

## VAKUM VE ISI İLE ŞEKİL VERİLEN BİR ÜRÜNDE KARŞILAŞTIRMALI KALINLIK DAĞILIMI TESPİTİ

Olca EKŞİ<sup>1</sup>, Selçuk ERDOĞAN<sup>2</sup>

### ÖZET

Bu çalışmada, vakum ve ısı ile şekil verilen bir ürünün kalınlık dağılımı tespiti karşılaştırmalı olarak belirlenmiştir. Ürün kalınlık dağılımı ilkin proses simülasyonu vasıtasıyla icra edilmiştir. Buna ek olarak, Alansal Çekme Oranı(Areal Draw Ratio) kullanılarak ürün kalınlık profili oluşturulmuştur. Elde edilen iki farklı kalınlık dağılımı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Üretim süreci simülasyonu, kullanılan polimer malzeme özelliklerini ve proses parametrelerini içermekte buna karşın Alansal Çekme Oranı(A.D.R.) ile kalınlık tespiti malzeme özelliklerinden bağımsız sadece kalıp veya ürün geometrisine göre sonuç vermektedir. Sonuç olarak; Alansal Çekme Oranı ile tespit edilen kalınlık dağılımı simülasyon vasıtasıyla elde edilen kalınlık dağılımıyla farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Ancak her iki metot ile elde edilen en ince cidar kalınlık değeri aynı noktalar arasını göstermektedir. Alansal Çekme Oranının, hassas bir kalınlık dağılımı ifadesinin oluşturulmasında değil ürünün en ince ya da en zayıf olduğu noktanın tespitinde kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** alansal çekme oranı(areal draw ratio), vakum ve ısı ile şekil verme prosesi, simülasyon.

### COMPARATIVE THERMOFORMED PRODUCT THICKNESS DETERMINATION

#### ABSTRACT

In this study, wall thickness distribution in a thermoformed product was determined comparatively. Firstly thickness distribution was achieved by a thermoforming simulation. In addition to this, thickness profile was created by using Areal Draw Ratio. Obtained two distinct thickness distributions were analysed comparatively. Thermoforming simulation in this study uses thermoformed polymer material properties and process parameters. In contrast, Areal Draw Ratio which is independent of polymer properties and thermoforming process parameters, only works according to product or thermoforming mould geometry. As a result, wall thickness distribution profiles obtained by Areal Draw Ratio show slightly agreement to results obtained by thermoforming simulation. But the weakest point or the thinnest area of the thermoformed product was determined accurately according to both methods. It is apparent that to employ Areal Draw Ratio is not appropriate for determination of thickness distribution precisely.

**Keywords:** areal draw ratio, thermoforming, simulation.

---

<sup>1</sup> Araştırma Görevlisi, Namık Kemal Üniversitesi, oeksi@nku.edu.tr

<sup>2</sup> Yardımcı Doçent Doktor, Trakya Üniversitesi, eselcuk@trakya.edu.tr

## GİRİŞ

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesi, geniş yüzeyli kalın ve büyük parçaların üretiminde kullanıldığı gibi ince polimer film malzemelerinde işlenmesine olanak sağlar. Düşük kalıp maliyeti, düşük çevrim zamanı gibi avantajlarının yanında kompleks şekilli ürün imalatının zorluğu, eşit kalınlık dağılımına sahip ürünlerin elde edilememesi vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin artıları ve eksileri olarak sayılabilir. Günümüzde birçok sektörde kendine uygulama alanı bulmuş olan proses, en çok otomotiv ve ambalaj sektörlerinde kullanılmaktadır.

Vakum ve ısı ile şekil verme sürecinin proses parametrelerinin belirlenmesi ve üretilmek istenen üründeki cidar kalınlık dağılımının etkin bir şekilde tespit edilebilmesi için Süreç Gerçekleşmesi(Üretim Yöntemi Simülasyonu) oldukça sık kullanılan bir metottur. Bu yöntemle daha üretim öncesinde oluşabilecek hata ve kusurların engellenmesi sağlanır. Üründe daha düzgün kalınlık dağılımının elde edilmesi için kalıp geometrisi, polimer levha kalınlığı, polimer türü, polimer levha sıcaklığı, vakumlama hızı, vakum değeri, ürün geometrisi vb. parametrelerin değişimi sağlanarak en uygun süreç değişkenleri belirlenir.

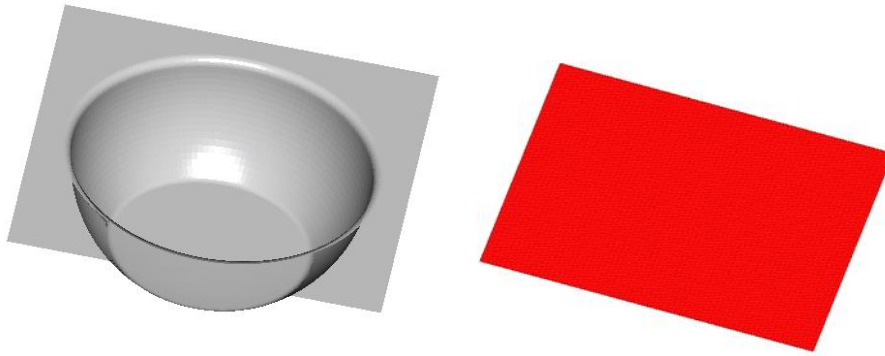
McCool ve diğerleri(McCool, 2006), ABAQUS yazılımını kullanarak kalıbın ve HIPS(High Impact Polystyrene) polimer malzemenin katı modelini oluşturup uygun malzeme modelini seçtikten sonra izotermal sıcak dağılımı için vakum ve ısı ile şekil verme sürecini simüle etmişlerdir. Ürün kalınlık dağılımına en çok etki eden unsurun ön şekil verme aparatı ile polimer levha arasındaki katsayı olarak belirlemişlerdir. Taylor ve diğerleri(Taylor, 1991), dikdörtgen geometrili bir kalıbın katı modelini oluşturmuş, üretim süreci değişkenlerinin nihai cidar kalınlık dağılımı üzerine etkisini bir proses gerçekleştirme yöntemiyle incelemiştir. Taylor ve diğerleri, nihai ürün kalınlık dağılımına etki eden en önemli faktör olarak kalıp geometrisi olarak göstermiştir. Warby ve diğerleri(Warby, 2003), belirli bir kalıp geometrisi için sonlu elemanlar yazılımı ile vakum ve ısı ile şekil verme operasyonunun simülasyonunu icra etmiştir. Farklı şekil verme basınçlarında mevcut kalıp geometrisi için minimum cidar kalınlıkları tespit edilmiş ve şekil verme basıncının artması sonrasında en küçük cidar kalınlığı değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Xu ve diğerleri(Xu, 1999), FEM yazılımı olan Abaqus ve T-SIM kullanarak parçanın boyutlarındaki büzülme, gerilme dağılımı, ürün cidar kalınlık dağılımı analizlerini yapmıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak parça büzülmesini ifade eden bir analitik model oluşturulmuştur. Sonrasında simülasyon sonuçlarıyla analitik model sonuçları karşılaştırılmıştır. Netice olarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle elde edilen bir parçada meydana gelen büzülme miktarının, kalıp içerisindeki soğutucu akışkan sıcaklığına ve polimer levhayı ısıtan fırın içerisindeki koşullara bağlı olduğu tespit edilmiştir. Willems ve diğerleri(Willems, 2008), dokuma cam elyaf takviyeli PP kompozit levhaları, çift kürel kalıp tertibatı ile derin çekme işlemine tabi tutmuş, sonrasında mevcut kalıp tertibatı geometrik olarak tanımlandıktan sonra şekil verme gerçekleştirmesini bir FEM yazılımı olan Abaqus/Explicit ile gerçekleştirmiştir. Kaydedilen kayma açısı değerleri, her iki deneysel çalışma ve gerçekleştirme sonuçlarından alınmıştır. Yapılan karşılaştırma sonrasında kayma açısı değerlerinin her iki durum içinde birbiri ile eşleştiği vurgulanmıştır. Kalıbın sahip olduğu radüslerin büyük değerde olması, simetrik yükleme koşulları, polimer malzemede şekil verme işlemi sırasında katlanma, buruşma ve kırışma meydana gelmemesi bu sonuçları destekleyen unsurlar olarak belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise; vakum ve ısı ile şekil verilmiş bir ürün olan "çanak" adlı parça için T-SIM vakum ve ısı ile şekil verme simülasyon yazılımı kullanılarak kalınlık dağılımı belirlenmiştir. Çanakta farklı kesitler alınarak bu kesitlerdeki cidar kalınlık dağılımı Alansal Çekme Oranı vasıtasıyla da hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafik yöntemle incelenmiştir.

## YÖNTEM

T-SIM yazılımı kullanılarak icra edilen proses gerçekleştirilmesinde tek kalıp yani dişi kalıp kullanılmış(Negative Forming), levha malzeme boyutları 200x200 mm<sup>2</sup> seçilmiştir. DOW Material "Magnum 500" (Mass ABS for sheet thermoforming) ticari adıyla verilen levha malzeme için şekil verme

sıcaklığı 160 °C ve ilk kalınlık değeri 3 mm olarak belirlenmiştir. Şekil verme sıcaklığında malzemenin şekil değiştirme davranışı K-BKZ WAGNER I malzeme modeliyle tanımlanmıştır. Şekil verme sıcaklığında basıncın zamanla değişimi doğrusaldır. 500 ms'lik zaman içinde 300 kPa pozitif basınç oluşumu hedeflenmiştir. Kullanılan takımın sürtünme katsayısı "1" olarak verilmiştir. Bu koşul; şekil değiştirme esnasında kalıp yüzeyine temas eden polimer levhanın sertleşerek katılaşp rijit bir hal aldığı, daha sonra kalıp yüzeyi üzerinde kaymadığını ve gerdirmeye sonrasında incelmediğini ifade etmektedir. K-BKZ (Kaye-Bernstein, Kearsley, Zapas) Wagner I malzeme modeli zamana bağlı lineer olmayan viskoelastik(Non-linear viscoelastic) şekil değişimini temsil etmektedir(Wagner, 1990). Simülasyon içerisinde malzeme modelinin tanımlı hale gelebilmesi için gerekli katsayılar; farklı deformasyon oranlarıyla icra edilen tek eksenli çekme deneyleri sonunda tespit edilmiş ve sürece dâhil edilmiştir. Şekil 1 simülasyonda kullanılan takımın katı modelini göstermektedir. Çanak üzerinde x=0, y=0 doğrultularında kesit alınarak ürün kalınlık dağılımı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3 alınan kesitleri ve doğrultularını buna ek olarak ürün kalınlık dağılımını göstermektedir.



Şekil 1: T-SIM yazılımıyla gerçekleştirilen simülasyonda kullanılan soldan sağa kalıp geometrisi ve ABS polimer levha.

#### ALANSAL ÇEKME ORANI İLE KALINLIK DAĞILIMININ HESAPLANMASI

Alansal Çekme Oranı(Areal Draw Ratio) vakum ve ısı ile şekil verme prosesi öncesinde üretilmek istenen ürünün kalınlık değerinin ne kadar azalacağını pratik olarak ortaya koyan bir öngörüdür. Hesaplama tamamen hacim dengesine dayanır. Şekil verme öncesinde polimer levhanın hacmi ile şekil verme sonrasındaki hacminin birbirine eşit olması temeline dayanarak Alansal Çekme Oranı hesaplanır. Başlangıçta  $A_0$  yüzey alanına( $\text{mm}^2$ ),  $t_0$  kalınlığına(mm) sahip polimer levha; şekil verme işleminden sonra  $A_d$  yüzey alanına( $\text{mm}^2$ ) ve  $t_d$  kalınlığına(mm) sahip olsun(Throne, 1987 - Throne, 1996 – Throne, 2008 - Klein, 2009 – Crawford, 1998 – Osswald, 1998);

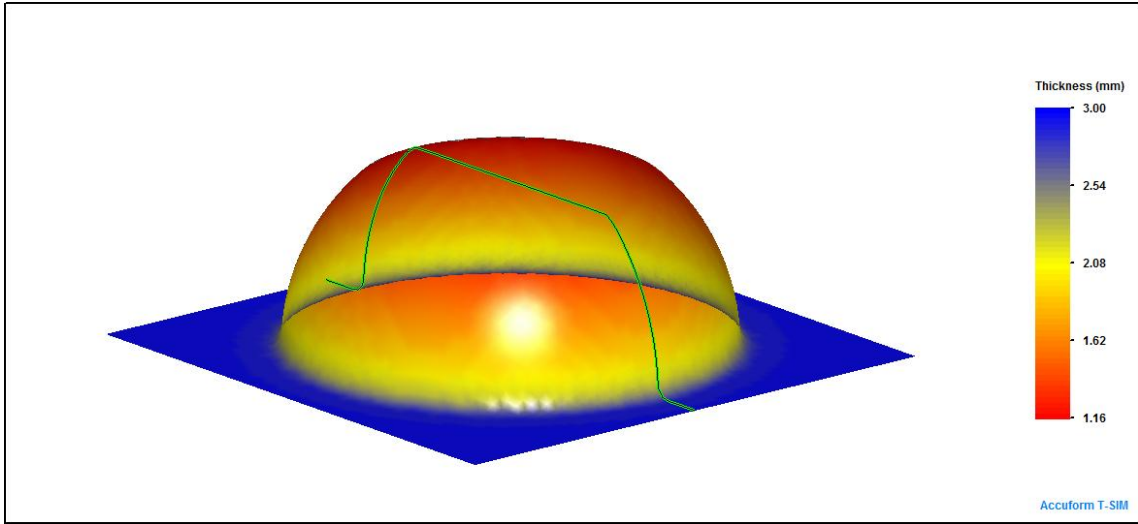
$$A_0 \cdot t_0 = A_d \cdot t_d \quad (1)$$

$$t_d = (A_0 \cdot t_0) / A_d \quad (2)$$

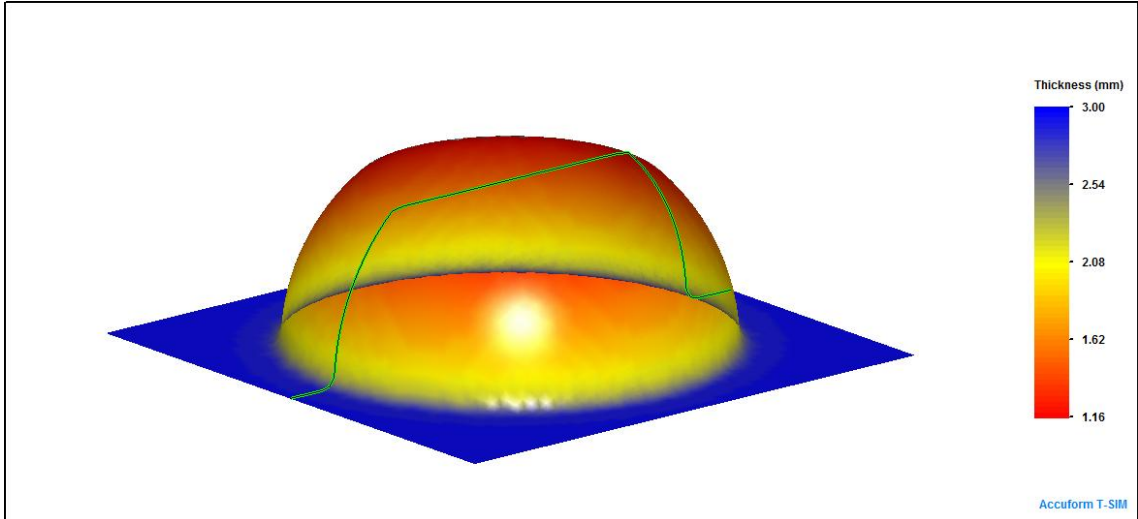
Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılarak şekil verilen yarı mamuldeki cidar kalınlığı değişimi hesaplanabilir. Eğer polimer levhanın kademeli deformasyonu ve o anki yüzey alanı tespit edilirse; o noktalar için cidar kalınlık dağılımı oluşturulabilir. Alansal Çekme Oranı ile tespit edilen ürün kalınlık dağılımının tespit edilmesi için çanağın katı modeli DXF formatında, Solidworks yazılımı içerisine dâhil edilmiştir. \*.sldprt formatına dönüştürülerek yüzey modeli oluşturulan çanağın kademeli şekil değişimi adım adım oluşturulmuş ve her adımdaki yüzey alanı belirlenmiştir. Buna göre Alansal Çekme Oranı kullanılarak cidar kalınlık dağılımı tespit edilmiş ve simülasyon sonucu elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4'te Alansal Çekme Oranı kullanılarak oluşturulan çanak adlı parçanın yüzey modelinin yarısı ve kalınlıkları tespit edilen noktalar verilmiştir. Karşılaştırma 29 farklı noktadaki kalınlık değeri için uygulanmıştır.

## SONUÇLAR

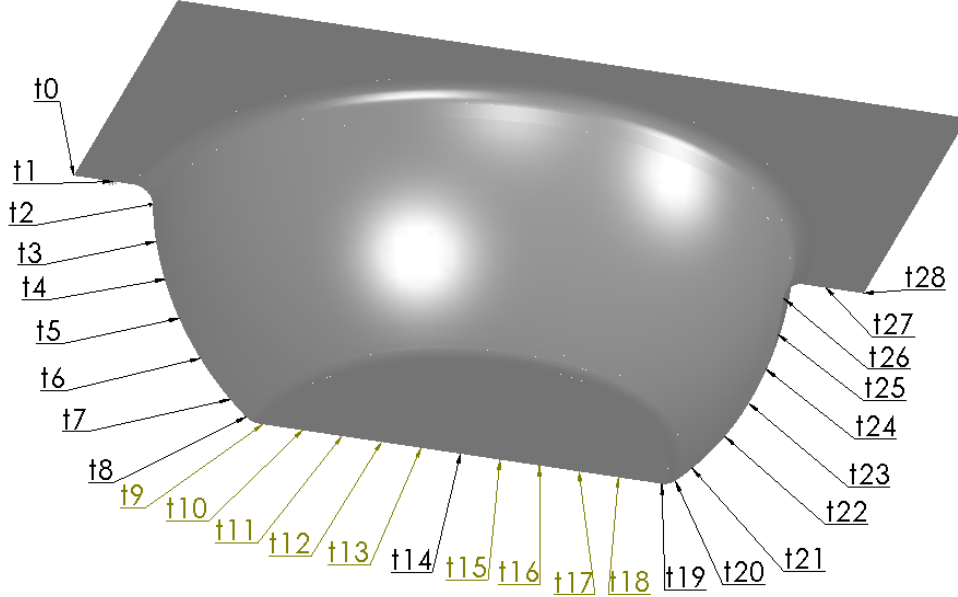
Çanak adlı parça üzerinde iki farklı doğrultuda alınan kesit üzerindeki kalınlık dağılımı Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 2 ve 3 ortaya koymaktadır ki; çanak adlı parça üzerinde oluşan en ince kalınlık değeri, polimer levhanın deformasyon sırasında kalıp yüzeyine en son temas ettiği noktada oluşmuştur. Bu değer; simülasyon sonucuna göre  $x=0$  doğrultusunda alınan kesitte, 1.171 mm olarak,  $y=0$  doğrultusunda alınan kesitte, 1.173 mm olarak tespit edilmiştir.  $x=0$  ve  $y=0$  doğrultularında tespit edilen en ince kalınlık değerleri arasındaki 0.002 mm değerindeki fark ihmal edilebilir düzeydedir. Alansal Çekme Oranı ile tespit edilen en zayıf nokta da simülasyon sonuçlarıyla belirlenen noktanın aynıdır. Bu yöntemle tespit edilen en ince kalınlık değeri, 1.685 mm'dir. Bu da vakum ve ısı ile şekil verilen çanak adlı parçanın en zayıf noktasındaki kalınlık değerinin  $x=0$  doğrultusundaki sonuca nazaran 0.514 mm,  $y=0$  doğrultusundaki sonuca göre ise 0.512 mm'lik bir fark ile tespiti anlamına gelmektedir. Parça üzerinde kalınlık değerleri tespit edilen noktalar Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 5'te ise ürün kalınlık dağılımlarının her iki metotla karşılaştırmalı incelemesi grafik yöntemle verilmiştir.



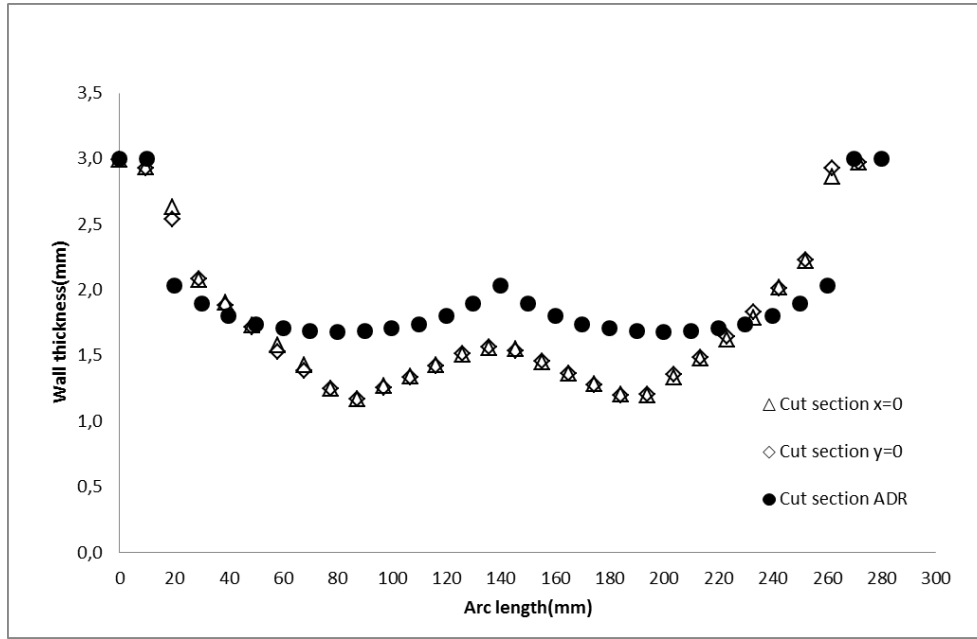
Şekil 2: Çanak adlı parça üzerinde alınan  $x=0$  doğrultusundaki kesit(Yeşil çizgi) ve kalınlık değişimi.



Şekil 3: Çanak adlı parça üzerinde alınan  $y=0$  doğrultusundaki kesit(Yeşil çizgi) ve kalınlık değişimi.



Şekil 4: Şekil verilen parçada kalınlığı Alansal Çekme Oranı ile tespit edilen noktalar.



Şekil 5: Çanak adlı parça üzerinde farklı doğrultularda alınan kesitlerdeki ürün kalınlık dağılımının karşılaştırmalı gösterimi.

### ÖNERİLER

Yapılan çalışma, Alansal Çekme Oranı ile tespit edilen kalınlık profilinin simülasyon sonuçlarıyla farklı olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 2-3 ve 5'ten de görüleceği üzere bu yöntemin, ürün kalınlık dağılımının tespitinden daha çok üründe en zayıf noktanın yani en ince kalınlık değerinin olduğu noktanın tespitinde kullanılması daha makul sonuçlar ortaya koyacaktır.

### KAYNAKÇA

Crawford, R. J.(1998). *Plastics Engineering*. Third Edition, Oxford:Butterworth-Heinemann.  
Klein, P. W. (2009). *Fundamentals of Plastics Thermoforming*. USA:Morgan&Claypool Publishers.

- McCool, R., Martin, P.J. ve Harkin-Jones, E. (2006). Process modeling for control of product wall thickness in thermoforming. *Plastics, Rubber and Composites*, 35(8), 340-347.
- Osswald, T.A. (1998). *Polymer Processing Fundamentals*. USA:Hanser/Gardner Publications.
- Taylor, C.A., DeLorenzi, H.G. ve Kazmer, D.O. (1991). Experimental and Numerical Investigations of the Vacuum Forming Process. *The Winter Annual Meeting of ASME(WAM), New York Kongresine Sunulmuş Bildiri*.
- Throne, J. L. (1987). *Thermoforming*. Munich:Hanser Publishers.
- Throne, J. L. (1996). *Technology of Thermoforming*. USA:Hanser/Gardner Publications, Inc.
- Throne, J. L. (2008). *Understanding Thermoforming*. USA:Hanser/Gardner Publications, Inc.
- Wagner, M.H. ve [Demarmels A.](#) (1990). [A constitutive analysis of extensional flows of polyisobutylene](#). *Journal of Rheology*, 34(6), 943/958.
- Warby, M.K., Whiteman, J.R., Jiang, W.G., Warwick, P. ve Wright, T. (2003). Finite element simulation of thermoforming processes for polymer sheets. *Mathematics and Computers in Simulation*, 61(3-6), 209-218.
- Willems, A., Lomov, S.V., Verpoest, I., Vandepitte, D., Harrison, P. ve Yu, W.R. (2008). Forming simulation of a thermoplastic commingled woven textile on a double dome, *International Journal of Material Forming*, 1(1), 965-968.
- Xu, H., Wysocki, J., Kazmer, D., Bristow, P., Landa, B., Riello, J., Messina, C., Marrey, R. (1999). Shrinkage study of thermoformed parts. *The Annual Technical Conference of The Society of Plastics Engineers Kongresine Sunulmuş Bildiri*.