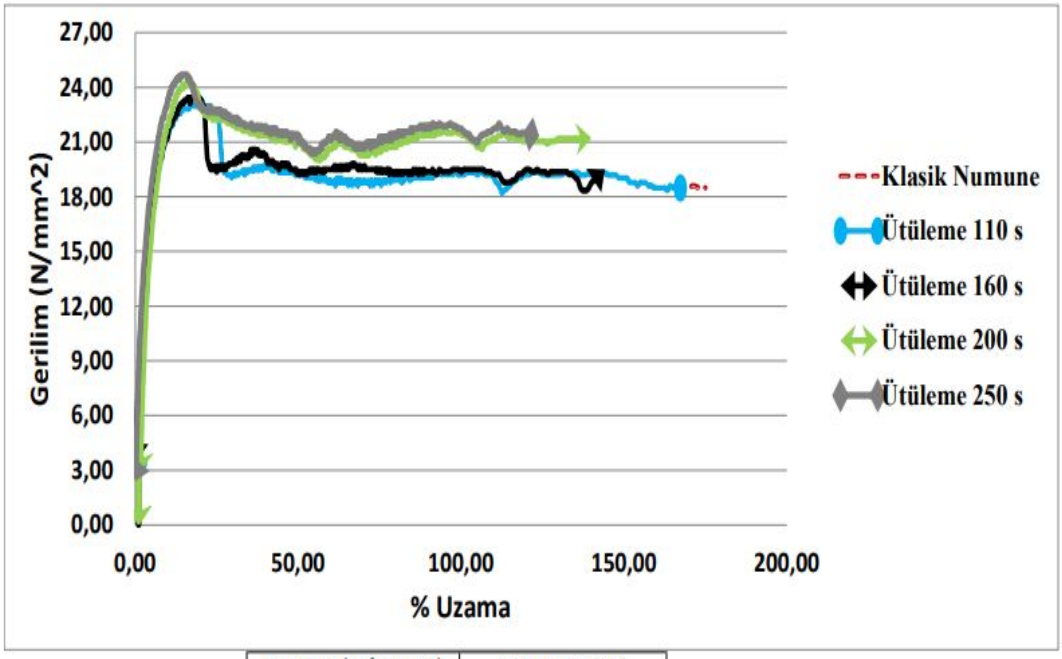


Şekil 5.13 : Ütüleme süresine bağlı serlik değeri sonuçları.

Ütüleme süresinin artmasıyla birlikte sertlik değerlerinin bir miktar arttığı görülmüştür. Ütüleme süresinin %56 artması sonucu sertlik değerleri %1,56 artış göstermiştir.

5.5. Çekme Deneyi Sonuçları

Geliştirilmiş soğutma tasarımında çevrim süresi sabit tutulup, ütüleme süresi arttırılmıştır. Elde edilen numunelerin çekme mukavemet değerleri incelenmiştir. Ütüleme süresinin artması numunelerdeki kütlesel artışla beraber mekanik mukavemette de %7,16 oranında artış olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.14).

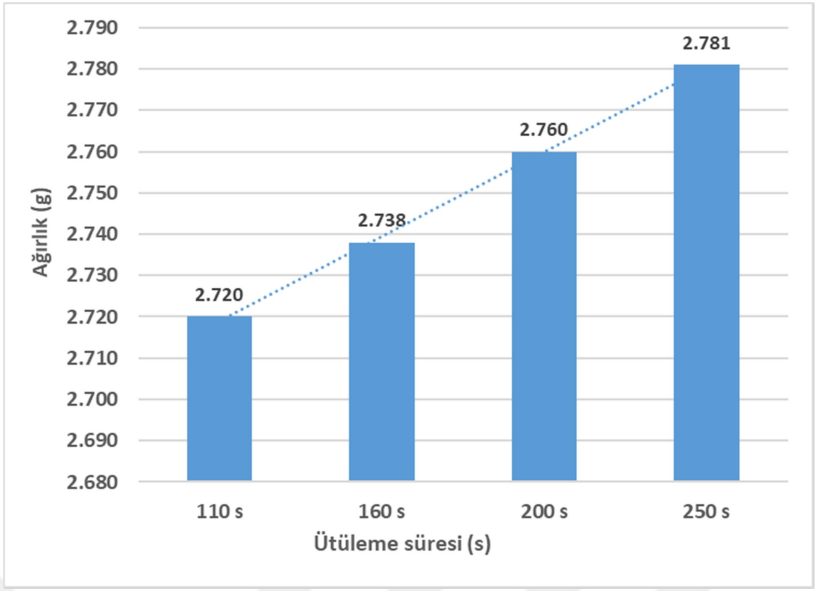


	Gerilim (N/mm^2)	Artış Yüzdesi
Klasik Numune	22,92	-
Ütüleme 110 s	22,99	0,35%
Ütüleme 160 s	23,42	2,14%
Ütüleme 200 s	24,25	5,48%
Ütüleme 250 s	24,69	7,16%

Şekil 5.14 : GST' de ütüleme süresine bağlı çekme mukavemeti deney sonuçları.

Çekme ve çarpılmayı azaltmak için parça, kalıp içinde bir ütüleme basıncı ve süresi altında bekletilir. Parça çektikçe içeriye yeni eriyik dolması sağlanır. Ütüleme safhası yolluk donana kadar devam eder.

Ütüleme süresinin artması numunelerin ağırlık ve çekme mukavemetlerini arttırmıştır. Şekil 5.15'te görüleceği üzere klasik numuneye göre ütülemenin 110s olması %0,35 ; 160s olması %2,14 ; 200 saniyede %5,48 ve 250 saniyede ise %7,16 oranında çekme mukavemetini arttırmıştır. Şekil 5.16'da ütüleme süresine bağlı numune ağırlığının değişimi de verilmiştir. Numune ağırlıkları 2.72 gramdan 2.78 grama çıkarak, %2,3 oranında bir artış görülmüştür.



Şekil 5.15 : Ütüleme süresine bağlı numune ağırlık değişim sonuçları.

Cidar kalınlıkları fazla olan (t ≥ 6 mm) ve geç katılaşan termoplastik malzemelerin plastik enjeksiyon yöntemiyle üretiminde ortaya çıkan yüksek çekme ve çarpılmaların homojen bir soğutma sistemi tasarımı ve ütüleme süresinin arttırılması ile kabul edilebilir en düşük değerlere indirilebileceği yapılan çalışmada ortaya konulmaya çalışılmıştır. Özellikle kalın cidarlı ve farklı kalınlık dağılımına sahip boru ekleme parçalarında oluşan sehimler, eksen kaçıklıkları, saha uygulamalarında ekleme parçaların uc uca montajlarında problemler yaratmaktadır.

Bu çalışmadaki, numunelerin orta bölgesindeki cidar kalınlığı yüksek olup (20mm), analiz programı ile numunedeki sıcaklık dağılımları daha net bir şekilde belirlenerek soğutma sistemi buna uygun olarak tasarlanmıştır.

Özellikle tam simetrik olmayan parçalarda oluşan çarpılmalar ciddi şekil ve ölçüsel hatalara yol açmaktadır. Çarpılma, dengesiz çekmenin bir sonucu olduğundan çekmeyi etkileyen faktörler çarpılmayı da doğrudan etkilemektedir.

Demirer ve ark. [32], yaptıkları çalışmada, enjeksiyon kalıplarında soğutma sisteminin ürün üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kalıp sıcaklığının artması ile çekme ve çarpılma değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Tasarladıkları soğutma sistemi ile çekme ve çarpılmaların azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca yaptıkları çalışmada çevrim süresinin uzamasının da çekme ve çarpılma miktarını azalttığını tespit etmişlerdir.

Dimla ve ark. [33], yaptıkları çalışmada, sanal prototipler kullanılarak enjeksiyonla kalıplanmış bir bileşenin soğutulmasında uygun kanalların tasarımı ve optimizasyonunu gerçekleştirmişler. İzlenen yöntemde, kalıp boşluğunu oluşturan parçanın bir 3D CAD modeli oluşturulmuş ve bu yapıya bir konformal soğutma tasarımı uygulanmış, ayrıca klasik soğutma sistemleri ile karşılaştırarak soğuma sürelerini optimize etmişlerdir.

Abasalizadeh ve ark. [34], yaptıkları çalışmada, soğuma süresinin artması ile PE malzemelerin hacimsel çekmesinin azalttığını görülmüşlerdir. Enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, ütüleme süresi ve soğuma süresi üzerine yapılan deneysel çalışmada minimum çekme için optimum şartlar tespit edilmiştir.

Prasetiyo ve Fauzun [35], yaptıkları çalışmada, ANSYS Fluent yazılımını kullanarak kalıp içindeki sıcaklık dağılım modeli ve ürünün kalıp içindeki soğutma etkinliğini düz ve konformal soğutma kanal tasarım yapılarıyla karşılaştırmıştır. Konformal soğutma kanalının düz soğutma kanalına göre parça üzerindeki sıcaklığı 2ºC düşürdüğünü tespit edilmiştir.

Ognen Tuteski ve Atanas Kočov [36], yaptıkları çalışmada iki farklı geliştirilmiş soğutma tasarımı sunmuş ve bunları geleneksel soğutma tasarımlarıyla karşılaştırmıştır. Çalışma, sonlu elemanlar analizi (FEA) ve CAD modellemesi kullanılarak farklı konformal şekillerin ve bunların plastik bir parça üzerindeki soğutma verimlerinin karşılaştırılmasıyla yürütülmüştür. Denemeler, bölmeler ve fıskiyeler kullanan geleneksel kanallara kıyasla uyumlu (kalıp boşluğuna homojen dağıtılmış) soğutma kanallarının kullanılmasından kaynaklanan üretkenlik faydalarını değerlendirmek için yapılmıştır. Uygun soğutma kanalları kullanıldığında çevrim sürelerinin %20' ye kadar azaldığı tespit edilmiştir.

Literatür çalışması sonuçlarına göre geliştirilmiş konformal soğutma sistemleri, uzun çevrim süreleri, yüksek kalıp sıcaklıkları ve yüksek enjeksiyon basınçları ve de uzun ütüleme sürelerinde çekme ve çarpılma oranlarının düştüğü deneysel çalışmalarla ortaya konulmaya çalışılmıştır.

BÖLÜM 6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada enjeksiyon kalıplarında farklı soğutma tasarımlarının parça kalitesine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma neticesinde ortaya çıkan genel sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Aynı proses şartlarındaki analiz sonuçlarında parça üzerindeki sıcaklık dağılımları incelendiğinde, GST'deki maksimum parça sıcaklığının KST'ye göre %57,9 oranında düştüğü görülmüştür.
- Analiz sonuçlarına göre kalın cidarlı bölgeler, klasik tasarımda (KST) ortalama 706 saniyede, GST'de ise ortalama 263 saniyede tamamen soğuyabilmektedir. Bu durumda soğuma süresinde %62,74 oranında bir iyileşme sağlamıştır.
- Klasik soğutma sisteminde x ve y eksenlerinde çarpılma miktarlarının, geliştirilmiş soğutma sistemine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Geliştirilmiş soğutma sisteminin klasik sisteme göre, çekme oranları sırasıyla çapta %12,12 boyda %12; çarpılmalarda ise %47,22 iyileşme sağlamıştır.
- Klasik soğutma sisteminde bölgesel olarak özellikle yüksek et kalınlığına sahip numunelerde eş zamanlı bir soğutma sağlanamayacağı görülmüştür.
- Ütüleme süresinin %21,43 (140 saniye) artması ile numunelerin çekme oranları çapta %40,5; boyda %50; çarpılma miktarlarında ise %47,69 azaldığı tespit edilmiştir.

- Ütüleme süresinin %56 artması ile numune ağırlıklarında en fazla %2,2 artış tespit edilmiştir. Bu durum mekanik değerleri de doğrudan etkilemiştir. Ütüleme süresinin %56 oranında arttırılması neticesinde numunelerin çekme mukavemetinde %7,16'ya kadar artış gözlenmiştir.
- Ütüleme süresinin %56 artması sonucu sertlik değerleri %1,56 artış göstermiştir.
- Geliştirilmiş soğutma sisteminde, klasik sisteme oranla Reynolds sayısı %20 oranında arttırılarak akış daha türbülanslı hale gelmiştir. Bu durum daha kısa sürede iyi bir ısı transferi sağlamıştır.
- Aynı proses şartlarında geliştirilmiş soğutma tasarımındaki sehim miktarı klasik tasarıma göre %50 oranında azalmıştır.
- Soğutma kanalı tasarımında paket program kullanılması ve bu sayede yapılacak akış analizleri ile doğru bir kalıp tasarımına yol gösterebileceği ortaya konulmuştur. Akış analizi yapılarak tasarlanmış soğutma sistemlerinin, parça kalitesinde önemli yeri olan çekme ve çarpılmayı iyileştireceği ve kalite değerleri yüksek ürünler elde etmemizi sağlayabileceği görülmüştür.
- İyi bir soğutma sistemi tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli hususun, soğutma kanallarının kalıp kavitesine (gözüne) mümkün olan en kısa mesafede ve homojen bir şekilde dağıtılması gerektiği gözlemlenmiştir.

6.2. Öneriler

Çalışmanın daha ileriye götürülmesi açısından araştırmacıların;

- Farklı kalıp sıcaklıkları ve enjeksiyon basınçları uygulayarak çekme ve çarpılma oranları incelenebilir.
- Kalıp maça soğutma sisteminde plastik bölmeli sarmal bir tasarım kullanılabilir.

- Çalışmanın devamında farklı ısı transfer katsayısına sahip malzemeler Berilyum-Bakır, PPA veya termal pim uygulamaları kullanılabilir.
- Farklı soğutma sıvıları kullanılarak çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Savaşçı, Ö. T., Uyanık ve N., Güneri, A. (1998). *Plastikler ve Plastik Teknolojisi*, Çantay Kitabevi, İstanbul.

[2] Pişkin, E. (2000). *Polimerler II, Mühendislik Polimerleri*, Pagev Yayıncılık, İstanbul.

[3] Akyüz, Ö.F (1999). *Plastikler ve Plastik Enjeksiyon Teknolojisine Giriş*, Pagev Yayınları, İstanbul.

[4] Demirer A. (2002). *Enjeksiyon Kalıplarında Sıcak Yolluk Sistemlerinin Kalıplama Prosesine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi* (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

[5] Demirer A. (2020). *Polimerik Malzemeler* (Ders Notu). Sakarya, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi.

[6] Tekleaimanot S. (2011). *Simulation and Design of a plastic injection Mold, A Joint mold for credit card and USB holder* (Doctoral dissertation). Retrieved from https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41114/Samson%20Teklehaimanot%20Final%20Thesis.pdf

[7] Gill, D. D. (2002). *Precision Replication of co-molded meso and micro optics through injection molding* (Doctoral dissertation). North Carolina State University, USA.

Retrieved from https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.16/4798/etd.pdf

[8] S. Elsheikhi (2011). *A Holistic Approach To Injection Moulding Optimisation For Product Quality and Cost Through the Characterisation of Reprocessed Polymeric Materials and Process Monitoring.* Retrieved from *https://bradscholars.brad.ac.uk/.*

[9] J. I. Segal, R. I. Campbell (2001). *A review of research into the effects of rapid tooling on part properties*. Rapid Prototyping J 7 ,90-98

[10] Yelkenci Ş. (2008). *Plastik Enjeksiyon Kalıplama Teknikleri ve Özel Uygulamalar* (Yüksek lisans tezi). Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[11] Pınar E. (2010). *Plastik Enjeksiyon Yöntemiyle İmalatta Hataların Tespiti ve Proses Şartlarının Optimizasyon Uygulaması* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[12] F. Klocke, T. Celiker, Y.-A Song (1995). *Rapid metal tooling*, Rapid Prototyping J 1 32- 42.

[13] DSM Design Guide, 2005. *Performance and Value with Engineering Plastics*, 52 p.

[14] Palabıyık, M., 2008. Polimer Esaslı Kompozitler ile Konstrüksiyon, İ.T.Ü. Makina Fakultesi, İstanbul.

[15] Lars-Erik Rännar (2008). *On Optimization of Injection Molding Cooling, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Engineering Design and Materials* (Doctoral dissertation), Trondheim.

[16] Anonim, 1996. Richtlinien für das Gestalten von Formteilen aus technischen Kunststoffen, Information der Hoechst AG, Franfurt am Main.

[17] Bryce, D. M. (1996). *Plastic injection molding: manufacturing process fundamentals*, vol. 1, Society of manufacturing engineers, ISBN: 9780872634725.

[18] Choosing The Right Cooling Method is The Key To Cycle Time Reduction-SealecPlastics Erişim adresi: https://sealectplastics.com/news/choosing-the-right-cooling-method-is-the-key-to-cycle-time-reduction/

[19] Bayer Engineering Polymers Design Guide, 2004, Mold Design

[20] D. V. Rosato and M. G. Rosato (2000). Injection Molding Handbook, Springer.

[21] Injection Mould- Chapter 2: Designing for Productivity and Performance-http://www.mtn.com.tr/faydali/Injection_mould.pdf

[22] Noren Thermal Solutions, Erişim adresi:

https://norenthermal.com/products/thermal-pins/

[23] Sina Ebnesajjad, in Fluoroplastics (Second Edition) 2015. *Volume 2: Melt Processible Fluoropolymers the Definitive User's Guide and Data Book*, Pages 236-281.

[24] Kuo C.C., Jiang Z.F., Lee J.H. (2019). *Effects of cooling time of molded parts on rapid injection molds with different layouts and surface roughness of conformal cooling channels.* Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019;103:2169–2182. doi: 10.1007/s00170-019-03694-2.

[25] Li Z., Wang X., Gu J., Ruan S., Shen C., Lyu Y., Zhao Y. (2018). *Topology optimization for the design of conformal cooling system in thin-wall injection molding based on BEM.* Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2018;94:1041–1059. doi: 10.1007/s00170-017-0901-1.

[26] Suchana A. Jahan, Tong Wu, Yi Zhang, Jing Zhang, Andres Tovar, Hazim Elmounayri (2017). *Thermo-mechanical design optimization of conformal cooling channels using design of experiments approach*, Department of Mechanical Engineering, Purdue School of Engineering and Technology, IUPUI, Indianapolis, IN-46202, USA, 45th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 45, LA, USA.

[27] Megep (2013). *Plastik Teknolojisi-Enjeksiyon ile Üretimde Kalıp Ayarları* Ankara.

Erişim, 10 Haziran 2021,
http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Enjeksiyon%20Ile%20%C3%9Cretimde%20Kal%C4%B1p%20Ayarlar%C4%B1.pdf

[28] Çolak A., Ayık M. (2009). *Isı Tekniği Ders Notu*, Ankara Üniversitesi.

Erişim, 10 Haziran 2021,
https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=45237

[29] Kamber Ö. (2008). *Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Basınç ve Sıcaklık Parametrelerinin Ürün Kalitesine Etkileri ve Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu* (Doktora tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[30] Moldex3D® TM material library, Moldex3D® software.

[31] EN ISO 527-2 (2012). *Plastics- Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. Retrieved from: http://www.ebusbar.net/uploadfiles/2021/01/20210105104811468.pdf

[32] Demirer, A., Çakırgil E , Çoban A., ve Durat M. (2009). *PP ve YYPE Malzemelerin Enjeksiyon Kalıplarında Üretilmesinde Soğutma Sisteminin Parça Kalitesine Etkisi*, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye.

[33] D.E. Dimla, M. Camilotto, F. Miani (2005). *Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools*, Journal of Materials Processing Technology 164–165.

[34] M. Abasalizadeh, R. Hasanzadeh, Z. Mohamadian, T. Azdast and M. Rostami (2018). *Experimental Study to Optimize Shrinkage Behavior of Semi-Crystalline and Amorphous Thermoplastics,* Iranian Journal of Materials Science & Engineering Vol. 15, No. 4.

[35] Angger Bagus Prasetiyo[1], and Fauzun Fauzun[1],* (2018). *Numerical study of effect of cooling channel configuration and size on the product cooling effectiveness in the plastic injection molding*, MATEC Web of Conferences 197, 08019 AASEC.

[36] Ognen Tuteski M.Sc., Atanas Kočov (2018). *Conformal Cooling Channels in Injection Molding Tools–Design Considerations*, International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials.", YEAR XII, ISSUE 11, P.P. 445-448.