

Kalıp Tasarımının Isıl Şekillendirilmiş Ambalajın Kalınlık Dağılımı Üzerine Etkisi

The Effect of Plug Design on Thickness Distribution of Thermoformed Package

Olçay EKŞİ^{*a}, Neslihan YAVUZ^b

Kırklareli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 39100, Kırklareli

• Geliş tarihi / Received: 25.02.2020

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 21.04.2020

• Kabul tarihi / Accepted: 06.05.2020

Öz

Isıl şekillendirme prosesi gerek otomotiv gerekse ambalaj sanayiinde en çok kullanılan proseslerden biridir. Bu çalışmada, Polivinil klorür (PVC) filmlerin, erkek kalıpla ısıl şekillendirme sonrası kalınlık dağılımları belirlenmiştir. Erkek kalıbın çapı ve erkek kalıbın dişi kalıp içerisindeki dalma derinliği artırılarak bir dizi ısıl şekillendirme işlemi yapılmış ve numuneler elde edilmiştir. Bu numunelerdeki kalınlık dağılımı karşılaştırmalı olarak grafik yöntemiyle incelenmiştir. Erkek kalıp çapının ve erkek kalıbın dişi kalıp içerisindeki dalma derinliğinin artırılmasının ısıl şekillendirilen yarı mamullerde özellikle yan duvar ve taban kalınlık dağılımını değiştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Isıl Şekillendirme, Kalınlık Dağılımı, Kalıp Tasarımı

Abstract

Thermoforming process is one of the most used processes in both automotive and packaging industry. In this study, thickness distributions of Polyvinyl chloride (PVC) sheets were determined after plug assisted thermoforming. By increasing the diameter of the plug and the plug depth inside the female mould, a series of thermoforming operation were performed and plug assisted thermoformed samples were obtained. Thickness distribution in thermoformed samples was examined comparatively using graphical method. It has been found that increasing the diameter of plug and the plug depth, changes thickness distribution particularly in the side wall and bottom of thermoformed semi-finished samples.

Keywords: Thermoforming, Thickness Distribution, Plug Design

*a Olçay EKŞİ; olcayeksi@klu.edu.tr, Tel: (0544) 293 38 43, orcid.org/0000-0002-2433-6700

^b orcid.org/0000-0002-5232-6489

1. Giriş

Isıl şekillendirme dünya çapında farklı endüstriyel ürünlerin elde edilmesinde kullanılan bir üretim yöntemidir. Bu proses elektrik-elektronik, sağlık, inşaat, ambalajlama ve otomotiv başta olmak üzere birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle termoplastik levha yâda film malzemelerin geniş yüzey alanlı yarı mamullere dönüştürülmesinde çevrim zamanı ve maliyet açısından oldukça verimlidir. Rakip üretim yöntemlerinden, enjeksiyon kalıplama, plastik ekstrüzyon ve ekstrüzyon şişirme kalıplama yöntemlerine nazaran makine ve kalıp maliyetleri dikkate alındığında avantajlı bir prodestir (Penix, 1991; Throne, 1996; Crawford, 1998; Rosato vd., 2001;) Bunun yanında ısıl şekillendirme yöntemiyle elde edilen ürünlerin kalınlık dağılımlarının her noktasında aynı olmaması ve ürün kalıptan alındıktan sonra istenmeyen kısımların kesilerek atılması gibi ek işlemler bu yöntemin zayıf yönleridir. Kalınlık dağılımının ısıl şekillendirilmiş ürünlerde her noktada farklı olması ürünün dayanımını etkiler. Eğer ısıl şekillendirilmiş ürün bir gıda ambalajı ise, farklı kalınlık değerleri, farklı gaz ve oksijen geçirgenliği anlamına geleceği için ambalajlanan gıdanın raf ömrünü değiştirir. Dolayısıyla ısıl şekillendirilmiş ürünün kalitesi söz konusu olduğunda kalınlık dağılımının mümkün olduğu kadar ilk levha yâda film kalınlığına yakın olması bir gerekliliktir (Rosato ve Rosato, 2004; Barry vd., 2006; Pribble, 2013; Schwarzman ve Illig, 2018). Isıl şekillendirme yönteminde termoplastik hammadde etkin sızdırmazlığın sağlanması için öncelikle tutucu çerçeve tarafından sabitlenir. Sabitlenen hammadde farklı ısıtma teknikleriyle (fırında ısıtma, radyant ısıtıcılar ile ısıtma, kızılötesi ısıtma vb.) ısıtılabilir. Hammaddenin türüne göre uygun şekil verme sıcaklığına ulaşan ve tutucu çerçeve tarafından sabitlenen levha yâda film malzeme, dişi kalıp üzerine yerleştirilir. Vakum, pozitif hava basıncı ve/veya erkek kalıp kullanılarak tercihen bir ön gerdirmeye sonrasında hammadde şekillendirilir. Soğuyarak katılaştıktan sonra kalıptan alınan yarı mamul istenmeyen kısımların kesilip atıldığı bir kesme kalıbı kullanılarak son şeklini alır. Erkek kalıp kullanılmayarak sadece vakum etkisinde ısıl şekillendirme yapılabilir. Bu durumda yöntem vakumla ısıl şekillendirme adını alır. Literatürde vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi ile ilgili çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. O'Connor vd. (2013), ısıl şekillendirmeyi etkileyen parametrelerin daha iyi anlaşılması için yüksek sıcaklıkta iki eksenli deney verilerine dayanan, Polipropilen için termal davranışı da içine alan bir malzeme modeli öngörerek sonlu elemanlar yöntemini kullanmış,

erkek kalıp kullanarak ısıl şekillendirme yönteminin simülasyonu üzerine çalışmıştır. Çalışmaların sonucunda, gerçekleş-tirilen modellemenin iki eksenli deneysel verilere iyi bir şekilde uyum sağladığı gözlenmiş ve modellenmenin doğruluğu, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada erkek kalıp ile hammadde arasındaki sürtünmenin en etkili parametrelerden biri olduğu gözlenmiştir. Bunun yanı sıra ısı transfer parametrelerinin de etkili olduğu belirlenmiştir. Hosseini vd. (2006), polimer içinde elastik deformasyonların heterojen bir şekilde birikmesi sonucu soğumanın ve gerilme gevşemesinin farklı hızlarda gerçekleştiğini gözlemiştir. Bunun bir sonucu olarak test edilen üründe çarpılmalar meydana gelmiştir. Çarpılmaları en az seviyeye indirmek ya da mümkün olduğu durumlarda tamamen gidermek için elastik deformasyonların en az miktarda olması gerekmektedir. Bunu sağlamak için iki aşamadan oluşan kalıp tasarlanmış ve kullanılmıştır. Morales vd. (2014), ısıl şekillendirilmiş bir parçanın, farklı üretim parametrelerinin değişiminden nasıl etkilendiğini araştırmıştır. Levha sıcaklığı, erkek kalıp malzemesi, erkek kalıp sıcaklığı, yüzey kalitesi, erkek kalıbın geometrisi ve hava basıncı değeri incelenen parametreler olarak belirlenmiştir. Erkek kalıbın malzemesinin değiştirilmesi sonucu; levha, erkek kalıba yapılabilmektedir. Bu durum, kalınlık dağılımını belirlemede sürtünmeye göre daha fazla rol oynamaktadır. Chen vd. (2008), 0.125 ve 0.2 mm kalınlıklardaki Polikarbonat (PC) filmlere ısıl şekillendirme yöntemiyle şekil vermiştir. Isıl şekillendirme gerçekleştirilirken, dişi kalıp sıcaklığı, erkek kalıp dalma derinliği, erkek kalıbın hızı, film malzemenin sıcaklığı ve erkek kalıbın bekleme süresi etkin parametreler olarak seçilmiş ve bunların kalınlık dağılımına etkileri incelenmiştir. Isıl şekillendirme ile oluşturulan yarımamullerin yan duvar kalınlıklarındaki değişimin artan dişi kalıp sıcaklığı, film malzeme sıcaklığı, erkek kalıp dalma derinliği ve erkek kalıp bekleme süresiyle arttığı, artan erkek kalıp hızıyla azaldığı belirlenmiştir. Moustafa vd. (2015), taşıyıcı cepli bant üretimini ısıl şekillendirme ile denemiştir. Kalıp malzemesinin termal iletkenliğinin, ısıl şekillendirilmiş ürünün duvar kalınlık dağılımına etkisini incelemek amacıyla dört farklı kalıp takım malzemesi kullanılmıştır. Kalıp malzemesinin termal iletkenliğinin yüksek olması ve şekillendirme sıcaklığının sabit tutulması daha düzgün kalınlık dağılımına sahip taşıyıcı bant üretmeyi sağladığı aktarılmıştır. Wang ve Nied (1999), ısıl şekillendirme yönteminde polimer levhanın ısıtılması sonrasında sıcaklık kontrolü yaparak dağılımı optimize etmiş ve ısıl

şekillendirilmiş üründe daha iyi kalınlık dağılımı sağladığını gözlemiştir.

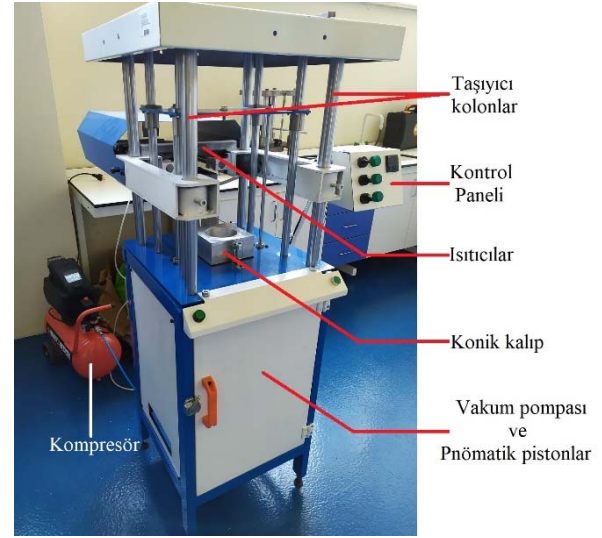
Ulusal literatürde erkek kalıp kullanarak ısıllendirmeye ile ilgili oldukça sınırlı kaynak bulunmaktadır. Mevcut çalışmalarında daha ziyade ısıllendiren ürün ve toplam kalitesini etkileyen parametreler hakkında olduğu bilinmektedir. Buna ek olarak, seri imalat ile üretim yapan birçok ambalaj firmasında kullanılan erkek kalıp malzemesi, çoğunlukla ısıllendirmeye ile ilgili oldukça düşük termoplastik, termoset ya da belirli oranlarda karışımlarından oluşmaktadır. Bu çalışmada ise, ısıllendirmeye yüksek olan C1040 çelik malzeme seçilmiştir. Özellikle gıda ambalajlama makinelerinde kullanılan erkek kalıpların boyutları hemen hemen dişi kalıp boyutlarındadır. Erkek kalıp ve polimer levha-film, şekil verme esnasında dişi kalıbın iç yüzeyine ya temas eder ya da temas edecek kadar yakındır. Yine sektördeki çoğu ambalajlama makinesi pozitif hava basıncı kullanarak erkek kalıp ile ısıllendirmeye yapmaktadır. Bu işlemlerde basınç 1 barın üzerine çıkabilmektedir. Mevcut çalışmada ise erkek kalıbın malzemesi, çapı ve dişi kalıp içerisindeki dalma derinliği değiştirilerek ürün kalınlık dağılımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Buna ek olarak şekil verme işlemi vakum kullanılarak gerçekleştirilmiş ve en yüksek basınç değeri 1 bar basıncın altında kalmıştır.

Bu çalışmada, PETKİM Petvinil S 23/59 renksiz şeffaf PVC film malzeme kullanılmıştır. 0.5 mm kalınlığa sahip PVC kullanılarak ilkin erkek kalıp kullanılmadan sadece vakum altında dişi kalıpla ısıllendirmeye yapılmıştır. Ardından kalınlık dağılımı belirlenmiştir. Erkek kalıbın dişi kalıp içerisinde dalma derinliği için 35 mm seçilerek, 30, 35, 40, 45 ve 50 mm çaplı erkek kalıplar ile ısıllendirmeye ile numuneler elde edilmiştir. Bu numunelerin kalınlık dağılımları grafik yöntemle belirlenmiştir. Erkek kalıp çapı 40 mm seçilerek dalma derinliği 25, 30, 35, 40 ve 45 mm olarak seçilmiş ve ısıllendirmeye ile numuneler elde edilmiştir. Numunelere ait kalınlık dağılımı yine grafik yöntemle belirlenmiştir. Erkek kalıp çapının ve erkek kalıbın dişi kalıp içerisindeki dalma derinliğinin artırılmasının ısıllendiren yarı mamullerde özellikle yan duvar ve taban kalınlık dağılımını değiştirdiği tespit edilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

Çalışmada 0.5 mm kalınlığında şeffaf süspansiyon PVC (yoğunluk:0.56-0.62gr/cm³) film kullanılmıştır. ısıllendirmeye, OYSAN Makine A.Ş tarafından üretilen laboratuvar tipi şekil verme

ünitesinde gerçekleştirilmiştir. 0.5 mm kalınlığa sahip PVC film malzeme şekillendirme öncesinde 150 x 150 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. ısıllendirmeye ünitesi Şekil 1'de gösterilmektedir. ısıllendirmeye ünitesi kompresör, vakum pompası, pnömomatik regülatör ve pistonlar, ısıtıcılar, taşıyıcı kolonlar ve elektrik sisteminden oluşmaktadır. ısıtıcılar hareketli tipte olmakla beraber 25 x 25 cm² ısıtma alanına sahiptir. 3 adet konkav seramik rezistans ısıtıcıları teşkil etmektedir. ısıtıcı sıcaklığı 500 C°'ye kadar çıkabilmektedir.



Şekil 1. Laboratuvar tipi ısıllendirmeye ünitesi

Film malzeme ilk olarak dişi kalıp üst yüzeyine yerleştirilir. Sonra tutucu çerçeve ile kalıp üst yüzeyine bastırılarak sıkıştırılır. ısıtıcılar çekilerek PVC film malzemenin ısıtılması için uygun konuma getirilir. 250 C° sıcaklığa sahip ısıtıcılar belirlenen süre boyunca PVC film malzemenin belirlenen sıcaklığa kadar ısıtır. ısıtıcılar eski konumuna itilir. Pnömomatik tahrik ile erkek kalıp aşağı yönde belirlenen derinlikte hareket eder ve ön gerdirme işlemi tamamlanmış olur. Erkek kalıp film ile hala temasta iken vakum pompası çalıştırılarak, filmin dişi kalıbın şeklini alması sağlanır. Erkek kalıp yukarı yönlü hareket ederek eski konumuna geri döner. Vakum, numune şekillendikten 5 saniye sonra kesilir. Bu bekleme, numunenin vakum altında soğuyarak katılaşmasını sağlar ve çarpılmayı azaltmak içindir. ısıllendirmeye öncesinde tutucu, film malzeme ve kalıp montajı Şekil 2'de gösterilmektedir.

Deneysel çalışmada konik geometriye sahip 2024 serisi alüminyum dişi kalıp kullanılmıştır. Erkek kalıp malzemesi olarak C1040 çeliği seçilmiştir.



Şekil 2. Tutucu, PVC film ve konik dişi kalıp

Çalışmada kullanılan erkek kalıbın farklı çaptaki dairesel başlıkları ve derinlik ayarı için kullanılan burçlar, Şekil 3'te montajı ise Şekil 4'te verilmiştir.

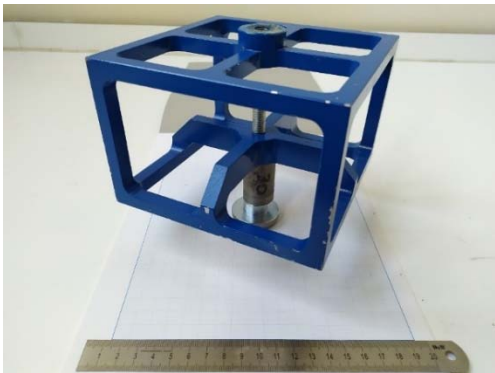


(a)



(b)

Şekil 3. (a) Erkek kalıbın farklı çaptaki dairesel zımbaları [mm], (b) Erkek kalıbın dalma derinliğini ayarlayan farklı yükseklikteki burçlar [mm]



Şekil 4. Erkek kalıp montajı

Çalışmada kullanılan dişi ısıl şekillendirme kalıbı alüminyümden Talaşlı şekil verme yöntemiyle belirli bir kritere göre tasarlanarak üretilmiştir.

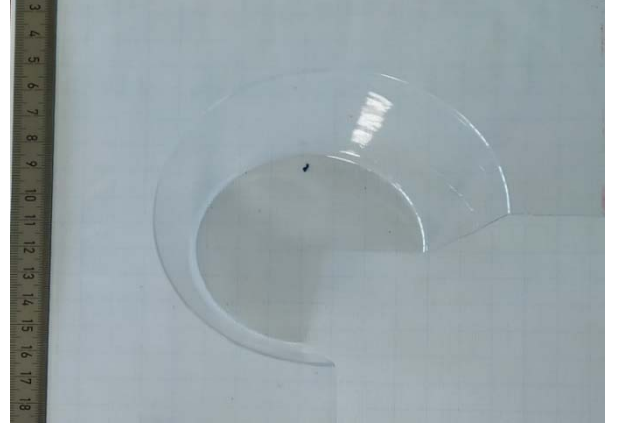
Kalıp boşluğunun yan duvarlarının draft açısı 15° olarak tasarlanmıştır. İç çap değeri 100 mm, derinlik ise 50 mm olarak belirlenmiştir. Isıl şekillendirme prosesinde üç farklı kritere göre ürün tasarımı, yani kalıp tasarımı yapılabilir. Bunlardan ilki alansal çekme oranı (Areal draw ratio), diğeri doğrusal ya da çizgisel çekme oranı (Linear draw ratio) ve sonuncusu ise ısıl şekillendirilen ürünün birbirine dik dış boyutlarının oranı olan (h:d) oranıdır (Throne, 1996). Bu kriterler bir ürünün pratik olarak ısıl şekillendirilebilir olup olmadığını ortaya koyabilmek için çıkarılmış eşitliklerdir. Erkek kalıbın kullanılması ve kullanılmaması durumunda bu eşitlikler farklı uygulanır. Ancak çalışmada kullanılan kalıbın kavite yüksekliğinin çapına oranı 1:2 olarak özel bir oran seçilmiş ve bu oranda üretilmiştir. $\frac{1}{2}$ oranı sınır bir değerdir. Bu oran küçüldüğünde, ürün siğ (shallow) olarak isimlendirilir. Keza bu oran büyüdüğünde ürün derin (deep) olarak nitelendirilir. Isıl şekillendirme prosesinin ismini de çoğu durumda bu oran belirler. Dişi kalıbın taban çapı yaklaşık olarak 73 mm'dir. Erkek kalıp çapının ise en büyük değeri 50 mm olarak seçilmiştir. Hedef, erkek kalıp ile dişi kalıp arasında en az 10 mm boşluk kalmasını sağlayabilmektir. Bu yüzden erkek kalıbın en büyük çap değeri 50 mm seçilerek 5'er mm'lik düşüş ile 45, 40, 35, ve 30 mm seçilmiştir.

Endüstriyel kullanımda ısıl iletkenliği ve sürtünme katsayısı oldukça düşük polimer bazlı erkek kalıp malzemeleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise, C1040 gibi ısıl iletkenliği oldukça yüksek ve üniversal tezgâhlar ile kolayca işlenebilecek erkek kalıpların üretilmesi amaçlanmıştır. Derinlik seçiminde ise 0-50 mm aralığı belirlenmiştir. Isıtılan PVC filmin, erkek kalıp temas etmeden önce yer çekimi etkisiyle, neredeyse 10-15 mm sarktığı tespit edilmiştir. Erkek kalıbın PVC filme etkin temasını sağlamak açısından dişi kalıbın üst yüzeyinden başlayarak 25, 30, 35, 40, 45 mm derinlik değerleri seçilmiştir. Çapın değişiminin etkisini incelemek için derinlik değeri sabit ve 5 farklı derinlik değerinden ortalama bir değer olan 35 mm, dalma derinliğinin etkisini incelemek için ise, yine 5 farklı çap değerinden ortalama değer olan 40 mm değeri seçilmiştir.

Isıl şekillendirilmiş ürünün kalınlık dağılımını etkileyen en önemli unsurlardan biri de sıcaklık dağılımıdır. Isıtıcı sıcaklığı PVC filmin degradasyonunu engellemek amacıyla 250 C° 'de sınırlandırılmıştır. Isıtma süresi ise seçilen erkek kalıp çapı ve dalma derinliği için başarılı bir ısıl şekillendirme operasyonu sonrasında her durum için ayrı belirlenmiştir. Isıtma işlemi sonrasında PVC film üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı

TESTO 871 Termal kamera kullanılarak belirlenmiştir. Özellikle erkek kalıpla şekil verme işlemlerinde ısıtma süreleri tespit edilmiş ve şekil vermenin hemen öncesinde termal görüntüler kaydedilerek ortalama sıcaklık belirlenmiştir. Artan erkek kalıp çapı ısıtma sürelerini artırmakta keza artan dalma derinliği de ısıtma sürelerini artırmaktadır. Artan ısıtma süreleri ısıll şekillendirme sıcaklıklarını da artırmaktadır. Elde edilen ısıll şekillendirilmiş konik PVC numunelerin dörtte biri kesip alınarak, bu çeyrek numune üzerinde kalınlık ölçümleri yapılmıştır. Kalınlık dağılımın belirlenebilmesi için seçilen her ısıll şekillendirme parametresi için 3 adet numune üretilmiş ve ortalama kalınlık değeri alınmıştır. Numunenin tabanının merkezinden başlayarak toplam 28 farklı noktada, LYK 5318 Kalınlık komparatörü (hassasiyet:0.001mm) kullanılarak kalınlık dağılımı belirlenmiştir. Kalınlık ölçme cihazının ve ısıll şekillendirilmiş numunelerin boyutları dikkate alınarak, 28 farklı nokta belirlenmiş ve kalınlık ölçümü yapılmıştır. ısıll

şekillendirilmiş PVC konik numune Şekil 5'te verilmiştir. Ek olarak, ısıll şekillendirme işleminin parametreleri Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 5. Isıll şekillendirilmiş ve kalınlık ölçümü yapılmış PVC numune

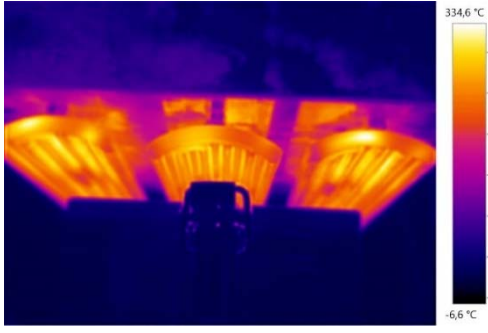
Tablo 1. PVC film malzemeye ait ısıll şekillendirme parametreleri

Çap değeri (mm)	Dalma derinliği (mm)	Isıtma süresi (s)	Vakum değeri (mm.hg)	Isıtıcı sıcaklığı (C ⁰)
Dişi kalıpla ısıll şekillendirme				
-	-	30	640-660	250
Sabit dalma derinliği(35 mm) ile ısıll şekillendirme				
30	35	60	640-660	250
35	35	75	640-660	250
40	35	90	640-660	250
45	35	105	640-660	250
50	35	120	640-660	250
Sabit çap(40 mm) ile ısıll şekillendirme				
40	25	90	640-660	250
40	30	105	640-660	250
40	35	105	640-660	250
40	40	120	640-660	250
40	45	120	640-660	250

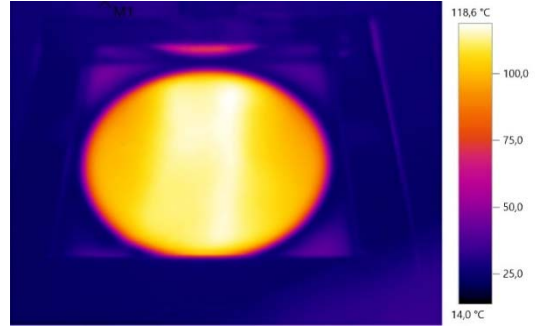
3. Bulgular

Isıtılmış film üzerindeki sıcaklık dağılımı ısıll şekillendirilmiş numunenin kalınlık dağılımı üzerinde ciddi rol oynamaktadır. Bu yüzden her ısıtma süresine karşılık gelen termal görüntü TESTO firmasına ait bir yazılım ile analiz edilerek

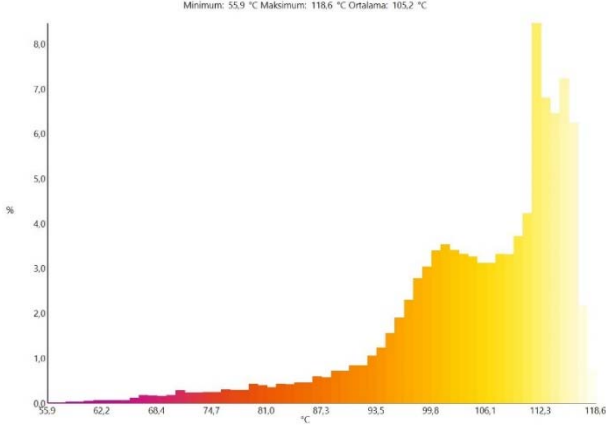
ortalama ısıll şekillendirme sıcaklığı belirlenmiştir. Ortalama ısıll şekil verme sıcaklıkları Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te gösterilmiştir. Şekil 6'da ise 250 C⁰ sıcaklıktaki ısıtıcılar üzerinde tespit edilen farklı sıcaklık değeri gösterilmiştir.



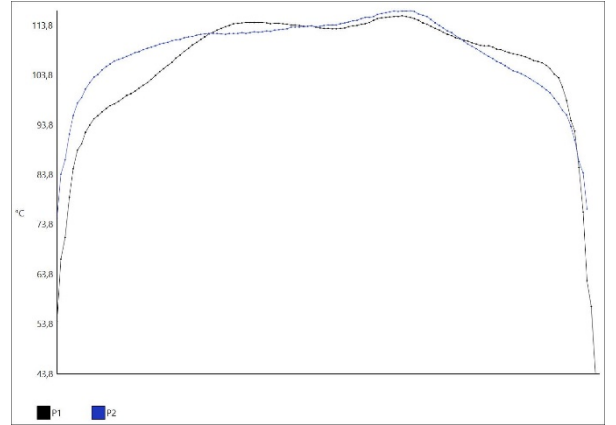
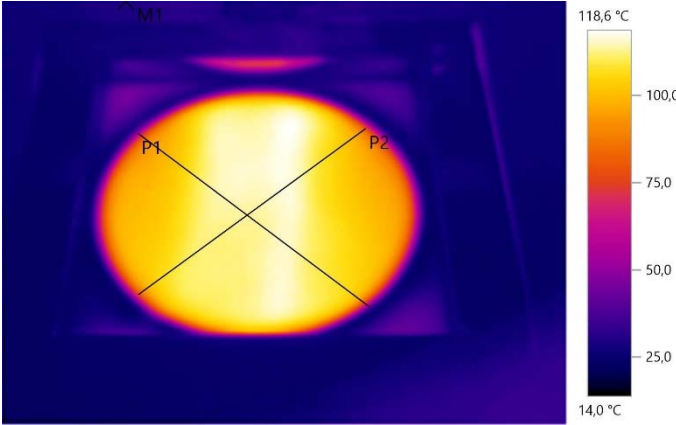
Şekil 6. 250 C° sıcaklıktaki ısıtıcılar üzerindeki sıcaklık dağılımı



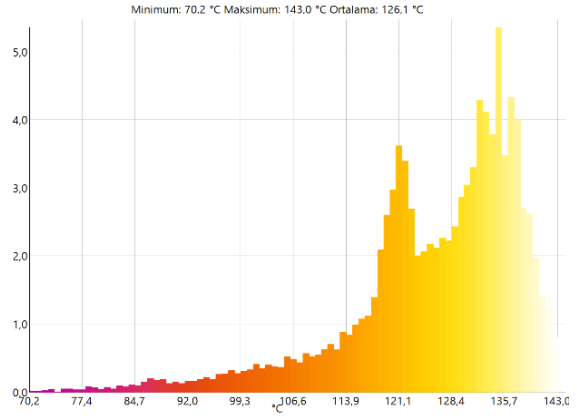
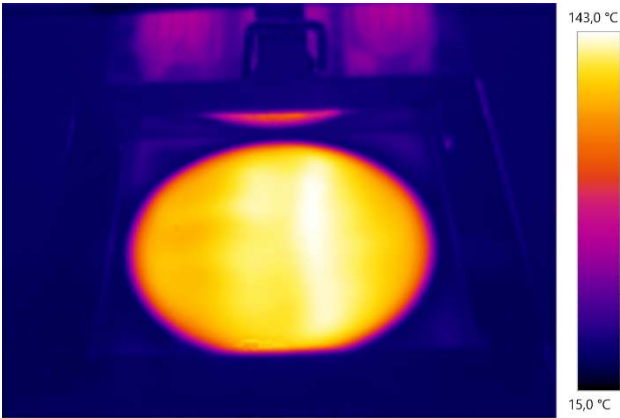
Şekil 7. 30 saniye ısıtma süresinde PVC film üzerindeki sıcaklık dağılımı



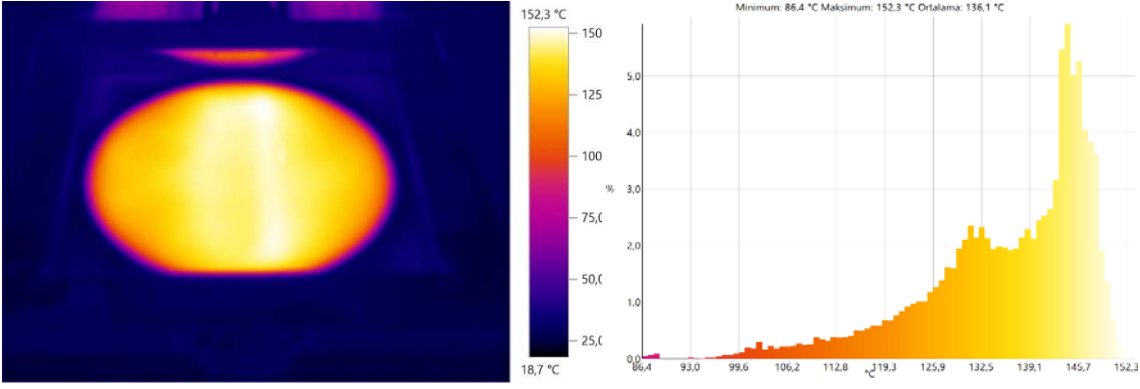
◀ Şekil 8. 30 saniye ısıtma süresinde PVC'nin ortalama ısıl şekillendirme sıcaklığı (105.2 C°)



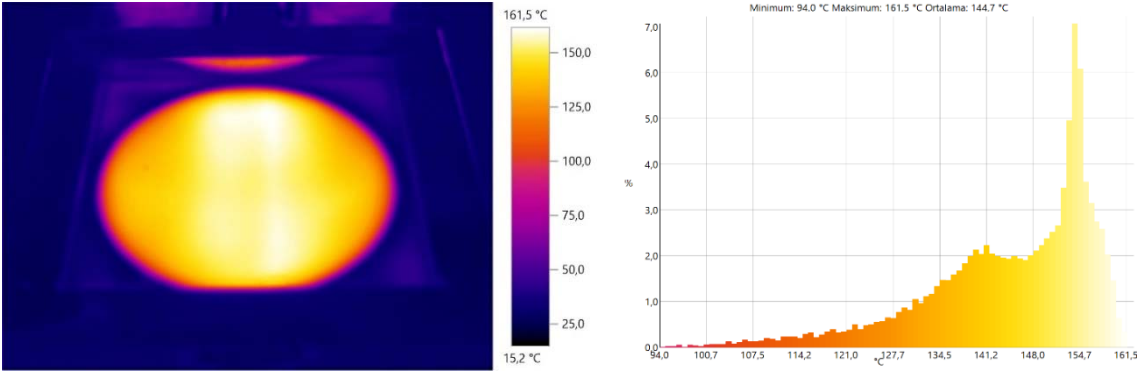
Şekil 9. P1 ve P2 doğrultularında alınan sıcaklık dağılımının karşılaştırılması



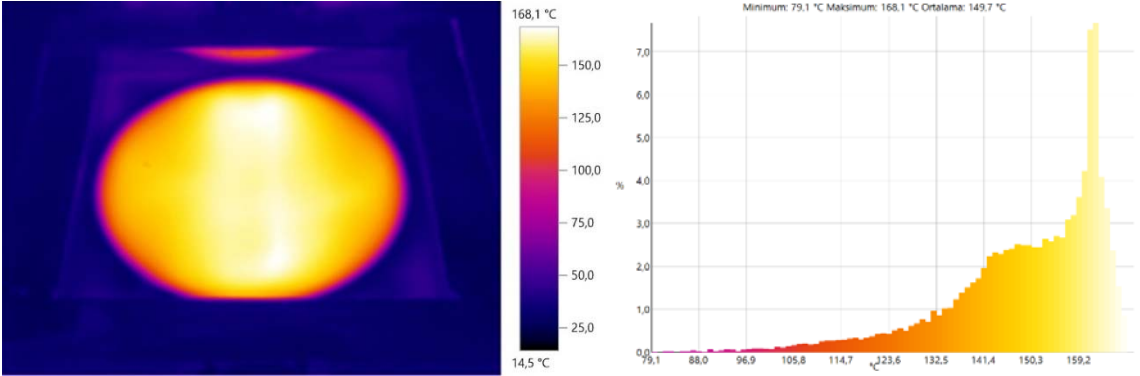
Şekil 10. 60 saniye ısıtma süresinde PVC film üzerindeki sıcaklık dağılımı ve ortalama ısıl şekillendirme sıcaklığı (126.1 C°)



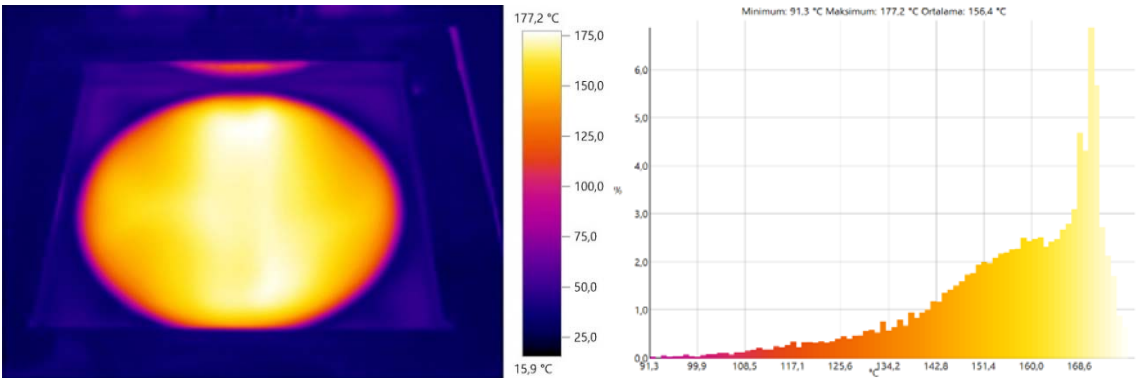
Şekil 11. 75 saniye ısıtma süresinde PVC film üzerindeki sıcaklık dağılımı ve ortalama ısıl şekillendirme sıcaklığı (136.1 C°)



Şekil 12. 90 saniye ısıtma süresinde PVC film üzerindeki sıcaklık dağılımı ve ortalama ısıl şekillendirme sıcaklığı (144.7 C°)



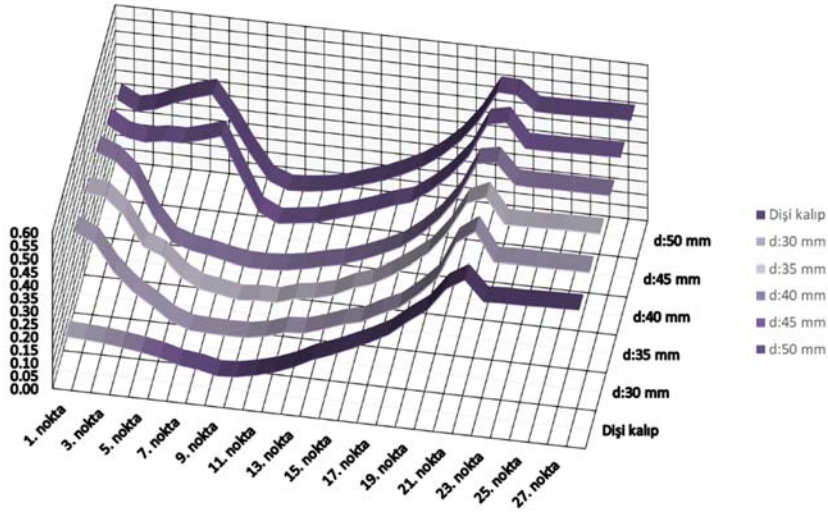
Şekil 13. 105 saniye ısıtma süresinde PVC film üzerindeki sıcaklık dağılımı ve ortalama ısıl şekillendirme sıcaklığı (149.7 C°)



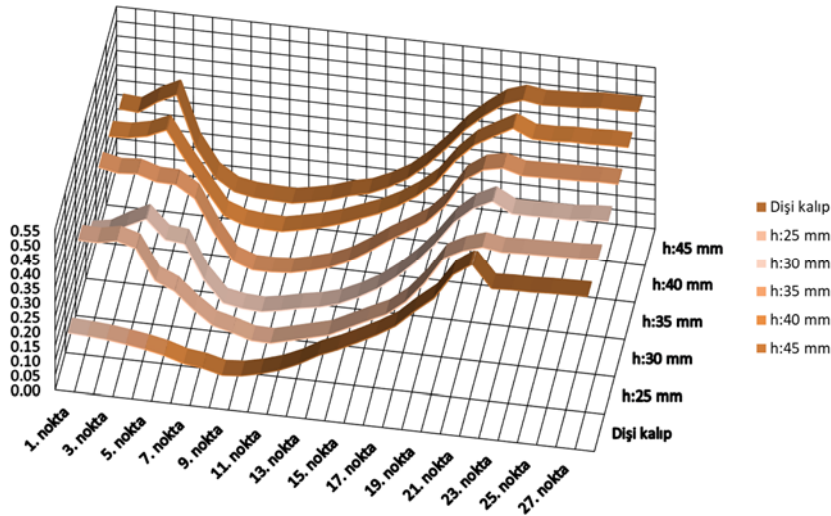
Şekil 14. 120 saniye ısıtma süresinde PVC film üzerindeki sıcaklık dağılımı ve ortalama ısıl şekillendirme sıcaklığı (156.4 C°)

Termal görüntüler üzerinde ilk konumuna geri itilen ısıtıcıların termal yansımaları da bulunduğundan ortalama sıcaklık dağılımı alınırken filmin yüksek sıcaklıktaki, deforme olan elips şekilli alanı seçilmiştir. Termal görüntüler belirli bir açıyla alınabilmektedir. Laboratuvar tipi ısıllı şekillendirme ünitesinin boyutları, ısıtılmış filmin termal görüntüsünün tam üstten alınmasını engellemiştir. Termal kameranın odak uzaklığının dişi kalıbın üstündeki mesafeden daha fazla olması da yine termal görüntülerin belirli bir açıyla alınmasına neden olmuştur. Şekil 9’da, alınan farklı iki doğrultuda (P1, P2) sıcaklık dağılımının birbirinden farklı olduğu da gözlenmektedir. Bu unsur, kalınlık dağılımının farklı olmasına yol açan etkenlerden biridir. Özellikle sıcaklığın, ısıtılmış filmin alüminyum kalıp yüzeyine temas eden kısımlarında daha düşük olduğu buna karşın filmin kalıp yüzeyine temas etmeyen dairesel kısmında

göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak yine ısıtıcılara paralel yönde sıcaklığın, ısıtıcılara dik yöndeki dağılımından farklı olduğu da gözle muayene edilebilmektedir. Şekil 15 ve 16, deneysel çalışmada elde edilen kalınlık dağılımlarını vermektedir. Şekil 15, erkek kalıbın dişi kalıp içerisindeki dalma derinliği 35 mm seçilerek ve erkek kalıp çapı değiştirilerek ısıllı şekillendirilen numunelerin kalınlık dağılımını karşılaştırmalı olarak vermektedir. Şekil 16 ise erkek kalıp çapı 40 mm seçilerek ve erkek kalıbın dişi kalıp içerisindeki dalma derinliği değiştirilerek ısıllı şekillendirilen numunelerin kalınlık dağılımını karşılaştırmalı olarak vermektedir. Şekil 15 ve 16’da “Dişi kalıp” olarak verilen seri; erkek kalıp kullanılmadan ısıllı şekillendirilen numunelerin kalınlık dağılımını verdiği için bu şekilde adlandırılmıştır.



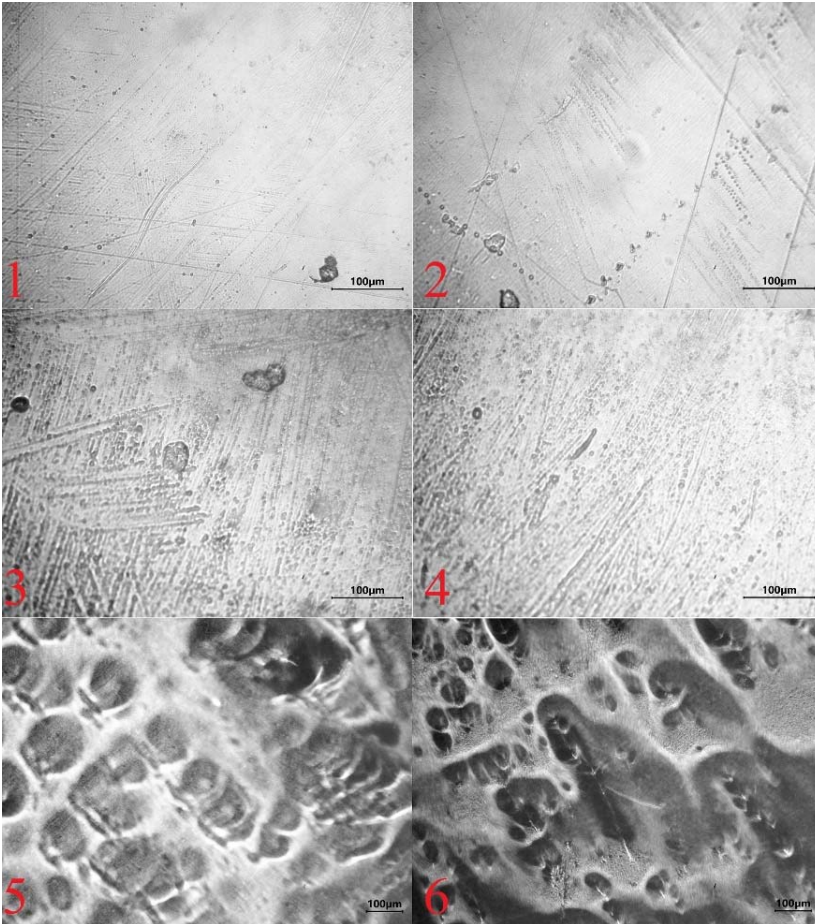
Şekil 15. Erkek kalıp çapının artırılması ile ısıllı şekillendirilen numunelerin karşılaştırmalı kalınlık dağılımları



Şekil 16. Erkek kalıp dalma derinliğinin artırılması ile ısıllı şekillendirilen numunelerin karşılaştırmalı kalınlık dağılımları

Şekil 7, Şekil 10, Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'te ısıtma öncesi PVC film malzemenin sıcaklık dağılımı verilmektedir. Isıtma süresinin artışı PVC film malzemenin ısıtma sıcaklığını da artırmıştır. Isıtma sıcaklıkları 30 saniye için 105.2 C°, 60 s için 126.1 C°, 75 s için 136.1 C°, 90 s için 144.7 C°, 105 s için 149.7 C°, 120 s için 156.4 C° olarak ölçülmüştür. PVC film malzeme yaklaşık 50 C°'lik bir sıcaklık farkıyla ısıtma sıcaklığına ulaştırılmıştır. Isıtma sıcaklığı; artan erkek kalıp çapıyla artış göstermiştir. Erkek kalıbın kullanılması, malzemedeki ısıtma sıcaklığını artırmıştır. Artan kalıp çapı ve dalma derinliği de malzemenin ısıtma sıcaklığını artırmıştır. Bunun nedeni, oda sıcaklığındaki çelik erkek kalıbın sıcak PVC film malzemeye temas ettiğinde film sıcaklığını düşürerek hızlı soğumaya yol açmasıdır. Çelik ısıyı iyi iletmediği için PVC ile temasta olduğu bölgelerde soğuma ve katılaşma hızla gerçekleşir ve bu bölgelerde şekil değiştirme meydana gelemez. Erkek kalıbın çapının artması ısıtılmış PVC film malzeme ile temas yüzeyinin arttığı anlamına gelir. Bu yüzden erkek kalıp çapı arttıkça ısıtma süresi artırılmış ve başarılı bir ısıtma işlemi için gerekli minimum sıcaklık değeri bulunmaya

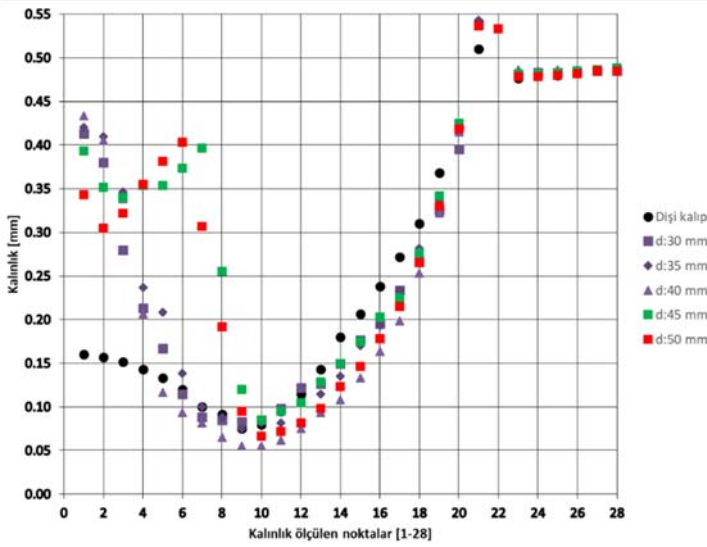
çalışılmıştır. Aynı eğilim artan erkek kalıp dalma derinliği için de söylenebilir. Artan dalma derinliği, oda sıcaklığındaki çelik kalıbın, ısıtılmış PVC film ile daha uzun süre temas etmesi anlamına gelir. Bu nedenle artan derinlik ile ısıtma süresi artırılır ve başarılı bir ısıtma işlemi için gerekli asgari sıcaklık değeri bulunmaya çalışılmıştır. Ancak en yüksek dalma derinliği 45 mm ve en büyük çap değeri 50 mm için ısıtma sıcaklığı, erkek kalıbın kullanılmadığı duruma göre neredeyse 50 C°'lik artış göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, [Moustafa vd. \(2015\)](#); [Wang ve Nied \(1999\)](#)'in elde ettiği sonuçlarla benzerdir. Kalıp malzemesinin iletkenliğinin yüksek olması ve ısıtılmış polimer levhanın her noktasında eş sıcaklık verilerine sahip olması daha düzgün bir kalınlık dağılımına imkan tanımaktadır. Bu çalışmada ise, erkek kalıp malzemesinin iletkenliği yüksek bir malzeme olan çelik seçilmesi daha iyi bir kalınlık dağılımını desteklemekte, ancak ısıtılmış termoplastik filmin sıcaklık dağılımının farklı olması kalınlık değişimini olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 17'de, 156.4 C°'de ısıtma işlemi yapılan numunelerde özellikle numune tabanının yüzeyinde meydana gelen değişimler, farklı büyütme oranlarıyla (10x, 20x) verilmiştir.



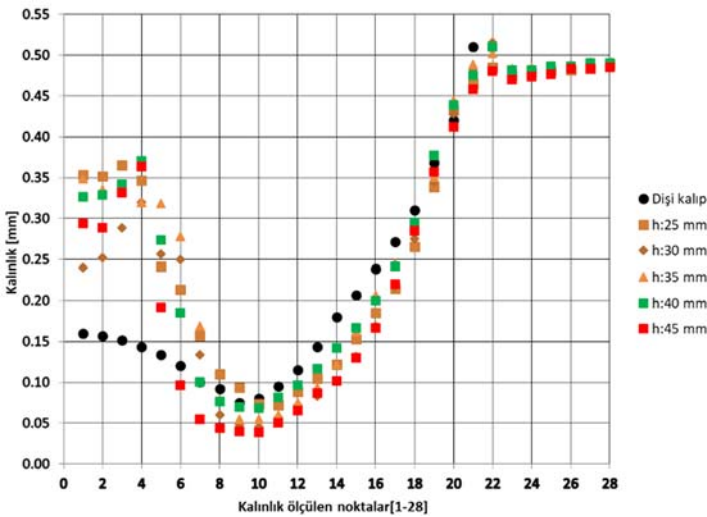
◀ **Şekil 17.** 1-2. Isıtma işlemi öncesi filmin yüzey görüntüleri (20x), 3-4. Sadece diş kalıbı ile ısıtma işlemi yapılan numunenin tabanından alınan görüntüler (20x), 5-6. 50 mm çaplı erkek kalıp kullanılarak ısıtma işlemi yapılan numunenin tabanına erkek kalıbın temas ettiği farklı iki noktadan alınan görüntüler (10x).

Şekil 18 ve 19’da, erkek kalıbın çapındaki artış özellikle numunelerin merkezindeki kalınlık değerlerini artırmıştır. Özellikle 8. noktaya kadar olan bölümde, erkek kalıp kullanılarak elde edilen ısıllı şekillendirilmiş numunelerin kalınlık değerleri, erkek kalıp kullanılmadan ısıllı şekillendirilenlerden daha yüksektir. Buda numunenin taban merkezindeki (1. nokta) ve tabanındaki (1-10. noktalar) kalınlığın erkek kalıp kullanımıyla arttığını doğrulamaktadır. Değişken dalma derinliği ve değişken çap uygulaması dikkate alındığında her iki senaryo içinde minimum kalınlık oluşumu 10. noktada gerçekleşmiştir. Ek olarak erkek kalıp kullanılarak ısıllı şekillendirilen numunelerin neredeyse tümünde ölçülen en düşük kalınlık değeri, erkek kalıp kullanılmadan ısıllı şekillendirilen numunelerinkinden daha düşük olmuştur. Yine erkek kalıp kullanımı her iki senaryo içinde numunelerin yan duvar kalınlıklarını dışı kalıpla ısıllı şekillendirilen numunelerinkine göre azaltmıştır (10-22. noktalar). Numune üst kenarında (23-28. noktalar) ise kalınlık dağılımı erkek kalıp kullanımından

etkilenmemiştir. Her iki senaryo için 21 ve 22. noktalarda kalınlık değerlerinde ani artışlar olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni bu bölgedeki yarıçap üzerinde kısmi katlanmaların oluşmasıdır. Ek olarak, özellikle Ø45 ve Ø50 mm ölçüsündeki erkek kalıp ile ısıllı şekillendirilen numunelerde 4. ve 8. noktalar arasında kalınlık azalması beklenirken artış olmuştur. Bunun nedeni ise daha önce de bahsedilen yüksek ısıllı şekillendirme sıcaklığı nedeniyle ısıtılan PVC filmin aşırı sarkması ve vakum etkisinde hızla şekil değiştirerek katlanmanın oluşmasıdır. Bu etki, değişken dalma derinliği için yapılan ısıllı şekillendirilmiş numunelerde görülmemektedir. Elde edilen veriler, Morales vd. (2014), ve Chen vd. (2008)’in sonuçlarıyla karşılaştırıldığında kalınlık dağılımını etkileyen unsurların aynı değişimi gösterdiği saptanmıştır. Özellikle kalıp malzemesi, boyutları ve dalma derinliğinin ısıllı şekillendirilen ürünün yan duvar kalınlıklarını değiştirdiği belirtilmiştir ve deneysel çalışmayı destekler niteliktedir.



◀ Şekil 18. Erkek kalıp çapının artırılması ile ısıllı şekillendirilen konik numunelerin karşılaştırılmalı kalınlık dağılımları



◀ Şekil 19. Erkek kalıp dalma derinliğinin artırılması ile ısıllı şekillendirilen konik numunelerin karşılaştırılmalı kalınlık dağılımları

4. Tartışma ve Sonuçlar

PVC'nin ısıllı şekillendirilmesinde, erkek kalıp kullanımının, numunelerin özellikle taban merkezindeki ve yan duvar kalınlığını değiştirdiği belirlenmiştir. Ancak numunelerde oluşan en dūřuk kalınlık değerinde kayda değer bir değişim gōrūlmemiřtir. Artan erkek kalıp çapı ve dalma derinliği ile numunelerin ısıllı şekillendirme sıcaklığı da artmıştır. Yaklaşık 50 C°'lik bir sıcaklık farkı ile PVC film malzeme ısıllı şekillendirilebilmiştir. Bunu mōmkūn kılan ise PVC'nin zincir dizilişine gōre amorf yapıda bir mōhendislik termoplastiği olmasıdır. Kalınlık dağılımını en çok etkileyen unsurlardan biri de; oda sıcaklığındaki elik erkek kalıbın sıcak film malzemeye temas ettiğinde ani soğumaya ve katılaşmaya neden olmasıdır. ısıllı şekillendirme öncesi film sıcaklık dağılımının da yer yer farklılık gōstermesi kalınlık dağılımına etki eden unsurlardanıdır. Elde edilen termal gōrūntüler, ısıtılmış film üzerindeki sıcaklık dağılımının her noktada farklı olabileceğini ortaya koymuştur. ısıtılan PVC film üzerinde birbirine dik doğrultularda yapılan sıcaklık dağılımı karşılaştırmasında bazı noktalarda 20 C°'yi bulan sıcaklık farkları tespit edilmiştir. Buna ek olarak erkek kalıp kullanımı ısıllı şekillendirilen numunenin yūzeyinde değişimlere yol açmıştır. Özellikle elik malzemeden imal edilen erkek kalıbın ısıllı şekillendirilen numuneye temas ettiği bōlgelerde mikron mertebesinde boşlukların oluştuğu tespit edilmiştir. PVC malzeme, amorf yapıda bir termoplastik olmasından dolayı gıda ambalajlama başta olmak üzere kaplanabilmekte ve farklı sektōrlerde kullanım alanı bulabilmektedir. Ek olarak, amorf yapıda olan diğer ısıllı şekillendirilebilen Polistiren (PS), Akrilonitril Būtadien Stiren (ABS), Polimetil Metakrilat (PMMA) ve Polikarbonat (PC) gibi farklı özellikleri olan termoplastikler de uygun ısıllı şekillendirme sıcaklığında benzer deformasyon özellikleri gōsterir. Ancak yarı kristalin yapıdaki Polipropilen (PP) ve Polietilen (PE) gibi ısıllı şekillendirme sıcaklık aralığı oldukça dar olan plastikler, PVC ile aynı deformasyon davranışını gōstermez.

Kaynaklar

- Barry, C.M.F., Baker, A-M. ve Mead, J.L., 2006. Introduction to Polymers and Plastics, in: Harper, C.A. (Eds.), Handbook of Plastics Technologies. McGraw-Hill Companies, New York.
- Crawford, R.J., 1998. Plastic Engineering: Oxford, Butterworth-Heinemann, 306-309 pp.

- Chen, S-C., Huang, S-T., Lin, M-C. ve Chien, R-D., 2008. Study on the Thermoforming of PC Films Used for In-Mold Decoration. International Communications in Heat and Mass Transfer, 35, 967-973.
- Hosseini, H., Berdyshev, B.V. ve Mehrabani-Zeinabad, A., 2006. A Solution for Warpage in Polymeric Products by Plug-Assisted Thermoforming. European Polymer Journal, 42, 1588-1600.
- Morales, R.A., Candal, M.V., Santana, O.O., Gordillo, A. ve Salazar, R., 2014. Effect of the Thermoforming Process Variables on the Sheet Friction Coefficient. Materials and Design, 53, 1097-1103.
- Moustafa, M., Dotchev, K., Wells, S., Bennett, N. ve Cawkell, J., 2015. Investigation of Thermoforming Tool Design and Pocket Quality. Journal of Thermal Engineering, 1, 670-676.
- O'Connor, C.P.J., Martin, P.J., Sweeney, J., Menary, G., Caton-Rose, P. ve Spencer, P.E., 2013. Simulation of the Plug-Assisted Thermoforming of Polypropylene Using a Large Strain Thermally Coupled Constitutive Model. Journal of Materials Processing Technology, 213, 1836-1843.
- Penix, J.A., 1991. Thermoforming of Plastic Film and Sheet, in: Berins, M.L. (Eds.), SPI Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc. Van Nostrand, New York, p. 383.
- Pribble, W.I., 2013. Introduction to Plastics Processing, in: DuBois, J.H., Pribble, W.I. (Eds.), Plastic Mold Engineering Handbook. Springer-Verlag, New York.
- Rosato, D. ve Rosato, D., 2004. Reinforced Plastics Handbook: Amsterdam, Elsevier, 1-18 pp.
- Rosato, D.V., Rosato, M.G. ve Schott, N.R., 2001. Plastics Institute of America Plastics Engineering, Manufacturing & Data Handbook: New York, Springer-Verlag.
- Schwarzman, P. ve Illig, A., 2018. Thermoforming A Practical Guide: Munich, Hanser.
- Throne, J.L., 1996. Technology of Thermoforming: Munich, Hanser.
- Wang, C-H. ve Nied, H.F., 1999. Temperature Optimization for Improved Thickness Control in Thermoforming. Journal of Materials Processing and Manufacturing Science, 8, 113-126.