KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİFENİLEN SÜLFİT REÇİNELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİT MALZEMEDEN TERMOFORMING YÖNTEMİYLE HÜCUM KENARI (LEADING EDGE) UÇAK YAPISAL PARÇASI ÜRETİMİNE YÖNELİK SİMULASYON VE DENEYSEL ANALİZ YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Osman Kaykusuz¹ AYBU, Ankara Mete Bakır² AYBU/TUSAŞ, Ankara

Fahrettin Öztürk³ AYBU/TUSAŞ, Ankara

ÖZET

Endüstrinin her alanında maliyet düşürme, üretimi kolaylaştırma ve geri dönüşümü sağlama çalışmaları yoğun ilgi görmektedir. Bu durum, havacılıkta kompozit malzemelerin kullanımı açısından değerlendirildiğinde; geri dönüşüm, yüksek sertlik, termoset kompozitlere göre imalat süreçlerinin oldukça kısa olması gibi birçok avantaja sahip olan termoplastik kompozit malzemeleri ön plana çıkartmaktadır. Son yıllarda havacılık endüstrisinde termoplastik kompozit malzemeler kullanılarak üretilen parçalarda hızlı artış görülmektedir. Termoplastik kompozit malzemeden parça üretim yöntemlerinin en önemlilerinden birisi de termoform (ısıl şekillendirme) yöntemidir. Bu çalışmada, bir uçak parçasının termoplastik malzemeden termoform yöntemiyle üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim analizleri LS-DYNA programı kullanılarak yapılmıştır. Fabrik malzeme, MAT_234 malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Kompozit malzeme, COMPOSITE_LONG kartı kullanılarak matris ve fabrik entegrasyon noktaları ile tanımlanmıştır. Analizler sonucunda yüzeysel tutucuların yaylı tutuculara göre kırışıklık oluşumunu önemli ölçüde azaltığı gözlemlenmiştir. Kompozitin istenilen kalitede şekillenmesi için gerekli olan kalıp sıcaklığı ve tutucu kuvveti tespit edilmiştir. Ayrıca fiber oryantasyonları ve maksimum gerilme bölgeleri de belirlenmiştir.

GIRİŞ

Son yıllarda havacılık sektöründe termoplastik kompozit malzemelere ilgi artmıştır. Bu malzemeler, kaynaklanabilme özelliğinden dolayı daha dayanıklı tek parça üretimi ve geri dönüşebilme özelliği sayesinde uzun yıllar kullanılabilir olması gibi çok önemli avantajlara sahiptirler. Termoplastik kompozit malzemelere artan talep, üretim süreçlerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda ürün kalitesini ve ömrünü önemli derecede etkileyen imalat hatalarının engellenebilmesi icin, proses parametrelerinin malzemeye göre belirlenmesi ve simülasyonlar yapılarak en hızlı sekilde imalat kalıplarının geliştirilmesi gereklidir. Termoplastik kompozit malzemeden parça üreten üretim yöntemlerinden biri olan termoform (ısıl şekillendirme) yöntemi düşük işlem döngüsü süresi ve karmaşık parçaların daha kolay üretilebilmesi nedeniyle bazı sektörlerde sık tercih edilen bir üretim yöntemi olmasına karşın, özellikle parça doğruluğunun üst düzeyde olduğu havacılık sektöründe henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu yöntem fiber oryantasyonları, malzeme davranışı, proses sıcaklığı, kalıp sıcaklığı gibi birçok parametreden etkilenmektedir [Tabiei, Murugesan, 2015]. Ayrıca eğrilik yarıçapı, çekme derinliği ve yüzey sürtünmesi de imalat sırasında dikkate alınması gereken kritik değişkenler olarak sayılabilir [Stack, Lai, 2013]. Dolayısıyla proses sonucunda kırışıklık, istenmeyen fiber oryantasyonları ve şekilsel bozulmalar gibi ürün kalitesini önemli ölçüde etkileyen imalat hataları oluşmaktadır. İlk olarak, pahalı ve uzun süreli deneysel yaklaşım yerine sonlu elemanlar analizleri ile imalatta oluşan bu hatalar tahmin edilebilmektedir. Düzlem içi deformasyonun kayma sınırını aşan bazı bölgelerinde gerçekleşen kırışıklık en önemli

¹Mak. Müh., E-posta: osman.kaykusuz@gmail.com

²Öğr. Gör. Dr., E-posta: mete.bakir@tai.com.tr

³Prof. Dr., E-posta: fahrettin.ozturk@tai.com.tr

ve yaygın olarak görülen imalat hatasıdır [Zhu, Yu, Zhang, Tao, 2011]. Kırışıklığın belirlenmesi ve deformasyonlar için literatürde yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Guzman-Maldonado ve arkadaşları [Guzman-Maldonado, Hamilia, Naouar, Moulin, Boisse, 2016] kayma açılarının kırışıklık oluşumu üzerine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma sonucunda sonlu elemanlar ile yapılan simülasyonlar deneysel olarak doğrulanmış ve kırışıklık oluşumunun düzlem içi kayma mekanizmasına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Breuer ve arkadaşları [Breuer, Neitzel, Ketzer, Reinicke, 1996] termoplastik kompozitlerin derin çekme prosesi sırasındaki kırışıklık oluşumunu ve bunu azaltmanın yollarını araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda yüzeysel tutucular aracılığıyla sağlanan büyük membran gerilmelerinin, yüksek kayma açılarındayken bile kırışıklık oluşumunu önlediği ortaya konulmuştur. Luca ve arkadaşları [Luca, Lefebure,Pickett, 1997] tek yönlü (uni-directional) ve dokuma (woven) termoplastik kompozitlerin presle şekillendirme işlemi için bazı parametrelerin etkilerini hem deneysel hem de nümerik olarak incelemişlerdir. Yüzeysel tutucu kullanımın çekme yükleme alanını artırmasından dolayı kırışıklığı azalttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, presin basma hızının azalmasının tabakalar arası ve tabaka içi kırışıklık oluşumunu azaltacağını göstermişlerdir.

Bu çalışmada ilk olarak ısıl şekillendirme prosesi, kırışıklık oluşumuna neden olan düzlem içi kayma mekanizması ve analizlerde kullanılan fabrik malzeme modeli incelenmiştir.

Termoform (Isıl Şekillendirme) Yöntemi

Isil şekillendirme işlemi sırasında kompozit malzemenin yapısal davranışı, malzeme ve proses parametrelerine ve ilgili deformasyon mekanizmalarına bağlıdır. Temel olarak, termoplastik emdirilmiş kompozit plakayı ısı ve basınç kullanarak şekillendirmeyi sağlayan bu metot, Şekil 1'de gösterilen beş ana adımı izler. Termoplastik kompozit istenilen geometri ve boyutlarda kesildikten sonra, tutucuya bağlanır [Liu, Zhang, Xu, Ye, 2018]. Sabitlenmiş kompozit, ön ısıtma işlemi için, kompozit içinde kullanılan termoplastiğin erime noktasının biraz üzerinde bir sıcaklığa kadar ısıtılır [Gardiner, 2006]. Isıtılmış levha, sıcaklık kontrollü ve ısıtılmış kalıpların olduğu sisteme hızlı bir şekilde aktarılır. Daha sonra, oluşturulan tabakaya pres ve kalıp aracılığıyla kontrollü olarak basınç uygulanır ve şekillendirme işlemi gerçekleştirilir. Son olarak, ısıyla şekillendirilmiş parça kalıptan çıkarılır ve kontrol, kesme gibi bitirme işlemleri gerçekleştirilir. İşlem basamaklarından görüleceği üzere proses kalitesini etkileyen bir çok parametre vardır. Bu parametrelerin etkilerini bilmek oldukça büyük öneme sahiptir. Nihayi ürüne giden kalıp tasarımında bu parametreleri kullanarak gerekli iyileştirmeleri yapmak parça kalitesini doğrudan etkilemektedir.



Şekil 1: Termoplastik Isıl Şekillendirme Proses Adımları

Düzlem İçi Kayma Deformasyonu

Termoplastik kompozitlerin termo mekanik davranışını anlamak, termoform işlemi sırasında oluşan imalat hatalarını tahmin etmek için büyük önem taşımaktadır [Baumard, Menary, Almeida, Schmidt, Martin, Bikard, 2017]. Düzlemde kayma deformasyon mekanizması tekstil şekillendirme prosesi için büyük önem taşımaktadır. Bu mekanizma üretim adımlarını önemli ölçüde yönetir. Böylece nihai ürünün performansını, gücünü ve kalitesini de etkiler. Şekil 2'de, 2 boyutlu olarak verilen örgünün başlangıçta ve deformasyon sonrası açıları gösterilmektedir. Burada; α kayma açısını β deformasyon sonrası açıyı göstermektedir.



Şekil 2: 2D Örgü Gösterimi; (a) Başlangıç, (b) Deformasyon Sonrası

Kayma açısı, şekillendirme işlemi boyunca sürekli olarak artar. Bu nedenle, iplikler birbirlerine gittikçe yaklaşırlar ve sıkışırlar. İplikler arasındaki kayma açısı, kilitleme açısı adı verilen maksimum değerine ulaştığında, düzlem dışı kırışıklık oluşur.

YÖNTEM

Fabrik Malzeme Modeli

Termoform yöntemiyle yapılan şekillendirme işlemlerinde nihai ürün kalitesi ve deformasyon büyük oranda fabrik malzemeye bağlıdır. Ivanov ve Tabiei [Ivanov, Tabiei, 2004] kuru düz dokuma kumaş malzemelerin mezo-mekanik modeli için kabuk elemanları ile kullanılmaya uygun olan MAT_234 malzeme modelini geliştirdiler. Model, çoğunlukla mezo ve mikro mekanik modeller için tercih edilen Temsili Hacim Hücresi (THH) tekniği kullanılarak geliştirilmiştir. THH, birbirinin üzerinden geçen dalgalı iki iplik içerir. Şekil 3'de THH ve parametreleri gösterilmektedir.



Şekil 3: THH ve Parametrelerinin Şematik Gösterimi [Ivanov, Tabiei, 2004]

THH karmaşık bir geometriye sahip olduğu için pim-eklem mekanizması kullanılarak basitleştirilmiş ve deformasyan anındaki davranışı daha iyi şekilde anlatılmıştır. Şekil 4'de verildiği gibi, viskolelastik çubuklarla gösterilen çözgü (warp) ve atkı (fill) iplikleri, orta noktalarından rijit bir çubukla birbirine bağlanmıştır.



Şekil 4: THH Pim-Eklem Mekanizması ve Parametreleri [Ivanov, Tabiei, 2004]

İplik kalınlığının yarısına eşit olan rijit çubuğun uzunluğu iplikler arası gerilme kuvvetlerinin dengesine göre değişir. Kafes (trellis) mekanizması yada düzlem içi dönme olarak bilinen bu mekanizmada iplikler rijit çubuk etrafında serbestçe dönebilmektedir. Ayrıca, ipliklerin çekme kuvvetlerine bağlı olarak uzaması ve düzleşmesine de imkan vermektedir. İplikler arası temastan kaynaklanan iplik deformasyonları rijit çubuğa bağlandıkları için ihmal edilir. Deformasyondan sonra, başlangıçta birbirlerine dik olan iplikler (örgü açıları 45°, -45°) kafes mekanizması kilitlenene kadar dönerler. Bu durum ipliklerin üstüste gelmesi ile oluşan kırışık hatasına yol açar. Aşağıdaki şekilde kafes mekanizması ve kilitlenme (locking) açısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5: Kafes Mekanizması (a) Başlangıçta, (b) Deformasyon Başladığında (c) Maksimum Gerginlikte (d) Kilitlenme Açısı Şematik Gösterimi [Ivanov, Tabiei, 2004]

Kafes mekanizmasının başlangıç durumuna göre minimum örgü açısı (θ_{min}) Denklem (1)'e göre hesaplanabilir:

$$\sin(2\theta_{\min}) = \frac{w}{s} \tag{1}$$

Ayrıca, kilitlenme açısı (θ_{lock}) ve maksimum örgü açısına (θ_{max}) Denklemler (2) ve (3) kullanılarak ulaşılabilir:

$$\theta_{lock} = 4\ddot{5} - \theta_{min} \tag{2}$$

$$\theta_{max} = 45^{\circ} + \theta_{lock} \tag{3}$$

Tüm malzemeler viskoelastik davranış gösterirler. MAT_234 malzeme modelinde viskoelastik davranış Kelvin-Voight elemanı ve sönümleme içermeyen Maxwell elemanın kombinasyonu kullanılarak tanımlanmıştır. Şekil 6'da viskoelastik model ve altında elde edilen diferansiyel denklem (bkz. Denklem (4)) verilmiştir.



Şekil 6: MAT_234 İçin Viskoelastik Modelin Şematik Gösterimi [Ivanov, Tabiei, 2004]

$$(K_a + K_b)\sigma + \mu_b \dot{\sigma} = K_a K_b \varepsilon + \mu_b K_a \dot{\varepsilon} \tag{4}$$

(n+1/2) zaman adımı için gerilme ve birim deformasyon oranları Denklemler (5) ve (6) ya göre elde edilir:

$$\dot{\sigma}^{(n+1/2)} = \frac{\Delta \sigma^{(n)}}{\Delta t^{(n)}} \tag{5}$$

$$\dot{\varepsilon}^{(n+1/2)} = \frac{\Delta \varepsilon^{(n)}}{\Delta t^{(n)}} \tag{6}$$

(4) nolu denklem (n+1/2) zaman adımı için tekrar yazıldığında:

$$(K_a + K_b)\left(\sigma^{(n)} + \frac{\Delta\sigma^{(n)}}{2}\right) + \mu_b \frac{\Delta\sigma^{(n)}}{\Delta t^{(n)}} = K_a K_b \left(\varepsilon^{(n)} + \frac{\Delta\varepsilon^{(n)}}{2}\right) + \mu_b K_a \frac{\Delta\varepsilon^{(n)}}{\Delta t^{(n)}}$$
(7)

Yukarıdaki denklem düzenlendiğinde gerilme değişimi:

$$\Delta \sigma^{(n)} = \frac{2(E_1 \varepsilon^{(n)} - \sigma^{(n)}) + (E_1 + K_a \eta^{(n)}) \Delta \varepsilon^{(n)}}{1 + \eta^{(n)}}$$
(8)

Burada iplikler için fiber yönündeki statik young modülü (E₁) ve ($\eta^{(n)}$) indisi sırasıyla:

$$E_1 = \frac{K_a K_b}{K_a + K_b} \tag{9}$$

$$\eta^{(n)} = \frac{2\mu_b}{\Delta t^{(n)}(K_a + K_b)}$$
(10)

Şekil 7'de yukarıdaki şemayla atkı (fill) alttaki şema ile çözgü (warp) iplikleri için (n+1/2) ve (n+1) zaman adımlarında merkez düğüm noktaları arası denge diyagramı verilmiştir. Burada iplikler arası mesafe (span-s) ve iplik uzunlukları (L) diyagramdan elde edilen denklemler (11), (12), (13), ve (14) ile hesaplanabilir.



Şekil 7: Merkez Düğüm Noktaları Denge Diyagramı [Ivanov, Tabiei, 2004]

$$s_f^{(n+1/2)} = \Lambda_f^{(n+1/2)} s , \quad s_w^{(n+1/2)} = \Lambda_w^{(n+1/2)} s$$
(11)

$$s_f^{(n+1)} = \Lambda_f^{(n+1)} s$$
, $s_w^{(n+1)} = \Lambda_w^{(n+1)} s$ (12)

$$L_{f}^{(n+1/2)} = \sqrt{\left(\frac{s_{f}^{(n+1/2)}}{2}\right)^{2} + \left(h_{f}^{(n)} + \frac{\delta^{(n)}}{2}\right)^{2}} L_{w}^{(n+1/2)} = \sqrt{\left(\frac{s_{w}^{(n+1/2)}}{2}\right)^{2} + \left(h_{w}^{(n)} - \frac{\delta^{(n)}}{2}\right)^{2}}$$
(13)

$$L_f^{(n+1)} = \sqrt{\left(\frac{s_f^{(n+1)}}{2}\right)^2 + (h_f^{(n)} + \delta^{(n)})^2} , \ L_w^{(n+1)} = \sqrt{\left(\frac{s_w^{(n+1)}}{2}\right)^2 + (h_w^{(n)} - \delta^{(n)})^2}$$
(14)

İplikler için dikey kuvvet bileşenleri:

$$F_f = \frac{h_f^{(n)} + \delta^{(n)}/2}{L_f^{(n+1/2)}} N_f = \frac{h_f^{(n)} + \delta^{(n)}/2}{L_f^{(n+1/2)}} (\sigma_f^{(n)} + \frac{\Delta \sigma_f^{(n)}}{2}) S$$
(15)

$$F_{w} = \frac{h_{w}^{(n)} - \delta^{(n)}/2}{L_{w}^{(n+1/2)}} N_{w} = \frac{h_{w}^{(n)} - \delta^{(n)}/2}{L_{w}^{(n+1/2)}} (\sigma_{w}^{(n)} + \frac{\Delta \sigma_{w}^{(n)}}{2}) S$$
(16)

Burada iplik kesit alanı "S" ile ifade edilmiştir. Denge durumunda:

$$2F_f = 2F_w \tag{17}$$

Her iki iplik için de birim deformasyon değişimi Denklem (18) ile hesaplanabilir:

$$\Delta \varepsilon_f^{(n)} = \frac{L_f^{(n+1)} - L_f^{(n)}}{L}, \ \Delta \varepsilon_w^{(n)} = \frac{L_w^{(n+1)} - L_w^{(n)}}{L}$$
(18)

Burada "L" ile ipliklerin başlangıç uzunluğu ifade edilmiştir (bkz. Denklem (19)):

$$L = \sqrt{\left(\frac{s}{2}\right)^2 + \left(\frac{t}{4}\right)^2} \tag{19}$$

6 Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı

UHUK-2020-119

"n+1" zaman adımı için birim deformasyon ve stress değişimi sırasıyla denklemler (20) ve (21) ile hesaplanabilir:

$$\varepsilon_f^{(n+1)} = \varepsilon_f^{(n)} + \Delta \varepsilon_f^{(n)} , \quad \varepsilon_w^{(n+1)} = \varepsilon_w^{(n)} + \Delta \varepsilon_w^{(n)}$$
(20)

$$\sigma_f^{(n+1)} = \sigma_f^{(n)} + \Delta \sigma_f^{(n)} , \ \ \sigma_w^{(n+1)} = \sigma_w^{(n)} + \Delta \sigma_w^{(n)}$$
(21)

Geometri ve Setup

Yukarıda bahsedilen MAT_234 fabrik malzeme modeli kullanılarak karbon fabrik tanımlanmıştır. Burada kullanılan fabrik parametereleri [Tabiei, Murugesan, 2015] malzeme kartı sırasına göre Çizelge 1'de verilmiştir. Matris malzemesi olan Polifenilen Sülfit (PPS) MAT_004 kartı kullanılarak programa tanımlanmıştır.

No	MAT_234 Viscoelastic_Loose_Fabric							
1	MID	RO	E1	E2	G12	EU	THL	THI
	3	1.79e-06	231.0	28.0	24.0	1.5	16	45.0
2	ТА	W	s	Т	Н	S	EKA	EUA
	3.0	1.32	1.5	0.16	0.216	0.1	142.0	0.75
3	VMB	С	G23	EKB	AOPT			
	0.035	0.6	10.7	142.0	2.0			
4	Хр	Үр	Zp	A1	A2	A3		
	0.0	0.0	0.0	-1.0	1.0	0.0		
5	V1	V2	V3	D1	D2	D3		
	0.0	0.0	0.0	-1.0	-1.0	0.0		

Çizelge 1: Fabrik Malzeme Parametreleri

Yüzeysel tutucular için analiz geometrisi Şekil 8'de görüldüğü gibi kabuk elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Burada gri renkli olan dişi kalıp ve yeşil ve turuncu renkle gösterilen tutucular MAT_020_RIGID malzeme modeli ile rijit olarak programa tanımlanmıştır. Basma işlemini gerçekleştiren erkek kalıp (mavi renkli) sadece basma yönünden serbest bırakılmış diğer tüm serbestlik dereceleri kısıtlanmıştır.



Şekil 8: Yüzeysel Tutucu İçin Analiz Geometrisi

Şekil 9'da gösterildiği gibi yaylı tutucular için analiz geometrisi yine kabuk elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Yüzeysel tutucular için oluşturulan analiz geometrisine benzer şekilde gri renkli olan dişi kalıp, mavi renkli erkek kalıp ve yayların bağlanması için sisteme eklenen çerçeve MAT_020_RIGID malzeme modeli kullanılarak tanımlanmıştır. Karşılıklı yerleştirilen yaylı tutucular sisteme discrete olarak S01-SPRING_ELASTIC kartı kullanılarak tanımlanmıştır.



Şekil 9: Yaylı Tutucu İçin Analiz Geometrisi

Kompozit malzeme COMPOSITE_LONG kartı kullanılarak fabrik malzeme (MAT_234*) ve termoplastik matris (MAT_004*) entegrasyon noktaları kullanılarak tanımlanmıştır. Kabuk elemanlar kullanılarak modelleme yapıldığı için kalınlık değerleri, ilgili malzeme entegrasyon noktası için aşağıdaki şekilde verildiği gibi tanımlanmıştır.



Şekil 10: Entegrasyon Noktaları ve Karşılık Gelen Kalınlık Değerleri

UYGULAMALAR

Tutucu Etkisi

Farklı tutucular kullanılarak termoform analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 11'de görüleceği üzere sabitleyici olarak yay kullanılan analizde yüzeysel tutucu ile sabitlenen analiz sonuçlarına göre tutma bölgelerinde kırışıklık oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 11: Analiz Sonuçları; (a) Yaylı Tutucu İçin, (b) Yüzeysel Tutucu İçin

Sıcaklık Etkisi

Termoplastik matrisler camsı geçiş sıcaklığının altında katılaşmaya başlarlar ve kırılgan bir yapı sergilerler. Bu nedenle ısıl şekillendirme prosesi, kompozit malzeme bu sıcaklığın altına düşmeden tamamlanmalıdır. Yapılan analizlerde şekillendirme işleminden önce başlangıçta kompozit malzeme 310 °C'ye kadar ısıtılmış ve farklı sıcaklıklara göre ısıtılan diğer sistem bileşenlerine göre analizler (bkz. Şekil 12) yapılmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında, PPS camsı geçiş sıcaklığı 280 °C'nin üzerinde kalarak prosesi tamamlamak için, diğer sistem bileşenlerinin de 190 °C üzerinde bir sıcaklığa ısıtılması gerektiği görülmüştür.



Şekil 12: Başlangıç Isıtma Sıcaklıklarına Göre Kompozit Final Sıcaklıları; (a) 150, (b) 180, (c) 190 °C

Tutucu Kuvveti

Yüzeysel tutucu kullanılarak yapılan ısıl şekillendirme işlemlerinde uygulanan tutucu kuvveti, ürün kalitesini etkilemektedir ve bu yüzden bu kuvvetin optimum hale getirilmesi gerekmektedir. Gereğinden fazla uygulanan kuvvet malzemenin yırtılmasına neden olurken, tam tersi durumda ise istenmeyen bozukluklar oluşmasına neden olabilmektedir. Bu çalışmada yüzeysel tutucu kuvvetini belirlemek için farklı analizler yapılmış ve uygulanacak maksimum kuvvet belirlenmiştir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere 0.695 kN ve üzeri tutucu kuvvetleri malzemenin yırtılmasına neden olmaktadır.



Şekil 13: Fazla Tutucu Kuvveti Uygulanması Sonucu (a) Yırtılma Anı, (b) Yırtılma Sonrası

SONUÇ

Yapılan analizler sonucunda parça derinliğinin ve şekillendirme yarıçapının büyük öneme sahip olduğu gözlemlenmiştir. Derinlik artıkça malzemenin akması zorlaşırken kalıbın girişinde yer alan şekillendirme yarıçapının büyümesi beklenildiği gibi şekillenme kabiliyetini artırmaktadır. Analiz sonuçlarına göre yaylı tutucularla yapılan analizlerde tutma bölgelerinde kırışıklıklar gözlemlenirken yüzeysel tutucuların kırışıklık oluşumunu ciddi oranda engellediği görülmektedir. Kullanılan termoplastik PPS reçinenin camsı geçiş sıcaklığına gelmeden şekillendirme işleminin tamamlanması için, tutucular ve kalıpların en az 190 °C ve üzeri sıcaklıklara ısıtılması gerektiği, analizler sonucu belirlenmiştir. Ürün kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden biri olan maksimum tutucu kuvveti analiz çıktılarına göre hesaplanmıştır. İlerleyen zamanlarda yapılan analizler deneysel çalışmalar ile de doğrulanacaktır.

Kaynaklar

Baumard T., Menary G., Almeida O., Schmidt F., Martin P., Bikard J., 2017. Towards a coupled heating-forming simulation of the thermoforming of thermoplastic composites, (20). ESAFORM conference on Material Forming

Breuer U., Neitzel M., Ketzer V., Reinicke R., 1996. Deep drawing of fabric-reinforced thermoplastics: Wrinkle formation and their reduction, Polymer Composites, (17), s. 643-647

De Luca P., Lefebure P., Pickett A.K., 1998. Numerical and experimental investigation of some press forming parameters of two fibre reinforced thermoplastics: APC2-AS4 and PEI-CETEX, Composites: Part A, s. 101-110

Gardiner., 2006. G.CompositesWorld https://www.flexformtech.com/News/pdfs/Composites-World-Thermoformable-Composite-Panels.pdf

Guzman- Maldonado E., Hamila N., Naouar N., Moulin G., Boisse P., 2016. Simulation of thermoplastic prepreg thermoforming based on a visco-hyperelastic model and a thermal homogenization, Materials and Design, (93), s: 431-442

Ivanov I., Tabiei A., 2004. Loosely woven fabric with viscoelastic crimped fibres for ballistic impact simulations, International Journal for Numerical Methods in Engineering, (61), s.1565-1583

Liu K., Zhang B., Xu X., Ye J., 2018. Experimental characterization and analysis of fiber orientations in hemispherical thermostamping for unidirectional thermoplastic composites, International Journal of Material Forming, (12), Issue 1, s. 97-111

Stack R.M., Lai F., 2013. Development in thermoforming thermoplastic composites, Thermoforming Quarterly, (32), s.45-53

Tabaei A., Murugesan R., 2015. Thermal Structural Forming Simulation of Carbon and Glass Fiber Reinforced Plastics Composites International Journal of Composite Materials, (6), s.182-194

Zhu B., Yu T.X., Zhang H., Tao X.M., 2011. Experimental investigations of formability of commingled woven composite preform in stamping operation, Composites B, (42), s.289-295