

168537

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİK MATRİKSLİ KOMPOZİT MALZEMELERDE
AKIŞ ANALİZİ VE UYGULAMALARI

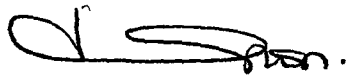
Mak. Müh. Erkan BİBER

FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan

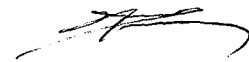
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Mehmet Emin YURCİ (YTÜ)

Prof. Dr. Nilvan NUGAY (ZÜ)



Prof. M. Emin YURCİ



Prof. Dr. Aysegül AKDOĞAN



İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. İMALAT YÖNTEMLERİ.....	3
2.1. İmalat Prosesi Seçim Kriterleri.....	4
2.1.1. İmalat Hızı.....	4
2.1.2. Maliyet.....	4
2.1.3. Performans.....	5
2.1.4. Boyut.....	7
2.2. Parça İmalatı Gereksinimleri.....	7
2.3. Kalıp ve Takım İmali.....	8
2.3.1. Kalıp Tasarım Kriterleri.....	9
2.3.1.1. Kendini Çekme.....	9
2.3.1.2. Takım Malzemesi ve Parçanın Isıl Genleşme Katsayısı.....	9
2.3.1.3. Kalıbın Rijitliği.....	9
2.3.1.4. Yüzey Bitirme Kalitesi.....	9
2.3.1.5. Çizim ve Köşe Yuvarlamaları.....	9
2.3.2. Takım İmal Yöntemleri.....	10
2.3.2.1. Talahlı İşleme.....	10
2.3.2.2. Açık Kalıplama Prosesleri İçin FRP Takımları.....	11
2.3.3. Kapalı Kalıp Operasyonları Takımlarında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar.....	14
2.4. Bir Kompozit İmalat Prosesinde Temel Adımlar.....	22

2.4.1.	İslatma.....	22
2.4.2.	Yatırma.....	23
2.4.3.	Birleştirme.....	24
2.4.4.	Katılma.....	25
2.5.	Termoset ve Termoplastik Prosesin Avantaj ve Dezavantajları.....	26
2.5.1.	Termoset Prosesin Avantajları.....	26
2.5.2.	Termoplastik Prosesin Avantajları.....	28
2.6.	Kompozit İmalat Prosesleri.....	29
3.	REÇİNE İLETİM KALIPLAMASI.....	30
3.1.	Başlıca Uygulamalar.....	30
3.2.	Temel Hammadde Malzemeler.....	32
3.3.	Takım İmali.....	33
3.4.	Parça İmali.....	33
3.5.	Isı ve Basınç Uygulama Metotları.....	36
3.6.	Temel Proses Adımları.....	37
3.7.	Reçine İletim Kalıplama Prosesinin Avantajları.....	41
3.8.	Reçine İletim Kalıplama Prosesinin Sınırlamaları.....	42
3.9.	RTM Prosesinin Varyasyonları.....	43
3.9.1.	VARTM.....	43
3.9.2.	SCRIMP.....	44
4.	PLASTİK MATRİKSLİ KOMPOZİT İMALAT PROSESİ MODELLEMESİ.....	45
4.1.	Giriş.....	45
4.2.	Kompozit İmalatındaki Modellerin Önemi.....	45
4.3.	Kompozit Prosesi.....	46
4.4.	Bir Proses Modelin Gereçleri.....	48
4.4.1.	Model ya da Sistem Sınırları.....	48
4.4.2.	Fiziksel Kanunlar.....	48
4.4.2.1.	Kütle Korunumu.....	48
4.4.2.2.	Momentum Korunumu.....	49
4.4.2.3.	Enerji Korunumu.....	49
4.4.3.	Kurucu Yasalar.....	50
4.4.4.	Sınır Koşulları.....	51
4.4.5.	Kabuller.....	51
4.4.5.1.	Yarı Kararlı Durum.....	51
4.4.5.2.	Tam Gelişmiş Bölge ve Giriş Etkisi.....	52
4.4.5.3.	Yağlama Yaklaşımı.....	53

4.4.5.4.	Kabuk Yaklaşımı.....	53
4.4.6.	Deneysel Doğrulama.....	53
4.4.7.	Modeli Tekrar Sınama.....	55
4.4.7.1.	Kabulleri Tekrar Sınama.....	55
4.4.7.2.	Kanunları Tekrar Gözden Geçirme.....	55
4.4.7.3.	Sınır Koşulların Tekrar Sınama.....	56
4.5.	Model Oluşturma Çalışması.....	56
4.5.1.	Problem Tanımı.....	56
4.5.2.	Matematiksel Model Oluşturma.....	58
4.5.3.	Denklemlerin Çözümü.....	58
4.5.4.	Modeli Değerlendirme.....	59
4.5.5.	Modeli Düzeltme.....	60
4.6.	Seçilmiş Termoset ve Termoplastik Prosesler İçin Proses Modelleri.....	61
4.6.1.	Termokimyasal Alt Model.....	61
4.6.2.	Boşluk Alt Modeli.....	62
4.6.3.	Gerilime Alt Modeli.....	63
4.6.4.	Akış Alt Modeli.....	64
5.	REÇİNE İLETİM KALIPLAMA AKIŞ ÇALIŞMALARI.....	68
5.1.	İzotermal Akış.....	68
5.2.	İzotermal Olmayan Akış.....	77
5.3.	RTM’de Kenar Etkisi.....	80
5.4.	Geçirgenliğin Belirlenmesi.....	81
5.5.	Yolluk Giriş ve Havalandırma Yeri Seçimi.....	83
6.	RTM PROSESİNDE İZOTERMAL DURUMUNDA MODELLEME UYGULAMASI.....	86
6.1.	Problem Tanımı ve Kabuller.....	86
6.2.	Kütle Korunumu.....	87
6.3.	Ana Denklemler.....	88
6.4.	Sonlu Elemanlar Ayrışması.....	90
6.5.	Hesaplama Yöntemi.....	91
6.5.1.	Hesaplama Sırası.....	92
6.5.2.	Zaman Adımı Miktarı ve Saf Sonlu Elemanlar Yönteminde Cephe Çözünümlü İlişkisi.....	93
6.6.	Analitik Doğrulama.....	95
6.7.	Sayısal Uygulama.....	98
6.7.1.	Sonlu Elemanlar Ayrışması.....	99

6.7.2.	Ana Denklem Sisteminin Kurulması.....	102
6.7.3.	Problemin Çözümü ve İrdelenmesi	104
7.	SONUÇLAR.....	105
	KAYNAKLAR.....	106
	EKLER.....	109
Ek 1	C_{ii} Simetrik Matrisinin C_{ii}^A , C_{ii}^B , C_{ii}^C , C_{ii}^D , C_{ii}^E ve C_{ii}^F , Bileşenleri.....	110
Ek 2	C_{ii} Matrisinin Sayısal Değerleri.....	114
Ek 3	K_{ij} Matrisinin Sayısal Değerleri.....	115
Ek 4	Sayısal Uygulamaların Sonlu Elemanlarının Yerel ve Global Dügümlerinin (x,y) Koordinatları ile Şekil Fonksiyonlarının A, B ve C Katsayıları.....	116
Ek 5	Sayısal Uygulamanın t=3 ve 6 sn. İçin ψ_i Değerleri ile t=6 sn İçin P_i Değerleri.....	120
Ek 6	Her Bir Elemanın Alabileceği max. P değeri (pa).....	121
Ek 7	Hesaplamalarda Kullanılan MATLAB programı.....	122
	ÖZGEÇMİŞ.....	127

SİMGE LİSTESİ

a, b	analiz edilen dikdörtgen kalıbın boyutları
A^e	sonlu eleman alanı
C_{ii}	sonlu elemanlar ayrışımı global bileşeni
f_i	sonlu elemanlar ayrışımı bileşeni
H	analiz edilen dikdörtgen kalıbın kalınlığı
$[K]$	geçirgenlik tensörü
K_{ij}	geçirgenlik tensörü bileşenleri
$[\hat{K}_{ij}]$	sınır koşulları uygulandıktan sonraki geçirgenlik bileşenleri
\hat{n}	yüzeyin dışına doğru normal vektör
n	zaman adımı sayısı
N	alt zaman adımları sayısı
∇N	şekil fonksiyonlarının yerel gradyeni
m	iterasyon sayısı
P	basınç
$[N]$	şekil fonksiyonları matrisi
t	zaman
Δt	zaman adımı
u_i	hız alanı bileşeni
i, j, k	yerel bileşenler
x, y, z	global Kartezyen koordinatlar
Φ	preform gözenekliliği
ε	sonsuz küçük sayı
μ	reçinenin viskozitesi
Γ	sınır bölgesi
ρ	yoğunluk
Ω	kalıp içi bölgesi
$d\Omega$	kalıp sınırı
ψ	dolum faktörü
$\bar{\psi}^N$	kütle korunumu sonunda dolum faktörü

KISALTIMA LİSTESİ

BEM	(Boundry Element Method) Sınır eleman metodu
FDM	(Finite Differential Method) Sonlu farklar yöntemi
FEM	(Finite Element Method) Sonlu elemanlar yöntemi
FE	(Finite Element) Sonlu elemanlar
FRP	(Fiber Reinforced Plastic) Fiber takviyeli plastik
GMT	(Glass Mat Thermoplastic) Cam hasır termoplastik
RTM	(Resin Transfer Molding) Reçine iletim kalıplaması
SCRIMP	(Seemann Composite Resin Infusion Molding Process) Seemann kompozit reçine dökme kalıplama prosesi
Saf FE	Saf sonlu elemanlar
SRIM	(Structural Reaction Injection Molding) Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplaması
VARTM	(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) Vakum takviyeli reçine iletim kalıplaması
FE/CV	(Finite Element/ Control Volume) - Sonlu eleman/ kontrol hacmi



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Spreyleme prosesi.....	7
Şekil 2.2 Bitmiş ana model ve tabakalı kalıp yapımında adımların gösterilmesi.....	11
Şekil 2.3 Ana modeller ve tabaklandırılmış kalıplar.....	13
Şekil 2.4 Sıvı bloktan araba şeklinin yapılması.....	13
Şekil 2.5 Enjeksiyon prosesi için iki plakalı kalıp.....	14
Şekil 2.6 Cam fiber/epoksi kar kayağı için takım.....	15
Şekil 2.7. Islak yatırma şematığı.....	16
Şekil 2.8. Filament sarma.....	16
Şekil 2.9. Karbon fiber tenis raketi için takım.....	17
Şekil 2.10 Aerodinamik helikopter karenej bileşeni için takım.....	18
Şekil 2.11 Pultrasyon prosesi.....	18
Şekil 2.12 Helikopter kuyruk rotoru yapımı için takım.....	19
Şekil 2.13 Akış cephesinin tekli ve çoklu boşluklar için gösterimi.....	20
Şekil 2.14 Kalıp dolumu sırasında kaynak hatlarının oluşumunun gösterimi.....	21
Şekil 2.15 Tavsiye edilen (a) tavsiye edilmeyen (b) yolluk giriş kısmı.....	21
Şekil 2.16 SRIM (Yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplaması).....	22
Şekil 2.17 Basma kalıplama.....	23
Şekil 2.18 Enjeksiyon kalıplama.....	24
Şekil 2.19 Termoplastik bant sarma.....	25
Şekil 2.20 Cam hasır termoplastik (GMT) basma kalıplaması.....	26
Şekil 2.21 Sıcak pres tekniği.....	27
Şekil 2.22 Diyafram şekillendirme.....	28
Şekil 3.1 Bisiklet için kompozit çatal.....	31
Şekil 3.2 RTM prosesinin şematığı.....	34
Şekil 3.3 Tipik RTM prosesinin imalat akış şeması.....	35
Şekil 3.4 Kontrol altındaki sıcaklık parametreleri ile vakum kullanarak preform kumaşın alınması.....	37
Şekil 3.5 Yeni kalıp döndürücü fikstür kullanılarak kalıba preform yükleme.....	38
Şekil 3.6 Bir teknisyen tarafından kalıba reçine enjekte edilmesi.....	38
Şekil 3.7 Yağ bağlantıları, enjeksiyon yolluk sistemi, kendinden kilitleme/yükleme aygıtları gibi standart tasarım özelliklerini gösteren tipik bir RTM kalıbı.....	39
Şekil 3.8 İlgili takım çıkartma hücrelerinde bileşenin kalıptan alınması.....	39
Şekil 3.9 Motor pervanesi için yarı otomatik çoklu gözlü takıma sahip olan imalat hücresi.....	40
Şekil 3.10 SCRIMP prosesinin şematik gösterimi.....	44
Şekil 4.1 Modelleme akış şeması.....	57
Şekil 4.2 Kompozit prosesinde beklenen akış tiplerinin şematığı.....	66
Şekil 5.1 Eş ısı olmayan modelleme akış şeması.....	78
Şekil 6.1 Genel kısmı dolmuş kalıp boşluğu.....	87
Şekil 6.2 Başlangıç ve sınır koşulları.....	89
Şekil 6.3 Dairesel kalıbın sabit basınçta dolum durumu ve ağ geometrisi.....	95
Şekil 6.4 Dairesel plaka kalıpta akış cephesi ve iterasyon karşılaştırmalar: Sabit enjeksiyon basıncı.....	97
Şekil 6.5 Analiz yapılacak RTM kalıbı örneği.....	98
Şekil 6.6 Üçgen sonlu eleman.....	99
Şekil 6.7 Seçilen dik eş üçgenin yerel düğüm sayıları ve global koordinatları ile kenar	

boyutları.....	104
Şekil 6.8 Çözüm bölgesi olan kalıp içinin sonlu elemanlar ağı ile global düğüm sayıları.....	102



ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Proseslerin çeşitli yönlerden karşılaştırılması.....	6
Çizelge 2.2. Çeşitli takım malzemelerinin ısıl genleşme katsayıları ve işletme sıcaklıkları.....	12
Çizelge 3.1 RTM'nin diğer kalıplama prosesleri ile karşılaştırılması.....	43



ÖNSÖZ

babama..



ÖZET

Polimer matrisli kompozitler pazarı içinde termoset plastik kullanımı %75'lik bir paya sahip olması ve reçine iletim kalıplaması (RTM) prosesi, termoset kompozitlerin üretiminde büyük öneme sahip olması nedeni ile RTM prosesi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bağlamda, RTM prosesinde en önemli adımın dolun safhası olduğu ve yürütülmüş çalışmaların büyük çoğunluğunun bu üretim adımının geliştirilmesi üzerine yapıldığı belirlenmiştir.

Bir model, fiziksel prosesin ya da sistemin idealleştirilmiş matematiksel gösterimidir. Bu nedenle, polimer matrisli kompozit üretim proseslerinin optimizasyonu için kullanılan modeller sınıflandırılarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve bir model oluşturma çalışmasının ilkeleri açıklanmıştır. Gerçek fiziksel durumlara en yakın modellemenin elde edilmesi için deneysel çalışma ile modellerin sınanması gerektiği saptanmıştır. Fakat kullanılan kanun ve ön kabuller daha önce sınanmış ise tekrar sınanmanın gereksiz olduğu da belirlenmiştir.

RTM prosesi çevresinde bugüne kadar yürütülmüş akış analizi çalışmaları özetlenmiştir. Daha önce kurulmuş olan bir çok modellemelerden biri olan Saf Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak, RTM'de ana akış denklemi iki boyutlu yaklaşım ile çözülmüş ve sonuçlar analitik olarak bulunan çözümler ile örtüşmüştür.

Kalıp geometrisi ve boyutuna bağlı olarak eğri yüzeyli kalıpların üç boyutlu analizi yapılabilir. Ayrıca izotermal durumdan elde edilen ana denkleme hacimsel kuvvetler ile ısı transferinden doğan ısı etkiler katılarak izotermal olmayan ve gerçeğe çok daha yakın dolun analizi ve pişme kinetiği modellenmesi de mümkündür. Ancak bunun için bilgisayar yazılımı desteği kaçınılmaz görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: RTM, Akış Analizi, Akış Prosesi Modelleme, Saf Sonlu Elemanlar Yöntemi

ABSTRACT

RTM process is studied in detail due to thermoset plastics' usage 75 % of all polymeric matrix composite market and its great importance in thermoset composite manufacturing. In this context, It is determined that filling stage is the most important step in RTM process and the majority of the studies performed before in order to improve this step.

A model is an idealized mathematical representation of the physical process or the system. Hence, models used for optimization of polymer matrix composite manufacturing processes are studied by classifying with all specifics and principles of the modelling are explained. It is established that models need to examine with experiments in order to obtain models close to real physical situations. But also, it is concluded that reexamination is needless, if laws and presumptions had examined before.

Flow analysis studies that were carried out around RTM process until today are summarized. By utilizing Pure Finite Element Method, one of models built previously, the governing equation in RTM is solved by 2D approach and results agree with analytical results.

3D analysis can be performed dependent on the mold geometry and dimension. Also, by adding volumetric forces and thermal effects arisen from the heat transfer, it is possible to make flow analysis and cure kinetics modelling that is non-isothermal and close to real-time situations. But, for this aim, computer software assistance seems to be inevitable.

Key words: RTM, Flow Analysis, Flow Process Modelling, Pure Finite Element Method.

1.GİRİŞ

Fiber takviyeli polimer reçineden yapılmış ileri kompozitler, askeri, otomotiv, havacılık, inşaat ve elektronik endüstrilerinde, yüksek rijitlik/ağırlık oranı, uzun yorulma dayanımı süresi, yüksek korozyon direnci ve takviyeli parçaların imal edebilme kabiliyeti gibi mükemmel özellikleri nedeniyle, artan bir şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Bu ileri özellikleri elde etmek için, son parçada fiber dağılımı üzerinde iyi bir kontrol sağlanması ve üretim prosesinin tam modellenmesi ile gösterimi gerekmektedir (Mohan , 1999a) .

Polimer matrisli kompozitlerin içinde termoset plastik kullanımı, tüm pazar dahil olmak üzere, %75'lik bir paya sahiptir. Reçine iletim kalıplaması (RTM) prosesi, termoset kompozitlerin üretiminde ciddi bir yer tutmakta ve giderek artan şekilde kullanılmaktadır.

Bir model, fiziksel prosesin ya da sistemin idealleştirilmiş matematiksel gösterimidir. Kompozitlerin üretimi, yeni bir parçanın tasarım, geliştirme ve üretiminde deneyim, deney veya hata yöntemlerine dayanan sezgiye bağlıdır. Fakat, bu yaklaşım şekli, yeni prototip geometrileri geliştirmede zaman ve nakit bakımından pahalıya mal olduğu kanıtlanmıştır. İlgili riskler, birçok potansiyel endüstriyel uygulamaların kullanımını engellemiştir. Proses modellerin kullanımı tasarımdan prototip geliştirmeye kadar olan yolda ilerlemeyi hızlandırabilir. Bu nedenle, bu malzemeler ve işleme operasyonlarını maliyet bakımından metaller ve diğer malzemelerle rekabet etmektedir. Bu bağlamda polimer kompozit üretim teknikleri için proses modeller kurmada temel prensipler ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Kompozit proses modelleri, deneysel verilerden türetilen fiziksel fenomenler ile kurucu yasa anlayışına dayanan fiziksel yasalar, yaklaşık kabuller ve sınır koşulları temelinde kurulmaktadır. Model, matematiksel denklemlerle iyi ifade edildiğinde, proses ve malzeme değişkenlerindeki değişimlere cevap olarak, sistem davranışlarını belirlemek üzere çalışılabilmektedir. En az çaba ile rutin bir şekilde kompozit üretim prosesinin davranışını araştırmak için, proses model bir bilgisayar simülasyonunda gösterilebilir. Bilgisayar simülasyonu ya da sanal proses senaryosu şu aşamalardan oluşmaktadır:

- Matematiksel denklemlerle ifade edilen ideal proses modelleri
- Denklemleri çözmek için kullanılan sayısal yöntem
- Çözümü elde etmek için kullanılan bilgisayar programı

- Prosesin fiziksel davranışını taklit ederek, sonuçları grafiksel olarak gösterecek yazılım

Böyle sanal kompozit proses senaryoları proses için değerleri ve detaylı bilgi sağlayabilir ve proses değişkenlerinin etkisini anlamayı geliştirebilir.

Reçine iletim kalıplaması (RTM) proses modellerin kullanımında mükemmel bir örnek teşkil etmektedir (Sözer, 2000). RTM parçasının sadece dolun ve pişmesinde bile birçok fiziksel fenomen iç içe girmiş bulunmaktadır. Viskoz polimer, kalıp boşluğunu doldurmak üzere fiber preform ağı arasında oluşturulmuş kanallardan geçerek akmaktadır. Isı, kalıba kalıp çeperlerinden iletim yoluyla giriş yapmaktadır. Polimerin viskozitesini arttıran moleküller arası reaksiyon başlamaktadır. Açığa çıkan ısının da uzaklaştırılması gerekir. Tüm bu faktörler kalıbın tamamen dolup dolmadığını, kalıpta ne kadar süre kalacağını, parçanın ısıl gerilmeler nedeniyle çarpılıp çarpılmayacağını ve üretilen parçanın ısıl özelliklerini belirlemektedir.

RTM prosesin başarısı, jel oluşumu ve kuru bölgelerin yok olmasından önce gözenekli fiber matriksin tamamen ıslanmasına bağlıdır (Mohan 1999a). Fiber içinde reçine dölleme anlayışı, kalıp tasarımcısına; ilk olarak kuru bölge olmadan kalıbın tamamen dolununu sağlamak üzere fiber empriye edilmesi üzerinde enjeksiyon yeri ve havalandırma açıklıkları yeri etkisini anlamasına; ikinci olarak kalıp dolununu sırasında beklenen ani basınç dağılımı etkisini anlamasına; son olarak da kalıp dolun süresi bilgisini kullanarak üretim çevrimi optimizasyonunu anlamasına yardımcı olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı RTM prosesi çevresinde akış analizinin önemini vurgulamak , şu ana kadar yapılmış çalışmaların bir sunumunu yapmak ve izotermal analiz anlayışı ile kalıp dolununu fenomenini irdelemektir. Bu amaçla, plastik matriksli kompozit malzeme üretimi tekniklerinden genel olarak bahsedilmiş, bu teknikler içinde önemli bir yer tutan RTM prosesi ayrıntıları ile ele alınmış, proses modellemesinin bileşenleri açıklanarak RTM prosesinde Saf Sonlu Elemanlar Yöntemi yaklaşımı ile izotermal akış analizi uygulaması yapılmıştır.

2. İMALAT TEKNİKLERİ

Her malzeme eşsiz fiziksel ve mekanik özellikler ile proses karakteristiklerine sahiptir. Bu nedenle uygun imalat tekniği malzemeyi son kullanımdaki parçaya dönüştürmek için uygun imalat tekniklerinin uygulanması gerekmektedir. Bir dönüşüm metodu bir malzeme için çok uygun olabilir ancak diğer malzeme için etkili seçim olamayabilir. Örneğin, ahşap kolay işlenebilir bir malzemedir ve bu nedenle talaşlı işleme bir ahşap bloğu son şekline dönüştürmede oldukça kullanılan bir metottur. Seramik parçalar zor işlenirler ve bu nedenle tozdan sıcak presleme teknikleri uygulanarak imal edilirler. Metallerde, standart boyutlarda saclar, çubuklar ve levhalar talaşlı işlenebilmektedir. Sonra son parçayı elde etmek için kaynatılır ya da tutturulur. Genellikle, kompozit standart boyutlu saclar ya da levhalar talaşlı işlenmezler. Çünkü talaşlı işleme fiberleri keser ve fiberlerde süreksizlik yapar. Çıplak kalmış ya da süreksiz fiberler kompozitlerin performansını düşürmektedir. Kompozit prosesi, ağımsı parçaların elde edilmesinde kolaylıkla kullanılmaktadır. Kompozitler, metal parçaların prosesleriyle, ekstrüzyon, haddeme ya da döküm ile kıyaslandığında parça prosesi için yüksek basınç ve sıcaklık gerektirmez. Bu nedenle, kompozit parçalar basit ve düşük maliyetli takımlar kullanılarak ağımsı parçalara dönüştürülebilmektedirler. Belirli parçalarda, örneğin, bot gövdesinde, kompozit parçalar düşük basınçta ve oda sıcaklığında yapılır. Kompozitlerin prosesinde, metallere göre az enerji gereksinimi, hammaddeyi ağımsı parçalara dönüştürmede çeşitli yeni fırsatlar sunmaktadır. Ağımsı parçaları ya da ağ parçalar üretmede iki ana yarar bulunmaktadır. İlk olarak, talaşlı işleme gereksinimlerini ve dolayısı ile talaşlı işleme maliyetini azaltır. İkincisi, hurdayı azaltır ve bu nedenle malzeme tasarrufu sağlar. Kompozitlerin talaşlı işlenmesi, metallerin talaşlı işlenmesinden farklı bakış açısı gerektirmektedir.

Kompozit imalatı teknikleri, fiberler, reçineler, hasırlar, kumaşlar, prepregler (fiber iskeletler) ve kalıplama bileşenlerini içeren çeşitli kompozit hammadde tiplerini kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Her bir imalat tekniği farklı tipte malzeme sistemleri, farklı proses koşulları ve parça imalatı için farklı takımlar gerektirmektedir. Her bir teknik, proses, parça boyutu, parça şekli, parça maliyeti, vs konularında kendi avantaj ve dezavantajlarına sahiptir. Parça imalatının başarısı, doğru imalat tekniği seçimi yanında uygun proses parametrelerinin seçimine bağlı olmaktadır. Burada bahsedilen imalat teknikleri, termoset ve termoplastik esaslı kompozit malzemelerin imalatında ticari olarak mevcut olanlardır. Bu kısımda sınırları,

avantajları, ısı ve sıcaklık uygulama metotları, kullanılan hammadde ve diğer önemli parametrelerden bahsedilecektir.

2.1 İmalat Prosesi Seçim Kriterleri

Bir parçanın imalatı için doğru imalat prosesi seçimi tasarım ve imalat mühendisleri için muazzam bir çaba gerektirmektedir. Bunun nedeni, tasarım ve imalat mühendislerinin parçayı üretmede hammadde ile proses teknikleri adına çok fazla seçimi olmasından kaynaklanmaktadır. Bir prosesin seçimi, imalat hızı, maliyeti, dayanım ve parça için boyut-şekil gereksinimine bağlıdır.

2.1.1 İmalat Hızı

İmalat hızı, imalata ve pazar ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı olmaktadır . Örneğin, otomotiv pazarı, yüksek imalat hızına sahiptir, örneğin, yılda 10.000 birim (günde 40) dan yılda 5.000.000 (günde 20.000) e değişebilir. Havacılık pazarında, imalat gereksinimleri genellikle yılda 10 ile 100 aralığındadır. Benzer olarak, düşük hacimli ve yüksek hacimli kütleli seri imalat çevrelerine uygun olan kompozit imalat teknikleri vardır. Örneğin, elde yatırma ve ıslak yatırma prosesleri yüksek hacimli imalat için kullanılamaz. Bunun yanında sıkıştırma kalıplama ve enjeksiyon kalıplama yüksek hacimli kütleli seri imalat ihtiyaçlarını karşılamak için kullanılmaktadır.

2.1.2 Maliyet

Birçok tüketici ve otomobil pazarı maliyet hassasiyetine sahiptirler ve yüksek imalat maliyetlerini kaldıramazlar. Maliyeti etkileyen faktörler, takım imalatı, işçilik, hammadde, proses çevrim zamanı ve montaj zamanıdır. İmalatı düşük maliyetli parçalarda iyi olan bazı kompozit proses teknikleri olduğu halde, diğerlerinin maliyeti yüksektir. Bir parçanın maliyetini belirleme, kolay bir görev değildir ve maliyet belirleme tekniklerini anlaşılması gerekmektedir. Bir parçanın maliyeti imalat hacmi ihtiyacından da önemli oranda etkilenmektedir. Çeşitli maliyet tahmin teknikleri, parçaların son maliyetini etkileyen çeşitli parametreler bulunmaktadır.

2.1.3 Performans

Her kompozit prosesi farklı başlangıç malzemeleri kullanmaktadır ve bu nedenle parçanın son özellikleri farklıdır. Kompozit parçanın dayanımı, fiber tipi, fiber uzunluğu, fiber yönlmesi ve fiber oranı (kural olarak %60-70 en sağlam) 'a çok bağlıdır. Örneğin, sürekli fiber kompozitler,

kısa fiberlerden daha yüksek rijitlik ve dayanım vermektedir. Uygulama ihtiyacına bağı olarak, uygun hammadde ve dolayısıyla uygun kompozit imalat tekniğı seçilir.

2.1.4 Boyut

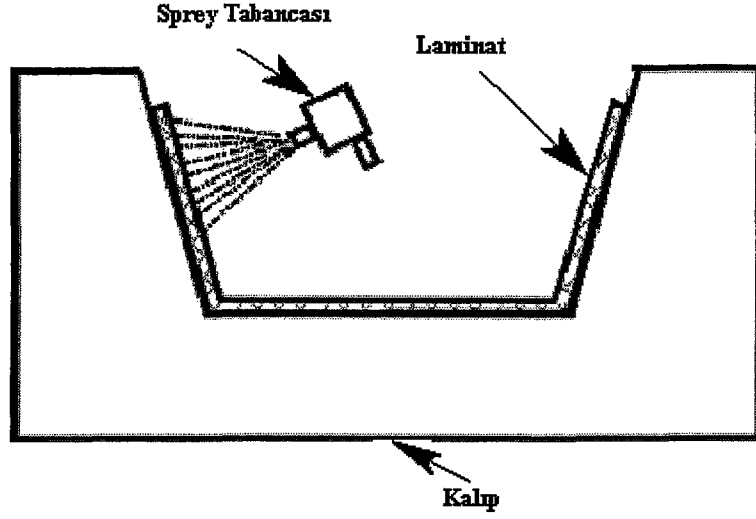
Parçanın boyutu ayrıca imalat proseslerinde tercih faktörüdür. Otomobil pazarı tipik olarak , havacılık ve denizcilik endüstrisine kıyasla daha ufak boyutlu kompozitler gerekmektedir. Ufaktan orta boyutluya kadar olan bileşenler için, kapalı kalıplamalar tercih edilir. Bunun yanında büyük yapılar, örneğin tekne gövdesi gibi, açık kalıplama prosesleri tercih edilir. Çizelge 2.1, kompozit imalat tekniklerini parça boyutu cinsinden uygunluğunu göstermektedir.

Bir parçanın şekli, imalat tekniğinin seçiminde ayrıca karar verici bir rol oynamaktadır. Örneğin, filament sarma, basınçlı kap ve silindirik şekiller için en çok uygun olan metottur. Uniform kesitli uzun parçaların, örneğin dairesel ve dörtgensel parçaların imalatında pultrasyon çok ekonomiktir. Çizelge 2.1, her bir imalat metodunu yukarıdaki faktörler temel alındığında karakteristik özelliklerini göstermektedir. Parçanın maliyet kategorisi, imalat donanımını tam kapasite çalıştığında gösterilir.

Çizelge 2.1 deki proses seçim kriterleri imalat seçimlerinin ön gösteriminde kullanışlıdır. Bir prosesin son seçimi, yukarıdaki değişkenler cinsinden (ör. Maliyet, hız ve boyut) detaylı bir çalışma yapılır.

Çizelge 2.1. Proseslerin çeşitli yönlerden karşılaştırılması (Sanjay K. M., 2002)

Proses	İmalat Hızı	Maliyet	Dayanım	Boyut	Şekil	Hammadde
Filament Sarma	Yavaştan Hızlıya	Düşükten hızlıya	Yüksek	Küçükten Büyüğe	Silindirik ve Simetrik olmayan	Epoksi ve polyester reçine ile sürekli fiberler
Pultrasyon	Hızlı	Düşükten Ortaya	Yüksek(düşey doğrultu boyunca)	Uzunlukta sınırlama yok; kesitte ufaktan ortaya	Sabit Kesit	Genellikle polyester ve vinilester reçineleri ile sürekli fiberler
Elle Yatırma	Düşük	Yüksek	Yüksek	Ufaktan büyüğe	Basitten Karmaşığa	Epoksi reçine ile prepreg ve kumaşlar
Islak Yatırma	Düşük	Orta	Ortadan Yüksekçe	Ortadan Yüksekçe	Basitten Karmaşığa	Polyester ve epoksi reçine ile kumaş/hasır
Spreyleme	Ortadan Hızlıya	Düşük	Düşük	Ufaktan ortaya	Basitten Karmaşığa	Katalize edilmiş epoksi ile kısa fiber
RTM	Orta	Düşükten ortadan	Orta	Ufaktan ortaya	Basitten Karmaşığa	Vinilester ve epoksi ile preform ve kumaşlar
SRIM	Hızlı	Düşük	Orta	Ufaktan Ortaya	Basitten Karmaşığa	Polizokriyanurat reçine ile kumaş ya da preform
Sıkıştırma Kalıplama	Hızlı	Düşük	Orta	Ufaktan Ortaya	Basitten Karmaşığa	Kalıplı bileşen (ör. SMC, BMC)
Basma	Hızlı	Orta	Orta	Orta	Basitten Çevreli	Termoplastik (bant) ile emdirilmiş kumaş
Enjeksiyon Kalıplama	Hızlı	Düşük	Düşükten Ortaya	Ufak	Karmaşık	Paletler (Termoplastik ile kısa fiberler)
Merdane Sarma	Ortadan Hızlıya	Düşükten Ortaya	Yüksek	Ufaktan Ortaya	Tüp Şeklinde	Prepregler



Şekil 2.1. Spreyleme prosesi

2.2 Parça İmalatı Gereksinimleri

Herhangi bir kompozit parça imal edebilmek için, dört ana öge gerekmektedir:

Hammadde

Takım/Kalıp

Isı

Basınç

Seçilen imalat prosesine bağlı olarak, uygun bir hammadde seçilmekte ve takım/kalıba yatırılmaktadır. Sonra, hammaddeyi son şekle dönüştürmek için ısı ve basınç uygulanmaktadır. Farklı malzeme sistemleri için farklı ısı ve basınç gerekmektedir. Genelde, malzemenin ne kadar yüksek erime sıcaklığı olursa, o kadar proses için ısı ve basınç gerekmektedir. Örneğin, yüksek sıcaklıklarda ergiyen çelik parçayı, diğer malzeme çeşitlerine göre daha yüksek sıcaklıklar ve basınçlarda işlemek gereklidir. Yaklaşık 500° C'de ergiyen alüminyum, şekli dönüştürmek için çeliğe kıyasla daha az ısı ve basınç gerektirir. Termoplastikler 100 ile 350° C arasında ergime sıcaklıklarına sahiptir ve bu nedenle çelik ve alüminyuma kıyasla daha az ısı ve basınç gerektirir. Termosetler oda sıcaklığında sıvı durumdadır ve bu nedenle şekil verme ve işlenmeleri kolaydır.

Termosetler malzemenin hızlı pişmesi için ısıya ihtiyaç duyarlar. Termosetlerin sıcaklık ihtiyacı reçine formülüne ve pişme kinetiğine bağlıdır. Kompozitlerde, fiberler erimezler bu nedenle ısı sadece matriks malzemesi ile uygun birleşmesi için gerekli olmaktadır.

Bir imalat prosesi sırasında daha yüksek basınç ve sıcaklık ihtiyacı, takım imalat maliyetini arttıran güçlü ve ağır takımlar gerektirmektedir. Daha yüksek takım maliyetine ilaveten, daha yüksek basınç ve sıcaklık artan proses maliyetinin diğer bir kaynağı olan özel ekipman gerektirmektedir. Örneğin, SMC kalıplama sırasında daha yüksek basınç gereksinimi, büyük ve hacimli ekipmanlar ile genellikle 1 milyon \$'dan fazla maliyet gerektirmektedir. İdeal imalat prosesi çok ısı ve basıncı fazla miktarda kullanan ve önemli proses maliyet tasarrufunu sağlamak için hızlı işleyen bir proses olacaktır.

Her proses hammaddeyi son şekle dönüştürecek bir takım setine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, bir imalat metodunun başarısı takımın kalitesine bağlı olmaktadır.

2.3 Kalıp ve Takım İmali

Herhangi bir parçanın geliştirilmesi için en çok önemli üç önemli adım; parça tasarımı, proses mühendisliği ve kalıp mühendisliğidir. Açıkça, bunlar bağımsız değildir ve parça tasarım mühendislerinin kalıp imalatçıları ile imalat mühendislerinin sınırlamalarını düşünmeleri gerekmektedir. Parça tasarımcıları çok güzel estetikle mükemmel tasarımlar çizebilir fakat parça ekonomik olarak üretilemez ise, bu muhteşem tasarımın hiçbir önemi yoktur.

Kalıp ve takım imalatı kompozit imalat alanında uğraştıran bir bölümdür. Bir takım hammaddeyi verilen şekle dönüştürür. Takım ya da kalıp kullanılmadan, hammaddenin son boyut ve biçimine getirilmesi mümkün değildir.

İmalat tekniğine bağlı olarak takım seçimi yapılmaktadır. Örneğin, filament sargı, hammaddeye yatırılmış mandrelleri kullanmaktadır. RTM kapalı kalıbı, pultrasyon kalıbı ve ıslak yatırma prosesi FRP kalıplarını son parçada istenen şekli sağlamak için kullanmaktadır. Parçanın kalitesi ve son yüzeyi ağırlıklı olarak takımın son yüzeyine bağlıdır.

2.3.1 Kalıp Tasarım Kriterleri

2.3.1.1 Kendini Çekme

Kalıp tasarımında, kompozit malzemenin kendini çekmesi, parça piştikten sonra son parçanın istenen boyut ve şekilde olduğunu garantilemek için hesaba katılır. Kendini çekme, hacimde ya da doğrusal boyutlarda reçinenin pışmesi ve ayrıca malzemenin ısıl etkileşimi ile meydana gelmektedir. Bir kompozit malzeme, ayrıca kalıp malzemesi için, kendini çekmeye izin verilmesi parça ve kalıbın tasarımında hesaba katılmakta ve belirlenmektedir.

2.3.1.2 Takım Malzemesi ve Parçanın Isıl Genleşme Katsayısı

Isıl genleşme katsayısı , kalıp tasarımında önemli bir parametredir. Her malzeme, belirli bir sıcaklığa ısıtıldığında farklı yönlere genişler. Kalıbın ve kompozit parçanın ısıl genleşme katsayısı kalıcı gerilmeleri önlemek ve son parçada boyutsal tamlık için birbirine çok yakın olması gerekmektedir. Oda sıcaklığı pışme sistemi için, ısıl genleşme katsayısı faktörü önemli değildir.

2.3.1.3 Kalıbın Rijitliği

Parça imalat, sırasında, özellikle kapalı kalıp operasyonlarında kalıp önemli ölçüde basınca maruz kalır. Böyle basınçlar altında, kalıp deforme olmamalıdır, aksi halde parçada çarpılmalara neden olur. Kalıp proses basınçlarını karşılayacak yeteri derecede rijit olmalıdır.

2.3.1.4 Yüzey Bitirme Kalitesi

Son parçanın yüzeyi, kalıbın yüzey kalitesine bağlıdır. A sınıfı yüzey kalitesinde bir parça elde etmek için, takım yüzeyi yüksek kalitede olmalıdır. Parça imalatı sırasında, takım yağlanır ve parçadaki yabancı maddelerin karışmasını önlemek için kir uzaklaştırılır. Pultrasyon prosesi için ve bot gövdesi ve otomotiv parçaları için kalıplar çok fazla yüzey kalitesinde olmalıdırlar.

2.3.1.5 Çizim ve Köşe Yuvarlatmaları

Düşey yüzeylerde, 1° açı önerilmektedir. Daha fazla çizim açısı daha iyi malzeme akışı, azalan eğrilmeler ve daha kolay kalıptan ayrılma sağlar. Keskin köşeler kalıp ve parça tasarımı sırasında kaçınılması gerekmektedir. Minimum iç köşe radyusu 0.08 in (2 mm) ve minimum dış köşe

radiusu 0.06 in (1,5 mm) köşelerden daha iyi akması ve parçanın çıkmasında kolaylık için önerilmektedir.

2.3.2 Takım İmalat Yöntemleri

2.3.2.1 Talaşlı İşleme

Ufaktan orta boylu parçalar için kalp imalatında malzeme bloğunun talaşlı işlenmesi çok geneldir. Filament sarma mandrelleri, pultrasyon kalıpları, sıkıştırma kalıplama, RTM ve SRIM için kalıplar bu prosesi kullanarak yapılırlar. Bir mandrel yapmak için, bir çelik çubuk alınır ve istenen çapı elde etmek için talaşlı işlenir. Mandrelin yüzeyi taşlanır ve krom kaplanarak düzgün ve parlak yüzey elde edilir. Çeşitli kalıplama prosesleri için kalıp yapmak için, yarı mamül (genelde takım çelikleri) alınır ve CNC tezgahlarda işlenir ve istenen şekli elde etmek için taşlama tezgâhı kullanılır. FE (sonlu elemanlardan) veri analizi ya da CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) modeli makineye aktarılır ve istenen yüzey elde edilir. Elektroerozyon, karmaşık şekilli kalıp yüzeyini elde etmede uygulanır. Elektroerozyonun iki ana tipiden dalma ya da daldırma adı verilen çeşidi kalıp boşluklarını yapmada kullanılır; tel erozyon ise basma kalıpları için gerekli şekilleri kesmede kullanılır. Kapalı kalıplama operasyonları için, örneğin RTM, SRIM, enjeksiyon kalıplama, iç/dış kapı ve girişler, hammaddenin kaçışını ve beslenmesini sağlar. Çıkış yolluğu (havalandırma) iki işlevi vardır: kalıptan havanın kaçması ve kalıbın reçine malzemesiyle tam dolmasını sağlamak. Isıtma ve soğutma aygıtları kalıba yerleştirilir. Kapalı kalıp operasyonları ağ şekil ya da ağımsı şekilli parçaların imalatına izin vermektedir.

Prototip inşa operasyonlarında, ahşap, sirtö köpük, plastik ve diğer malzemeler talaşlı işlenir ve kalıp olarak kullanılırlar.

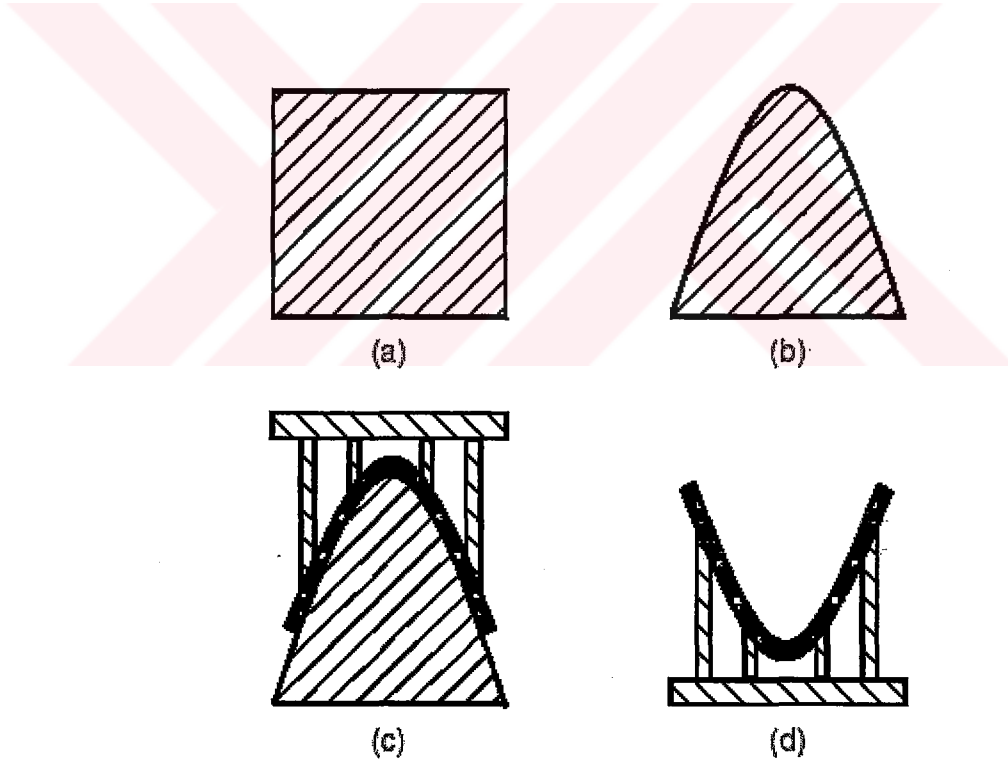
2.3.2.2 Açık Kalıplama Prosesleri İçin FRP Takımları

Fiber takviyeli plastik (FRP) takımları, elde yatırma, ıslak yatırma ve spreyleme prosesleri gibi açık kalıp operasyonları için öncelikle imal edilmektedirler. Açık kalıplar, ana parçadan yapılırlar. Hem, kompozit bileşenleri inşa edilmiş kalıplarla hem de yapılan kalıplardan ana parça (modeller ya da tampon) son parçanın kalitesi noktasında kritik olmaktadır. Ana parça, bot gövdesi, otomobil tamponu ya da sacı gibi olan bir parça olabilir ya da metali ahşap, plastik, köpük ya da Şekil 1'da gösterilen diğer herhangi bir malzemedan bir bloğun talaşlı işlenmesiyle imal edilmektedir.

Rijit bloktan talaşlı işleme ile ana modelin elde edilmesi Şekil 2.2a ve b' de gösterilmiştir. Ana model, kalıpta kumlama ve ovalama miktarını azaltmak için parlak ve hatasız olmalıdır.

Ana model hazır olduğunda, kalıptan kolay ayrılması için serbest ajanla mumlanır. Ana model, serbest ajanla değişik doğrultularda üç ya da dört kez mumlanır ve her tabaka uygulandıktan sonra sertleştirilmesi sağlanır.

Sonraki adım, takım jeli kaplamasını ana model yüzeyine uygulamaktır. Takım jeli kaplaması kalıpta sert, parlak ve uzun süreli bir yüzey oluşturur. Bir fırça ya da spreyleme ekipmanı ile uygulanır. Jel kaplama uygun şekilde uygulandığından emin olmak için, yüzeye hafifçe parmakla dokunulur. Eğer parmak yapışmaz ya da jel yüzeyinde hafif parmak izi bırakmaz ise laminasyon için hazırdır.



Şekil 2.2. Bitmiş ana model ve tabakalı kalıp imalatında adımların gösterilmesi: (a) katı blok (b) talaşlı işlenmesinden sonra ana model; (c) destekli tabakalı kalıplar; ve (d) bitmiş kalıp

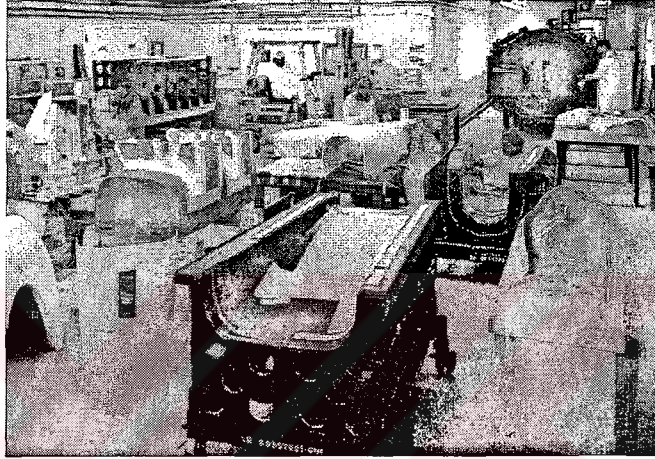
Çizelge 2.2. Çeşitli takım malzemelerinin ısı genleşme katsayıları ve işletme sıcaklıkları (Sanjay K. M., 2002).

Takım Malzemesi	Isıl Genleşme Katsayıları μ mm/mm °C	Maksimum İşletme Sıcaklığı °C
Paslanmaz Çelik	4,44-6,67	540
Alüminyum Alaşımları	6,67-7,5	150-260
Oda sıcaklığında pişmiş karbon/epoksi prepeg	0,78	150-200
Ortalama sıcaklıkta pişmiş karbon/epoksi prepeg	0,78	150-200
Karbon/sianat ester prepeg	0,83-1,11	230-370
Karbon/BMI prepeg	1,11-1,67	230-260
Oda sıcaklığında pişmiş cam/epoksi prepeg	3,89-4,44	150-200
Ortalama sıcaklıkta pişmiş cam/epoksi prepeg	3,89-4,44	150-200
Epoksi esaslı takım levhası	16,67-22,22	65-200
Üretan esaslı takım levhası	19,44-27,78	120-150

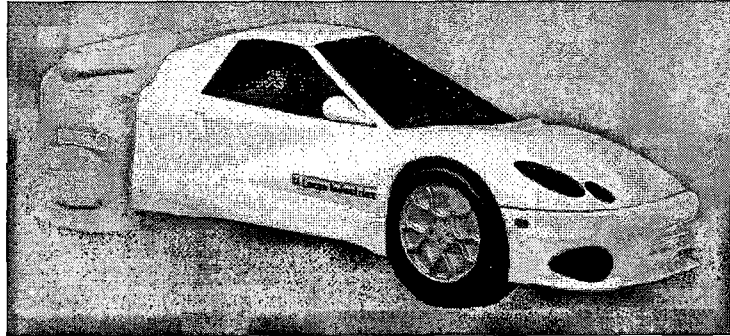
Jel kaplama hazır olduktan sonra, bir spreyleme tabancası kısa fiber kompozitleri tabakalaştırmak için kullanılır. Prepeg malzeme ya da ıslak kumaş ayrıca laminasyon için kullanılabilir. Havacılık uygulamaları için, prepegler genellikle laminasyon için kullanılmaktadır. Banyo küvetleri ya da bot gövdeleri için, kalıp imalatında spreyleme prosesi ya da spreyleme ile ıslak kumaş laminasyonunun bir bileşeni kullanılmaktadır. Büyüklük ve rijitlik yönünden kritik yapılar, ahşap ya da köpük çekirdek malzeme, sandviç yapı elde etmek için laminasyon içine gömülmektedir. Takım malzemelerinin çeşitli tipleri, Tablo 2.2' de gösterildiği gibi, kalıp destek malzemesi olarak mevcuttur.

Kalıp hazırlandığında, beşik denilen geri destek yapısıyla kalıbı desteklemek için, Şekil 2.1 c'de gösterildiği gibi güçlendirilir. Beşik, ahşaptan ya da çelikten imal edilmiştir; fakat bağlantıda k beşiğin kalıptan izole edilmesi önemlidir. Bu, kalıp ile beşik arasında pul koyarak elde edilebilir. Pullar mukavva, köpük ya da iç hasırdan yapılır ve kalıpla temas haline geldiği herhangi bir yere yerleştirilir. Beşik, kumaş ya da reçine laminasyonu ile kalıba sabitlenir. Reçinenin pul malzemesine akmaması için dikkat edilmelidir.

Şekil 2.3, ana model, geri destekli tabaklandırılmış kalıplar, kontrol şablonları, vs içeren bir takım atölyesinin fotoğrafı gösterilmektedir. Şekil 2.4, aeromark 80 sıvı bloktan CNC işleme ile elde edilen bir otomobil şeklinin prototip görülmektedir; özgül ağırlığı 8lb (3,6 kg) köpük dolgu malzemesi kullanılmış, 2 in (50,8 mm) kalınlıkta sıvı blok işlenmiş köpük yapının üzerine uygulanmıştır. Katı model bloğun üstüne bu hafif köpük kullanımı, ağır ve pahalı taban plakası ihtiyacını saf dışı bırakır ve malzeme maliyetinde al kademe tasarruf sağlar.



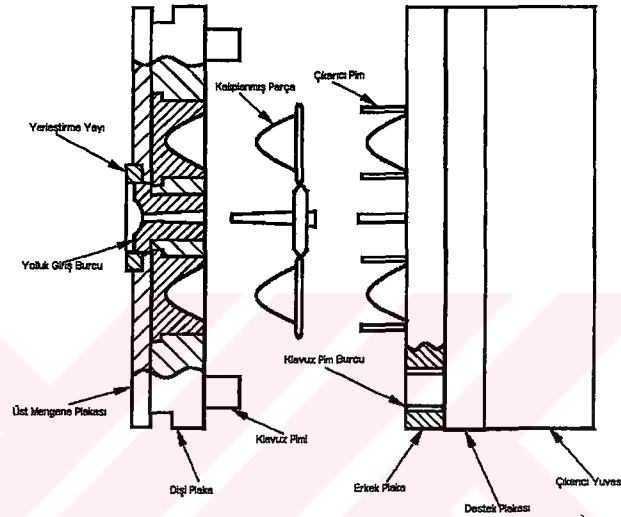
Şekil 2.3. Ana modeller ve tabaklandırılmış kalıplar (Lucas Industries)



Şekil 2.4. Sıvı bloktan araba şeklinin yapılması (Lucas Industries)

2.3.3 Kapalı Kalıp Operasyonları Takımlarında Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

RTM, SRIM ve enjeksiyon kalıplama gibi kapalı kalıp operasyonlarında, kalıp malzemesi, kapama kuvveti ve ayrıca enjeksiyon basıncını karşılayacak derecede güçlü olması gerekmektedir. Kapama kuvvetinin kalıpta meydana getirdiği gerilmeler, parça ve kalıpta yeteri kadar çarpılma meydana getirebilecek kadar yüksek olabilmektedir.



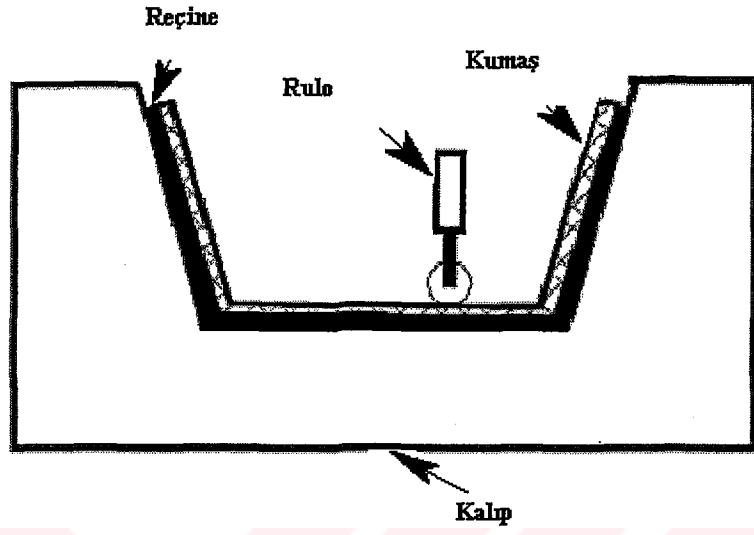
Şekil 2.5. Enjeksiyon prosesi için iki plakalı kalıp

Bunlar, konservatif malzeme dayanımı analizi kullanarak, parça hatalarının imalat toleransı dışında oluşmadığını belirlemek için kontrol edilmelidir. Kapalı kalıplama operasyonları için, yolluk giriş yeri ya da içeri ve dışarı çıkış yeri kalıp tasarımında çok kritik olmaktadır. RTM prosesleri için, kalıp içinde reçine akışını sayısal olarak simüle edecek çeşitli bilgisayar modelleri geliştirilmiştir. Bu simülasyon modelleri, kalıp tasarımı aşamasında, optimal giriş ve havalandırma yerleri ve çoklu giriş olduğunda optimal enjeksiyon sırasını tahmin etmede kullanılmaktadır. Böylece minimal iç basınç ve dolun zamanı hedefi tutturularak eksik kalıp dolunu veya kuru noktalar önlenmiş olur. Simülasyon modelleri potansiyel sorun noktalarını tanımlar ve tasarımcıya – pahalı kalıbın kayda değer şekilde değişimi ya da terk edilmesi gereken yerlerde daha pahalı ampruk yaklaşımın yerine- bilgisayarda çeşitli enjeksiyon stratejilerine izin verir. Bilgisayar modelleri termoplastik enjeksiyon kalıplama prosesleri için geniş şekilde kullanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplama prosesi kalıpları çok pahalıdır ve bu bilgisayar modelleri kayda önemli kalıp tasarımı maliyeti tasarrufu sağlar. Şekil 2.5, enjeksiyon kalıplama prosesi için

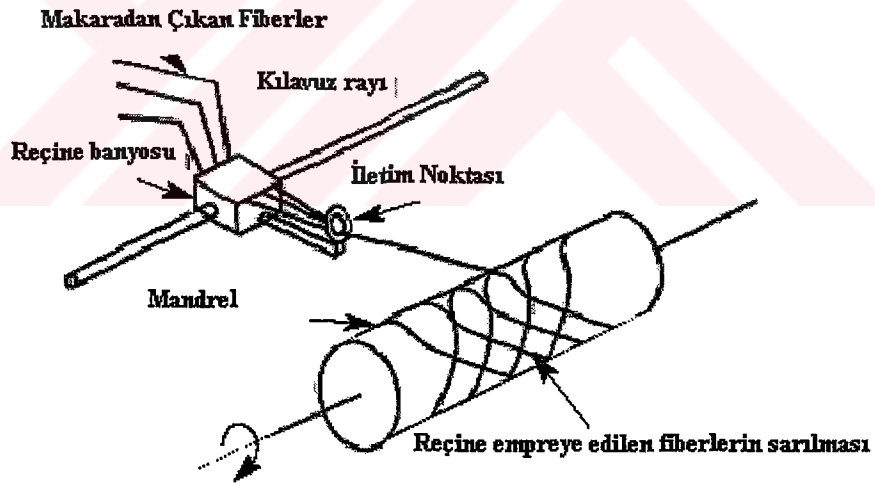
iki plakalı kalıbı göstermektedir. İki plakalı kalıp basit şekildedir ve enjeksiyon kalıplama endüstrilerinde daha geneldir. İki plakalı kalıpta köşe giriş noktaları Şekil 2.5' de gösterilmiştir. Hammadde yolluk giriş burcu boyunca enjekte edilir ve yolluklar boyunca boşluklara ulaşır. Yolluk giriş, yolluk ve meme sisteminin amacı sıvı reçineyi iletmek ya da uniform şekilde ergitmek ve her bir boşlukta minimum basınç ve sıcaklık düşüşü ile bunu sağlamaktır. Akışın uniformluğu, her bir giriş noktası boyunca eş akış hızı ve dolayısıyla boşluk girişte eş basınç demektir. Çoklu boşluklar enjeksiyon kalıplama endüstrisinde oldukça yaygındır. RTM'de çoklu boşlukların kullanımı daha az yaygındır ve ufak parçaların imalatında kullanılmaktadır. Örneğin, hokey sopaları, eş zamanlı olarak, kalıplamadan boşaltıma imalat çevrim zamanı yaklaşık 14 dak. olarak bir RTM prosesinde imal edilebilir. Bir RTM prosesinde büyük parçaların imalatında, tek boşluklu kalıplar çoklu giriş noktaları yapılı. Çoklu giriş, çevrim zamanını hızlandırmak için, ayrıca yüksek enjeksiyon basıncı ihtiyacını dindirmek için kullanılmaktadır. Şekil 2.6, kar tahtası imalatı için bir kalıbı göstermektedir. Kalıplar, bütünsel olarak ısıtılır ve cam fiber /epoksi üretilen çekirdekli kar kayağının laminasyonundan hemen önce termoplastik alan sacını vakumlamak için alt kalıp yarısı ortalama 1400 havalandırma boşluğu bulunmaktadır. Şekil 2.6, karbon fiber tenis raketi imalatı için eşleme kalıplarını göstermektedir. Prepreg iç basınç kesesi ile parçanın imalinde kullanılır. Aerodinamik helikopter gövde bileşenleri için takım imalatı Şekil 2.9' de gösterilmiştir. Bu koni ve yarım koni takımlar helikopter dış yakıt tankları için aerodinamik gövde imalatında kullanılmaktadır.



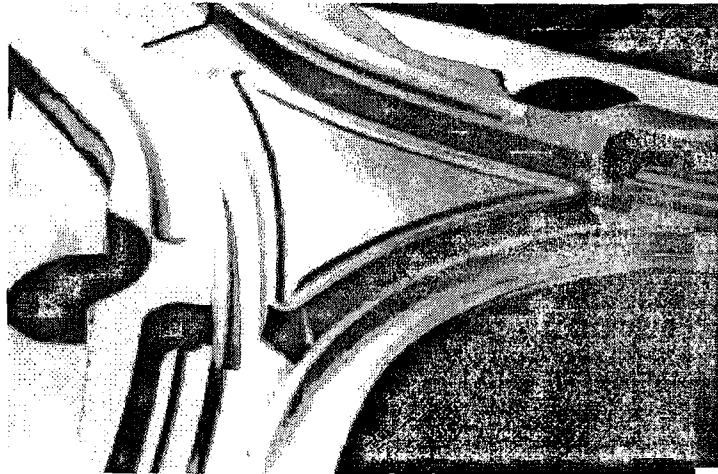
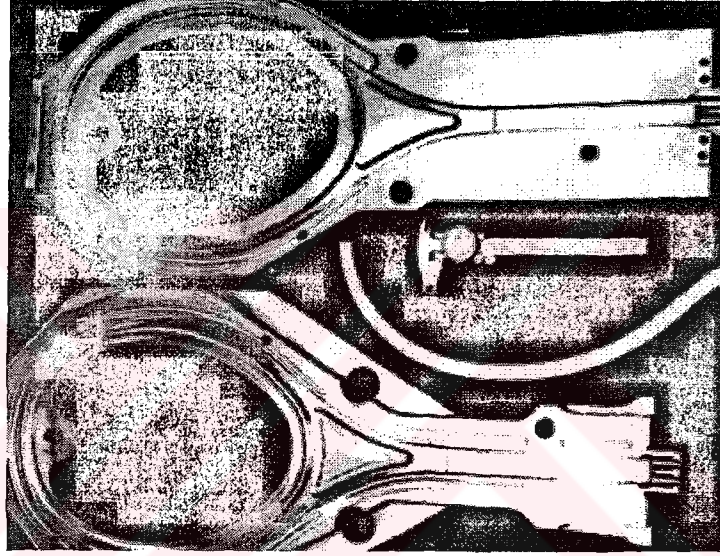
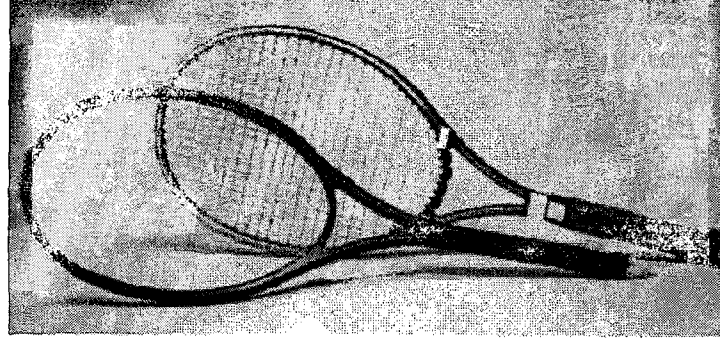
Şekil 2.6. Cam fiber/epoksi kar kayağı için takım (Lucas Industries)



Şekil 2.7. Islak yatırma şematığı



Şekil 2.8. Filament sarma

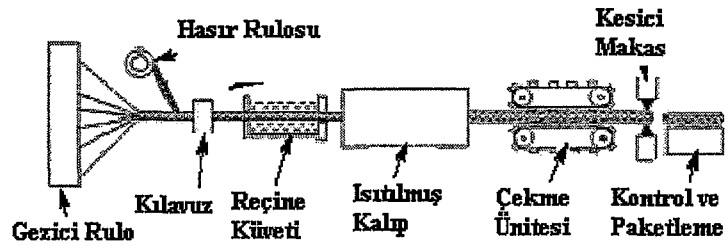


Şekil 2.9. Karbon fiber tenis raketi için takım (Radius Engineering Inc.)

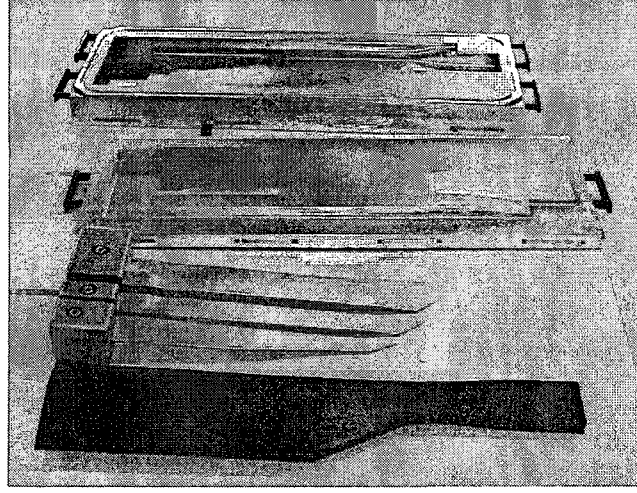


Şekil 2.10. Aerodinamik helikopter karenej bileşeni için takım (Radius Engineering, Inc)

Karenej, prepreg hale getirilmiş cam fiber epoksiden elde edilmiştir. Yüksek fiber hacim ve düşük boşluk içerik parçaları eşlenik takı setlerinde üretir. Şekil 2.12, helikopter kuyruk rotor parçaları için alüminyum takımlarını göstermektedir. Karbon/epoksi kuyruk rotor parçası fotoğrafın altında gösterilmektedir. Bu parça RTM prosesi ile imal edilmektedir. Şekil 2.12' in en üstte iki eleman, kalıbın üst ve alt yarısını göstermektedir ve üstten üçüncü eleman ise rotor parçasında kaburga kesimlerini imal etmek için kalıbın içine yerleştirilen üç alüminyum mandreli göstermektedir. Karbon kumaşlar, bu mandrellerin çevresine sarılır ve kalıbın içine yerleştirilir. Kalıp sonra kapatılır ve epoksi reçine parçayı takviye etmek için enjekte edilir. Pişmesinden sonra, parça kalıptan, mandreller gibi çıkartılır.



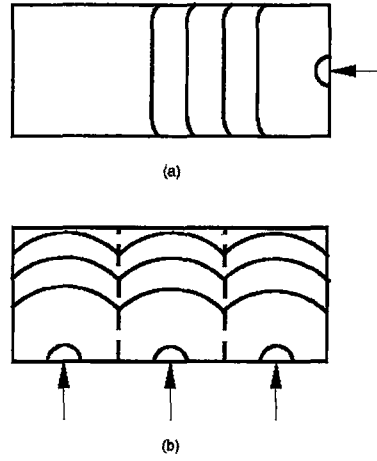
Şekil 2.11. Pultrasyon Prosesi



Şekil 2.12. Helikopter kuyruk rotoru imalatı için takım. Karbon/epoksi kuyruk rotoru altta gösterilmektedir. (Radius Engineering, Inc)

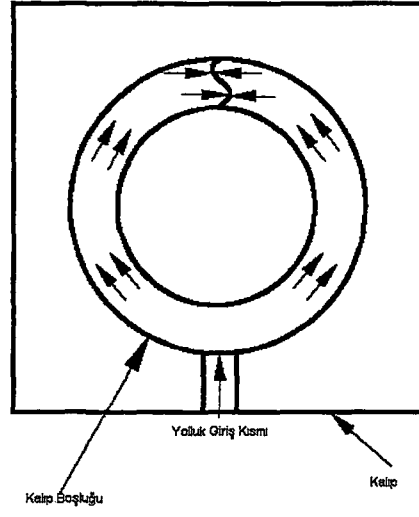
Kapalı kalıplama operasyonları için içeri giriş ya da yolluk tasarımı için dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır:

1. Yüksek akış uzunluğu / kalınlık oranlarına sahip ince cidarlı parçalar, örneğin hokey sopaları, için, eşit akış uzunlukları sağlamak ve akış dağılım problemlerini önlemek üzere iki ya da daha fazla meme giriş noktaları yapmalıdır.
2. Reçinenin ya da ergiyin akışının uniform olarak en büyük boyutlar boyunca akacağı yerlere, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi giriş kısımlarını yerleştirmelidir. Tek girişli kalıplar için, kısa tarafa, çoklu giriş için uzun tarafa, Şekil 2.13' daki gibi, alanı iki eş parçaya bölmek için yerleştirmelidir. $6,5 \text{ cm}^2$ alan, 133 cm uzunluğunda, 2 mm cidar kalınlığındaki bir hokey sopası imal etmek için, bir çıkıştan eğer reçine enjekte edilirse, bir RTM prosesinde kalıp dolumu yaklaşık 30 dak. tutar.
3. Parça görüntüsünün önemli olduğu parçanın açık tarafına yolluk girişini yerleştirmekten sakınmalıdır.

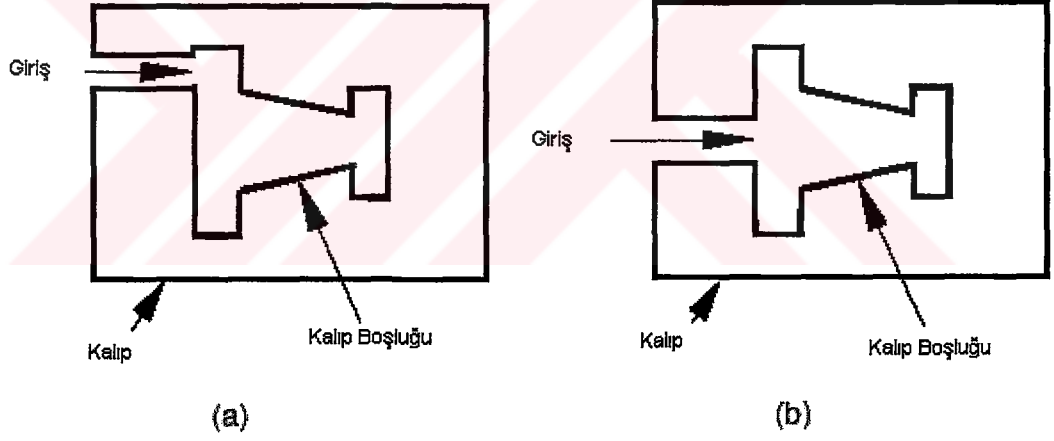


Şekil 2.13. Akış cephesinin tekli ve çoklu boşluklar için gösterimi: a) Kısa kenarda tekli girişte akış cephesi ve b) çoklu girişte akış cephesi

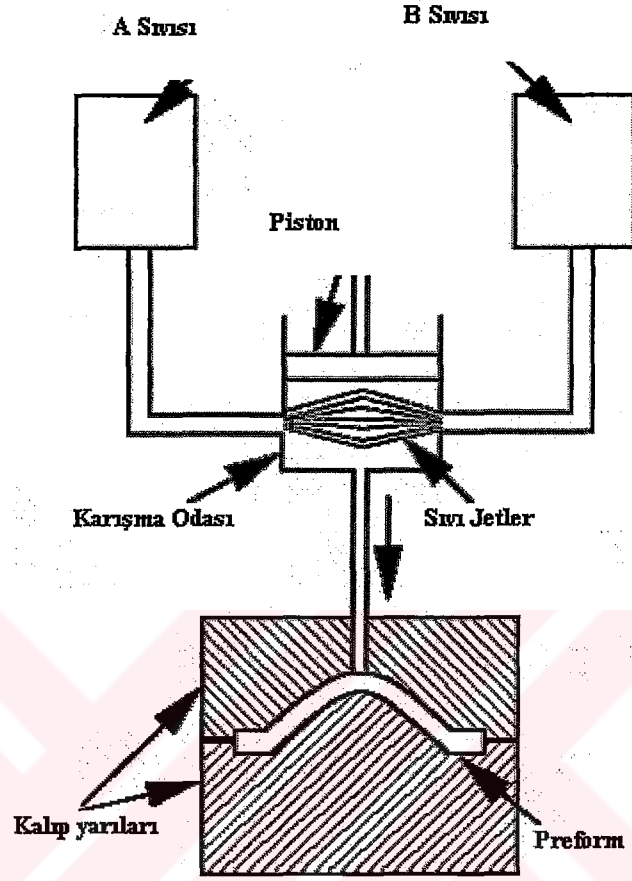
4. Kaynak çizgilerini önleyecek şekilde giriş noktaları yerleştirilmelidir. Enjeksiyon kalıplamada ayrıca SMC parçalarının basma kalıplamasında kritik olmaktadır. Kaynak çizgileri, iki akış cephesinin çakışması ya da iki paralel akımın üst üste binmesiyle oluşur (Şekil 2.14). Kaynak çizgileri parçanın zayıflatılmış alanıdır ve görüntüyü etkiler. Yüksek takviye oranı, kaynak çizgilerinin ters etkilerini düşürmektedir.
5. Giriş yerlerini, reçine akışı ventillerden (çıkış noktası) ya da parça düzlemi boyunca hava ile doğal olarak yer değiştirecek şekilde yerleştirilmelidir.
6. Sonra dolan ve boşluk ya da kuru noktaları olabilecek kuru bölgeleri önleyecek şekilde giriş yerleri yerleştirilmelidir (Şekil 2.14). Şekil 2.14b'de gösterildiği gibi, gelen reçine kalıp içinde fişkirabilir. Hapsolmuş hava ya da boşlukların dolmayan bölgeleri olabilir. Bu senaryo, özellikle kısa fiberli kompozitlerin enjeksiyon kalıplaması durumunda önlenebilir. Şekil 2.14a, da reçine cephesi akış direnci ile karşılaşmakta ve fişkırma problemini önlemektedir.
7. Kalın kesitinde, eksik dolun ya da batma izlerini önlemek için yolluk yerleştirilmelidir. Sonra, daha kalın kesitlerin dolmasını sağlayacak şekilde yüksek enjeksiyon hızı kullanılmalıdır.



Şekil 2.14. Kalıp dolumu sırasında kaynak hatlarının oluşumunun gösterimi



Şekil 2.15. Tavsiye edilen (a) tavsiye edilmeyen (b) yolluk giriş kısmı



Şekil.2.16. SRİM (Yapısal Reçine Enjeksiyon Kalıplaması)

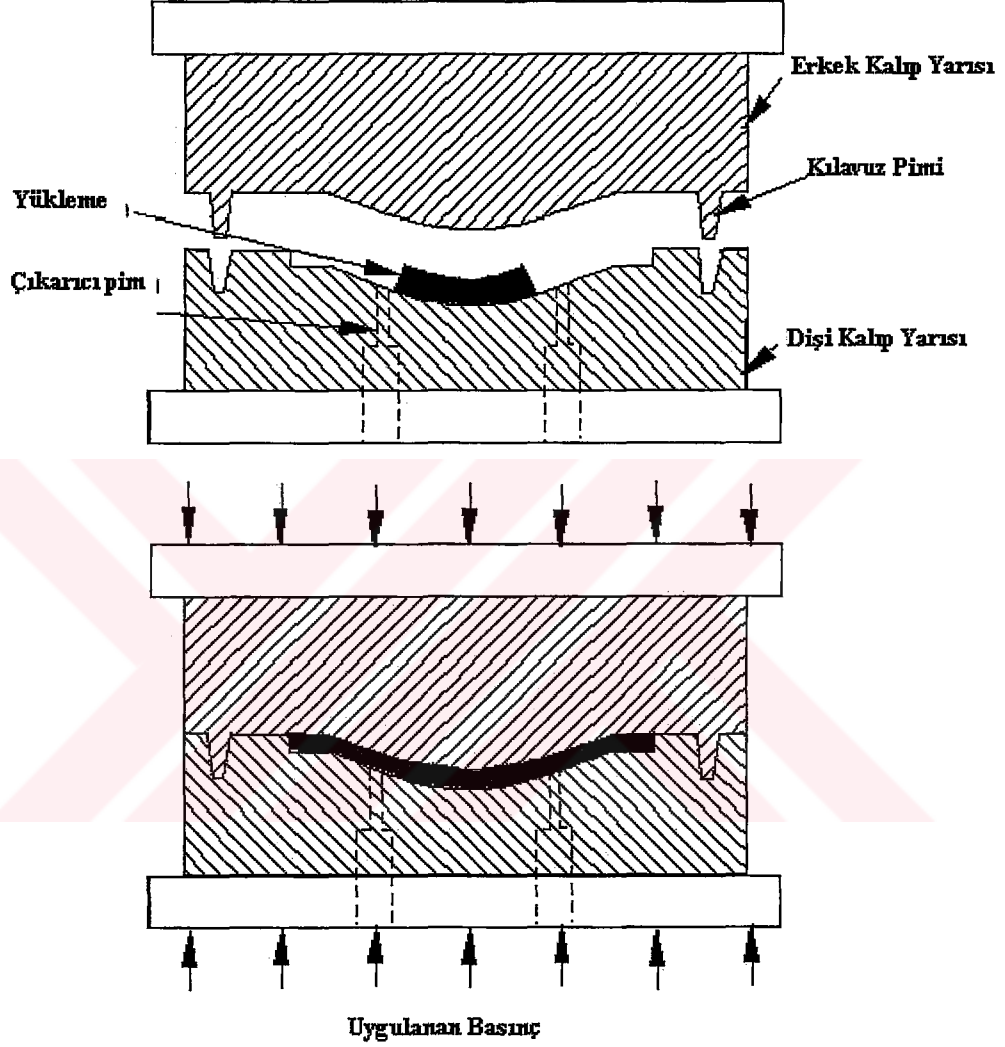
2.4 Bir Kompozit İmalat Prosesinde Temel Adımlar

Kompozit parça imalatında dört temel adım vardır: ıslatma , yayma, birleşme, katılaşma. Tüm kompozit imalat prosesleri, farklı yollarda imal edilmesine rağmen aynı adımlara sahiptir.

2.4.1 Islatma

Bu adımda, fiberler ve reçineler bir tabakayı şekillendirmek için bir araya gelirler. Örneğin, bir filament sarma prosesinde, fiberler reçine banyosundan ıslanmak üzere geçerler. Bir elle yatırma prosesinde, kontrollü çevrede bulunan malzeme tedariki ile ıslatılan prepregler bulunmaktadır. Islak yatırma prosesinde, her bir kumaş tabakası uygun olarak ıslatılması için sıkıştırıcı merdane kullanarak reçine ile ıslatılır. Bu adımın amacı, reçinenin tüm fiberler çevresinde tamamen akışını sağlamaktır. Viskozite, yüzey gerilmesi ve kapiler hareket ıslatma prosesini etkileyen temel parametrelerdir. 10 ile 10^4 arasında değişen viskoziteye sahip termosetlerin ıslatılması daha

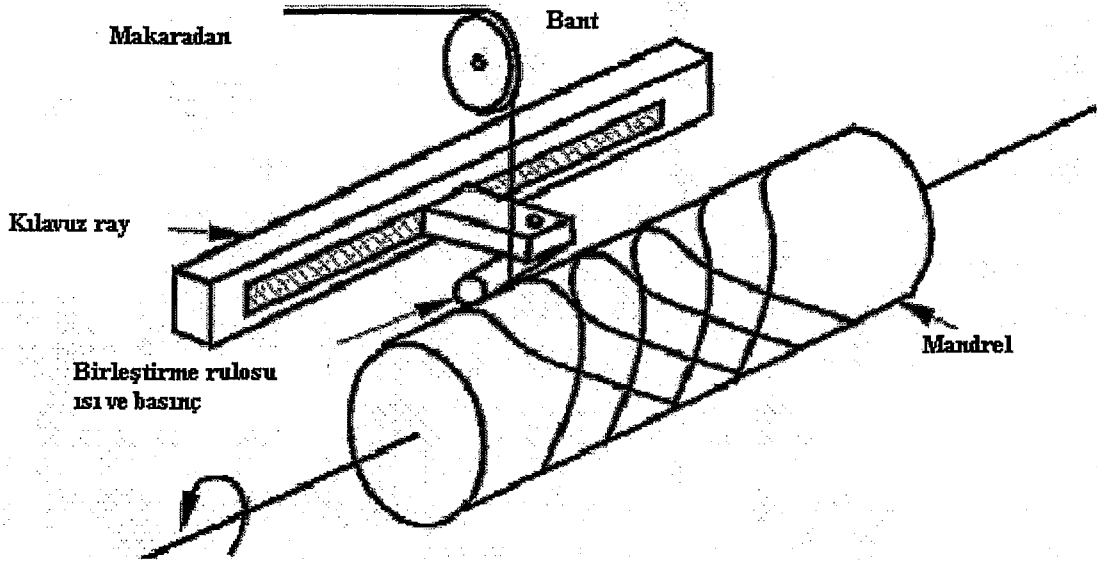
kolaydır. Termoplastiklerin viskoziteleri 10^4 ile 10^8 cp arasındadır ve iyi ıslatma için daha çok miktarda basınç gereklidir.



Şekil 2.17 Basma kalıplama

2.4.2 Yatırma

Bu adımda, kompozit laminatlar fiber reçine karışımlarını ya da prepregleri istenen açılarda ve gereken yerlere konmasıdır. İstenen kompozit kalınlığı fiber ve reçine karışımının çeşitli katmanlarını yerleştirme ile elde edilir. Filament sarmada, istenen fiber dağılımı, mandarel ve taşıma ünitesinin göreceli hareketi ile elde edilir. Prepreg yayma prosesinde, spesifik fiber dağılımındaki prepregler ya elle ya da makine ile yatırılır. RTM prosesinde, ön şekil fiber

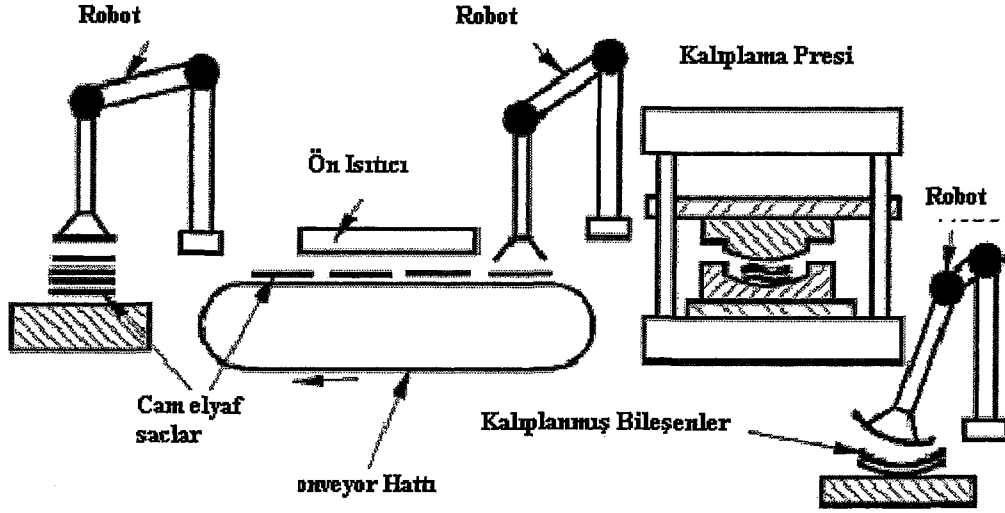


Şekil 2.19 Termoplastik bant sarma

2.4.4 Katılaşma

Termoplastikler için bir dakikadan az, termosetler için 120 dak.'ya kadar tutabilecek katılaşma fazı son adımdır. Vakum ya da basınç, bu periyot sırasında elde edilir. Ne kadar katılaşma süresini azaltırsak, o kadar imalat hızı proses tarafından ulaşılabilir olmaktadır. Termoset kompozitlerde, katılaşma hızı, reçine formülasyonuna ve pişme kinetiğine bağlıdır. Reçinenin pişme hızını arttırmak için proses sırasında ısı sağlanır. Termoset reçinelerde, genellikle daha yüksek pişme sıcaklıklarında, çapraz bağlı proses daha hızlı olmaktadır. Termoplastiklerde, katılaşma sırasında kimyasal değişime uğramazlar ve bu nedenle katılaşma en kısa zaman gerektirmektedir. Termoplastik proste, katılaşma hızı prosesin soğuma hızına bağlıdır. Termoset kompozitlerde, sıcaklık daha hızlı katılaşmayı elde etmek üzere yükseltilir; termoplastik prosesinde ise, sıcaklık rijit parça elde etmek üzere düşürülmektedir.

Yukarıdaki dört adım, termosetlerde ve aynı zamanda termoplastik kompozit prosesinde geneldir. Isı ve basınç uygulanması ve istenen fiber dağılımı farklı imalat metotları ile sağlanmaktadır.



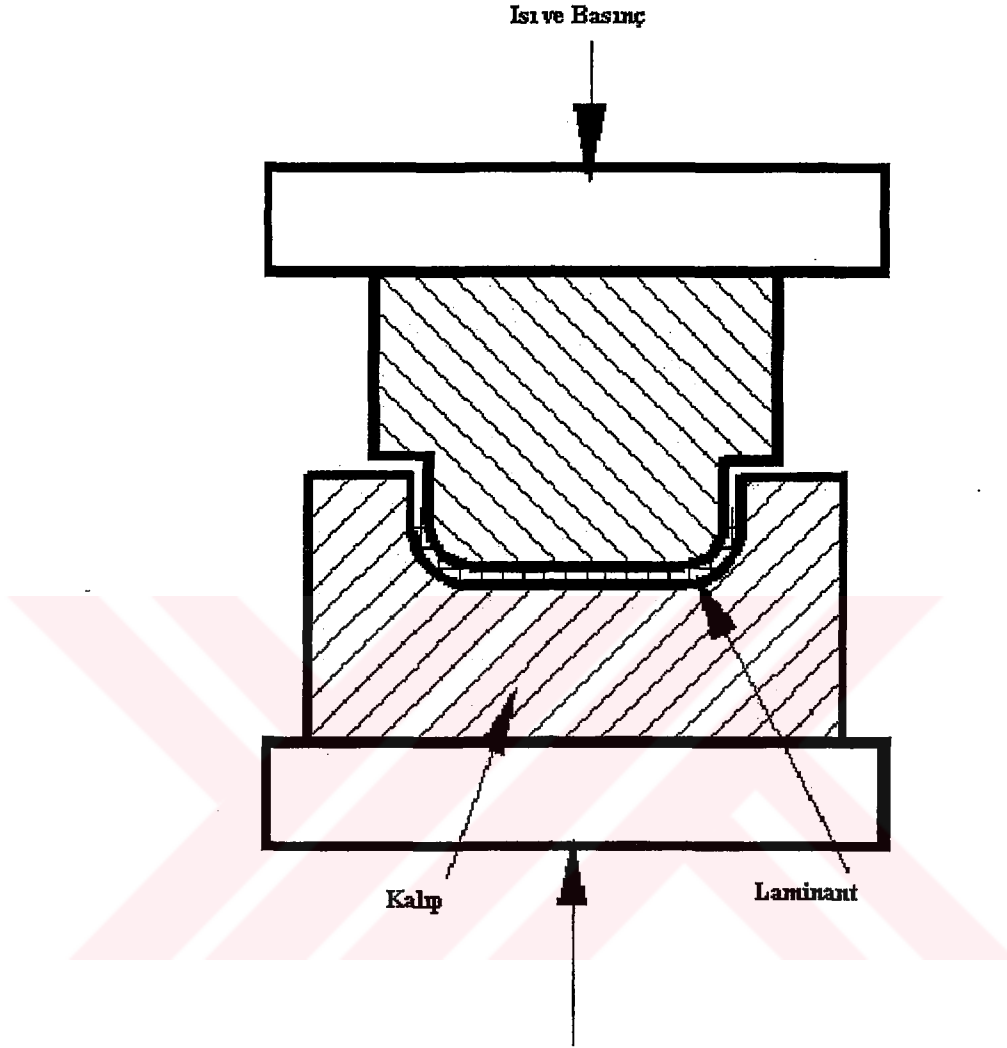
Şekil 2.20. Cam hasır termoplastik (GMT) basma kalıplaması

2.5 Termoset ve Termoplastik Prosesinin Avantaj ve Dezavantajları

2.5.1 Termoset Kompozit Prosesinin Avantajları

Genel termoset reçineler, epoksi, polyester ve vinilestlerdir. Bu malzemeler, tek parça ya da iki parçalı sistemde ve genellikle sıvı fazda oda sıcaklığında dırlar. Bu reçineler, sonra kararlaştırılan sıcaklıkta ve bazen oda sıcaklığında son şekli almak üzere pişirilir. Termoset kompozitlerin imalat metotları aşağıdaki avantajlara sahiptir:

1. Termoset kompozitlerin prosesi çok daha kolaydır, çünkü başlangıç reçine sistemi sıvı fazdadır.
2. Fiberler termosetlerde kolayca ıslanır, böylece boşluk ve gözenekler daha azdır.
3. Termoset kompozitlerin ısı ve basınç gereksinimleri, termoplastik kompozitlerden daha azdır, böylece enerji tasarrufu sağlar.
4. Basit düşük maliyette takım sistemi termoset kompozitlerin prosesinde kullanılabilir.



Şekil 2.21 Sıcak pres tekniği

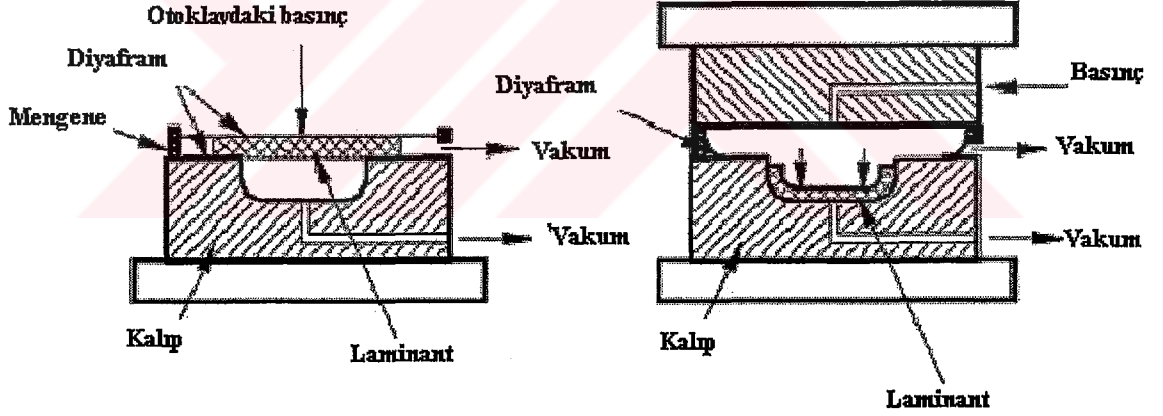
Termosetlerin prosesinde dezavantajlar

1. Termoset kompozit prosesi uzunca pişme zamanı gerektirir ve böylece termoplastiklerden daha düşük imalat hızına sahiptir.
2. Termoset kompozit parçalar bir kere piştiği ve katılaştığı zaman, diğer şekilleri elde etmek üzere tekrar şekillendirilemezler.
3. Termoset kompozitlerin geri dönüşümü bir sorun teşkil etmektedir.

2.5.2 Termoplastik Kompozit Prosesinin Avantajları

Termoplastik kompozitlerdeki başlangıç hammadde malzeme katı fazdadır ve son parça elde etmek üzere ergitilmesi gerekmektedir. Termoplastik kompozitlerin prosesindeki avantajlar şunlardır:

1. Proses çevrim zamanı genellikle kısadır, çünkü proses sırasında kimyasal reaksiyon yoktur ve bu nedenle yüksek hacimli imalat metotlarında kullanılabilir. Örneğin, enjeksiyon kalıplama için proses çevrim zamanı 1 dk.'dan düşüktür ve bu nedenle, imalat hızı gereksinimlerinin genellikle yüksek olduğu otomotiv tipi pazarlar için çok uygundur.
2. Termoplastik kompozitler tekrar şekillendirilebilirler ve ısı ve basınç uygulanmasıyla tekrar şekillendirilebilir.
3. Termoplastik kompozitlere kolaylıkla geri dönüşüm uygulanabilir.



Şekil 2.22 Diyafram şekillendirme

Termoplastik Kompozit Prosesinin Dezavantajları

1. Termoplastik kompozitlerde, proses için ağır ve güçlü takımlar gerekir. Daha fazlası, takım maliyeti termoplastik kompozit imalat prosesinde çok yüksektir. Örneğin, Enjeksiyon kalıplama prosesinde takım maliyeti, tipik olarak 50.000\$'dan fazladır, filament sargı prosesi için bir mandrel ise 500\$'dan azdır.

2. Termoplastik kompozitlerin prosesi kolay değildir ve bazen ısı ve basınç uygulamak için karmaşık ekipmanlar gerektirir.

2.6 Kompozit İmalat Prosesleri

Kompozit imalat prosesleri iki ana alt kategoriye ayrılabilir: termoset kompozitler için imalat prosesleri ve termoplastik kompozitler için imalat prosesleri. Ticari uygulamalar adına, termoset kompozit parçalar kompozit piyasasında liderdir. Yaklaşık tüm kompozit parçaların %75'i termoset reçinelerden imal edilmektedir.

Termoset kompozit prosesleri termoplastik karşıt parçalarından, termoset kompozitlerin geniş kullanımı ve termoplastik kompozit proses teknikleri üzerindeki avantajları nedeniyle daha olgundur. Termoset kompozitlerin ilk kullanımı (doymamış polyesterle cam fiber) erken 1940'larda meydana gelmiştir; termoplastik kompozitlerin kullanımı ise çok daha sonra olmuştur.

Termoset kompozitler için imalat prosesleri: Prepreg yatırma, Islak yatırma, spreyleme, filament sargı, pultrasyon, reçine iletim kalıplaması, yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplaması (SRIM), basma kalıplama, rulo sarma, termoset kompozitlerde enjeksiyon kalıplaması.

Termoplastik kompozitler için imalat prosesleri: Termoplastik bant sarma, termoplastik pultrasyon, GMT basma kalıplaması, sıcak pres tekniği, otoklav prosesi, diyafram şekillendirme prosesi, enjeksiyon kalıplama.

Biz tezimizde ağırlıklı olarak RTM (Reçine İletim Kalıplaması) üzerinde duracağız.

3. REÇİNE İLETİM KALIPLAMA PROSESİ

Reçine iletim kalıplama (RTM) prosesi ayrıca sıvı iletim kalıplama prosesi olarak da bilinmektedir. Enjeksiyon kalıplama ve basma kalıplama prosesleri yüksek hacimli imalat metotları olarak popüler olsalar da, kullanımları yapısal olmayan uygulamalarda, kalıplama bileşenlerinin (kısa fiber kompozitler) kullanımından ötürü çok sınırlıdır. Bu kalıplama proseslerinin aksine, RTM prosesi maliyet verimli ortam-hacim büyüklüklerinde yapısal parçaların imalatı, düşük maliyetli takım kullanılarak yapılmaktadır. RTM ağımsı şekilli karmaşık parçaların kontrollü fiber yönlendirilmesiyle sunmaktadır. Genellikle sürekli fiberler RTM prosesinde kullanılmaktadır.

RTM prosesinde, bir preform kalıp boşluğuna yerleştirilir. Diğer kalıp yarısı ilk yarıya oturtulur ve ikisi mengelenir. Sonra, dağıtıcı ekipman kullanarak, basınçlı termoset reçine, bir katalizör, renk, dolgu, vs., tekli ya da çoklu kalıba giriş noktası kullanarak kalıba pompalanır. 6 ya da 30 dk. piştikten sonra, karışımın pişme kinetiğine bağlı olarak, parça kalıptan alınır. Böylece, RTM, parçanın her iki tarafında iyi yüzey kaliteli yapısal parçaların imali ile sonuçlanır.

RTM prosesinde ana sorunlar, reçine akışı, pişme ve gözenekli ortamda ısı iletimidir. Proses, ön katalizlenmiş termoset reçine basınç altında ısıtılmış, gözenekli fiber preformu taşıyan kalıp boşluğuna enjekte edilmesinden oluşmaktadır. Kalıp dolumu sırasında, reçine kalıba akmakta ve viskozitesinin zamanla artıp sonuçta katılaştığı ekzotermik pişme reaksiyonları meydana gelmektedir. Fiber preform tamamen reçine ile doyduğunda, pişme reaksiyonları çapraz bağlı polimeri şekillendirmek üzere jel noktasını geçmeye devam eder.

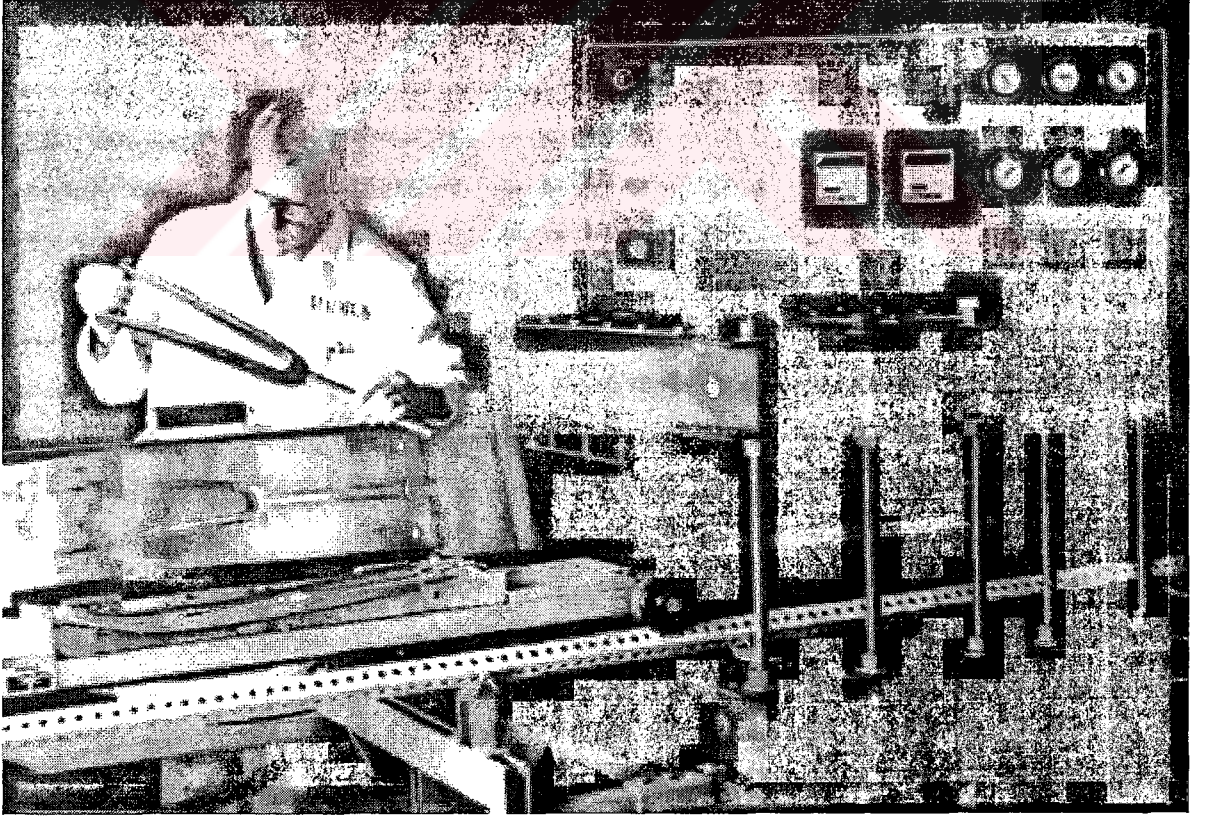
RTM prosesi, kuru fiber preformu kalıba yerleştiği ve sonra termoset reçine yolluk giriş noktasından kalıp reçine ile doldurulana kadar enjekte edildiği kapalı kalıp operasyonudur. Reçine daha sonra pişer ve parça kalıptan alınır (Sanjay 2002)

3.1 Başlıca Uygulamalar

RTM prosesi ufaktan büyük boyutlu, küçükten orta hacimli yapılar için uygundur. RTM otomotiv, havacılık, spor eşyaları ve tüketim malları uygulamalarında kullanılır. Yapılar tipik olarak, kasklar, kapılar, hokey sopaları, bisiklet çerçeveleri, rüzgâr değirmeni pervanesi, spor araba gövdesi, otomotiv panelleri ve uçak parçalarıdır. Destekler, bölmeler, kontrol yüzey kaburgaları

ve tutturucuları, dış kaplamalar ve pul bloklarından oluşan bazı uçak yapıları RTM prosesi ile yapılmaktadırlar.

Şekil 3.1, bisiklet için kompozit çatalı göstermektedir. Çatal kalıpları için erozyonla işlenmiş nikel yüzeyler kullanılmaktadır. Yapısal dolgu malzemesi, nikel yüzeyin ısıl genleşme katsayısını karşılamak ve yüksek ısıl iletkenlik sağlamak üzere formüle edilmiştir. Bütünleşik elektriksel ısıtma ve su soğutma çok yüksek ısıl çevrim sağlamaktadır. Hava soğutma, aşırı sıcaklığı önlemek için hızlı ısı yükselmesinin sonunda sıcaklık yükselmesini kontrol etmede kullanılmaktadır. Su soğutması için yüksek sıcaklık tutumunun sonunda hızla soğumayı sağlamak için kullanılmaktadır. Kalıplar kalıp presi ile bütünleşik proses kontrol sistemi ile çalışmaktadır.



Şekil.3.1 Bisiklet için Kompozit Çatal (Radius Müh. İzni ile)

3.2 Temel Hammadde Malzemeler

RTM prosesi için, fiber preformlar ya da kumaşlar takviye olarak kullanılırlar. Preformun kullanılan birçok çeşidi vardır (örneğin ısıll şekillendirilebilir hasır, uyabilen hasırlar ve örgülü preformlar). Isıll şekillendirilebilir hasırlar az ya da çok rasgele sürekli ipliklerin hareketli taşıyıcı film ya da bantta örülmesiyle ve tipik olarak termoplastik polimer olan, gevşek şekilde hasır tutan bağlayıcı ekleyerek yapılır. Hasır, istenen boyutta kesilmekte ve ısı ile basınç kullanarak kalıbın şeklinde şekillendirilmektedir. Bu proseste, karmaşık üç boyutlu şekiller düz hasırın kesilip ısı ve basınçla şekillendirildiğinden son preform şeklini elde etmek üzere dik meyiller verilmektedir. Şekil verildikten sonra, preform şeklini korur. Uyabilen hasırlarda, kumaşlar ya da kırılmış iplikçik hasırlar, dış tabakaya yerleştirilir ve örülü sınırlı çekirdek malzeme çekirdek malzeme olarak yerleştirilir. Bu tabakalar, uyabilen hasır şekillendirmek üzere birbirine dikilmektedir. Örülü malzeme, iç bölgede düşük geçirgenlik oluşturmak üzere çekirdek malzeme olarak yerleştirilir. Örgülü preformlarda, fiberler iç bölgelerde üç boyutlu fiber yapısı elde etmek için mandrel üzerine örülür. Düşük hacimli uygulamalar için, örgü, burgular ve hasırlar kullanılır; yüksek hacimli uygulamalar için, rasgele fiber preformlar kullanılır. Cam (E-cam en geneli), karbon ve Kevlar preform imalatında kullanılan takviye fiberlerdir.

Alümina, trihidrat ve kalsiyum karbonat içeren pigment ve dolgularla birleştirilmiş polyeşter, vinileşter, epoksi, fenolik ve metilmetakrilat gibi geniş yelpazede reçine sistemleri kullanılabilir. En genel olarak RTM prosesi için kullanılan reçineler doymamış polyeşter ve epoksilerdir. Karbon fiberli epoksi havacılık endüstrisinde çok geneldir. Epoksi ve diğer yüksek viskoziteli reçinelerin kullanımı enjeksiyon öncesi reçineyi ölçmeye ve hazırlamaya yarayan ekipmanlarda değişiklikler gerektirmektedir. Yeni epoksi reçineler ile hızlı pişme elde edilmekte böylece imalat hızı arttırılmaktadır.

Dolgu, RTM prosesi boyunca reçineye eklenebilir. Dolgu eklemesinin ana amacı parçanın maliyetini azaltmaktır. Kalsiyum karbonat dolgunun maliyeti sadece 0,11\$/kg iken epoksi reçine maliyeti yaklaşık 4,4 ile 22 \$/kg dır. Mikro kürecikler ayrıca dolgu malzemesi olarak kullanılabilir fakat maliyet aralığı 6,6 ile 8,8 \$/kg arasındadır. Mikro kürecikler ağırlık bazında pahalıdır fakat hacim bazında 1 kg mikro kürecik 100 kg ortamı doldurabilir ve ucuz olur. Karıştırılmış dolgu malzemesi, örneğın, temel kalsiyum karbonat ile reçine, dolgu boyutunun 10µm'i aşmaması konusunda önlemler alınmalıdır. Daha büyük dolgu boyutu, preformlarla filtreleme sorunları yapar. 5 ile 8 µm tavsiye edilmiştir ki, dolgu reçineyle fiber yapısı içinde

herhangi bir sorun yapmaksızın hareket etmektedir. Dolguyu reçineyle karıştırmak, reçinenin viskozitesini arttırmakta ve imalat hızını düşürmektedir. Ayrıca önemli ölçüde parça ağırlığını arttırmaktadır. Dolgu eklenmesiyle ağırlık %30 artabilir fakat hacim artımı sadece %12 olabilir.

3.3 Takım İmali

RTM prosesi, enjeksiyon ve basma kalıplama gibi kalıplama prosesleriyle karşılaştırıldığında, basınç ve RTM prosesi sırasında, basma ve enjeksiyon kalıplama proseslerinin basınç gereksinimleriyle karşılaştığında düşük olması nedeniyle düşük maliyetli takım sistemi kullanma avantajını sunmaktadır. Bu nedenle, takım güçlü ve ağır olması gerekmez. Aynı zamanda, düşük maliyetli takım imali, imalat çalışması için prototip inşası için ilk yatırımlarının düşük olması yararını sağlamaktadır. RTM'nin filament sargı, pultrasyon ve diğer açık kalıp prosesleri ile karşılaştığında yararı, RTM prosesinin kapalı doğası nedeniyle daha iyi çalışma ortamı, stiren emisyonu ile ilgili sert kurallara karşı artan önemini sunmaktadır.

RTM prosesi için kalıp tipik olarak alüminyum ve çelikten yapılmıştır, fakat prototip amaçlı plastik ve ahşaplar ayrıca kullanılmaktadır.

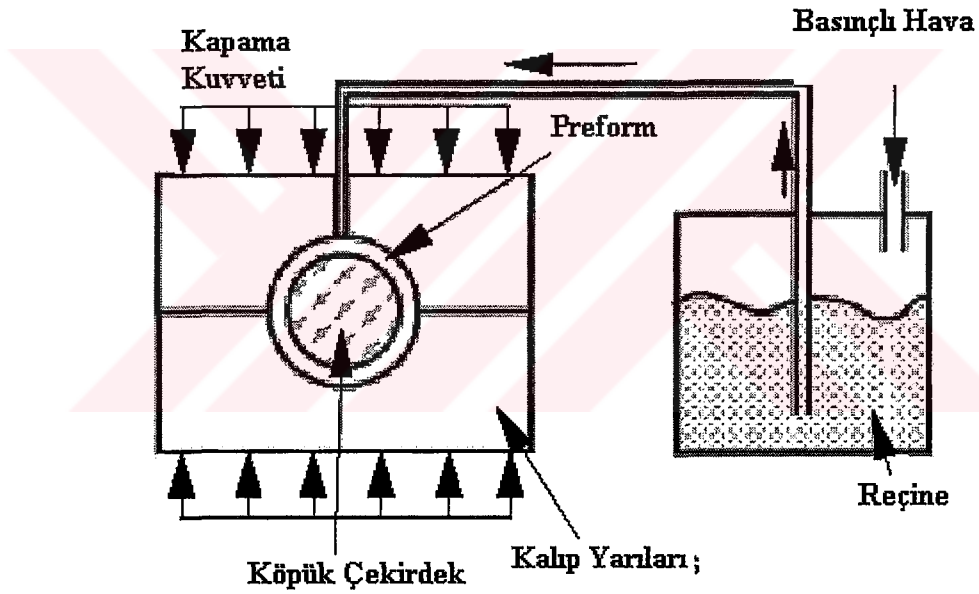
Kalıp genellikle iki yarılı olup, reçine enjeksiyonu için tek ya da çoklu giriş noktası ile hava ve reçine çıkışı için tekli veya çoklu çıkıcılar bulunur. Kalıp tasarımı katılığı kritiktir. Kalıbın kesit kalınlığı proses boyunca tüm basınçları kaldırabilecek kadar rijit olmalıdır. Kalıp tasarımı için ayrıca işleme ve ısı faktörlerine göz önüne alınmaktadır. Kalıbın ve kompozit malzemenin ısı özellikleri bitmiş parçanın boyutsal toleranslarını etkiler ve bu nedenle kalıp ile parçanın ısı genleşme katsayısı tasarım sırasında düşünülmelidir. Takım, kapatılıp düzgün kilitlenebilen şekilde tasarlanmalıdır.

İmalat faaliyeti için kalıpların maliyeti, karmaşıklık ve parça boyutuna bağlı olarak 2000 ile 50,000\$ arasındadır. Prototip parçaların imali ya da reçine akışı davranışını araştırmak içinse, bir kalıp maliyeti 200 ile 5000\$ arasında kalır. Akrilik gibi şeffaf malzemeler proses sırasında reçine akış davranışı ve diğer karakteristikleri araştırmalarda kullanılmaktadır.

3.4 Parça İmali

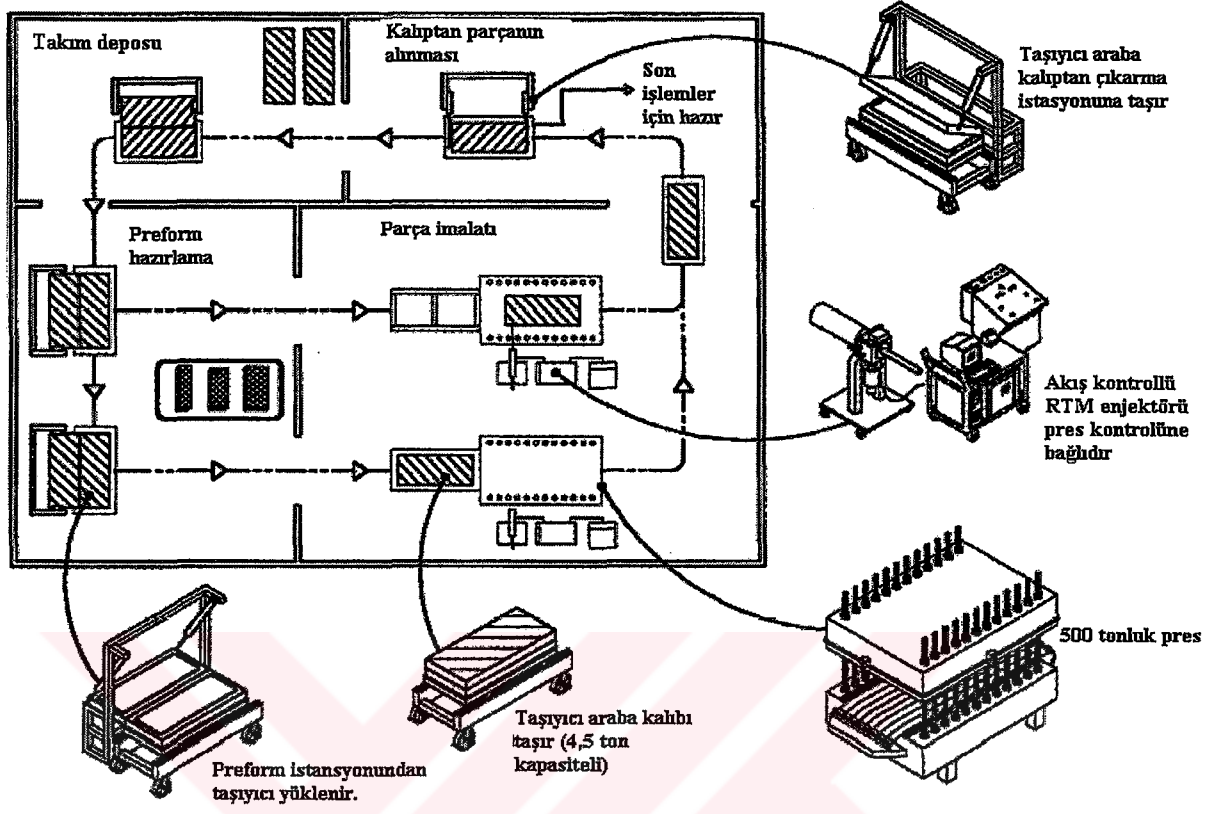
RTM prosesinde, kuru fiberglas hasır ya da kumaş bir preform, karşılıklı kalıbın boşluğuna yerleştirilir (Şekil 3.2). Preforma gerektiği gibi çekirdek parça ve insertler yerleştirilir. Tipik olarak, balsa ve köpük çekirdek parçalar, çekirdek malzeme olarak kullanılmaktadır. Petek

çekirdekler RTM prosesinde kullanılmaz çünkü petek malzemenin açık yüzeyi çekirdek içine reçine akışını sınırlamaz. Daha fazlası, petek malzemesinin karmaşık şekillere kesilmesi uğraştırıcıdır. Yüzey örtülü ticari olarak mevcut olan, çekirdek içine reçine akışını sınırlayan polipropilen çekirdekler RTM prosesinde kullanılabilir. Çekirdek malzemesinin yerleştirilmesi, yapıyı hafifletir ve sandviç yapıların imalinde güçlendirir. Insert yerleştirmenin amacı yapıda sağlamlaştırıcı mekanizma yapmaktır. Takviye ve çekirdek malzemeler kalıp boşluğuna yerleştirilince, kalıp kapatılır. Kalıp hidrolik ya da pnömomatik presler kullanarak ya da kenarlardan mengenerler kullanarak kapatılır. RTM prosesinin tipik imalat akış diyagramı şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.3). Diyagram, preform imalinden, son parça imalatına malzeme akışını göstermektedir.



Şekil .3.2 RTM prosesinin şematığı

Kalıp kapandıktan sonra, hazırlama donanımı kullanarak kalıp boşluğuna düşükten orta ya basınç altında reçine pompalanır. İsteğe göre yapılmış RTM amacıyla piyasada hazırlama ekipmanı bulunmaktadır. RTM makinesi etkili ve tam bir şekilde, malzemeleri ölçebilir, karıştırabilir ve birkaç gramdan yüzlerde kiloya kadar düşük basınçlı kapalı kalıba enjekte edebilir. Makineler polyester, metakrilat, epoksi, üretan ve diğer iki bileşenli reçine sistemleri ile çalışacak şekilde



Şekil 3.3. Tipik RTM prosesinin imalat akış şeması

tasarlanmışlardır. Tipik hazırlayıcı donanımında, reçine ve katalizör A ve B tanklarında depolanır ve statik karıştırıcı yardımı ile enjekte edilmeden az önce karıştırılır. Hazırlayıcı ekipmanın en basit şeklinde, önceden formüle edilmiş reçine basınç kabında depolanmakta ve basınçla hava kalına doğru reçineyi enjekte edilmek üzere kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Tekli ya da çoklu giriş noktası reçine enjeksiyonu için kullanılmaktadır. Ufak bileşenler için, tekli giriş noktası tipik olarak kullanılmaktadır. Uzun ve büyük yapılar için, çoklu giriş noktası uniform reçine dağılımı için ve ayrıca daha hızlı çevrim zamanı için kullanılmaktadır. Genel olarak, reçine kalıbın en düşük noktasına enjekte edilir ve kapılan havayı azaltmak için yerçekimine karşı yukarı doğru akar. Havalandırma açıklıkları kalıbın en yüksek noktasına bulunur.

Bir RTM prosesinde, reçine akışı ve fiber ıslanması kritik olmaktadır. RTM kalıbı içinde reçine akışı, enjeksiyon basıncı, kalıp içi vakum, reçine sıcaklığı, viskozite ve preform geçirgenliğini

içeren çeşitli parametrelere bağlı olmaktadır. Preform geçirgenliği, fiber malzeme çeşidi, fiber yapısı, fiber hacim oranı, tabaka içi ve düzlemde akış ve diğer çeşitli faktörlere bağlı olmaktadır. Kalıp dolumu sırasında, reçine, en az dirençle karşılaşacağı yolu izler. Polimer, sıkı yığılmış iplikçikleri ıslatırken ve fiberleri takviyelerken zorluklarla karşılaşmaktadır.

Reçine akışını preform içinden akışını sayısal olarak göstermek üzere çeşitli bilgisayar modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller kalıp tasarımı safhasında, en uygun yolluk giriş noktası ile havalandırma boşlukları yerleşimi ve en uygun enjeksiyon sırasını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu nedenle, minimal yolluk giriş kısmı basıncı ve dolum zamanı ile tamamlanmamış kalıp dolumu ya da kuru yerlerin oluşmaması amacına ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu modeller tipik olarak, preform içinde reçine akışını tarif etmek üzere Darcy'nin iki boyutlu versiyonuna ve sonlu eleman analizine dayanır. Bu modellerin iki boyutlu doğası nedeniyle, uniform kalınlıkta basit geometrilerle sınırlıdır. Fakat son zamanlarda bu konu ile ilgili çok geniş araştırmalar yapılmaktadır. Konu ile ilgili ayrıntılı çalışmaları ileriki bölümde ele alacağız.

Kuru bölgeler (ya da uygun olmayan ıslatma) RTM prosesinde başlıca uğraşılan sorunlardandır. Kompozit yapısındaki kuru bölgeler, parça reddine neden olmaktadır. Bu nedenle, kuru bölgeler imalat sonucuna doğrudan etkili olmaktadır. İyi reçine akışına yardımcı olabilmek ve kuru bölgelerin oluşmasını engellemek için, havalandırma yerlerinde, takviye arasından havayı almak üzere bazen vakum uygulanmaktadır. Vakum ayrıca hızlı kalıp dolumuna yardımcı olmaktadır. Çapraz bağ oluşumundan önce hızlı bir şekilde kalıbın dolması sağlanır. Kalıp reçine ile tamamen dolunca, daha hızlı kalıptan almak için hızlı bir şekilde pişmesine izin verilir. Doymamış polyesterler ve vinilesterler için, çapraz bağlanma oda sıcaklığında başlarken, diğer reçineler hızlı pişme için ısı gerekmektedir. Pişme sırasında, havalandırma boşlukları kapatılır ve reçine jelleşene kadar iç yolluk giriş kısmında belirli geri basınç sağlanır. Reçine pişince, kalıp açılır ve parça çıkartılır.

3.5 Isı ve Basınç Uygulama Metotları

RTM prosesi sırasında, reçine enjeksiyon basıncı kullanarak kalıba basınç uygulanmaktadır. Bu enjeksiyon basıncı reçinenin kalıbın içindeki gözenekli ortamdan akmasına yardım etmekte ve reçinenin kalıp boşluğunun doldurmasına izin vermektedir. RTM ekipmanı, belirli basınçta reçineyi enjekte eden bir kompresöre sahiptir. Tipik olarak, enjeksiyon basıncı düşüktür ve 10 ile

100 psi (69 ile 690 kPa) arasındadır. Kalıp tamamen reçine ile dolduktan sonra, pişme sırasında kalıptaki basınç yaklaşık 2 ile 10 psi (14 ile 69 kPa) arasında tutulur. Reçine enjeksiyon basıncı reçine viskozitesine, kalıp boyutuna, gözenekli ortamın geçirgenliğine, gerekli kalıp dolum zamanına ve reçine pişme kinetiğine bağlıdır. RTM işlemi için reçine viskozitesi, tipik olarak 100 ve 500 cP (santi poise) arasında düşük tutulur ki hazırlayıcı ekipmanın pompalama kapasitesini aşmasın.

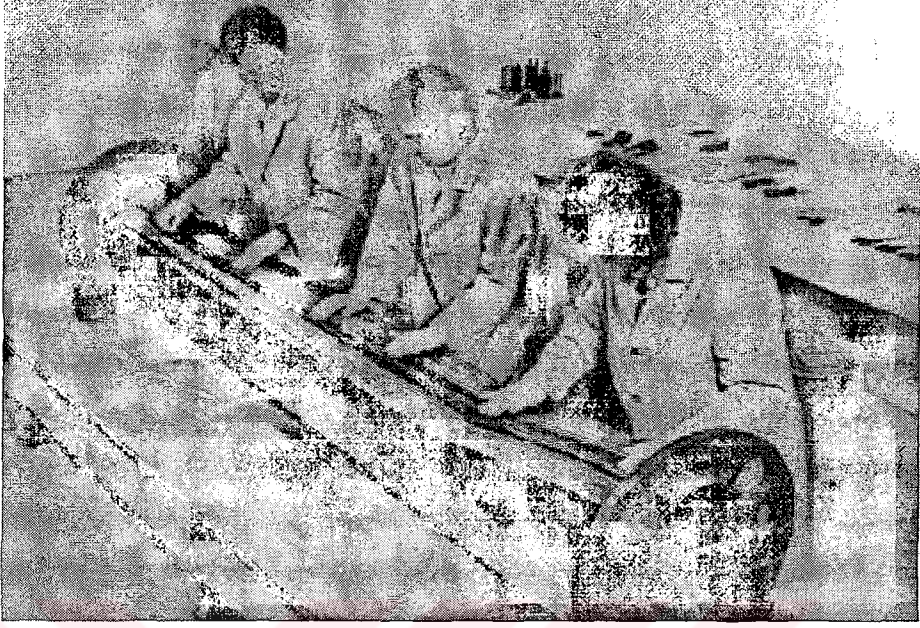
RTM işlemi sırasında sıcaklık seçimi, reçine çeşidine bağlı olmaktadır. Reçine tedarikçisi, ön ısı sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve pişme sıcaklığını içeren özel işleme koşullarını tavsiye etmektedir.

3.6 Temel Proses Adımları

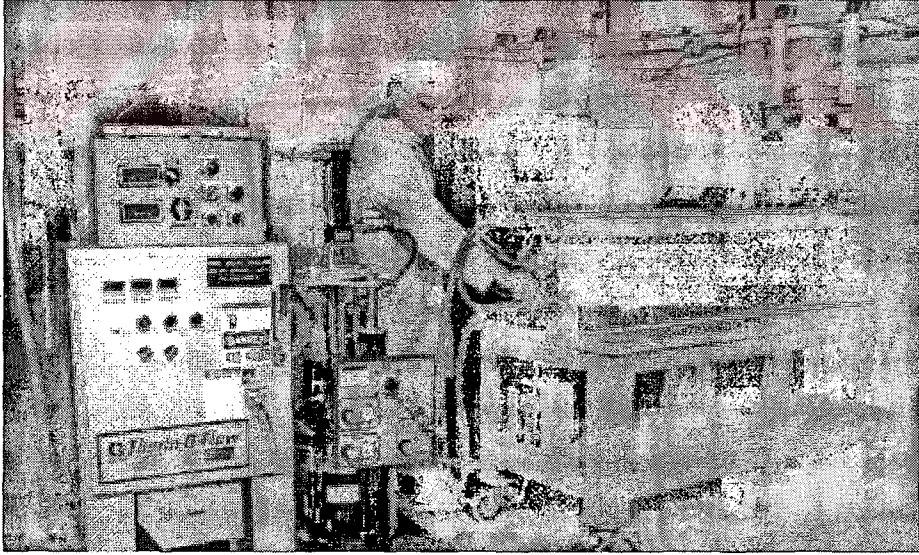
Tüm RTM prosesini anlamada basitlik sağlaması için, Şekil 3.4'den Şekil 3.8'e kadar kompozit bileşenin imalatı için gerekli temel adımlar gösterilmiştir. Şekil 3.4, vakumla kontrollü sıcaklık parametreleri altında preform kumaşın alınmasını göstermektedir. Preform kalıba yüklenmesi Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Şekil 3.6 belirlenmiş proses parametreleri altında reçinenin kalıba enjeksiyonunu göstermektedir. Yağ bağlantıları, enjeksiyon yolluk sistemi ve kendinden kilitleme/yükleme aygıt gibi standart tasarım özelliği gösteren tipik bir RTM kalıbı Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Proses tamamlandıktan sonra, parça Şekil 3.8'de gösterildiği gibi kalıptan alınır ve işleme ile bitirme işlemleri gerçekleştirilir. İşleme ve yüzey bitirme miktarı parçanın karmaşıklığına bağlıdır.



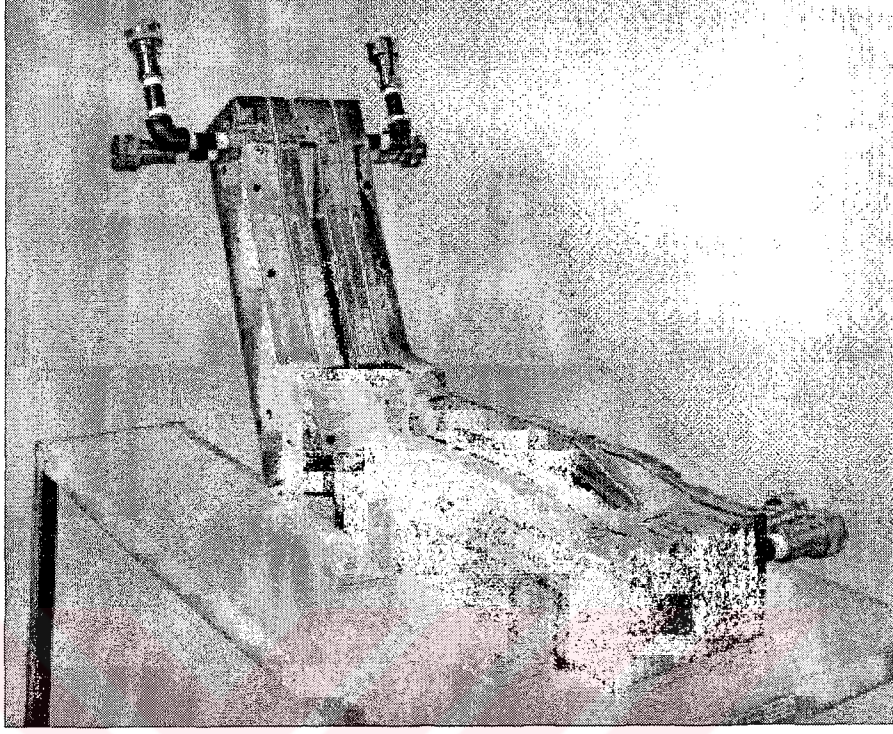
Şekil 3.4 Kontrol altındaki sıcaklık parametreleri ile vakum kullanarak preform kumaşın alınması (Intellitec)



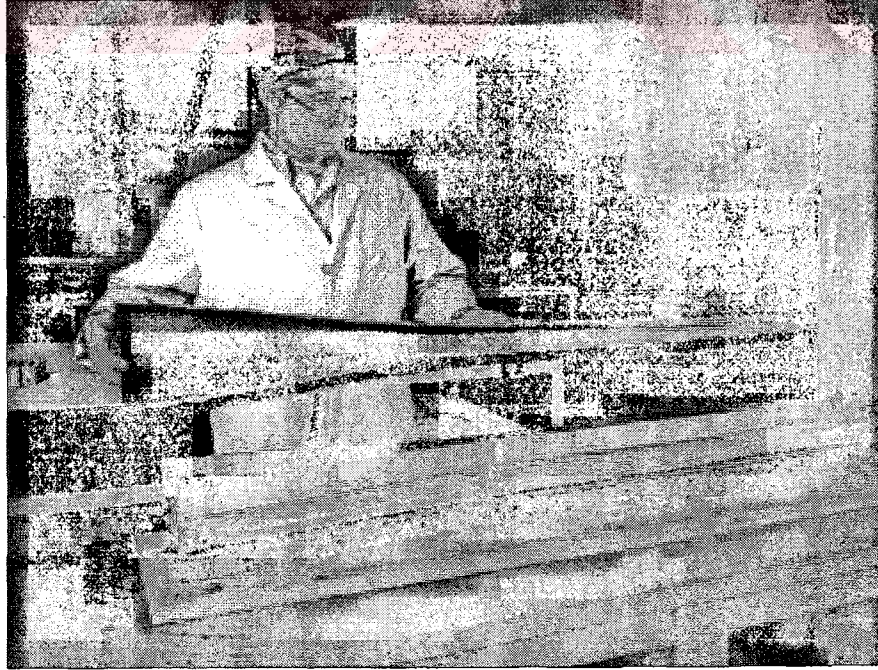
Şekil 3.5 Yeni kalıp döndürücü fikstür kullanılarak kalıba preform yükleme (Intellitec)



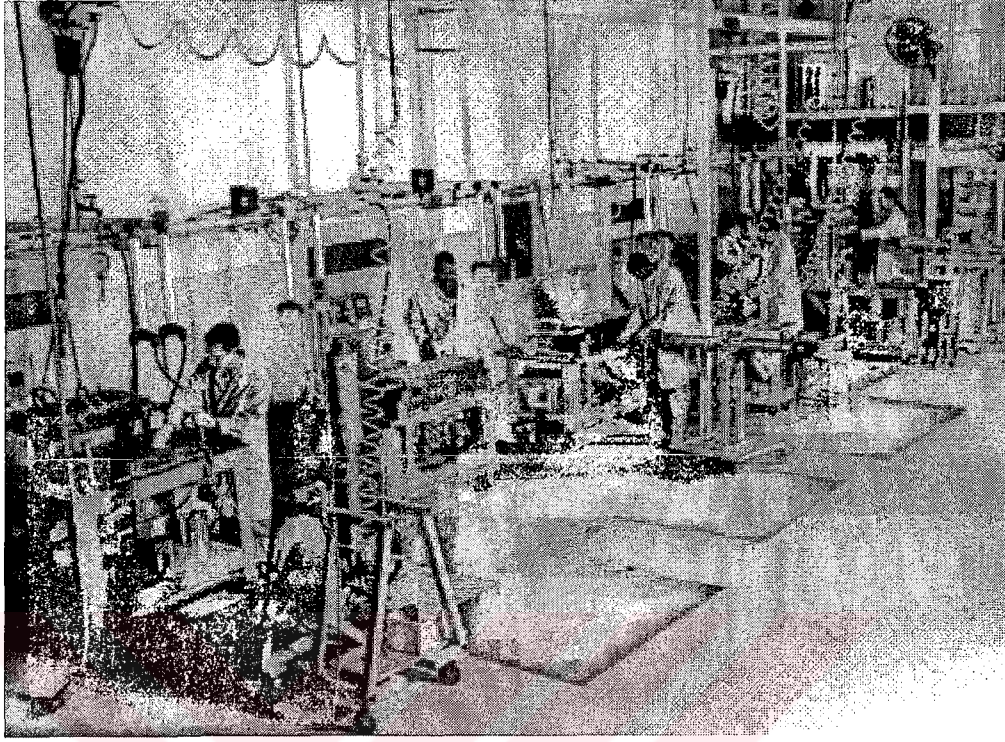
Şekil 3.6 Bir teknisyen tarafından kalıba reçine enjekte edilmesi (Intellitec)



Şekil 3.7 Yağ bağlantıları, enjeksiyon yolluk sistemi, kendinden kilitleme/yükleme aygıtları gibi standart tasarım özelliklerini gösteren tipik bir RTM kalıbı (Intellitec)



Şekil 3.8 İlgili takım çıkartma hücreinde bileşenin kalıptan alınması (Intellitec)



Şekil 3.9 Motor pervanesi imalatı için yarı otomatik çoklu gözlü takıma sahip olan imalat hücresi (Intellitec)

Şekil 3.9, motor pervanesi imalatı için yarı otomatik çoklu gözlü takıma sahip olan imalat hücresini göstermektedir. İmalat hücresi, yüksek hacimli RTM parçaların imalatında kullanılır ve “düşürme ve yükleme” kalıplama tekniği ile çalışmaktadır. Bu tekniği kullanarak, Intellitec firması yıllık olarak, AlliedSignal firması için 35,000’den fazla motor pervanesi üretmekte ve bu rakam daha fazla kalıp ya da daha fazla istasyon kullanılarak artabilmektedir.

RTM prosesi adımları aşağıda özetlenmiştir:

1. Termoset reçine ve katalizör hazırlayıcı donanımın A ve B tanklarına yerleştirilir.
2. Ayırıcı ajan, parçanın kolay alınması için kalıba uygulanır. Bazen, iyi yüzey kalitesi için jel kaplama uygulanmaktadır.
3. Prefrom kalıba yerleştirilir ve kalıp kapanır.
4. Kalıp spesifik bir sıcaklığa ısıtılır.

5. Karışmış reçine iç giriş yolluk giriş noktasından seçilmiş sıcaklık ve basınçla enjekte edilir. Bazen, reçine akışına yardım etmek ve hava kabarcıklarını uzaklaştırmak için kalıbın içinde vakum oluşturulmaktadır.
6. Kalıp tamamen dolana kadar reçine enjekte edilir. Vakum kapatılır ve havalandırma çıkışı kapatılır. Kalıp içindeki basınç, geri kalan gözenekliliğin ortadan kalkmasını sağlamak amacıyla artırılır.
7. Belirli zamanda (reçine kimyasına bağlı olarak 6 ile 20 dak. arasında) piştikten sonra, kompozit parça kalıptan alınır.

3.7. Reçine İletim Kalıplaması Prosesinin Avantajları

Son zamanlarda, RTM, ufaktan büyüğe karmaşık yapıların maliyet etkili bir şekilde yapabilme potansiyeli nedeniyle, kompozit endüstrisinde önem kazanmıştır. RTM, düşükten orta hacim ortamında yapısal bileşenlerin imalatı için sürekli fiber kullanma fırsatı sunmaktadır. Diğer kompozit imalat tekniklerine göre RTM'nin başlıca avantajları şunlardır:

1. Basma kalıplama ve enjeksiyon kalıplama ile karşılaştırıldığında takım ve işletme maliyetlerinin düşük olması nedeniyle başlangıç yatırım maliyeti düşüktür. Bu nedenle, Pazar değerlendirmeleri için prototipler kolayca yapılmaktadır. Örneğin, uydu anteni, sıkıştırma kalıplama parçaların basma kalıplaması için başlıca yatırımlar yapılmadan önce tasarım özelliklerini değerlendirmek için RTM prosesi kullanılmıştır.
2. Kalıplamalar boyutsal toleranslara yakın üretilebilir.
3. RTM prosesi, ortalama hacim oranlarında karmaşık parçalar yapabilir. Bu özellik, maliyet etkili bir şekilde sınırlı imalat akışına izin verir. Bu özellik, araç modeli başına daha az imalat hacmi ve diğer sektörlere göre daha hızlı değişim gerektiren otomotiv pazarında yarar sağlamaktadır.
4. RTM, her iki tarafta iyi yüzey kalitesine sahip parçaların imalatını sağlamaktadır. Her taraf, benzer ya da benzer olmayan yüzey kalitesine sahip olabilir.
5. RTM, takviye seçimi ve tam fiber yönelimi kontrolü ile yapısal parçaların imalatına izin vermektedir.

6. %65'e kadar yüksek fiber hacim oranlarına ulaşılabilir.
7. Insertler kalıplara kolayca monte edilir ve böylece iyi birleştirme ve montaj yapılabilir.
8. Çok çeşitli takviye malzemeleri kullanılabilir.
9. Kapalı kalıplama prosesi nedeniyle, proses sırasında düşük uçucu emisyonu sunmaktadır.
10. Proses, daha az ıskarta ve daha fazla imalat hızı ile sonuçlanacak otomasyona geçebilir.

3.8 Reçine İletim Kalıplamasının Sınırlamaları

RTM, diğer imalat prosesleri ile kıyasla birçok avantajlara sahip olmasına rağmen, RTM ayrıca şu sınırlamalara sahiptir:

1. Karmaşık parçaların imalatında, çok miktarda deneme yanılma yapılması ya da gözenek veya kuru fibersiz parçalar imalatını sağlamak üzere akış simülasyonu modellenmesi gerekmektedir.
2. Elle yatırma ya da spreyleme prosesleri için gereken takım ve donanım maliyetinden daha fazla maliyet gerekmektedir.
3. Takım tasarımı karmaşıktır.

Çizelge 3.1'de diğer kalıplama prosesleri ile RTM'nin kıyaslaması gösterilmektedir:

Çizelge 3.1 RTM'nin diğer kalıplama prosesleri ile karşılaştırılması (Sanjay , 2002).

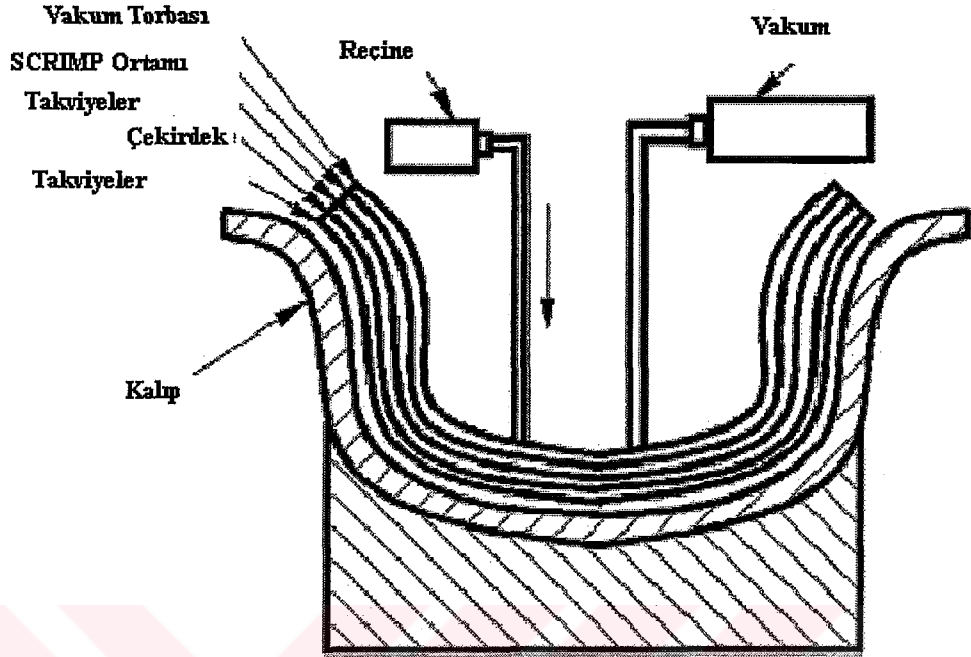
Kalıplama Prosesi	İmalat Hızı/Yıl	Çevrim Zamanı (dak.)	Emisyon Sorunu	İki Taraflı Parça Mümkün mü?
RTM	200-10.000	6-30	HAYIR	EVET
AÇIK KALIPLAMA (ELLE YATIRMA, SPREYLEME)	100-500	60-180	EVET	HAYIR
SRIM	10.000'DEN FAZLA	3-20	HAYIR	EVET
BASMA KALIPLAMA (SMC,BMC)	10.000'DEN FAZLA	1-20	HAYIR	EVET
ENJEKSİYON KALIPLAMA	20.000'DEN FAZLA	0,5-2	HAYIR (ÇOK GÜVENLİ)	EVET

3.9 RTM Prosesinin Varyasyonları

RTM prosesinin, ticari sektörde kullanılan bir çok varyasyonu vardır. Bir kaç aşağıda açıklanmıştır:

3.9.1 VARTM

VARTM, RTM prosesinin bir adaptasyonudur ve bot gövdeleri gibi büyük yapıların imalında maliyet etkili bir yöntemdir. Bu proseste, açık kalıplar gibi tek taraflı takımlar kullanılarak parça yapıldığından takım maliyetleri yarıya düşmektedir. Bu dökme prosesinde, fiberler tek taraflı kalıba yerleştirilir ve ya rijit ya da esnek bir örtü vakumla sıkıştırılmış kapak görevi görmek üzere üstüne yerleştirilir. Vakum prosedürü çeşitli yolluk giriş noktası boyunca yapıya reçineyi çekmek üzere kullanılır. Bot gövdelerinin imalatında kullanılan ıslak yatırma prosesi ile karşılaştırıldığında birçok avantaj sağlamaktadır. VARTM kapalı kalıp prosesi olduğundan, stiren emisyonu sıfıra yakındır. Dahası, bu prosesle yüksek hacim oranına (%70) ulaşılır. Bu nedenle, parçada yüksek yapısal performans elde edilmektedir.



Şekil 3.10 SCRIMP prosesinin şematik gösterimi

3.9.2 SCRIMP

SCRIMP'nin açılımı Seemann Composite Resin Infusion Molding Process (Seemann Kompozit Reçine Dökme Kalıplama Prosesi) dir ve Seemann, TPI ve HardCore Kompozit firmalarının patentli teknolojileridir. SCRIMP özellikle ortadan büyük boyutluya kadar olan parçalar için iyi çalışmaktadır. VARTM prosesine benzerdir. Bu proseste, 27 ile 29 in. (69 ile 74 cm) Hg. kararlı vakum ilkönce tabakaları sıkıştırmak için uygulanır. Sonra, reçine tabakalara çekilir. Bu yolla, filamentler ve çekirdek reçine ile bulanmadan önce fiber sıkışması sağlanmış olur. Böylece, boşluklar önlenmiş ve tam yerleşme sağlanmıştır. Ek olarak, SCRIMP'de Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, basit mekanik aygıtlarla birlikte özel reçine akış ortamından oluşan patentli reçine dağıtım sistemi mevcuttur. SCRIMP prosesinin başlıca kullanımı denizcilik endüstrisindedir.

SCRIMP prosesinin uygulamaları, limanlar için tekne liman tamponu, yel değirmeni kanatları, uydu antenleri, demiryolu araçları, otobüsler, farklı araç gövdeleri, eğlence parkı arabaları, fiziksel terapi havuzları ve havacılık bileşenleridir. Islak yatırma prosesi ile karşılaştırıldığında SCRIMP'nin başlıca avantajı ağırlık kontrolü ve stiren emisyonunun olmamasıdır. Dahası, kuru kumaşı ve çekirdeği yatırma proses sırasında işçilik ve zaman tasarrufu sağlar.

4. PLASTİK MATRİKSLİ KOMPOZİT ÜRETİM PROSESİ MODELLEMESİ

4.1. Giriş

Modeller, çeşitli koşullar altında gerçek olayların davranış ve karakteristiklerini göstermek ya da bir problemi analiz etmek için matematiksel ya da grafiksel olarak gerçek dünya durumlarını göstermede kullanılır. Mühendisler ve araştırmacılar çeşitli tipteki fiziksel, kimyasal ya da mühendislik problemlerini çözmeye kullanırlar. Kimyasal fabrikalar, çeşitli kimyasal reaksiyonları ve operasyonları bu modellerin yardımı ile kontrol ederler. Fizikçiler bir fenomeni anlamak için çeşitli atomik modeller ve kuantum mekaniğini kullanırlar. Malzeme bilimciler, kübik hacim merkezli (BBC) ve kübik yanal merkezli (FCC) ve diğer kristal yapılarını metallerin ve polimerlerin davranışını anlamada kullanırlar. Metalürjistler faz diyagramlarını, makine mühendisleri serbest hacim diyagramlarını ve diğer modelleri bir fenomeni ya da gerçek dünya durumunu kestirmede ya da tanımlamada kullanırlar. Modeller, gerçek mühendislik ya da fiziksel problemleri, herhangi bir deney yapmadan çözmeye çok kullanışlıdır.

4.2 Kompozit Üretimindeki Modellerin Önemi

Yüksek kaliteli parçanın düşük maliyette üreten bir takım olduğunda, bir proses modeli bir üretim prosesini analiz etmede çok yardımcı olur. Bir üretim süreci başlamadan önce ya da parça tasarımı tamamlanmadan önce bir çok proses problemlerini çözebilir. Yüksek kaliteli parça elde etmek için, bir üretim süreci için uygun değer proses parametrelerini kestirir. Üretimde büyük miktarda zaman ve para tasarrufu sağlar.

Bir RTM sürecinde, bir simülasyon modeli, akış şeklini tahmin etmek için ve parçada herhangi bir kuru bölgeyi değerlendirmek için kullanılabilir. Enjeksiyon basıncı, reçine viskozitesi ve yolluk giriş kısmı gibi proses parametrelerini optimum olarak takviyelerin reçine ile tam döllemesini sağlamak üzere belirleyebilir. RTM süreci kullanarak paraların üretimi ile alakalı ana problemler şunlardır:

1. Reçinenin boşluğu tam doldurmadan pışmesi
2. Kuru bölgeler
3. Kalıntı gerilmeler nedeniyle parçanın çarpılması
4. Reçine akışı nedeniyle fiber yönlendirmesinde (fiberler sürüklenmesiyle oluşan) değişim.

RTM proses modeli kullanarak bir parçayı yapmadan bile yukarıdaki sorunlar çözülebilir. Model, optimum yolluk giriş noktası, fiber geçirgenliği, kesit kalınlığı, enjeksiyon basıncı, viskozite, akış hızı ve diğer proses parametreleri, takviyelerin daha iyi reçine döllenişmesi ve minimum kalıcı gerilmelerle daha iyi parça kalitesi için belirleyebilir. Benzer şekilde, kaynak hattı, enjeksiyon kalıplamasının, çapak, boşluk ve parça çarpılması gibi bir çok problem modeller kullanılarak çözülebilir. Otoklav prosesi ile alakalı tipik problemler, yetersiz pişme, tabakaların ayrışması, parça çarpılması ve boşluklarının hepsi proses modelleri kullanarak çözülebilir. Filament sargı prosesindeki proses değişkenleri, fiber gerilmesi, reçine viskozitesi, pişme sıcaklığı ,vs dir; bu değişkenler iyi kalitede parçaların yapımı için modeller kullanarak optimize edilebilir. Benzer şekilde, pultrasyon prosesi modeli, çekme kuvveti, reçine viskozitesi ve kalıp sıcaklığı daha iyi parça kalitesi için sağlayabilir.

Genel olarak, proses modelleri, iyi kalitede kompozit parçaların üretimi için optimum proses parametrelerini tahmin etmede çok avantajlıdır. Proses modelleri, parça tasarımı, takım tasarımı ve optimum proses koşullarının seçiminde kullanılır.

4.3 Kompozit Prosesi

Kompozit parçaların üretiminde mevcut bir çok proses tekniği vardır (örneğin filament sargı, otoklav, RTM, enjeksiyon kalıplama ve termoplastik bant sarma). Kompozit parçalar ya termoset reçineler ya da termoplastik reçineler bazı takviyelerle kullanarak yapılır. Bu proseslerde, basınç ve sıcaklık, minimum hata ile iyi birleştirilmiş parçalar elde etmek için belli hızlarda uygulanır ve alınır. Termoset kompozitlerde, ısıtma ve soğutma, pişme derecesini başlatmak ve kontrol etmede uygulanırken, termoplastik kompozitlerde ısıtma ve soğutma istenen kristallikte elde etmek üzere reçine ergitilir ve katılaştırılır. Pişme sırasındaki basınç ya da katılaşma komşu tabakalar arasında iyi sıkıştırma ile kalıpta ya da takım yüzeyinde iyi dolumu sağlamak için uygulanır. Sıcaklıkların ve basınçların büyüklüğü ve süresi, bitmiş parçanın performansını çok etkileyen pişme/katılaşma sırasında uygulanır. Bu nedenle, proses çevrimi her bir uygulama için seçilmelidir. Uygun pişme/proses çevriminin bazı önemli kriterleri şunlardır:

1. İşlenen parça mümkün olan en düşük boşlukta olmalıdır.
2. Termoset kompozitler durumunda, reçine uniform olmalı ve tamamen pişirilmelidir. Düzgün olmayan pişme parçada kalıcı gerilmelere neden olur. Benzer şekilde,

termoplastik kompozitler için, uniform soğuma, kalıcı gerilmelerin oluşumunu engellemek için meydana gelmelidir.

3. Bitmiş parça, parça çarpılmasını azaltmak için minimum kalıcı gerilmeye sahip olması gerekir. Parça çarpılması ya da düzensiz kendini çekme parçada toleranstan kaçmaya neden olur.
4. Tüm proses mümkün en kısa zamanda gerçekleşmelidir. Ne kadar kısa süreli proses çevrimi olursa o kadar yüksek üretim hızı ve düşük üretim maliyeti olur.
5. Termoset kompozitlerin pişme süreci sırasında, aşırı reçine her bir tabakadan dışarı kusmalı ve reçine dağılımı uniform olmalıdır.

Isı ve basınç uygulama metotları, her bir üretim süreci için farklıdır. Otoklav sürecinde, otoklav ısı sıcak hava ya da sıcak azot gazı yardımı ile sağlanır, basınç ise vakum torbaları ile ve hava basınçlı odacıklar ile uygulanır. RTM sürecinde, basınç enjeksiyon basıncı ile kontrol edilir, sıcaklık ise kalıbın ısıtılmasıyla sağlanır. Termoplastik bant sarma sürecinde, sıcaklık lazer ya da sıcak gazla sağlanır ve basınç sıkıştırma rulolarının yardımı ile uygulanır. Pulturasyon sürecinde, sıcaklık ısıtılmış kalıp ile sağlanır ve basınç ise daralan kalıp açıklığından meydana gelir.

Katılma süreci sırasında, bir çok fiziksel ve mekanik fenomen kompozit malzemede meydana gelir, bunlar;

1. Polimer yapısının şekillenmesi, fiziksel ve mekanik özelliklerde değişiklik, pişme ya da kristallik, relaksasyon değişimlerinin (jelleşme ve camlaşmaya bağlı) değişim.
2. Kimyasal ortam ve sıcaklığa bağlı kendini çekme
3. Gerilme ve gerinim gelişimi
4. Kohesif etkiler ve adhesif bağ kopmasının oluşumu
5. Uçucuların uçması ve boşluk büyümesi

4.4 Bir Proses Modelin Gereçleri

Bir proses modeli altı ana gereç üzerine kurulur ve doğrulanır.(Sözer , 2000)

Model ya da sistem sınırları: çalışılan sistemi tanımlamaktır.

Fiziksel yasalar: kütle, momentum ve enerji korunumunu sağlamaktadır.

Kurucu yasalar: malzemeler ve fenomenolojik davranışlarını tanımlar. Bunlar gereklidir çünkü ilk ilkelere, doğrusal olmayan reçine malzeme davranışı gibi bazı iletim fenomeni, reçine ve fiber etkileşimleri ve makro yapıda reçine pişme kinetiğini tanımlayamayız.

Sınır koşulları: özel kompozit üretim prosesine modeli biçimlendirmektedir.

Kabuller: prosesi basitleştirmektedir.

Deneyler: modeli doğrulamaktadır.

Bu altı gereç alt başlıklar altında tartışılacaktır.

4.4.1 Model ya da Sistem Sınırları

Fiziksel ya da kurucu yasaları göz önüne alındığı alandır. Örneğin, eğer ekstrüderin vidası ya da enjeksiyon kalıplama makinesi içinde malzeme akışını modellenmek istendiğinde, vida içindeki kanal, ilgi sistemi olarak tanımlanmalı. Vida dönmesi ve ısıtıcılardan sağlanan ısı gibi dış etkiler sınır koşulları olarak ifade edilir.

4.4.2 Fiziksel Kanunlar

Sistem tanımlandığında, sistem sınırları içinde kütle, momentum ve enerji korunumu ifade edilmeli. Kurucu denklemler, düşünülen sistemden daha küçük, fakat basınç, hız ve sıcaklık gibi değişenler sürekli yapıda düşülebilecek kadar moleküler hacimden daha büyük olacak şekilde sistemde küçük kontrol hacmi seçilerek geliştirilir.

4.4.2.1 Kütle Korunumu

Bu denklem; sisteme giren ve çıkan kütle hızı ile kontrol hacmi içinde artan kütle hızı arasındaki farkı denklem halinde ifadesiyle formüle etmektedir.

$$\text{Kütle artma hızı} = \text{giren kütle hızı} - \text{çıkan kütle hızı} - \text{çökmeden kaynaklanan kütle kaybı hızı} \quad (4.1)$$

4.4.2.2 Momentum Korunumu

Momentum değişiminin kontrol hacmine etkiyen kuvvetlere eşit olduğu Newton'un kanununa dayanır. Kontrol hacmine etkiyen kuvvetler, şekillenen malzemenin viskoz hareketine bağlı olan kesme kuvvetleri, malzeme şekil değişimine bağlı olan normal gerilemeler, malzeme içindeki basınç ve yerçekimi ya da elektromanyetizma gibi herhangi etkileşimsiz kuvvetlere bağlı olan kütsel kuvvetler. Bu, düşünölen sistemde malzeme hareketi için bir denklem üretir. Hareket denklemini malzeme hız alanının malzeme gerilmelerine ve sisteme etkiyen basınca bağlantılıdır.

$$\rho \frac{DU}{Dt} (\text{Atalet kuvveti}) = -\nabla P (\text{hidrodinamik kuvvet}) + \nabla \tau (\text{Gerilmelere bağlı kuvvet}) + F_B (\text{Hacimsel Kuvvet}) \quad (4.2)$$

Burada ρ malzeme yoğunluğu, U hız vektörü, P statik basınç, τ viskoz gerilme tensörü, F_B kütle kuvvet vektörü ve t zaman. Fakat, gerilme ve akışkanın şekil değiştirmesi arasındaki ilişkiye, ya basınç ya da akışkandan beklenen hızın çözülebilmesinden önce gereklidir. Bu ilişkiyi tanımlayan denklemler kurucu denklemler olarak tanımlanır.

Viskozitenin düşük olduğu termoset malzemeler için, reçine, sabit fiber preform yatak arasında genellikle döllenabilir ve bu nedenle gözenekli ortam içinden akış teorisi hareketi tanımlamak için kullanılır. Böylece, böyle malzemeler için, momentum korunumu fiziksel kanun tarafından tanımlanmaz fakat malzeme içindeki hız ve basınç grandyeni arasında empirik bağıntı ile tanımlanır.

4.4.2.3 Enerji Korunumu

Sıcaklık alanını, kontrol hacmi için denge düşünölererek belirlenmesine izin verir:

$$\dot{Q} \text{ ve kinetik enerji artma hızı} = \text{giren iç ve kinetik enerji-giren ısı} + \text{toplam gerilme } \sigma \text{ bağlı olarak enerji artım hızı} - \text{kütsel kuvvetlere } F_B \text{ bağlı olarak artma hızı} + \text{kaynağa bağlı olarak enerji üretim hızı} \quad (4.3)$$

Sistem içinde üretilen enerji, kristalizasyon kinetiği ya da reaksiyon kinetiğine bağlı olabilir. İkinci durumda, enerji üretimi sıcaklığın bir fonksiyonu olacaktır ve denklem doğrusal olmayacaktır. Termoplastikler için, yüksek viskoziteleri nedeniyle, malzemenin aşırı ısıtılması,

viskoz dağılma nedeniyle olur. Örneğin, Enjeksiyon kalıplamada, ısıtıcılar ısıyı polimeri başlangıçta ergitmek için sağlamalarına rağmen, viskoz dağılmaya bağlı olarak üretilen önemli miktarda ısı dar kanallarda geçerken malzeme şekil değiştirirken üretilir. Bu nedenle bu enerji dengesi için hesaba katılması gerekir. Kompozit reçine ve fiberlerden meydana geldiğinden, karışım kanunları, ısıl kapasite ve ısıl iletkenlik gibi termofiziksel özellikleri hesaplamada genellikle kullanılır.

4.4.3 Kurucu Yasalar

İlgilenen parametreler arasındaki deneye dayalı bağıntılardır. Genellikle, makro seviyedeki denklemlere mikron ya da moleküler seviyede çalışılan ve analiz edilen fizik dahil edilmez. Bu denklemler, koordinat sistemi ile bağıntılar ve sonuçların değişmeyeceği denklemlerden olmalıdır. Neredeyse, tüm kurucu denklemleri araştırmacılar, malzeme ve durumuna özel olan denklemlerde içeriği karakterize etmesi gerekir. Örneğin, bir gerilmeye maruz kalmış bir akışkan, eğer gerilme her zaman doğrudan gerinime orantılıysa, akışkanın deneye dayalı orantısal sabiti viskozite olur. Bu kurucu bağıntı Newtonien kanun olarak bilinir ve bu davranışı gösteren sıvılara Newtonien sıvılar denir. Kurucu denklemler, proses rejiminde, deneylerle gösterilen fizikle uyumlu olması için durağan olmalıdır.

Kurucu denklemler, reçinenin heterojen doğasına, karmaşık kimyasına ve dolgu ve fiberler etkileşimine ve mikro, mezo ve makro seviyelerde anlık kütle ve enerji iletimine bağlı olarak kompozit malzemelerin işleminin tanımlanması gerekir. Mikron boyutunda kürelerin büyüme hızı gibi mikro yapıda analiz edilen konular, makro yapı seviyesinde gösterilebilir. Bu durumda, kristalizasyon kinetiği cinsinden, uygun kurucu denklemlerin kullanımı ile uygulamaya konabilir. Kurucu denklemler, mikro seviyede detaylara takılmak yerine proses mühendisi ilgi alanında olan prosesin global resmini ve proses parametrelerini tarif eder. Kurucu denklemler, her zaman, araştırmacılara malzeme ve proses koşullarının fonksiyonları olan sabitleri belirlemesini gerektirir. Bu nedenle, kurucu denklemler için malzeme sabitlerini bağımsız karakterizasyon ve sınıflandırma böyle prosesleri modellemeyi yavaşlatan ve tehlikeye atan uğraştırıcı bir iştir.

Malzeme davranışını, kütle, momentum ve enerji korunumu denklemleri kullanarak tanımlayan kurucu denklemler on bir birincil değişkenli on bir denklem sistemini oluşturur. Bu değişkenler; basınç, hızın üç bileşeni, sıcaklık ve gerilmenin altı bileşeni. Bu denklem sistemini çözmek için, sınır koşullarının tanımlanması gerekir.

4.4.4 Sınır Koşulları

Sistem ya da prosesi etkileyen dış etkiler değişkenler için sınır koşullarını formüle ederek ifade edilmesidir. Genelde, iki tip sınır koşulları vardır: kinematik, ki bu hızla ilgilidir ve dinamik, ki bu da hız alanlar ile ilgilidir.

Sınırdaki akışkanın fiziksel temasını düşünerek, sınır koşulları daha sonra beş gruba ayrılabilirler.

Sıvı-katı arayüzeyi (katı yüzeyde temas)

Sıvı-sıvı arayüzeyi

Sıvı-buhar arayüzeyi

Serbest yüzey

Özel giriş ve çıkış sınır koşulları

4.4.5 Kabuller

Modelleri basitleştirmek için, bazı kabuller yapılır. Belirli kabuller ciddi şekilde bir proses modelini basitleştirebilir. Fakat, uygun olmayan basitleştirmeler, gözlemlerle uyumsuz proses davranış tahminlerine ayrıca yol açabilir. Bu nedenle, kabullerin iyi düşünülmüş, deneyime dayalı ya da deneylerle doğrulanmış olması önemlidir. Bir ya da daha fazla proseslerde kullanılan, ilgi alanı içindeki fenomenlere bağlı olan genel kabuller, bu bölümde açıklanmıştır. Bu kabuller, her proses için kullanılması gerekli değildir. Her modellenen fenomen için, modeli basitleştirmek için yapılmış her kabulü doğrulama alıştırmalarından geçmesi gerekir.

4.4.5.1 Yarı Kararlı Durum

Fiziksel olarak, hız, sıcaklık ya da basınç gibi değişken kararlı durumdadır. Bu, sabit referans taslağından, değişken uzamsal yerde zamanla değişmeyeceği anlamına gelir. Matematik olarak, kararlı durum $\partial(\)/\partial t=0$ yaparak ifade edilir. Yarı kararlı kabul, ufak karasız ya da zaman bağımlı akışı, ufak pasif etki ile kararlı durum akışını ifadesi olarak yaklaşım yapmak demektir. Böylece, problem zaman bağımlı sınır koşulları taşımaya rağmen, herhangi bir zaman için t kararlı durum problemi olarak çözülebilir. t zamanı için, koşul sabit değer olacaktır, böylece kararlı durum ana denklemi çözülebilir.

Eğer sınır koşullarından momentum iletimi iyi tanımlanmış ve malzeme ataleti önemsiz ise bu yaklaşım mantıklıdır. Kinetik viskozite ν , genellikle momentum iletiminin hızı ile ilgilidir.

Polimerler ve polimer kompozitler için, bu değer su ile karşılaştırıldığında çok yüksektir. Momentum iletiminin hızı herhangi bir zamanda ani değer için her zaman yaklaşım yapılabilir. Bunu tanımlamanın diğer bir yolu, viskozite yüksek ve proses hızı düşük olduğunda atalet etkileri önemsizdir.

Bu kabulün kullanımına bir örnek kalıp dolumu problemlerindedir. Bu tarz problemlerde, akışkan basıncı için çözülen çözüm alanı, kalıptaki reçinenin sınırları ile çevrelenmiştir. Eğer reçine kalıp çeperine ulaşırsa alan, kalıp sınırları ile ve kalıp çeperine ulaşmayan bölgelerde ani reçine cephesi (akış cephesi olarak bilinir) çevrelenmiş olur. Basınç alanı için çözülürken, akışkan hızları çözülür ve akışkan hızlarına bağlı olan akış cephesi ilerler ve yeni alan için tekrar çözülür. Bu prosedür kalıp dolana kadar devam ettirilir. Böylece, basıncın yarı kararlı çözümü sadece ani malzeme özellikleri ile basıncın bir fonksiyonu olan sınır koşullarına bağlıdır.

4.4.5.2 Tam Gelişmiş Bölge ve Giriş Etkisi

Sistem değişkeni belirli yönlerde değişmediğinde, değişkenin bu yönde tam geliştiğine kanaat getirilir. Örneğin, eğer sıcaklık profili x yönünde değişmez ise, sıcaklık x yönünde tam geliştiği fiziksel olarak kabul edilir. Matematiksel olarak bu koşul $\partial T/\partial x=0$ olarak ifade edilebilmektedir.

“Tam gelişmiş akış ve önemsiz giriş etkileri” kabulü polimer ve polimer kompozit prosesinde geniş şekilde kullanılmaktadır. Kabul tekrar momentum iletim hızı ile ilişkilidir. Kinematik viskozite ne kadar yüksek ise, o kadar momentum iletimi hızlı olmaktadır ve hız profili o kadar çabuk gelişmektedir.

Bir tanktan ya da basınçlı kaptan gelen tüpte bir akışı düşünelim. δ giriş bölgesinde, akış profili giriş noktasından viskoz Newtonien akışkana doğru parabolik bir profil olmaktadır. Genellikle, bu bölge tüpün D çapına ve Reynolds sayısına $Re=UD\rho/\mu$ orantılıdır; burada U hız, ρ yoğunluk, μ viskozite.

Eğer Reynolds sayısı birden düşük ise, giriş etkisi tüp çapından daha düşük sürmektedir ve tam gelişmiş akış kabulü önemli fiziksel kurallara ya da çözümlere etkisi olmayacaktır.

Benzer şekilde, eğer akış yönünde tam gelişmiş sıcaklık profili kabul edilmek isteniyorsa, şu kriterin karşılanması gerekmektedir:

$$\frac{\delta}{D} \cong (0,03 \text{ ile } 0,04) Re Pr \quad (4.4)$$

4.4.5.3 Yağlama Yaklaşımı

Osborne Reynolds, *yağlama yaklaşımı* terimini, hidrodinamik yağlama analizine gönderme yaptığında geliştirmiştir. Bu teoriyi uygulamak için anahtar gereksinim akışın viskoz olmasıdır (Reynolds sayısı küçük olmalı) ve akış ufak aralıklarda gerçekleşmelidir. Kompozit prosesi sırasında genelde kalınlığı milimetre olduğu halde, uzunluk ve genişlikte muhtemel olarak metre cinsinden olan parçalar kullanılır. Düşük Reynolds sayısına sahip olduklarından, yağlama analizi modeli kolaylaştırmak için kullanılabilir.

Newtonien viskoz malzeme için hareket denklemlerini kolaylaştırmak için nasıl yağlama teorisinin kullanılması gerektiğini özetlemek mümkündür. Bu analizi akış problemine uygulamadan önce sağlanması gereken şartlar şunlardır:

Malzeme basılamaz olmalıdır.

Akış izotermal olmalıdır.

Reynolds sayısı birden ufak olmalıdır (atalet kuvvetleri viskoz kesme kuvvetlerinden daha ufak olmalıdır)

Düzlemdeki boyutlara kıyasla aralık yüksekliği çok küçük olmalıdır.

Eğer aralık yüksekliği, h , sabit değilse, düzlemdeki boyutlarda çok yavaş değişmelidir. Boyuttaki boyutlar x ve y için; dh/dx ve $dh/dy \ll 1$

4.4.5.4 Kabuk Yaklaşımı

Eğer sınırlardaki kaymama sağlanamıyorsa, yağlama yaklaşımını kullanmak zor olabilir. Tam kayma varsa, akışı kalıp boşluğu kalınlığı boyunca akış olarak modellemek mümkündür. Örneğin, fiber ağı boyunca termoset reçinenin akışı için Darcy kanunu kullanıldığında, kalıp yüzeylerinde tam kayma olduğu kabul edilir. Böyle durumlarda, kalınlık boyunca akış ihmal edilir. h kalınlıktaki yeri, L düzlemdeki yerleri için K_h ile K_L sırasıyla kalınlıkta ve düzlemde fiber ağının geçirgenlikleri ise $K_h/K_L \ll 1$.

4.4.6 Deneysel Onaylama

Neredeyse tüm prosesler, bir ya da daha fazla kabulle geliştirilir. Birçoğu, kurucu ya da fenomenolojik kabulleri malzeme davranışını göstermek üzere kullanılır. Bu nedenle, model kabullerinin deneysel sonuçlarla örtüşüp örtüşmediği kontrol edilmelidir. Bir model

simülasyonları, her yerde basınç ve sıcaklık dağılımları ile fiber yönlenmesi gibi birçok detayı göstermek üzere geliştirilmiştir. Bir deney sonlu çoklukları ölçülebilir. Bu nedenle, hangi değişkenin ölçüleceğini ve nereden ölçüleceğini belirlemek önemli bir faktördür.

Bir modeli onaylamanın birçok çeşidi vardır. Ana denklemlerin biri ya da tüm alan değişkenleri seçilmeli ve doğrudan tahminlerle karşılaştırılmalıdır. Örneğin, kalıbın ortasındaki reçinenin sıcaklığını göstermenin bir yolu, enjeksiyon zamanının bir fonksiyonu olarak almak ve izotermal olmayan simülasyonlarla karşılaştırmaktır. Diğer bir yaklaşım ise, temel bulguları doğrudan karşılaştırmaktır.

Uygun değişkenleri onaylama deneyleri ile sınamak önemlidir. Akışa bağımlı fiber yönlenme modelini onaylamak için, fiber yoğunluğu ve fiber uzunluk dağılımında değişim olmadığını kabul ederek enjeksiyon kalıp dolumu simülasyonunu geliştirilmiştir. Kurucu reolojik model gerilme-gerinim ilişkisi için kullanılmakta ve fiber yönlenmesi tahmin edilmektedir. Daha sonra, sonuçlar enjeksiyon kalıplanmış numunelerden ölçülen fiber yönlenme durumu ile karşılaştırılmaktadır. Akışa bağımlı fiber yönlenme modelini onaylamak için bu iyi bir onaylama şekli değildir, çünkü enjeksiyon kalıplamada fiber yönlenme şeklini etkileyen diğer bir çok değişken de mevcut olmaktadır. Fakat, eğer basit kesme akışında ya da diğer iyi tanımlanmış akışlarda fiber süspansiyonu oluşturulabilecek ve böyle akışlardaki fiber yönlenmesi ölçülebilecek ise, bu akışa bağımlı fiber yönlenmesi modeline yardım edebilir. Dahası, modelin ıslahına neden olabilecek fiber-fiber etkileşimi fenomenini izah edebilecektir.

Bu nedenle, deney tipi formüle edilmiş proses modellerinde önemli bir faktördür. Her proses modeli genellikle bir çok fenomenden, alt adımlardan ve her alt seviyede kabullerden oluşmaktadır. Eğer mümkünse, tüm modele bağımsız olarak her alt modeli onaylamaya çalışmalıdır. Örneğin, filament sargıda, termokimyasal, fiber hareketi, gerilme ve boşluk modeli gibi bir çok alt model vardır. Bu modelleri, ölçülen özellikler ile son tahmini özellikleri karşılaştırmaktan ziyade bağımsız olarak onaylamak yararlıdır. Alt modellerin bir kaçını doğrudan onaylamayı istenildiği durumlarda her alt modeli doğrulamak bazen verimli olmayabilir.

Tek tek alt modelleri onaylamanın yanında tüm prosesi onaylamak önemlidir, çünkü alt modeller arasındaki modellenmiş etkileşimlerin tamlığına ışık tutmaktadır. Proses modelin her alt modelini onaylanabilir ve proses modelin onaylandığı kabul edilebilir, fakat henüz doğrulanmamış alt

modeller arasındaki etkileşimler hakkında kabuller yapılmış olabilir. Bu nedenle, proses modelin onaylanması tahmini değerlerle son sonuçları onaylanana kadar tamamlanmış değildir.

Eğer deneylerle model tahminleri örtüşürse, tasarım, üretim ve kontrol için başarılı bir model oluşturulmuş demektir.

4.4.7 Model Bileşenlerini Tekrar Sınama

Model kurulmasına geçilmezden önce model bileşenleri tekrar sınanmalıdır.

4.4.7.1 Kabulleri Tekrar Sınama

Tahminlerin ve deneysel sonuçların örtüşmediği durumlarda, modeli yapan kişi kabullerini tekrar gözden geçirmeli ve bu kabuller için doğrulama deneyleri yapmalıdır. Modelleyici simülasyonu veya kapalı şekil çözümlü ya da ağ düzeltimli modeli doğrulamış olmalıdır. Daha sonra, modelleyici fenomeni temsil etmede kullanılmış olan kurucu yasayı sorgulamalıdır. Bazen modelci kanunu değişik hale sokmak için deneylerden yeteri kadar öğreneceği şeyi olabilir. Örneğin, eğer model kuvvet kanunu akışını malzeme davranışını temsil etmek üzere kullanıyor ise, deney çok düşük kesme hızlarını içerir, deney sonuçları ve tahminler örtüşmez. Carreau akışkan modelini kullanırken modeli tasfiye etmek gerekebilir. Aynı şekilde, fiber-fiber etkileşimi, akım tahrikli fiber yönlenme modelinde sabit bir parametre ile temsil edilebilir. Fakat model deneyleri beklenen yönlenme davranışı tahminlerden az da olsa farklı olduğunu görebilir. Bu, modelleyiciye tüm fiber yönlenme durumunda sabit olamayacağını düşünmesine neden olacaktır. Tüm fiberler düzenlendiği zamana göre tam düzensiz (rasgele) yönlenme durumunda fiber-fiber etkileşiminin daha yüksek olduğu beklenebilir. Bu nedenle, modelleyici fiber yönlenme modelini geliştirmek için bu bakış açısını kullanabilir.

4.4.7.2 Kanunları Tekrar Gözden Geçirme

Genellikle modeller, daha fazla malzeme parametrelerini katarak geliştirilebilir veya sadeleştirilebilir. Örneğin, daha önce belirtildiği gibi kuvvet kanunundan Carreau akışkanına değiştirmekle iki yerine üç parametre gerekir. Benzer şekilde, eğer fiber etkileşimi parametresi yönlenmeye bağımlı yapılırsa, bu ilişkinin belirlenmesi için ek bir denklem gerekebilmektedir. Diğer zamanlarda, kurucu yasaları yeni gözlenen fenomenleri kullanmak için tekrar formüle etmek gereklidir. Örneğin, rasgele fiber preform tamamen Darcy kanununa tabidir, çünkü birçok

kez bu doğrulanmıştır. Fakat bazı örülü ya da sıkı dokunmuş kumaşların iki ölçekli gözenekleri vardır: Fiberler arasında daha ufak gözenekler ve büyük gözenekler.

Akışkan bu preformları döllediğinde, fiberler arasındaki gözenekler fiberler arasında daha ufak gözenek olduğundan daha önce bir zamanda dolmaktadır. Bu modelin tekrar formülasyonunu gerektirmektedir, çünkü ikili ölçekli gözenekli ortamın doyması rasgele preformlarda olduğu gibi ani olmadığı bulunmuştur.

4.4.7.3 Sınır Koşulların Tekrar Sınama

Bazen, hata, sınır koşullarının doğru bir şekilde uygulanamayışından ya da sınır koşullarının bilinmediğinden kaynaklanabilmektedir. Eğer iletimsel ısı transfer sınır koşulları kalıbın dışında mevcut ise, kedisinin kurucu yasaya gerektirdiği iletimsel ısı transferi katsayısını belirlemek gerekmektedir. Bir yaklaşım, bu sınır koşullarını kullanmayan fakat belirli sıcaklık ya da ısı akımını kullanan doğrulama deneyleri yapmaktır.

4.5 Model Oluşturma Çalışması

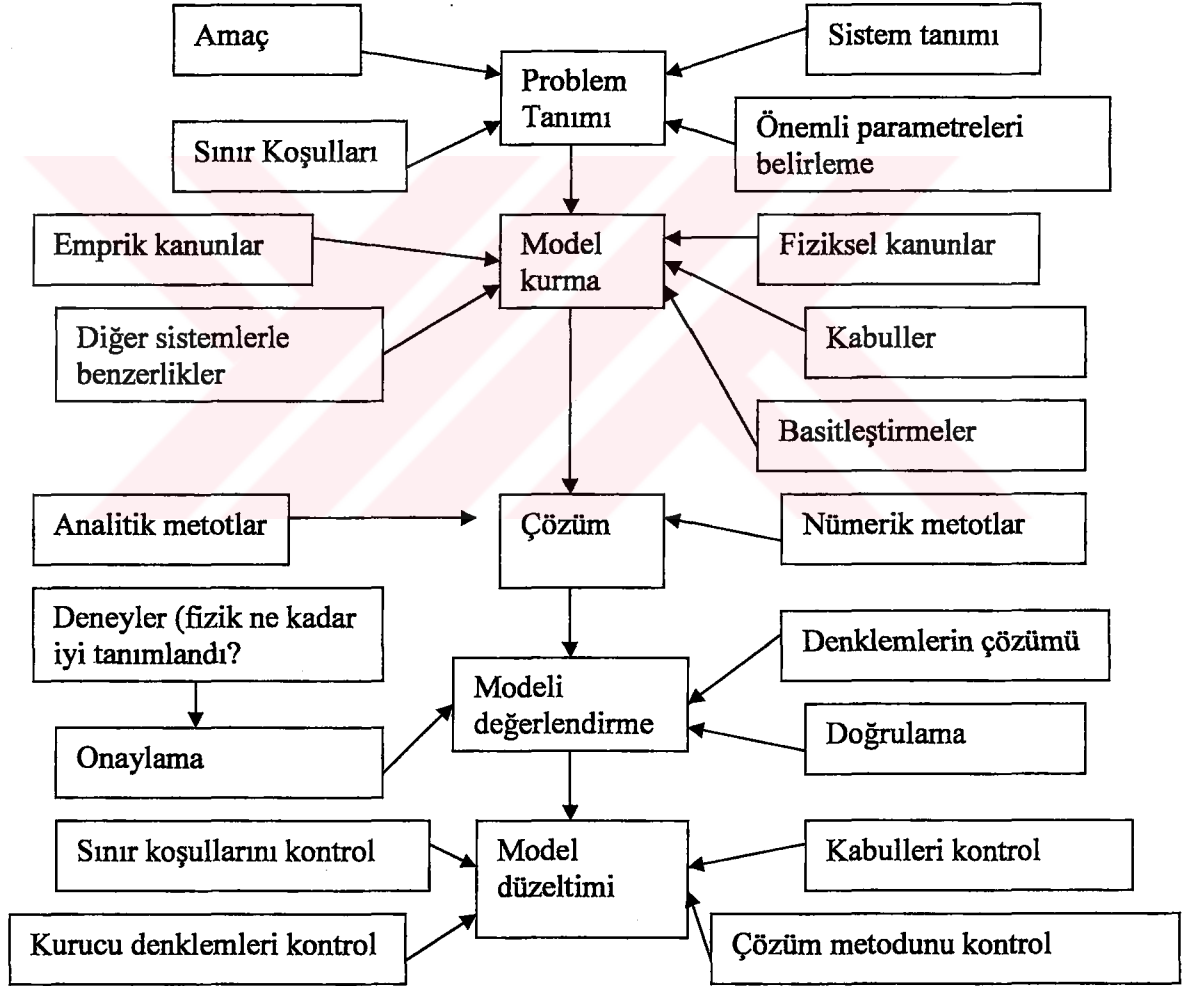
Modelleme yolu değişebilir fakat Şekil 4.1’de genel plan gösterilmiştir.

4.5.1 Problem Tanımı

Bir modelin amacı girdi ve koşulların bir prosesteki davranışını tahmin etmektir. Bu nedenle, fiziksel proses ve girdileri tanımlanmalıdır. Fiziksel proses tüm kompozit üretim prosesini göstermeyebilir fakat üretim sırasında prosesin ufak bir bölümüne odaklayabilir. Bu nedenle, pratik proses ve girdileri tanımlanması gerekir. Fiziksel özellikler tüm kompozit üretim prosesini temsil etmeyebilir, fakat üretim sırasında prosesin ufak bir kısmına odaklanabilir. Örneğin, enjeksiyon kalıplamada, kalıp dolumu üretim prosesinin bir kısmıdır. Modelde, vida, yolluk ve yolluk giriş kısmı fiber süspansiyonuna debiyi veren diğer kaynaklar olarak belirtilmelidir. Modelleme sırasında sınırlarını da belirtilmesi önemlidir. Diğer alt sistemler olarak modellenebilecek olan prosesin diğer parçaları sınırdan sağladıkları ile tanımlı sistemle etkileşimde olabilir.

Modelin amacı tanımlanmalıdır, çünkü modelin hangi açısına vurgu yapıldığını etkilemektedir. Prosesin önemli tepkilerini ve hangi koşul ve girdilerin temsil edileceğini tanımlamak yararlıdır. Amaca bağlı olarak, aynı fiziksel proses için farklı modeller farklı cevap verebilir. Örneğin, RTM

gibi proseslerde bazı modeller debi ve basınçla çok az ilişkilidir. Diğerleri karmaşık geometrilere akış cephesi yeri hakkında detaylı bilgi verebilmektedir. Ayrıca bir çok kalıp boşluğu ile sınırlı olabilmektedir. Bazı modeller de sıcaklık geçmişini dahi verebilmekte ve kalıcı gerilmeleri tahmin edebilmektedir. Modeller sadece pişme fazına odaklanabilir ve dolumu ihmal edebilir. Bu nedenle, aynı proses için model çokluğu olabilir. Seçilen model hangi durumların önemli olduğu, aynı zamanda sonucu bulmak için ne kadar zaman ve çaba gerektiğine bağlıdır.



Şekil 4.1 Modelleme akış şeması

4.5.2 Matematiksel Model Oluşturma

Sistem ve önemli büyüklükleri tanımlandığında, fiziksel yasalar, ampirik ve fenomenolojik gözlemler ve veya diğer sistemlerle benzerliklerden model kurulabilir. Fiziksel prosesi temsil eden bir matematiksel model, birincil ve ikincil değişkenli olarak ilintili büyüklükler ve matematiksel denklemler seti ile sistem davranışını tanımlamaktadır. Seçilen sistem ve çevre arasındaki karşılıklı etkileşimler, modelin sınır koşulları olarak dahil edilmektedir.

Birçok kompozit üretim prosesi modelleri kütle, momentum ve enerji korunumu gibi fiziksel yasaları, viskozite ve geçirgenlik yasaları gibi ampirik gözlemlerle birleştirmektedir. Eğer tüm bilinen etkiler dahil edilirse, model karmaşıklaşmaktadır. Tecrübeli modelleyici model, önemli etkileri hesaba katacak kabuller yaparak modeli basitleştirmeye, diğer yandan, matematiksel denklemleri çözmeyi daha kolaylaştırmaya çalışacaktır. Basitleştirilmiş model gerekli bir çok parametreleri sadeleştirecektir. Sonuçlar daha kolay anlaşılır olacaktır.

Örnek olarak, RTM akışı ince kalıp boşluğunu doldururken sadece düzlem boyunca önemlidir. Böylece ana denklemler üç boyuttan iki boyuta indirilebilmektedir. Denklemleri çözmek için, geçirgenlik tensörünü kurmak gereklidir. İki boyutlu için, sadece iki ana geçirgenlik bileşeni gereklidir. Viskozite modelini kullanırken benzer basitleştirmeler yapılmaktadır. Newtonien bir akışkan için sadece bir malzeme parametresi gereklidir. Fakat eğer Carreau akışkan modeli seçilirse, dört malzeme parametresi seçilmelidir. Ek olarak, denklemler doğrusal değildir ve çözümü daha zordur.

4.5.3 Denklemlerin Çözümü

Formüle edilmiş matematiksel model sıradan tek bağımlı veya bağımsız değişkenli diferansiyel denklem olabilir. İki veya daha çok bağımsız değişkenli karmaşık ve doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemler sistemi olabilir. Eğer uygulanmış sınır ya da başlangıç koşulları belirtilmiş ise, basit denklemler analitik olarak çözülebilir.

Karmaşık geometride çözülecek kısmi diferansiyeli modeller için, sonlu farklar, sınır eleman ve sonlu elemanlar analizi gibi standart sayısal yöntemler kullanılabilir. Eğer denklemler ya da sınır şartları, kalıp dolusunda olduğu gibi hareketli sınır problemi gibi doğrusal değil ise özel teknikler gerekebilmektedir. Modelin diğer bir amacı da, çözüm için seçilecek yöntem karar vermektir. Dolayısı ise yöntem seçimi, kurulum ve çalışma zaman ve maliyetini belirlemektedir.

Sayısal bir yöntem uygularken bilgisayar yazılımının uygunluk, uyarlanabilirlik, etkinlik ve kullanıcı arayüzeyi gibi özelliklerini de göz önünde bulundurmak gerekir.

4.5.4 Modeli Değerlendirme

Model değerlendirme iki bölümden oluşur: doğrulama ve onaylama

Doğrulama; önceden belirlenen sınır koşullarında formüle edilmiş denklem kümesine seçilen yöntemin doğru sonuç verip vermediğini ima etmektedir. Sayısal tekniğin herhangi hata ya da ana denklemin doğru sonuç vermesinden saptıracak herhangi bir uygunsuzluğa müsaade etmediği her zaman doğrulanmalıdır. Eğer sayısal bir yöntem kullanıldıysa, analitik ya da basitleştirilmiş bir geometri için çözüm kümesi veya yarı kararlı durumlar ile karşılaştırılmalıdır. Ayrıca, çözüm alanı üzerinde korunduğunu anlamak için global çözüm ve enerji dengesi karşılaştırılmalıdır.

Onaylama; seçilmiş fenomenin fiziğini proses modelin nasıl iyi tanımladığına işaret etmektedir. Kabuller yapıp ampirik bağıntılar katılarak sınır şartları yaklaşık olarak verildiğinden, önemli fiziksel kuramların modelde hala geçerliliğini koruduğunu kontrol etmek zorunluluktur. Onaylama, ayrıca herhangi bir önemli fenomenin proste kayıp olduğunu kontrol etmeye izin vermektedir. Aynı zamanda, doğrulama, proses modele katılan gereksiz ve önemsiz etkileri açığa çıkarır.

Bir proses model nasıl onaylanır? En genel yaklaşım deneyledir. Bu yaklaşımın iki seviyesi vardır:

İlk olarak, proses model doğru fiziği kapsadığından emin olmak için, kontrol altında laboratuvar deneyleri ya da model deneyleri yapmak önemlidir. Eğer amaç, Newtonien akışkanda akışa bağlı olarak fiber yönlenmesi modelini doğrulamak ise, yönlenme davranışını anlamak ve kayıt etmek için iz bırakan fiberli silikon yağ ve naylon fiber gibi akış modeli kullanılabilir. Eğer model sonuçları doğrudan enjeksiyon kalıplanmış plaklardan alınmış fiber yönlenme ölçümleri ile kıyas ediliyor ise, viskoelastisite, fiber kırılması, polimer soğuması ve fiber toplanması gibi diğer etkiler fiber yönlenmesini etkilemede rol oynayabilmektedir. Bu nedenle, akışa bağlı etkiyi, bu gibi proses modeline dahil olmayan diğer etkilerden ayırmak zorlaşabilecektir.

Model deneyleri, proses durumunda altında yatan fiziği bir çok kes ortaya çıkarabilir ve diğer etkilere bağlı parazit ya da sapmayı önleyebilir. Fakat, parazitin sadece parazit olduğu ve proses sırasında modelde ihmal edilecek kadar önemsiz olduğundan emin olmak gerekmektedir.

Model deneyleri “ideleştirilmiş model” onayı için yararlı bilgiler sağlamasına rağmen, “idealleştirilmiş model” fabrika zemini gerçeğini ne kadar iyi yansıttığının bilinmesi gerekmektedir. Deneylerin ikinci aşaması, üretim durumunu taklit etmektir. Termoset işlenmesinde kapalı kalıpta akış fiziğini Darcy kanunu nasıl iyi kapsadığını göstermek için model deneylerinde rasgele preformlar kullanılabilir. Fakat eğer örülü ya da kumaş preformlar üretimde takviye seçimi ise, bu malzemelerin de ayrıca Darcy kanununu ayrıca gösterdiğini doğrulamak önemlidir. Eğer değilse, ne kadar fazla kanundan ayrıldığını bulmamak gerekir. “Böyle malzemeler için yeni bir model geliştirmek gerekir mi?” ya da “preformun çift ölçekli doğasına bağlı olarak hata tahmin edilebilir mi?” gibi sorular gelecek ve cevaplandırılması gerekecektir.

4.5 Modeli Düzeltme

Eğer model deneysel sonuçlarla uyarsa, kullanışlı tahminler yapmak üzere başarılı bir model çıkmıştır. Fakat çoğu durumlarda, model ve deneyler arasında uyumsuzluklar olacaktır. Uyumsuzluğun muhtemel nedenlerini matematiksel olarak araştırması önemlidir. İlkönce, kullanılan çözüm metodunun kusursuz olduğu kontrol edilmelidir. Ana denklemler için kullanılan çözüm uygulamalarındaki hataları aramak gerekir. Daha sonra, modelde eksikliklerin olup olmadığı kontrol edilir. Bir model, hatalı kabul, uygun olmayan ampirik yasa, yanlış hipotez, aşırı basitleştirme ya da doğru olmayan sınır koşulları kullanım olabilir. Örneğin, fiber- fiber etkileşimi akış sırasında sabit olmadığı kabul edilmiş ise, deneysel sonuçlar doğru sonuç vermeyebilir ve bu kabul tekrar sınanmalıdır. Bu nedenle, modeldeki eksiklikler ve sayısal yöntemler bir bilgisayar programında birlikte bulunur ve bir tek varlık olarak görmek çok kolay olmaktadır.

Diğer basit uyumsuzluk, malzemenin karakteristiklerini tam olarak belirtmemekten kaynaklanmaktadır. Örneğin, RTM’de kalıptaki geçirgenlik sabit değer olarak kullanılabilir. Fakat, deneyde malzeme geniş olarak değişiklikler gösterebilmektedir. Deneysel dolum zamanı ve yolluk giriş kısmı basıncı, önceden tahmin edilenden farklı olabilir. Bu nedenle, proses model doğru olabilir fakat malzeme parametrelerinin doğru belirlenememesi uyumsuzluklara neden olabilmektedir. Ayrıca, proses modelde yerleştirilen fizik ile deneyden elde edilen fiziğin örtüşmesi gerekir.

Genel olarak şu söylene gelmektedir: Bir modelci model kurduğunda modelciden başka hiç kimse sonuçlarına inanmaz, fakat bir deneyci sonuç sunduğunda, deneyi yapan dışında herkes

inanır. Bu nedenle, modelde kabul edilen aynı şartlarda deney yapılması gerekmektedir. Laboratuvar yöntemleri ve uygulamaları tam ve tutarlı sonuçların vermesini sağlamak önemlidir; ölçüm aygıtlarının tam olmayan hesaplamaları, reçine akması, debide dalgalanma ya da modelde kabul edilen sınır koşullarından farklı deneysel sıcaklıklar uyumsuzluğun temel nedeni olabilir.

Modeller deneylerle rutin olarak uyuşmamaktadır. Modelleme yaklaşımında düzeltimler gerekli doğal bir bileşen olarak düşünülmelidir. Deneylerdeki gözlemleri açıklamak için düzeltimler modelde ek koşullar getirebilir. Arıtılmış model fiziksel prosesi daha yakından gösterecektir.

4.6 Seçilmiş Termoset ve Termoplastik Prosesler İçin Proses Modelleri

Kompozit prosesi için, çeşitli analitik modeller, reçine akışı, pişme derecesi (termosetler için) ya da kristallik (termoplastikler için), sıkışma ve birleşme derecesi, kalıcı gerilmeler, vs'i göstermek için geliştirilmiştir. Tüm fenomeni analiz etmek için, bütün model genellikle 4 alt modele ayrılmıştır. Alt modeller, eş zamanlı birleştirilir ve çözülür. Stanford Üniversitesinden, George Springer ve takımı çeşitli üretim prosesi için (örneğin, otoklav, filament sargı, pultrasyon, RTM, vs) proses modelleri geliştirmekte mükemmel iş çıkarmışlardır. Çeşitli reçine sistemlerinin pişme kinetiğini anlamada modeller geliştirmişlerdir. Pişme/kristallik kinetiği için modellerin yanı sıra çeşitli üretim prosesleri için modeller geliştiren birçok araştırmacılar vardır.

4.6.1 Termokimyasal Alt Model

Bu alt model ani yerel sıcaklıktaki viskozite ve ya pişme ya da kristallik derecesini, reçine tipine bağlı olarak sağlar. Tabakalı yapıdaki sıcaklık dağılımını belirlemek herhangi bir zaman ve noktadaki viskozite ve pişme derecesini anlamada çok önemlidir. Düzensiz pişme ve katılma derecesi, parçada kalıcı gerilmelere neden olur. Sıcaklık dağılımı, sonlu eleman analizi (FEA) yazılımı kullanarak ya da bilgisayar modelleri geliştirip sonlu farklar metodu ya da sonlu elemanlar metodu gibi sayısal teknikler kullanarak çözerek belirlenir. Yapı içindeki sıcaklık dağılımı, sınır ve ilk koşullara bağlı olduğu gibi malzeme özelliklerine de bağlıdır. Otoklav, filament sargı, termoplastik bant sargı prosesleri için sınır ve başlangıç koşulları farklıdır.

Bu konu hakkında bağımsız çalışmalar olduğu gibi RTM prosesi ile ilgili çalışmalar mevcuttur. 5. Bölümde ayrıntılı olarak ele alacağımız gibi, çeşitli teknikler kullanarak pişme kinetiğine bağlı modellemeler yapılmıştır.

4.6.2 Boşluk Alt Modeli

Herhangi bir üretim prosesinin amacı, boşluk miktarını minimize etmektir, çünkü boşluğun oluşumu kompozit parçanın performansını kötüleştirir. Kompozit parça üretimi sırasında boşluklar ya mekanik yolla (örneğin hava ya da gaz baloncukları tutumu, kırık fiberler) ya da homojen veya heterojen çekirdeklenmeyle meydana gelir. Bu model parçanın boşluk boyutunu belirler.

Kompozit parça yapımı sırasında, ya mekanik yolla (örneğin, hava ya da gaz baloncuk tutumu, kırık fiberler) ya da homojen veya heterojen çekirdeklenme ile boşluklar oluşur. Boşluk oluştuğunda, boyutu ve şekli şunlara bağlı olarak değişir:

1. Boşluğun içindeki basınç değişimi, prepregdeki basınç ve sıcaklık değişimine bağlıdır.
2. Boşluk içindeki buhar kütleindeki değişim, boşluk/prepreg arayüzeyi boyunca buhar iletimi nedeniyle olur.
3. Isıl genleşme ya da kendini çekme, reçinedeki sıcaklık gradyanına bağlıdır.

Boşluk alt modelde hem yer hem de boşluğun başlangıç boyutu bilinmesini gerektirir. Genelde bu bilgi mevcut değildir, çünkü boşluk çekirdekleri oluşumu rasgele prostir. Diğer yandan, geliştirilen bu alt model, düşük boşluk içerikli olmakla sonuçlanacak pişme çevrimi seçiminde hala kullanılabilir. Boşluk içeriği, prepregde buhar baloncuklarını yıkacak derecede yüksek basınç uygulandığında etkili bir şekilde azaldığı bulunmuştur. Buhar baloncukları, yerel sıcaklıkta boşluk içindeki doyma basıncına eşit ya da daha büyük olan bir basınç uygulandığında buhar baloncukları kaybolur. Burada belirtilen şey, basınç jel noktasına ulaşmadan az önce ($t < t_{jel}$) uygulanır. Tipik bir otoklav pişme çevriminde, 80 - 100 psi (552-690 kPa) arasındaki bir basınç, 270 °F (132 °C)'de uçucuları çıkarmak için uygulanır. Sonra sıcaklık 350 °F (177 °C)'e reçinenin 1 ile 2 saat arasında pişmesi için yükseltilir. Jel zamanı ve yerel sıcaklık termokimyasal ve reçine akış modelleriyle belirlenir. Sıcaklık ile doyma basıncı arasındaki uygun termodinamik ilişki gereken basıncı verir.

4.6.3 Gerilme Alt Modeli

Bu model, parçada, üretim prosesinden meydana gelen kalıcı gerilme ve gerinimleri tahmin eder. Kalıcı gerilme oluşumu, kalın ve büyük parçaların yapıldığında dikkate alınması gereken bir noktadır. Kalıcı gerilmeler parçayı çarpar ve parçayı toleranstan saptırır. Simetrik olmayan laminatlı ya da benzer olmayan malzemeli parçalar için kalıcı gerilme baskındır. Simetrik parçalarda, kalıcı gerilme düzensiz pişme ve katılma nedeniyle oluşur. Kalıcı gerilmenin birincil nedeni reçinedeki kimyasal değişim, düzensiz pişme/katılma ve her bir tabakadaki ısı genleşme katsayısı farkına bağlı olarak ısı gerinimleridir.

Laminatta kalıcı gerilmeler, reçinenin pişme sıcaklığından oda sıcaklığına soğutulduğunda oluşur. Kalıcı gerilmelerin iki ana nedeni, reçinedeki kimyasal değişimler ile ısı genleşme katsayılarının farkına bağlı olarak her bir tabakadaki, ısı gerinimleridir. Pişme süreci sırasında, çapraz bağlar oluşurken, epoksi kendini çeker ve kimyasal değişimler meydana gelir. Kimyasal değişimler, tek yönlü laminatta boyuna doğrultudan ziyade zıt yönde daha fazla deformasyona neden olur. Bu nedenle, laminatta, bir tabakanın deformasyonu farkı yönlenmeli diğer tabakalarla engellenir ve bu nedenle her bir tabakada kalıcı gerilmeler oluşur. Kompozit süreci sırasında, çapraz bağlar, pişme sıcaklığı denin terfi sıcaklığında genellikle meydana gelir. Bu sıcaklıkla, reçine kalıcı gerilmenin tam relaksasyonuna izin verecek kadar hala yeteri derecede viskozdur. Bu nedenle, pişme sıcaklığı, gerilmemiş sıcaklık olarak düşünülür. Bu modelde, kimyasal kendini çekmeden kaynaklanan kalıcı gerilmeler düşünülmemiştir.

Kalıcı gerilme oluşumunun ikinci nedeni ısı gerinimle alakalıdır. Bir kompozit laminant, pişme sıcaklığından oda sıcaklığına soğutulduğunda, çeşitli tabakaların ısı uyumsuzluğuna bağlı olarak önemli kalıcı gerilme oluşabilir. Bazı durumlarda, bu pişme gerilmeleri tabakalar arası çatlaklara meydan verecek kadar yüksek olabilir.

4.6.4 Akış alt modeli

Bu model, reçine akış, fiber ve reçine dağılımı, sıkıştırma ve termoplastik durumunda, birleşme ve bağlanma derecesini tahmin eder. Reçine akışı farklı proseslerde farklı cereyan eder. RTM prosesinde, kuru fiber kalıp içinde kullanılır ve reçine tek veya çoklu girişle enjekte edilerek döllendir. RTM prosesinde, prepregler parça yapımında kullanılır. Prepreglerde, takviyeler reçine ile ön döllendirilmiştir. Otoklav prosesinde, reçine akışı, havayı ve aşırı reçineyi almak için tabakalar arasında meydana gelir. Reçine akışı, iyi sıkıştırılmış parçalar yapmada yardımcı olur. Filament sargı prosesinde, fiberlerin ve reçinelerin gelen tabakaları ön döllendirilmiş kompozitler üzerine yatırılır. Filament sargı prosesinde reçine akışı hava boşluklarını ve fazla reçineyi almak böylece sıkışmış parçalar elde etmek için meydana gelir. Termoplastik bant sarma prosesinde, reçine akışı, ısının gelen bant ve ön birleştirilmiş tabakalar arasındaki ufak hacimde meydana gelir. Bu proseste, reçine akışı tabakalar arası iyi bağ elde etmekte sorumludur. Hepsinden öte, bir üretim prosesinde reçine akış analizi, üretilen parçalar aşırı reçineli ya da kuru fiber alanlı, dolgunsuz kalıp alanlar ya da birleşmemiş alanların olup olmadığında kılavuzluk eder. Bu modellemeyi ayrı bir bölümde ayrıntılı olarak ele alacağız. İletim prosesleri momentum fiziği ve tüm safhalarda enerji iletimini içerir. Kompozitler heterojen malzemeler olduğundan, mikro, mezo ve makro boyutlarda kütle ve momentum transferleri vardır. Zaman bağımlı malzeme prosesleri ve sınır koşullu çoklu sistemde kimyasal reaksiyonlar sırasında meydana gelir. Kompozit üretim prosesleri, akışa göre üç kategoriye ayrılabilir:

Kısa fiber süspansiyon metotları

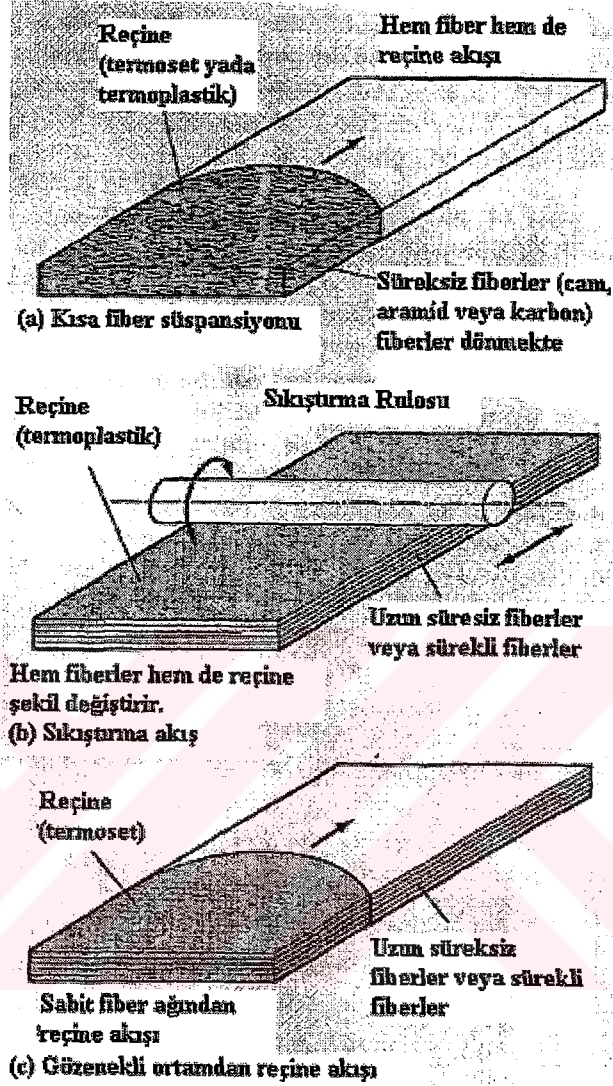
Sıkıştırma akış metotları

Gözenekli ortam metotları

Kısa fiber süspansiyon üretim metodu: kalıbın içine veya kompoziti şekillendirmek üzere kalıp boyunca süspansiyon şekilde fiberlerin ve reçinenin taşınmasını içeren üretim proseslerinden oluşmaktadır. Böyle proseslerde, ergimiş şekillendirici reçine içinde fiberler büyük mesafelerde hareket edebilir ve genellikle dönmesi ve kırılması serbesttir. Son ürünün mikro yapısı, proses metodu ve süspansiyonun kalıba akışı ile bağlıdır.. Enjeksiyon kalıplama, basma kalıplama ve

ekstrüzyon prosesleri bu kategoriye girer. Takviyeler genellikle süreksiz cam, aramid ve karbon fiberler ve reçine ya termoset ya da termoplastik olabilir.

Sıkıştırma akış üretim metotları, ya da ileri termoplastik kompozit üretim metotları genellikle sürekli ya da uzun bağlı, süreksiz ya kısmi ya da tamamen termoplastik reçine ile ön döllenen fiberlerden oluşur. Bu proseslerde, fiberler ve reçine, kompoziti şekillendirmek için uygulanan kuvvet altında sürekli teller ya da tel gurupları içeren hamur gibi beraber şekil değiştirirler. Fiberlerin olması, uygulanan yüke anizotropik direnç yaratır ve genellikle viskozitesi suyunkinden bir milyon kere fazla olabilmektedir. Bu kompozitin büyük kütleli hareketlerini engeller. Termoplastik sac üretimi, termoplastik püskürtme ve fiber şerit yatırma metotları bu fizikte açıklanabilir. Öncü malzemeler çeşitli formlarda olabilir. Böyle bir form düzenli ve sürekli ya da uzun süreksiz fiberlerle döllenen termoplastik şerittir. Diğer popüler form, cam ya da karbon fiberlerle karışık polimer fiberlerin preform dokumasıdır. Uygulanan ısı ve basınç altında, polimer fiberler erir ve takviye fiberler arasındaki boşluğu doldurur. Polimer başlangıç safhaları sırasında fiberlere bağlı toz formunda da ayrıca olabilir. Isı ergitecek ve basınç fiber gurubunu kaynaştırma ve birleştirmeye yardım eder. Termoplastik reçine hareket edemez ve çok yüksek viskozitesine bağlı olarak uzun mesafelerde sürüklenemez. Bu nedenle, öncü malzeme formu fiber mimari ağı içinde dağılmış reçine süzülmesini sağlamak zorundadır.



Şekil 4.2 Kompozit prosesinde beklenen akış tiplerinin şematifi. (a) Kısa fiber süspansiyon üretim yöntemleri: kalıba doğru ya da kalıptan geçerken reçine-fiber süspansiyonu akışı. Örnekler: enjeksiyon kalıplama, basma kalıplama ve ekstrüzyon. (b) Sıkıştırma akışı üretim yöntemleri (ileri termoplastik kompozit üretim yöntemleri): sıkıştırma rulosu hem termoplastik reçineyi hem de ön döllenen fiber ağını şekillendirir. Örnekler; termoplastik sac şekillendirme, termoplastik pultrasyon ve bant yatırma. (c) Gözenekli ortam üretim yöntemleri (ileri termoset üretim yöntemleri): sabit fiber ağından reçine akışı. Örnekler; sıvı kompozit kalıplama, termoset pultrasyon, filament sarma ve otoklav

Gözenekli ortam üretim metotları, ya da ileri termoset kompozit üretim metotları, açık ya da kapalı kalıpta kompoziti şekillendiren reçinenin içine girip dölleyeceği ve hava ile yer değiştireceği, genellikle sürekli ve neredeyse sabit fiber ağlarından oluşur. Reçine bu proseste neredeyse her zaman, düşük viskozitesi nedeniyle termosettir. Bu metotlarda hakim olan kimyasal reaksiyonları gerçeğe yaklaştırmak için hesaba katmak gerekir. Sıvı kompozit kalıplama, termoset pultrasyon, filament sargı ve otoklav prosesi bu kategoriye dahildir.

Malzemeler çeşitli formlar alabilir: kısmi döllemiş preformlar, katmanlara sıvı termoset reçine uygulanmış fiberler ya da reçine ile döllemiş sabit fiber ağı. Termoset reçinelerin düşük viskozitesi bu çok yönlülüğe izin verir. Fakat karmaşık kimyasal reaksiyon, jellenme ve pişme fenomenlerini katmak dezavantajdır. İzotermal durumda modelleme gerçekleştirilirse ısı transferinden kaynaklanan sıcaklık, pişme ve viskozitenin Newtonien dışı davranışı gibi izotermal olmayan koşullar sisteme dahil edilmez. Böylece dolum safhasında kalıp içi akış fenomenini inceleme daha da basitleştirilebilir.

Bir kompozit prosesinde, fiber yapısı ve kalıbın içindeki, iyi sıkışmış tabakaları şekillendirmek üzere reçine akar. Bir RTM prosesinde, reçine iç yolluk girişi ile enjekte edilir ve kompozit parçayı şekillendirmek üzere fiber yapısı içinden akar. Reçine akış analizi, üretim prosesi ile üretilen parçanın fazla reçine ya da kuru fiber alanı, dolmamış kalıp alanı ya da birleşmemiş alanın olup olmadığı hakkında kılavuzluk eder.

Bir otoklav prosesinde, reçine akış analizi, tüm tabakalar (prepregler) tamamen sıkışmış olup olmadığını belirler. Bir otoklav prosesinde, tabakalar arasındaki arayüzeyin oluşmasından sonra, fazla reçine kusulur. Otoklav pişmesi, filament sargı ve termoplastik bant sargı prosesleri için akış analizi mevcut olduğu halde biz RTM prosesini uygulamalı olarak ayrı bir bölümde akış modellemesini yapacağız.

5. REÇİNE İLETİM KALIPLAMA AKIŞ ANALİZİ ÇALIŞMALARI

Reçine İletim Kalıplamasında akış modellemesi konusunda daha önce yapılan çalışmalar gruplandırılarak aşağıda özetlenmiştir.

5.1. İzotermal Akış

RTM'de kalıp dolumu prosesi gözenekli ortamdan akış prosesi olarak düşünülebilir. Petrol, tarım, filtreleme, ısıtma ve soğutma endüstrisinde uygulamalarda gözenekli ortamdan akış problemlerini içeren bir çok literatür bulunmaktadır. Fakat, bu alanlarda çalışma RTM prosesinde kalıp dolumuna doğrudan uygulanabilir alanlar değildir. Diğer yandan, RTM üzerine sayısal ve deneysel çalışmalar son zamanlarda yayınlanmıştır. Bu çalışmaların bir çoğu, ana denklem olarak, Newtonien akışkanların doymuş gözenekli ortamda akış hızının ortam boyunca basınç düşmesine orantılı olmasını öngören Darcy kanununu kullanmışlardır.

Anizotropik gözenekli ortamda kalıp dolumu, reçine iletim kalıplama ve yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplama gibi bir çok kompozit üretim proseslerinin ana fenomenidir. Kalıp dolumu kısmının sayısal simülasyonu, proses değişkenleri (enjeksiyon basıncı ve kalıp sıcaklığı), malzeme özellikleri (hem reçine hem de fiberli ortam) ve akış değişkenleri (basınç, hız dağılımı) arasında karmaşık ilişkiler arasında kullanışlı bilgiler sunabilir. Böyle bir yaklaşım, proses ekipmanı tasarımı ve üretim performansını tahmin etmede yardım edebilir. İki boyutlu, sonlu eleman/kontrol hacmine (FE/CV) dayanan sayısal simülasyon Brusckve ve Advani (1990) tarafından fiberli ağ boyunca viskoz akışkanın akışın tahmin etmede ön görülmüştür. Değişen kalınlıkta keyfi şekilde ince kabuk kalıp geometrisinde akış cephesinin serbest yüzeyi hareketi tahmin edilebilmiştir. Fiber ağı boyunca akış Darcy kanunu kullanarak modellenmiştir. Simülasyon ortam boyunca büyüklük ve yönlenmede geçirgenlikte değişimlere izin vermektedir. Deneysel, fiber preformların karakteristik geçirgenliklerini ölçmek için yapılmıştır. Simülasyonun sonuçları Newtonien akışkan (SAE-30 motor yağı) kullanarak, ayıraç yardımı ile iki plakayı tutan düz dörtgen kalıpta gerçekleştirilen deneylerle karşılaştırılmıştır. Tek yönlü (%30 fiber hacim oranlı) ve rasgele yönlenmiş kırık fiberli (%25 fiber hacim oranlı) iki tip cam matriks kullanılmıştır. Preform ve proses koşulları çeşitli sayısal model, doğrulamak için kullanılmıştır:

Farklı yönlenmeli yığılmış tabakaların etkisini araştırmak için, aynı kalınlıktaki dokuz tek yönlü matriks yatırma kullanarak deney yapılmıştır. Tahmini ve deneysel akış cephesi kalıp çeperleri yakınında iyi uyumuştur. Kalıp çeperi boyunca akış cephesi deneyde daha hızlı ilerlemiştir.

İkinci deney, rasgele cam matriks kullanarak yuvarlak insert yerleştirilmiş bir kalıpta yapılmıştır. Yine, tahmini ve deneysel sonuçlar, kalıp çeperine cephe ulaşana kadar iyi bir şekilde uyumuştur.

Üçüncü deneyde, preformda kesik çizgisi olan iki bölümlü tek yönlü cam kullanılmıştır. Kesik çizgisinin öncesinde ve sonrasında, tahmini ve deneysel değerler mantıklı bir şekilde uyumuştur. Fakat, kesik çizgisine yakın bölgelerde ana geçirgenliklerin oranının değiştiği gösterecek şekilde kesik çizgisinde akış matriks doğrultusunda daha hızlı ilerleme eğiliminde olmuştur.

Son deney setinde, kalıp aralık yüksekliği kalıbın bir bölümünde azaltılmıştır. Geçirgenlik, kalınlığı azalmış bölgede %10 arttırılmıştır. Bu demektir ki, geçirgenlik ile fiber hacim oranı arasında doğrusal bir bağıntı bulunmaktadır.

Son üç deneyler FE/CV yaklaşımının çok yönlülüğünü göstermek için yapılmıştır. İlkinde, akışkan iki dip köşelerden enjekte edilerek bu tip akışta CV yaklaşımının kullanılabilirliğini kanıtlamıştır. İkincisinde, farklı yönlenmeli dört tek yönlü matriks kullanılmıştır; bu tip matriksin simülasyonda özel bir sorun oluşturmadığı görülmüştür. Üçüncüsü ise üç boyutlu kalıp dolumu simüle edilmiştir. Büyük ve karmaşık ağlamaya rağmen, FE/CV metodu diğer sayısal tekniklere nazaran işlemci hassasiyetli değildir.

Birçok yaklaşımda, viskozite kesme hızının bir fonksiyonu olmadığını kabul etmiştir (yani reçine Newtonien). Yüksek derecede Newtonien olmayan karakteristik gösteren reçine sistemleri için, bu kabul geçerli değildir ve kuvvet kanunu gibi viskozite-kesme hızı ilişkisi uygulanmalıdır. Bunun için, aynı araştırmacılar (1991), gözenekli ortamda kuvvet kanunu akışkanlarının akışını tanımlamak için kapiler model esaslı Darcy kanununun değişik şeklini kullanmışlardır. Çalışmalarında, polimerlerin akış davranışını tanımlamakta en çok kullanılan iki genelleştirilmiş Newtonien modeller olan *kuvvet kanunu*'ndan ve *Ellis Modeli*'nden bahsetmişlerdir. Fiber preformunun karakteristik geçirgenliğini ölçmek için deneyler yapmışlardır. Geliştirilen model değişen kalınlıkta keyfi şekilli ince kabuk kalıp geometrisinde akış cephesinin serbest yüzey hareketini tahmin etmektedir. Simülasyon sonuçları, Newtonien akışkan kullanarak düz dörtgen kalıpta gerçekleştirilen deneylerle karşılaştırılmıştır. Sayısal modeli doğrulamak üzere çeşitli preformlar ve proses koşulları kullanılmıştır.

Young ve Lee (1991), izotermal koşullarda yapısal enjeksiyon kalıplama ve reçine iletim kalıplama proseslerinin kalıp dolumunda kullanılmak üzere FE/CV metoduna dayanan 2 boyutlu ve 3 boyutlu bilgisayar simülasyonu şeması geliştirmişlerdir. Geliştirilmiş bilgisayar kodu karmaşık geometrili kalıpların kalıp dolumunu simüle edebilmiştir. Deneyleer ayrıca akış gösterimlerine dayanarak yürütülmüştür. Karmaşık geometrili parçaların, örneğın otomotiv çatısı, kalıp dolumu bu çalışmada sayısal olarak incelenmiştir. Gerçek otomotiv gövde panellerine dayanan deneysel çalışma, ön görülen kalıp dolumu simülasyon programını daha sonra doğrulamak üzere yürütülmüştür.

Sayısal kalıp dolumu proses simülasyonu Kwang ve Lee (1991), sınır eleman metodu (BEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel doğrulama ayrıca yapılmıştır. Anizotropik gözenekli ortam için Darcy kanunu ana diferansiyel denklemi kurmak için kütle korunumu ile kullanılmıştır. Sonuç potansiyel problem sınır eleman tekniğı ile çözülmüştür. Çözüm alanı ilerleyen reçine cephesi ilerlerken değışirken, sınır düğümleri her zaman adımı için tekrar düzenlenir. Bir önceki ve şu anki zaman adımlarındaki düğümler arasında çizilen çizgi ve katı sınır arasındaki kesişim noktasında, zaman ilerlerken çözüm alanından kaçan düğüm tekrar yerleştirilir. Dörtgen kalıp verisi ile çözümler iyi uyum göstermiştir. Modelin daha sonraki doğruluğunu değerlendirmek için, kalıp dolumu sırasında reçine ıslatma hızı hesaplanmış ve kütle korunumunu kontrol etmek için karşılık gelen reçine giriş hızı ile karşılaştırılmıştır. Çok yakın uyum gözlenmiştir. Ayrıca, yöntemin etkinliğini göstermek için karmaşık geometriler için sayısal hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Coulter ve Güçeri (1989), reçine iletim kalıplama ve reçine film yığılma üretim proseslerini anlamak için yürütülmüş olan kompozit malzeme üretimi sırasında reçine döllenenmesi alanına deneysel araştırma yapmışlardır. Ek olarak, daha önce böyle prosesleri simüle etmek için geliştirilmiş kod olan (TGIMPG)'yi test etmektir. Yürütölen deneyleer, üç boyutlu fiber takviyesi içeren ince kalıba enjekte edilen reçinenin döllenenmesini tam olarak görüntölemekten oluşmaktadır. Deneyleer, ayrı olarak dörtgen ve düzensiz şekilli anizotropik fiberli preformlar için yapılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılmasında bir çok sonuçlar elde edilmiştir. TGIMPG kodu deneysel olarak akış şekli ile mantıksal olarak uyum içinde olan reçine cephe ilerleme tahminleri verdiğıne karar verilmiştir. Anizotropik durumlar için, diğer yandan, çalışılan preform malzemelerin ikincil eksenlerinde akış derecesini tahmin edemediğı bulunmuştur. Ayrıca, temas noktaları bölgelerinde (örneğin yan çeperler) düzensiz döllenenmeler oluştuğı ve deneysel

olara gözlenenden daha az temas noktası hareketi tahmin ettiği tespit edilmiştir. Makalede, simülasyon kodlarının tahmin etme kapasitesi ile, reçine iletim kalıplama ve reçine film yığıma gibi üretim proseslerinin etkinliği oldukça arttırılabileceğinin sonucuna varılmıştır.

Lin, Hahn ve Huh (1997), dolaylı sonlu eleman yöntemi ile izotermal reçine kalıplama prosesi modellenmesi geliştirmiştir. Geleneksel dolaysız FE/CV yaklaşımının aksine, sabit tek zaman adımında akış cephesi elemanından daha hızlı ilerlemesine izin vermektedir. Geliştirilen bilgisayar kodu RTMSIM düz plaka kapalı form sonuçları ile tahminler karşılaştırılarak geçerliliği test edilmiştir.

Mohan ve arkadaşları (1999a) , fiziksel olarak tam ve hesaplama yönünden daha az yük getiren Saf Sonlu Elemanlar Yöntemini iterasyon kullanarak geliştirmiştir. Formüller reçine akışı için zaman bağımlı kütle korunumu denkleminde başlayarak geliştirilmiştir. Darcy akış yaklaşımı hız alanını içerdiğinden, ani ana denklemler geliştirilerek, reçine cephe yüzeyi yerini takip eden basınç alanı ve reçine doyma dolum oranı bulunmuştur. Geleneksel dolaysız FE/CV yaklaşımında gerekli olan her bir düğüm çevresinde oluşturulması gereken kontrol hacimlerine ve zaman artımı sınırlamasına gerek kalmadan hem basınç alanı hem de dolum oranı iterasyon ile çözülmüştür. Böylece kalıp dolum prosesinin fiziksel ani doğasını belirleyerek, gelişmiş sayısal ve hesap yöntemi ortaya konulmuştur.

Aynı araştırmacılar (1999b, 1999c), geliştirdikleri dolaylı Saf Sonlu Elemanlar Yöntemini üç boyutlu karmaşık yapılarda dolaysız FE/CV yaklaşımı ile karşılaştırmalı olarak göstermiş ve teknik olarak iki yaklaşımın artılarını ve eksilerini üç boyutlu parçalar üzerinde göstermişlerdir. Ayrıca, FE/CV yaklaşımına akım esaslı sonlu elemanlar ayrışması getirerek bu yöntemde katkıda bulunmuşlardır.

Kanapady ve Tama (1999a, 1999b), RTM proseslerinde yüksek ölçeklenebilir paralel bilgisayar modeli geliştirmişlerdir. Ölçeklenebilir paralel algoritmalar tanımlanmış ve simetrik multi işlemci (SMC) olan SGI Origin 2000 ile SGI Power Challenge kullanarak teknik detayları verilmiştir. Üretim proses simülasyonu uygulaması olarak geleneksel dolaysız kontrol hacmi sonlu eleman (FE/CV) yaklaşımı ile yeni geliştirilmiş dolaylı saf sonlu eleman yaklaşımı kullanmıştır. Böylece iki yaklaşım uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır.

Chang ve Hwang (1991), polimerik kompozitlerin RTM kalıbı dolumu izotermal gösterimi için bir model geliştirmişlerdir. Model, fiberli takviyenin anizotropik doğasını ve polimer reçinenin

kimyasal reaksiyon sonucu viskozitesindeki değişimi hesaba katmıştır. Fiber ağdan dölleyen reçinenin akışı Darcy kanunu terimleri ile ifade edilmiştir. Modeldeki diferansiyel denklemler sayısal olarak sonlu eleman tekniği kullanılarak çözülmüştür. Galarkin sonlu eleman yöntemi, basınç dağılımını elde etmek üzere kullanılmıştır. Öngörülen hesapsal şemanın uygulamasını göstermek için, hem izotropik durum hem de ortotropik durum için bir örnek çalışılmıştır. Simülasyondan, aynı koşullar altında kalıp dolumu zamanı ortotropik kumaş için %30 daha fazla olduğu ve akış cephesinin şeklinde büyük değişikliklere neden olduğu gözlenmiştir.

Liu, Bickerton ve Advani (1996), üretim sırasında proses koşullarına gönderim yapmak üzere reçine iletim kalıplama prosesi için Delaware Üniversitesi'nde geliştirilmiş mevcut kalıp simülasyonu olan LIMS (Sıvı Enjeksiyon Kalıplama Simülasyonu)'nda üç simülasyon özelliği geliştirmiştir. Bunlar yoluk giriş noktası kontrolü, havalandırma ve kuru bölge oluşumu. İlk özelliğe prosesi kontrol etmek için pratikte kullanılan gerçek sensörleri simüle eden sayısal sensörler kullanılarak ulaşılmıştır. İkinci özellik havalandırmanın bulunmasını hesaba katmak için geliştirilmiştir. Havalandırma/çıkıcı yeri bilgileri ile, simülasyon basınç dağılımı ve kalıp dolumu şeklindeki değişiklikleri tahmine etmek için kullanılmıştır. Üçüncü özellik kuru bölge oluşumunu tahmin etmek için sağlanmıştır. Eğer kalıpta hava tutulmuşsa ve bu tutulan hava dolum prosesinde takip ediliyorsa simülasyon kodu bunu kontrol eder. Bu özelliklerin bileşimi tasarım aracı olarak kodun kabiliyetini arttırmıştır. LIMS simülasyon kodunu doğrulamak için bir çok deneyler yapılmıştır.

Reçine iletim kalıplama prosesi, düşükten ortaya üretim hızlarında bileşenlerin üretimi için iyi bir proses olarak tanımlanmıştır, fakat yüksek hacimde uygulamaları henüz gösterilmemiştir. En az çevrim süresi sunumu, bunun için ön koşuldur; bu nedenle temel çalışma tek proses zamanlarının ve toplam çevrim zamanlarını göz önüne alan bir çok proses değişkenlerinin göreceli önemini sunmak üzere Rudd, Owen ve Middleton (1990) tarafından yürütülmüştür. Burada tanımlanan çalışma, plak kalıplama ekipmanında ulaşılan çevrim zamanlarındaki birçok proses değişkenlerinin etkisini teorik ve deneysel çalışma ile ortaya konulmuştur. Sınama için seçilen bir çok değişken: fiber oranı, enjeksiyon basıncı, reçine ön ısıtımı, preform ön ısıtımı sıcaklığı. Fiber oranı etkisi, preformda sabit laminant kalınlığı ve değişken fiber kütlesi göz önüne alınarak çalışılmıştır. Sonuçlar, kütlece %18 ve %43 fiber kullanarak fiberler için sunulmuştur. Kalıp boşluğu dolum zamanı, daha yüksek geçirgenliğe sahip olan %18 fiber oranı

için yaklaşık %50 azaldığı gösterilmiştir. Bir çok deneyden sonra, ön ısıtılmış reçine sisteminin ya da ön ısıtılmış preform kullanılması kalıp dolumu zamanını düşürmekte olduğunu göstermiştir.

Young ve Chuang (1995) T şekilli yapısal kompozitleri üretmek için RTM prosesi kullanmıştır. Kalıp boşluğundaki vakum fiber matriksi ve kalıp arasındaki boşluk veya kalıbın kusurlu kapatılmasına bağlı olan kuru bölge oluşumu ihtimalini azalttığı bulunmuştur. Kalıp dolumunun sayısal simülasyonları, kalıp dolumu şekilleri ve kenar kanallanma akışında yolluk giriş yeri etkisini araştırmak üzere oluşturulmuştur. Değişik fiber malzemeler için T şekilli yapıların bağ dayanımlarını araştırmak için mekanik çekme testleri yapılmıştır. T şekli yapılar kalıp ve yolluk giriş noktası iyi tasarlandı ise RTM prosesi ile iyi kalitede üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

Ferret ve arkadaşları (1998) RTM prosesi ile elde edilen yapısal parçalarda insert etkisini araştırmışlardır. "Ecole Polytechnique de Montreal" tarafından geliştirilmiş olan RTMFLOT kullanarak yapılan sayısal akış simülasyonu enjeksiyon prosesini optimize etmelerine izin vermiştir. Mikro seviyede de çalışan bu simülasyonlar, insert kullanımı ve kumaş döllemesi kalitesini başarılı bir şekilde teyit etmiştir. Bu mikro seviye gözlemler hata oluşumunun (reçine toplanması, kumaş tabaka basımı ve çatlaklar) yerini belirlemede yardımcı olmuştur. Ayrıca parçaların mekanik testleri (çekme basma, eğme) yapılmıştır.

Kompozitlerin reçine iletim kalıplamasında, ıslatma sırasında hareketli reçine cephesinin yeri proses optimizasyonu için önemlidir. Schwab, Levy ve Glower (1996), RTM kalıbında reçine pozisyonunu belirlemek için DC kondaktometre esaslı , basit, pahalı olmayan ve çoklu noktalı sensör sistemi tanımlamıştır. Çıktıları döllemenin başlamasından sonra herhangi bir zamanda reçine akış şeklini üretmede kullanılacak Reçine Pozisyon Sensörü (RPS) sistemi RTM takımına gömülen ufak sensörler matriksi oluşturulmuştur. Pişme başladığında, reçine direnci artmış ve sensör pişme monitörü olarak çalışmıştır. Büyük 24 sensörlü RTM takımı RPS gösterimi için üretilmiştir. Hem E-cam hem de karbon fiber preformların döllemesi sırasında sensör verilerinden üretilen akış konturu haritası gösterilmiştir.

Bickerton ve arkadaşları (2001), RTM'nin dolum fazı için aktif kontrolü üzerine çalışma yapmışlardır. Geliştirilen tam otomatik akış gösterim test yatağı, çoklu çizgi enjeksiyon sistemi, akış cephesi sensörü ve otomatik havalandırma grubundan oluşmaktadır. Ayrıca, tam kontrollü enjeksiyon için tasarım esasları belirtilmiştir. Tüm örneklerde kuru bölge azalmış, daha karmaşık parçalar başarı ile üretilmiştir.

Diğer bir ilginç konu da fiber hasırın deformasyonudur. Reçine sıvı kompozit kalıplamada kalıba enjekte edildiğinde, önceden yerleştirilmiş fiber hasır enjekte edilmiş akışkan tarafından taşınan yüksek momentum nedeni ile yolluk giriş kısmı yakınında şekil değiştirir. Fiber hasır deformasyonunu izleyen yolluk giriş kısmı yakınında fibersiz bölge oluşabilir. Bu fenomen, yığın fiber hasırın düşük geçirgenlik ve reçinenin yüksek viskoziteye sahip olduğu durumlarda meydana gelir. Kalıp dolumu deney seti Han, Lee ve Liou (1993) tarafından kalıp dolumu sırasında fiber deformasyonunu araştırmak için ufak saydam kalıp ve ekipmanlı metal kalıp kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, debi, basınç ve fiber hasır deformasyonu arasındaki ilişki, kalıp dolumu prosesine hasır deformasyonu etkisini değerlendirmek için araştırılmıştır. Deneyden üç sonuç çıkmıştır:

Fiber hasır deformasyonu yolluk giriş kısmının yakınında ufak bir bölgede sınırlıdır ve deformasyon büyük miktarda kalıplama basıncını azaltmıştır. Reçine akışı fiber hasırı sıkıştırmış ve kalıp çeperi ile fiber yatağı arasında bir kanal oluşturmuştur. Fiber yatağının deformasyonu fiber hasır , fiber hasırın yığın sırası, debi ve reçinenin viskozitesinden etkilenmektedir.

Fiber yatağı deformasyonu kalıp boşluğunda, fiber deformasyonu çok fazla ise kuru bölgeye meydan verebilmektedir.

Değiştirilmiş yolluk giriş kısmı tasarımı ile zorlanmış fiber deformasyonu kalıp dolumu sırasında maksimum basıncı azaltabilir (ya da debiyi arttırabilir)

Aynı araştırmacılar (1993), sıvı kompozit kalıplama sırasında akışa bağlı fiber matriks deformasyonunu simülasyonu için bir matematiksel model önermişlerdir. Fiber yatağı elastik kriş olarak davranmış ve yatağa uygulanan yük deformasyonuna neden olmuştur. Bazı yaklaşımlar, fibersiz bölgedeki reçine akış denklemini basitleştirmek için yapılmış ve şekil değiştirmiş fiber yataktaki basınç ve hız alanlarını hesaplamak için Darcy kanunu kullanılmıştır. Ana denklemler sonlu eleman/kontrol hacmi yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Sayısal sonuçlar daha önce elde edilen deneysel sonuçlarla mantıksal bir örtüşme sağlanmıştır.

RTM ürünlerinde hava kabarcığı tutumu, yüzey gerilmesine ve kapiler olarak parçaların katılığını zayıflatıcı etki yapmaktadır. Reçine iletim kalıplamada tamamlanmamış fiber ıslatma zayıf yüzey kalitesi, yüksek boşluk içeriği ve düşük mekaniksel özellikle sonuçlanabilmektedir. Bu nedenle, tutulan havanın önlenmesi ya da azaltılmasının yolları önemlidir. Shield ve Colton (1993), sıvı kalıplama reçinenin toz versiyonu ile ön kaplanmış yedek fiberin kullanımı ile (towpreg)

çalışmışlardır. Amaç, böyle preformların saha iyi fiber ıslanması nedeniyle son parça özelliklerinin iyileşip iyileşmediğini görmektir. Hercules 12K As-4 fiberler ve PR500 (sıvı) ve Ps500 (toz) reçineler, %50 (ağr.) reçine içeren towpreg kumaşların yapımında kullanılmıştır (sıvı ve toz birleşik). Toz oranları % ağırlık olarak 0, 13, 21, 50 dir. Sonuçlar göstermiştir ki, toz kaplı preformlarla kalıplanmış numuneler daha iyi yüzey kalitesi ve düşük boşluk içeriğine (% 1,4 ile 5) neden olmuş fakat muhtemelen elde örülü kumaşların kullanımından kaynaklanan mekanik özellikler gelişmemiştir.

Lundström ve Gebart (1994), reçine iletim kalıplamada deneysel olarak boşluk içeriğine farklı proses değişkenlerinin etkisini araştırmışlardır. Kalıplanan parçalar, laminantın bir kenarından diğerine paralel akışla düz kalıp dolumu ile yapılmışlardır. Boşlukların , laminantın havalandırılmış yanına yakın dar bir alanda yoğunlaştığı bulunmuştur. Bu bölgedeki boşluk hacim oranı neredeyse sabit ve laminantın geri kalan yerinde kısa uzaklıkta düşerek temel olarak hiç boşluk olmadığı görülmüştür. Boşluk içeriği uygulanan vakum ile azaltılabileceği ve neredeyse tamamen önlenebileceğine karar verilmiştir. Benzer etki, pişme sırasında artan basınçla elde edilmiştir. Bu sonuçlar, tam kalıp dolumu sonrasında basınç artımı ile laminatta boşlukların, azaltılmış boşluk içeriğine kısmen basma etkisi olduğunu önermiştir.

Yüksek kalitede ürün elde edilmesi için reçine dolum işleminde boşlukların önlenmesi önemlidir. Song Y ve arkadaşları (1996), mikro ve makro boşlukların oluşum ve göçünü araştırmak için iki fazlı, iki bileşenli havayı çözülebilen model sunulmuştur. Modelin sayısal çözümleri cephe izleme kodu yolu ile elde edilmiştir. Cephe takip yöntemi, simülasyon boyunca keskin arayüzeyleri koruma gibi önemli özelliğe sahiptir. Sonuçlar göstermiştir ki, sunulan model deneysel sonuçlarla istenilen nitelikte bir uyuma içindedir. Bu sonuçlara dayanarak, modelleme nin üretim prosesini, dolayısı ile ürün kalitesini nasıl iyileştirebileceğini göstermek için sayısal tahminlerde bulunmuşlardır.

Gözenekli ortamlarda kumaş preformlarda olduğu gibi ufak ve büyük olmak üzere çift ölçekli iki farklı ölçekte gözenegi vardır. Simacek P ve Advani S G (2002) bu çift ölçekli ortamı modellemek için FE/CV yaklaşımı kullanarak iç çökme terimini fazladan bir boyutlu elemanı kontrol hacimleri ile beraber değerlendirerek modellemiştir. Böylece daha önceden kullanılan yöntemlere çeşitli avantajlar sağlamıştır. Bunlar, çözülecek problem doğrusal kalarak akış zaman alanı içinde doğrudan hesaplanabilmekte olduğu ve çift doyma etkilerini RTM için mevcut simülasyon paketlerinde çift ölçekli ortamda akış kullanılabilmekte olmasıdır. Bunun için LIMS

simülasyon paketi kullanılmıştır. Keyfi şekilli parçaların dolumu sırasında doyma verisi sunmakta ve dolum basıncı ve debi üzerinde doyma etkisini belirleyebilmektedir. Parça performansı için önemli olan tam doyma için gerekli zamanı belirlemekte ve tek ölçekli geçirgen ortamda görülen enjeksiyon basıncı değişimi sorunları görülmemektedir.

VARTM'de modelleme, eğer RTM'de sıklıkla ihmal edilen, VARTM'de kalıp dolumu sırasında fiber sıkışması ve çift ölçekli fiber doymayı hesaba katılırsa daha karmaşık olur. Acherson, Simacek ve Advani (2003), bu fenomeni araştırmışlardır. Reçine akışını tanımlamak için ana denklem sistemini formüle edebilmek için rijit olmayan kontrol hacimleri tanımlamışlardır. Mikro seviyede fiber döllemesi, kütle korunumu ilkesi uygulanarak makro seviyede global reçine akışı ile ilişkilendirilmiştir. Preform sıkışması, sıkıştırma basıncı reçine ve preform arasında dinamik olarak dağılmış doğrusal olmayan yay yatak olarak modellenmiştir. Preform geçirgenliğindeki değişiklikler, sıkışmadaki değişimin bir sonucu olarak dıber hacim oranındaki değişimlere göre değiştirilmiştir. VARTM prosesinde sıkışma ve çift ölçekli gözenekli ortamın rolünü araştırmak için basit bir boyutlu kalıp dolumu çözülmüştür. Parametrik çalışma, tatmin edici sonuçlar için tam kontrollü model koşullarında sıkışma ve doymu ihman edebilecek durumları tanımlamalarına izin vermiştir.

Chang ve Kikuchi (1994), dolum simülasyonunun önemli bir bakış açısını sunmuşlardır. Kalıpta akış alanının boyut ve şekli reçine iletim kalıplamasında sürekli değiştiğinden, her zaman adımında akış alanının geometrisini tekrar tanımlamak gereklidir. Her zaman adımında tekrar sonlu elemanlar ağlaması yapmadan, sabit ağda simülasyonu gerçekleştirebilen bir çok sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri, sonlu elaman/kontrol hacmi (FE/CV) dir. Bu sabit ağlama yönteminde, başlangıç ağ, simülasyonun başından sonuna kadar kullanılmaktadır. Bu sabit ağ, geleneksel sonlu eleman yöntemlerine bir çok avantajlar sağlamasına rağmen, tüm simülasyon için bir ağın kullanımı, simülasyon boyunca önemli ölçüde akış alanının boyut ve şeklinin değişimi sırasında hesaplama etkinliğini de ayrıca düşürecektir. Örneğin, başlangıç dolum safhasında çözümün tamlığı için gerekli olan daha ufak ağlar, daha uzun hesap zamanına gerek duyacaktır. Yarı doluma geldiğinde artık buna ihtiyaç kalmayacaktır. Bu nedenle, simülasyonun belirli noktasında, çözümün tamlığını sağlarken, hesaplama zamanını azaltmak için ağların tekrar düzeltilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, araştırmacılar kalıp dolum prosesinin sayısal analizi için uyarlanabilir ağlama (adaptive remeshing) yöntemi sunmuşlardır. Ana denklemlerin türetilmesinin ve sayısal şema olarak FE/CV yaklaşımının kullanımı kısa bir tartışmasından sonra,

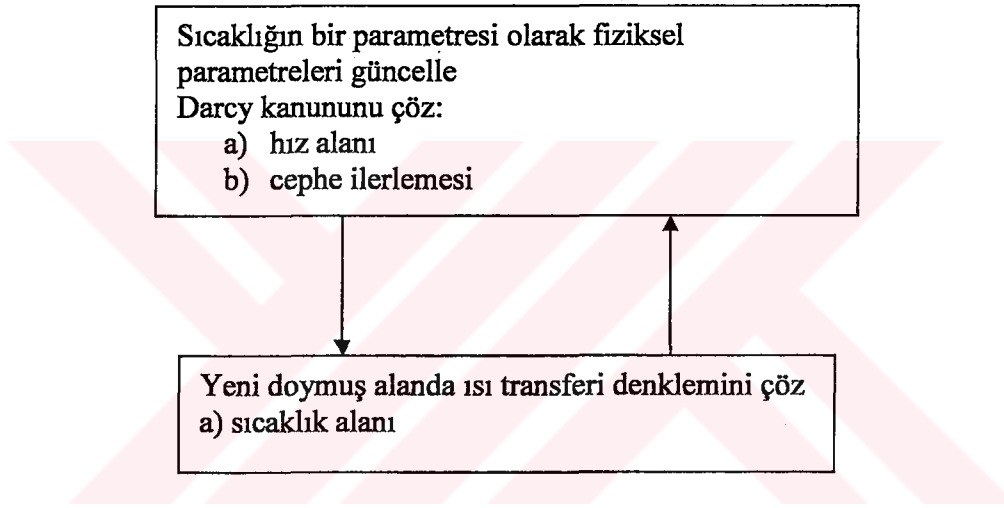
hata ölçümü ve otomatik ağ üretimi ile birlikte uyarlanabilir ağlama yöntemini sunmuşlardır. Ana denklemleri çözmek için FE/CV yöntemi ile başarılı bir şekilde uyarlanmışlardır. Makalede, uyarlanabilir ağlama şemasının performansı büyük ölçüde hata sınırlarına ve referans hatasına bağlı olduğu bulunmuştur. Eğer hata sınırlarının arasındaki fark çok ufaksa ya da eğer referans hata yaklaşık olarak seçilmemişse, yöntem yararlarını yok edecek olan sık ağlamaya neden olmaktadır. Diğer yandan, eğer aralık çok fazla ise, daha sonraki gelişmeye yer bırakacak tekrar ağlama yeteri kadar gerçekleştirilmemiştir.

RTM ile üretilen kompozit parçaların genel bir tipi olan üç boyutlu kabuklara, Béchet ve arkadaşları (2003), bilgisayar zamanını azaltmak için dolum hesabından önce ağı optimize ederek hata tahmini yapan uyarlanabilir ağlama yöntemini uygulamıştır. Kabuk geometrilere özgü problemler ele alınarak gerçek parçaların modellenmesi yapılmıştır. Son olarak, radyal enjeksiyonun analitik bir çalışması dört tip ağ artırım prosedürü ile ilgili noktalar gösterilmiştir. Bunlar, (1) sabit zaman adımı (2) sabit radyal yoğunluk (her zaman adımında akış cephesinin düzenli ilerlemesini sağlamak için), (3) sabit Caurant sayısı (durağan ısı simülasyonu sağlamak için) (4) sabit enterplasyon hatası.

5.2 İzotermal Olmayan Akış

Yukarıda açıklanan çalışmalar izotermal RTM kalıp dolumu ile ilgilidir. Fakat, kalıp ve reçine dolum prosesini hızlandırmak için ısıtılabilir. Son zamanlarda, izotermal olmayan kalıp dolumu ve sıvı kompozit kalıplama prosesinde pişme ile alakalı bazı araştırmalar yapılmıştır. İzotermal olmayan kalıp dolumunda ana sorun preformdan akış ve reçine ve fiber takviye arasında ısı transferidir. Hem reçine akışı hem de ısı transferini ilgilendiren FE(CV yöntemine dayanan matematiksel bir model Lin, Lee ve Liou (1993) tarafından geliştirilmiştir. Kalıplama deneyi seni ve model tahmini ile deneysel sonuçlar arasında karşılaştırmalar sunmuşlardır. Çalışmadan iki tip çözümden bahsedilmiştir. Biri, reçine akışının hızı düşük ve reaksiyon hızı yavaş olduğu böylece reçine ile fiber arasında ısı denge olduğu global analizdir. Diğerisi ise reçine akışı hızlı ya da reaksiyon hızı yüksek olduğu, reçine ve fiber sıcaklığı oldukça farklı olduğu global olmayan analizdir. Böylece, reçine ve fiber beraber toplanmamakta ve ayrı ayrı düşünülmesi gerekmektedir. İzotermal olmayan kalıplama deneyleri inert yağ ve reaktif poliüretan reçine sistemi kullanılarak yapılmıştır. Fiber takviye olarak sürekli rasgele fiber hasır kullanılmıştır.

Trochu ve Gauvin (1993), RTM prosesi için izotermal olmayan kalıp dolumu simülasyonu için sonlu elemanlara dayanan iki boyutlu model geliştirmiştir. Tayler-Galerkin yöntemi, ısı denklemindeki konveksiyonel terimlere bağlı olarak sayısal durağansızlığı önlemek için kullanılmıştır. Her zaman adımında reçine akışı hızını hesaplamak için, ısı transferi modeli, uyumsuz sonlu elemanlara dayanan kalıp dolum simülasyonu ile birlikte verilmiştir. Kalıp dolumu modelinde, fiberli preformun döllenmesi Darcy kanunu ile elde edilen gözenekli ortamda akış olarak modellenmiştir. Darcy kanunu ile hesaplanan hız dağılımını kullanarak, yeni doymuş alan, ısı transferi hesaplamaları yapılmış olan yerlerde her zaman adımında elde edilmiştir. Şekil iki program modülü arasındaki ilişkiyi göstermektedir:



Şekil 5.1 İzotermal olmayan modelleme akış şeması

Wymer ve Engel (1993), fiberler arasındaki termoset reçine akışına tek yönlü hasırın fiberlerinin ısıtılma etkisini sınamışlardır. Model, kararlı basılamaz akışkan, fiber yönünde aktığını kabul etmiştir. Sonuç denklem, basıncın doğrusal değişimini kabul ederek analitik olarak çözülmüşken, enerji denklemi sonlu farklar kullanarak sayısal olarak çözmektedir. İterasyon şeması, viskozite denklemine sıcaklık bağımlı kullanarak akış yönünde hızı güncellemek için kullanılmıştır. Fiberler, fiberlerinin boyuna doğru sıcaklık dağılımı ile sonuçlanacak fiber sonlarından iletim ile ısıtılmaktadır. Isıl bağımlı viskozite gradyenlerden kaynaklanan fiberler arasındaki hız profilleri, fiber boylarınca çeşitli adımlar için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak akış zamanındaki azatlımlar sabit sıcaklıktaki fiberler durumundakiler ve izotermal durumunda ısıtılmamış fiberlerin dolum zamanı ile karşılaştırılmıştır. Makale, fiber boyunca değişken sıcaklık dağılımlı basitleştirilmiş

mikro model içermektedir. Fiberler etrafındaki kanallardan reçine akışına bu dağılımın etkisi gösterilmiştir.

Wymer ve Engel (1994) ayrıca sıcaklıkla reçine viskozitesinin değiştiği ısıtılmış tek yönlü fiber demetine paralel termoset reçine akışını araştırmak için tek yönlü fiber hasır preform fiberleri ısıtılırken reçine iletim kalıplama prosesi için basit bir model geliştirmişlerdir. Ek fiberlere paralel hızlar için momentum denklemi çözerken akışkan durağan, basılamaz kabul edilmiştir. Reçine sıcaklığı enerji iletim denkleminde sonlu farklar yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Akış yönünde hız, sıcaklık ve viskoziteyi güncellemek için iterasyon kullanılmıştır. Isıtılmış ek fiber yakınında, viskozitedeki düşüş nedeniyle hız gittikçe artmıştır. Kalıp içinde ortama reçine sıcaklığı giriş reçine sıcaklığından daha yüksektir. İzotermal ve izotermal olmayan akışlar için ortalama dolum süreleri karşılaştırılması göstermiştir ki, başlangıç olarak 25°C'da reçine ve 100°C'ye ısıtılmış fiberler için dolum zamanı, 50°C sabit sıcaklıkta alınan reçinenin izotermal durumda dolum zamanına eşittir. Kontrolü fiber sıcaklığının artan debiye bağlı olarak azalan toplam proses zamanının potansiyel yararı olduğu sonucuna varılmıştır.

Oda sıcaklığında reçine ile dolu, ısıtılmış RTM kalıplarının kullanımı toplam çevrim zamanını azaltmada etkili olduğunu kanıtlamıştır. Lebrun ve Gauvin (1996), prosesin tüm safhaları boyunca reçinenin sıcaklığına ısıtılmış kalıbın etkisini araştırmak için düz çelik kalıp kullanarak deneysel çalışma sonuçlarını sunmuşlardır. Kalıp cidar kalınlığında sıcaklık profilleri farklı kalıplama koşulları altında farklı yerlerden ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin uygunluğu farklı deneysel setlerle sağlanmıştır. Sıcaklık profillerine ve kalıp boşluğundaki basınç değerlendirmesine proses koşullarının etkisi ayrıca araştırılmıştır. Sonuçlar reçinede dolum sırasında önemli hataların oluşumuna katkıda bulunabilecek muhtemel ve önemli sıcaklık gradyanı oluştuğunu göstermiştir.

Cheung, Yu ve Pochiraju (2003) üç boyutlu Galerkin sonlu eleman yöntemine dayanan sıvı kompozit kalıplama prosesinin çiftli ısıl-kinetik simülasyonu sunmuşlardır. RTM prosesinin pişme fazında ısıl denge ve kimyasal kinetiği, kalıp sıcaklığı geçmişi ve karşılık gelen üretim prosesi planına göre elde edilmiştir. Pişme alanının sıcaklık ve miktarı ile bunlara karşılık gelen gradyanlar pişme prosesi sırasında elde edilmiştir. İki sayısal örnek yapılmış ve deneysel verilerle bu sonuçlar desteklenmiştir.

Rouison, Sain ve Couturier (2004), RTM prosesi ile elde edilmiş hemp/kenaf fiber- doymamış polyester kompozit kullanarak pişme simülasyonu yapmışlardır. %4,3 nemli %50 göreceli nemde fiber hasırlar, yaklaşık %1-2 nem içeriğine erişmeleri için kalıpta vakum altında kurutulmuşlardır. Hacimsel olarak %20,6'ya kadar olan fiber içerikli RTM kompozitler üretilmiştir. Fiberlerin ıslanması çok iyi olmuştur. Reçine enjeksiyon zamanı, hasırın düşük geçirgenliğine bağlı olarak yüksek fiber içeriğinde çok fazla arttığı görülmüştür. Kalıp sabit sıcaklıkta tutularak, parçanın hızlı ve homojen pişmesi sağlanmıştır. Kalıptaki reçine pişmesi modellenmiştir. Deneysel sonuçlarla bu model sınanmış ve elde edilen parçalara çekme ve eğme testi uygulanarak parçaların mekanik davranışları değerlendirilmiştir.

5.3 RTM'de Kenar Etkisi

Akış cephesi yerinin sayısal simülasyonu özellikle kalıp boşluğunun kenarına yakın yerde başarısızdır. Bir kalıp boşluğunun kenarına yakın yerde akış cephesi oldukça hızlı akmaktadır. RTM'de kenar etkisini tartışan birçok makale mevcuttur. Deneysel verilere dayanan gözeneklilik ve geçirgenlik arasındaki bağıntı, TGFM 300 P/E rasgele fiber hasır için Wu C J, Hourng L W ve Liao J C (1995) tarafından önerilmiştir. Kenar etkisi fiber hasırın kenarı boyunca geçirgenlik sınır koşulları ile reçinenin sürünme hareketi ile simüle edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, kenar etkisi fiber hasırın şekline çok hassas olmaktadır. Fiber hasır iyi şekilde ise, sayısal tahminlerle deneysel sonuçlar örtüşmektedir. Kalıp boşluğundan fiber hasırın boyutları çok az büyük ise, kenar etkisi ihmal edilebilir. Makale, hacme yerleştirilmiş sonlu fark yöntemi (FDM) ile FEM 'yi sayısal yöntemde otomatik ağlanmış ve otomatik düğüm- eleman oluşturmak için birleştirmiştir. Makalede, bu yöntem RTM'de dolum prosesinde olduğu gibi düzensiz geometrilerle hareketli sınır problemlerin çözümünde yetkin ve uygun olduğunu savunulmaktadır. RTM'nin bu sayısal simülasyonunda, kalıp boşluğu fiber hasır bölgesi ile aralık bölgesine kalıp boşluğu ayrılmaktadır. Fiber hasır bölgesi geçirgen sınır koşulları altında Darcy kanunu ile simüle edilmiştir. Modellerinde, fiber hasır ve kenar çeperi arasında bir boşluk olduğu kabul edilmiştir. İyi şekillenmiş fiber hasır için, aralıkta hareket eden reçine kalıp dolum safhasında sürünme hareketi göstermektedir. Bunu gösteren sayısal tahminlerin deneysel sonuçlarla iyi örtüştüğü belirtilmektedir.

Wu ve Houring (1995), RTM'de fiber hasır ve yan çerper arasına yerleşmiş etkin aralığa bağlı olarak kenar etkisini araştırmıştır. Etkin aralık deyimi, fiber hasır ve yan çerper arasındaki arayüzeyde geçirgen sınır koşullarına neden olmaktadır. Bu durumdaki gözeneklilik tüm alanda sabit olduğu kabul edilemez. Sonuçlar göstermiştir ki, etkin aralık alt tabanı kenar etkisi fenomenini iyi açıklamakta olduğunu göstermektedir. Bu modelde, dolum prosesi hacme yerleştirilmiş sonlu elaman yöntemi ve yarı kararlı durum için zaman artımının sınırlaması ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

5.4 Geçirgenliğin Belirlenmesi

Akış cephesi yerini ve kalıp dolum sırasında kapama kuvvetini etkileyen fiber hasırların geçirgenliği sayısal analizle öncelikli olarak ölçülmelidir. Gebart (1992), düzenli dizilmiş paralel, tek yönlü fiberler alarak analitik geçirgenlik değerleri türetmiştir. Sıvı fiber düzenli yönde ilerlerken, sonuç geçirgenlik hesaplamasında kullanılan Kozeny-Carman denklemi ile uyuşmakta olduğunu bulmuştur. Makale geçirgenliğin belirlenmesi için analitik teori ile başlar, hem fiber düzenine hem de fiber hacim oranına bağlı olan şekil faktörü katarak geçirgenliğin sayısal hesaplaması ile devam eder. Mikro akışı modellemede, fiberler boşlukta sabitlenmiş olarak alınmış ve akış basınç gradyeni tarafından tahrik edildiği kabul edilmiştir. Geçirgenliğin teorik tahminleri özel tasarımlanmış kalıpta test edilmiştir. Doymamış reçine ve tek yönlü takviye ile yapılmış deneyler Darcy kanunu ile tahmin edilen sonuçlarla mükemmel uyum göstermiştir.

Berdichevski ve Cai (1993) kendinden uyumlu yöntemi (SCM) sunmuşlar ve sonlu eleman simülasyonunu düzenli fiber destesinin geçirgenliğini tahmin etmede kullanmışlardır. Kendinden uyumlu yöntem formülleri hem düşey hem de çapraz geçirgenlikleri fiber hacim oranının bir fonksiyonu olarak vermektedir. Çapraz geçirgenlik ortalama fiber hacmi tarafından etkilenir ve fiber hacim oranı için mevcut iken, düşey geçirgenlik fiber destesi boyunca açıklıklardan da etkilenmektedir. Sonlu eleman simülasyonu çeşitli periyodik fiber yığınları için çözümler sunmuştur. Makalede ayrıca geçirgenliğin fiber hacim oranı ya da gözenek ile sadece bağıntılı olmadığı, buna ilaveten yığın yapısı ve mikro seviye çalkantılarından da etkilendiği açıklanmıştır. Fiber hacim oranına ek olarak maksimum hacim oranını değişkenler olarak kullanılan birleşik empirik model sunulmuştur. Model tahminleri ve sayısal simülasyon çok iyi uyumuşlardır.

Ferland ve arkadaşları (1996) fiberli malzemenin düzlemde geçirgenliklerini ölçmek için yeni bir yöntem önermiştir. Yöntem, tüm mevcut deneysel veriler preformun geçirgenliğini karakterize

etmek için anında kullanıldığından ‐Eş Geçirgenlik Ölçüm Prosedürü (CPMP)‐ olarak anılmaktadır. dörtgen bir kalıp, ana geçirgenlikleri sayısal olarak belirlemek için kullanılmıştır. Deneysel verisi Darcy kanunu ve hem deneysel hem de sayısal hataların izin verilmiş tahmini ile kurulmuş kolerasyonu içermektedir. Yöntem göreceli basit deney ile güvenilir sonuçlar verme avantajı sunmuştur. Deneysel prosedürde, geçirgenlik ölçümlerinin güvenilirliğini arttırmak için pratik ilkeler ifade edilmiş ve minimum enjekte edilmiş uzunluk ve maksimum enjeksiyon basıncı gibi ilgili parametreler sunulmuştur. Yöntem bir çok şirket ve üniversite tarafından sayısal simülasyonlar için geçirgenlik değerlerini üretmek için kullanılmış ve deneyler ile iyi bir ilişki sunmuştur.

Verheus ve Peeters (1993), RTM için kullanılan fiber takviyelerin düzlemde geçirgenliklerini ölçmek için iki tip ekipman geliştirmişlerdir. Ayarlanabilir kalıp boşluğu kalınlığı olan TNO tipi geçirgenlik ölçerde geçirgenlik kararlı durumda akıştaki model akışkan kullanarak tekli deneyde fiber hacim oranının bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Takviyenin geçirgenliği polyester reçine ile gerçek bir vakum enjeksiyon deneyi sırasında yüksek tamlıkta ayrıca ölçülebilmektedir. İki ekipman ünifilo tip cam hasır kullanılarak karşılaştırılmış ve iyi bir uyum göstermişlerdir. Makalede, geçirgenlik ölçer farklı fiber hacim oranlarındaki takviyelerin geçirgenlikleri hakkında hızlı bilgi edinmede kullanılabilen olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı geçirgenliklerdeki tabakalardan oluşmuş anizotropik laminantın ortalama geçirgenliğini tahmin etmek mümkündür. Ünifilonun geçirgenlik verisi, delik ulunan düz bir plakada akış cephesi ilerlemesini simüle etmek için sonlu eleman programına uygulanmıştır. Program dolum zamanı ve dolum konturları deneylerle karşılaştırıldığında iyi bir tahmin verdiği bulunmuştur.

Weitzenböck J R, Shenoı R A ve Wilson P A, (1999a, 1999b), RTM’de sabit yolluk giriş basıncında iki boyutlu radyal akış geçirgenlik ölçümüne yeni bir bakış açısı getirmiştir. Ana geçirgenliği, deneysel eksenler ana yönlerde olmamasına rağmen ölçmeyi başarmışlardır. İki bölümlü olan makalede, ilk bölümde teorik olarak yöntem tanımlanmış, ikinci bölümde ise deneysel onaylama yapılmıştır. Formüller, üç yönde akış cephesi ölçümünden ana eksenlerin yönlenmesi ve ana geçirgenliği hesaplamaya izin verecek şekilde türetilmiştir. Dairesel yolluk nedeni ile gelişen ani akış cephesi etkileri tartışılmış ve ölçülen geçirgenliğe etkileri belirtilmiştir. Akış cephesi şeklinin sadece yolluk çapı ve anizotropi derecesine bağlı olduğunu gösteren sayısal çalışmalar yapılmıştır. Böylece, geçirgenlik ölçümü için minimum gerekli kalıp boyutunu tahmin etmek için formül geliştirilmiştir.

RTM prosesinin tam sayısal simülasyon için temel gereksinim uygulanan kumaş takviyenin tam geçirgenlik katsayıları kümesidir. Düzlemde akış ölçüldüğünde daha kolay olduğu düşünüldüğünde, laminat düzlemine dik hareket eden akış cephesi belirlemek zor olduğu görülmektedir. Bu nedenle, çapraz ısıtma davranışına az rastlanır ve çapraz geçirgenlik değerleri sadece bir kaç kumaş için belirlenmiştir. Tam çapraz geçirgenlik bilgisi, kalın kesitli parçalardan geçen akışın üç boyutlu simülasyonu ve reçine film dökümü ile SCRIMP gibi RTM ile alakalı prosesler için önemlidir. Stöven T, Weyrauch F, Mitschang P ve Neitzel M (2003) ultra ses transmisyonu kullanarak akış cephesi gelişimini görüntülemiştir. Test parçası, nokta enjeksiyona bağlı üç boyutlu elipsoid döllemesini görüntülemek üzere geliştirilmiştir. İki çok yönlü kıvrımsız kumaş, üç boyutlu ölçüm ile karakterize edilmiştir. Çapraz geçirgenliğin belirlenmesi için makalede üç boyutlu dolun durumunda sayısal akış simülasyon yazılımı kullanılmıştır.

Geleneksel geçirgenlik ölçüm yöntemleri kirlilik ve yerel geçirgenlik değişimleri nedeni ile ani ölçüm yapılamamaktadır. Ding L ve arkadaşları (2002), reçine enjeksiyonu öncesinde kapalı kalıp grubu içinde preform geçirgenlik değişikliğini belirlemek üzere gaz akışı kullanarak yeni geçirgenlik karakterizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem şu araştırma bulgularına dayanmaktadır: (1) reçine geçirgenliği iyi kontrol edilen gaz akışı ile aynı fiber preform için hava geçirgenliği ile yüksek oranda uyumaktadır (2) bir preformun tam hava geçirgenlik alan profili basınç alanı ve gaz akışını ölçerek elde edilebilir. Çalışmada, daha sonra sonlu farklar kullanan iki boyutlu akış modeli preform kirliliği ve yerel değişimleri belirlemek üzere sonulmuş ve deneysel bulgularla desteklenmiştir

5.5 Yolluk Giriş ve Havalandırma Yerleri Seçimi

RTM prosesinde son zamanlardaki gelişmelerden bir tanesi karmaşık geometrili ve yüksek fiber içerikli yapısal kompozit parçalardır. Preform akış direnci göreceli yüksek olduğundan kalıp dolunu kritik olmaktadır. Kalıp tasarımı ve havalandırma yerleşimi son parça kalitesi bakımından önemlidir. Basitleştirilmiş teoriler ve hesaplamalara dayanan tasarım rehberi geliştirilirse çok büyük bir yardım olacaktır. Bu amaçla, Cai (1992), basitleştirilmiş bir boyutlu akış analizine dayanan belli tasarım kriterleri geliştirmiştir. Islak genişlik, kalıp dolun zamanı ve basınç dağılımı kapalı form çözümleri dörtgen, yamuk ve dairesel kesitler gibi farklı basitleştirilmiş için türetilmiştir. Bu sonuçlar RTM'de kalıp tasarımına ve havalandırma yeri

seçimine uygulanmıştır. Bir çok uygulama örnekleri ile gösterilen iki tasarım ilkesi sunulmuştur. Bu ilkeleri şu şekilde özetlemek mümkündür:

Yolluk giriş ve çıkıcı yerleri mümkün en kısa yol izlenebilecek şekilde düzenlenmelidir.

Reçine akışı yönü, dolmamış hacmi hızlı şekilde azaltmayı garanti edebilecek büyük taraftan ufak tarafa ya da dış çaptan içe doğru olacak şekilde düzenlenmelidir.

Gerçek proseste, yolluk giriş kısmındaki sabit uygulanan basın sınır koşuluna yakın olduğunda, kalıp dolusunda tasarruf bu ayarlamalar ile önemli olmaktadır. Ayrıca, nokta giriş noktasından çizgi şeklinde yolluk girişinin daha iyi olacağı da belirtilmiştir. Bir takım formüller ve tablolar, kalıp dolum zamanı, ıslak uzunluk ve çalışan ekipman gereksinimleri için kullanılabilir tek boyutlu reçine akış durumu için türetilmiştir.

Springer, Boccard ve Lee (1995), ayrıca yolluk yeri belirleme ve kalıp dolum zamanı tahmini için basit modeller geliştirmişlerdir. Çalışmanın ilk ve öncelikli amacının (belirli yolluk giriş yeri için) preformun tamamen reçine ile dolacak ve preformda tutulan hava kabarcıklarının olmayacak şekilde çıkıcı yerinin belirlenmesi şeklindedir. Tutulan hava kabarcıklarını önlemek için gereken çıkıcı yerleşimi geometrik koşullarla belirlenmektedir. Kalıp dolumu için gerekli süre kısmen radyal ve kısmen kanalımsı akış olarak kalıp içi reçine akışını ele alarak hesaplanmıştır. Insert kullanarak ve kullanmayarak testler yapılmıştır. Tutulan hava kabarcıklarını önlemek için gereken çıkıcı yerleşimi ve kalıp dolumu için gerek süre belirlenmiştir. Deneysel olarak belirlenen çıkıcı yerleri modelde verilen yerler ile iyi bir uyuma göstermiştir. Ölçülen ve hesaplanan dolum zamanı da ayrıca örtüşmüştür.

Bir çok simülasyon programı simüle edilmiş kalıp dolumu sonuçlarını bilinen yolluk giriş yerine göre sunmaktadır. Fakat, kalıp tasarımında önemli noktalardan biri olan yolluk giriş yeri seçiminde doğrudan yaralı olmamaktadır. Young (1994) kalıp dolum basıncını, süzensiz dolum olayını ve kalıp dolumu prosesi sırasında sıcaklık farkını azaltmaya dayanan yolluk giriş yeri optimizasyonu geliştirmiştir. Genetik yöntem, kalıp dolumu simülasyonu sonuçlarına dayanan optimizasyon algoritması olarak ifade edilmiştir. Optimizasyon prosesi sırasında, hedef fonksiyon;

1. reçine enjeksiyon basıncı
2. dolan sınır düğümleri arasındaki maksimum zaman farkı

3. kalıp dolumu sonunda düğümler arası maksimum sıcaklık farkı

koşullarına bağılı olarak değerlendirilmiştir. Hedef fonksiyonun minimizasyonu ile, üniform kalıp dolumu şekli elde edilebilir ve böylece tutulan hava kabarcıkları ihtimali azaltılabilir. Fakat, kuru bölge oluşumu ihtimalinin doğrudan araştırması çalışmada ele alınmamıştır.



6. RTM PROSESİNDE İZOTERMAL DURUMDA MODELLEME UYGULAMASI

6.1. Problem Tanımı ve Kabuller

Kalıp dolumu analizinin amacı, herhangi bir anda reçine kütlesi korunumu ve Eulerian Kalıp boşluğu ağı içinde dağılımını belirlemektir. Dolum faktörü dolaylı olarak, kalıp boşluğu içinde herhangi bir zamanda reçine miktarını ve dağılımını tanımlamaktadır. Tezimizde, dolum faktörünün zaman türevini içeren kütle dengesi ya da süreklilik denklemini kullanacağız. Hız alanı yaklaşık olarak Darcy Kanununa, gözenekli geçirgen ortamda akışa dayanmaktadır. Sonlu eleman yaklaşımları, hem basınç alanı hem de dolum faktörü için kullanılmıştır. Böylece, daha önce çok kullanılan hem basınç alanı hem de dolum faktörü için kontrol hacmi tanımlamaya gerek kalmadan saf sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Sonuç zaman bağımlı denklem sistemi hem basınç alanı hem de Eulerian kalıp boşluğu içinde reçine yerini tanımlayan dolum faktörü için iterasyonla çözülmüştür. Zaman bağımlı denklem sistemi, herhangi zaman adımı, basınç alanı ve ayrışık zaman adımlarında dolmuş bölgeler analiz sırasında kullanılarak çözülebilir. Zaman adımlarının seçimi akış cephesi çözümüne ve tamlık beklentilerine bağlıdır. (Mohan 1999a, 1999b, 1999c)

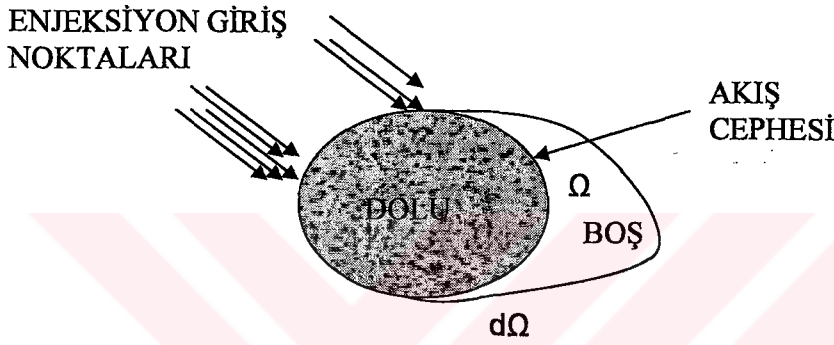
Uygulama olarak kullanılan modeldeki kabuller şunlardır:

1. Polimer reçine basılamaz akışkandır.
2. Reçinenin viskozitesi sabit alınabilir ve dolum izotermal koşullarda alınabilir.
3. Akışkan Darcy kanununa tabidir ve Reynolds sayısı o kadar küçüktür ki atalet terimlerinin etkileri ihmal edilebilir.
4. Hacimsel kuvvetler ve yerçekimi etkisi katılmamıştır.

Bu kabullere rağmen, izotermal olmayan durumda hacimsel kuvvetler ve yerçekimi etkisi katılarak mevcut formüller genişletilebilir. Genel çaba, dolum safhası ve fiber preformun jel oluşumundan önce tamamen ıslanmasını sağlamak olduğundan (Mohan 1999b) bu çalışma kapsam dışında tutulmuştur.

6.2. Kütle Korunumu Kanunu

Daha önce belirtildiği gibi, polimer reçine iletim kalıp dolumu analizinde amaç gözenekli kalıp boşluğu içinden herhangi bir zamanda akışta reçine kütlesi korunumudur. Dolum faktörü dolaylı olarak, kalıp boşluğu içinde herhangi bir zamanda reçine miktarını ve dağılımını tanımlamaktadır. Bu nedenle, genel Eulerian kalıp bölgesi Ω giriş noktalarından gelen reçineye bağlı olarak kütle akımını düşünelim (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 Genel kısmi dolmuş kalıp boşluğu

Herhangi bir zamanda, kalıp boşluğunun bir parçası reçine ile dolmaktadır ve dolum faktörü (ψ) dolu alanlarda sıfırdan farklıdır ve maksimum değeri bire eşit olacaktır. Dolmamış bölgelerde, reçine dolum faktörü (ψ) sıfıra eşittir. Kalıbın içinde herhangi bir zamanda reçine kütlesi şu denklemle verilir:

$$\int_{\Omega} \rho \psi d\Omega \quad (6.1)$$

Burada ρ polimer reçinenin yoğunluğu ve ψ tanımı sadece reçine ile dolmuş kalıp boşluğunu göz önüne almıştır. Kütle korunumu herhangi bir zamandan elde edildiğinden, herhangi bir zamanda reçine için kütle korunumu denklemi ya da süreklilik denklemi (Reynolds iletim denklemi uygulamasına dayanarak) şu şekilde yazılabilir (Mohan 1999a):

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \psi) d\Omega = - \int_{\partial\Omega} \rho \psi u_i n_i d\Omega \quad (6.2)$$

Burada ρ polimer reçinenin yoğunluğu, ψ bölgenin dolum doğasını gösteren dolum oranı, u_i akış hızı vektör alanının bileşenleri, n_i , Ω alanının sınırı olan $d\Omega$ 'ya dış normal ve t zaman. Burada belirtilmesi gerekir ki, hız farklarının mikroskopik varyasyonlarını ve preform gözenekliğine bağlı etkileri hesaba katan ilgili fiziksel bileşenler de burada kullanılabilir.

6.3 Ana Denklemler ve Sınır Koşulları

RTM'de aktığı gibi gözenekli ortamda polimer reçine akışı için, hız alanı Darcy akış alanı yaklaşımına tabidir ve reçine geçirgenliği ile reçine viskozitesine bağlıdır. Reçinenin yüksek viskozitesi ve akışkanın düşük Reynolds sayısı nedeniyle, karmaşık geometri, farklı hacimsel alanlar, köşeler, bileşimler ile geçirgenliğe izin vermeyen insertler ve benzeri durumları içerebilen kalıpta akış üç koordinat boyutunca x_i ($i=1,2,3$) ortalama hız alanını göz önüne alarak modellenmiştir. Akış, basınçla tahrik edilmektedir. Ortalama hız bileşenleri basınç gradyanları ile ilgili olarak Darcy kanunu ile verilmektedir. Böylece;

$$u_i = -\frac{K_{ij}}{\mu} P_j \quad i = 1,2,3 \quad (6.3)$$

j üzerinde toplam olarak $P_{,j}$, basınç gradyanı olan $\partial P/\partial x_j$, 'yi temsil eder. Etkin viskozite μ ile gösterilmektedir. Yukarıda, u_i , akış alanının Darcy ortalama hız bileşenleridir.

Geçirgenlik tensörü K_{ij} üç boyutlu anizotropik durumda şu şekilde verilmiştir:

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Kütle dengesi denkleminde (6.2) verilen hız alanı yaklaşımını ve Green Teoremini kullanarak, dolum oranı ve basınç alanını içeren değiştirilmiş kütle denge denklemi şu şekilde elde edilmiştir:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \psi}{\partial t} d\Omega = \int_{\Omega} \psi \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K_{ij}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x_j} \right) d\Omega \quad (6.5)$$

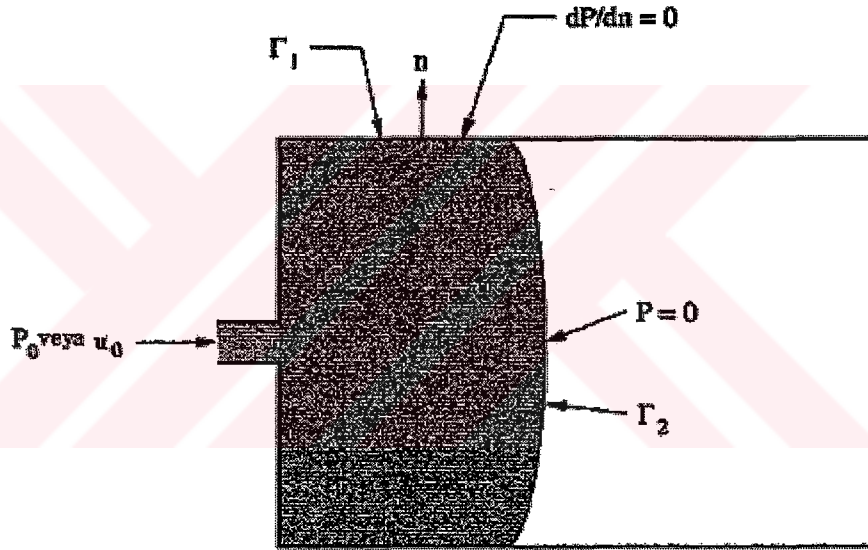
Darcy'nin akış yaklaşımına dayanan kalıp boşluğu içinde reçine akışı basınç tahrikli akıştır ve basınç gradyanları dolmamış bölgelerde ve yarı dolmuş $0 \leq \psi \leq 1$ bölgelerde ihmal edilebilmektedir. Değiştirilmiş kütle dengesi denklemi bu nedenle şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial \psi}{\partial t} d\Omega = \int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{[K_{ij}]}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x_j} \right) d\Omega \quad (6.6)$$

Ani dolum oranını ve basınç alanını içeren, yukarıdaki denklemin diferansiyel şekli şu şekilde verilmiştir:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{K_{ij}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x_j} \right) \quad (6.7)$$

Kütle denge denklemleri ile alakalı sınır ve başlangıç koşulları şöyle verilemektedir:



Şekil 6.2. Başlangıç ve sınır koşulları

Kalıp yüzeyinde;

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad (6.8a)$$

Akış cephesinde;

$$P = 0 \quad (6.8b)$$

Yolluk giriş noktasında;

$$P = P_0 \quad (6.8c)$$

ya da

$$u_n = -\frac{K_{ij}}{\mu} P_j n_j = u_o \quad (6.8d)$$

dolum faktörleri ise;

$$\psi(t \geq 0) = 1.0 \quad (6.8e)$$

6.4 Sonlu Elemanlar Ayrıklaştırması

Basınç alanı ve reçine doyma dolum faktörlerini belirlemek için, kalıp boşluğu ayrıştırılmış ve sonlu elemanlar kullanarak modellenmiştir. İnce kabul kalıplar için, iki boyutlu hız alanlı iki boyutlu elemanlar ve iki boyutlu geçirgenlikler kullanılabilir. Daha kalın kompozit kesimler için, Darcy kanununda verildiği gibi üç boyutlu hız alanları ve üç boyutlu geçirgenlik tansörü kullanılabilir. Bu nedenle, mevcut formüller hem ince hem de kalın kompozitlere uygulanabilmektedir. Kalıp boşluğunu sonlu elemanlara bölüp, hem basınç hem de dolum oranları için sonlu eleman yaklaşımı yapılmaktadır. Dolum oranı ψ ($0 \leq \psi \leq 1$) ve basınç P , öyle ayrılır ki, dolum oranı, her bir elemanda basınç alanı ile aynı yerel varyasyonlara sahip olacaklardır ve sonlu elemanlar ağında sadece eleman tipine bağlı olacaktır:

$$P = P_i N_i \quad \psi = \psi_i N_i \quad (6.9)$$

Galarkin sonlu eleman ağırlıklı kalıcı formülünü kütle denge denkleminde (6.7) kullanarak, şu yarı ayrılmış sistem elde edilir:

$$\left(\int_{\Omega} N_i N_j d\Omega \right) \dot{\psi}_i = \left(- \int_{\Omega} \nabla N_i \frac{K_{ij}}{\mu} \nabla N_j d\Omega \right) P_i + \int_{\partial\Omega} \frac{K_{ij}}{\mu} (\nabla P n_i) N_i d\partial\Omega \quad (6.10)$$

Yukarıdaki sistem şu şekilde ifade edilebilir:

$$C \dot{\psi} + KP = f \quad (6.11)$$

Burada;

$$C = \int_{\Omega} N_i N_j d\Omega \quad (6.12)$$

$$K = \int_{\Omega} \nabla N_i \frac{[K_{ij}]}{\mu} \nabla N_j d\Omega \quad (6.13)$$

$$f = \int_{\partial\Omega} \frac{K_{ij}}{\mu} (\nabla P \cdot n_i) N_j d\partial\Omega \quad (6.14)$$

Burada ∇N_i veya ∇N_j sonlu eleman ayrıklaştırması için kullanılan şekil fonksiyonlarının yerel türevleridir.

Zaman türevi terimleri için sonlu diferansiyel kullanılmıştır. Sonuç olarak, yukarıdaki denklemde zaman türevi için sonlu fark yaklaşımı kullanarak şunu elde ederiz:

$$\dot{\psi} = \frac{\psi^{n+1} - \psi^n}{\Delta t} \quad (6.15)$$

Tam ayrılmış sonlu eleman sistemi şöyle verilir

$$C(\psi^{n+1} - \psi^n) + \nabla t KP = \nabla t f \quad (6.16)$$

Global C için, global denklemler şu şekilde yazılabilir:

$$C_{ii}(\psi^{n+1} - \psi^n) + \nabla t K_{ij} P_j = \nabla t f_i \quad (6.17)$$

Yukarıdaki denklem hem basınç hem de dolum faktörü ψ için global denklemdir ve iterasyonla çözülmektedirler.

6.5 Hesaplama Yöntemi

Düğümlemlerle ilintili dolum faktörleri ve basınç alanı (6.17)'de elde edilen sonlu eleman ayrıklaştırma denklemlerine dayanarak iterasyonla çözümler. Dolum oranları, simülasyonun başında bilinmektedirler ve enjeksiyon giriş noktasını oluşturan düğümlerde 1 alınır. Basınç alanı ve dolum oranını her bir zaman adımında kütle korunumunu sağlayana kadar çözmek için iteratif prosedür ayrı bölümlerde anlatılacaktır.

6.5.1 Hesaplama Sırası

1. Her zaman adımının başında

$$(\psi_i)_{m+1} = (\psi_i)^n \quad (6.18)$$

alınır. Burada m iterasyon sayısı, sırasıyla n+1 ve n şü anki ve önceki zaman adımları

2. K'ya sınır koşulları uygulanır:

- Enjeksiyon, havalandırma basınçları ve enjeksiyon debisine dayanan sınır koşulları uygulanır.
- $\psi_i < 1.0$ olduğu yerlerde dolum faktörlere dayanan koşullar.

3. Şu denklem kurulur:

$$(g_i)_m = C_{ii}(\psi_i)^n - C_{ii}(\psi_i)_{m+1}^{n+1} + \Delta t f_i \quad (6.19)$$

4. $[\hat{K}_{ij}](P_j)_m = (g_i)_m$ çözülür. Buradaki $[\hat{K}_{ij}]$ sınır koşulları uygulandıktan sonraki değişmiş K dır.

5. Dügümsel reçine oranı alanı ψ_i kütle denge denkleminin değişmiş şeklini kullanarak düzeltilir.

$$C_{ii}\psi^{n+1} = C_{ii}\psi^n - \nabla t K_{ij} P_j + \nabla t f_i \quad (6.20)$$

-Sadece matris vektör çarpımı ve vektör toplamı olmalıdır-

6. Az ya da aşırı dolular düzeltilir. Ψ , ya 1'den fazla ya da 0'da az olduğunda, düzeltim yapılmalıdır.

$$(\psi_i)_{m+1}^{n+1} = \max[0, \min(1, (\psi_i)_{m+1}^{n+1})] \quad (6.21)$$

ψ ($0 \leq \psi \leq 1$) ve kütle korunumu kontrolü bir zaman adımı için her iterasyonda yapılır. Dolum oranı ψ ve P arasında şu bağıntı vardır:

$$P_i = \begin{cases} 0 & \text{eğer } \psi_i < 1 \\ P_i^{\text{hesaplanmış}} & \text{eğer } \psi_i = 1 \end{cases} \quad (6.22)$$

7. Konverjans sağlanana kadar devam edilir

$$\|C_{ii}\psi_{m+1}^{n+1} - C_{ii}\psi_m^{n+1}\| < \varepsilon \quad (6.22)$$

8. Sonraki zaman adımına geçilir.

6.5.2 Zaman Adım Miktarı ve Saf Sonlu Elemanlar Yönteminde Cephe Çözünümlü İlişkisi

Saf sonlu eleman yönteminin önemli avantajlarından biri, akış cephesinin herhangi bir zamanda serbest yüzey reçine ilerlemesi sırasında hesaplanan yeri, bu seviyeye ulaşması için kullanılan zaman adımı boyutundan bağımsız olmasıdır. Saf sonlu eleman yöntemi, analizi yapana istenen akış ilerlemesinin çözümüne dayanan analiz için zaman adımını seçmeye izin vermektedir. Basınç çözümü tamlığı, diğer yandan, zaman adımı boyutuna bağlıdır. Analiz sırasında akış cephesi yeri, analiz sırasında dögümsel dolum oranına dayanarak belirlenir.

(6.16)'da verilen denklemleri alalım. Belirli enjeksiyon koşulları altında reçine cephesi ilerlemesi olduğu kalıp dolumu zaman adımı boyutu Δt_i olarak yapıldığını düşünelim. N gibi zaman adımından sonra, karşılık gelen zaman seviyesi $N\Delta t_i$, akış cephesinin serbest yüzeyinin ani yerini dolaylı olarak tanımlayan dolum oranı vektörü ψ^N ve basınç vektörü ise P^N olacaktır. N zaman adımı sonunda basınç çözümü ve dolum oranı çözümü denk 6.16'nin sıra ile çözümü ile elde edilmektedir. Her bir Δt zaman adımında kütle konumuna dayanarak dolum faktörü ve basınç alanı çözümü elde edilir. Kütle korunumu koşullarının sağlandığı zaman adımlarının her birinde global sisten şu şekilde olur:

$$\begin{aligned} C[\psi^1 - \psi^0] + K\Delta t_1 P^1 &= \Delta t_1 f \\ C[\psi^2 - \psi^1] + K\Delta t_1 P^2 &= \Delta t_1 f \\ &\dots \\ C[\psi^{N-1} - \psi^{N-2}] + K\Delta t_1 P^{N-1} &= \Delta t_1 f \\ C[\psi^N - \psi^{N-1}] + K\Delta t_1 P^N &= \Delta t_1 f \end{aligned} \quad (6.23)$$

Burada, i (i=1,2,3,...N) zaman adımlarının her birinde dolum oranı alanı ψ^i ve basınç vektörü ise P^i dir. ψ^0 enjeksiyon koşullarına dayanan başlangıç dolum faktörüne karşılık gelir. f vektörü enjeksiyon koşullarına bağlıdır.

Yukarıdaki denklemlerde ψ^1 'leri çıkartırsak geriye şu denklem kalır:

$$C[\psi^2 - \psi^o] + K\Delta t_1 P^1 + K\Delta t_1 P^2 = \Delta t_1 f + \Delta t_1 f \quad (6.24)$$

Her bir adımdaki global denklem sisteminin orta dolun faktörlerini sırasıyla çıkartılmasıyla şunu elde ederiz:

$$C[\psi^2 - \psi^o] + K\Delta t_1 [P^1 + P^2 + \dots + P^{N-1} + P^N] = N\Delta t_1 f \quad (6.25)$$

Tek bir zaman adımı boyutu $N\Delta t_1$ kullanarak aynı akış ilerlemesi analizi yapılabilir. Tek bir zaman adımı boyutu $N\Delta t_1$ kullanırken kütle korunumu sonunda dolun faktörü $\bar{\psi}^N$ ve karşılık gelen basınç çözümü \bar{P}^N olsun. Bu, zaman adımına dayanan global sistem şu şekilde yazılabilir:

$$C[\bar{\psi}^N - \psi^o] + K\Delta t_1 [\bar{P}^N] = N\Delta t_1 f \quad (6.26)$$

(6.25) ve (6.26) doğrusal sistemlerinden şu yazılabilir:

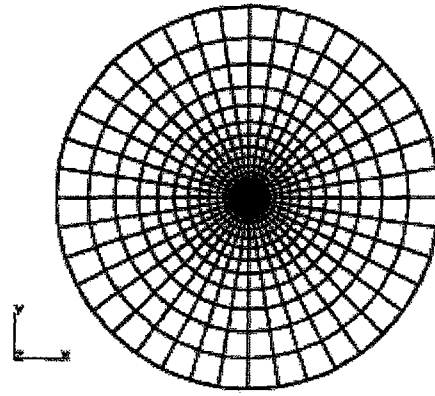
$$C[C[\bar{\psi}^N - \psi^N] + K\Delta t_1 [N\bar{P}^N - (P^1 + P^2 + \dots + P^{N-1} + P^N)] = 0 \quad (6.27)$$

(6.27)'de vektörlerin her ikisi doğrusal bağımsızdır ve toplamın sıfır olması için;

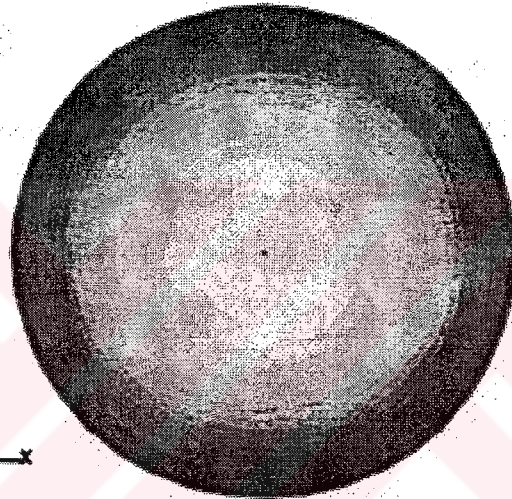
$$\bar{\psi}^N = \psi^N \quad (6.28)$$

$$N\bar{P}^N = (P^1 + P^2 + \dots + P^{N-1} + P^N) \quad (6.29)$$

(6.28)'den N adımlarının sonunda hesaplanan dolun faktörleri bu nedenle bu zamanda erişilmesi için kullanılan zaman adımı boyutundan bağımsız olmaktadır. Dolun faktörleri dolaylı olarak akış yerini belirlemektedir. Bu nedenle, herhangi bir zamanda cephe yeri, bu seviyeye ulaşmak için kullanılan zaman adımı boyutundan bağımsızdır. Zaman adımı sadece cephe çözümüne ve istenen basınç çözümünün tamlığına bağlıdır.



a) Kalıp plakası ağ geometrisi



b) Kalıpta dolun sınırları

100.0
92.86
85.71
78.57
71.43
64.29
57.14
50.00
42.86
35.71
28.57
21.43
14.29
7.143

.00000251

Şekil 6.3 Dairesel kalıbın sabit basınçta dolun durumu ve ağ geometrisi

6.6 Analitik Doğrulama

Kullanılan kanun ve fiziksel fenomenler daha önce deneylerle denendiğinden, yöntemin geçerliliğini araştırmak üzere analitik doğrulama yeterli olacaktır.

Merkezinde kalıba giriş noktası olarak R_0 yarıçaplı deliğe sahip bir kalıp düşünelim (Mohan 1999c). İlk olarak P sabit basıncı ile R_0 yarıçapında yolluk giriş noktalı plakaya enjeksiyon basıncına tabi tutulsun. Kalıp boşluğunun kalınlığı H ve fiber preformun geçirgenliği K , gözenekliliği Φ alınmıştır. Mükemmel radyal akış kabulü ile akış cephesinin R_f yarıçapına ulaşma zamanı şu bağıntı ile verilir:

$$t = \frac{H\Phi}{KP} \int_{R_o}^{R_f} \frac{r \ln \frac{r}{R_o}}{H} dz \quad (6.30)$$

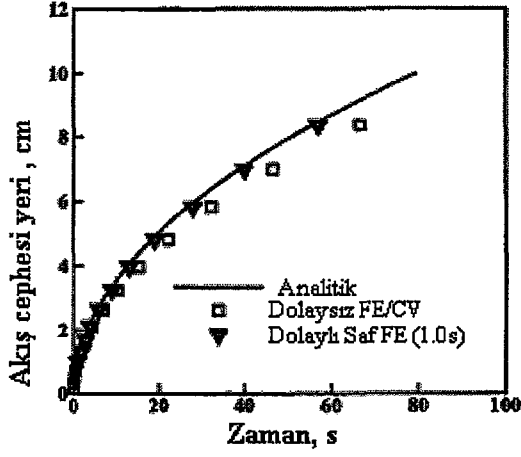
Sabit viskozite μ_o için, R_f yarıçapına ulaşma zamanı:

$$t = \frac{\mu_o \Phi}{KP} \left\{ \frac{R_f}{2} \ln \left(\frac{R_f}{R_o} \right) - \frac{R_f^2}{4} + \frac{R_o^2}{4} \right\} \quad (6.31)$$

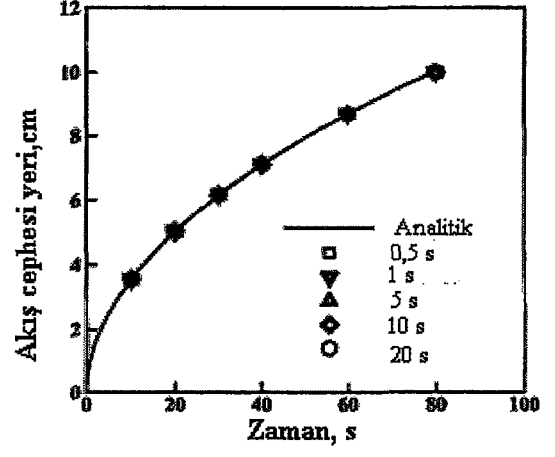
İç çapı $R_o=0,0015m$, geçirgenliği $K=44 \times 10^{-12} m^2$, gözenekliliği $\Phi =0,805$ olan kalıp viskozitesi $\mu_o=0,02$ pa.s ve 69 000 pa basınçla enjekte edilmektedir. Uygulanan ağ geometrisi ve akış cephesi sınırları Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Akış cephesinin saf sonlu elemanlar ve geleneksel dolaysız sonlu eleman/ kontrol hacmi formülasyonları ile analitik çözümün karşılaştırılması ise Şekil 6.4a'de verilmiştir. Farklı zaman adımı boyutu kullanarak, saf sonlu elemanlar formülasyonundan elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 6.4b'de verilmiştir. Sayısal simülasyonlar iki boyutlu dörtgen ve 600 elemandan oluşan ağ geometrisine dayanmakta ve ayrıca iki boyutlu geçirgenlik tensörü izotropik, dış çap 0,1 metre alınmıştır. Şekillerden açıkça görüldüğü gibi gelişmiş akış cephesi çözümüne sahiptir. Kütle korunumunun sağlanmasında saf sonlu elemanların fiziksel avantajının çok ilerde olduğunu göstermektedir. Kalıbın dolumuna kadar toplam iterasyon sayısı ve her bir adım sayısı için ortalama iterasyon sayısı Şekil 6.4 c ve d'de gösterilmektedir. Şunu belirtmek gerekir ki, zaman adımı boyutu arttığında, toplam iterasyon sayısı azalmaktadır, böylece gelişmiş hesap performansı sunmaktadır.

Şekil 6.3'deki zaman verisi, belirli düğümsel doğrultu boyunca dolduğu zaman adımını belirlenmesi ile elde edilmiştir (Mohan 1999c). Bu strateji ile zaman ve akış cephesi çözümünü zaman adımı sayısına bağlıdır ve sadece, analizde kullanılan iki ayrı zaman adımı atasında fiziksel olarak düğüm dolumu oluşurken, verilen düğüm yeri belirli zaman adımı sonunda dolduğunu belirtmektedir. Ayırıklaştırma formüllerine dayanarak, belirli zamanın sonundaki dolum oranları, bu seviyeye ulaşmak için zaman adımı boyutundan bağımsız olduğunu daha önce göstermiştik. Daha sonra şunu belirtmek gerekir ki, analiz sırasında, daha büyük zaman adımı boyutu kullanırken tam dolum için hesaplanan zamanın aynı olmaktadır. Belirli ortalama zamana kadar olan analiz ile ilgili sayısal deneyler (Mohan 1999a) ayrıca göstermiştir ki bu zaman kadar kütle korunumu sağlandıktan sonra dolmuş ve kısmi dolmuş bölgelerin aynı olduğu (sayısal

hatalar içinde) göstermiştir. Açıkça önermektedir ki, akış cephesinin tahmini yeri, zaman adımı boyutundan bağımsızdır (daha önce matematiksel olarak gösterilmiştir)



a) Dolaysız FE/CV ile karşılaştırma



b) Saf FE karşılaştırmaları



c) Saf FE toplam iterasyon sayısı

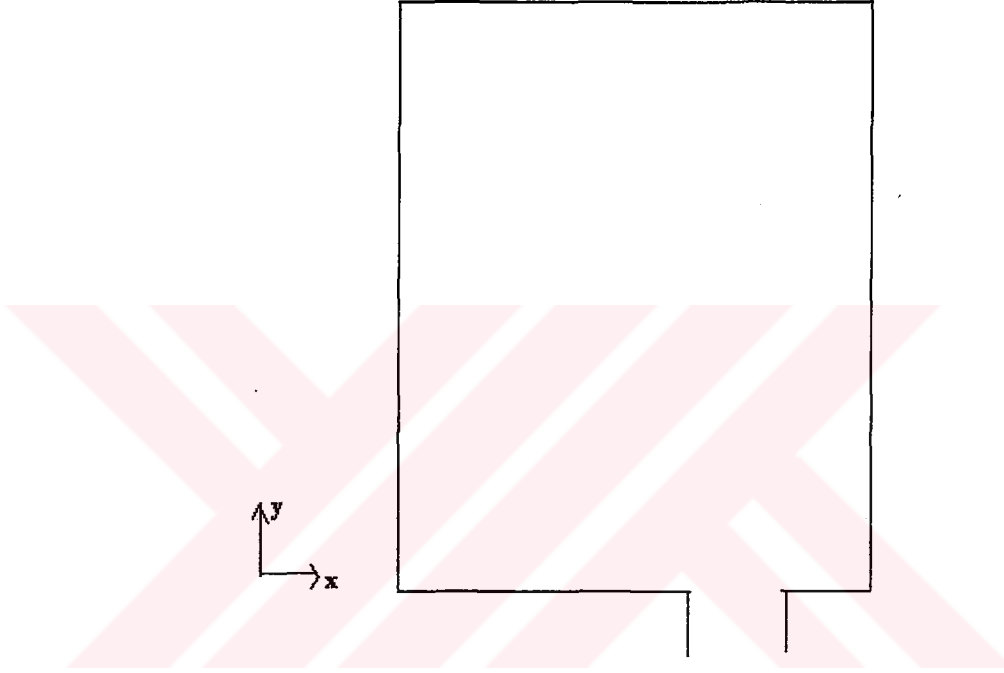


d) Saf FE ortalama iterasyon/ zaman adımı

Şekil 6.4 Dairesel plaka kalıpta akış cephesi ve iterasyon karşılaştırmaları: Sabit enjeksiyon basıncı

6.7 Sayısal Uygulama

İzotermal durumda RTM simülasyonlarına Saf Sonlu Elemanlar Yönteminin uygulanabilirliğini göstermek üzere sayısal bir örnek yapılacaktır. Daha önceden de belirtildiği gibi sıcaklık, pişme ve viskozitenin Newtonien dışı davranışı gibi izotermal olmayan koşullara ek olarak ayrıca kenar etkisi, geçirgenlik değişimi gibi diğer tüm etkiler ihmal edilmiştir.



Şekil 6.5 Analiz yapılacak RTM kalıbı örneği

RTM ile kalıplanacak parçamız için hazırlanan Şekil 6.3'de görülen dikdörtgen kalıbın boyutları 40 x 50 x 0,4 cm olsun. z yönündeki boyut önemsiz olduğundan kabuk yaklaşımı ile iki boyutlu olarak modelimizi kurabiliriz. Preformun gözenekliliği $\Phi=0.805$, geçirgenlik matrisi;

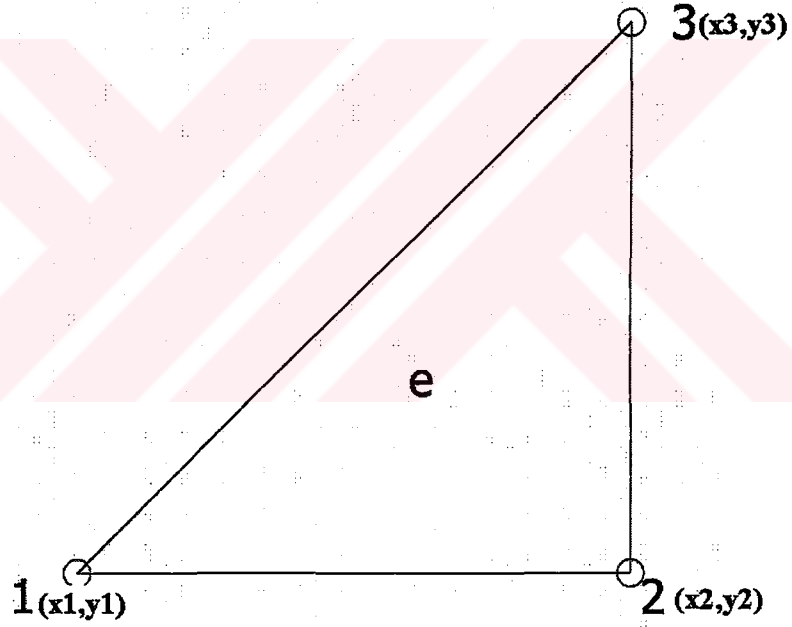
$$K = \begin{bmatrix} 44 \times 10^{-12} & 0 \\ 0 & 44 \times 10^{-12} \end{bmatrix} \text{ m}^2$$

(6.30)

alınmıştır. Viskozite değeri $\mu=0.02$ pa.s olan polimer sabit $2,64 \times 10^{-2}$ m/s hızla kalıba basılmaktadır.

6.7.1 Sonlu Elemanlar Ayrıklaştırması

Ele alınan çözüm bölgesi düzlemsel olduğu zaman sonlu elemanlar da düzlemsel basit geometrik formlardan olan üçgen, dikdörtgen, vb. olarak seçilir. Bir sonlu elemanın başlangıç ve bitiş noktası veya köşe noktasına nod (düğüm noktası) denir. Üçgen sonlu elemanda, düğüm sayısı en az 3'tür. Düğüm sayısı bu değerden daha az olamaz, fakat istenildiği kadar artırılabilir. Örneğin, bir üçgen eleman, düğümlerinin konumları ve düğümlerin koordinatları Şekil 6.2'de gösterilmektedir



Şekil 6.6 Üçgen sonlu eleman

Şekil 6.2' de ki elemanda sadece üçgenin köşe noktalarında düğüm seçilmiştir. Dolayısıyla, toplam 3 düğüm ve her bir noda karşı gelen 3 şekil fonksiyonu belirlenir.

Şekil fonksiyonları sırasıyla $N_1^e(x, y)$, $N_2^e(x, y)$ ve $N_3^e(x, y)$ sırasıyla 1., 2. ve 3. noda karşılık gelsin. Bu fonksiyonlar,

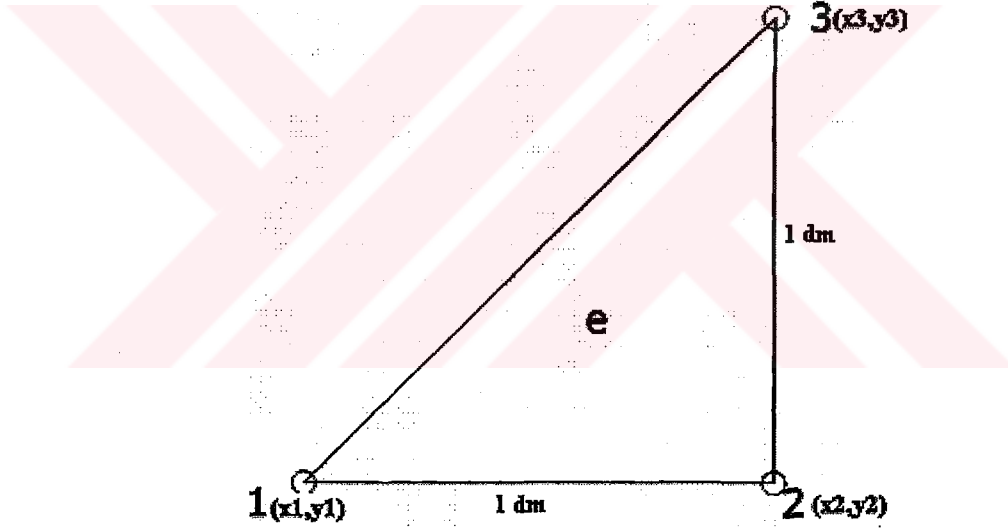
$$N_i^e(x_j, y_j) = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (6.30)$$

özelliğinden belirlenir. Buna göre, üçgen sonlu eleman için I. dereceden şekil fonksiyonları:

$$\begin{aligned} N_1^e(x, y) &= \frac{1}{2A^e} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \\ N_2^e(x, y) &= \frac{1}{2A^e} [(x_1 y_3 - x_3 y_1) + (y_1 - y_3)x + (x_3 - x_1)y] \\ N_3^e(x, y) &= \frac{1}{2A^e} [(x_2 y_1 - x_1 y_2) + (y_2 - y_1)x + (x_1 - x_2)y] \end{aligned} \quad (6.31)$$

olur (Bingöl 2004). (6.31)'da A^e , üçgen sonlu elemanın alanını göstermektedir. (x_i, y_i) , i. nodun sırasıyla apsis ve ordinatıdır.

Seçilmiş olan eş dik üçgen elemanın boyutları ise şekil 6.3'de gösterilmiştir.

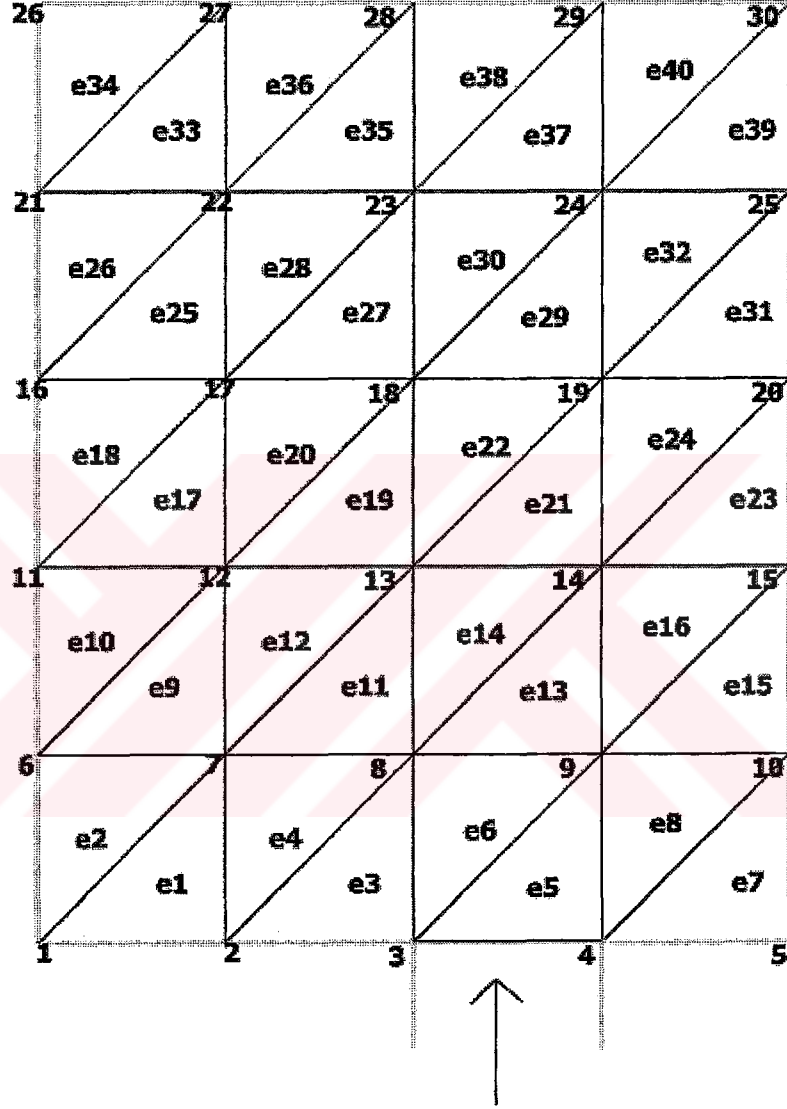


Şekil 6.7 Seçilen dik eş üçgenin yerel düğüm sayıları ve global koordinatları ile kenar boyutları

Çözüm bölgesinin üçgen sonlu elemanlara ayrılmış hali şekil 6.3'de gösterilmektedir. Buna göre çözüm bölgesi 40 sonlu eleman, 30 düğümden meydana gelmektedir. Her bir elemanın düğümüne karşılık gelen doğrusal şekil fonksiyonu;

$$N_i = Ay + Bx + C \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6.32)$$

olsun. Her bir elemanın yerel düğüm noktalarına karşılık gelen global düğüm noktaları, şekil fonksiyonlarının A, B, C değerleri ile koordinat değerleri (x_i, y_i) ekte verilmiştir.



Şekil 6.8 Çözüm bölgesi olan kalıp içinin sonlu elemanlar ağı ile global düğüm sayıları

6.7.2 Ana Denklem Sisteminin Kurulması

İlk adım olarak (6.12) eşitliğini kullanarak her bir eleman için C_{ij}^e matrisini, daha sonra ise global C_{ij} matrisini oluşturacağız.

Örnek olarak 1. eleman için C_{ij}^{e1} matrisine ait C_{11}^{e1} değeri şu şekilde bulunur :

$$C_{11}^{e1} = \int_0^1 \int_0^1 N_1 N_1 dy dx = \int_0^1 \int_0^1 (1-x)(1-x) dy dx = \frac{1}{12} \quad (6.33)$$

Her bir şekil elemanı için, matrisin her bir bileşeni hesaplandıktan sonra şu matris grubu ortaya çıkar:

$$C_{ij}^{ek} = \begin{bmatrix} C_{11}^{ek} & C_{12}^{ek} & C_{13}^{ek} \\ C_{12}^{ek} & C_{22}^{ek} & C_{23}^{ek} \\ C_{13}^{ek} & C_{23}^{ek} & C_{33}^{ek} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{12} & \frac{1}{24} & \frac{1}{24} \\ \frac{1}{24} & \frac{1}{12} & \frac{1}{24} \\ \frac{1}{24} & \frac{1}{24} & \frac{1}{12} \end{bmatrix} \quad k = 1, 2, \dots, 39, 40 \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (6.34)$$

Her bir elemanın ilgilerine göre C_{ij} matrisler gurubu düzenlenerek global C_{ii} matrisi elde edilir.

Buna göre;

$$C_{ii} = \begin{bmatrix} C_{ii}^A & C_{ii}^B & C_{ii}^C \\ & C_{ii}^D & C_{ii}^E \\ SMT & & C_{ii}^F \end{bmatrix} \quad (6.35)$$

olmak üzere simetrik global sisteminin bileşenler ile sayısal değerleri ekler kısmında bulunmaktadır.

Benzer şekilde (6.13) eşitliğini kullanarak her bir eleman için K_{ij}^e matrisini, daha sonra ise global K_{ii} matrisini oluşturacağız. Bunun için ilkönce;

$$K_{ij} = \iint \nabla N_i \nabla N_j d\Omega \quad (6.36)$$

integralini her bir eleman için hesaplar isek, sonuç olarak şu matris grubu ortaya çıkar:

$$K^{ek}_{ij} = \frac{[K]}{\mu} \begin{bmatrix} K^{ek}_{11} & K^{ek}_{12} & K^{ek}_{13} \\ K^{ek}_{12} & K^{ek}_{22} & K^{ek}_{23} \\ K^{ek}_{13} & K^{ek}_{23} & K^{ek}_{33} \end{bmatrix} = 22 \times 10^{-8} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad k = 1, 2, 3, \dots, 39, 40 \quad i, j = 1, 2, 3$$

(6.37)

Sınır koşulları başlangıç şartları ile birlikte K_{ij} matrisine uygulanır. Ara kademede basınç dağılımı için gerekli olan bu uygulama için reçinenin geçtiği yerlerde ($\psi_i > 0$) geçirgenlik direnci olduğu ve enjeksiyon noktasındaki direnci yenmek üzere yerleştirildiği düşünülür. Ara kademe basınç dağılımı çalışma dışı tutulmuştur.

Kalıp tam dolduğunda basınç dağılımını bulmak için yukarıdaki K_{ij} matris grubu C_{ii} global matrisini oluşturduğumuz gibi, düğümsel ilgilere göre düzenlenir. K_{ij} matrisinin sayısal değerleri ekler kısmında bulunmaktadır.

(6.14) sınır integralini kullanarak f matrisini oluşturalım. Bunun için Şekil 6.2'de verilen sınır şartlarından yararlanarak kalıp sınırı iki kısma ayırabiliriz: Γ_1 kalıp yüzeyi ve Γ_2 yolluk giriş kısmıdır. Polimer kalıp yüzeyine paralel akacağından $\Gamma_1 = 0$ olur. Böylece Γ_2 sınırında f integralini hesaplamamız yeterli olacaktır. Bunun için bazı tanımlamalar yapmak gerekir. l_{ij} Γ_2 sınırının uzunluğu, s ise sınır integral değişkeni olsun (Huebner 1975)

$$\int_{\Gamma_2} N_i d\Gamma_2 = \int_0^{l_{ij}} \left(1 - \frac{s}{l_{ij}}\right) ds = -\frac{l_{ij}}{2} = -\frac{1}{2} \quad (6.38)$$

Γ_2 sınırı 5. elemanın 1 ve 2. yerel düğümlerine yani 3 ve 4. global düğümlere karşılık gelmektedir. Böylece;

$$f_i^{e5} = \frac{K_{ij}}{\mu} (\nabla P n) \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ 0 \end{bmatrix} = 1,32 \times 10^{-2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.39)$$

elde edilir.

6.7.3 Problemin Çözümü ve İrdeleme

6.5’de anlatıldığı gibi ana denklem sistemi hesaplanır. Bunun için belirlenen zaman adımı boyutu akış cephesi yeri belirlemeden bağımsız olduğu daha önce gösterilmişti. Sabit debi ile enjeksiyon yapıldığından yaklaşık olarak zaman adımı sayısı belirlerken şu formülden yararlanılabilir:

$$t = \frac{abH\Phi}{q} \approx 6sn \quad (6.40)$$

Burada, a ve b kalıbın boyutları, H kalıbın kalınlığı, Φ preformun gözenekliliği, q ise enjeksiyon debisi. Akış cephesinin yerini belirten dolun faktörü ψ_i matrisi $\Delta t=3$ saniye zaman adımı için çözülür. İterasyon sayısı $m=150$ olarak sabit tutulmuştur.

İlk $t=3$ ve 6 saniye için ψ_i dolun faktörü çözümü ektedir. Buna göre; reçine $\psi=1$ olduğu yerlerde tam dolun yapmış, $0 < \psi < 1$ olduğu yerlerde doldurmak üzere olduğu, $\psi=0$ olduğu düğümlerde ise dolun yapamamış olduğu anlaşılır.

$t=6$ saniyede kalıp tamamen dolduğundan; $[\hat{K}_{ij}](P_j)_m = (g_i)_m$ eşitliği basınç için çözülür. Çözüm ekte bulunmaktadır.

Tüm hesaplamalar için kullanılan MATLAB© programı ekte mevcuttur.

$P(x,y)$ tam dolunun $\psi_i=1$ olduğu yerlerde hesaplanırken şu fonksiyondan yararlanılır:

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^{40} \sum_{j=1}^3 (P_j \cdot N_j) = \begin{cases} P_1 N_1 + P_2 N_2 + P_7 N_3 & (x, y) \in \Omega_1 \\ P_1 N_1 + P_6 N_2 + P_7 N_3 & (x, y) \in \Omega_2 \\ M \\ M \\ P_{24} N_1 + P_{29} N_2 + P_{30} N_3 & (x, y) \in \Omega_{40} \end{cases} \quad (6.41)$$

Burada P_j global düğümsel basınç değerleri, N_j i inci elemana ait yerel düğümsel şekil fonksiyonu, Ω_i ise i inci sonlu elemanın bulunduğu bölgedir. Çözümler ektedir.

7. SONUÇLAR

Çalışmamızda polimer kompozitlerin önemi vurgulanmış ve üretim prosesleri içinde en önemli yeri kaplayan RTM prosesi ayrıntılı bir şekilde incelenerek son ürün performansını etkileyecek parametreler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bağlamda, RTM prosesinde en önemli adımın dolum safhası olduğu ve yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunun bu üretim adımının geliştirilmesi üzerine yapıldığı belirlenmiştir.

Polimer matriksli kompozit üretim proseslerinin optimizasyonu için kullanılan modellemeler sınıflandırılarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve bir model oluşturma çalışmasının ilkeleri açıklanmıştır. Gerçek fiziksel durumlara en yakın modellemenin elde edilmesi için deneysel çalışma ile modellerin sınanması gerektiği saptanmıştır. Fakat kullanılan kanun ve ön kabuller daha önce sınıandı ise tekrar sınıamanın gereksiz olduğu da belirlenmiştir.

Daha önce yapılmış olan bir çok modellemelerden biri olan Saf Sonlu Elemanlar Yöntemi çözüm metodu, RTM'de ana akış denklemi iki boyutlu yaklaşım ile çözümü oluşturulmuş ve sonuçlar analitik olarak bulunan çözümler ile örtüşmüştür.

Kalıp geometrisi ve boyutuna göre eğri yüzeyle kalıpların analizi ile üç boyutlu analiz yapılabilir. Ayrıca eş ısıllı durumdan elde edilen ana denkleme hacimsel kuvvetler ile ısı transferinden doğan ısıllı etkiler katılarak eş ısıllı olmayan ve gerçeğe çok daha yakın dolum analizi ve pişme kinetiği modellenmesi de mümkündür. Ancak bunun için bilgisayar yazılımı desteği kaçınılmaz görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Acheson J A, Simacek P, Advani S G (2004), "The implications of fiber compaction and saturation on fully coupled VARTM simulation", *Composites: Part A* 35:159–169, 2004
- Béchet E, Ruiz E, Trochu F, Cuilliere J C (2003), "Adaptive mesh generation for mould filling problems in resin transfer moulding", *Composites: Part A*, 34: 813–834, 2003
- Berdichevsky A L, Cai Z. (1993), "Preform Premability Predictions bu Self Consistent Method and Finite Element Simulation", *Polymer Composites*, 14:132-143, 1993
- Bickerton S, Stadtfeld H C , Steiner K. V. , Advani S. G. (2001) , "Design and application of actively controlled injection schemes for resin-transfer molding", *Composites Science and Technology* 61:1625–1637, 2001
- Bingöl, O. K., İki Boyutlu Poisson Denklemine Sonlu Elemanlar Yardımı İle Çözülmesi, Bitirme Tezi, YTÜ, İstanbul, 2004
- Boccard A, II.Woo, Springer G. S. (1995) , "Model for Dterminibg the Vent Locations and Fill Time of Resin Transfer Molding" , *Journal of Composite Materials*, 29:306-333, 1995
- Bruscke M. V, Advani S.G. (1990), "A Finite Element/Control Volume Approach to Mold Filling in Anisotropic Porous Media" , *Polimer Composites* 11: 398-405, 1990
- Bruscke M. V, Advani S.G. (1991) " RTM: Filling Simulation of Complex 3D Shell-like Structures", *Sampe Quarterly*: 2-10, 1991
- Cai, Z. (1992), "Analysis of Mold Filling In RTM Process, *Journal of Composte Materials*", Vol 26:1310-1338, 1992
- Chan A. W, Hwank S.T. (1991) " Modeling og Impregnation Process during Resin Transfer Molding", *Polimer Engineering Science and Technology*, 1149-1156,1991
- Chang W ve Kikuchi N. (1994) , "An Adaptive Remeshing Method in the Simulation of Resin Trasnfer Molding (RTM) Process, *Computer Mechanics in Applied Mechanics and Engineering*", 112:41-68, 1994
- Cheung A, Yu Y, Pochiraju K. (2004), "Three-dimensional finite element simulation of curing of polymer composites", *Finite Elements in Analysis and Design*, 40: 895–912, 2004
- Coulter J P, Güçeri S.I. (1989), " Resin Impregnation During Composites Manufacturing: Theory and Experimentation" , *Composite Science and Technlogy*, 317-330, 1989
- Ding L, Shih C, Liang Z, Zhang C ,Wang B. (2003), "In situ measurement and monitoring of whole-field permeability profile of fiber preform for liquid composite molding processes", *Composites: Part A* 34: 779–789,2003
- Ferland P, Guittard D, Trochu F (1996), "Concurrent Methods for Permability Measurement in Resin Trasnfer Molding", *Polymer Composites*, 17:149-158, 1996

- Ferret B, Anduze M ve Nardari C. (1998), "Metal inserts in structural composite materials manufactured by RTM", *Composites Part A*, 29A: 693-700, 1998
- Gao D. M., Traochu F, Gauvin R (1993), *Heat Transfer Analysis of Nonisothermal Resin Transfer Molding by the Finite Element Method*, CA CSMA CANCOM, 1993
- Gebart B R (1992), "Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM" , *Journal of Composite Materials*, 26:1100-1133, 1992
- Han K, Lee L J ve Liou M. (1993a), "Fiber Mat Deformation in Liquid Composite Molding II: Modeling" , *Polymer Composites* 14:151-160,1993
- Han K, Trevin L, James L, Liou M. (1993b), "Fiber Mat Deformation in Liquid Composite Molding I: Experimental Analysis", *Polymer Composites* 14:144-150,1993
- Huebner, K H (1975), *The Finite Element Method for Engineers*, Wiley Interscience Publication, 1975
- Kanapady R., Tama K.K.(1999a), " Highly Scalable Parallel Computational Models for Large-Scale RTM Process Modelling Simulations, PART 1: Theoretical Formulations and Generic Design" , *Numerical Heat Transfer, Part B*, 36: 265- 285, 1999
- Kanapady R., Tama K.K. (1999b), "Highly Scalable Parallel Computational Models for Large-Scale RTM Process Modelling Simulations , PART 2: Parallel Formulation Theory and Implementation " , *Numerical Heat Transfer, Part B*, 36: 287- 308, 1999
- Kwang M, Lee W II. (1991), "A Study on the Mold Filling Process in Resin Transfer Molding Process", *Polymer Engineering and Science*, 31: 785-771, 1991
- Lebrun G, Gauvin R, Kendall K. N. (1996), Experimental Investigation of Resin Temperature and Pressure during Filling and Curing in a Flat Shell RTM Mould, *Composites Part A*, Vol 27A, 347-355, 1996
- Lin R. J., Lee L. J. Ve Liou M J (1993) , "Mold Filling and Curing Analysis in Liquid Composite Molding", *Polymer Composites*, 14: 71-81, 1993
- Lui B, Bickerton S, Advani S. G. (1996) , "Modeling and simulation of Resin Transfer Molding (RTM)- Gate Control, Venting and Dry Spot Prediction", *Composites Part A*, 135-141,1996
- Lin M, Hahn H. T. ve Huha H. (1998) , "A finite element simulation of resin transfer molding based on partial nodal saturation and implicit time integration", *Composites Part A* 29A :541-550, 1998
- Lunström S T ve Gebart R (1994), "Influence from Process Parameters on Void Formation in Resin Transfer Molding" , *Polymer Composites* vol 15, 25-33,1994

Mohan R.V., Ngo N. D., Tama K. K. (1999a) "Three-Dimensional Resin Transfer Molding :Isothermal Process Modelling and Explicit Tracking of Moving Fronts for Thick Geometrically Complex Composites Manufacturing Applications PART 1" , Numerical Heat Transfer, Part A, 35: 815- 838, 1999

Mohan R.V., Ngo N. D., Tama K. K. (1999b), "Three-Dimensional Resin Transfer Molding :Isothermal Process Modelling and Explicit Tracking of Moving Fronts for Thick Geometrically Complex Composites Manufacturing Applications PART 2", Numerical Heat Transfer, Part A, 35: 839- 858, 1999

Mohan R.V., Ngo N. D., Tama K. K.(1999c). "On a Pure Finite-Element-Based Methodology for Resin Transfer Mold Filling Simulations, Polymer Engineering and Science, January , 39: 26-43,1999

Rouison D, Sain M, Couturier M. (2004), "Resin transfer molding of natural fiber reinforced composites: cure simulation", Composites Science and Technology, 64: 629–644, 2004

Rudd C. D., Owen M. J., Middleton V. (1990), "Effects of Process Variables on Cycle Time During RTM for High Volume Manufacture", Materials Science and Technology, 6:656-665, 1990

Sanjay K. M.. (2002), Composites Materials, Product, and Process Engineering, CRC Press,2002

Schwab S D, Levy R L, Glover G G. (1996), "Sensor System for Monitoring Impregnation and Cure during Resin Transfer Molding", Polymer Composites 17:312-316, 1996

Shields K ve Colton J. (1993) , "Resin Transfer Molding with Powder Coated Preforms, Polymer Composites " 14:341-348, 1993

Simacek P ve Advani S G. (2003), "A Numerical Model to Predict Fiber Tow Saturation during Liquid Composite Molding", Composite Science and Technology, 63:1725–1736 ,2003

Song W, Chui W. , Glimm J, Lindquist B ve Tangerman F. (1997), "Applications of Front Tracking to the Simulation of Resin Transfer Molding", *Computers Math. Applic.* 33:9: 47-60, 1997

Sözer M, Advani S. G.(2000), Process modeling, ASM Handbook, 21: 423-433,2000

Stöven T, Weyrauch F. (2003), "Mitschang P, Neitzel M, Continuous Monitoring of Three-Dimensional Resin Flow through a Fibre Preform", Composites Part A, 34: 475-480,2003

Verheus A. S. Ve Peeters J. H. A. (1993), "The Role of Reinforcement Premability in Resin Transfer Moulding" Composites Manufacturing, 4:33-38, 1993

Weitzenböck J R, Sheno R A, Wilson P A (1999a) , "Radial flow permeability measurement. Part A: Theory", Composites: Part A, 30: 781-796, 1999

Weitzenböck J R, Shenoï R A, Wilson P A (1999b) , “Radial flow permeability measurement. Part B: Application, Composites: Part A 30: 797–813, 1999

Wu C J, Hourng L W ve Liao J C. (1995) , “Numerical and Ezpreimental Study on the Edge Effect of Resin Transfer Molding”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14:694-723, 1995

Wu C J, Hourng L W. (1995), “Permable Boundry Condition for Nymerical Simulation in Resin Trasnfer Molding, Polymer Engineering and Science”, 35:1272-1281, 1995

Wymer A. S., Engel R S. (1993) , “RTM Model for Resin Flow over Nonuniformly Heated Fibers, CA CSMA CANCOM,1993

Wymer A. S., Engel R S (1994) , ”A Numerical Study of Nonisothermal Resin Flow in RTM with Heated Uniaxial Fibers”, Journal of Compsote Materials, 28:53-65, 1994

Young W.B., Han, K, Fong L. H. Lee J ve Liou M..J. (1991) “Flow Simulation in Molds with Preplaced Fiber Mats”, Polymer Composites , 12: 391-403,1991

Young W B (1994), “Gate Location Optimization in Liquid Composite Molding Using Genetic Algorithms”, Journal of Composite Materials, 28:1098-1113, 1994

Young W B, Chuang M T. (1996), “Fabrication of T-Shaped Structural composite through Resin Transfer Molding” , Journal of Composite Material 17:312-316, 1996

EKLER

- Ek 1 C_{ii} Simetrik Matrisinin C_{ii}^A , C_{ii}^B , C_{ii}^C , C_{ii}^D , C_{ii}^E ve C_{ii}^F Bileşenleri
- Ek 2 C_{ij} Matrisinin Sayısal Değerleri
- Ek 3 K_{ij} Matrisinin Sayısal Değerleri
- Ek 4 Sayısal Uygulamaların Sonlu Elemanlarının Yerel ve Global Düğümlerinin (x,y) Koordinatları ile Şekil Fonksiyonlarının A, B ve C Katsayıları
- Ek 5 Sayısal Uygulamanın t=3 ve 6 sn. İçin ψ_i Değerleri ile t=6 sn İçin P_i Değerleri
- Ek 6 Her Bir Elemanın Alabileceği max. P değeri (pa)
- Ek 7 Hesaplamalar İçin Kullanılan MATLAB programı



EK 1 Devami

$C_{22}^{e10} + C_{11}^{e17} + C_{11}^{e18}$	0	0	0	$C_{13}^{e17} + C_{13}^{e18}$	0	0	0
$C_{23}^{e10} + C_{12}^{e17} + C_{33}^{e9} + C_{33}^{e10} + C_{22}^{e12} + C_{22}^{e17} + C_{11}^{e19} + C_{11}^{e20}$	$C_{23}^{e12} + C_{12}^{e19}$	0	0	$C_{23}^{e17} + C_{12}^{e20}$	$C_{13}^{e19} + C_{13}^{e20}$	0	0
0	$C_{33}^{e11} + C_{33}^{e12} + C_{22}^{e14} + C_{22}^{e19} + C_{11}^{e21} + C_{11}^{e22}$	0	0	0	$C_{23}^{e19} + C_{12}^{e22}$	$C_{13}^{e21} + C_{13}^{e22}$	0
0	$C_{23}^{e14} + C_{12}^{e21} + C_{33}^{e13} + C_{33}^{e14} + C_{22}^{e16} + C_{22}^{e21} + C_{11}^{e23} + C_{11}^{e24}$	$C_{23}^{e16} + C_{12}^{e23}$	0	0	0	$C_{23}^{e21} + C_{12}^{e24}$	$C_{13}^{e23} + C_{13}^{e24}$
0	$C_{23}^{e16} + C_{12}^{e23}$	$C_{22}^{e23} + C_{33}^{e15} + C_{33}^{e16}$	0	0	0	0	C_{23}^{e23}
C_{12}^{e18}	0	0	0	$C_{22}^{e18} + C_{11}^{e25} + C_{11}^{e26}$	0	0	0
$C_{13}^{e17} + C_{13}^{e18}$	0	0	0	$C_{23}^{e18} + C_{12}^{e25} + C_{33}^{e17} + C_{33}^{e18} + C_{22}^{e20} + C_{12}^{e25} + C_{11}^{e27} + C_{11}^{e28}$	$C_{23}^{e20} + C_{12}^{e27}$	0	0
0	$C_{23}^{e19} + C_{13}^{e20} + C_{12}^{e22}$	0	0	$C_{23}^{e20} + C_{12}^{e27}$	$C_{33}^{e19} + C_{33}^{e20} + C_{22}^{e22} + C_{22}^{e27} + C_{11}^{e29} + C_{11}^{e30}$	$C_{23}^{e22} + C_{12}^{e29}$	0
0	0	$C_{13}^{e21} + C_{13}^{e22}$	$C_{23}^{e21} + C_{12}^{e24}$	0	0	$C_{33}^{e21} + C_{33}^{e22} + C_{22}^{e24} + C_{22}^{e29} + C_{11}^{e31} + C_{11}^{e32}$	$C_{23}^{e24} + C_{12}^{e31}$
0	0	0	$C_{13}^{e23} + C_{13}^{e24}$	0	0	$C_{23}^{e23} + C_{12}^{e31} + C_{23}^{e24} + C_{33}^{e23} + C_{33}^{e24} + C_{22}^{e31}$	$C_{23}^{e23} + C_{33}^{e24} + C_{33}^{e31} + C_{22}^{e31}$

$C_H^D =$

EK 1-Devami

$$C_H^F = \begin{bmatrix} C_{22}^{e26} + C_{11}^{e33} + C_{11}^{e34} & 0 & 0 & 0 & C_{12}^{e34} & C_{13}^{e33} + C_{13}^{e34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{23}^{e26} + C_{12}^{e33} + C_{11}^{e25} + C_{33}^{e26} + C_{22}^{e28} + C_{22}^{e33} + C_{11}^{e35} + C_{11}^{e36} & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{23}^{e33} + C_{12}^{e36} & C_{13}^{e35} + C_{13}^{e36} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{23}^{e28} + C_{12}^{e35} & C_{33}^{e27} + C_{33}^{e28} + C_{22}^{e30} + C_{22}^{e35} + C_{11}^{e37} + C_{11}^{e38} & 0 & 0 & 0 & C_{23}^{e35} + C_{12}^{e38} & C_{13}^{e37} + C_{13}^{e38} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{23}^{e30} + C_{12}^{e37} + C_{33}^{e29} + C_{33}^{e30} + C_{22}^{e32} + C_{22}^{e37} + C_{11}^{e39} + C_{11}^{e40} & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{23}^{e37} + C_{12}^{e40} & C_{13}^{e39} + C_{13}^{e40} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{23}^{e39} \\ C_{12}^{e34} & 0 & 0 & 0 & C_{22}^{e34} & C_{23}^{e34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_{13}^{e33} + C_{13}^{e34} & 0 & 0 & 0 & C_{23}^{e34} & C_{33}^{e33} + C_{33}^{e34} + C_{22}^{e36} & C_{23}^{e36} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{13}^{e35} + C_{13}^{e36} & C_{23}^{e35} + C_{12}^{e38} & 0 & 0 & C_{23}^{e36} & C_{33}^{e35} + C_{33}^{e36} + C_{22}^{e38} & C_{23}^{e38} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{13}^{e37} + C_{13}^{e38} & 0 & 0 & 0 & C_{23}^{e38} & C_{33}^{e37} + C_{33}^{e38} + C_{22}^{e40} & C_{23}^{e40} & C_{33}^{e39} + C_{33}^{e40} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{23}^{e39} & 0 & 0 & C_{23}^{e40} & C_{33}^{e39} + C_{33}^{e40} & 0 \end{bmatrix}$$

EK 4 Sayısal Uygulamanın Sonlu Elemanlarının Yerel ve Global Dügümlerinin (x,y) Koordinatları ile Şekil Fonksiyonlarının A, B ve C katsayıları

Eleman	Yerel Dügüm	Global Dügüm	x	y	C	B	A
1	1	1	0	0	1	-1	0
1	2	2	1	0	0	1	-1
1	3	7	1	1	0	0	1
2	1	1	0	0	-1	0	1
2	2	6	0	1	0	1	-1
2	3	7	1	1	0	-1	0
3	1	2	1	0	2	-1	0
3	2	3	2	0	-1	1	-1
3	3	8	2	1	0	0	1
4	1	2	1	0	-1	0	1
4	2	7	1	1	-1	1	-1
4	3	8	2	1	1	-1	0
5	1	3	2	0	3	-1	0
5	2	4	3	0	-2	1	-1
5	3	9	3	1	0	0	1
6	1	3	2	0	-1	0	1
6	2	8	2	1	-2	1	-1
6	3	9	3	1	2	-1	0
7	1	4	3	0	4	-1	0
7	2	5	4	0	-3	1	-1
7	3	10	4	1	0	0	1
8	1	4	3	0	-1	0	1
8	2	9	3	1	-3	1	-1
8	3	10	4	1	3	-1	0
9	1	6	0	1	1	-1	0
9	2	7	1	1	1	1	-1
9	3	12	1	2	-1	0	1
10	1	6	0	1	-2	0	1
10	2	11	0	2	1	1	-1
10	3	12	1	2	0	-1	0
11	1	7	1	1	2	-1	0
11	2	8	2	1	0	1	-1
11	3	13	2	2	-1	0	1
12	1	7	1	1	-2	0	1
12	2	12	1	2	0	1	-1
12	3	13	2	2	1	-1	0
13	1	8	2	1	3	-1	0
13	2	9	3	1	-1	1	-1
13	3	14	3	2	-1	0	1
14	1	8	2	1	-2	0	1
14	2	13	2	2	-1	1	-1
14	3	14	3	2	2	-1	0
15	1	9	3	1	4	-1	0
15	2	10	4	1	-2	1	-1
15	3	15	4	2	-1	0	1
16	1	9	3	1	-2	0	1
16	2	14	3	2	-2	1	-1
16	3	15	4	2	3	-1	0
17	1	11	0	2	1	-1	0

17	2	12	1	2	2	1	-1
17	3	17	1	3	-2	0	1
18	1	11	0	2	-3	0	1
18	2	16	0	3	2	1	-1
18	3	17	1	3	0	-1	0
19	1	12	1	2	2	-1	0
19	2	13	2	2	1	1	-1
19	3	18	2	3	-2	0	1
20	1	12	1	2	-3	0	1
20	2	17	1	3	1	1	-1
20	3	18	2	3	1	-1	0
21	1	13	2	2	3	-1	0
21	2	14	3	2	0	1	-1
21	3	19	3	3	-2	0	1
22	1	13	2	2	-3	0	1
22	2	18	2	3	0	1	-1
22	3	19	3	3	2	-1	0
23	1	14	3	2	4	-1	0
23	2	15	4	2	-1	1	-1
23	3	20	4	3	-2	0	1
24	1	14	3	2	-3	0	1
24	2	19	3	3	-1	1	-1
24	3	20	4	3	3	-1	0
25	1	16	0	3	1	-1	0
25	2	17	1	3	3	1	-1
25	3	22	1	4	-3	0	1
26	1	16	0	3	-4	0	1
26	2	21	0	4	3	1	-1
26	3	22	1	4	0	-1	0
27	1	17	1	3	2	-1	0
27	2	18	2	3	2	1	-1
27	3	23	2	4	-3	0	1
28	1	17	1	3	-4	0	1
28	2	22	1	4	2	1	-1
28	3	23	2	4	1	-1	0
29	1	18	2	3	3	-1	0
29	2	19	3	3	1	1	-1
29	3	24	3	4	-3	0	1
30	1	18	2	3	-4	0	1
30	2	23	2	4	1	1	-1
30	3	24	3	4	2	-1	0
31	1	19	3	3	4	-1	0
31	2	20	4	3	0	1	-1
31	3	25	4	4	-3	0	1
32	1	19	3	3	-4	0	1
32	2	24	3	4	0	1	-1
32	3	25	4	4	3	-1	0
33	1	21	0	4	1	-1	0
33	2	22	1	4	4	1	-1
33	3	27	1	5	-4	0	1
34	1	21	0	4	-5	0	1
34	2	26	0	5	4	1	-1

34	3	27	1	5	0	-1	0
35	1	22	1	4	2	-1	0
35	2	23	2	4	3	1	-1
35	3	28	2	5	-4	0	1
36	1	22	1	4	-5	0	1
36	2	27	1	5	3	1	-1
36	3	28	2	5	1	-1	0
37	1	23	2	4	3	-1	0
37	2	24	3	4	2	1	-1
37	3	29	3	5	-4	0	1
38	1	23	2	4	-5	0	1
38	2	28	2	5	2	1	-1
38	3	29	3	5	2	-1	0
39	1	24	3	4	4	-1	0
39	2	25	4	4	1	1	-1
39	3	30	4	5	-4	0	1
40	1	24	3	4	-5	0	1
40	2	29	3	5	1	1	-1
40	3	30	4	5	3	-1	0



EK 5. Sayısal Uygulamanın t=3 ve 6 sn. İçin ψ_i Değerleri ile t=6 sn İçin P_i Değerleri

$\psi_i(t = 3 \text{ s için}) =$	0.12	$\psi_i(t = 6 \text{ s için}) =$	0.56	$P_i(t = 6 \text{ s için}) =$	0
	0.35		1		100,56
	1		1		120,76
	1		1		120
	0.354		1		96,34
	0.468		1		90,34
	0.89		1		100,25
	1		1		98,87
	1		1		84,34
	0.765		1		80,54
	0.643		1		70,76
	0.654		1		78,76
	0.721		1		79,65
	0.756		1		80,8
	0.643		1		70,34
	0.632		1		60,45
	0.679		1		63,56
	0.345		1		70,65
	0.127		1		75,56
	0.023		1		74,56
	0		1		72,45
	0		1		70,65
	0		1		68,67
	0		1		64,54
	0		1		50,65
	0		0.75		0
	0		1		60,78
	0		1		63,76
	0		1		60,54
	0		1		40,54

EK 6. Her Bir Elemanın Alabileceği max. P değeri (pa)

Eleman	Max. Değ
1	90,34
2	90,34
3	100,25
4	100,25
5	98,87
6	98,87
7	80,54
8	80,54
9	78,76
10	78,76
11	79,65
12	79,65
13	80,8
14	80,8
15	70,34
16	70,34
17	63,56
18	63,56
19	70,65
20	70,65
21	79,65
22	79,65
23	87,04
24	87,04
25	70,65
26	70,65
27	68,67
28	68,67
29	64,54
30	64,54
31	50,65
32	50,65
33	60,78
34	60,78
35	63,67
36	63,67
37	60,54
38	60,54
39	40,54
40	40,54

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	16.04.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1994-1997	Kabataş Erkek Lisesi
Lisans	1997-2001	Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

Çalıştığı Kurumlar

2001-2002	MİSPA Elektronik Kart San ve Tic A.Ş.
2002-Devam Ediyor	YTÜ Makine Fakültesi Araştırma Görevlisi

