

Mehmet Emin Özmen

Makine Y. Mühendisi

FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.  
Konya Yolu 8. km  
Oğulbey Köyü Mevkii  
Gölbaşı  
06830 Ankara

Merve Erdal

Yrd. Doç. Dr.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Makine Mühendisliği Bölümü  
06800 Ankara

# Plastik Enjeksiyonda Parça Yüzeyini İzleyen Soğutma Kanalları İle Parça Soğumasının Analizi

*Bu makalede, plastik enjeksiyonla imalat sırasında, parça şeklini izleyen (konformal) soğutma kanallarının kullanılmasının, parça ve üretim süreci üzerindeki etkileri sanal ortamda, bir bilgisayar benzetim programı (Moldflow) kullanılarak incelenmiştir. Bu bağlamda, yarım silindirik kabuk şeklindeki bir parça üretiminde düz (geleneksel) ve konformal soğutma kanalları kullanımının etkileri karşılaştırılmış, parçanın sıcaklık değişimi, donma süresi ve soğuma kalitesi gibi çeşitli özellikler incelenmiştir. Çalışmada aynı zamanda gerçek üretim verileri kullanılarak, bir buzdolabı rafının plastik enjeksiyonu sırasında konformal soğutma kanallı kalıp ve düz kanallı kalıp kullanımı benzetimi yapılmıştır. Bu analizde amaç, konformal kanallı kalıp kullanılarak çevrim süresinin, parçanın yüzey görüntü kalitesi bozulmadan azaltılmasıdır. Yapılan benzetimlerde konformal soğutma kanalları olan kalıpla üretilen parçaların düz soğutma kanalları olan kalıpla üretilen parçalara göre, parça yüzey kalitesi bozulmadan, çevrim süresinin önemli ölçüde düştüğü gözlenmiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Plastik Enjeksiyon, Parça Şeklini İzleyen (Konformal) Soğutma Kanalları, Moldflow*

## TERİMLEME

$p$	basınç
$S$	akışkanlık (fluidity)
$T$	sıcaklık
$x, y$	kalıp kovuğu düzlemsel koordinatları
$z$	kalıp kovuk kalınlığı koordinatı
$u$	$x$ yönündeki plastik akış hızı
$\bar{u}$	kovuk kalınlığı boyunca ortalanmış, $x$ yönündeki plastik akış hızı
$v$	$y$ yönündeki plastik akış hızı
$\bar{v}$	kovuk kalınlığı boyunca ortalanmış, $y$ yönündeki plastik akış hızı
$\mu$	plastik viskozitesi
$\phi$	viskoz disipasyon

## 1. GİRİŞ

Plastik enjeksiyon, ince cidarlı, karmaşık şekle sahip orta büyüklükte plastik ürünlerin üretiminde en yaygın olarak kullanılan üretim tekniğidir [1]. Bu yöntemde, eriyik sıcak plastik, ürün şeklini verecek kalıp kovuğuna enjekte edilir, basınç altındayken kalıbın içine açılmış soğutma kanalları yardımıyla soğutularak katılaşır ve ürün halini alır. Plastik enjeksiyonda çevrim süresi parçanın maliyetini ve kalitesini belirleyen en önemli etkenlerden biridir. Bu bağlamda çevrim süresini parça yüzey kalitesini bozmadan düşürmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazılarında proses

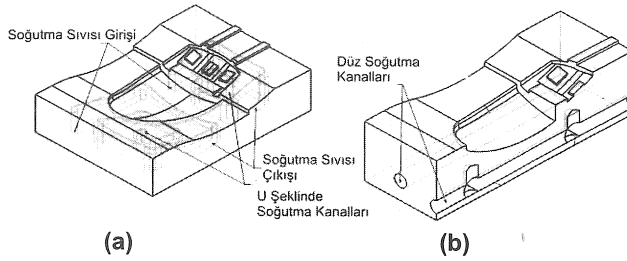
değişkenleriyle oynanarak düzgün bir soğuma sağlanarak soğuma süresi düşürülmeye çalışılmıştır.

Ji-Zhao Liang [2] soğuma sıvısı tarafından parçadan maksimum ısıyı alacak düz soğuma sistemi geliştirmeye çalışmıştır. Bu kapsamda tek yönden ısı iletimi sağlayacak bir sistem geliştirmiştir ve çeşitli proses değişkenleri (soğutma kanalı çapı, soğutma kanalları arasındaki mesafe ve soğuma kanallarının kalıp yüzeyine olan uzaklığı) optimize edilmiştir. Natti [3] düzgün kalıp yüzey sıcaklığı dağılımı elde etmek için benzer bir çalışma yapmıştır. Mathey [4] "T" ve "L" şeklindeki parçaların zamana bağlı ısı transferini sınır elemanları yöntemine dayanarak analiz etmiştir ve kalıp içinde soğutma kanalları için en uygun yeri belirlemiştir.

Bu çalışmaların yanı sıra yakın zamanda karmaşık geometrisi olan parçaların yüzey şeklini izleyen (konformal) soğutma kanallarına sahip kalıplar üretimi için lazer sinterleme yöntemi kullanılmış [5], hızlı prototipleme yöntemlerinin konformal soğutma kanallarına sahip kalıp üretiminde kullanımı incelenmiştir [6].

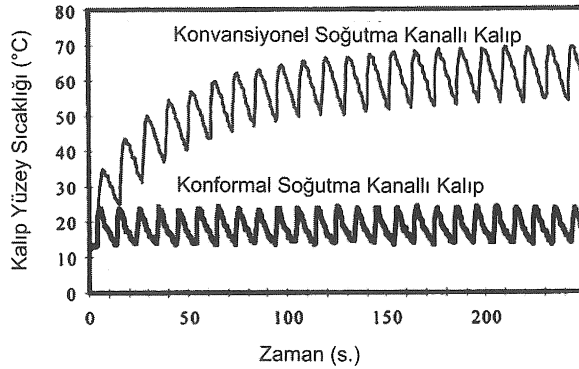
Karmaşık şekilli parçalara uygun kalıp için için U şeklinde soğutma kanalları frezeleme yöntemiyle üretilmiştir [7,8]. U şeklinde soğutma kanalları olan kalıpla düz soğutma kanalları olan kalıp karşılaştırılmış (Şekil 1), U şeklinde soğutma

kanalları olan kalıbın sıcaklık dağılımı daha düzgün bulunmuştur. Ancak U şeklinde soğutma kanallarında dolaşan suyun basıncının düz soğutma kanallarındaki suya göre daha fazla düştüğü gözlemlenmiştir. Bu da soğutma suyunu pompalamak için tüketilen enerjinin U şeklinde soğutma kanalları için daha fazla olduğuna işaret etmiştir.



Şekil 1 a) U şeklinde soğutma kanalları olan kalıp  
b) Düz soğutma kanalları olan kalıp [7]

Karmaşık soğutma kanal konfigürasyonlarının normal yöntemlerle üretilmesi zordur. Bu yüzden hızlı prototipleme yöntemleri konformal soğutma kanallarına sahip kalıpları üretmek için uygulanmıştır. Lazer sinterleme yönteminin yanı sıra, Sachs [9], "3 Boyutlu Damlatma" (3-D printing) yöntemi ile, bağlayıcı maddeyle karıştırılmış çelik tozlarının bir püskürtücü ağızdan katman katman serilerek birleşmesi sonucu imal ettiği kalıpta, parça yüzeyini izleyen soğutma kanallarını oluşturmuştur. Sachs parça yüzeyini takip eden soğutma kanallarının düzgün bir sıcaklık dağılımına ilk çevrimden itibaren ulaşıldığını, düz soğutma kanallarında ise birkaç çevrimden sonra ulaşıldığını göstermiştir (Şekil 2).



Şekil 2 Düz soğutma kanallarına sahip kalıp ile konformal soğutma kanallarına sahip kalıbın birbirini takip eden çevrimler süresince yüzey sıcaklık dağılımının karşılaştırılması [9]

Bu makalede Moldflow programı kullanılarak parça yüzeyini izleyen (konformal) soğutma kanallarının, üretim süreci içindeki etkileri araştırılmıştır. Düz ve parça yüzeyini izleyen

(konformal) soğutma kanallarının proses üzerindeki etkisi, yarım silindir kabuk şekilli bir parça için üretim benzetimleri yapılarak incelenmiştir. Bunun yanı sıra, bir buzdolabı rafının düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan gerçek üretim süreci, aynı sürecin parça yüzeyini izleyen soğutma kanalları kullanılarak yapılan benzetimi sonucundaki verilerle karşılaştırılmıştır.

## 2. PLASTİK ENJEKSİYON SÜRECİNDE KALIP İÇİ AKIŞ DENKLEMLERİ

Plastik enjeksiyonda kalıp içindeki akışın incelenmesi, istenilen parça kalitesini verecek süreç parametrelerinin belirlenmesi ve kalıp tasarımı (kaç kapıdan enjeksiyon yapılacağı, kapıların ve hava çıkışlarının konumlandırılması, vb.) için önemlidir. Kalıp içindeki üretim süreci temel olarak bir akış-ısı transferi problemidir. Ticari ya da ticari olmayan plastik enjeksiyon bilgisayar programları, kalıp içi akış-ısı transferi ve sonrasında soğutma kanalları yardımıyla plastiğin soğuyarak katılaşması süreçlerini modelleyerek, kullanıcıya üretim/kalıp tasarımı ile ilgili önemli bulgular verebilir. Kullanılan matematiksel modellerde, kalıp kovuğu kalınlıklarının, diğer parça boyutlarına göre çok küçük olması, kalınlık boyunca akış hızının ihmal edilmesine ve iç basıncın sadece düzlem koordinatlarına göre değişmesini öngörür. Bu nedenle, kovuk içinde akışın ön cephesi (ve kalınlıkların değiştiği durumlar) dışında kalıp içi akış 2-boyutlu kabul edilir ve Hele-Shaw yaklaşımı kullanılarak formüle edilir [10,11]. Bu yaklaşımda kalınlık yönündeki hız değişimi ortalanarak akış problemi, kalınlıktan bağımsız çözülür. Kullanılan formüller kütle, momentum ve enerji korunumunun bu yaklaşıma göre basitleştirilmiş halleridir. Kalıp kovuğunun düzlemsel koordinatları  $(x, y)$  yönündeki ortalama hızları, momentum denkleminin kalınlık boyunca  $(z$  yönü) integralinin alınmasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir.

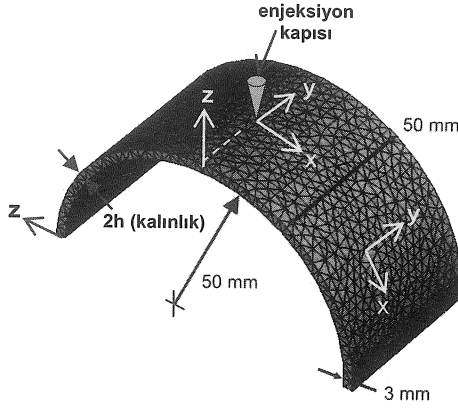
$$\bar{u} = -\frac{S}{2h} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.a)$$

$$\bar{v} = -\frac{S}{2h} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (1.b)$$

Bu denklemlerde  $h$ , kovuk kalınlığının yarısıdır. Kovuk içindeki koordinat sistemi, Şekil 3'te bir örnek parça üzerinde gösterilmiştir. Akış sırasındaki plastik basıncı,  $p$  ve  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  hızları sadece düzlemsel koordinatlara  $(x, y)$  bağlıdır. Akışkanlık (ya da akıcılık) olarak adlandırılan  $S$  parametresi ("fluidity"), eriyik plastiğin viskozitesine  $(\mu)$  bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$S = \int_0^h \frac{z^2}{\mu} dz \quad (2)$$

Plastik viskozitesi Newtonian olmayıp, kullanılan plastik çeşidinin reolojik davranış özelliklerine uygun formülasyonlarla ifade edilebilir. Akışkanlık tanımı, hem Newtonian, hem de Newtonian olmayan davranış özelliklerine sahip akışkanlar için geçerlidir.



Şekil 3 Yarım silindirik kabuk geometrisi ve kovuk içinde düzlemsel (x, y) ve kalınlık (z) yönündeki koordinatların gösterimi

Momentum korunumu (Denklem 1), kütle korunumuyla birleştirilerek basınç için aşağıdaki Laplace denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

Kovuğun plastikte dolu alanındaki sınır koşulları, 2-boyutlu akış senaryoları için bilinmektedir. Akış cephesi boyunca (sıkışma olmadığı sürece) basınç atmosferik alınır:

$$p_{\text{akış cephesi}} = 0 \quad (4.a)$$

Plastiğin kovuk yan duvarlarıyla temas ettiği bölgelerde, duvara dik hız, sıfır alınır. Bu nedenle, basıncın duvara dik yöndeki (n koordinatı) türevi sıfırdır:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_{\text{duvar}} = 0 \quad (4.b)$$

Enjeksiyon kapısında, basınç tanımlanmıştır (bilinmektedir):

$$p_{\text{kapı}} = P_0 \quad (4.c)$$

Plastik enjeksiyon sırasında kovuk içi plastik akış alanındaki basınç dağılımı, her zaman anı için,

Denklem (3)'ün, sınır koşulları (Denklem (4)) uygulanarak çözülmesiyle bulunur. Akış cephesi, bu bölgede Denklem (1) kullanılarak hesaplanan ortalama hızlarla, sayısal çözüm sırasında uygun bir zaman arttırımı kullanılarak ilerletilir. Böylece kalıbın içi tamamen dolana kadar akış cephesi ilerlemesi ve basınç dağılımları bulunabilir.

Kalıp içi akış, çok kısa olan çevrim süresince hızlı bir soğuma olduğu için sıcaklıktan bağımsız olmayabilir. Plastik viskozitesinin (ve akışkanlığın) nitelendirilmesi, sıcaklığa bağlı olarak ifade edilebilir. Bu da, Denklem (1) ve (3)'ün çözülebilmesi için sıcaklığın bulunmasını gerektirir. Kalıp içi plastik akış için enerji korunumu, zamana bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi \quad (5)$$

Bu denklemde  $\phi$  viskoz disipasyonu ifade etmektedir. Viskoz disipasyon, akışkanın viskozitesi ve kayma hızı dağılımına bağlıdır. Enjeksiyon sırasında plastik viskozitesi ve (plastik çok küçük bir aralıktan geçtiği için) kayma hızlarının yüksek olması sonucu, bu terim enerji korunumunda ihmal edilmez. Plastiğin kalıpla temas ettiği en büyük alanın, kovuğun düzlemsel (x - y düzlemi) duvarları olması ve plastiğin, kalıp duvarlarına temasıyla kondüksiyon tipi ısı iletimiyle soğuması nedeniyle, sıcaklığın en hızlı değiştiği yön kovuk kalınlığı (z koordinatı) boyuncadır. Denklem (5)'teki hızlar, kalınlık boyunca ortalanmamıştır ve ortalama hızlarla aralarındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_0^h u dz \quad (6.a)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{h} \int_0^h v dz \quad (6.b)$$

Denklem (3)'ün çözülmesiyle elde edilen basınç dağılımı, plastik enjeksiyon için aşağıdaki şekilde basitleştirilmiş momentum denklemi kullanılarak u, v hızları bulunabilir.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (7.a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (7.b)$$

Bulunan hızlar, Denklem (5)'te sıcaklığın çözümünü için kullanılır. Sıcaklık dağılımı, viskozite ve akışkanlığı ihmal edilemeyecek düzeyde

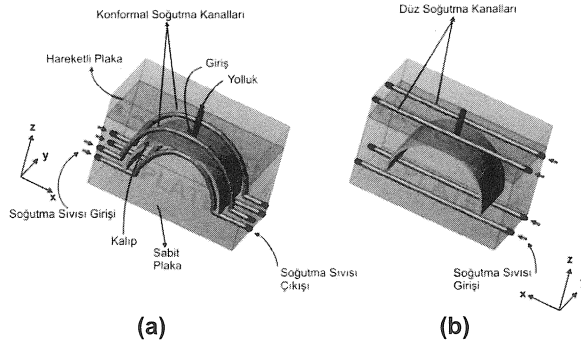
değiştiriyorsa, momentum ve enerji denklemlerinin birlikte çözülmesi gerekir.

Denklem (5)'in sıcaklık için çözülebilmesi için sınır koşulu olarak kovuk duvarlarının sıcaklığının bilinmesi gerekir. Bu sıcaklıklar, kovuk duvarlarından soğutma kanallarının iç yüzeyine kadar olan konduktif ısı iletimi ve kanallarda akan soğutucu sıvının (su) bu ıyı konvektif ısı iletimi yoluyla alıp kalıp dışına taşımasının analiziyle bulunur. Bu analizdeki ısı transferi problemi, kalıp ve soğutma kanalları şekilsel olarak karmaşık olduğu için, sayısal yöntemlerle çözülebilir.

### 3. KONVANSİYONEL VE KONFORMAL SOĞUTMA KANALLI KALIPLARDA KARMAŞIK ŞEKLİ PARÇA ENJEKSİYONUNUN BENZETİMİ

Önceki bölümde sunulan matematiksel enjeksiyon modelini temel alan ticari yazılımlardan birisi de Moldflow programıdır. Bu bölümde, Moldflow kullanılarak yarım silindir kabuk şeklinde bir parçanın iki tip soğutma kanalı için enjeksiyon benzetimi yapılmıştır. Bu analizde amaç düz ve konformal soğutma kanallarının, parça üzerinde etkisini incelemek ve karşılaştırmaktır. Enjeksiyon benzetimi yapılan yarım silindir kabuk şekilli ürün geometrisi, Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 4'te yarım silindir kabuk için (a) konformal soğutma kanalları olan kalıp ve (b) düz soğutma kanalları olan kalıp gösterilmiştir. İki tip kalıpta da, soğutma kanalları kalıbın her iki kısmında da (sabit ve hareketli) yer almaktadır. Konformal kanallar, parça yüzey profilini izleyecek şekilde açılmış, düz kanallar ise parça şeklinden bağımsız olarak tek bir eksen boyunca açılmıştır.



Şekil 4 a) Konformal soğutma kanalları olan kapalı kalıp, b) Düz soğutma kanalları olan kapalı kalıp

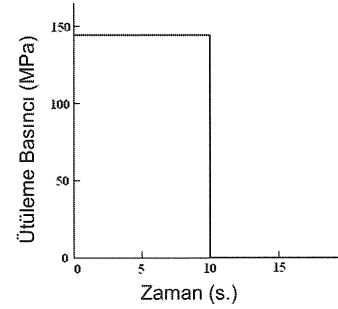
Bu kanal yapıları arasında bir karşılaştırma yapabilmek için, Tablo 1 de görüldüğü gibi süreç parametreleri, parça ve kalıp malzemesi, her iki tip kalıp için aynı şekilde verilmiştir. Çevrim içinde enjeksiyonu takip eden süreçte, ürünün istenilen

ölçülerde olması ve çöküntü, yamulma, eğilme gibi hataların en aza indirilebilmesi için, eriyik plastik bir süre daha yüksek basınçta tutulmaya devam edilir. Bu sürece ütleme denir. Şekil 5'te yapılan benzetim sırasında yarım silindir kabuk için kullanılan ütleme basıncı gösteriliyor. Ütleme sürecini, soğuma süreci takip eder. Plastik enjeksiyonun bir çevriminde yer alan en uzun süreç olan bu süreçte plastik soğuyarak katılaşır. Benzetim sırasında üretimin (çevrimin) sonlandırılma kriteri, parçanın kalıp açıldıktan sonraki donma yüzdesine göre ayarlanmıştır (% 100).

Tablo 1 Yarım kabuk üretimi benzetiminde kullanılan proses değişkenleri

Kalıp Malzemesi	Thyroplast 2738 (DIN 1.2738)
Ürün Malzemesi (plastik)	Polystyrol 165H
Soğutma Kanalındaki Suyun Debisi	7 l/dak
Soğutma Kanalındaki Suyun Giriş Sıcaklığı	20 °C
Kalıbın İlk Sıcaklığı	40 °C
Erimiş Polimerin İlk Sıcaklığı	230 °C

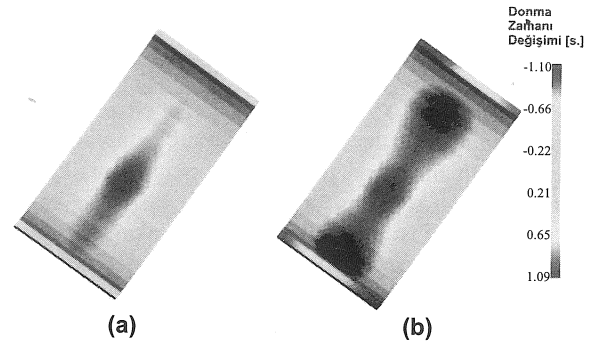
Ütleme Basıncı vs. Zaman



Şekil 5 Yarım silindir kabuk üretiminde ütleme basıncı

Şekil 6, Moldflow ile yapılan analiz sonucu elde edilen soğuma kalitesi sonuçlarını göstermektedir. Soğuma kalitesi, ısının parçadan ne derece düzgün alındığının göstergesidir. Şekil 6.b'de sarı ile görülen bölgede (düz soğutma kanallı kalıp), ısı diğer bölgelerdeki kadar hızlı ve eşit miktarda alınmamıştır. Bu sonuçlar "yüzey sıcaklığı değişimi" ve "donma zamanı değişimi"ne bağlıdır. Şekil 7 parçanın ortalama çevrim sıcaklığından ne kadar sapıp gösteren "yüzey sıcaklığı değişimi" sonuçlarını göstermektedir. Buna göre düz kanallı kalıpta, kabuğun orta kısmı ve kenarları arasındaki ortalama sıcaklık farkı, konformal kanallı kalıba göre önemli ölçüde fazladır. Konformal kanallı kalıpta, kanallar yüzey profilini izlediği için bu fark çok daha küçüktür. Sıcaklığın parça üzerinde önemli farklılıklar göstermesi, soğuma ve katılaşmanın (donmanın) da daha düzensiz/homojen olmayan bir şekilde gerçekleşmesini yol açmaktadır. Bu etkiler,

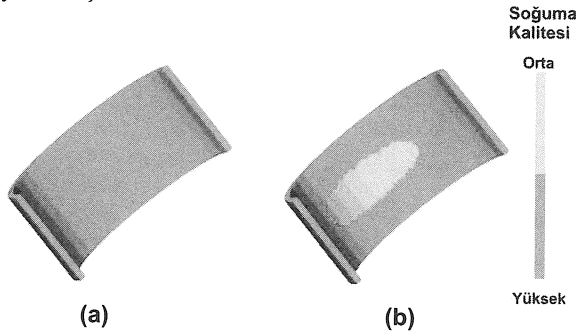
Şekil 8’de görülebilir. Şekil 8’deki “donma zamanı değişimi” plastiğin herhangi bir bölgedeki donma süresinin tüm parçanın ortalama donma süresine göre sapmasını göstermektedir. Düz kanallı kalıpta üretilen parçada, donma zamanı ve yüzey sıcaklığının çevrim ortalama değerlerinden önemli derecede saptığı (konformal kanallı kalıba göre) görülmektedir. Ancak, Şekil 8.a’da konformal kanallı kalıpta üretilen parça için, parçanın orta bölgesinin, diğer bölgelere göre belirgin bir şekilde daha geç donduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi, bu bölgenin (düz kanallı kalıpta olduğu gibi) enjeksiyon kapısını içermesi ve enjeksiyon kapısının hava sıkışması olan bölgeler dışında, enjeksiyonun sonuna kadar en sıcak bölge olmasıdır. Buna rağmen, konformal kanallı kalıpta yapılan üretimde donma sıcaklığı farkının yüksek olduğu bölge, düz kanallı kalıba göre daha küçük bir alandadır. Şekil 7.a’da da görüldüğü gibi, konformal soğutma kanallarıyla yapılan üretimde soğutma kanalları parçanın üzerinden ısıyı, düz kanallı kalıba göre daha homojen almaktadır. Tablo 2’deki sonuçlar, konformal kanallarla soğutulan parçadaki soğuma süresinin, düz kanallarla soğutulan parçaya göre önemli miktarda azaldığını göstermektedir. Bu sonuç toplam çevrim süresine de yansımıştır.



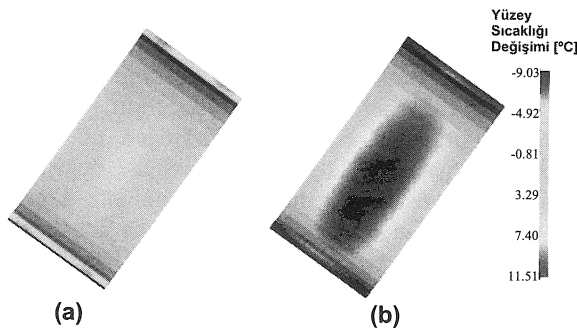
Şekil 8 Donma Zamanı Değişimi: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim

Tablo 2 Benzetim Sonuçları

	Düz Soğutma Kanalları	Konformal Soğutma Kanalları
Çevrim Süresi (s)	21.68	16.42
Soğuma Süresi (s)	9.2	3.95

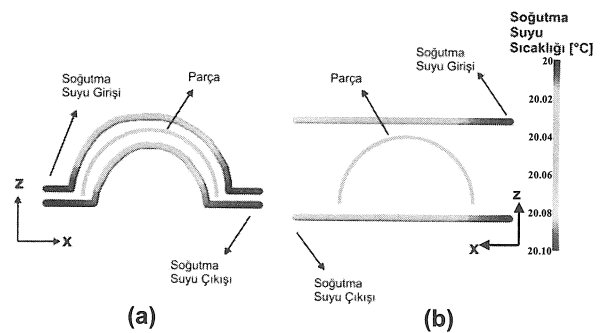


Şekil 6 Soğuma Kalitesi: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim

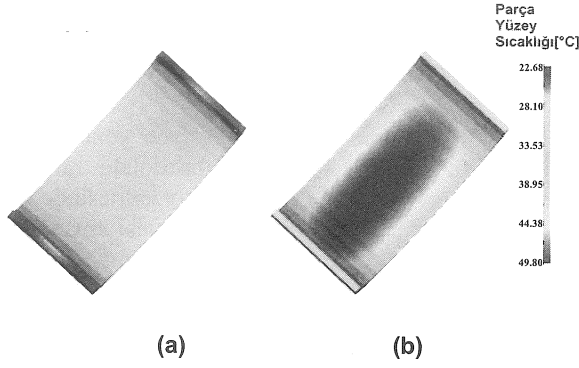


Şekil 7 Yüzey Sıcaklığı Değişimi: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim

Şekil 9’da soğutma kanallarındaki suyun parçayla ısı alışverişini sırasındaki sıcaklığının değişimi gösteriliyor. Konformal soğutma kanalları daha verimli bir soğuma sağladığı için parçadan alınan ısı düz soğutma kanallarının aldığı ısıya göre daha fazladır. Bu yüzden konformal soğutma kanallarında soğutma suyundaki sıcaklık artışının düz soğutma kanallarındaki soğutma suyunun sıcaklık artışına göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Şekil 10’da konformal soğutma kanalları ile soğutulan parçanın kalıptan çıktığında yüzey sıcaklığı dağılımının, düz soğutma kanalları ile soğutulan parçaya göre daha az farklılık gösterdiği, değer olarak da daha düşük olduğu görülebilir.

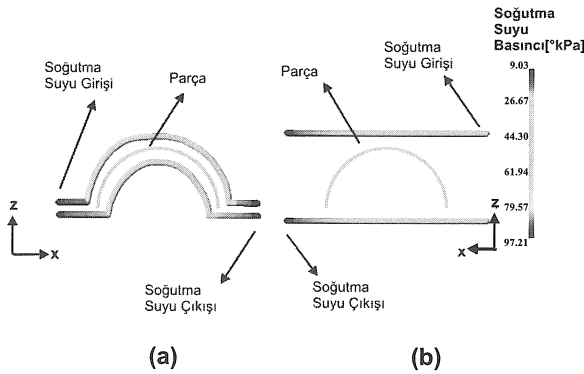


Şekil 9 Soğutma Suyu Sıcaklığı: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim



Şekil 10 Çevrim Sonunda Parça Yüzey Sıcaklığı: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim

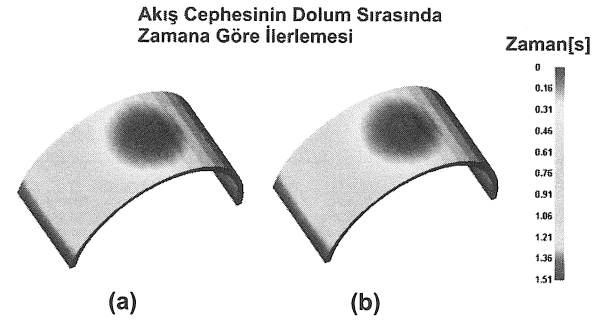
Şekil 11'de her iki tip soğutma kanalı konfigürasyonu için, kanallar boyunca suyun basınç değişimi görülmektedir. Konformal kanallardaki soğutma suyu basınç düşüşünün, düz kanallardakine göre yaklaşık iki kat daha fazla olduğu gösteriliyor. Bu da konformal kanallardaki soğutma suyunu pompalamak için gereken enerjinin düz kanallardaki soğutma suyunu pompalamak için gereken enerjiden daha fazla olacağına işaret etmektedir. Özellikle parça şeklinin karmaşıklığının artmasıyla, konformal kanal uzunluğu ve döngüleri de artacak, bu durum basıncın daha da fazla düşmesine neden olacaktır.



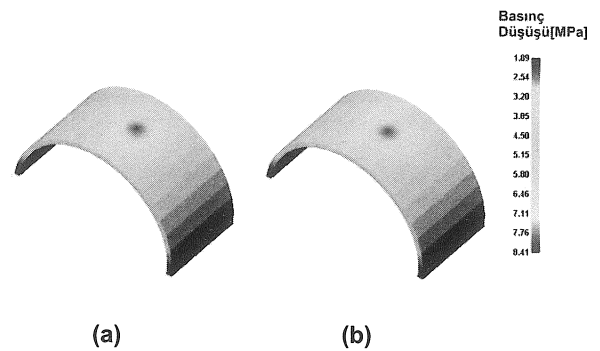
Şekil 11 Soğutma Suyu Basıncı: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim

Şekil 12'de kovuk içinde her noktanın hangi zamanda doldurulduğu gösterilmektedir. Şekil 13'te kalıbın doldurulduğu andaki basınç dağılımının, kapıdaki basınca göre farkı gösterilmektedir. En büyük basınç farkı, beklenildiği gibi akış cephesinin son geldiği kabuğun uç bölgelerinde görülmektedir. Bu iki şekil, soğutma kanalı tipinin akış cephesi ilerlemesi, dolun basıncı ve dolun zamanı üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermektedir. Ancak, Şekil 13'te çok net gözükmese de konformal

kanallı kalıp için gereken basınç yaklaşık 0.08 MPa kadar fazladır. Şekil 14'te iki tip soğutma kanalı için, dolun anında parça içinde oluşan donma katmanı yüzdesi gösterilmektedir. Kalıp içinde dolun sürerken, polimerin kalıp duvarlarına temas ettiği yüzeylerde bir donma katmanı oluşturur. Donma katmanı yüzdesi, kalıpta erimiş polimerin dolun anında oluşturduğu donma katmanının polimerin aktığı alana olan oranıdır. Kalıpta donma katmanı ne kadar kalın olursa enjekte edilen erimiş polimerin akabileceği alan o kadar dar olur. Erimiş polimerin dar bir alandan geçerek kalıbı doldurması daha zordur. Şekil 14'te konformal kanallı kalıptaki polimerin donma katmanı yüzdesinin (daha verimli soğutulduğu için) biraz daha fazla olduğu gösteriliyor. Bu tip kalıptaki erimiş polimerin enjeksiyon basıncının bir miktar daha fazla olması, polimer sıcaklığının düşük olması sonucu (Şekil 7) oluşan daha yüksek viskozite ve daha küçük akış alanı (daha yüksek donma katmanı yüzdesi) ile açıklanabilir.



Şekil 12 Kalıp içinde Akış Cephesinin Dolun Sırasında Zamana Göre İlerlemesi: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim

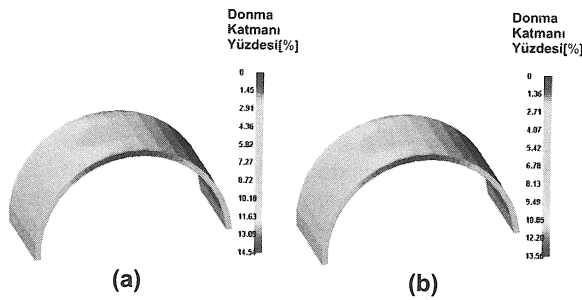


Şekil 13 Basınç Düşüşü: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim

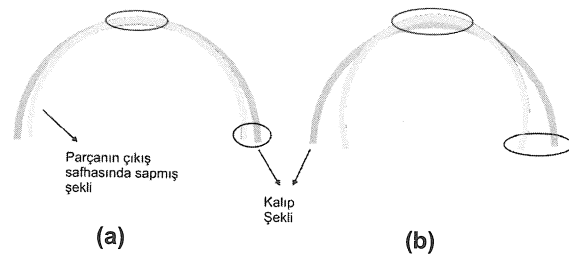
Parçanın soğuması sırasında, kalıp ile parça arasındaki sıcaklık farkının düzgün bir dağılım göstermemesi sonucu oluşan ısıl stresler, parçanın burkulmasına yol açabilir, parçanın görünümünü ve özelliklerini etkiler [12]. Tablo 3'te, iki tip soğutma kanalı için kalıptaki sıcaklıklar gösterilmiştir. Kalıp sıcaklıkları, konformal kanallı kalıpta daha küçüktür. Özellikle ortalama sıcaklık oldukça düşüktür. Şekil 10'daki sıcaklık dağılımları da gözönüne alındığında, düz tip soğutma kanallı üretim sonucu parçadaki sıcaklık dağılımının daha az değişken olması sonucu ısıl streslerin parça üzerindeki etkisinin daha küçük olması beklenmektedir. Şekil 15'te, iki tip kalıp için üretilen parçalarda ısıl strese bağlı sapma (soğuma sonrası) gösterilmiştir. Buna göre düz kanallı kalıpta üretilen parçanın tasarlanan haline göre sapmasının daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Tablo 3 Düz ve konformal soğutma kanal tiplerinde kalıp sıcaklığı

	Düz Soğutma Kanallı Kalıp	Konformal Soğutma Kanallı Kalıp
Minimum kalıp sıcaklığı (°C)	26.7	21.24
Maksimum kalıp sıcaklığı (°C)	50.18	41.48
Ortalama kalıp sıcaklığı (°C)	38.2	24.55



Şekil 14 Donma Katmanı Yüzdesi: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim

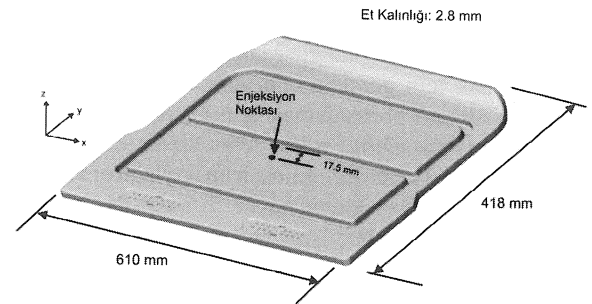


Şekil 15 Parçanın kalıptan çıkış safhasında ısıl strese göre sapması: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim.

#### 4. GERÇEK İMALAT ÖRNEĞİ: BİR BUZDOLABI RAFININ PLASTİK ENJEKSİYON İLE ÜRETİMİNİN MOLDFLOW KULLANILARAK BENZETİMİ

Bu kısımda, plastik enjeksiyon yöntemi ile seri üretimi gerçekleştirilen bir buzdolabı rafının, mevcut çevrim süresinin (58 s) - yüzey kalitesinde bir düşüş yaşanmaması şartıyla - düşürülmesi amacıyla, Moldflow'la enjeksiyon benzetimi yapılmış, uygun süreç/kalıp parametreleri araştırılmıştır. Benzetimlerde, gerçek imalattan alınan veriler kullanılmıştır (Arçelik).

Şekil 16'da benzetimde kullanılan buzdolabı rafının şekli ve boyutları verilmiştir. Parçanın et kalınlığı, her yerde 2.8 mm'dir. Enjeksiyon tek bir noktadan gerçekleştirilmiştir. Tablo 4, buzdolabı rafının üretiminde kullanılan plastik ve kalıp malzeme bilgilerini, süreç parametrelerini ve üretim sonucu elde edilen verileri göstermektedir.



Şekil 16 İmalatı gerçekleştirilen buzdolabı rafı geometrisi

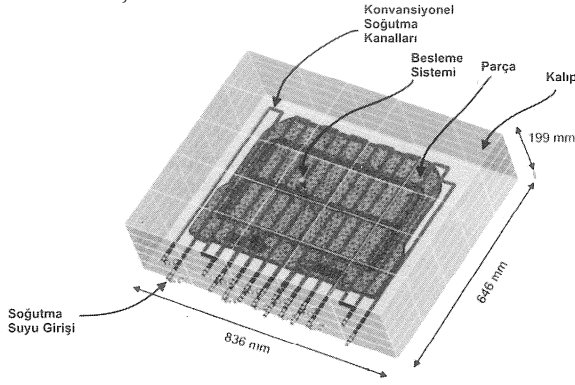
Tablo 4 Buzdolabı rafının plastik enjeksiyonla üretimi sürecinde proses değişkenleri

Kalıp Malzemesi	Thyoplast 2738 (DIN 1.2738)
Parça Malzemesi	Polystyrol 165H
Soğutma Suyunun Debisi	5 l/min
Soğutma Suyu Giriş Sıcaklığı	22 °C
Enjeksiyon Basıncı	80 MPa
Başlangıç Kalıp Sıcaklığı	40 °C
Başlangıç Erimiş Polimer Sıcaklığı	230 °C
Enjeksiyon süresi	3.05 s
Ütüleme Zamanı	10 s
Soğuma Süresi	41 s
Çevrim Süresi	58 s

Şekil 17'de, gerçekleştirilen buzdolabı raf üretiminde kullanılan düz soğutma kanallarına sahip kalıbın tasarımı gösterilmiştir. Soğutma sıvısı olarak saf su kullanılmıştır. Soğutma kanalları arasındaki mesafe, soğutma kanallarının çapının 1.5 katı olarak alınmıştır. Soğutma kanallarının uzunluğu 1.5 m'yi geçmeyecek şekilde tasarlanmıştır. Kalıp yüzeyi ve

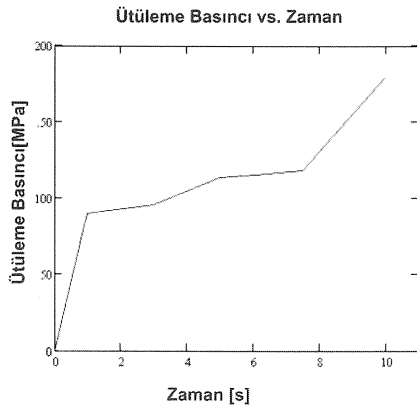


soğutma kanalları arasındaki mesafe, soğutma kanallarının çapının 3 katını geçmeyecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 17 Buzdolabı rafının mevcut üretiminde kullanılan kalıbın yapısı

Buzdolabı rafının gerçekte uygulanmakta olan üretim süreci, Tablo 4 teki değişkenlere göre ve Şekil 18’de verilen ütüleme basıncına göre gerçekleştirilmektedir. Mevcut üretim süreciyle ilgili elde edilen veriler arasında soğutma suyunun debisi ve giriş sıcaklığı bulunmamaktadır. Bu değişkenler deneme yanılma yöntemiyle Moldflow benzetimi yapılarak bulunmuş; parçanın mevcut üretimde kalıptan çıktığı zamanki bilinen yüzey sıcaklığı Moldflow benzetimiyle elde edilene kadar bu iki parametre değiştirilmiştir.

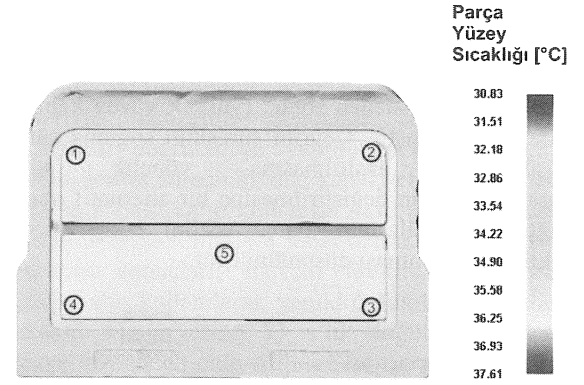


Şekil 18 Buzdolabı rafının mevcut üretiminde, ütüleme basıncı-zaman grafiği

Mevcut üretimde parçanın kalıptan çıktıktan sonraki yüzey sıcaklığı beş noktadan ölçülmüştür (enjeksiyon noktası da dahil) ve bu veriler Tablo 5’te verilmiştir. Bu sonuçlar, benzetim sonucu elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Moldflow’un verdiği en büyük hata değeri (% 12) enjeksiyon noktasında görülmüştür. Şekil 19’da, Moldflow ile bulunan buzdolabı rafı yüzeyinin sıcaklığının, kalıptan çıkış sırasındaki dağılımları gösterilmiştir.

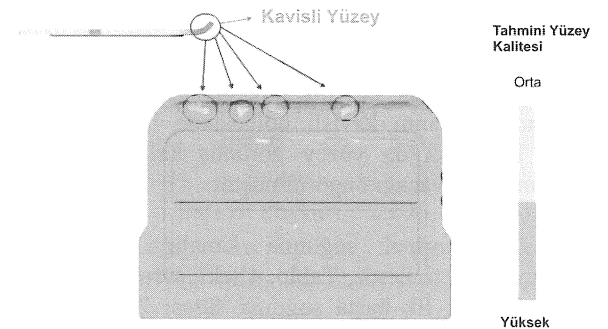
Tablo 5 Parça yüzeyinin üzerindeki 5 ayrı nokta için çevrim sonu sıcaklıkları: Mevcut üretim verilerinin, Moldflow üretim benzetimi sonuçlarıyla karşılaştırılması

Ölçüm/bildirim noktaları	1	2	3	4	5
Mevcut üretimde parçanın ölçülen yüzey sıcaklığı (°C)	35.5	34.2	34.8	35	41
Mevcut üretimin Moldflow’la benzetiminden elde edilen parça yüzey sıcaklığı (°C)	35	36	35.2	35.7	36
Hata (%)	-1.4	5.2	1.5	1.4	-12



Şekil 19 Moldflow ile yapılan mevcut üretim benzetiminde buzdolabı rafının kalıptan çıkış yüzey sıcaklığı dağılımı ve sıcaklık ölçüm noktaları

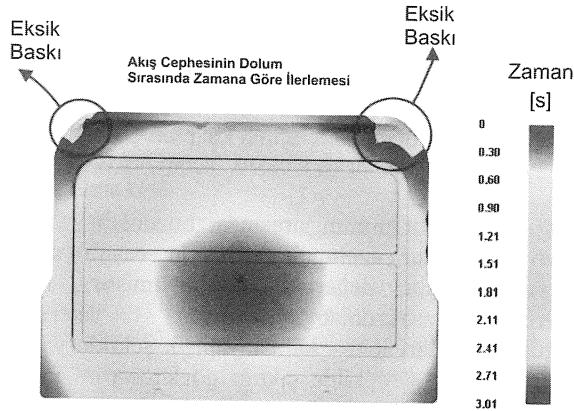
Mevcut üretim sırasında, buzdolabı rafının çevrim süresini azaltmak amacıyla çeşitli süreç parametrelerinin değerleri değiştirilmiştir. Bazı çevrimlerde, buzdolabı raflarının - yeterince soğutulmadıkları için - kalıba yapışık şekilde ya da kalıptan kırılmış şekilde çıktığı gözlenmiştir. Tablo 4’teki tüm parametreler aynı alınarak sadece soğuma süresi 41’den 33 saniyeye düşürüldüğü üretim sürecinde üretilen rafların kavisli bölgelerinde yüzey kalitesinin daha kötüleştiği gözlenmiştir. Bu üretimin Moldflow kullanılarak benzetimi yapıldığında, gerçekte gözlenen kavisli bölgelerdeki düşük yüzey kalitesi, benzetim sonuçlarında da gözlenmiştir (Şekil 20).



Şekil 20 Soğuma zamanının süreç parametrelerinin değiştirilmesiyle düşürülmesi sonucu modellenen raf yüzey kalitesi



Mevcut üretimde, yine soğuma süresini düşürmek için, bir alternatif olarak erimiş polimer 230 °C yerine 200 °C sıcaklıkla kalıba verilmiştir. Bu denemede düşük sıcaklıktaki polimerin viskozitesi yüksek olduğu için, polimerin kalıba dolumu daha yüksek enjeksiyon basıncı gerektirmiştir. Bu yüzden, enjeksiyon basıncı yüzde 10 oranında artırılmıştır (80 MPa dan 88 MPa). Diğer parametreler, Tablo 4'teki gibi bırakılmıştır. Bu denemede üretilen parçaların, kavisli bölgelerinin uçları dolmaması şeklinde (eksik baskı) çıktığı gözlenmiştir. Üretim aynı şartlarda Moldflow'da benetimi yapılmış ve eksik baskı benzetiminde de görülmüştür (Şekil 21). Süreç parametreleriyle oynanarak yapılan üretim denemelerinde (ve benzetimlerinde) çevrim süresi düşürülse bile istenen sonuç (yüksek yüzey kalitesi) elde edilememiştir. Çevrim süresinin soğuma süresi düşürülerek azaltılmasına yönelik süreç parametrelerinin değiştirilmesine bir alternatif olarak soğutma kanallarının, parça şeklini takip edecek şekilde tasarlanması düşünülmüştür.

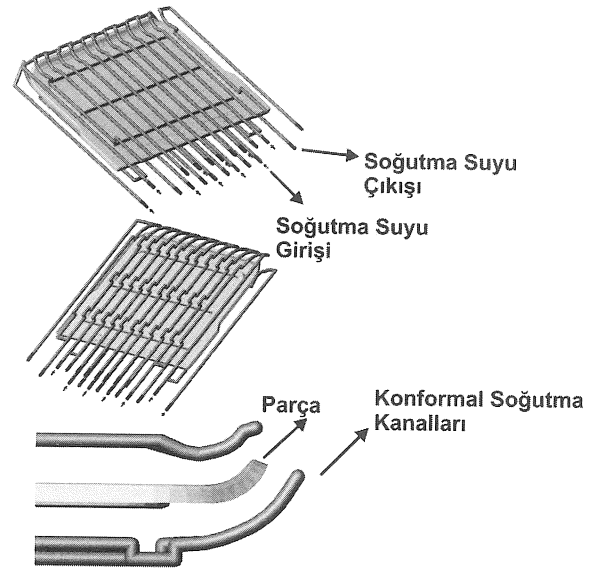


Şekil 21 Başlangıç sıcaklığı düşürülmüş erimiş polimerle yapılan enjeksiyon sırasında akış cephesinin zamana göre ilerlemesi

Şekil 22'de buzdolabı raf yüzeyini izleyen (konformal) soğutma kanalları tasarımı gösterilmiştir. Konformal soğutma kanallarıyla mevcut düz (düz) soğutma kanalları (Şekil 17) arasındaki önemli fark, konformal soğutma kanallarının kalıp içinde, yüzeyin kavisli bölgeleri de dahil her bölgesine eşit uzaklıkta ilerlemesidir. Bu şekilde, buzdolabı rafının daha verimli soğuyarak çevrim süresinin düşeceği, aynı zamanda parçanın kavisli bölgesinde herhangi bir eksik baskı ya da yüzey görünüş kalitesinde bir bozulma olmayacağı öngörülmüştür.

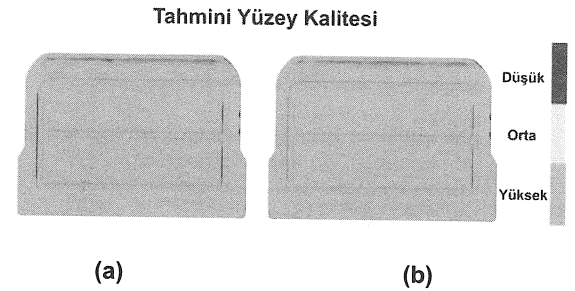
Konformal soğutma kanallı kalıp için yapılan benzetimlerde Tablo 4'teki süreç değerleri kullanılmıştır. İlk başta soğuma süresi 27 s olarak alınmıştır (Tablo 4'ten farklı olarak). Bu süre her seferinde 1 s artırılarak, yapılan her benzetim sonucu düz kanallı kalıpta yapılan üretim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Benzetimler, elde edilen parça

kalitesi, düz kanallı kalıpla yapılan üretimdeki parça kalitesi ile örtüşünceye kadar sürdürülmüştür.



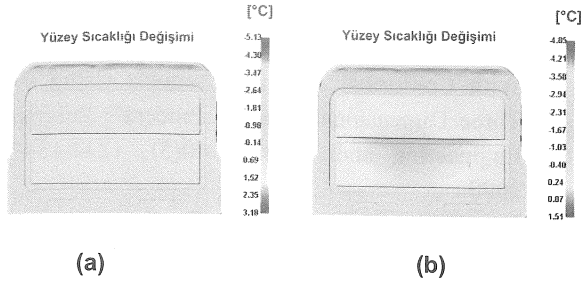
Şekil 22 Parça yüzeyini izleyen (konformal) soğutma kanalları

Soğuma süresi 33 saniye alındığında, konformal soğutma kanallı kalıpta üretilen parçanın, 41 saniyede düz kanallı kalıpta soğutulan parçayla eş yüzey kalitesi gösterdiği görülmüştür (Şekil 23).

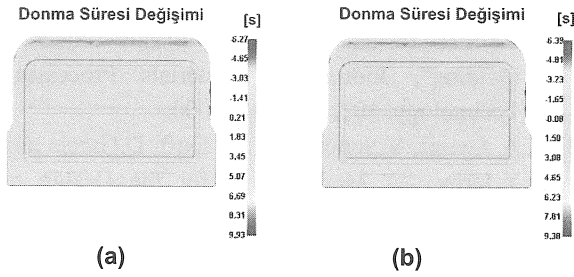


Şekil 23 Tahmini Yüzey Kalitesi: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim

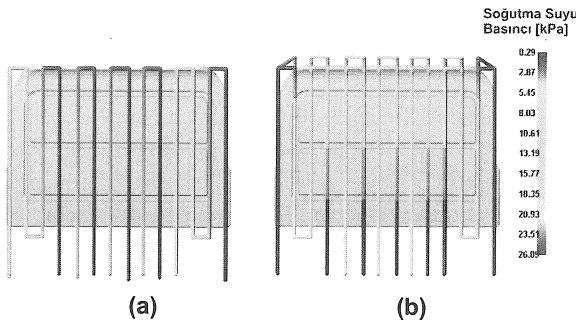
Şekil 24'teki sonuçlar, konformal kanallı kalıpta üretim benzetimi yapılan parçanın yüzey sıcaklık değişiminin, düz kanallı kalıpta üretilen parçaya göre biraz daha düzgün dağıldığını göstermiştir. Şekil 25'te konformal kanallı kalıp için üretim benzetimi yapılan parça içinde donma süresinin değişiminin, düz kanallı kalıptaki üretim sonucu elde edilen parçadaki değişime benzer olduğu görülmektedir. Şekil 26'da, konformal ve düz kanallar içindeki sudaki basınç düşüşü görülmektedir. Beklenildiği gibi, konformal kanallardaki basınç daha fazla düşmüştür.



Şekil 24 Yüzey Sıcaklığı Değişimi: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim



Şekil 25 Donma Süresi Değişimi: (a) Konformal soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim (b) Düz soğutma kanalları kullanılarak yapılan üretim



Şekil 26 Soğutma Suyu Basıncı: (a) Düz (düz) soğutma kanalları (b) Konformal soğutma kanalları

## 5. SONUÇ

Plastik enjeksiyon sürecinde kaliteli ve ekonomik ürün için, plastiğin düzgün ve hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Soğuma süresi, bir enjeksiyon çevrimdeki en uzun süreç olduğu için, özellikle seri üretimde soğumadan elde edilecek ufak tasarruflar bile önemli kazanç sağlar [13]. Hızlı ve düzgün soğumanın gerçekleşmesi için, üretim tasarımında kalıptaki soğutma kanalları özellikle önem kazanır.

Bu çalışmada, plastik enjeksiyonla imalat sırasında, parça şeklini izleyen (konformal) soğutma kanallarının kullanılmasının, parça ve üretim süreci üzerindeki etkileri bir plastik enjeksiyon benzetim programı (Moldflow) kullanılarak incelenmiştir. İlk olarak, yarım silindirik kabuk şeklindeki bir parça üretiminde düz ve konformal soğutma kanalları kullanımının etkileri karşılaştırılmış, parçanın sıcaklık değişimi, donma süresi ve soğuma kalitesi gibi çeşitli özellikleri incelenmiştir. Bunu takiben gerçek bir üretim örneği kapsamında, bir buzdolabı rafının plastik enjeksiyonu sırasında konformal ve düz soğutma kanallı kalıpların kullanımı karşılaştırılmıştır. Önce mevcut üretimin, Moldflow’la benzetimi yapılmış, gerçek üretim verileriyle benzetim sonuçları karşılaştırılmış, benzetimin doğrulaması yapılmıştır. Daha sonra, mevcut üretim sürecinin, düz kanal yerine konformal soğutma kanallı kalıp kullanılsa nasıl sonuç vereceği Moldflow benzetimleriyle sanal olarak incelenmiştir. Benzetim sonuçları, mevcut üretimin konformal kanallı kalıp kullanılarak yapıldığı takdirde istenilen parçanın 41 s yerine 33 s’lik soğumayla yüzey kalitesi düşmeden elde edileceğine işaret etmektedir. Bu sayede çevrim süresinde önemli bir kazanım elde edilebilir. Ancak yapılan benzetimler, konformal kanallardaki soğutma suyu basıncının daha fazla düştüğünü, bu nedenle suyun pompalanması için daha fazla enerji gerektiğini de göstermiştir. Konformal soğutma kanallarının kullanımında karşılaşılan temel zorluk, bu tip kanala sahip kalıpların imalatıdır. Özellikle, ürünün şekil karmaşıklığı arttıkça, konformal kanallara sahip kalıpların maliyeti de artmakta, üretimi zorlaşmakta ve bazı durumlarda yapılamamaktadır. Çoğu zaman geleneksel yöntemlerle üretimi zor ya da mümkün olmayan bu tip kanallı kalıpların üretimi üzerine araştırmalar yapılmakta, özellikle hızlı prototipleme/katmanlı imalat (layered/additive manufacturing) yöntemleri ([6] gibi) incelenmektedir.

## 6. KAYNAKÇA

1. R. Wang, J. Zeng, X. Feng and Y. Xia, “Evaluation of Effect of Plastic InjectionMolding Process Parameters on Shrinkage Based on Neural Network Simulation”, Journal of Macromolecular Science - Part B: Physics, 52,206–221, 2013
2. J.Z. Liang, “An Optimal Design of Cooling System For Injection Mold”, Polymer Plastic Technology Engineering, 41(2), 261–271, 2002
3. N. S. Rao, G. Schumacher, N. R. Schott, K. T. O’Brien, “Optimization of Cooling Systems in Injection Molds by an Easily Applicable

- Analytical Model”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21(5), 451-459, 2002
4. E. Mathey, L. Penazzi, F.M. Schmidt and F. Rondé-Oustau, “Automatic Optimization of the Cooling of Injection Mold Based on the Boundary Element”, *Numiform*, 222-227, 2004
  5. J. Liu, Z. Lu, Y. Shi, W. Xu and J. Zhang, “Investigation into Manufacturing Injection Mold via Indirect Selective Laser Sintering”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 48,155–163,2010.
  6. K.M. Au, K.M. Yu and W.K. Chiu, “Visibility-Based Conformal Cooling Channel Generation For Rapid Tooling”, *Computer-Aided Design*, 43, 356–373, 2011.
  7. Y. F. Sun, K. S. Lee and A. Y. C. Nee, “The Application of U-Shape Milled Grooves for Cooling Of Injection Molds”, *Proc. Inst. Mech. Engrs. Vol 216 Part B: J Engineering Manufacture, Special Issue Paper*, 1561-1573, 2002.
  8. X.P. Dang and H.S. Park, “Design of U-shape Milled Groove Conformal Cooling Channels for Plastic Injection Mold”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(1), 73-84, 2011.
  9. E. Sachs, E. Wylqms, S. Allev, M. Cima and H. Guo, “Production of Injection Molding Tooling With Conformal Cooling Channels Using the Three Dimensional Printing Process”, *Polymer Engineering and Science*, 40(5), 1232-1247, 2000.
  10. D. Wimpenny, “Rapid Tooling Options Compared”, *Proc. 4th National Conference on Rapid and Virtual Prototyping and Applications*, Lancaster, U.K. 189-202, 2003.
  11. S. J. Park and T. H. Kwon, “Optimal cooling system design for the injection molding process”, *Polym Eng Sci*, 38, 1450-1462, 1998.
  12. X. Chen, Y.C. Lam and D.Q. Li, “Analysis of thermal residual stress in plastic injection molding”, *Journal of Materials Processing Technology*, 101, 275-280, 2000.
  13. A.Agazzi, V.Sobotka, R. Le Goff, D.Garcia and Y.Jarny, “A Methodology for the Design of Effective Cooling System in Injection Moulding”, *Int. J. Mater Form*, 3(1), 13–16, 2010.