

Merve Erdal

Yrd. Doç. Dr.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Hakan İpek

Makine Y. Mühendisi

Oyak-Renault Otomobil
Fabrikaları A.Ş.
Bursa

Hatice Sinem Şaş

Arş. Gör.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

İleri Kompozit Malzemelerin Reçine Transfer Kalıplama Yöntemiyle Üretiminde Kalıp İçi Reçine Akışının Modellenmesi

Bu makalede, reçine transfer kalıplama yöntemi sırasında reçinenin elyaf içindeki akışının benzetimi için geliştirilen, Darcy kanunu temelli matematiksel model ve sayısal çözüm yöntemi sunulmuştur. Geliştirilen model, karmaşık şekilli kalıplar için 2-boyutlu, eşyönlü/eşyönsüz reçine akışını izotermal olarak modellemektedir. Dolum süresi, kalıp içi basınç dağılımı, akış cephesinin ilerlemesi gibi kalıp ve üretim tasarımı için önemli veriler elde edilebilmektedir. 1 boyutlu akış konfigürasyonu için sayısal ve analitik çözümler karşılaştırılmış, çeşitli süreç değişkenlerinin üretime etkisi incelenmiştir. Karmaşık şekilli kalıp içi 2boyutlu dolum analizi yapılmış, sayısal sonuçlar önceki bildirişlerdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modelin, karmaşık şekilli ve eşyönsüz elyaf preform içi reçine akışının benzetiminde tatmin edici doğrulukta sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Reçine transfer kalıplama, Gözenek içi akış modellemesi, Sayısal analiz

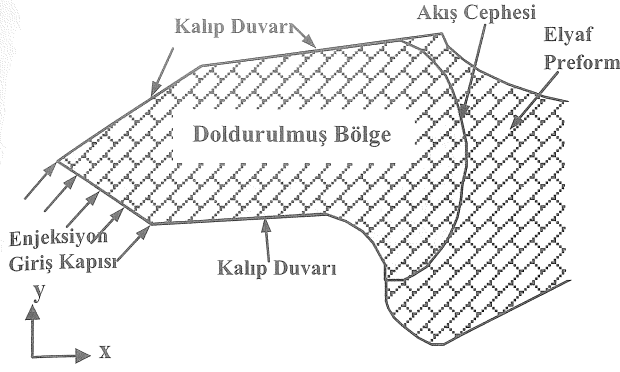
TERİMLER

\vec{V}	yüzeysel (Darcy) hız vektörü
\vec{V}'	gerçek hız vektörü
ε	gözeneklilik oranı (preform boşluk hacmi/kalıp kovuğu hacmi)
v_f	elyaf hacim oranı (preform elyaf hacmi/ kalıp kovuğu hacmi, $\varepsilon = 1 - v_f$)
$\underline{\underline{K}}$	geçirgenlik tensörü
ψ	akım fonksiyonu
μ	reçine viskozitesi
u_0	yüzeysel giriş enjeksiyon hızı (m/s)

GİRİŞ

Reçine transfer kalıplama yöntemi ("resin transfer molding"- RTM), özellikle karmaşık şekilli, kesintisiz

elyafla güçlendirilmiş, yapısal kompozit malzeme üretiminde kullanılan ileri bir üretim tekniğidir. RTM, şekilsel olarak karmaşık yapıya sahip, üstün mekanik performanslı, hafif parçaların üretimi için uygundur. Bu üretim yönteminde, ürün kalitesinde oluşabilecek değişkenlik, diğer kompozit üretim yöntemlerine göre daha iyi kontrol edilebilir (yüksek tekrarlanabilirlik) [1,2]. Üretilecek parça için tasarlanmış kalıp yuvasına, örgülü/örgüsüz elyaf kumaş katmanları, parçanın istenilen mekanik özelliklerine göre belirlenen elyaf hacim oranlarında ve yönlerinde yerleştirilir. Şekil 1'de görüldüğü gibi elyaf preform (üretilecek ürünün şekline göre kesilip hazırlanan elyaf bütünü) yerleştirildikten sonra kalıp kapatılır ve termoset plastik reçine basınç uygulanarak kalıbın içine enjekte edilir. Katalize edilmiş reçinenin kalıba dolumu sona erince, reçinenin polimerize olarak katılaşması için kalıp fırınlanır. Oluşturulan kompozit malzemede, reçine matrisi, yükün yük taşıyıcı elyaflar arasında iletimini sağlar ve ürüne katı şeklini verir [3].



Şekil 1. RTM yönteminde enjeksiyon aşaması

RTM yönteminde preformun reçineyle emdirilmesinin ve kalıbın dolununun benzetimi yapılarak süreç parametreleri için ön bilgi elde edilir. Kalıp yuvasının tamamen dolumu, kalıp içi basınç dağılımı, (istenmeyen) hava kabarcıklarının oluşumu gibi bilgilerin kalıp içi reçine akışının benzetimi ile elde edilmesi, hem üretim hem de malzeme maliyeti yüksek olan bu yöntemde tasarım sürecindeki verimi artırır. Bunun yanında kompozit malzemenin ve planlanan üretim sürecinin önemli özellikleri (hava boşluklarının oluşumu, yerleri, dolum basıncı, dolum zamanı, vb.) geliştirilebilir.

Bu çalışmada preform içi reçine akışı ve kalıbın doldurulması, Newtonian akış özellikleri gösteren bir reçine için 2-boyutlu, sanki-durağan ("quasi-steady") ve izotermal olarak modellenmiştir. RTM yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin kalınlıkları, yüzey alanı boyutlarına göre çok küçüktür. Bu nedenle akışta üçüncü boyutun (kalınlık yönünde) ihmal edilmesi, RTM süreç modellemesinde sıkça kullanılan bir yaklaşımdır. Darcy kanunu temel alınarak geliştirilen model, karmaşık şekle sahip kalıp içi dolunun, tek veya birden fazla kapılı enjeksiyon için benzetimini yapabilmektedir. Model aynı zamanda, hem eşyönlü ("isotropic") hem eşyönsüz (anisotropic") elyaf preform için reçine doldurulmasını modelleyebilmektedir.

Geliştirilen modelle RTM yönteminde kalıp içi akış sırasında süreç parametrelerinin akışa olan etkileri, 1boyutlu parametrik analiz çalışmalarıyla incelenmiştir. Sayısal çözümün doğruluğunun incelenmesi için, 1 boyutlu analitik çözümle sayısal çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra, 2 boyutlu karmaşık şekle sahip kalıp içi eşyönsüz akış benzetimi yapılmış ve sonuçlar önceki bildirişlerdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

PROBLEMİN FORMÜLASYONU

RTM yönteminde kalıbın içine reçine aktarımı ve reçinenin örgülü/örgüsüz elyaf preform içinde ilerleyişi, gözenekli yapı içi akıştır ve makroskopik düzeyde, Darcy kanunu ile modellenilebilir [1,4-7]. Darcy kanunu iç kuvvetlerin ihmal edildiği bir yaklaşımla aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\vec{V} = -\frac{1}{\mu} \underline{\underline{K}} \cdot \nabla P \quad (1)$$

Burada \vec{V} yüzeysel (Darcy) hız, P akış basıncı, μ reçine viskozitesi ve $\underline{\underline{K}}$ preformun yönsel geçirgenlik tensörüdür. Preform içi ilerleyen reçinenin gerçek hızının (\vec{V}'), yüzeysel hız ile arasındaki bağıntı, gözeneklilik oranı ε veya elyaf hacim oranına, v_f göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V' = \frac{V}{\varepsilon} = \frac{V}{1 - v_f} \quad (2)$$

Kartezyen koordinatta simetrik geçirgenlik tensörü aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\underline{\underline{K}} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Geçirgenlik tensörünün K_{ij} elemanı, j yönündeki basınç gradyanının i yönündeki akış hızına olan etkisini ifade eder.

2 boyutlu akış analizi için geçirgenlik tensörü aşağıdaki gibi sadeleşir.

$$\underline{\underline{K}} = \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Kartezyen koordinat sistemi, geçirgenlik tensörünün asal eksenleri ("principal axes") ile çakıştırılarak geçirgenlik tensörü aşağıdaki gibi diyagonal matris haline getirilir.

$$\underline{\underline{K}} = \begin{pmatrix} K_{xx} & 0 \\ 0 & K_{yy} \end{pmatrix} \quad (5)$$

2 boyutlu akış analizinde denklem (1)'deki Darcy kanununun açılmış hali kullanılarak hız bileşenleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$u = -\frac{K_{xx}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (6.a)$$

$$v = -\frac{K_{yy}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (6.b)$$

Süreklilik denklemi sıkıştırılmayan akışkanlar için akım fonksiyonu yoluyla aşağıdaki eşitlikler ile tanımlanabilir.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (7.a)$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (7.b)$$

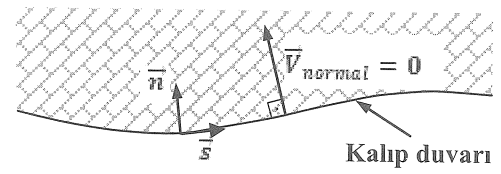
Denklem (6) ve denklem (7) birleştirilir ve basınç gradyanları çapraz türevle elenerek, temel denklem, akım fonksiyonu cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} & \frac{\mu}{K_{yy}} \frac{\partial \psi^2}{\partial x^2} + \frac{\mu}{K_{xx}} \frac{\partial \psi^2}{\partial y^2} \\ & + \left[\frac{1}{K_{xx}} \frac{\partial \mu}{\partial y} - \frac{\mu}{K_{xx}^2} \left(\frac{\partial K_{xx}}{\partial y} \right) \right] \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ & + \left[\frac{1}{K_{yy}} \frac{\partial \mu}{\partial x} - \frac{\mu}{K_{yy}^2} \left(\frac{\partial K_{yy}}{\partial x} \right) \right] \frac{\partial \psi}{\partial x} \end{aligned} \quad (8)$$

Denklem (8), preform içinde Newtonian reçinenin 2 boyutlu, izotermal, sanki-durağan akışının temel denklemdir.

Akış probleminin temel denklemi, (8), eliptik karakterde olduğu için, akış alanının bütün sınırları için sınır koşulları tanımlanmalıdır. Akış alanında 3 farklı sınır çeşidi olabilir. Bu sınırlar reçinenin temas ettiği kalıp duvarı, reçinenin giriş (enjeksiyon) kapısı ve ilerleyen akış cephesidir. Problemin temel denklemi akım fonksiyonu ile belirtildiği için sınır koşulları da akım fonksiyonu cinsinden tanımlanmalıdır. Reçinenin kalıp kenarı boyunca kaydığı ("slip condition") varsayılarak kalıp duvarının reçine ile temas eden kısmı bir akım çizgisi olarak kabul edilir. Şekil 2'de kalıp duvarı için duvar koordinatları (\vec{s} ve \vec{n})

tanımlanmış ve duvara dik hız (\vec{V}_{normal}) gösterilmiştir.



Şekil 2. Kalıp duvarı için sınır koşulu

Bu durumda, kalıp duvarlarının reçine ile teması için duvar boyunca akım fonksiyonu sabit kalacaktır.

$$\psi_{kalip_duvarı} = \psi_0 \quad (9)$$

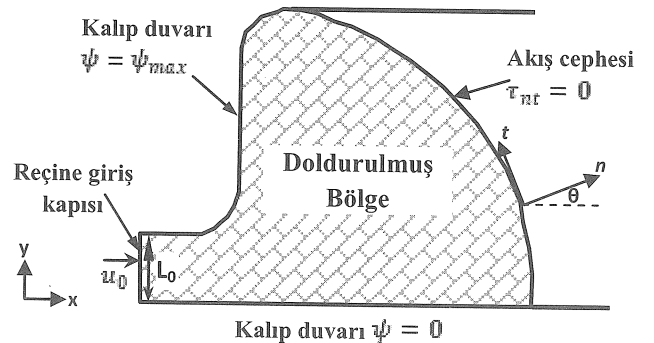
Denklem (9)'un türevi alınarak kalıp duvarları için modelde kullanılan sınır koşulu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial \psi}{\partial s} = V_{normal} = 0 \quad (10)$$

Reçine giriş kapısı boyunca reçine giriş basıncı ya da reçine giriş hızı tanımlanır. Bu çalışmada verilen akış debisinden, giriş kapısı için sınır koşulu olarak sabit akış debisi tanımlanmıştır. Verilen akış debisinden, giriş hızlarının bileşenleri (u ve v) bulunur. Giriş hızlarına bağlı olarak giriş kapısındaki akım fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\psi = \int u dy - \int v dx \quad (11)$$

Reçine giriş (enjeksiyon) kapısı y-ekseni ile çakıştırıldığında giriş hızının y-ekseni yönündeki bileşeni, v , sıfır olur (Şekil 3).



Şekil 3. Sınır koşulları

Buna göre giriş kapısındaki akım fonksiyonu hesabı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\psi_{giriş}(0, y) - \psi_{giriş}(0, 0) = \int_0^y u_{giriş}(0, y) dy \quad (12)$$

x-ekseni yönündeki sabit gerçek giriş hızı $\bar{u}_{giriş}$ olarak ifade edilirse, giriş kapısındaki akım fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$\psi_{giriş}(y) - \psi_{giriş, y=0} = \bar{u}_{giriş} \cdot y \quad (13)$$

x-ekseni boyunca yüzeysel hız (Darcy hızı), u_0 aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$u_0 = \varepsilon \cdot \bar{u}_{giriş} \quad (14)$$

Bu durumda giriş kapısı boyunca akım fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\psi_{giriş}(y) = \frac{u_0}{\varepsilon} y \quad (15)$$

Giriş kapısının alt noktasında ($y = 0$) akım fonksiyonu değeri 0 alınmıştır (Şekil 3). Giriş kapısının boyu L_0 ile ifade edilerek giriş kapısı boyunca akım fonksiyonunun maksimum değişimi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta\psi_{max} = \psi_{giriş}(L_0) - \psi_{giriş, y=0} = \frac{u_0}{\varepsilon} L_0 \quad (16)$$

Temel denklemde ve sınır koşullarındaki tüm akım fonksiyonu değerleri, akım fonksiyonunun maksimum değişimi ile ölçeklendirilir ve akış alanı içindeki tüm akım fonksiyon değerleri 0 ve 1 arasında değişir. Buna göre giriş kapısındaki akım fonksiyonu, ölçeklendirilmiş olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\psi_{giriş}^*(y) = \frac{\psi_{giriş}}{\Delta\psi_{max}} = \frac{u_0}{\varepsilon} y \frac{1}{\frac{u_0}{\varepsilon} L_0} = \frac{y}{L_0} \quad (17)$$

Kalıp duvarı için tanımlanan sabit akım fonksiyonu değerleri de (denklem (9)) aynı şekilde ölçeklendirildiği zaman 0 ve 1 değerleri arasında değişir.

Reçine kalıp içine dolduruldukça sıkıştırılan hava kalıptaki hava kanallarıyla dışarı atılmaktadır. İlerleyen akış cephesi bir serbest yüzey olduğu için akış cephesi üzerinde herhangi bir kayma kuvveti oluşmadığı varsayılır [8] ve bu durum aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\tau_{nt} = \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \sin 2\theta - \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \cos 2\theta \right] = 0 \quad (18)$$

Şekil 3'te de görüldüğü gibi θ , serbest yüzeydeki (akış cephesindeki) yüzey normali ile Kartezyen koordinat sisteminin x-ekseni arasındaki açıdır. Denklem (18)'de hız bileşenleri akım fonksiyonu cinsinden ifade edilerek, serbest cephe (akış cephesi) sınır koşulu elde edilir.

Preform içinde ilerleyen reçinenin akış modellemesi için gerekli 3 farklı sınır koşulu Şekil 3'te gösterilmiş ve denklem (10), (17) ve (18) ile akım fonksiyonu cinsinden ifade edilmiştir.

SAYISAL ÇÖZÜM

RTM yönteminin benzetimi, tanımlanmış reçine giriş akış debisiyle reçinenin preform içine emdirilmesinin ve kalıbın doldurulmasının akış cephesi takibiyle yapılmasını kapsamaktadır.

Düzgün şekilli kalıp konfigürasyonlarında bile enjeksiyon sırasında ilerleyen serbest akış cephesinin oluşturduğu akış alanı karmaşık şekilli bir çözüm alanı oluşturmaktadır. Bu durumda birçok akış senaryosu için analitik çözüm yapılması mümkün olmamaktadır.

Karmaşık şekle sahip parçaların RTM yöntemiyle üretiminde preform içi reçine akışının benzetimi sayısal çözüm şekli açısından iki yöntemle yapılabilir. Birinci yöntemde kalıp kovuğu sabit bir hesaplama ağı ile kaplanır [3,9]. Hesaplama ağındaki her eleman için bir doluluk oranı değeri atanır. Doluluk oranı 0 ile 1 arasında değişen değerler alır. Doluluk oranının 1 olması elemanın reçine ile tamamen doldurulduğunu, 0 olması ise henüz içinde tamamen hava olduğunu ifade eder. 0 ile 1 arasındaki bir doluluk oranı ise reçinenin, o elemanı belirtilen oranda doldurduğunu ve akış cephesinin elemanın içinde olduğunu ifade eder. Bu yöntemde tek bir hesaplama ağında tek bir doğrusal denklem sisteminin çözülmesi gerekir. Bu sebeple sabit ağ kullanımı

hesaplama zamanı açısından avantaj sağlar. Fakat akış cephesinin ilerlemesinin doğru bir şekilde yapılması hesaplama ağındaki elemanların küçüklüğüne bağlıdır. İkinci sayısal çözüm yöntemi olan dinamik hesaplama ağı içeren çözümlerde ise her bir zaman adımında çözüm ağı reçinenin doldurulmuş olduğu kısım için tanımlanır ve her bir zaman adımında yeni hesaplama ağı oluşturulur [2,4,8,10].

Bu çalışmada, dinamik hesaplama ağı kullanılarak sayısal çözüm gerçekleştirilmiş; karmaşık şekilli çözüm alanı, sınıra uydurulmuş koordinat sistemine ("boundary fitted coordinate system") taşınmıştır [11]. Bu yöntemle, preform boyunca ilerleyen reçinenin doldurduğu kısım ile oluşan çözüm alanı (x-y koordinat sistemi), düzgün şekilli bir hesaplama alanına (ξ - η koordinat sistemi) aktarılır (Şekil 4). Çözüm sırasında, her bir zaman adımı için yeni bir akış alanı oluşturulduğu için, yeni bir hesaplama alanı da oluşturulur. Çözüm, düzgün hesaplama alanında gerçekleştirileceği için, temel denklem (denklem (8)) ve sınır koşulları (denklem (10), (17) ve (18)) da, hesaplama alanı koordinat değişkenleri (ξ - η) cinsinden ifade edilmelidir.

Fiziksel ve hesaplama alanlarının koordinat sistemleri arasında ilişki eliptik, hiperbolik veya parabolik kısmi denklemlerle ifade edilebilir. Bu çalışmada sınırlardaki süreksizlik ve tekillik gibi

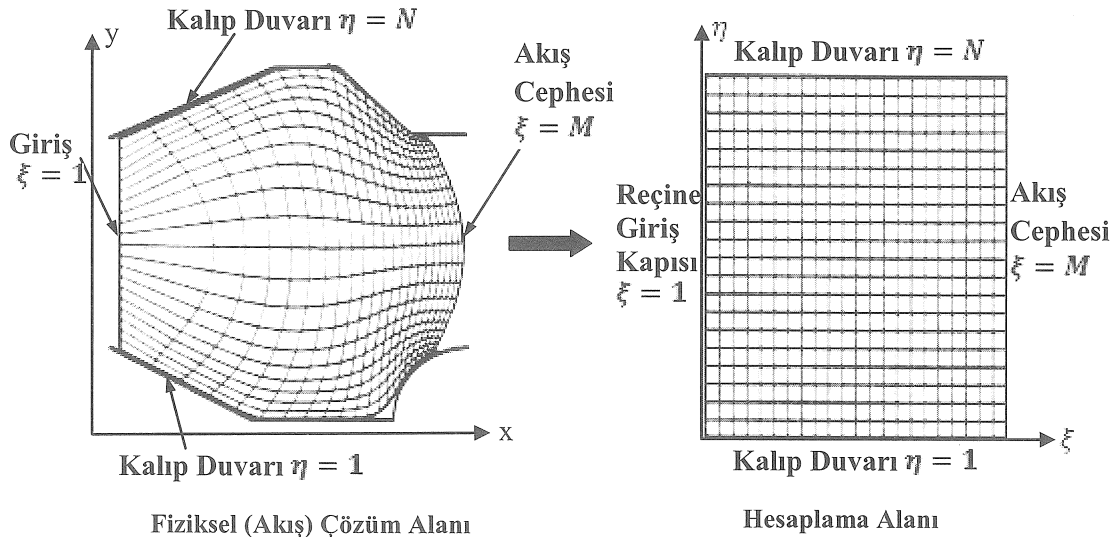
sayısal problemlere karşı daha iyi sonuçlar elde edilen eliptik ağ oluşturma (grid üretim) yöntemi kullanılmıştır [4-5,10]. 2-boyutlu problem için Poisson-tipi eliptik ağ oluşturma denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = P(\xi, \eta) \quad (19.a)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} = Q(\xi, \eta) \quad (19.b)$$

Denklem (19)'da kullanılan $P(\xi, \eta)$ ve $Q(\xi, \eta)$ ağ (grid) kontrol fonksiyonlarıdır ve fiziksel çözüm alanındaki hesaplama noktalarının dağılımının düzenlenmesinde kullanılırlar. Problemin fiziksel çözüm alanından Kartezyen hesaplama koordinat sistemine taşınmasında P ve Q fonksiyonları sıfır olarak alınmıştır.

Sınıra uydurulmuş koordinat sistemini düzensiz şekilli geometrilerde kullanabilmek için temel denklemin ve sınır koşullarının hesaplama alanına taşınması gerekmektedir. Akış alanındaki 4 adet sınır koşulu (2 kalıp duvarı, reçine giriş kapısı ve akış cephesi) Şekil 4'te gösterilen hesaplama alanına taşınır.



Şekil 4. RTM yönteminde fiziksel çözüm alanının sınıra uydurulmuş koordinat sistemi ile hesaplama alanına taşınması

Temel denklem (denklem (8)) de hesaplama alanına taşınarak ξ ve η değişkenleri cinsinden ifade edilmektedir. Örneğin, fiziksel çözüm alanında tanımlı $f(x, y)$ fonksiyonunun birinci dereceden kısmi türevleri, hesaplama alanı koordinat sisteminin değişkenleri ξ ve η cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f_x = f_{\xi} \xi_x + f_{\eta} \eta_x \quad (20.a)$$

$$f_y = f_{\xi} \xi_y + f_{\eta} \eta_y \quad (20.b)$$

Koordinat taşınmasında Jakoben, J, aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$J = x_{\xi} y_{\eta} - x_{\eta} y_{\xi} \quad (21)$$

Denklem (20), Jakoben tanımı kullanılarak aşağıdaki hale getirilir.

$$f_x = \frac{1}{J} f_{\xi} y_{\eta} - f_{\eta} y_{\xi} \quad (22.a)$$

$$f_y = \frac{1}{J} - f_{\xi} x_{\eta} + f_{\eta} x_{\xi} \quad (22.b)$$

Denklem (22) kullanılarak temel denklem ve sınır koşullarındaki türevler, (ξ, η) değişkenleriyle ifade edilir ve çözüm hesaplama alanı koordinat düzleminde yapılır. Denklemlerin dönüştürülmüş bu halleri, akım fonksiyonunun hesaplama alanındaki çözümünde kullanılacak denklemlerdir. Düzgün hesaplama alanındaki her bir nokta, birebir olarak fiziksel (akış) çözüm alanındaki tek bir noktayla eşleştirilmiştir ($(\xi(x, y)$ ve $\eta(x, y)$ bilinmektedir).

Düzgün şekilli hesaplama alanına taşınan temel denklem ve sınır koşulları sayısal çözüm uygulanması için ayrık hale getirilir. Bu çalışmada temel denklemin ve sınır koşullarının ayrıklaştırılması sonlu fark ("finite difference") yöntemiyle yapılmıştır. Ayrık hale getirilmiş temel denklem ve sınır koşulları bütün hesaplama noktaları için ifade edilir ve akım fonksiyonunun çözümünde kullanılacak doğrusal cebirsel denklem sistemi oluşturulur. Oluşturulan doğrusal denklem sistemi ardışık-aşırı-rahatlatma ("successive over relaxation, SOR") yöntemi

kullanılarak, akım fonksiyonu için çözülür. Geliştirilen modelin sayısal çözümü, Fortran derleyicisi kullanılarak yazılan programla gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen programın akış şeması Şekil 5'te sunulmuştur.

MODELLEME SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Süreç değişkenlerinin sürece olan etkisinin incelenmesi için 1 boyutlu akış analizleri yapılmıştır.

Şekil 6'da boyutları verilen düz kanal için sayısal ve analitik çözümler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. İncelenen kalıbın en-boy oranı küçük olduğu için ve enjeksiyonun tüm kalıp eni boyunca ("line-gate") yapılması nedeniyle analiz 1 boyutlu kabul edilmiş ve analitik çözüm bu şekilde yapılmıştır. Sayısal çözüm, 2 boyutlu gerçekleştirilmiş ve analitik çözümle karşılaştırılan sonuçlar düz kanalın x-yönündeki merkez çizgisi boyunca alınmıştır.

Sabit u_0 yüzeysel hızıyla enjekte edilen reçinenin 1 boyutlu akışının analitik çözümü bulunabilir. Elyaf preform içindeki reçinenin gerçek akış hızı $\frac{u_0}{1-v_f}$ dir ve bu hız akış alanı boyunca sabittir. Akış cephesi konumu, x_L 'in, zamana bağlı ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$x_L = \frac{u_0}{1-v_f} \cdot t \quad (23)$$

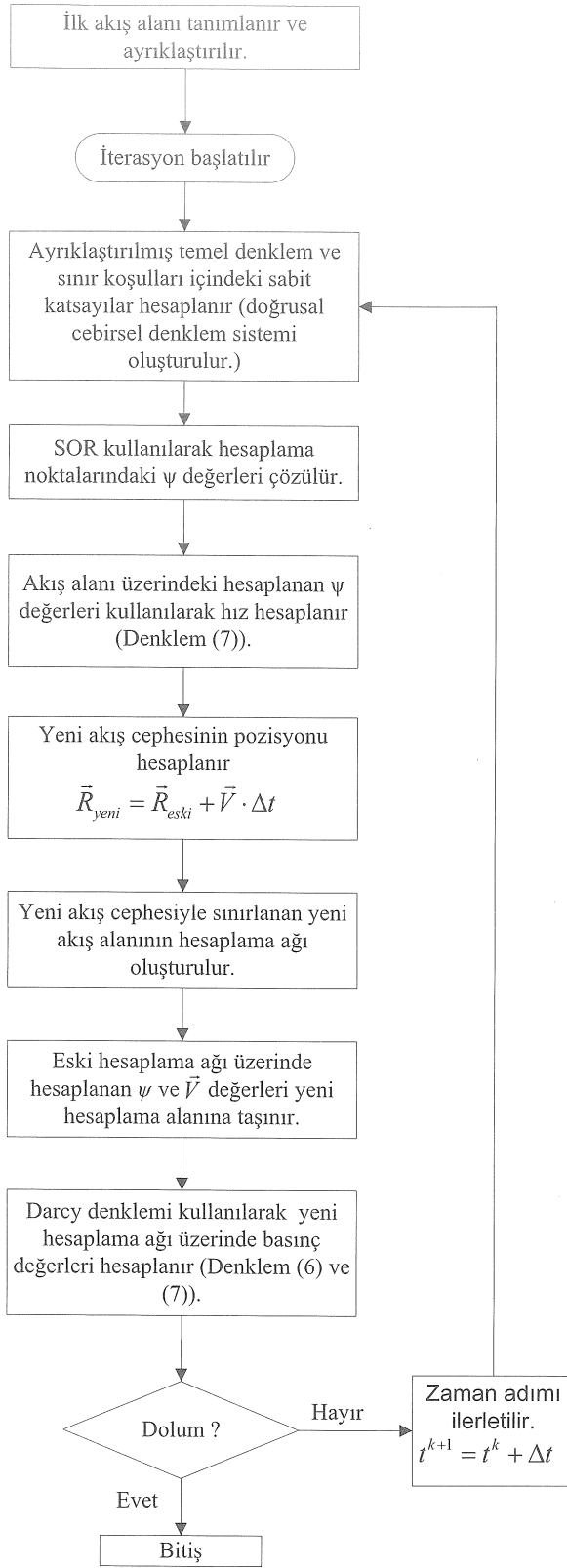
Denklem (23)'te t geçen süreyi ifade eder.

Denklem (1) ile verilen Darcy kanununun 1 boyutlu akış için basitleştirilmiş halinin integrali alındığında akış alanındaki her bir x konumundaki basınç değeri aşağıdaki gibi bulunur.

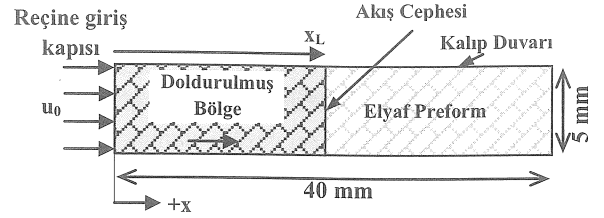
$$P(x) = \frac{\mu \cdot u_0}{K_{xx}} (x_L - x) \quad (24)$$

Enjeksiyon kapısındaki ($x = 0$) basınç değeri denklem (24) kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{giriş} = \frac{\mu}{K_{xx}} u_0 x_L \quad (25)$$



Şekil 5. Program Akış Şeması



Şekil 6. 1-boyutlu analiz için kalıp ve kapı konfigürasyonu

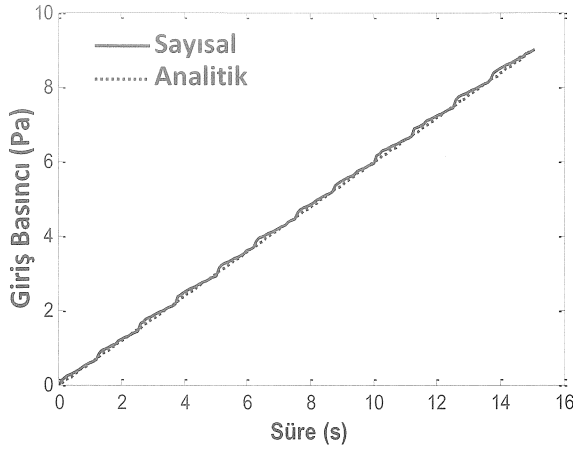
Denklem (25) kullanılarak hesaplanan giriş kapısındaki basınç değeri (analitik çözüm), geliştirilen program ile bulunan giriş kapısının orta noktasındaki basınç değeri ile karşılaştırılmıştır. 1 boyutlu dolun sürecinin analitik çözümü ve benzetimi için kullanılan süreç parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'de ve Şekil 7'de giriş basıncının zamana göre dağılımının analitik ve sayısal çözüm sonuçları verilmiştir. Tablo 1'deki dolun süreleri ve Şekil 7'deki giriş basıncının zamana bağlı değişimi incelendiğinde, analitik ve geliştirilmiş programdan elde edilen sonuçların eş olduğunu görülmektedir.

Beklendiği gibi, sabit enjeksiyon hızında, giriş basıncı doğrusal olarak artmaktadır ve bu artış analitik olarak da denklem (25) ile ifade edilmektedir. 1 boyutlu kalıp içi reçine akışı için sayısal ve analitik sonuçlarda, dolun süreleri de eşdeğer çıkmıştır.

Tablo 1. 1-boyutlu akış çözümü için kullanılan süreç parametreleri ve modelleme sonuçları

Giriş hızı, (mm/s)	1
Reçine viskozitesi, μ , (Pa.s)	1.149
Geçirgenlik, K_{xx} , (m^2)	$38.37 \times 10^{-2} m^2$
Zaman adımı, Δt (s)	0.1
Elyaf Hacim Oranı, v_f (%)	50
Dolum Süresi, Analitik, (s)	15
Dolum Süresi, Sayısal, (s)	15



Şekil 7. 1-boyutlu reçine enjeksiyonunun sayısal ve analitik çözüm için giriş basıncındaki değişim

Geçirgenlik (K_{xx}): 1-boyutlu RTM'de elyaf preform geçirgenliğinin (K_{xx}) akışa etkisi incelenmiştir. Tablo 2'de verilen üç farklı geçirgenlik değeriyle üç ayrı benzetim yapılmıştır. Benzetimler sırasında kullanılan diğer süreç parametreleri, Tablo 1'de verildiği gibidir.

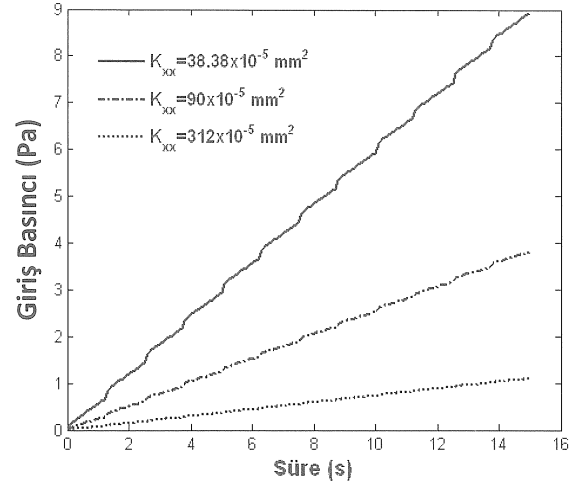
Dolum zamanı Tablo 2'de, giriş basıncının zamana bağlı değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Giriş hızı ve elyaf hacim oranı değişmediği için dolum süresi geçirgenlik değeri ile değişmemektedir. Şekil 8'de görüldüğü gibi giriş basıncındaki zamana bağlı artış geçirgenlik sabitinin değeri arttıkça azalmaktadır. Geçirgenlik değeri azaldıkça reçinenin preforma nüfuz etmesi zorlaşmakta, reçinenin karşı gelmesi gereken basınç artmaktadır.

Tablo 2. 1-boyutlu geçirgenlik analizi için geçirgenlik değerleri ve modelleme sonuçları

	1	2	3
Geçirgenlik $K_{xx} \times 10^{-5} (\text{mm}^2)$	38.38	90	312
Dolum anındaki giriş basıncı (Pa)	8.94	3.81	1.09
Dolum zamanı (s)	15	15	15

Enjeksiyon Hızı (u_0): Farklı enjeksiyon hızlarının (giriş hızı) akışa olan etkisi, 1-boyutlu akış konfigürasyonu için incelenmiştir. Tablo 3'de benzetimlerde kullanılan süreç parametre değerleri verilmiştir. Dört farklı giriş hızı için yapılan benzetimlerin sonucunda bulunan dolum anındaki giriş

basıncı ve dolum zamanı Tablo 3'te verilmiştir. Şekil 9'da farklı giriş hızları için giriş basıncının zamana göre değişimi sunulmuştur.

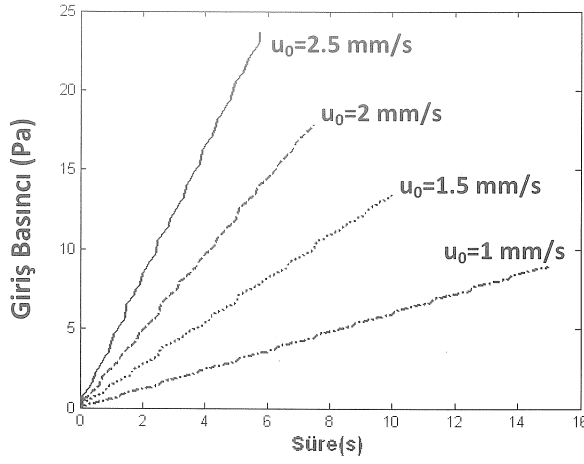


Şekil 8. 1-boyutlu akış için farklı geçirgenlik değerlerinde giriş basıncındaki değişim

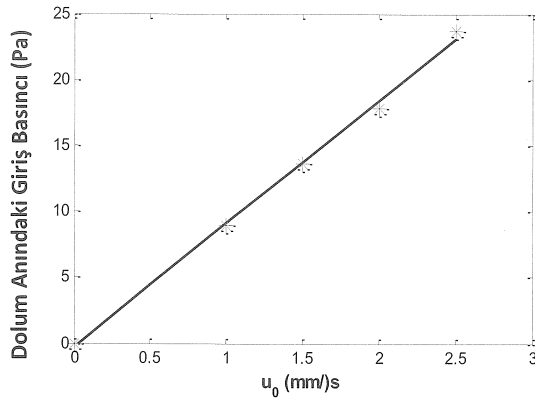
Tablo 3'te ve Şekil 9'da görüldüğü gibi enjeksiyon hızı artırıldıkça dolum süresi kısalmakta ve giriş basıncı artmaktadır. Denklem (25)'e göre, giriş basıncı giriş hızıyla doğrusal olarak değişmelidir. Şekil 10'da görüldüğü gibi, sayısal çözümde giriş basıncı-enjeksiyon hızı arasındaki bağıntı doğrusallıktan az miktarda sapmaktadır. Bu analizlerde, program 2-boyutlu bir kalıp şekli için çözüm yapmaktadır. Sunulan sonuçlar, kalıp kanalının x-yönündeki merkez çizgisi boyunca verilmiştir. Kalıp eni boyunca sayısal çözüm sonuçları az da olsa bir farklılık göstermektedir. Şekil 10'daki görülen doğrusallıktan sapmanın bu nedenle oluştuğu düşünülmektedir.

Tablo 3. 1-boyutlu hız analizi için süreç parametreleri ve modelleme sonuçları

Geçirgenlik $K_{xx} \times 10^{-5} (\text{mm}^2)$	38.37			
Zaman adımı, Δt (s)	0.1			
Elyaf hacim oranı, v_f , (%)	50			
Reçine viskozitesi, μ (Pa.s)	1.149			
Giriş hızı, u_0 (mm/s)	1.0	1.5	2.0	2.5
Dolum anındaki giriş basıncı (Pa)	8.94	13.67	17.87	23.69
Dolum zamanı (s)	15	10	7.5	6



Şekil 9. 1- boyutlu akış için farklı giriş hızlarında giriş basıncındaki değişim



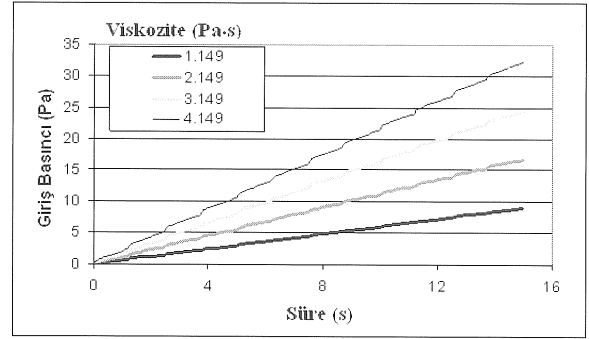
Şekil 10. 1-boyutlu akışta farklı giriş hızları için dolum anındaki giriş basıncı

Viskozite (μ): Farklı reçine viskozitelerinin akışa olan etkisi, 1-boyutlu akış konfigürasyonu için incelenmiştir. Dört farklı viskozite değeri için benzetim yapılmıştır. Analiz parametreleri ve benzetim sonuçları Tablo 4'de sunulmuş ve grafiksel olarak da Şekil 11'de gösterilmiştir.

Giriş hızları ve elyaf hacim oranı sabit tutulduğu için dolum süresinde bir farklılık gözlenmezken, viskozite arttıkça dolum anındaki giriş basınç değerlerinde değişim görülmüştür. Reçine viskozitesi artırıldıkça, preformun reçine ile emdirilmesi zorlaşmaktadır. Bu sebeple dolum anındaki giriş basıncı reçine viskozitesi ile aynı oranda artar. Bu artış, analitik çözümde öngörüldüğü gibi (denklem (25)) doğrusaldır.

Tablo 4. 1-boyutlu viskozite analizi için süreç parametreleri ve modelleme sonuçları

Giriş Basıncı, u_0 (mm/s)	1.0			
Geçirgenlik, $K_{xx} \times 10^{-5}$ (mm ²)	38.38			
Zaman adımı, Δt (s)	0.1			
Elyaf hacim oranı, v_f (%)	50			
Reçine viskozitesi, μ , (Pa.s)	1.149	2.149	3.149	4.149
Dolum anındaki giriş basıncı (Pa)	8.94	16.73	24.51	32.29
Dolum zamanı (s)	15	15	15	15



Şekil 11. 1-boyutlu akış için farklı viskozite değerlerinde giriş basıncındaki değişim

Elyaf hacim oranı (v_f): Farklı elyaf hacim oranlarının akışa olan etkisi, 1-boyutlu akış konfigürasyonu için incelenmiştir. Analiz parametreleri ve sonuçlar Tablo 5'de sunulmuş ve grafiksel olarak da Şekil 12'de gösterilmiştir.

Elyaf hacim oranının artırılmasıyla, kalıp kovuğunun içindeki boş hacim azalmaktadır. Bu nedenle elyaf hacim oranı artırıldığında aynı boyutlardaki kalıbın dolumu için daha az reçine gerekmektedir. Şekil 12'de görüldüğü gibi aynı enjeksiyon hızında, elyaf hacim oranı arttıkça dolum süresi azalır.

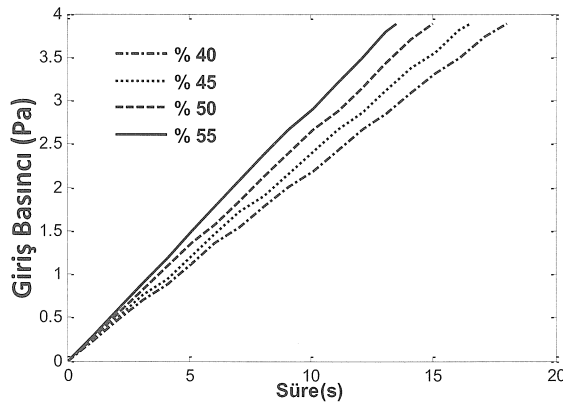
Elyaf hacim oranı arttıkça, basınç eğrisinin eğimi beklenildiği gibi artmıştır. Elyaf hacim oranı yükseldikçe, kalıp kavuğundaki boşluk oranı azalır ve akışa olan reçine direnci artar. Tablo 5 ve Şekil 12'deki sonuçlara göre, dolum anındaki giriş basıncı,

farklı elyaf hacim oranlarındaki benzetimlerde aynıdır. Bu sonuç, denklem (25)'de öngörüldüğü gibi olup ancak gerçekçi değildir.

RTM sürecinde elyaf hacim oranı, aynı tip örgülü/örgüsüz elyaf preformlar için, farklı sayıda elyaf katmanı kullanılarak değiştirilir. Ancak, katmanların kapalı kalıp içinde sıkıştırılma derecelerine bağlı olarak geçirgenlikleri de değişmektedir. Tablo 5 ve Şekil 12'deki sonuçlar için yapılan benzetimlerde, geçirgenlik değerinin bu değişimi ihmal edilmiştir. Elyaf hacim oranı arttıkça geçirgenlik değeri azalmalıdır.

Tablo 5. 1-boyutlu elyaf hacim oranı analizi için süreç parametreleri ve modelleme sonuçları

Giriş Basıncı, u_0 (mm/s)	1.0			
Geçirgenlik $K_{xx} \times 10^{-5}$ (mm ²)	38.38			
Zaman adımı, Δt (s)	0.1			
Reçine viskozitesi, μ (Pa.s)	0.5			
Elyaf hacim oranı, v_f (%)	40	45	50	55
Dolum anındaki giriş basıncı (Pa)	3.89	3.89	3.89	3.88
Dolum zamanı (s)	18.00	16.00	15.00	13.50

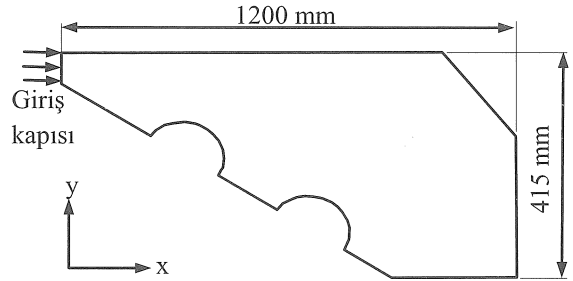


Şekil 12. 1-boyutlu Farklı elyaf hacim oranları için basınç değişimi

Geçirgenlik değerinin azalması da giriş basıncının daha da artmasına neden olacaktır (denklem (25)). Elyaf hacim oranının değişiminin akışa etkisini

parametrik olarak inceleyebilmek için geçirgenlik değerinin değişimi ihmal edilmemelidir.

2 boyutlu karmaşık şekilli kalıp için RTM benzetimi ve deneysel sonuçlarla karşılaştırma: Geliştirilen programla, 2 boyutlu, karmaşık şekilli bir kalıp için RTM benzetimi yapılmış, sayısal sonuçlar, aynı kalıp için yazından alınan deneysel sonuçlarla [2] karşılaştırılmıştır. Şekil 13'te karmaşık şekilli kalıp, kalıbın boyutları ve enjeksiyon kapısı gösterilmiştir. Sayısal analiz için kullanılan süreç değişken değerleri, bu kalıp için gerçekleştirilen RTM deneylerinde [2] kullanılan değerlerdir ve Tablo 6'da verilmiştir. Kalıp kovuğunun kalınlığı, kalıbın diğer boyutlarından çok daha küçük olduğu için bu kalıp, 2-boyutlu RTM benzetimi için uygundur. Dolum eşyönsüz bir preform ($K_{xx} \neq K_{yy}$) için gerçekleştirilmiştir. Bu sayede geliştirilen programın, eşyönsüz bir akış konfigürasyonundaki performansı da görülebilecektir.

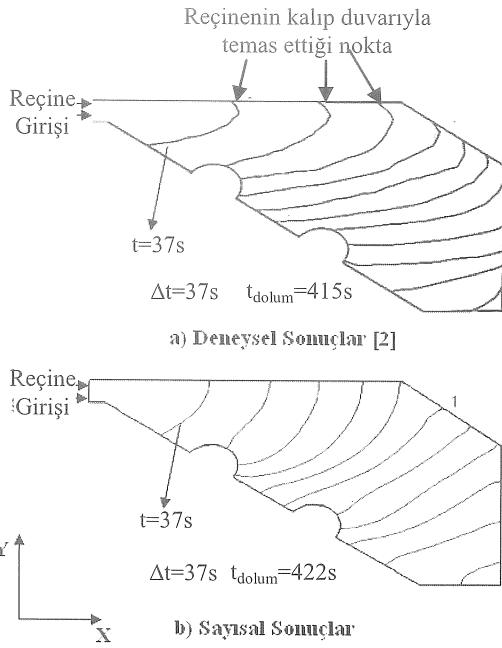


Şekil 13. 2-boyutlu, karmaşık şekilli kalıp kovuğu

Şekil 14'te, sayısal çözüm sonucu bulunan reçine akış cephesinin kalıp içindeki ilerleyişi, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar 37 saniyelik zaman adımlarında gösterilmiştir.

Tablo 6. Şekil 13'teki kalıp için gerçekleştirilen RTM benzetimi ve deneyinde kullanılan süreç parametre değerleri [2]

Reçine viskozitesi, μ , (Pa.s)	1.8
Geçirgenlik (mm ²)	$K_{xx} = 28.7 \cdot 10^{-9}$
	$K_{yy} = 6.9 \cdot 10^{-9}$
Giriş hızı, u_0 , (mm/s)	56.6
Kalıp kalınlığı, (mm)	6.31



Şekil 14. 2-boyutlu reçine doluşunun deneysel ve sayısal modelleme sonuçları

Dolum aşamasının ilk yarısında akış cephesinin ilerlemesi kalıp kovuğu boyunca deneysel çalışmadaki ilerleme sonuçlarının bir miktar gerisinde kalmaktadır. Kalıbın ikinci yarısında, sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki cephe ilerleme farkı kapanmıştır. Akış cephelerinin genel şekline bakılacak olursa, deneysel sonuçlarda reçinenin duvarla temas ettiği noktaların akış cephesinin diğer kısımlarından daha geride olduğu görülmektedir. Sayısal sonuçlarda, reçinenin duvarla temas ettiği noktalar cephenin diğer kısımlarından bu denli geride kalmamıştır. Sayısal modellemede kalıp duvarlarındaki sınır koşulu olarak kayma ("slip") koşulu uygulanmıştır. Deneysel sonuçlarda kaymama ("no-slip") koşulu akış cephesi şeklinden açıkça görülmektedir. Deneysel ve sayısal akış cephelerindeki şekilsel farklılığın, sınır koşullarının bu şekilde uygulanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sayısal çözümde bulunan akış cephelerinin izlediği yol ve dolum anında son geldiği nokta, deneysel sonuçlarla uyumludur. Kalıbın gerçek dolum süresi 415 saniye, sayısal çözüm ile elde edilen dolum süresi 422 saniyedir. Aradaki fark sadece 7 saniyedir. Kullanılan kalıbın şekil karmaşıklığı ve preformun eşyönsüzlüğü düşünüldüğünde, geliştirilen programın tatmin edici düzeyde, 2-boyutlu RTM benzetimi yapabildiği sonucuna varılmıştır.

SONUÇ

Bu makalede, 2-boyutlu Darcy kanunu temel alınarak geliştirilen, RTM sürecinde kalıp içindeki reçine akışının matematiksel modeli ve sayısal çözüm yöntemi sunulmuştur. Geliştirilen model, karmaşık şekilli kalıp içine yerleştirilen elyaf preformun özelliklerine göre, eşyönlü veya eşyönsüz reçine akışını sanki-durağan (quasi-steady) ve izotermal olarak modelleyebilmektedir. Analitik çözümler ve yazından alınan deneysel sonuçlarla yapılan karşılaştırmalar, geliştirilen programın karmaşık şekilli ve eşyönsüz elyaf preformlar için tatmin edici doğrulukta kullanılabileceğini öngörmüştür. Bu çalışmayı takiben, geliştirilen programla çeşitli RTM dolum senaryoları incelenecek; karmaşık şekilli kalıp içi akış benzetimleri, eşyönlü ve eşyönsüz elyaf preformlar ve tek/birden fazla kapılı enjeksiyon için yapılacaktır.

MODELING OF RESIN IMPREGNATION IN RESIN TRANSFER MOLDING OF CONTINUOUS FIBER-REINFORCED COMPOSITES

In this study, a mathematical model based on Darcy's Law and its numerical implementation are presented to model the resin impregnation through the fibrous preform during resin transfer molding (RTM) of continuous-fiber reinforced composites. The developed model can simulate the isothermal flow of the resin through both isotropic and anisotropic preforms, for 2-D complex-shaped mold configurations. Using the model, important design information such as fill time, pressure distribution in the mold cavity and flow front progression are obtained. Parametric studies of process parameters are performed for 1-D resin impregnation and numerical results are compared with analytical solutions. Resin impregnation through a 2-D, complex shaped mold is simulated and the results are compared with an experimental case study from the literature. The developed model and numerical solver are observed to simulate resin impregnation through anisotropic preforms in complex-shaped molds, with acceptable accuracy.

Keywords: Resin Transfer Molding, Porous Flow Modeling, Numerical Analysis

KAYNAKÇA

1. Shojaei, A., Numerical Simulation of Three-Dimensional Flow and Analysis of Filling Process in Compression Resin Transfer Molding, Composites. Part A, Applied science and manufacturing , 37 (2006), 1434-1450.
2. Coulter, J.P., Güçeri, S., Resin Transfer Molding and Research Opportunities, The Manufacturing Science of Composites. T.G. Gutowski, IV (1988), 79-86.
3. Simancek, P., Desirable Features in Mold Filling Simulations for Liquid Composite Molding Process, Polymer Composites, 25 (2004) 4.
4. İpek, H., Modeling of Resin Transfer Molding for Composite Manufacturing, Ms. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2005.
5. Friedrichs, B., Modeling of Three Dimensional Flow Fields in Injection and Resin Transfer Molding Processes, Ph.D. dissertation, Newark, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Delaware 19716, USA, 1992.
6. Yoo, Y., Lee W.I., Numerical Simulation of the Resin Transfer Mold Filling Process Using the Boundary Element Method, Polymer Composites, 17 (1996) 3.
7. Kang, M. K., Jung J. J., ve Lee W. I., Analysis of Resin Transfer Moulding Process with Controlled Multiple Gate Resin Injection, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 31 (2000) 5, 407-422
8. Erdal, M., Güçeri, S., Danforth, S.C., Impregnation Molding of Particle Filled Pre ceramic Ploymers: Process Modeling, J American Ceramic Society, 82 (1999) 8, 2017-28.
9. Cheng, P., Tan, P.C., ve Springer, G.S., Composite Manufacturing: Simulation of 3-D resin Transfer Molding, SAGE, Journal of Compoiste Materials, 33 (1988), 1716
10. Erdal, M., Impregnation Molding of Continuous Fiber-Reinforced Ceramic-Ceramic Composites Using Pre ceramic Polymers, PhD. Thesis, University of Illinois at Chicago, USA, 1998.
11. Cai, Z., Analysis of Mold Filling in RTM processes, Journal of Composite Materials, 26 (1992) 9, 1310-1338.