

T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLASTİK ESASLI KOMPOZİT LEVHALARIN THERMOFORMING (VAKUM
VE ISI İLE ŞEKİL VERME) ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Olcay EKŞİ

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Selçuk ERDOĞAN

EDİRNE-2014

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Mustafa ÖZCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tezin **Doktora** tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Taner TIMARCI
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tez tarafımda okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Selçuk ERDOĞAN
Tez Danışmanı

Bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında bir **Doktora** tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Prof. Dr. Enver ATİK

Prof. Dr. Metin AYDOĞDU

Doç. Dr. Tahir ALTINBALIK

Yrd. Doç. Dr. Selçuk ERDOĞAN

Yrd. Doç. Dr. Hayrettin BEYNEK

Tarih: 22/05/2014

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

İlgili tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını beyan ederim.

22/05/2014

Olçay EKŞİ

Doktora Tezi
Olca EKŞİ
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada takviye elemanı içermeyen Polipropilen (PP), Polistiren (PS) ve Polivinil Klorür (PVC) levha malzemeler ile ağırlıkça takviye elemanı içeren % 5 cam elyaf takviyeli Polipropilen (PP), % 5 ve % 15 karbon elyaf takviyeli Polipropilen (PP), % 5 cam elyaf takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) levha malzemeler vakum ve ısı ile şekil verme yöntemiyle şekillendirilmiş, proses parametreleri değişiminin ürün kalitesi üzerine etkisi araştırılmıştır. Vakum ve ısı ile şekil verilen yarı mamuller üzerinde kesitler alınarak ürün kalınlık dağılımları belirlenmiştir. Elde edilen kalınlık dağılımı ifadeleri, vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonu sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen kübik, silindirik ve konik yarı mamullerde Geometrik Elemanlar Analizi metodu kullanılarak ürün kalınlık dağılımları oluşturulmuş ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Yıl : 2014

Sayfa Sayısı : 126

Anahtar Kelimeler : Vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi, kompozit, Geometrik Elemanlar Analizi (GEA), termoplastik levha, Polipropilen (PP), Polistiren (PS), Polivinil Klorür (PVC), Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE).

Doctoral Thesis
Olcay EKŞİ
Trakya University Institute of Natural Sciences
Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

In this study, Polypropylene (PP), Polystyrene (PS), Polyvinyl Chloride (PVC) pure sheet materials and 5% glass fibre reinforced Polypropylene (PP), 5% and 15% carbon fibre reinforced Polypropylene (PP) and 5% glass fibre reinforced High Density Polyethylene (HDPE) sheet materials were thermoformed and effect of variation of thermoforming process parameters on final product quality was investigated. Wall thickness distribution profiles were generated on predetermined sections of thermoformed products. Wall thickness distribution results that obtained experimentally were compared to results predicted by thermoforming simulation. Also wall thickness distribution was calculated according to Geometric Element Analysis (GEA) for Semi-finished thermoformed conical, cylindrical and cubical products. Results obtained by GEA were compared to wall thickness distributions generated by experimentally.

Year : 2014

Number of Pages : 126

Keywords : Thermoforming, composite, Geometric Element Analysis (GEA), thermoplastic sheet, Polypropylene (PP), Polystyrene (PS), Polyvinyl Chloride (PVC), High Density Polyethylene (HDPE).

ÖNSÖZ

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesi, ambalaj sanayinin temel üretim metotlarından biridir. Ülkemizde bu yöntemle ilgili ulusal düzeyde literatür kaynaklarının yeterli seviyede olmayışı, araştırmacı ve akademisyenleri bu konuda kısıtlamıştır.

Deneysel nitelikli bu çalışma Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (TÜBAP) tarafından desteklenmiştir. Çalışma boyunca beni yalnız bırakmayan, attığım her adımda yanımda olan ve deneysel çalışma ortamının zevkini bana yaşatan, tecrübelerinden büyük dersler çıkardığım danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Ertuğrul Selçuk Erdoğan'a teşekkür ederim.

Bilimsel araştırma projesinin özel sektör ortağı olan "Yeniyurt Makine A.Ş." çalışanlarına, Sayın Murat Yeşilyurt'a, Sayın Talat Yeşilyurt'a, çalışmada kullanılan Polistiren levhaları tedarik eden "Akay Stand" firmasında görevli Sayın Yusuf Pala'ya, PVC levha tedarik eden "Plasko Plastik San. ve Tic. A.Ş." firmasında görevli Sayın Tamer Yaşar'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmada kullanılan kompozit levha üretiminde birlikte çalıştığım arkadaşım, Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Sayın Ümit Hüner'e, bana gerek bilgi dağarcığı gerekse insani boyuttaki yardımlarından ötürü Namık Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Sencer Süreyya Karabeyoğlu'ya, teşekkür ederim.

Sadece doktora öğrenimim süresince değil tüm hayatım boyunca beni yalnız bırakmayan, beni karşılıksız seven Annem Sıtkıye Ekşi'ye, Babam Ahmet Ekşi'ye, tüm aile büyüklerime, doktora öğrenimim süresince bana iki kız evlat armağan eden canımdan çok sevdiğim karım ve çocuklarımla annesi Gülçay Ekşi'ye, hayatıma mutluluk katan canım kızlarım Derin Ekşi ve Zeynep Sezin Ekşi'ye minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1 : GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 : MATERYAL VE METOD	34
2.1. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Prosesinin Analizi.....	34
2.1.1.Geometrik Elemanlar Analizi(GEA) ve Cidar Kalınlık Dağılımı Eşitliklerinin Konik Geometrilik Kalıplarda Belirlenmesi	37
2.1.2.Cidar Kalınlık Dağılımı Eşitliklerinin Silindirik Geometrilik Kalıplarda Belirlenmesi	39
2.1.3. Cidar Kalınlık Dağılımı Eşitliklerinin Kübik Geometrilik Kalıplarda Belirlenmesi	41
2.2.Deneysel Çalışma.....	43
2.2.1. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Ünitesini Oluşturan Temel Elemanlar	44
2.2.1.1.Gövde	44
2.2.1.2. Isıtıcı Sistem.....	45
2.2.1.3. Vakumlama Sistemi	46
2.2.1.4. Elektrik Panosu	46
2.2.1.5. Kalıplar.....	47
2.2.2.Vakum ve Isı ile Şekil Verme Ünitesinin Tasarımı ve İmalatı	47
2.2.2.1. Tek Adımda Şekil Verme Prosesi	48
2.2.2.2.Çok Adımda Şekil Verme Prosesi	52
2.2.2.3.Vakum ve Isı ile Şekil Verme Ünitesinin Tasarım ve Üretim Aşamaları...56	
2.2.2.4.Vakum ve Isı ile Şekil Verme Kalıplarının Tasarımı ve İmalatı	59
2.3.Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Temini.....	60
BÖLÜM 3 : SONUÇLAR VE TARTIŞMA	63
3.1.PP, PVC ve PS Termoplastik Polimer Levhaların Proses Parametrelerinin Belirlenmesi	63

3.2.Vakum ve Isı ile Şekil Verilen PP, PVC ve PS Levhalarda Deneysel Cidar Kalınlık Dağılımının Tespit Edilmesi	63
3.3.PP, PVC ve PS Termoplastik Polimer Levhaların Vakum ve Isı ile Şekil Verme Prosesinde Deformasyon Karakteristiğinin Oluşturulması	78
3.4.Ağırlıkça Cam Elyaf ve Karbon Elyaf İçeren Termoplastik Polimer Levhaların Proses Parametrelerinin Belirlenmesi	81
3.5. Vakum ve Isı ile Şekil Verilen Takviyeli Termoplastik Levhaların Deneysel Cidar Kalınlık Dağılımının Tespit Edilmesi ve Deformasyon Karakteristiğinin Oluşturulması	83
3.6. Kompozit Levhaların Şekillendirilmesi Sonucu Elde Edilen Yarı Mamullerde Oluşan Elyaf Dağılımlarının İncelenmesi	88
3.7. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Simülasyonu	91
3.7.1. Alansal Çekme Oranı (Areal Draw Ratio) Kullanılarak, Deneysel Çalışmada Şekil Verilen Konik ve Silindirik Yarı Mamullerdeki Cidar Kalınlık Dağılımının Tespiti.....	95
3.8. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Bazı Mekanik Özelliklerinin Tespiti.....	101
3.8.1. Çekme Deneyi(ASTM D 638)	101
3.8.2. Erime Akış İndeksi (MFI) Deneyi (ISO 1133)	104
3.8.3. Darbe Deneyi (Gardner Impact Test-ASTM D 5420)	105
3.9. Tartışma.....	108
KAYNAKLAR	
ÖZGEÇMİŞ	
TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER	

SİMGELER DİZİNİ

A	bir “t” anında levhanın gerdirme kuvvetine dik kesit alanı
A_0	polimer levhanın sahip olduğu ilk yüzey alanı
A_{cap}	küresel kubbenin alanı
α	deneysel değeri 0.67 ile 1 arasında değişen bir katsayı
β	koniklik açısı
C	kalıp yüzeyi ile polimer malzeme arasındaki kinetik sürtünme katsayısı
D	tutucu ile sabitlenen levhanın çapı
ε	genleme, birim şekil değiştirme
F_D	gerdirme kuvveti
F_D^1	pot çemberi altındaki levha malzemesinin gerdirilmeden kalıp ve tutucular arasından kayması için gerekli olan kuvvet
F_S	sürtünme kuvveti
H	düşey yönde silindirik kalıbın yüksekliği
h_0	polimer levhanın ilk kalınlığı
h_1	koni yüksekliği
N	normal kuvvet
P	şekil değiştiren çapak malzemesine uygulanan basınç
R	küresel kubbenin yarıçapı
R_0	başlangıçta t_0 kalınlığına sahip çeyrek çemberin yarıçapı
R_A	alansal çekme oranı
R_L	doğrusal çekme oranı
σ	gerilme
s	kalıbın eğik yüzeyi ile polimer levhanın temasta olan kısmının uzunluğu
T	levhanın şekil verme sıcaklığındaki dayanımı
t	küresel kubbeyi oluşturan levhanın kalınlığı
t_0	polimer levhanın sahip olduğu ilk kalınlık değeri
t^*	$s=0$ 'daki levha cidar kalınlığı

Kısaltmalar

aPET	amorf polietilen teraftalat
CA	selüloz asetat
cPET	kristalin polietilen teraftalat
EXP	kalınlık dağılımı hesabında kullanılan deneysel metot
FEA	sonlu elemanlar analizi
GEA	geometrik elemanlar analizi
HDPE	yüksek yoğunluklu polietilen
LDPE	alçak yoğunluklu polietilen
PE	polietilen
PMMA	polimetilmetakrilat
PP	polipropilen
PS	polistiren
PVC	polivinil klorür

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1 Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinde kullanılan vakum pompasının özellikleri.....	58
Tablo 2.2 Deneysel çalışmada kullanılan PP ve PVC levha malzemelere ait özellikler.	62
Tablo 2.3 Takviyeli levhaların üretiminde kullanılan termoplastik granüllere ait özellikler.....	62
Tablo 2.4 Takviyeli levhaların üretiminde kullanılan elyaf malzemelere ait özellikler.	62
Tablo 3.1 PP, PVC ve PS levha malzemeler için Laboratuvar tipi şekil verme ünitesinde belirlenen şekil verme parametreleri.....	63
Tablo 3.2 % 5 cam elyaf takviyeli PP levha malzeme için deneysel proses parametreleri(GF=Glass Fibre).....	81
Tablo 3.3 % 5 ve % 15 karbon elyaf takviyeli PP levha malzemeler için deneysel proses parametreleri(CF=Carbon Fibre).....	82
Tablo 3.4 % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzeme için deneysel proses parametreleri(GF=Glass Fibre).....	82
Tablo 3.5 PS malzemeye ait çekme deneyi sonuçları.....	102
Tablo 3.6 % 5 cam elyaf takviyeli HDPE malzemeye ait çekme deneyi sonuçları.....	103
Tablo 3.7 Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde kullanılan malzemelerin MFI deney sonuçları.....	105
Tablo 3.8 PS (t=2.5 mm) levha malzemenin darbe deneyi ölçümleri.....	106
Tablo 3.9 PS (t=2 mm) levha malzemenin darbe deneyi ölçümleri.....	107
Tablo 3.10 PVC (t=3 mm) levha malzemenin darbe deneyi ölçümleri.....	107
Tablo 3.11 PP (t=3 mm) levha malzemenin darbe deneyi ölçümleri.....	107
Tablo 3.12 Farklı geometrilerdeki yarı mamuller üzerinde tespit edilen en düşük kalınlık değerleri.....	124

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Erkek ve dişi kalıp uygulamalarında düzlemsel çekme oranı tespiti.....	36
Şekil 2.2 Geometrik Elemanlar Analizi ile polimer levhanın konik kalıp içerisine derin çekilmesi. (a) derin çekme prosesi başladıktan sonra " θ " anı. (b) " θ " anından " $d\theta$ " zaman aralığı sonra.	38
Şekil 2.3 Silindirik bir vakum ve ısı ile şekil verme kalıbının tam kesit görünümü.....	40
Şekil 2.4 Kübik geometrili bir vakum ve ısı ile şekil verme kalıbının tam kesit görünümü.	41
Şekil 2.5 Polimer levhanın kübik vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı içerisinde öngörülen şekil değişimi. (A- tam görünüm, B-tam kesit görünümü).....	42
Şekil 2.6 Polimer levhanın kübik vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı içerisinde öngörülen şekil değişimi. (A- tam görünüm, B-tam kesit görünümü).....	42
Şekil 2.7 Polimer levhanın kalıp tabanına değdiği anki toplam yüzey alanı. (46524.24 mm^2 , Eşitlik (2.31)).....	43
Şekil 2.8 Yenyurt Makine A.Ş. tarafından üretilen laboratuvar tipi vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi.....	44
Şekil 2.9 Isıtıcı tablanın üç boyutlu katı modelinin alt ve izometrik görünümleri.	45
Şekil 2.10 Vakumlama sistemi ve elemanları.	46
Şekil 2.11 Deneysel çalışma içinde kullanılan sırasıyla kübik, silindirik ve konik vakum ve ısı ile şekil verme kalıpları.	47
Şekil 2.12 Erkek kalıp uygulamalarında prosesin şematik gösterimi ve Ürün cidar kalınlığının değişimi.	48
Şekil 2.13 Dişi kalıpla şekil verme operasyonu.	49
Şekil 2.14 Vakum yardımıyla serbest şekil verme prosesi(Free Blowing with vacuum)	50
Şekil 2.15 Hava basıncıyla serbest şekil verme prosesi(Free Blowing with air pressure)	50
Şekil 2.16 Basıncılı hava ile şekil verme prosesi(Pressure Forming) 1-Isıtılmış plastik esaslı levha, 2-Alt tabla, 3-Kalıp tertibatı, 4-Sızdırmazlığı sağlayan contalar ve basınç oluşumunu sağlayan üst tabla, 5. levhanın yer değişimiyle birlikte kalıp içerisindeki havanın kalıp dışına tahliyesi.	51
Şekil 2.17 Mekanik şekil verme prosesi (Matched Die Forming)	52

Şekil 2.18 Basınçla şişirerek erkek kalıpla şekil verme prosesi (Billow Drape Forming)	53
Şekil 2.19 Vakum ve hava basıncı ile şekil verme prosesi, 1-Isıtılmış plastik levhanın tutucular yardımıyla sabitlenmesi, 2-Polimer levhanın ısıtıcılar tarafından uygun sıcaklığa kadar ısıtılması, 3-Vakum sonrası şekil değişimi, 4-Hava basıncı uygulaması sonrasında levhanı erkek kalıp yüzeyine yapışması, 5-Tutucuların açılmasıyla birlikte soğuyan ve katılaştıran levhanın son ürün haline gelmesi.....	53
Şekil 2.20 Mekanik yardımcı destekli vakum ile ısıl şekil verme prosesi(Plug Assist Vacuum Forming).....	55
Şekil 2.21 Mekanik yardımcı destekli hava basıncı ile şekil verme prosesi (Plug Assist Pressure Forming).....	55
Şekil 2.22 Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinin taslak katı modeli.	56
Şekil 2.23 Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinin tasarım aşamasından üç boyutlu bir görünüş.....	57
Şekil 2.24 İmalat sürecine hazır olan nihai tasarımın üç boyutlu bir görünüşü.	59
Şekil 2.25 Konik, silindirik ve kübik vakum ve ısı ile şekil verme kalıplarının tam kesit görünümü.	59
Şekil 3.1 Vakum ve ısı ile şekil verilen sırasıyla 2, 2.5 ve 3 mm kalınlığındaki PS konik yarı mamuller.	64
Şekil 3.2 Vakum ve ısı ile şekil verilen sırasıyla 2, 2.5 ve 3 mm kalınlığındaki PS kübik yarı mamuller.	65
Şekil 3.3 Vakum ve ısı ile şekil verilen sırasıyla 2.5 ve 3 mm kalınlığındaki PS silindirik yarı mamuller.	65
Şekil 3.4 Vakum ve ısı ile şekil verilen 3 mm kalınlığındaki sırasıyla PVC ve PP kübik yarı mamuller.	65
Şekil 3.5 Vakum ve ısı ile şekil verilen 3 mm kalınlığındaki sırasıyla PVC ve PP konik yarı mamuller.	66
Şekil 3.6 Vakum ve ısı ile şekil verilen 3 mm kalınlığındaki sırasıyla PVC ve PP silindirik yarı mamuller.....	66
Şekil 3.7 Vakum ve ısı ile şekil verilen konik yarı mamulde deneysel metotla ölçüm yapılan noktalar.(1-Ürün tabanının merkezi, 2-Ürün tabanında 10 mm'lik radüsün	

başlangıç noktası, 3-10 mm'lik radüsün bitiş noktası, 4-Ürün yan duvarında ölçüm yapılan son nokta)	66
Şekil 3.8 Vakum ve ısı ile şekil verilen silindirik yarı mamulde deneysel metotla ölçüm yapılan noktalar.(1-Ürün tabanının merkezi, 2-Ürün tabanında 10 mm'lik radüsün başlangıç noktası, 3-10 mm'lik radüsün bitiş noktası, 4-Ürün yan duvarında ölçüm yapılan son nokta)	67
Şekil 3.9 Vakum ve ısı ile şekil verilen kübik yarı mamulde deneysel metotla ölçüm yapılan noktalar.(1-Ürün tabanının merkezi, 2-Ürün tabanında 10 mm'lik radüsün başlangıç noktası, 3-10 mm'lik radüsün bitiş noktası, 4-Ürün yan duvarında ölçüm yapılan son nokta)	67
Şekil 3.10 Vakum ve ısı ile şekil verilen kübik yarı mamulde köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte deneysel metotla ölçüm yapılan noktalar.(1-Ürün tabanının merkezi, 2-Ürün tabanında 10 mm'lik radüsün başlangıç noktası, 3-10 mm'lik radüsün bitiş noktası, 4-Ürün yan duvarında ölçüm yapılan son nokta)	68
Şekil 3.11 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı, FEA: Sonlu Elemanlar Analizi uyarınca hesaplanan kalınlık dağılımı. (PS, t=2mm)	68
Şekil 3.12 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2.5mm)	69
Şekil 3.13 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=3mm)	69
Şekil 3.14 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PP, t=3mm)	70
Şekil 3.15 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PVC, t=3mm)	70

Şekil 3.16 Silindirik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2.5mm).....	71
Şekil 3.17 Silindirik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=3mm).....	71
Şekil 3.18 Silindirik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PP, t=3mm).....	72
Şekil 3.19 Silindirik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PVC, t=3mm).....	72
Şekil 3.20 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2mm).....	73
Şekil 3.21 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2.5 mm).....	73
Şekil 3.22 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=3 mm).....	74
Şekil 3.23 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PP, t=3 mm).....	74
Şekil 3.24 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PVC, t=3 mm).....	75
Şekil 3.25 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2 mm).....	75

Şekil 3.26 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2.5 mm)	76
Şekil 3.27 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=3 mm)	76
Şekil 3.28 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PP, t=3 mm)	77
Şekil 3.29 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PVC, t=3 mm)	77
Şekil 3.30 Işık kaynağı önüne yerleştirilen farklı kalınlıklardaki PS kübik yarı mamullerin görünümü.	79
Şekil 3.31 Işık kaynağı önüne yerleştirilen PS konik yarı mamullerin görünümü.	80
Şekil 3.32 PS kübik yarı mamulde şekil değişiminde rol oynayan deformasyon mekanizmaları.	80
Şekil 3.33 PS konik yarı mamulde şekil değişiminde rol oynayan deformasyon mekanizmaları.	81
Şekil 3.34 Konik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (%5 cam elyaf takviyeli HDPE, t=1.5 mm)	84
Şekil 3.35 Konik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (%5 karbon elyaf takviyeli PP, t=2 mm)	84
Şekil 3.36 Konik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (%15 karbon elyaf takviyeli PP, t=2 mm)	85
Şekil 3.37 Konik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (%5 cam elyaf takviyeli PP, t=2 mm)	85

Şekil 3.38 Silindirik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (% 5 cam elyaf takviyeli HDPE, t=1.5mm)	86
Şekil 3.39 Kübik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (% 5 cam elyaf takviyeli HDPE, t=1.5mm)	86
Şekil 3.40 Konik geometrili kalıpta şekil verilen % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzemenin farklı açılardan görünüşü.	87
Şekil 3.41 Kübik geometrili kalıpta şekil verilen % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzemenin farklı açılardan görünüşü.	87
Şekil 3.42 Silindirik geometrili kalıpta şekil verilen % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzemenin farklı açılardan görünüşü.	87
Şekil 3.43 Konik geometrili kalıpta şekil verilen % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzemenin deformasyon mekanizmaları.....	88
Şekil 3.44 Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM).....	89
Şekil 3.45 Elyaf dağılımları incelenen noktaların konik yarı mamul üzerindeki konumları.	89
Şekil 3.46 % 5 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul kesitinden alınan SEM görüntüleri, büyütme:500x, (Nokta 1-2-3-4)	89
Şekil 3.47 % 15 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul kesitinden alınan SEM görüntüleri, büyütme:500x, (Nokta 1-2-3-4)	90
Şekil 3.48 % 5 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul yüzeyinden alınan SEM görüntüleri, büyütme:500x.....	90
Şekil 3.49 1-% 5 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul yüzeyinden alınan SEM görüntüsü, büyütme:500x, 2-% 15 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul yüzeyinden alınan Topografik SEM görüntüsü, büyütme:3800x.	90
Şekil 3.50 % 15 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamulde matris ve takviye bileşenlerinin etkileşimi, 1-Elyaf doğrultusuna karşıdan bakış, büyütme:2940x, 2-Elyaf doğrultusunda bakış, büyütme:3750x	91
Şekil 3.51 1-% 15 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamulde elyaf kümelenmesi, 2-Elyaf kümesinde alınan kesitteki SEM görüntüsü, büyütme:745x, 3-Elyaf kümesinde alınan kesitteki SEM görüntüsü, büyütme:850x.	91

Şekil 3.52 Ağ örülmüş(Meshed) ve yüzey elemanlarından(Shell elements) oluşan konik geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı ile polimer levhanın dörtte bir modeli. .	92
Şekil 3.53 Polimer levhada oluşan nihai cidar kalınlık dağılımı.	93
Şekil 3.54 Polimer levhada oluşan % kalınlık düşüşü dağılımı.	93
Şekil 3.55 Polimer levhada meydana gelen toplam deplasman dağılımı.	94
Şekil 3.56 Polimer levhanın kademeli şekil değişimi. Sırasıyla 1-8.	94
Şekil 3.57 $\frac{1}{4}$ Konik yarı mamulün şekil değiştirme kademeleri ve tespit edilen kalınlıklar.	97
Şekil 3.58 $\frac{1}{4}$ Silindirik yarı mamulün şekil değiştirme kademeleri ve tespit edilen kalınlıklar.	97
Şekil 3.59 T-SIM yazılımıyla gerçekleştirilen simülasyonda kullanılan kalıp geometrisi ve ABS polimer levha.	98
Şekil 3.60 Çanak üzerinde alınan $x=0$ doğrultusundaki kesit(Yeşil çizgi) ve kalınlık değişimi.	98
Şekil 3.61 Çanak üzerinde alınan $y=0$ doğrultusundaki kesit(Yeşil çizgi) ve kalınlık değişimi.	98
Şekil 3.62 Çanak üzerinde alınan köşegen doğrultusundaki kesit(Yeşil çizgi) ve kalınlık değişimi.	99
Şekil 3.63 Çanak üzerinde kalınlığı Alansal Çekme Oranı ile tespit edilen noktalar.	99
Şekil 3.64 Konik yarı mamul üzerinde alınan kesitte belirlenen kalınlık dağılımının karşılaştırmalı gösterimi.	100
Şekil 3.65 Silindirik yarı mamul üzerinde alınan kesitte belirlenen kalınlık dağılımının karşılaştırmalı gösterimi.	100
Şekil 3.66 Çanak üzerinde farklı doğrultularda alınan kesitlerdeki ürün kalınlık dağılımının karşılaştırmalı gösterimi.	101
Şekil 3.67 Deneylerde kullanılan Zwick-Roell Type 1455-20 kN (Materials Testing Machine, Floor-Standing Model) çekme deney cihazı.	102
Şekil 3.68 PS malzemeye ait numunelerin Gerilme-Genleme diyagramı.	103
Şekil 3.69 % 5 cam elyaf takviyeli HDPE malzemeye ait numunelerin Gerilme-Genleme diyagramı.	104
Şekil 3.70 Zwick 4100 Melt Flow Index akışkanlık ölçme cihazı.	105
Şekil 3.71 Devotrans plastik darbe test cihazı SAH-YP.	106

Şekil 3.72 Takviye elemanı içeren levhalarda vakum ve ısı ile şekil verme işlemi sonrasında oluşan üretim kusurları. (Katlanma, büzülme, aşırı deformasyon, yüzey pürüzlülüğü.	111
Şekil 3.73 Şekil verme sıcaklığında aşırı şekil değiştirme oranlarıyla yırtılan ürünlere ait görüntüler.....	111
Şekil 3.74 1-Kristal yapıdaki polimerin sıcaklık eğrisi, 2-Amorf yapıdaki polimerin sıcaklık eğrisi	112
Şekil 3.75 Kübik yarı mamul ve tel kafes görünümlü çizgilerin değişimi.....	113
Şekil 3.76 Kübik yarı mamulün perspektif görünüşü ve çember şekil değiştirme eğrileri.	113
Şekil 3.77 Silindirik yarı mamul ve çember şekil değiştirme çizgilerinin perspektif görünüşü.....	114
Şekil 3.78 Silindirik yarı mamulde düzlemsel gerçek şekil değiştirme bileşenleri.	114
Şekil 3.79 Konik yarı mamul ve tel kafes görünümlü çizgilerin değişimi.....	115
Şekil 3.80 Konik yarı mamul ve tutucu takıma ait üst görünüş.	117
Şekil 3.81 Konik yarı mamul ve dairesel tutucuya ait üst görünüş.....	117
Şekil 3.82 T-SIM yazılımıyla "çanak" adlı parça üzerinde farklı kesitlerde alınan ürün kalınlık dağılımları.	118
Şekil 3.83 % 5 karbon elyaf takviyeli PP levhadan ekstrüzyon yönünde alınan numunenin Gerilme-Genleme diyagramı.....	119
Şekil 3.84 % 5 karbon elyaf takviyeli PP levhadan ekstrüzyon yönüne dik alınan numunenin Gerilme-Genleme diyagramı.....	119
Şekil 3.85 % 15 karbon elyaf takviyeli PP levhadan ekstrüzyon yönünde alınan numunenin Gerilme-Genleme diyagramı.....	120
Şekil 3.86 % 15 karbon elyaf takviyeli PP levhadan ekstrüzyon yönüne dik alınan numunenin Gerilme-Genleme diyagramı.....	120

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Kaplumbağa kabuğundaki Keratin muhtemelen ısı ve basınç ile şekil verilen ilk malzemedir. Keratin ayrıca hayvan boynuzu ve toynağında bulunmaktadır. Bu malzeme, kaynar su veya yağ içerisine daldırılmak suretiyle yumuşatılabilir. Levha halindeki malzeme daha sonra insan eli yardımıyla malzemeye şeklini verecek kalıp üzerine bastırılır ve malzeme soğuyup katılaşıncaya kadar beklenir. Amerikan yerlileri benzer bir yöntem kullanarak ağaç kabuğunun temel bileşeni olan doğal selülozu ısı ve basınç kullanarak şekillendirmiştir. Doğal ve türetilen selüloziklerle 1800'lü yıllarda yapılan denemelere rağmen J.W. Hyatt, kendi deyimiyle selüloit'in (celluloid) diğer adıyla Kâfur kullanılarak elde edilen Selüloz Nitratin (camphor solvated cellulose nitrate) ticari potansiyelinin tanınmasını sağlayan ilk isim olmuştur. 19. Yüzyılda imal edilen birçok yarı sentetik plastik ürün, selüloit ve benzer kimyasal içeriğe sahip selefleri kullanılarak yumuşatılmış levhanın belirli bir form üzerine bastırılması ve soğuyana kadar beklenmesi esasına göre üretilmiştir. Bazı piyano tuşları, ahşap bloklar kullanılarak basınç etkisiyle bu yöntemle üretilmiştir [1, 2].

Modern ısı ile şekil verme prosesinin başlangıcı yaklaşık 70–75 yıl öncesine dayanmaktadır. İkinci dünya savaşının kısa süre öncesinde savaş süresince ve savaştan hemen sonraki süreçte yaşanan iki önemli gelişme modern ısı ile şekil verme prosesinin başlangıcını tayin etmiştir. Termoplastik reçine kimyasında yapılan araştırmalar esnek PVC (Polivinil klorür), CA (Selüloz asetat), ve PS (Polistiren) malzemelerin ekstrüzyon ile işlenmesine imkân tanımış bununla birlikte döküm PMMA (Polimetilmetakrilat) malzemenin gelişimi de sağlanmıştır. Vidalı ekstrüder ve rulo veya top halindeki plastik film malzeme beslemeli ısı ile şekil verme ünitesinin (Roll-Fed Thermoformer) icadı ile

sürekli şekil verme metodu hayata geçirilmiştir. Bahsedilen bu iki önemli atılım, savaş öncesi ülke içinde üretilen çeşitli ürünün özellikle ince cidarlı ambalajların geliştirilmesini sağlamıştır. Bu dönüm noktası üreticileri uçak tenteleri ve keşif kabartma haritaları gibi savaş ürünleri konusunda gelişmelere hazırlamıştır. Ambalaj endüstrisi 1940'ların sonlarında ısı ile şekil verme yöntemini (Thermoforming) temel proses olarak adapte etmiştir. Bu adaptasyon o denli gerçekleşmiştir ki; 1950'li yıllarda ısı ile şekil verilmiş ambalaj, ambalaj sektöründeki en önemli ilerleme olarak sayılmıştır. 1970'lerde ise gıdaların kolaylıkla ambalajlanması talebi, fırınlanabilir porsiyon servisler ve tek kullanımlık içecek kaplarının gelişimini beraberinde getirmiştir. Bu ambalajların üretimi PS köpük, CPET (Kristalin Polietilen Teraftalat) ve PP (Polipropilen) gibi malzemelerin basınçlı şekil verme prosesinde işlenmesini sağlamıştır. Duş kabinleri ve buzdolabı kapağı içinde bulunan rafların kalın cidarlı plastik levhalardan ısı ile şekil verme metodu kullanılarak üretimi bu süreçte gerçekleşmiştir. Zamanla mühendisler takviye edilmiş ve alev almayan plastik levhaları ısı ile şekil verme yöntemiyle şekillendirmiş ve elde edilen ürünler başta taşımacılık sektörü olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanım imkânı bulmuştur. Isı ile şekil verme prosesinin avantajları nedeniyle zamanla ambalaj kapakları ve kapları, gıda konservelerindeki kaynaklı çelik malzeme, kavanozlardaki cam, içecek şişeleri ve havacılık sektöründe kullanılan el yatırma yöntemiyle üretilen termoset kompozitler ısı ile şekil verme prosesiyle üretilen selefleriyle yer değiştirmişlerdir [1, 2]. Günümüzde otomobil gövde parçalarından blister ambalajlara kadar ısı ile şekil verme yöntemiyle birçok ürün üretilmektedir. Isı ile şekil verme yöntemiyle üretilen ürün pazarında endüstriyel ürünler daha ziyade uzun ömür beklentisiyle üretilmiş yapı-inşa ve taşımacılık sektörlerinde kullanılan ürünlerdir. Tek kullanımlık ürünler ise uzun ömür beklentisi ile imal edilmemiş ürünlerdir. Bunlara örnek olarak plastik tepsilere ve içecek kapları verilebilir. Ambalaj ürünleri ise büyük ve yüksek hacimli bir endüstriyi oluşturur. Bu endüstri üreticilere imal ettikleri ürünü sergilemeyi, ürünü korumayı ve ürün ömrünü uzatmayı sağlayan düşük maliyetli ambalaj ürünleri endüstrisidir [3]. Isı ile şekil verme prosesi selefindeki üretim yöntemlerine göre belirli avantajlar sunmaktadır. Şişirme kalıplama, enjeksiyon şişirme kalıplama, rotasyonel kalıplama, enjeksiyon kalıplama gibi üretim yöntemlerine nazaran, daha düşük şekil verme basınçları gereklidir, dolayısıyla kalıp maliyeti düşüktür. Oldukça geniş yüzey alanına

sahip büyük parçalar seri üretimde ekonomik olarak üretilebilir. Bu üretim yöntemiyle yüzey alanı-cidar kalınlığı oranı çok düşük parçaların imalatı da mümkündür. İnce cidar kalınlığına sahip parçalar oldukça kısa çevrim sürelerinde üretilebilir. Kalıplar düşük basınç altında çalıştığından dolayı daha ekonomik malzemelerden imal edilebilir. Buda ısı ile şekil verme prosesini ekonomik kılan etmenlerden biridir. Tüm bu avantajlar göz önüne alındığında ısı ile şekil verme (Thermoforming) metodu kullanılarak, diğer imalat yöntemleri ile üretimi ekonomik olmayan parçaların prototip imalatı da gerçekleştirilmektedir [2]. Isıl şekil verme prosesi, şekil verilecek levhanın sıkı ve rijit bir şekilde sabitlenmesi, ısıtma, şekil verme, soğutma ve fazlalıkların parçadan kesilerek atılması aşamalarından ibarettir. Isıl şekil verme prosesinde kullanılan levhalar kalınlıklarına göre iki ana gruba ayrılır. Eğer kullanılan levhanın kalınlığı 0.25 mm (0.01 in)'den az ise ince cidarlı (thin-gage), 0.25 mm (0.01 in)'den fazla ise kalın cidarlı (thick-gage) olarak adlandırılır. Kalın cidarlı levha da cidar kalınlığına göre iki şekilde isimlendirilir. Eğer levha kalınlığı 0.25 mm (0.01 in) ile 1.5 mm (0.06 in) arasında ise kullanılan levha orta kalınlıkta (medium-weight) levha, 1.5 mm (0.06 in)'den büyükse çok kalın (heavy-gage) levha olarak adlandırılır. İnce cidarlı levhalar genellikle makaralara veya rulolara sarılı olarak bulunur ve şekil verme ünitesine bu şekilde besleme yapılır. Bu üretim yönteminde kullanılan şekil verme ünitesine sürekli levha şekil verme ünitesi (continuous sheet former) adı verilir. Bunun aksine kalın cidarlı levhalar belirli boyutlarda kesilir, üst üste istifleme yapılarak dizilir ve bu şekilde şekil verme ünitesine besleme yapılır. Bu halde kullanılan şekil verme ünitesine veya prese tek levha şekil verme ünitesi (cut sheet former) adı verilmektedir [4].

Ambalaj, tüketici talebi doğrultusunda üretilen ürünlerin sürdürülebilir şekilde sarılmasını, taşınmasını, stoklanmasını, saklanmasını ve görsel olarak pazarlanmasını sağlayan bir unsur olarak tanımlanmaktadır. Ambalaj tüm sektörlerde üretilen ürünlerin ihtiyaç duyduğu bir gereksinim olmakla birlikte genel endüstriyel pazarlama alanında lokomotif görevini üstlenmiştir. Dünyada kişi başına ambalaj tüketimi ve ambalaj sektörünün gelişmişliği ekonomik yaşam standardının bir göstergesidir. Ülkemizde Ambalaj Sanayicileri Derneği 2012 yılı faaliyet raporu irdelendiğinde sektörde kullanılan plastik malzemelerin ülke bazında çoğunluğu teşkil ettiği görülmektedir. Plastik esaslı ambalaj malzemelerinin büyük bir kısmının da vakum ve ısı ile şekil verme prosesi ile üretildiği göz önüne alınırsa prosesin sektördeki önemi vurgulanmış

olur [5, 6]. 2011 yılında BCC Research Company verilerine göre küresel termoform edilmiş plastik ürün miktarı 3.1 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Termoform edilmiş plastik malzeme miktarının 2012 yılından 2017 yılına kadar 3.2 milyon ton'dan 3.85 milyon ton'a ulaşması beklenmektedir. Bu artış % 4'lük karma yıllık artış oranına (CAGR-compound annual growth rate) karşılık gelmektedir. Küresel vakum ve ısı ile şekil verilmiş plastik malzeme pazarının büyük bir kısmını ambalaj sanayi ürünleri teşkil etmektedir. Bu oran toplam vakum ve ısı ile şekil verilmiş plastik malzeme miktarının % 80'lik kısmını oluşturmaktadır [7]. Küresel pazarda ambalaj sanayi ürünleri 2011 yılında 2.2 milyon ton, 2012 yılında 2.25 milyon ton olarak gerçekleşmiş 2017 yılında ise tahmini % 4'lük karma yıllık büyüme oranı ile 2.75 milyon ton olarak öngörülmektedir [7].

Literatürde vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle ilgili birçok çalışma yer almaktadır. Prosesin yakın geçmişteki gelişimiyle ilgili; Throne ve Mooney [8], Kuzey Amerika'daki vakum ve ısı ile şekil verme sektörü üzerine araştırmaya dayalı bir çalışma ortaya koymuş, firmalar ve sektörün gelişiminin dünya pazarıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin yıllık büyüme hızının Kuzey Amerika'da dünyadaki plastik endüstrisinin yıllık büyüme hızından daha fazla olduğunu belirtmiştir. Ek olarak, vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde malzeme seçimi, yöntem içerisindeki kalıpların imal edilmesi, kalıplar ve şekil verilen malzeme arasındaki sürtünme koşulları, yarı şekillenmiş malzemeden istenmeyen kısımların kesilip atılmasıyla ilgili uygulanan prosesler ve polimer levhanın ısıtılması ile ilgili çeşitli çalışmalarda literatürde kendine yer bulmuştur. Bu konularda; Engelmann ve Schubert [9], ultrasonik ses dalgalarını kullanarak yeni bir baskı ve kesici çapak alma aparatı geliştirmiştir. Bu aparat normalde 1 ile 1.5 saniye olan çapak alma süresini 200 ms ile 500 ms arasında değişen değerlerde azaltmıştır. Çalışmada 1810 mm uzunluğunda 450 µm kalınlığında A-PET malzeme kullanılmış ve kesme için gerekli yük 20.7 ton'dan 1.2 ton'a kadar düşürülmüştür. Hegemann ve diğerleri [10], yaptıkları deneysel çalışma içerisinde amorf bir malzeme olan HIPS (1 mm kalınlık, Ø=25 mm dairesel levha, $T_g=95$ °C) ve yarı kristalin bir malzeme olan HDPE (1 mm kalınlık, Ø=25 mm dairesel levha, $T_m=136$ °C) kullanmış ve bu malzemelerin, vakum ve ısı ile şekil verme prosesi yardımıyla çelikten ve sentetik köpük malzemeden (HYTAC B1X) yapılmış takoz malzemeleriyle etkileşimini incelemiştir. Mevcut malzemeler ile çelik

ve sentetik köpük malzemedan yapılmış takoz arasındaki sürtünme katsayısını dinamik ve statik olarak tespit eden Hegemann ve diğerleri [10], her iki malzeme için farklı sıcaklıklarda sürtünme katsayısının değişimini ortaya koymuştur. Çelik ve HDPE arasında farklı sıcaklıklarda tespit edilen statik sürtünme katsayısı tüm test sıcaklıklarında dinamik sürtünme katsayısından büyük değerler almakla birlikte, sıcaklığın artmasıyla artmıştır. HIPS ve Hytac B1X arasında farklı sıcaklıklarda tespit edilen statik sürtünme katsayısı ise yine tüm test sıcaklıklarında dinamik sürtünme katsayısından büyük değerler almış ve artan sıcaklıkla birlikte aynı yönde değişim göstermiştir. Howery [11], yaptığı çalışmada vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde kullanılan malzemelerin seçiminde dikkat edilmesi gereken hususları ortaya koymuştur. Çalışma içerisinde malzeme seçiminden önce, gereksinimlerin açık bir şekilde tanımlanması gerektiği, fiyat ve maliyet, işlenebilirlik, özellikler göz önüne alınarak malzeme seçiminde verimli olunabileceği ortaya konmuştur. Tabrizi [12], vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde üretilen ürün içerisinde oluşan artık gerilmelerin azaltılması ve parçadaki cidar kalınlığı dağılımının daha üniform hale getirilmesi için farklı soğutma oranlarına sahip iki bölmeli bir kalıp tasarlamış, imal etmiş ve sonuçları ortaya koymuştur. Deneysel çalışma içerisinde PS ve PVC termoplastik levha malzemeler kullanılmıştır. Farklı soğutma oranlarına sahip iki bölmeli kalıpta her malzeme için üç ayrı deney gerçekleştirilmiş ürün kalınlık dağılımı ve artık gerilmelerin değişimi araştırılmıştır. Oluşan ürünlerdeki artık gerilmeler bir polariskop yardımıyla göz ile muayene edilerek gerçekleştirilmiştir. Farklı soğuma oranlarına sahip iki bölmeli kalıpta üretilen ürünlerdeki artık gerilmelerin bilindik yöntemle üretilen seleflerine nazaran oldukça azaldığı gözlemlenmiş ancak ürün kalınlık dağılımının çok fazla değişim göstermediği belirtilmiştir. Oliver [13], vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde kullanılan kalıp malzemelerinden olan alüminyum, ahşap ve epoksi (termoset) malzemelerin karşılaştırmalı incelemesini gerçekleştirmiştir. Karşılaştırma sonrasında söz konusu kalıp malzemeleri için avantaj ve dezavantajlar belirtilmiştir. Birçok konuda karşılaştırma yapılan çalışmada karşılaştırma konuları, aşınma direnci, basma dayanımı, yeterli tokluk değeri, korozyon direnci, termal iletkenlik, boyutsal kararlılık, kalıp malzemesinin kolay bulunabilirliği ve ekonomik olması, talaşlı şekil verme yöntemiyle işlenebilme kolaylığı gibi birçok parametre incelenmiştir. Morales ve Santana [14], mühendislik plastiklerinden biri olan PP malzemesini vakum ve ısı ile şekil verme

prosesinde kullanmıştır. Morales ve Santana [14], PP malzeme için ASTM D 638 TYPE IV çekme test numuneleri hazırlayarak tek eksenli ve iki eksenli şekil değişiminin karakterizasyonu üzerine çalışmıştır. Deneysel çalışmanın yanında, kullanılan “DGDZ” modeli ile de PP malzemenin teorik olarak gerçek gerilme-genleme karakteristiği araştırılmıştır. Öncelikle $T=80^{\circ}\text{C}$, $V=10$ mm/dak giriş değerleri kullanılarak tek eksenli çekme deneyi sonrasında, DGDZ modelinin gerçek gerilme-genleme eğrisinin, elde edilen eğriyle hemen hemen aynı olduğu gözlemlenmiştir. Farklı yükleme hızları ve farklı sıcaklıklar için eksenel çekme deneyleri gerçekleştirilmiş, DGDZ modelinin ortaya koyduğu gerçek gerilme-genleme eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Farklı şekil değiştirme oranları ve $T=80^{\circ}\text{C}$ için yapılan çekme deneyleri göstermiştir ki farklı şekil değiştirme hızları malzemenin kuvvet-şekil değiştirme davranışına etki etmektedir. Gauthier ve diğerleri [15], ısıtılan levha ile ısıtıcı arasındaki tüm enerji geçişinin yalnızca % 95’inin ışınlama ile gerçekleştiğini % 5’lik kısmın ise doğal taşınım ve doğal iletim yoluyla kayıp olduğunu ve % 5’lik kaybın bir kısmının da levha tarafından absorbe edilen enerjiden kaynaklandığını belirtmiştir. Literatürdeki geliştirilmiş modele ek olarak, Gauthier ve diğerleri [15], absorpsiyon terimlerini de ilave etmişlerdir. Deneysel çalışma için HDPE levhalar kullanılmış ve bu levhalarda, levha kalınlığı boyunca muhtelif noktalara sıcaklık tespiti için termoelemanlar yerleştirilmiştir. Bir ısıtma fırını içine yerleştirilen levhalardan $280-320$ ve 420°C sıcaklıklarında levha yüzeyi referans alınarak 3 mm ve 9 mm derinlikteki termoelemanlardan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Daha sonra yeni geliştirilen modele göre mevcut noktalarda sıcaklık değerleri belirlenmiş ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbiri ile örtüştüğü tespit edilmiştir.

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle üretilen ürünlerin bazı desen ve görünümde olması istenebilir. Farklı görünüm ve desenlere sahip vakum ve ısı ile şekil verilmiş ürünlerin imalatı ile ilgili; Haberstroh ve Ederleh [16], IMG (In-Mold-Graining) şekil verme metodu üzerine deneysel bir çalışma ortaya koymuştur. Taneli görümlü yüzeye sahip olan bir otomobil iç aksam parçası üretmenin vakum ve ısı ile şekil verme süreciyle oldukça zor bir parametre olduğu ortaya konmuştur. Bilindik metot içerisinde taneli görünüm, parçaya plastik ekstrüzyon ile üretimi esnasında verilmekte olup belirli boyutlarda kesilen levha yâda film malzemeye sonrasında vakum ve ısı ile şekil verme metoduyla nihai şekli kazandırılmaktadır. Fakat bu üretim yöntemi

iki aşamalı bir prosesi gerektirmektedir. Bununla birlikte vakum ve ısı ile şekil verme kalıplarında yerel olarak farklı gerdirm oranlarının oluşması kalıptan çıkan parça yüzeyindeki taneli görünümün bozulmasına neden olmaktadır. Üretilmek istenen bir otomobil iç aksam parçasına tek aşamalı olarak taneli görünüm kazandırma Haberstroh ve Ederleh [16], tarafından IMG yöntemi ile denenmiştir. Ancak IMG yöntemi sonrasında çok katmanlı ve taneli görünüme sahip parçaların oluşturulabilmesi için, parçada oluşan lokal basınç ve sıcaklık değerlerinin kontrol altında tutulması gerektiği ortaya konmuştur. Dolayısı ile HEIZEN adlı bir yazılım tarafından üç katmanlı bir yarı mamulün şekil verme sıcaklığında katmanlar arası sıcaklık dağılımı incelenmiş ve lokal basınç değerleri silikon membran bir basınç ölçer tarafından tespit edilmiştir. Peng ve diğerleri [17], 0.125 mm kalınlığındaki PC (Polikarbonat) film malzemeyi kullanarak ön şekil verme aparatının kullanıldığı vakum ve ısı ile şekil verme operasyonunu farklı proses parametreleri ile gerçekleştirmiştir. Çalışmada bardağa benzeyen bir parça kullanılmıştır. Ürün üzerinde alınan kesitlerde cidar kalınlığı dağılımı tespit edilmiştir. Film malzemenin ısıtılma sıcaklığı, ön şekil verme aparatının dışı kalıp içerisinde düşeydeki hareketi, ön şekil verme aparatının hızı, ön şekil verme aparatının levhaya temas ettiği süre çok aşamalı ön şekil verme gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Peng ve diğerleri [17], çekme derinliği arttıkça parçada büzülme ve katlanmaların başladığını, bunun aşılabilmesi için çok aşamalı vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin kullanılması gerektiğini belirtmiştir. Malkani ve diğerleri [18], üç ayrı termoplastik poliolefin malzemeyi kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesi ile şekillendirmiştir. Termoplastik poliolefin malzemelerin tümü % 30 oranında PP, % 48 oranında α -olefin içermektedir. Farklı olarak bir malzeme TPV (Santoprene) diğer iki malzeme ise % 20 ionomer (Surlyn 9520), % 20 ionomer (Surlyn 8528) ve % 2 reaktif polimer (Elvaloy) içermektedir. Malkani ve diğerleri [18], kübik ve silindirik iki ayrı kalıbı kullanarak yalnızca vakum, yalnızca hava basıncı etkisiyle, ön şekil verme aparatı kullanarak, vakum ile ön şekil verme aparatı kullanarak, pozitif hava basıncı ile ön şekil verme aparatı kullanarak söz konusu üç ayrı malzeme için şekil verme operasyonunu gerçekleştirmiştir. Yapılan mevcut deneysel çalışmanın sonucunda üç ayrı malzeme için şekil verme sıcaklık aralığı belirlenmiştir. Aynı zamanda hangi şekil verme operasyonuyla daha düzgün ürün cidar kalınlık dağılımı elde edildiği mevcut ürünler üzerinden alınan kesitlerdeki cidar kalınlıklarının tespiti ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç

olarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde şekil verme sürecini oluşturan metod ürün cidar kalınlığını belirleyen başlıca etmenlerden biri olmuştur. Cleir [19], enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş 235 ml hacmindeki PP kap ile vakum ve ısı ile şekil verme yöntemiyle üretilmiş aynı hacimli PP kap için bir çok deney sonucunda karşılaştırma yapmış ve hangi üretim yönteminin hangi test için daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Enjeksiyon kalıplamadan vakum ve ısı ile şekil verme metoduna geçişte iki farklı patent incelenerek bir dizi tahribatlı ve tahribatsız test numunelere uygulanmıştır. ASTM D-4169 uyarınca gerçekleştirilen deneyler sonrasında vakum ve ısı ile şekil verme metoduyla üretilen ve enjeksiyon kalıplamayla üretilen selefinden % 27 daha hafif olan PP kap, düşey yönde selefiyle aynı basıncı taşıyabileceğini göstermiştir. Ancak aynı PP kap ışık geçirgenliği, sıcaklık değişiminde şeklini koruyabilme gibi testlerde enjeksiyonla üretilen selefinin gerisinde kalmıştır.

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde kullanılan kalıp tertibatları üretilmek istenen ürünün karmaşıklığına göre değişmektedir. Bazı durumlarda, uygun sıcaklıktaki polimer levhaya ön şişirme veya vakum uygulanmadan bir aparat tarafından (erkek kalıp) ön şekil verme uygulanır. Bu proses ile ilgili; Harter ve Fritz [20], ön şekil verme aparatı kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesi içerisinde yer alan parametrelerin değişiminin ürün cidar kalınlığı üzerine etkisini araştırmıştır. Ön şekil verme aparatı (Takoz) malzemesi olarak dört farklı malzeme kullanılmış, bu takozlar sentetik köpük ve termoplastik malzemeden imal edilmiştir. Şekil verilen levha malzemesi olarak da PP, PS, APET malzemeler kullanılmıştır. Her levhanın farklı malzemeden imal edilmiş takoz elemanı ile etkileşimi ayrı ayrı incelenmiştir. APET ve sentetik köpük takoz ile yapılan deneysel çalışmada çekme derinliğinin değişimi cidar kalınlığını azaltmış, sıcaklık artırılınca nihai cidar kalınlığında hafif bir artış gözlenmiş, takozun şekli ve hızı değiştirildiğinde levha cidar kalınlığında belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir. PP levha ve sentetik köpük takoz kullanılarak yapılan deneysel çalışmada çekme derinliği artınca nihai ürün cidar kalınlığı azalmış, sıcaklık artırıldığında da cidar kalınlığı azalmış, takoz hızının artırılması, ürün nihai cidar kalınlığını takoz çapının düşürülmesi sonrasındakinden daha fazla azaltmıştır. PS levha ve sentetik köpük takoz arasındaki etkileşim incelendiğinde ise, ürün nihai kalınlığının daha çok sıcaklıkla değiştiği tespit edilmiştir. Sıcaklık artınca ürün kalınlığı azalmakta ve takoz hızı artarsa kalınlık yine azalmaktadır. Martin ve diğerleri [21], vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde, levha

malzemesi, takoz malzemesi ve takoz sıcaklığını değiştirerek ürünün cidar kalınlığı dağılımını üzerine etkisini araştırmıştır. Levha malzemesi olarak 0.8 mm kalınlığında HIPS ve 0.5 mm kalınlığında APET kullanılmıştır. Takoz malzemesi olarak Hytac B1X, Hytac WFT, HS Blue Nylon, POM-C ticari ön adlı malzemeler kullanılmıştır. Deneysel çalışma içerisinde APET levhalar oda sıcaklığındaki farklı takoz malzemeleriyle ön şekillendirilmiş, oluşan ürün cidar kalınlığı dağılımını belirlenmiştir. Sonrasında 62.5 °C ve 100 °C sıcaklığındaki, farklı malzemelerden imal edilmiş takozlarla tekrar vakum ve ısı ile şekil verme işlemi gerçekleştirilmiş, oluşan ürünlerin nihai cidar kalınlık dağılımını belirlenmiştir. Ancak sonuçlar göstermektedir ki, sıcaklık arttığında takoz malzemesi ile levha arasındaki sirtünme kuvveti de artmaktadır. Çünkü takozun levhaya ilk temas ettiği yüzeyde kalınlık değerleri artan sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Sıcaklıkla artan sirtünme katsayısı levhanın takoz yüzeyinden kaymasını engelleyerek, şekil değiştirmesine engel olmaktadır. Dolayısıyla oluşan ön şekil verilmiş yarı mamullerden en kalın tabana sentetik köpük takoz malzemesiyle yapılan 100 °C'deki deneyde ulaşılmıştır. Sentetik köpük malzemeler (Hytac B1X, Hytac WFT) diğer takoz malzemelerine nazaran düşük sıcaklıklarda daha düşük, yüksek sıcaklıklarda ise daha yüksek sirtünme direnci göstermektedir. Duarte ve Covas [22], 0.8 mm kalınlığında PS ve HIPS film malzemeleri kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle, ön şekil verme aparatı yani takoz geometrisinin lokal ürün cidar kalınlığı dağılımını üzerine etkisini araştırmıştır. Deneysel çalışma içerisinde ön şekil verme aparatı sıcaklığı 120 °C, hızı 150 mm/s olarak belirlenmiş kalıp sıcaklığı ise oda sıcaklığı (20 °C) olarak seçilmiştir. şekil verme işlemlerinde vakum değerinin maksimum -0.7 bar olduğu verilen sonuçlar arasındadır. Üç farklı geometride ön şekil verme aparatı tasarlanmış, imal edilmiş ve bu takozlar kullanılarak üretilen ürünlerin nihai cidar kalınlık dağılımları ortaya konmuştur. Takoz geometrileri silindirik, konik ve birden fazla farklı çaptaki silindirik millerden oluşan kademeli takoz geometrileridir. Çok kademeli piston geometrili takozla şekil verilen ürünlerde daha homojen bir kalınlık dağılımının elde edilmesi hedeflenmiştir. Ancak farklı çaptaki her kademenin düşeyde aldığı mesafe cidar kalınlık dağılımını farklı oranlarda etkilemektedir. Deneysel sonuçlar, T-SIM simülasyon yazılımıyla elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. şekil verilen film malzemeler, K-BKZ malzeme modeli uyarınca Wagner sönümlenme fonksiyonunu içeren viskoelastik bir membran olarak kabul edilmiştir. Deneysel olarak ve simülasyon

sonucu elde edilen kalınlık dağılımlarının birbiri ile uyum sağladığı gözlemlenen sonuçlar arasındadır. Hosseini ve diğerleri [23], vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde, ön şekil verme takozunun, uygun sıcaklıktaki polimer levhaya şekil verebilmesi için gerekli minimum kuvvetin değerini teorik olarak bulmuştur. Günümüz vakum ve ısı ile şekil verme ünitelerinde pratik olarak ayarlanabilen bir değer olsa da kullanılan mühendislik plastiklerinin gelişimi, ön şekil verme takozunun geometrisini, hızını ve takoza uygulanması gereken kuvveti önemli kılmaktadır. Dees [24], vakum ve ısı ile şekil verme prosesi ile üretilen bir ürünün son cidar kalınlığına etki eden unsurların belirlenmesi üzerine çalışmıştır. Ön şekil verme aparatı kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin simülasyonu gerçekleştirilmiş, takozun kalıp içerisindeki derinliğinin değişimi, takozun kalıp içerisine maksimum dalma derinliği ve takozun sahip olduğu yarıçap değeri değişiminin ürün cidar kalınlığı üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada ürün cidar kalınlığına etki eden önemli parametreler üç kısımda toplanmıştır. İlk takoz ile plastik malzeme arasındaki sürtünme katsayısı incelenmiş, farklı sürtünme katsayıları kullanılarak mevcut kalıp geometrisi için simülasyon yapılmış ve elde edilen cidar kalınlığı değerleri gerçek değerler ile karşılaştırılmıştır. Birbirine en yakın değerler takoz malzemesi ile plastik malzeme arasındaki sürtünme katsayısının 1.5 olduğu durum olarak belirlenmiştir. Sonrasında takoz ile kalıp arasındaki boşluk için üç farklı değer belirlenmiş ve bu değerlere göre simülasyon yapılmıştır. En uygun değer olarak 3 mm değeri seçilmiştir. Takozun kalıp içerisine maksimum dalma derinliği olarak 50-55-60 mm gibi üç farklı değer seçilerek her durum için takozun sahip olduğu üç farklı yarıçapta (12-18-24 mm) simülasyon yapılmıştır. En uygun dalma derinliği 55 mm ve en uygun yarıçap değeri 18 mm olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara simülasyon sonrasında elde edilen en uygun cidar kalınlığı dağılımına bakılarak varılmıştır. Başlangıçta oluşan ürünün en ince kesitindeki kalınlık, 0.124 mm iken optimizasyon sonrasında ürünün en zayıf kesitindeki minimum kalınlık 0.216 mm olmuştur. Tulsian ve diğerleri [25], vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde T-SIM gerçekleştirme yazılımıyla hesaplamalar yapmıştır. Bir üründen alınan cidar kalınlığı dağılımı referans alınarak bu işlemin T-SIM ile simülasyonu yapılmış ve aynı cidar kalınlık dağılımı elde edilene kadar takoz malzemesi ile levha arasındaki sürtünme katsayısı değiştirilmiştir. Gerçek sonuçlar ile simülasyondan elde edilen ürün kalınlık dağılımı ifadesi birbirine en yakın olduğu konumda sürtünme katsayısı değerleri

kaydedilmiştir. Harron ve diğerleri [26], 1.45 mm kalınlığa sahip Appryl 3030 BT1 PP film malzemeyi kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesini gerçekleştirmiştir. Prosesin optimizasyonu için ön şekil verme aparatına, ön şekil verme sürecinde ortaya çıkan kuvvet-zaman profilini belirleyen bir kuvvet algılayıcı sensör yerleştirilmiştir. Deneysel çalışma içinde laboratuvar ölçeğinde çalışan bir ön şekil verme aparatlı vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi kullanılmıştır. Şekil verilen her levha 150x150 mm² ebadında kesilerek önce konveksiyon ısıtma fırınında belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılmış sonrasında mekanik olarak şekil verme ünitesine alınmıştır. Şekil verme öncesinde levha sıcaklığı tespit edilmiş ve takozun kaydettiği kuvvet değerleri zamana bağlı olarak belirlenmiştir. Levha sıcaklığının artırılması takoz vasıtasıyla kaydedilen kuvvet değerlerinin oldukça düşmesine neden olmuştur. Öyle ki; levha sıcaklığında 2-4 °C'lık bir artış ölçülen kuvvet değerininin 100 N azalmasıyla sonuçlanmıştır. Takoz şekli olarak küt burunlu keskin köşeli bir geometri ile balistik mermi formunda radüslü diğer bir geometri sınanmıştır. Küt burunlu takoz ile yapılan deneylerde çekme kuvvetinin daha yüksek olduğu, nedeninin ise balistik mermi formundaki takozu nazaran daha fazla malzeme ile temasta olduğu ve bu bölgede ısı geçişini artırarak katılaştırdığı söylenmiştir. Takoz hızı arttıkça takozun geometrisi fark etmeksizin çekme kuvvetinin arttığı belirtilmiştir. Collins ve diğerleri [27], vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde, ön şekil verme aparatı ile şekil verilen polimer levha arasındaki ve polimer levha ile dışı kalıp yüzeyi arasındaki ısı geçişinin proses işleyişi üzerine etkilerini araştırmıştır. Bunun için üç farklı kalınlıktaki levha üzerinde öncelikle takoz malzemesinin teması sonrasında ısı geçişi incelenmiş ve sonrasında polimer levha ile dışı kalıp yüzeyine teması esnasındaki ısı geçişi belirlenmiştir. Bunun için ABAQUS yazılımı kullanılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Başlangıçta ısıtılan farklı kalınlıktaki levhalar ile takoz malzemesi arasındaki etkileşim incelenmiştir. Levha kalınlığı arttıkça, takoz malzemesi ile temas ettikten sonra levhanın kaybettiği ısı akısı da artmaktadır. Levha kalınlığı azaldıkça ısı gradyanı küçülmektedir. Çalışmanın sonunda ise ısı transferini içinde barındıran model ile izotermal model kullanılarak yapılan simülasyon sonuçlarından elde edilen nihai ürün cidar kalınlıkları karşılaştırılmıştır. Isı geçişini simülasyon sürecine dahil eden modelin, deneysel verilere en yakın cidar kalınlığı sonuçlarını ortaya koyduğu benimsenmiştir.

Tüm bu çalışmaların yanında vakum ve ısı ile şekil verilen ürünün ve kalıp tertibatının tasarımı da büyük önem taşımaktadır. Literatürde; Karjust ve diğerleri [28], vakum ve ısı ile şekil verme sürecinin emek yoğun bir periyot olması nedeniyle yapay sinir ağları kullanarak üretim sürecinin optimizasyonu üzerine çalışmıştır. Vakum ve ısı ile şekil verme prosesini etkileyen parametreler; mühendislerin bilgi ve tecrübesi, son parçanın sahip olduğu geometrik karmaşıklık, çekme derinliği, parçanın yüzey detaylarının zorluğu, tasarımla ilgili destek, yarıçap yüzeyler ve gerilme yığılımları olarak verilmiştir. Vakum ve ısı ile şekil verme sürecinde parça cidar kalınlığını etkileyen faktörler, levha özellikleri, fazla nemin şekil verme öncesinde parçadan ön ısıtma ile alınması, homojen ısıtma olarak verilmiştir. Unwin ve diğerleri [29], vakum ve ısı ile şekil verme yöntemiyle üretilen ince cidarlı Polistiren ürünlerin tasarımını optimize eden bir CAD yazılımının doğruluğunu belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma ortaya koymuştur. Deneysel çalışma içerisinde polistiren malzemenin vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi içerisindeki davranışı K-BKZ malzeme modeliyle tanımlanmıştır. Bu model içerisindeki elastik sabitlerin tespiti için de bir dizi tek eksenli, düzlemsel gerdirme ve çekme deneyleri yapılmıştır. Bu tahribatlı malzeme testlerinden sonra ince cidarlı polistiren ürünlerin davranışı incelenmiş K-BKZ modeli kullanılarak vakum ve ısı ile şekil verme süreci içerisindeki davranışıyla karşılaştırılmıştır. Morales ve Candal [30], bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli mühendislik yazılımlarının vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle üretilen ürün ve bu proseste kullanılan kalıpların tasarım ve imalatında kullanımının oldukça etkin olduğunu ortaya koymuştur. Bu yolla üretim öncesinde ve sonrasında gerek ürün gerekse kalıplarda yerinde değişikliklerin yapılması mümkün olabilmektedir. Bu yazılımların kullanımının, para ve zamandan kazandırırken daha düzgün dağılımlı bir ürün cidar kalınlığı yakalanmasını mümkün kıldığı belirtilmiştir. Throne [31], vakum ve ısı ile şekil verme üretim yönteminde en önemli karakteristikleri belirlerken bunlardan ilkinin bir ürünün oluşabilmesi için gerekli çevrim zamanı olduğunu belirtmiştir. Çevrim zamanını tayin eden ön önemli parametre ise levhanın ısıtılması olarak tespit edilmiştir. Özellikle kalın levhaların vakum ve ısı ile şekil verme operasyonlarında ön ısıtma ve soğutma işlemlerinin çevrim zamanını büyük ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Isıtma fırını içerisinde levhaya ısı geçişinin büyük ölçüde ışıma yoluyla olduğu buna ek olarak iletim ve taşınım yoluyla ısı geçişinin yardımcı pozisyonda işlev gördüğü ifade

edilmiştir. Buna ek olarak bir fırın içerisindeki ısıtıcı elemanların dizilişi söz gelimi yapılmış ve buna göre levha üzerindeki ısı enerjisi profili diyagram vasıtasıyla gösterilmiştir. Levhaya geçen ısı miktarı ve ısıtma soğutma zamanını gerçek değerlere çok yakın sonuçlarla ortaya koyan bilgisayar yazılımlarının kullanımından bahsedilmiştir. Devamında vakum ve ısı ile şekil verme operasyonlarında en önemli değişken, oluşan ürünün homojen bir cidar kalınlık dağılımına sahip olabilmesidir. Bunun sağlanabilmesi için günümüzde birçok Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) yazılımının kullanıldığı ve nümerik birçok ifadenin, deneysel şekil değiştirme davranışlarından elde edilen veriler ışığında modifiye edilerek gerçeğe çok yakın sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Bir diğer önemli konu ise vakum ve ısı ile şekil verilen ürünün kalıptan çıktıktan sonra şeklinin koruyabilmesidir. Ancak soğuma hızı ve dış etkenler nedeniyle ürün büzülme ve çarpılma etkisindedir. Bu konuda; Xu ve diğerleri [32], Luran S(BASF Plastics), Cypolac GPX3700 gibi iki farklı termoplastik malzemeyi vakum ve ısı ile şekillendirmiştir. Erkek ve dişi kalıp, malzeme ve şekil verme süreci bilgisayar destekli tasarım yazılımı olan SolidWorks kullanılarak parametrik olarak modellenmiş, FEM yazılımı olan Abaqus ve T-SIM kullanılarak parçanın boyutlarındaki büzülme, gerilme dağılımı, ürün cidar kalınlık dağılımı analizleri yapılmıştır. Vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle elde edilen bir parçada meydana gelen büzülme miktarının, kalıp içerisindeki soğutucu akışkan sıcaklığına ve polimer levhayı ısıtan fırın içerisindeki koşullara bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar arasında önemli yer tutan diğer bir konu, vakum ve ısı ile şekil verme sürecinde kullanılan malzemelerin karakterizasyonudur. Bu konuda; Martin ve diğerleri [33], düzlemsel karakterizasyon deneylerinden sonra, farklı polimer malzemelerin iki eksenli yükleme etkisi altında farklı davranış gösterdiğini kaydetmiştir. Kaydedilen bu davranışların büyük oranda genleme oranı, sıcaklık ve deformasyon türü veya modu ile alakalı olduğu belirtilmiştir. İncelenen malzemeler PP, aPET, HIPS olarak verilmekle beraber; PP malzemenin düzlemsel şekil değiştirme davranışı incelendiğinde diğer malzemelere oranla aynı genleme değerinde en yüksek gerilmenin olduğu malzeme olarak verilmiştir. Belirgin akma olayının gözlemlendiği tek polimer olduğu belirtilmiştir. aPET malzemenin, gerilme-genleme davranışı incelendiğinde, diğer malzemelere nazaran artan şekil değiştirme miktarıyla,

pekleşmenin (Strain hardening) gözlemlendiği tek polimer olduğu tespit edilmiştir. HIPS polimer malzemenin diğer iki polimer ile karşılaştırıldığında şekil verilmesi en kolay malzeme olduğu, Gerilme-Genleme davranışı incelendiğinde, aynı genleme değeri için diğer iki polimere göre en düşük gerilme değerine sahip malzeme olduğu ortaya konan sonuçlar arasındadır. Tan ve diğerleri [34], PET, PS, PP, LDPE gibi hem amorf hem de yarı kristalin yapıdaki termoplastikleri kullanarak, üç ayrı gerdirme türü belirlemiş ve bu malzemelerin şekil değiştirme davranışını deneysel olarak karakterize etmiştir. Bu çalışma için termoplastik levhaların düzlemsel şekil değişimini gerçekleyen bir test cihazı kullanılmıştır. 76x76 mm² boyutlarında plastik ekstrüzyonla üretilmiş levhalardan kesilen deney numuneleri üç ayrı gerdirme moduyla test cihazında denenmiş ve farklı genleme oranlarında şekil değişim karakteristikleri incelenmiştir. Üç gerdirme modu; aynı anda hem enine hem de boyuna gerdirme, sadece boyuna gerdirme ve sıra ile önce enine sonra boyuna gerdirme olarak belirtilmiştir. Bu verilerden sonra sonuç olarak; PET, HIPS, PP ve LDPE malzemenin şekil değiştirme davranışının genleme oranına, sıcaklığa ve şekil değiştirme moduna büyük oranda bağlı olduğu belirtilmiştir. Martin ve diğerleri [35], vakum ve ısı ile şekil verme prosesi ile şişirme kalıplama üretim yönteminde kullanılan malzemelerin şekil değiştirme esnasındaki davranışını en iyi ortaya koyabilecek malzeme modelini belirlemek için çok eksenli şekil değiştirme operasyonları gerçekleştirmiştir. Söz konusu üretim yöntemiyle şekillendirilen malzemelerin belirli malzeme modelleri ile ifade edilebilmesi için genellikle şekil verme sıcaklığında malzemelere tek eksenli çekme deneyi uygulanmaktadır. Ancak gerçek şekil verme operasyonunda ön şekil verme aparatının hızı 0.5 m/s olmakla birlikte, tek eksenli çekme cihazlarındaki şekil değiştirme oranı 0.02 m/s'dir. Dolayısıyla malzemelerin şekil verme operasyonu sırasındaki davranışı bilindik tek eksenli çekme deneyleri ile tam olarak belirlenememektedir. Mevcut deneysel çalışmada Queen's University of Belfast laboratuvarında kullanılan çok eksenli malzeme karakterizasyonu test cihazına yer verilmiştir. Bu cihazın numuneleri 650 °C'ye kadar ısıtabildiği, 1.2 m/s şekil değiştirme hızıyla deforme edebildiği ve en fazla 2 mm kalınlığında numunelerle çalışabilir olduğu belirtilmiştir. Deneysel çalışma öncesinde şekil değiştirecek malzeme üzerine kare çerçeveler çizilmiş ve işlem sonrasında belirli kalıp geometrisi için hangi bölgelerde hangi şekil değişimi modu görüldüğü tanımlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan malzeme için hem tek eksenli

çekme deneyi uygulanmış hem de çok eksenli şekil değişimi belirleme test cihazı ile sonuçlar ortaya konmuştur. Çok eksenli şekil değiştirme karakterizasyonu belirleme cihazından elde edilen sonuçlar mevcut malzeme modellerindeki katsayıların belirlenmesi için daha doğru sonuçlar ortaya koymuştur. Bu sonuçlar tek eksenli çekme deneyi sonuçları ile de büyük farklılıklar içermektedir. Martin ve diğerleri [36], vakum ve ısı ile şekil verme prosesi simülasyonunda en önemli öğelerden birinin gerçekçi malzeme modellerinin oluşturulması olduğunu vurgulamıştır. Gerçekçi malzeme modellerinin oluşturulması ise bir takım deneysel çalışmalarla mümkün olacağından deneysel malzeme karakterizasyonu üzerinde çalışılması gerektiği ifade edilmiştir. Martin ve diğerleri [36], şekil verilen malzemenin gerçek proses şartlarındaki davranışını belirleyebilmek için yüksek sıcaklıkta darbe test cihazı geliştirmiştir. Bu test elemanı bilindik darbe test cihazına bir ısıtma fırını ve ön şekil verme aparatının şekil verme davranışını simüle eden bir çekiç ilavesiyle mümkün olmuştur. Çalışmada 60x60 mm² ebadındaki kare numuneler 1 mm kalınlığındaki PS ve 1.5 mm kalınlığındaki PP levhalardan kesilerek alınmış ve test cihazına özel çeneler yardımıyla bağlanmıştır. Levha sıcaklığı, levha yüzeyine yerleştirilen bir sıcaklık belirleyici eleman vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Darbe deneyini gerçekleştirecek olan çekiç PS numune için syntactic foam malzemedir, PP numune için ise poliasetal malzemedir aslına uygun üretilmiştir. Ancak proses şartlarından farklı olarak çekicinin levhaya tesir ettiği mesafe 20 mm olarak sınırlandırılmıştır. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneylerde ısıtılan levhanın şekil değişimi sonrasında ortaya çıkan değerler gerçek Gerilme-Genleme değerlerine dönüştürülerek grafik yöntemle incelenmiştir.

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde simülasyon oldukça kullanılan bir yöntemdir. Üretim öncesinde sorunların tespit edilebilmesi için daha prototip aşamasında tasarımcı ve üreticiye yol gösteren bir çözüm yoludur. Vakum ve ısı ile şekil verme prosesini kullanan çoğu üretici simülasyonu araştırma geliştirme sürecinin vazgeçilmez bir parçası olarak görmektedir. Bu konuda; Willems ve diğerleri [37], dokuma cam elyaf takviyeli PP kompozit levhaları, çift küreli kalıp tertibatı ile derin çekme işlemine tabi tutmuş, şekil verme simülasyonu bir FEM yazılımı olan Abaqus/Explicit ile gerçekleştirilmiştir. Kaydedilen kayma açısı değerleri, her iki deneysel çalışma ve simülasyon sonuçlarından alınmıştır. Yapılan karşılaştırma sonrasında kayma açısı değerlerinin her iki durum içinde birbiri ile eşleştiği

vurgulanmıştır. Kalıbın sahip olduğu radüslerin büyük değerde olması, simetrik yükleme koşulları, polimer malzemede şekil verme işlemi sırasında katlanma, buruşma ve kırışma meydana gelmemesi bu sonuçları destekleyen unsurlar olarak belirtilmiştir. O'Connor ve diğerleri [38], vakum ve ısı ile şekil verilmesi oldukça zor olan PP kopolimer malzemeye, ön şekil verme aparatlı basınçlı hava ile şekillendirme yöntemiyle şekil vermiştir. Elde edilen ürünün 30 farklı noktasında cidar kalınlık tespiti yapılmıştır. ABAQUS yazılımı kullanılarak, kalıp ve polimer levhanın modellenmesinden sonra, farklı hiperelastik malzeme modelleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilen ürün cidar kalınlığı değerleri, deneysel çalışmada belirlenen 30 noktadaki kalınlık değeriyle karşılaştırılmıştır. Yarı kristalin yapıya sahip olan PP kopolimer malzemenin vakum ve ısı ile şekil verme sıcaklık aralığının darlığı, ticari manada PP'in vakum ve ısı ile şekil verme sürecini zorlaştırırsa da farklı teorik yaklaşımlar geliştirilerek, farklı malzeme modelleriyle, PP kopolimer malzemenin şekil verme sürecinde gerçeğe daha yakın sonuçlar sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Dong ve diğerleri [39], PAM-FORM vakum ve ısı ile şekil verme prosesi simülasyon yazılımı ile "Grid Strain Analysis" olarak adlandırılan malzeme yüzeyini bölgelere ayırarak şekil değiştirme karakteristiğinin oluşturulması işlemini gerçekleştirmiştir. Simülasyon, dikdörtgenler prizması şeklindeki vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı ile 160 °C sıcaklığında şeffaf ve opak akrilik levhalar, 20 kPa ve 40 kPa'lık şekil verme basınçları kullanılarak levhanın şişirme esnasındaki şekil değişimi gözlemlenerek icra edilmiştir. Levhada yerel olarak genleme elemanları alınmış enine ve boyuna şekil değiştirme karakteristiği incelenmiştir. İki ayrı bölgede incelenen tel kafes elemanlarda düzlem şekil değiştirmenin, şişirme aşamasında büyük rol oynadığı belirtilmiştir. Sonrasında silindirik geometri bir kap için vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonu opak ve şeffaf akrilik levhalar için tekrarlanmıştır. Sonuç olarak PAM-FORM vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonu yazılımı ile hiperelastik malzeme modeli kullanarak yapılan gerçeklemeden elde edilen sonuçların literatürdeki analitik sonuçlarla yakın değerler ortaya koyduğu tespit edilmiştir. Harter ve DyJack [40], iki ayrı vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı imal etmiş ve bu kalıplarla PET levhaları şekillendirmiştir. Şekil verilen ürünler üzerinde bazı noktalarda cidar kalınlıkları tespit edilmiştir. İmal edilen kalıpların katı modeli oluşturulmuş, iki ayrı kalıp geometrisi için farklı üç sıcaklıkta süreç simüle edilmiş ve belirli noktalardaki ürün cidar kalınlıkları

tespit edilmiştir. İmal edilen kalıplardan yarı küre geometrili kalıpta yataydaki aksenal çekme oranı, diğer kalıpta ise düşey yöndeki çekme oranının cidar kalınlığı üzerinde ki etkisi araştırılmıştır. Simülasyon ve deneylerden elde edilen cidar kalınlıkları karşılaştırılmış ve değerler arasındaki fark yüzdeleri ortaya koyulmuştur. Sonuç olarak düşük çekme oranlarında simülasyon ve gerçek ürün cidar kalınlıkları arasında fazla fark bulunmazken, çekme oranı limitler dışına çıkıp artış gösterdiğinde cidar kalınlık değerleri arasındaki fark yüzdesi birden artmaktadır. Çalışmada kullanılan simülasyon yazılımının yüksek çekme oranlarında hatalı sonuçlar ortaya koyduğu verilen sonuçlar arasındadır. Debergue ve diğerleri [41], vakum ve ısı ile şekil verme yönteminde ısıtma sonrasında polimer levhada meydana gelen sarkmanın, prosesi etkileyen birincil parametrelerden olduğunu ortaya koymuştur. Polimer levhanın şekil verme işlemi için uygun sıcaklığa kadar ısıtılırken ortaya çıkan sarkma değerini daha doğru sonuçlarla ortaya koyan bir çalışma yapılmıştır. Farklı kalınlıktaki termoplastik levhalar ısıtıcı fırın içerisine yerleştirilmiş, levhalar üzerinde belirli lokasyonlarda termik elemanlar vasıtasıyla sıcaklık tespiti yapılmıştır. Tespit edilen değerler ile K-BKZ malzeme modeli uyarınca ortaya çıkan nümerik hesaplama sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonrasında mevcut malzeme modeli uyarınca farklı kalınlıklardaki polimer levhalar için sarkma hesabı yapılmış, elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. K-BKZ malzeme modeli içerisindeki gevşeme zamanlarının (Relaxation Times) sayısı arttırıldıkça deneysel sonuçlara daha yakın sarkma değerleri elde edilmiştir. Warby ve diğerleri [42], 200 °C'de farklı şekil değiştirme oranlarında bir polimer malzemenin Gerçek gerilme-Gerçek genleme (σ - ϵ) davranışını incelemiştir. Sıcaklık 100 °C olarak seçilmiş ve (σ - ϵ) davranışı incelenmiştir. Bunun sonucu olarak 100 °C'de polimer malzeme için gerçek gerilme ile gerçek genleme arasında ampirik bir ifade oluşturulmuştur. Test verileri ile ampirik ifade sonuçlarının birbiri ile aynı doğrultuda değiştiği tespit edilmiştir. Pantelelis ve diğerleri [43], Polistren levha kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle buzdolabı iç kabini üretimi üzerine çalışmıştır. Üründe belirli lokasyonlarda cidar kalınlığı tespit edilmiştir. Şekil verme öncesinde polistren levha üzerine tel kafes geometrisinde çizgiler çizilmiş ve asıl deformasyonun hangi bölgelerde olduğu tespit edilmiştir. Kalıbın geometrisi bir Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) yazılımıyla modellenmiş ve *.stl formatında Sonlu Elemanlar Analizi yazılımı olan T-SIM kullanılarak analiz yapılmıştır. Deneysel şekil verme sürecinde elde edilen

cidar kalınlıkları ile simülasyon sonrasında ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Simülasyon yazılımından elde edilen sonuçlar deneysel verilerle yakınsamış ancak birden fazla noktadaki değerler arasında farklılık görülmüştür. Bunun nedeninin, simülasyonda kullanılan malzeme modeli, kalıp geometrisi ve gerçek proses parametrelerinin FEA yazılımında tam olarak tanımlanamaması olduğu belirtilmiştir. Christopherson ve diğerleri [44], vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle üretilen bir ilaç ambalajının su buharı bariyerinin daha da geliştirilmesi hususunda çalışmıştır. Bir ilaç ambalajında su buharı bariyeri ilacın sağlıklı koşullarda uzun süreli saklanabilmesine imkân verdiğinden dolayı önemlidir. Christopherson ve diğerleri [44], iki farklı malzeme seçerek (PVdC kaplı PVC ve PP homopolimer kaplı COC film) 120, 130, 140 °C’de 10, 50, 100 mm/dak çekme hızlarıyla tek eksenli çekme deneyi yapmış böylelikle malzemelerin Gerilme-Genleme davranışları ortaya konarak malzeme karakterizasyonu yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda şekil değiştirme davranışı belirlenen malzemelerin K-BKZ malzeme modeline matematiksel uygunluk sağlaması için çalışılmış, PVdC kaplı PVC malzeme kusursuz bir uygunluk sağlamış ancak PP homopolimer kaplı COC aynı uygunluğu sağlamamıştır. Seçilen K-BKZ malzeme modeli için deneysel parametreler seçildikten sonra Polyflow yazılımıyla ön şekil verme aparatı kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin simülasyonu yapılmıştır. Lokal cidar kalınlığı ile su buharı bariyerinin ters orantılı değiştiği olgusu vurgulanmış ve simülasyon sonucunda ürün cidar kalınlık dağılımı ortaya konmuştur. Wang ve Nied [45], vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle üretilen parçaların kalite standartlarından birinin üniform cidar kalınlığı dağılımı olduğunu belirtmiştir. Bunun sağlanabilmesi için vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi içerisine ilave ön şekil verme aparatı, ön şişirme gibi şekil verme metotları dâhil edilmiştir. Ancak yine de enjeksiyon kalıplama üretim yönteminde olduğu kadar üniform cidar kalınlığı dağılımı sağlanamamaktadır. Vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle üretilen ürünlerde cidar kalınlığı dağılımını daha düzgün hale getirmek için şekil verilen levhanın diferansiyel ısıtma ile istenilen sıcaklığa getirilmesi bir çözüm yolu haline gelmiştir. Polimer malzemenin sıcaklığının artırılması daha kolay şekil değiştirmesi yani o bölgedeki malzeme akışının daha fazla olması anlamına geleceğinden, diferansiyel ısıtma koşullarının bu soruna çözüm olmasını sınamak amacıyla vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonu tabanlı bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada ABS termoplastik malzeme kullanılmış, simülasyon için Mooney-Rivlin

Hiperelastik malzeme modeli seçilmiştir. Malzeme modeli için ABS termoplastik malzemesinin katsayıları literatür çalışmalarından elde edilmiştir. Simülasyonda silindirik geometrili bir ürün kullanılmış, şekil verme sıcaklığı olarak $115.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ seçilmiştir. sonrasında şekil verme sıcaklık aralığı $100\text{-}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında belirlenerek simülasyon tekrarlanmış ve en uygun cidar kalınlığı dağılımını veren sonuçlar ortaya konmuştur. Böylelikle optimum sıcaklığın belirlenmesi amaçlanmıştır. Song ve diğerleri [46], HDPE film malzeme kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle yarı küre ve dikdörtgenler prizması şeklindeki basit geometrili kalıplar yardımıyla levha şekil verme sıcaklığı dağılımının ürünün nihai cidar kalınlığı dağılımı üzerine etkisini araştırmıştır. Soğuma aşamasındaki şekil değişimi elastik kabul edilip, mevcut iki ayrı kalıp geometrisi için termal gerilme ve çarpılma analizi yapılarak deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Simülasyon için geliştirilen ARVIP 3D yazılımı kullanılmıştır. Her iki kalıp geometrisiyle elde edilen ürünlerdeki levha cidar kalınlık dağılımıyla levha sıcaklık dağılımı birbirine çok yakın sonuçlar ortaya koymuştur. Ürün kalınlık dağılımının geleneksel yöntem olan tahribatlı yöntemin dışında tahribatsız olarak bir termal kamera vasıtasıyla görsel sonuçlar ortaya koyarak analiz edilebilir olduğu gösterilmiştir. Ürünün kalıpta soğuması esnasında gerçekleştirilen simülasyon aşaması ve deneysel çalışma sonrasında elde edilen termal gerilme ve çarpılma sonuçları birbiri ile büyük oranda uyum sağlamıştır. Song ve diğerleri [47], ARVIP 3-D yazılımını kullanarak $1000\times 600\times 20\text{ mm}^3$ hacminde ilk sıcaklığı $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan bir PP levhanın, kalınlığı boyunca sıcaklık profilini oluşturmuştur. PP levhanın iki yüzeyinin de metal kalıp yüzeyiyle temas halinde olduğu, kalıbın sıcaklığının ise $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu kabulü yapılmıştır. 18 dakikalık soğuma süresinden sonra levha yüzeyinde ve levha merkezinde yapılan sıcaklık tespitlerinin ARVIP 3-D yazılımıyla elde edilen sonuçlar ile analitik metotla bulunan sıcaklık değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğunu göstermiştir. ARVIP 3-D yazılımıyla elde edilen ürün sıcaklık dağılımı ve ürün kalınlık dağılımı sonuçları arasında birbirine uyan bir bağıntı olduğu sonucu ortaya konmuştur. Yapılan karşılaştırmada ürün kalınlığı ne kadar az ise sıcaklığının da o noktada o kadar az olduğu tespiti yapılmıştır. Rachik ve Roelandt [48], hiperelastik ve viskoelastik malzeme modellerini kullanarak iki farklı kalıp geometrisi için iki ayrı simülasyon gerçekleştirmiş, sonuç olarak nihai ürün cidar kalınlıkları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda şekil değiştirme

oranlarının hangi malzeme modeline daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Novotny ve Saha [49], vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin optimizasyonu için ön şekil verme aparatının kalıp içerisindeki son konumu, hızı ve boyutlarını değiştirerek T-SIM yazılımıyla farklı simülasyonlar üzerine çalışmalar yapmıştır. Değişkenlerden, ürünün son cidar kalınlığına en çok etki eden faktörün takozun yani ön şekil verme aparatının kalıp içerisindeki son konumu olduğu ortaya çıkmıştır. Takozun boyutları ve proses içerisindeki hızı, ürünün nihai cidar kalınlığını belirgin bir şekilde etkilememekle birlikte hesaba katılması gereken iki ayrı faktördür. Lappin ve diğerleri [50], ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan Abaqus/Standart'ı kullanarak öncelikle hiperelastik malzeme modeli ile vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Simülasyon, hiperelastik malzeme modelinin levhanın şekil verme sıcaklığındaki davranışını, gerilme-genleme bağıntılarını ve ürün nihai cidar kalınlık dağılımını tam olarak ortaya koyamadığını göstermiştir. Nam ve diğerleri [51], kauçuk ile akrilonitril içerikleri ve molekül ağırlıkları farklı ABS-a ve ABS-b polimer malzemelerini kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesi vasıtasıyla bu malzemeleri şekillendirmiştir. Gerçekleştirilen şekil verme operasyonu nümerik simülasyon verileri ile karşılaştırılmıştır. Söz konusu malzemeler için yüksek sıcaklıkta çekme ve dinamik salınım kayma testleri icra edilmiş, sonlu elemanlar modeli oluşturulurken kullanılan malzeme modeli parametreleri tespit edilmiştir. Şekil verilen ürünlerden belirli kesitlerde kalınlık dağılımı profili oluşturulmuş ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; “hyper-elastic rubber like” malzeme modeli kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçları deneysel sonuçlara en yakın verileri sağlamıştır. Nam ve diğerleri [52], vakum ve ısı ile şekil verme prosesini membran yaklaşımı dışında üç boyutlu sonlu elemanlar analizini kullanarak incelemiştir. Üç boyutlu algoritma, membran yaklaşımının çözüm üretmediği sabitleme sınır koşulunu da içermektedir. Ayrıca oluşturulan bu algoritma membran yaklaşımıyla elde edilen ürün cidar kalınlık dağılımı, gerilme ve genleme değerlerinden daha doğru ve yakınsayan değerler ortaya koymuştur. Çalışmada malzeme modeli olarak hiperelastik malzeme modeli olan 2 terimli Mooney-Rivlin malzeme modeli kullanılmıştır. DiRaddo ve diğerleri [53], vakum ve ısı ile şekil verme prosesi içerisindeki, levhanın ısıtılması ve şekil verme aşamalarının modellenmesi ile deneysel olarak tasdik edilmesini amaçlamıştır. Vakum ve ısı ile şekil verme süreciyle

üretilen bir ürünün kalitesinin levhanın uygun bir şekilde ısıtılmasından geçtiği belirtilen çalışmada, levhanın ısıtılması ve deformasyon aşamalarının bütünlük bir yaklaşımla modellenmesi yapılmıştır. Isıtıcı fırın içerisinde ısıtıcılardan levhaya geçen toplam ısı akısının ışınım ve taşınım yoluyla olduğu belirtilmiş ve bu ısı geçişleri ayrı ayrı teorik olarak belirlenmiştir. 180 saniye fırın içerisinde ısıtılan levha malzemesinin sıcaklık dağılımı AGEMA 900LW infa-red kamera ile tespit edilmiş ve teorik sıcaklık dağılımı ifadesiyle karşılaştırılmıştır. İzotermal olmayan viskoelastik özellikli ABS malzemenin K-BKZ malzeme modeliyle tanımlandığı çalışmada dikdörtgenler prizması şeklinde dişi kalıp geometrisine sahip katı modeli ile vakum ve ısı ile şekil verme sürecinin simülasyonu yapılmıştır. Söz konusu kalıpla ABS malzeme için şekil verme operasyonu gerçekleştirilmiş ve kalıbın uzun kenarı boyunca tam kesit üzerindeki cidar kalınlıkları karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve deneysel verilerin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Marchal ve diğerleri [54], değişik endüstriyel alanlarda kullanılan üç ayrı ürün için kalıp geometrilerini tespit etmiş ve bu ürünler için POLYFLOW yazılımı yardımıyla vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonu yapmıştır. Bu ürünler güvenlik için kullanılan koruma başlığı, yoğurt kabı ve cep telefonu kılıfı olarak çalışma içerisinde belirtilmiştir. Oluşan ürünlerde daha üniform bir cidar kalınlığı dağılımı yakalamak için ısıtılan levha üzerindeki sıcaklık dağılımı eldeki yazılım ile geliştirilmiş ve üç ayrı ürün için cidar kalınlığı dağılımı simülasyon yazılımı yardımı ile hesaplanmıştır. İlk şekil verilecek levha üzerindeki sıcaklık dağılımı üniform kabul edilmiş ancak simülasyon yazılımı yardımıyla yapılan gelişmiş sıcaklık dağılımı ile bu üniformluk yerini farklı lokasyonlarda farklı sıcaklıklara bırakmıştır. Oluşan iki ayrı durum için yapılan simülasyon sonuçları ortaya koymuştur ki; geliştirilen sıcaklık dağılımı ile yapılan gerçekleştirme vasıtasıyla oluşan ürünlerde daha üniform bir cidar kalınlık dağılımı elde edilmiştir. Liu [55], boyutları 200-400 µm olan ağaç tozlarını takviye elemanı olarak barındıran ağırlıkça % 50 takviye elemanı içeren farklı termoplastik kompozit levhalara, vakum ve ısı ile şekil vermiştir. Şekil verme işlemi kesik koni geometrisine sahip bir vakum kalıbında yapılmıştır. Sonlu Elemanlar Viskoelastik metodu olarak adlandırılan bir denklem ile kesik koni geometrisindeki kalıp için cidar kalınlığı dağılımı hesaplanmıştır. Her iki durumda aynı kalıp geometrisi için hesaplanan ürün cidar kalınlıkları karşılaştırılmıştır. Elde edilen cidar kalınlık değerlerinin deneysel verilerle uyduğu gözlenmiştir. Koziy ve diğerleri [56], şekil

verme sıcaklığında polimer malzemenin şekil değiştirme davranışını ortaya koyan malzeme modelleri üzerine bir araştırma yapmıştır. HyperMesh 2.0 yazılımı kullanılmıştır. Eksenel simetriye sahip olmayan bir kalıp geometrisi belirlenmiş ve simülasyon farklı malzeme modelleri kullanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma içerisinde yer verilen malzeme HDPE olarak seçilmiş ve şekil verme sıcaklığı 190 °C olarak belirlenmiştir. Tespit edilen tüm veriler ışığında Mooney-Rivlin, Ogden, G'Sell, Modified G'Sell ve K-BKZ malzeme modelleriyle vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin simülasyonu tekrarlanmış, oluşan ürün cidar kalınlığı dağılımı her model için karşılaştırılmış ve gerçeğe hangi modelin daha yakınsadığı tartışılmıştır. Sonuç olarak farklı malzeme modellerinin farklı malzemeler için daha uygun sonuçlar ortaya koyduğu ve bu konuda farklı modellerin geliştirilmesinde deneysel çalışmaların büyük rol oynadığı belirtilmiştir.

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle sadece takviye elemanı ve katkı maddesi içermeyen saf termoplastik levhaların değil, kompozit levha malzemelerin de şekillendirilmesi mümkündür. Nakamura ve diğerleri [57], takviye elemanı olarak "Ramie" dokuma kumaş malzeme, matris elemanı olarak da ECOFLEX (BASF JAPAN CO. LTD.) doğal bir reçine kullanarak, 2 farklı elyaf dizilişiyle katmanlı kompozit levhalar oluşturmuştur. 0-90°/0-90°/0-90° ve +45/ +45/ +45 varyasyonları seçilmiştir. Nakamura ve diğerleri [57], doğal matris ve takviye elemanına sahip kompozit levhaların yüksek sıcaklıklardaki çekme (σ - ϵ) özelliklerini ve derin çekme kabiliyetini araştırmıştır. Kompozitlerin, şekil verme sıcaklık aralığı 100-115 °C olarak belirlenmiştir. Ayrıca 115 °C'de yapılan derin çekme deneylerinde özel bir alkali çözültüsüyle işlem gören kompozit levhalar, kare ve silindirik geometrilik kalıplar kullanılarak ancak 20 mm derin çekmeye tabi tutulmuştur. Sadighi ve diğerleri [58], örgü cam elyaf takviyeli çok katmanlı PP kompozit levhaları, başlangıçta 180 °C'de 1 saat ısıtmış, sonrasında yarı küre şeklindeki kalıp tertibatı ile farklı yönlerde takviye edilmiş PP kompozit levhaları şekillendirmiştir. Aynı çalışma Abaqus/Explicit ile simüle edilmiştir. Örgü cam elyafların farklı yönlerde dizilimiyle elde edilen farklı kompozit plaklar derin çekme işlemine tabi tutulduktan sonra flanş, yani pot çemberi altında kalan alanın geometrisinin elyaf doğrultusu ile ilişkisi araştırılmıştır. Elyaf örgülerin takviye edildiği doğrultu ile şekil verme işleminden sonra üründe buruşma kırışıklık ve fiber burkulması gibi meydana gelen hasarlar arasındaki bağıntı

belirlenmiştir. Hogan ve diğerleri [59], Polipropilen ağırlıklı termoplastik poliolefin geniş yüzey alanlı ve kalın levhaların vakum ve ısı ile şekil verme süreciyle işlenmesinin endüstriyel olarak önemine değinmiştir. Geleneksel levha malzemelerinin vakum ve ısı ile şekil verme yöntemiyle şekil verilebilirliğini artırmak amacıyla belirli bir karışım hazırlanmış ve bu karışım içerisinde, yüksek ergiyik dayanımlı Polipropilenin miktarı, elastomer malzemenin türü ve miktarı, dolgu malzemesi pudranın miktarı değişik oranlarda tespit edilmiştir. Hazırlanan karışımdan 640 mm eninde 890 mm uzunluğunda ve 4.7 mm kalınlığında levhalar plastik ekstrüzyon üretim yöntemiyle hazırlanmıştır. Bu levhalardan elde edilen numuneler vasıtasıyla bazı reolojik ve fiziksel özelliklerin tespiti yapılmıştır. Başlangıçta hazırlanan karışım içerisinde ağırlıkça % 30 pudra miktarı sabit olmak kaydıyla elastomer bileşen oranı ağırlıkça %10 ve %20 olarak değiştirilmiş ve elde edilen yüksek ergiyik dayanımlı Polipropilen'in vakum ve ısı ile şekil verme süreci incelenmiştir. İncelenen parametrelerden bir tanesi levhanın ısıtılma esnasında gösterdiği sarkma miktarıdır. Hazırlanan formülasyonun içeriğindeki "HMS PP" yani yüksek ergiyik dayanımlı Polipropilen miktarı arttıkça oluşan levhanın ısıtma sonrasındaki sarkma miktarının azaldığı sarkmaya karşı direnç kazandığı, kalıptan alınan son ürün içerisindeki malzeme üniformluğunun geliştiği, levhanın estetik görünüm açısından geliştiği gözlemlenmiştir. HMS TPO ve bilindik TPO malzemeler arasında ısıtma sonrasında meydana gelen sarkmalar karşılaştırılmıştır. Geleneksel TPO levha malzemesinde ısıtma sonrasında meydana gelen sarkma miktarı, HMS TPO malzemesinde 22 s. daha geç gözlemlenmiştir. Shirani ve diğerleri [60], polipropilen termoplastik levhaları kullanarak dokuma cam elyaf ile konsolidasyonu sonrasında katmanlı kompozit levhalar elde etmiştir. Bu üretim sırasında asıl proses parametrelerini araştırmıştır. Bunlar, termoplastik levhanın ısıtıldığı sıcaklık, preslendiği basınç ve ısıtma zamanı değerleridir. Uygun konsolidasyon için 10.000 N, 5 dakika ve 25 bar basıncın uygun olduğu sonucuna varmıştır. PP termoplastik levhaların 210 °C civarında 100 dakika ısıtılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Derin çekme operasyonunda ise; PP levhalar yaklaşık 80 dakika, 180 °C civarında ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Bu ön ısıtma sırasında PP levhaların yüzeyinde oksitlenme meydana gelse de cam elyaflarda herhangi bir bozulma gözlemlenmemiştir. Bhattacharyya ve diğerleri [61], boyları 3 ile 5 mm arasında değişen, 40 µm ortalama çapa sahip ahşap fiberlerden keçe oluşturmuş ve

bunların polimer malzeme ile birleşmesini sağlamıştır. Sonrasında konsolidasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve tabakalı kompozit malzemeler ısı ve basınç ile şekil vermeye hazır hale getirilmiştir. Kompozit levhalar dört farklı kalıp geometrisi ve dört farklı teknik ile şekillendirilmiş, üretim sürecindeki parametrelerin değişiminin birbiri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu değişkenler; kalıp geometrisi, şekil verme oranı, burkulma ve delaminasyondur. Grid Strain Analysis (Şekil verilecek levhanın üzerine tel kafes görünümünde renkli çizgiler çizilir. Şekil verme işleminden sonra çizgilerin değişimi incelenerek parçanın şekil değiştirme davranışı belirlenir), matris malzemesinde akış ve kalınlık değişimi, burkulma buruşma ve kırışıklıklar, takviye elemanının etkisi, şekil verme sıcaklığı, pot çemberinin boyutları olarak belirtilmiştir. Cao ve diğerleri [62], kompozit levhaların şekil verme simülasyonunda, malzeme özelliklerinde sıcaklığa bağlılığın analitik çözümleme metoduna dâhil edilmesini araştırmıştır. Sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri tanımlanmış kompozit malzemeler seçilerek, derin çekme simülasyonu gerçekleştirilmiş, kayma gerilmesinin proses parametrelerinin değişiminden nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Lim ve diğerleri [63], dokuma kumaş takviyeli polimer matrisli kompozit levhaların şekillendirilmesinde kullanılan vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle levha malzemenin derin çekme esnasında şekil değiştirme karakteristiğini hem deneysel metot hem de analitik bir modelin geliştirilmesi sonucu karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Analitik model varsayılan bir kalıp geometrisi için oluşturulmuş, nihai derin çekme uzunluğu yani ürün boyu, ürün çapı, takım geometrisinin ürün boyutları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Analitik metotla elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada takviye elemanı içermeyen saf PP levhanın dokuma kumaş takviyeli selefi kadar derin çekmeye yatkın olmadığı görsel olarak resimlerle ifade edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki; dokuma kumaş takviyeli kompozit levhaların şekil değişimi farklı mekanizmalar yardımıyla oluşmaktadır. Bu mekanizmalar ise; fiber demetlerinin birbiri üzerinden kayması, farklı düğümlerin kayma düzlemleri üzerinde kayması ve fiber uzaması olarak verilebilir. Hsiao ve Kikuchi [64], dokuma mikroyapıya sahip katmanlı kompozitlerin vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin simülasyonu ve tasarımı üzerine çalışmıştır. Simülasyon süreci nümerik metodoloji kullanılarak tamamlanmıştır. Katmanlı kompozit yapının üç boyutlu Sonlu Elemanlar Modeli oluşturulmuş ve kinematik hususlar hesaba katılarak, şekil verme ve soğuma aşamalarının analizi gerçekleştirilmiştir. Diğer bir amaç ise

optimum kalınlık dağılımının yakalanmasıdır. Bu hususta katmanlı kompozit yapının ısıtılma aşaması analiz edilerek elde edilen sonuçlar ortaya konmuştur.

Literatür çalışmalarının çoğunluğu vakum ve ısı ile şekil verilen saf termoplastik levha yada film malzemeler üzerine yapılan deneysel çalışmalardır. Proses parametrelerinin değişiminin çoğunlukla nihai ürün kalitesi üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu konuda; Lieg ve Giacomini [65], üçgen şeklinde oluk ya da kanal geometrili parçaların vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde işlendikten sonra belirli kesitlerdeki kalınlık profillerinin analitik ifadeler geliştirilerek tespitini sağlamıştır. Çalışma içerisinde yalnızca üçgen şeklinde kanal geometrili parçaların şekil verme prosesi ve parametreleri incelenmiştir. Bir ürünün oluşabilmesi için gereken zaman, süreç hızı gibi parametrelerin değişiminin cevabını çalışma içerisinde örneklerle vermeye çalışmıştır. McConville ve diğerleri [66], plastik ekstrüzyon ile vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin parametrelerini değiştirilerek son ürün kalitesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ekstrüzyon üretim yönteminde, levha kalıptan çıktıktan sonra malzemenin kalenderleme işlemine tabi tutulduğu merdane sıcaklığı ve ekstrüzyon hattının hızı, değişken parametreleri olarak tespit edilmiş, kullanılan üç farklı PP türevinin her biri için yüksek ve düşük birer merdane sıcaklığı ve ekstrüzyon hattı hızı seçilmiştir. Her bir parametrenin değişimine göre plastik ekstrüzyon üretim yöntemiyle elde edilen levhalardan bir dizi test yardımıyla ölçümler yapılmış ve sonuçlar ortaya konmuştur. DSC cihazı ile kristallenme tespiti, ISO 527 uyarınca çekme deneyi sonrası elastiklik modülü, toplam boy uzaması tespiti gibi bazı değerlerin belirlenmesi sağlanmıştır. Ancak merdane sıcaklığı ve ekstrüzyon hattı hızının araştırılan malzeme özelliklerini çok fazla değiştirmedeği, malzemelerin farklı olmasının bu özellikleri etkilediği belirlenmiştir. Kim ve diğerleri [67], "Film Insert Molding" adlı üretim yönteminin proses parametrelerinin değişimi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma ortaya koymuştur. Çalışmada kullanılan malzeme AVERY DENNISON tarafından üretilen üç katmanlı yapıya sahip, 0.5 mm kalınlığında ABS film malzemedir. Katmanlı film malzemenin şekil değiştirme davranışını ortaya koymak için farklı şekil değiştirme oranlarında ve farklı sıcaklıklarda tek eksenli çekme deneyi yapılmış ve ABS film malzemenin Gerçek gerilme-genleme diyagramları oluşturulmuştur. Bu diyagramlar vasıtasıyla G'Sell viskoelastik yönetici denkleminde kullanılan bazı katsayılar tespit edilmiş, ABS film malzemenin alınarak kullanılan çekme numuneleri ile farklı

sıcaklıklarda gerçekleştirilen tek eksenli çekme deneyleri sonrasında elde edilen gerçek gerilme-genleme eğrileri, G'Sell yönetici yasası uyarınca hesaplanan gerçek gerilme-genleme eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirine yakın olduğu, ABS polimer film malzemenin şekil değişimi karakteristiğini ortaya koymak için G'Sell yönetici eşitliğinin kullanılabilmesi verilen sonuçlar arasındadır. Woefle ve diğerleri [68], Styron HIPS ticari ön adıyla bilinen üç farklı termoplastik malzemeyi kullanarak bir dizi deneysel vakum ve ısı ile şekil verme operasyonu gerçekleştirmiştir. Tek kullanımlık bardak için yapılan kalıp kullanılarak üç ayrı malzeme şekillendirilmiş ve oluşan sonuçlar ortaya konmuştur. Her malzeme için şekil verme koşulları, üç farklı ön şekil verme takozu hızı, takozun dışı kalıp içerisine üç farklı dalma yüksekliği ve beş ayrı sıcaklık değeri belirlenerek vakum ve ısı ile şekil verme operasyonları gerçekleştirilmiştir. IMI/NRC tarafından geliştirilen FormSim yazılımı ile yapılan vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonuna yer verilmiştir. Belirli bir sıcaklıkta ısıtma fırını içerisinde üç ayrı HIPS malzeme için farklı ısıtma zamanlarında sarkma analizi yapılmış ve simülasyon yazılımının gerçeğe oldukça yakın sonuçlar ortaya koyduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak daha düşük uzama ve kayma viskozitesinin malzeme için daha geniş şekil verme sıcaklık aralığı sağladığı ortaya konmuştur. McCool ve diğerleri [69], ön şekil verme aparatlı basınçlı hava ile şekil verme prosesini etkileyen parametreleri araştırmıştır. Levha sıcaklığının, ön şekil verme aparatı yüzey sıcaklığının ve ön şekil verme aparatı hızının ürün cidar kalınlığı üzerine etkisi incelenmiştir. ABAQUS yazılımı kullanılarak kalıp ve ön şekil verme aparatının katı modeli oluşturulmuş, polimer malzeme (High Impact Polystyrene-HIPS) için en uygun malzeme modeli belirlenmiş ve izotermal simülasyon sonuçları tespit edilmiştir. McCool ve diğerleri [69], polimer levha ile ön şekil verme aparatı arasındaki sürtünme katsayısının levha cidar kalınlığı dağılımı üzerine etkisini de deneysel olarak incelemiştir. Hosseini ve diğerleri [70], vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle imal edilen bir ürünün dayanım ve kalite gibi özelliklerinin, her noktasında eşit cidar kalınlık değerine sahip olması sonrasında mümkün olacağını ortaya koymuştur. Ön şekil verme aparatı kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde deformasyon karakteristiğini veren bir matematiksel ifade oluşturulmuştur. Bu ifade lokal cidar kalınlık dağılımını, gerilme ve gerilme oranlarını tespit etmektedir. Matematiksel model ve deneysel çalışmadan elde edilen ürün cidar kalınlıkları belirli noktalarda karşılaştırılmış ve

sonuçların birbirine yakın olduğu belirtilmiştir. Tshai ve diğerleri [71], yarı kristalin PP film malzeme için uygun şekil verme sıcaklığında düzlemsel şekil değiştirme karakteristiğini deneysel olarak incelemiştir. PP malzemenin şekil verme sıcaklığındaki davranışını en iyi ortaya koyan modeller incelenmiş, yazar tarafından modifikasyonu yapılarak bazı katsayı ve eklentiler bu modellere dâhil edilmiştir. Modifikasyon, yarı kristalin PP malzemenin şekil verme sıcaklığındaki davranışını en iyi sonuçlarla ortaya koyabilmek ve bir ortak malzeme modeli gelişimi için yapılmıştır. Hosseini ve Berdyshev [72], ön şekil verme yardımcısı kullanarak vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde polimer levhanın hasar almasının nedenini araştırmıştır. Bu nedenler ve çözümleri kısaca;

- ◆ Kalıp tasarımı – Köşe yarıçapları artırılmalı
- ◆ Levha sıcaklığı yüksek – Levha sıcaklığını düşür, levhaya ön ısıtma yap sonrasında şekil verme sıcaklığına getir, levha cidar kalınlığı homojen değil.
- ◆ Levha sıcaklığı düşük – Isıtma zamanını artır, levhaya ön ısıtma uygula.
- ◆ Uygun olmayan malzeme – Çekme derinliği malzeme için aşırı, şekillendirme tekniğini değiştir.
- ◆ Uygun olmayan şekil verme koşulları – Mekanik ön şekil verme aparatının düşey hareketini kısıtla, şişirme zamanını artır.

olarak belirtilmiştir. Hosseini ve Berdyshev [72], bu nedenleri ortaya koymakla kalmamış, polimer malzemenin hasar almasının nedenlerini anlayacak ve hasara neden olan parametreleri hesaplayacak bir teorik açılım geliştirmiştir. Rungrongdouyboon ve Coulter [73], 0.6x0.9 m² ebadında 1.6 mm kalınlığında opak PS levha malzemeyi kullanarak farklı bir modelleme ve optimizasyon yaklaşımıyla, vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde üniform levha sıcaklığının sağlanması için ışınlama ile ısı geçişini sağlayan çift taraflı ısıtıcı elemanların sayısı ve sıcaklıklarının optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. İlk aşamada üniform levha sıcaklığı olarak 171 °C ve 60 saniye ısıtma süresi seçilmiş 5 iterasyondan sonra 4x6 yani 24 ısıtıcı elemanın her biri için üniform levha sıcaklığını sağlayacak ısıtıcı eleman sıcaklıkları belirlenmiş ve grafik yöntemle incelenmiştir. Sonuçlar ortaya koymaktadır ki; üniform levha sıcaklığı için aynı optimizasyon süreci daha fazla ısıtıcı eleman için tekrarlandığında daha üniform levha sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında düzgün olmayan dağılımlı levha sıcaklığı için optimizasyon gerçekleştirilmiş ve ısıtıcı sayısı 6x9 yani 54

eleman olarak belirlenmiştir. Isıtıcı eleman sıcaklıkları ise 7 iterasyon sonrasında tespit edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında ister düzgün dağılımlı levha sıcaklığı ister düzgün dağılımlı olmayan levha sıcaklığı hedeflensin ısıtıcı eleman sayısının artması, istenen sıcaklık dağılımına daha yakın sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Kutz [74], incelenen bölümlerde vakum ve ısı ile şekil verme kalıplarındaki cidar kalınlığı dağılımını veren ifadeler yer almaktadır. Derin ve sıg kalıplar için ayrı ifadelerin yer aldığı kitabın bu bölümünde vakum ve ısı ile şekil verme sürecinden de bahsedilmiştir. Harron ve diğerleri [75], vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde işlem parametrelerinin değişiminin ürün cidar kalınlığı üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Ön şekil verme aparatı(Takoz) yardımıyla vakum ve ısı ile şekil verme sürecinde iki ayrı ekstrüzyon hattı hızıyla (2mm/dk-4mm/dk) üretilen 1.45 mm kalınlığında PP malzeme kullanılmıştır. PP malzeme rulo halinde vakum ve ısı ile şekil verme ünitesine beslenmiştir. Değiştirilen proses parametreleri; ekstrüzyon hattının hızı, levhanın şekil verme sıcaklığı, soğutma suyu sıcaklığı, takoz malzemesi, takozun dişi kalıp içerisinde indiği strok derinliği, takoz sıcaklığı, takozun şekil verme sürecindeki zamanlaması, takoz şekli, hava basıncı, havanın süreç içerisindeki zamanlaması olarak seçilmiş ve ürün cidar kalınlığı, basma dayanımı, büzülme, ağırlık ve takoz kuvveti üzerindeki değişimi incelenmiştir. Sonuç olarak, ürün cidar kalınlık dağılımının, levhaya şekil verme sıcaklığı, takozun dişi kalıp içerisinde dalma derinliği, takoz zamanlaması, hava zamanlaması ve takoz şekli tarafından kontrol edildiğini ortaya koymuştur. Ürün basma dayanımı doğrudan ürün cidar kalınlığıyla alakalı olduğundan, cidar kalınlık dağılımını kontrol eden parametrelerin basma dayanımını da aynı oranda değiştirmekte olduğu ifade edilmiştir. Takoz malzemesi üzerinde ölçülen kuvvetin değişiminin büyük oranda levha sıcaklığıyla değiştiği saptanan sonuçlar arasında yer almaktadır. Ayhan ve Zhang [76], "Benco Aseptic" tipte bir vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi kullanarak 20 ml hacminde üretilen bir ambalajın cidar kalınlık dağılımını etkileyen faktörleri araştırmıştır. Malzeme olarak çok katmanlı Allistra Plastic Packaging Company (Muncie) tarafından üretilen HIPS/Bağlayıcı/PVDC/Bağlayıcı/LDPE formuna sahip 5 katmanlı film malzeme seçilmiştir. Toplam film malzeme kalınlığı 1.4478 mm olarak tespit edilmiştir. Çalışma içerisinde Benco Asepack 2 (Pienza, ITALY) ön şekil verme aparatlı vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi kullanılmış, Dickson (Model IR 550) infrared termometre HIPS kaplı yüzeyin sıcaklığını ölçmek için Mitutoyo (Model 5C

721) mikrometre ise ürün cidar kalınlığının tespitinde kullanılmıştır. Şekil verme sıcaklığı, şekil veren hava basıncı ve ısıtma süresi gibi süreç değişkenlerinin ürün kalınlık dağılımına etkisi araştırılmıştır. Tüm bu parametrelerin değişiminin ürün kalınlık dağılımını etkilediği belirtilmiştir. En çok etkileyen süreç değişkeninin şekil verme sıcaklığı olduğu ortaya koyulan sonuçlar arasındadır. Bordonaro ve diğerleri [77], kaliteli bir ürün elde etmek için vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin parametrelerinin değişiminin oldukça önemli olduğunu ortaya koymuştur. Bu amaçla üç kriter hesaba katılmıştır. Bunlar; ürün kalınlık değişimi, katlanma ve kırışıklık oluşumu, parçada oluşan minimum kalınlık değeridir. Bu kriterleri optimize etmek amacıyla Bordonaro ve diğerleri [77], ön gerdirme aşamasındaki şişirme yüksekliği, levha sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı parametrelerini değiştirerek en uygun ürünü veren bir dizi vakum ve ısı ile şekil verme operasyonu gerçekleştirmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmasında; levha yüzey sıcaklığı Max=182 °C, Min=160 °C, şişirme yüksekliği Max=46 cm, Min=38 cm, kalıp sıcaklığı Max=99 °C Min=66 °C ve ısıtma oranı Max=%75, Min=%25 değerleri benimsenmiştir. Çalışma içerisinde değişim katsayısı (Coefficient of Variation) olarak tanımlanan soyut bir kavramında değişen parametrelerle seyri incelenmiştir. Wayne [78], yüzey alanı geniş ve kalın levhaların vakum ve ısı ile şekil verme sürecini üç ayrı malzeme kullanarak incelemiştir. Bu malzemeler Akrilik (AtoHaas Plexiglas MC PMMA), Kopolyester (Eastman Spectar 14471), Polikarbonat (GE LEXAN PC) olarak belirtilmiş ve özellikleri çalışma içerisinde tablo halinde verilmiştir. Wayne [78], 80x57 cm² yüzey alanına ve 3 mm kalınlığa sahip levha halindeki üç ayrı malzeme için en uygun şekil verme değişkenlerini deneysel olarak tespit etmiştir. Bu işlem için uygun bir vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi olan (Brown Thermoformer) kullanılmıştır. Üç ayrı malzeme içinde şekil verme alt ve üst sıcaklıkları belirlenmiş ve bu belirleme gözle muayene sonucu tayin edilmiştir. Her malzeme alt ve üst şekil verme sıcaklıkları arasında değişik aralıklarla belirlenen sıcaklık değerlerinde şekillendirilmiş ve oluşan ürünün cidar kalınlığı tespit edilmiştir. Örneğin Spectar malzemesi için farklı sıcaklıklardaki farklı cidar kalınlık dağılımı verilmiş ve karşılaştırmalı olarak diyagram vasıtasıyla sonuçlar ortaya konmuştur. Üç ayrı malzemenin şekil verme sıcaklığına ulaşabilmesi için ne kadar ısıtılması gerektiği en uygun şekil verme sıcaklığı da hesaba katılarak tespit edilmiştir. Taylor ve diğerleri [79], dikdörtgen şekilli bir kalıp kullanarak vakum ve ısı

ile şekil verme prosesinde, süreç değişkenlerinin ürünün son cidar kalınlığı üzerine olan etkisini araştırmıştır. Bu değişkenler levha yüzey sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve termoplastik malzemenin kalıp yüzeyi üzerinde kayması olarak verilmiştir. Vakum ve ısı ile şekil verilen bir ürünün son cidar kalınlığına etki eden en önemli faktör, termoplastik malzeme özelliklerinden ziyade kalıp geometrisi olarak tespit edilmiştir. Kamal ve diğerleri [80], ekstrüzyon şişirme kalıplama yöntemiyle üretilen plastik bir şişenin parizon aşamasındaki şekil değişimi davranışını, şişirme ve soğutma aşamalarındaki nihai ürün kalınlık dağılımlarını incelemiştir. Bu amaç doğrultusunda Resin D ve Resin E adında önceki literatür çalışmalarında yer alan iki farklı Polietilen reçineden yararlanılmışlardır. Çalışmada, Impco (Model A13-R12) vidalı tip bir şişirme kalıplama ekstrüderi kullanılmıştır. Kullanılan kalıp çalışma için özel üretilmiş ve tasarlanmış şeffaf bir şişirme kalıplama takımı olarak belirtilmiştir. Markite (Model 4709) marka bir doğrusal mesafe algılayıcı ekstrüder üzerine monte edilmiş ve işlem sırasında ekstrüder vidasının doğrusal hareketi tespit edilmiştir. Buna ek olarak ergimiş polimer malzemenin sıcaklığı ise kalıp duvarına yerleştirilen bir sıcaklık algılayıcı termo-eleman vasıtasıyla tespit edilmiştir. Şişirme esnasındaki basınç ise kalıp hava girişine monte edilen bir basınç algılayıcı ile belirlenmiştir. Parizon şeklinin şişirme ve soğuma sonrası değişimini incelemek amacıyla 16 mm Bolex (H16) iki adet film kamerası biri kalıbı alt cepheden diğeri ise ön cepheden görece şekilde yerleştirilmiştir. Farklı zamanlarda alınan farklı görüntüler ile elde edilen farklı kalınlık dağılımları sonucu iki ayrı PE malzemenin farklı reolojik ve şekil değiştirme karakteristiği olduğu sonucuna varılmıştır. Rosenzweig ve diğerleri [81], vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde, iki farklı kalıp geometrisi için (derin ve sığ) levha kalınlık değişimini veren denklemleri oluşturmuştur. Bununla birlikte önceki literatür çalışmalarından elde edilen deneysel cidar kalınlığı değerleri oluşturulan teorik kalınlık dağılımını veren ifadelerden elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Hem derin hem de sığ kalıp geometrisi için karşılaştırma yapılmış ve değerler arasında uyum gözlemlenmiştir. Ancak belirgin farkların oluştuğu noktalar için, düzeltme faktörü olarak tanımlanan bir katsayı ile levha kalınlık değerleri çarpılarak düzeltilmiş yeni değerler ortaya konmuştur. Williams [82], PMMA polimer levhaları, 20 dakikalık süre ile ısıtma fırınında bekleterek 160 °C'lik şekil verme sıcaklığına ulaştıktan sonra, fırından alarak hemen çekme test cihazında çekme testine tabi tutmuştur. Farklı şekil değiştirme oranlarında bu deneyler

tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı bir şekilde incelenmiştir. Belirlenen nümerik bir metot ile farklı kalıp geometrileri için cidar kalınlık değişimleri hesaplanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar genellikle verimlilik esasına dayalı olarak üretilen vakum ve ısı ile şekil verme üniteleri ile gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmada 1 mm ve daha kalın termoplastik levha malzemelere vakum ve ısı ile şekil verilebilmesini sağlayan ünite, bir bilimsel araştırma projesi kapsamında tasarlanmış ve üretilmiştir. Geleneksel şekil verme ünitelerinde levhanın çift yönlü ısıtılması söz konusu iken, çalışmada kullanılan şekil verme ünitesinde tek taraflı ısıtma yeterli olmuştur. Şekil verme ünitesini geleneksel seleflerinden ayıran diğer bir özellik ise levha ile kalıp arasında sızdırmazlığı sağlayan ek bir eleman kullanılmamasıdır. Diğer ünitelere nazaran çevrim zamanının uzun olması, deneysel çalışma için tasarlanıp üretilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Literatür çalışmalarında, tek çalışma içerisinde hem amorf hem de kristalin yapıdaki plastik malzemelerin vakum ve ısı ile şekil verme parametrelerinin ve davranışının tespiti yapılmamıştır. Buna ek olarak kısa elyaf içeren rasgele dağılımlı hem amorf hem de kristalin yapıdaki plastik kompozit levhaların şekil değiştirme davranışı tek çalışma içerisinde karşılaştırmalı olarak grafik yöntemle incelenmemiştir. Literatürdeki bu eksiğin giderilmesi amacıyla tez çalışması bilimsel bir kaynak niteliğinde hazırlanmıştır.

Bu çalışmada yapılan faaliyetler birbirini izleyen ve birbirine bağlı incelemelerden oluşmaktadır. Vakum ve ısı ile şekil verme prosesi kullanılarak şekil verilen ürünlerin büyük bir kısmı ambalaj sanayinde üretildiğinden öncelikle ambalaj sanayinin Türkiye’de ve Dünyadaki önemi rakamlarla vurgulanmıştır. Ülkemizde ambalaj sanayinde faaliyet gösteren birçok büyük ve orta ölçekli firma bulunmaktadır. Bu firmalar yarattıkları istihdam ve katma değer düşünüldüğünde ülke ekonomisine hatırı sayılır rakamlar kazandırmaktadır. Ancak ulusal alanda hem özel sektör hem de kamu sektörü ele alındığında vakum ve ısı ile şekil verme prosesi ve özellikleri ile ilgili ayrıntılı bilgi içeren veri tabanının bulunmaması yapılan araştırmaların bilimsellikten uzak olmasına neden olmuştur. Ulusal alanda faaliyet gösteren araştırmacılara vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin tanıtılması, sektörde faaliyet gösteren, AR-GE çalışması yürüten firmalara bilimsel nitelikte bir kaynak oluşturulması amacı güdülerek tez çalışması yürütülmüştür. Çalışma bünyesinde farklı kalınlıklarda termoplastik levha

malzemeler seçilerek vakum ve ısı ile şekil verilmesi öngörülmüştür. Levha malzemeler 1, 2, 3 mm olarak farklı kalınlıklarda ve PS, PP, PVC gibi mühendislik plastikleri arasından seçilmiştir. Ağırlıkça farklı oranlarda cam ve karbon elyaf ilavesi ile Yüksek Yoğunluklu Polietilen ve Polipropilen granüller kullanılarak kısa elyaf takviyeli levhalar elde edilmiştir. Bu kompozit levhaların üretimi Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Araştırma Laboratuvarında bulunan deneysel çalışma için kullanılan plastik malzeme ekstrüderi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan saf ve takviyeli levha malzemelerin tümünün vakum ve ısı ile şekil verme proses parametrelerinin tespiti amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda üç adet basit geometrili kalıp ve bir adet vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi tasarlanmıştır. Tasarlanan ünite ve kalıpların imalatı için kullanılacak finansmanın yaratılması amacıyla tez konusu Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (TÜBAP) birimine proje olarak sunulmuştur. TÜBAP 2010/43 No'lu bilimsel araştırma projesi bünyesinde proje ortağı Yenyurt Makine A.Ş. katkılarıyla vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi ve beraberinde üç adet basit geometrili deneysel çalışma kalıbının tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Şekil verme ünitesinde deforme edilen malzemelerin proses parametreleri ve şekil değiştirme davranışları mevcut kalıp geometrileri için araştırılmıştır. Deneysel çalışma bünyesinde elde edilen vakum ve ısı ile şekil verilmiş ürünler üzerinde simetri eksenleri doğrultusunda kesitler alınarak cidar kalınlık dağılımı Geometrik Elemanlar Analizi ve deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu iki yöntem ile tespit edilen ürün kalınlık dağılımları grafik yöntemle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Levha malzemelerin şekil değiştirme davranışının konik geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı kullanılarak daha iyi açıklanabilmesi için LS-DYNA yazılımı kullanılarak proses simülasyonu yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan kalıpların tasarımı tez çalışmasında $H:D = 1/2$ oranı kullanılarak derin veya derin ile sığ arasında imal edilmiştir. Tasarlanan ve üretilen vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi yapısı itibari ile tek taraflı ısıtmaya imkân sağlamakta bununla birlikte 3 mm kalınlığa kadar levhaların şekil verilmesine imkân vermektedir. Deneysel çalışma içerisinde genel itibari ile 1.5 mm ve daha kalın levha malzemelere şekil verildiğinden dolayı şekil verme prosesi kalın levhalara vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi (Heavy-Gauge Thermoforming veya Cut-Sheet Thermoforming) olarak adlandırılabilir. Kullanılan kalıpların tümü dişi kalıp olarak tasarlanıp üretilmiştir. Şekil verme aşamasında hiçbir

n Şekil verme aparatı ve basınçlı n Şişirme varyasyonu kullanılmamıştır. Uygun sıcaklığa ısıtılan levhaların deformasyonu tamamen vakum yardımıyla gerçekteŐirilmiŐtir. Kalıp içerisinde oluşan vakum -0.1 MPa mutlak basınç değerini aŐmamıŐtır. Sayılan tüm bu proses parametreleri kullanılarak deneysel çalışma icra edilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

BÖLÜM 2

MATERYAL VE METOD

2.1. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Prosesinin Analizi

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde levhanın şekil verme esnasında hangi kuvvetler tarafından şekillendirildiği bilinmesi gereken bir mühendislik hesabıdır. Bununla birlikte önemli gereksinimlerden biride "çekme oranı" (Draw Ratio) teriminin net bir şekilde tespit edilmesidir. Polimer esaslı levhaların şekillendirildiği vakum ve ısı ile şekil verme yönteminde tutucular tarafından sabitlenmiş bir levhada kuvvet analizi yapıldığında[83];

Şekil verme işlemi başladıktan sonra bir "t" anında;

$$F_D = T A^1 \quad (2.1)$$

F_D ; gerdirme kuvveti, T ; levhanın şekil verme sıcaklığındaki dayanımı, A^1 , t anında levhanın gerdirme kuvvetine dik kesit alanı olarak ifade edilebilir. Sürtünme kuvveti ise aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$F_S = C N^\alpha = C (P A)^\alpha \quad (2.2)$$

F_S ; sürtünme kuvveti, N ; normal kuvvet, P ; şekil değiştiren çapak malzemesine uygulanan basınç, A ; tutucular ile kalıp kenarı arasında kalan alan, C ; kalıp yüzeyi ile polimer malzeme arasındaki kinetik sürtünme katsayısı, α ; deneysel değeri 0.67 ile 1 arasında değişen bir katsayıdır. Deformasyon kuvveti yani gerdirme kuvvetinin derin çekme eksenine dik bileşeni F_D^1 pot çemberi altındaki levha malzemesinin gerdirilmeden kalıp ve tutucular arasından kayması için gerekli olan kuvvettir. F_D^1 kuvvet bileşeni başlangıç esnasında daha levha düzlemsel halini korurken değeri sıfırdır.

$$F_D^1 = F_D \cos\beta = T t_0 \pi d \cos\beta \quad (2.3)$$

β levhanın yatayla yaptığı açı olarak tanımlanır. Eğer kalıp kenar düzleminde tutucu ile sabitlenen levhanın çapı, $D = (1+nd)$ olarak tanımlanırsa;

$$F_S = C P^\alpha \{d^2 \pi [(1+n^2)-1]/4\}^\alpha \quad (2.4)$$

Tutucular tarafından sabitlenen levhanın kalıp kenar düzlemi üzerindeki kayması ancak; $F_D^1 < F_S$ olması durumunda sona erer. $\alpha=1$ için;

$$P = 4T t_0 \cos\beta / \{C d [(1+n^2)-1]\} \quad (2.5)$$

Gerdirme kuvvetinin yatay bileşeni, sürtünme kuvvetinden ilk anda büyüktür. Yataydaki gerdirme kuvveti bileşeni sürtünme kuvvetiyle eşit olana kadar pot çemberi yani tutucular altındaki levha malzemesi kalıp kenar düzleminde kaymaya devam eder. Sürtünme kuvveti, gerdirme kuvveti yatay bileşeninden daha büyük olduğu anda levhanın kayması sonlanır ve tutucular ile kalıp kenarı arasındaki levha malzemesi gerdirilir ve şekil değiştirir.

Bahsedilen bu kuvvetler dengesi yanında düzlemsel bir levhadan ısı ve basınç etkisi altında plastik ürünler elde edilebilmesi için çekme oranı olarak tanımlanan parametrenin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gereklidir. Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde iki farklı çekme oranı tanımlanmaktadır[83].

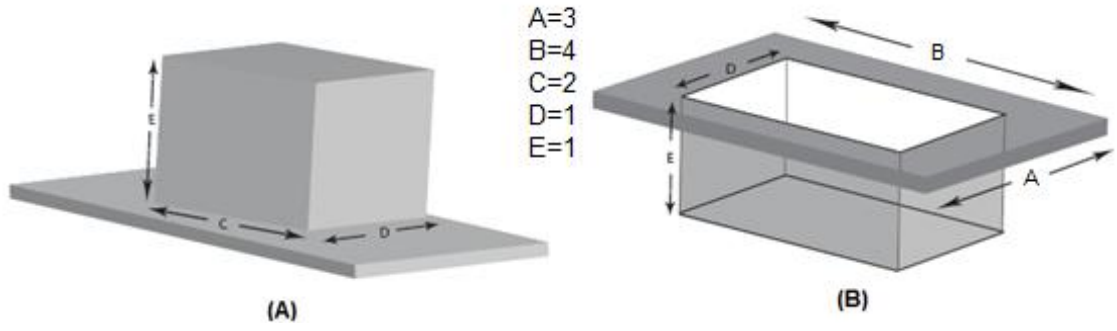
- ◆ Düzlemsel çekme oranı(R_A – Areal Draw Ratio)
- ◆ Doğrusal çekme oranı(R_L – Linear Draw Ratio)

Düzlemsel çekme oranı levhanın düzlemsel gerilme(Biaxial Stretching) etkisi altındaki durumunu belirlemek için kullanılan bir mühendislik parametresi iken doğrusal çekme oranı levhanın tek eksenli gerdirilmesi(Axial Stretching) adına incelenen bir olgudur. Şekil değişimi esnasında hacim sabitliği olduğu varsayılırsa, başlangıçta A_0 yüzey alanına, t_0 cidar kalınlığına sahip olan bir levhanın şekil verme sonrasında alanı A ve kalınlığı t olarak alınır[83];

$$A_0 t_0 = A t \quad (2.6)$$

Eğer bu iki ayrı çekme oranını tanımlamak gerekirse;

$R_A = (\text{Gerekli levha yüzey alanı}) / (\text{Şekillenmiş son parçanın yüzey alanı})$ olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.1 Erkek ve dişi kalıp uygulamalarında düzlemsel çekme oranı tespiti.

Şekil 2.1 (A) figüründe erkek kalıp kullanılarak elde edilen parça gösterilmiştir. Bu durumda düzlemsel çekme oranı;

$$\begin{aligned}
 &= [(A B) - (C D)] / [(A B) - (C D) + E (2C + 2D)] & (2.7) \\
 &= [(3 \times 4) - (2 \times 1)] / [(3 \times 4) - (2 \times 1) + 1 (4 + 2)] \\
 &= 10/16 \\
 &= \% 63
 \end{aligned}$$

Yukarıdaki örnekte ilk cidar kalınlığı şekil verme sonrasında % 37 oranında azalmıştır. Şekil 2.1 (B) figüründe dişi kalıpla vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle elde edilen parça gösterilmiştir. Bu durumda düzlemsel çekme oranı;

$$\begin{aligned}
 &= [C D] / [C D + E (2C + 2D)] & (2.8) \\
 &= [2 \times 1] / [2 \times 1 + 1 (4 + 2)] \\
 &= 2/8 \\
 &= \% 25
 \end{aligned}$$

Bu durumda cidar kalınlığı değişimi % 25 olarak gerçekleşmiştir. İlk cidar kalınlığı % 75 oranında azalmıştır. Levha cidar kalınlığının dağılımı, kullanılan prosesin türü ve kalıp geometrisine bağlıdır. Örneğin bir birim çap ve bir birim yüksekliğe sahip bir silindirik parça dişi kalıpla şekillendirilmek istense düzlemsel çekme oranı;

$$R_A = \text{Levha yüzey alanı} / \text{Son ürün yüzey alanı} \quad (2.9)$$

$$R_A = [\pi (1)^2 / 4] / [\pi (1) (1) + \pi (1)^2 / 4]$$

$$R_A = (\pi / 4) / (5\pi / 4)$$

$$R_A = 0.2$$

$$R_A = \% 20$$

Levha cidar kalınlığı % 80 oranında azalmıştır. Doğrusal çekme oranı ise levhanın şekil verme öncesinde kenarları üzerinde iki nokta arasındaki doğru parçasının uzunluğunun, levha şekillendikten sonraki projeksiyon uzunluğuna oranıdır. Örneğin bir birim çap, bir birim yükseklik değerine sahip silindirik bir parça için doğrusal çekme oranı;

$$R_L = (1)/(1+1+1) \quad (2.10)$$

$R_L = 1/3$ olarak hesaplanır.

2.1.1. Geometrik Elemanlar Analizi (GEA) ve Cidar Kalınlık Dağılımı Eşitliklerinin Konik Geometrilik Kalıplarda Belirlenmesi

Geometrik Elemanlar Analizinin en basit gösterimi Şekil 2.2'de bir levhanın konik kalıp içerisine derin çekilmesidir. Şekil 2.2 (a)'da belirtilen ve polimer levha şekil değiştirmeye başladıktan sonra herhangi bir " θ " anında, ilk kalınlığı t_0 olan levha ve koniklik açısı β , derinliği h_1 olan koni verilmiştir. Kalıbın eğik yüzeyi ile polimer levhanın temasta olan kısmının uzunluğu s olarak tanımlanmıştır. Buna karşın polimer levhanın kalıp ile temasta olmayan bölümü R yarıçapında bir küresel kubbe oluşturmuştur. Küresel kubbeyi oluşturan levhanın kalınlığı her noktada aynı ve t olarak verilmiştir. Küresel kubbenin alanı;

$$A_{cap} = 2 \pi R^2 (1 - \cos\beta) \quad (2.11)$$

Şekil 2.2 (b)'de gösterilen $\theta+d\theta$ anında, θ anındaki küresel kubbeden diferansiyel miktarda malzeme ayrılarak konik kalıp yüzeyinde depolanmaktadır. Kubbe her an gerdirildiği için cidar kalınlığı da azalmaktadır. Küresel kubbe için θ ve $\theta+d\theta$ zamanlarında anlık malzeme dengesi yazılırsa [1, 2, 83];

$$(A t)_\theta = (A t)_{\theta+d\theta} + A_{cone} t \quad (2.12)$$

$$2 \pi R^2 (1 - \cos\beta) t = 2 \pi (R+dR)^2 (1 - \cos\beta) (t+dt) + (2 \pi R t) \sin\beta ds \quad (2.13)$$

R ; küresel kubbenin yarıçapı; h , s ve β cinsinden yazılırsa;

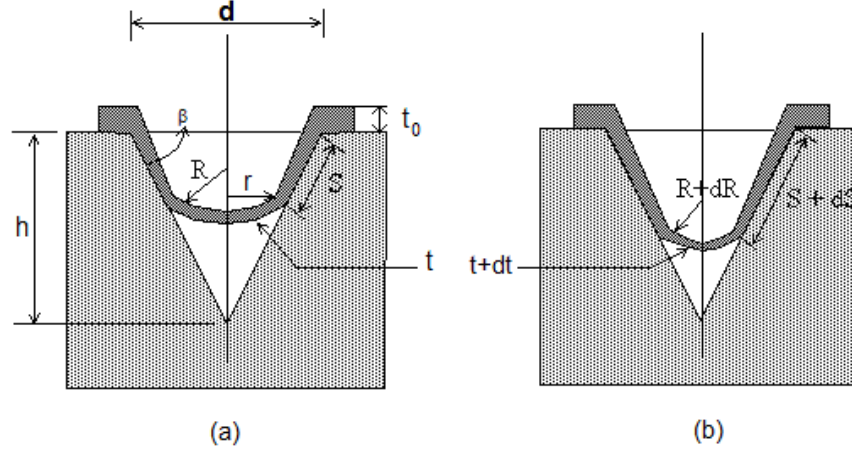
$$R = h - (s \sin\beta)/(\sin\beta \tan\beta) \quad (2.14)$$

$dR = -ds/\tan\beta$ olarak ifade edilirse diferansiyel malzeme dengesi;

$$dt/t = [2 - (\tan\beta \sin\beta)/(1 - \cos\beta)] [\sin\beta/(h - s \sin\beta)] ds \quad (2.15)$$

$$t/t^* = [1 - (s \sin\beta)/h]^{(\sec\beta-1)} \quad (2.16)$$

t^* , $s=0$ 'daki levha cidar kalınlığıdır. Polimer levha, şekil verme sürecinin başında hemen konik kalıp yüzeyine değmez bir miktar sehim verdikten sonra kalıp ile temasa geçer. Levhanın konik kalıp yüzeyine ilk değdiği andaki cidar kalınlığı;



Şekil 2.2 Geometrik Elemanlar Analizi ile polimer levhanın konik kalıp içerisine derin çekilmesi. (a) derin çekme prosesi başladıktan sonra " θ " anı. (b) " θ " anından " $d\theta$ " zaman aralığı sonra.

$$A_0 t_0 = A_{cap} t^* \quad (2.17)$$

$$t^* = (t_0/2)(1+\cos\beta) \quad (2.18)$$

Levha konik kalıbın yan duvarlarına değdiği an ilk levha kalınlığına bağlı olarak;

$$t/t_0 = [(1+\cos\beta)/2] [1 - (2s \cos\beta)/d]^{(\sec\beta-1)} \quad (2.19)$$

yazılır. Eşitlik (2.19) koni geometrili kalıplarda cidar kalınlığı dağılımını veren en genel ifadedir. Bu ifade kesik uçlu koni geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıplarında cidar kalınlığı dağılımını hesaplamak içinde kullanılır. Ancak bu ifadenin kullanımı levha kalıp tabanına değdiği an son bulur. Sonrasında incelmeye devam eden levha kalıp köşelerinde en ince konumunu alır ve soğuma sonrası donar. Yarıçap yüzeyinin olduğu ve levhanın en ince konumuna geldiği bu noktalarda cidar kalınlıkları için iki ve üç boyutlu yaklaşımlar ayrı ayrı hesaplanabilir. İki boyutlu köşelerdeki cidar kalınlığı değişimi Eşitlik (2.20) ve (2.21) ile hesaplanır.

$$t/t_0 = (R/R_0)^K \quad (2.20)$$

$$K = (2 - \alpha \tan(\theta/2)) / (\alpha \tan(\theta/2)) \quad (2.21)$$

Başlangıçta R_0 yarıçapına sahip çeyrek çemberin kalınlığı t_0 olarak verilirse üç boyutlu köşelerde levha cidar kalınlığı dağılımı ise Eşitlik (2.22) ile hesaplanır.

$$t/t_0 = (R/R_0) \quad (2.22)$$

Ancak polimer levhalara şekil verilirken her zaman konik geometrili kalıplar kullanılmayabilir. Ek olarak polimer levha, dikdörtgen veya kare kesitli kanal, üçgen kesitli kanal, kare, dikdörtgen kesitli sıg tepsisi formlarına sahip kalıplarla şekillendirilebilir. Kare veya dikdörtgen kesitli kanal formuna sahip bir kalıp içerisinde polimer levhanın cidar kalınlık dağılımı Eşitlik (2.23) kullanılarak hesaplanır[2].

$$t/t_0 = \exp[-2x/\pi R_0] \quad (2.23)$$

Üçgen kesitli bir kanalda polimer levhanın şekil değişimi ise Eşitlik (2.24)'e göre hesaplanır[2].

$$t/t_0 = (R/R_0)^K \quad (2.24)$$

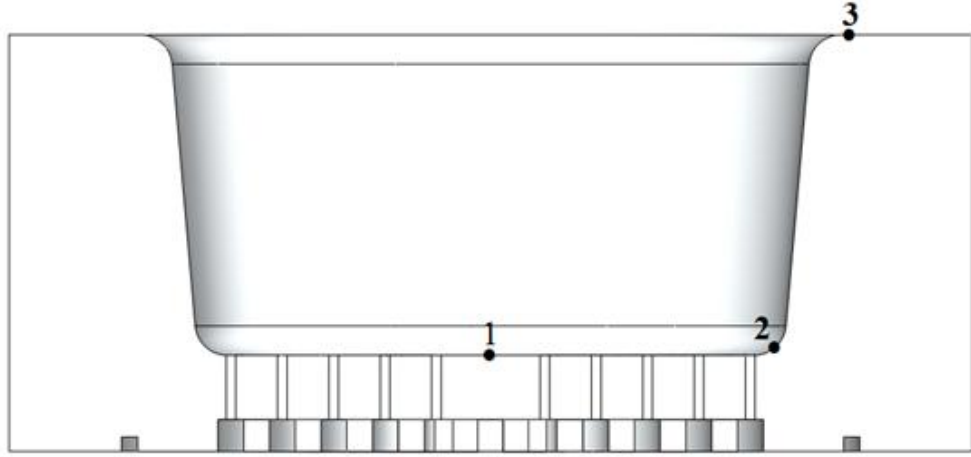
2.1.2.Cidar Kalınlık Dağılımı Eşitliklerinin Silindirik Geometrili Kalıplarda Belirlenmesi

Vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi, plastik levha ve film malzemenin şekillendirildiği ikincil bir üretim tekniğidir. Vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi polimer levhanın ısıtılması ve erkek veya dişi kalıp kullanılarak vakum ve/veya pozitif hava basıncı tahriki ile şekil verilmesi aşamalarından oluşmaktadır. Günümüzde vakum ve ısı ile şekil verme yöntemiyle çok fazla endüstriyel çeşitliliğe sahip ürünün temini sağlanmaktadır. Bu ürünler biyomedikal, bilişim, elektrik, elektronik, ambalaj, savunma, otomotiv, ulaşım sektörü gibi birçok alanda kendine uygulama sahası yaratmıştır. Ürünlerin çeşitliliği üretim yönteminin de sektörden sektöre farklılaşmasına ve vakum ve ısı ile şekil verme yönteminin farklı varyasyonlarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Üretim metodundaki aşamalarda yaratılan farklılık doğal olarak süreç içerisinde kullanılan kalıplarında değişmesine yol açmıştır. Kalıplar vakum ve pozitif hava basıncı altında çalışmakla birlikte, hava basıncı olmadan da eşlenik kalıplarla ürünlerin şekillendirilmesi mümkündür. Vakum ve ısı ile şekil verme kalıpları basit konik, silindirik, yarı küre veya kübik şekiller olmakla birlikte, oldukça kompleks hacimsel boşluklarda ihtiva edebilir. Silindirik geometrili kalıplar da belirtilen basit geometrik kalıp örneklerinden biridir. Bu yapıdaki kalıplarda levha cidar kalınlık dağılımlarının belirlenmesi, elde edilen ürünün dayanımı, kalitesi ve işlevsel özelliklerini yerine getirebilmesi için önemlidir. Silindirik geometrili kalıplarda levha cidar kalınlık dağılımını veren genel ifade Geometrik Elemanlar Analizi (GEA) kullanılarak şekil verme öncesinde ve sonrasında levhanın hacim sabitliği prensibine

dayanarak oluşturulmuş ve malzeme parametreleri bu ifade içerisinde kullanılmamıştır[84]. Silindirik bir kalıbın derin olarak nitelenebilmesi için;

$$H > R \text{ olmalıdır.} \quad (2.25)$$

R silindirin yarıçapı, H ise düşey yönde silindirin yüksekliğidir. Aksi takdirde silindirik kalıp sığ olarak adlandırılır ve levha cidar kalınlığı dağılımı buna göre belirlenir. h_0 polimer levhanın ilk kalınlığı, s polimer levhanın kalıp yan duvarlarına temas ettiği düşey mesafe, R kalıp yarıçapı olarak verilmiştir. Şekil verme işlemi sonrasındaki ilk adım olarak polimer levha yarı küre şeklinde bir baloncuk oluşturacaktır. Hacim sabitliği Geometrik Elemanlar Analizi(GEA) uyarınca yazılırsa;



Şekil 2.3 Silindirik bir vakum ve ısı ile şekil verme kalıbının tam kesit görünümü.

$$\blacklozenge \pi R^2 h_0 = 2 \pi R^2 h_1 \quad (2.26)$$

$$\blacklozenge h_1 = h_0/2 \quad (2.27)$$

Bu noktadan sonra polimer levha kalıp yan duvarlarına temas edecek, diferansiyel zaman aralığı sonrasında kalıp yan duvarında yüksekliği ds olan bir silindirik hacim ve yarıçapı R, kalınlığı h olan bir yarı küre oluşur. Levha kalıp yan duvarına değdiği an ve diferansiyel zaman aralığı sonra hacim sabitliği yazılırsa;

$$\blacklozenge 2 \pi R^2 h = 2 \pi R^2 (h+dh) + 2 \pi R h ds \quad (2.28)$$

$$\blacklozenge dh/h = - ds/R \quad (2.29)$$

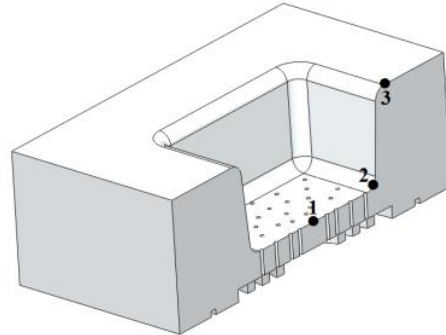
Sınır koşulları uygulanarak $h = h_1$ iken $s = 0$ olur. Bu değerler denklemde yerine konursa;

$$h = (h_0/2) e^{(-s/R)} \quad (2.30)$$

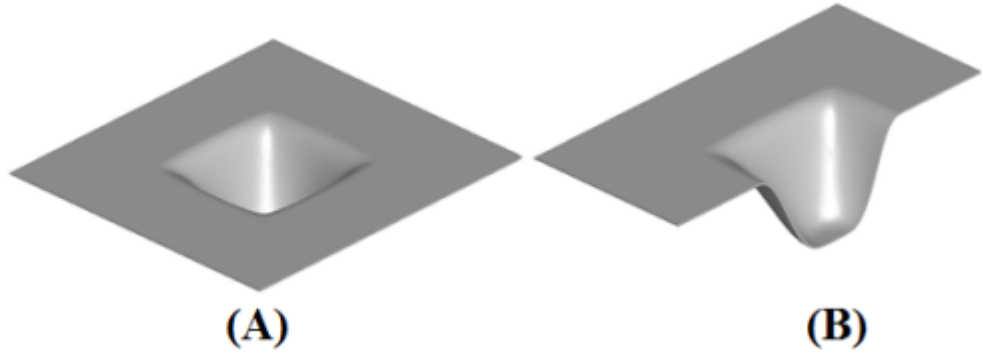
Silindirik kalıplar için levha cidar kalınlığını verir[84]. Eşitlik (2.30) kullanılarak polimer levhanın derin ve silindirik geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıplarında kalıp tabanına değene kadar cidar kalınlık dağılımı hesaplanabilir. Polimer levha kalıp tabanına değdikten sonra Eşitlik (2.20) ve (2.21) kullanılarak polimer malzemenin en son temas ettiği noktaya kadar her noktada cidar kalınlık dağılımının tespiti mümkündür. Tez çalışması içerisinde Geometrik elemanlar Analizi kullanılarak silindirik kalıpta yapılan hesaplamalar kalıp tabanının merkezindeki "1" noktasından başlayarak sırasıyla "2" ve "3" noktaları doğrultusundadır.

2.1.3. Cidar Kalınlık Dağılımı Eşitliklerinin Kübik Geometrili Kalıplarda Belirlenmesi

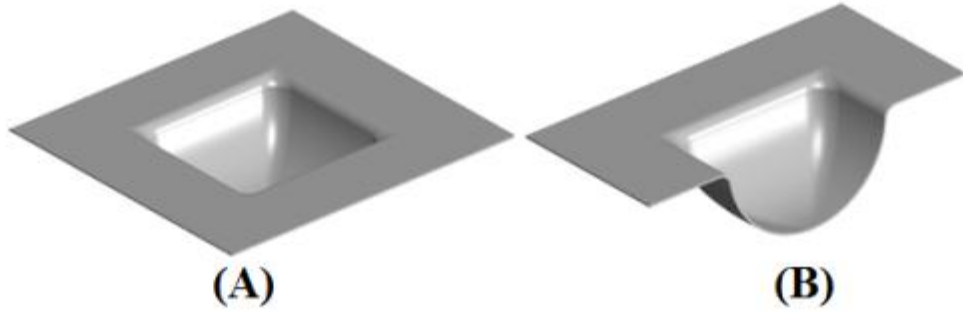
Kübik geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıbında polimer levhanın kalıp tabanına değdiği noktadaki cidar kalınlığı, Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilirse, oluşan şeklin karmaşıklığı nedeniyle hacim hesabı yapmak zordur. Polimer levhanın kalıp tabanına değdiği an sahip olduğu hacim; her noktasındaki cidar kalınlığı sabit kabul edilerek toplam yüzey alanı ile cidar kalınlık değerinin çarpımı olarak hesaplanmıştır. Polimer levhanın ısıtılmaya başladıktan sonra vakum etkisiyle kalıp tabanına temas ettiği durum için şekil değiştirme karakteristiğini belirleyen bir çalışma yürütülmüştür. Polimer levhanın şekli, bilgisayar destekli tasarım yazılımı olan SolidWorks kullanılarak parametrik katı model olarak oluşturulmuştur.



Şekil 2.4 Kübik geometrili bir vakum ve ısı ile şekil verme kalıbının tam kesit görünümü.



Şekil 2.5 Polimer levhanın kübik vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı içerisinde öngörülen şekil değişimi. (A- tam görünüm, B-tam kesit görünümü)



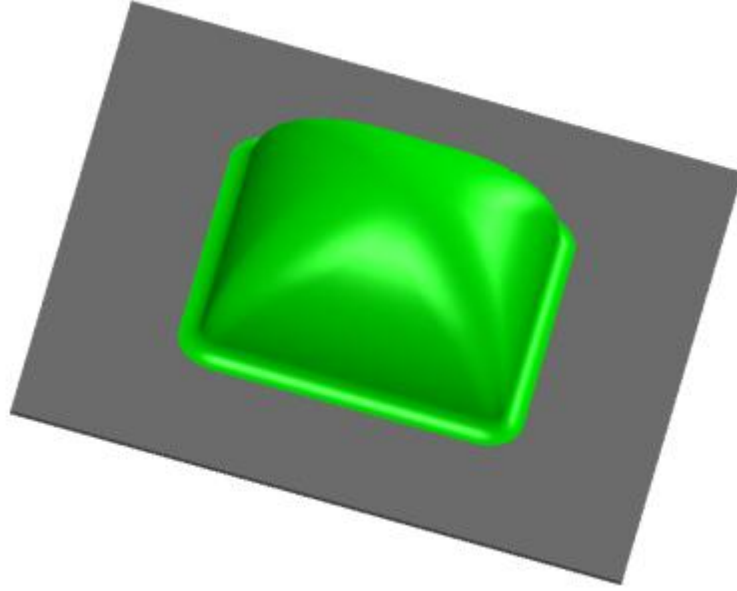
Şekil 2.6 Polimer levhanın kübik vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı içerisinde öngörülen şekil değişimi. (A- tam görünüm, B-tam kesit görünümü)

Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 polimer levhanın deformasyonu sırasında aldığı şekli temsil etmektedir. Ancak literatürdeki çalışmalar ve tez kapsamındaki deneysel çalışmadan elde edilen tecrübeler doğrultusunda Şekil 2.6 levhanın şekil değişimi için esas alınmıştır. Polimer levhanın şekil değişimi Geometrik Elemanlar Analizine göre aşağıdaki gibi yazılır (Eşitlik 2.31).

$$(150 \times 150 \text{ mm}^2) \times t_0 = 46524.24 \text{ mm}^2 \times t \quad (2.31)$$

Polimer levhanın ilk yüzey alanı $150 \times 150 \text{ mm}^2$, cidar kalınlığı t_0 , Şekil 2.7'de verilen şekil değiştirmiş levhanın kalıp tabanına değdiği anki yüzey alanı 46524.24 mm^2 , et kalınlığı ise t ile verilmiştir. Eşitlik (2.31) kullanılarak polimer levha kübik kalıp

tabanına temas ettiği durumda cidar kalınlığı tespit edilir. Polimer levhanın kalıbın diğer noktadaki kalınlık dağılımları Eşitlik (2.21) ve (2.24) yardımıyla hesaplanır.



Şekil 2.7 Polimer levhanın kalıp tabanına değdiği anki toplam yüzey alanı. (46524.24 mm², Eşitlik (2.31))

2.2.Deneysel Çalışma

Deneysel çalışma faaliyetleri Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Araştırma Laboratuvarında yürütülmüştür. Deneysel çalışma faaliyetleri içinde amaçlanan şekil verme operasyonları, Yenyurt Makine A.Ş. firması tarafından üretilen laboratuvar tipi vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi (Lab-Type Thermoformer) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarımı Yrd. Doç. Dr. Selçuk ERDOĞAN ve Mak.Yük.Müh. Olcay EKŞİ, İmalatı Yenyurt Makine A.Ş tarafından yapılan, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri(TÜBAP) Birimi tarafından desteklenen vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Yeni yurt Makine A.Ş. tarafından üretilen laboratuvar tipi vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi.

2.2.1. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Ünitesini Oluşturan Temel Elemanlar

Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi birkaç temel elemandan oluşmaktadır. Ünitenin sorunsuz bir şekilde çalışmasını ve şekil verme faaliyetlerini yürütmesini sağlayan bu parçalar aşağıda sırasıyla verilmiştir. Bunlar;

- ◆ Gövde
- ◆ Isıtıcı sistem
- ◆ Vakumlama sistemi
- ◆ Elektrik panosu
- ◆ Kalıplar

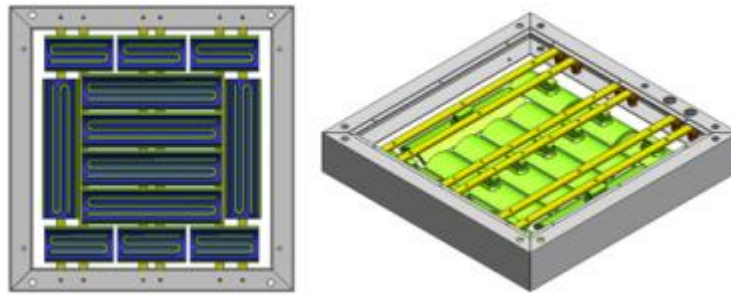
2.2.1.1. Gövde

Gövde olarak adlandırılan sistem içerisinde hareketli ve hareketsiz tablalar, 4 adet taşıyıcı sütun temel yapıyı oluşturmaktadır. Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinin hedeflendiği üzere 1 ile 3 mm arasında kalınlığa ve 300x300 mm² yüzey alanına sahip takviyeli kompozit levhaları şekillendirebilmesi için gerekli rijitliği gövde sistemi

sağlamaktadır. Ayrıca gövde diğer sistem elemanlarını da bünyesinde bulundurarak sistemin bütünlüğünü teşkil etmektedir.

2.2.1.2. Isıtıcı Sistem

Isıtıcı sistem toplam 12 adet ısıtıcı eleman içermektedir. Bu elemanların yarısı 500 Watt gücünde, diğer yarısı ise 1000 Watt gücünde Elstein marka seramik ısıtıcılardır. Toplam ısıtma elamanı kapasitesi 9 kW olmakla birlikte ısıtıcı elemanlar hareketli tablaya bağlı olarak yukarı ve aşağı düşey yönde hareket etmektedir. Isıtma işlemi sırasında polimer levha ile ısıtıcı eleman arasındaki mesafe yaklaşık 50 mm civarındadır. Tasarımın bir gereği olarak deneysel çalışma amaçlanarak imal edilen vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinde polimer levhanın tek taraflı ısıtması gerçekleştirilmektedir. Daha verimli bir ısıtma ve farklı yüzey alanlarına sahip termoplastik polimer levhalarında ısıtılabilmesi için ısıtıcı elemanlar çift zonlu olarak çalışmaktadır. İlk ısıtıcı bölge 30x30 cm²'lik yüzey alanını ısıtabilir. Diğer ısıtıcı bölge ise 50x50cm²'lik yüzey alanını ısıtma kapasitesine sahiptir. Çift bölgeden oluşan ısıtıcı sistem iç ve dış ısıtıcı elemanların ayrı ayrı çalıştırılabilmesine imkân vermektedir. Her iki bölgedeki ısıtıcı eleman sıcaklıkları dijital olarak ayarlanabilmektedir. Isıtıcı sistemin üç boyutlu katı modeli Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 Isıtıcı tablanın üç boyutlu katı modelinin alt ve izometrik görünümü.

2.2.1.3. Vakumlama Sistemi

Vakumlama sistemi Becker U 4.20 Yağlı tip (yağ soğutmalı) vakum pompası üzerine kurulmuştur. Seçilen vakum pompası, 0.55 kW gücünde, 18 m³/h debiye sahip ve -999 mbar vakum oluşumuna imkân vermektedir. Vakum pompasına ilaveten kalıplar ile pompa arasındaki bağlantıyı sağlayan vakum hattı da bu sistem içerisinde yer almaktadır. Vakum sistemi ve elemanları Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Vakum pompasının çalışması elektrik panosu üzerinde bulunan Start/Stop düğmeleri ile sağlanmaktadır. Ayrıca vakum pompası ve kalıp arasında bulunan hat üzerinde vakum açma kapama vanası, vakum boşaltma vanası ve vakum saati yer almaktadır. Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesiyle yapılan şekil verme operasyonlarında maksimum -720 mmHg vakum oluşumu tespit edilmiştir.



Şekil 2.10 Vakumlama sistemi ve elemanları.

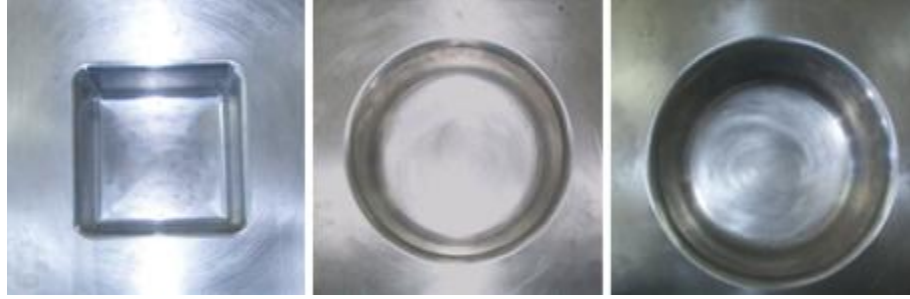
2.2.1.4. Elektrik Panosu

Elektrik panosu şekil verme ünitesi üzerinde bulunan ve elektrikle çalışan yardımcı sistemlerin enerjisinin verildiği anahtar elemandır. Isıtıcı elemanlar ve vakum pompasının çalışması esnasında oluşabilecek olumsuz koşullar(sistemin aşırı akım çekmesi) göz önüne alınarak devre güvenlik elemanlarını içeren elektrik panosu,

ısıtıcıların dijital olarak kontrol edildiği iki adet kontrol ekranı ve vakum pompasının açma kapama anahtarını üzerinde barındırmaktadır.

2.2.1.5. Kalıplar

Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinde uygun sıcaklığa kadar ısıtılan termoplastik levhanın vakum yardımıyla istenen şekle kavuşmasını sağlayan eleman kalıplardır. Kalıplar deneysel çalışmanın niteliği göz önüne alındığında alüminyum malzemedен imal edilmişlerdir. Bu çalışmada üç farklı geometride konik, silindirik ve kübik yapıda vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı imal edilmiş ve deneysel çalışmada kullanılmıştır. Kalıplara ait görüntüler Şekil 2.11'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kalıplar talaşlı şekil verme yöntemiyle imal edilmiştir.



Şekil 2.11 Deneysel çalışma içinde kullanılan sırasıyla kübik, silindirik ve konik vakum ve ısı ile şekil verme kalıpları.

2.2.2. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Ünitesinin Tasarımı ve İmalatı

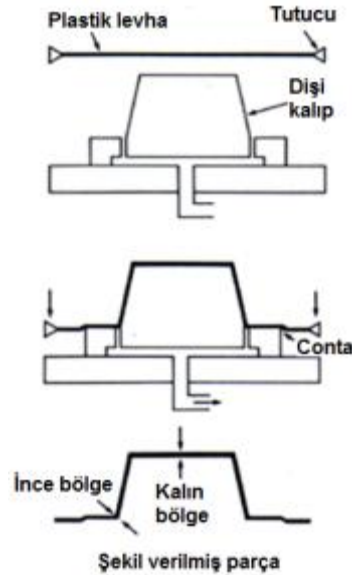
Deneysel çalışma amacıyla tasarlanan ve imal edilen Laboratuvar Tipi Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi tamamıyla Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen bir proje dâhilinde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarım altı aylık bir süreç içerisinde, ünitenin imalatı ise bir ay gibi kısa bir süre içerisinde tamamlanmıştır. Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi, deneysel çalışma amacı ile tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deneysel çalışma içerisinde farklı mühendislik termoplastiklerinin vakum ve ısı ile şekil verme parametrelerinin belirlenmesi, takviye elemanı içeren farklı termoplastik kompozit levhaların sıcaklık ve vakum etkisi altında

şekil değiştirme karakteristiğinin incelenmesi, şekil verme öncesinde ve sonrasında malzemenin mekanik özelliklerindeki değişim, içyapı değişimi elyaf yönlenmeleri gibi unsurların değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak literatür taraması yapılmış deneysel amaçlı kullanılabilen bir vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinin temel bileşenleri araştırılmıştır. Vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi ve varyasyonları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.2.2.1. Tek Adımda Şekil Verme Prosesi

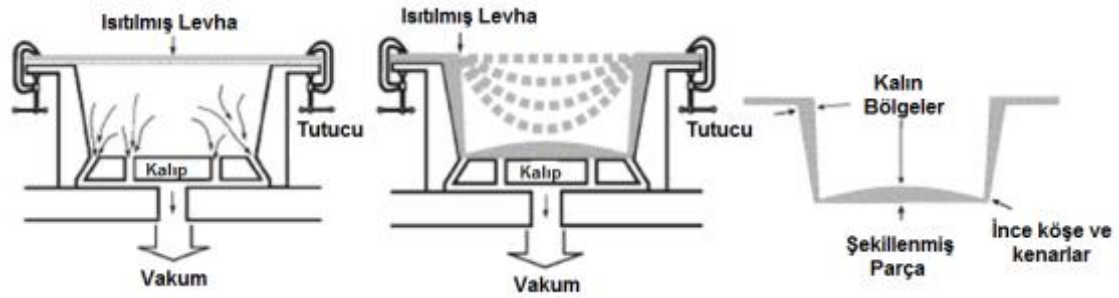
Beş farklı türde tek adımda şekil verme operasyonu bulunmaktadır;

- ♦ **Erkek kalıpla şekil verme:** Tutucular tarafından sıkıca sabitlenmiş ve uygun sıcaklığa ısıtılmış levha erkek kalıp üzerine düşürülür veya levha sabit tutularak kalıp levhaya doğru yükseltilerek şekil verme işlemi gerçekleştirilir. Levha kalıba dokunduğu an, o bölgede gerdirme devam etmez. Levhanın kalıbın şeklini doğru ve iyi biçimde alabilmesi için basınç farkı oluşumu istendiğinde vakum ve pozitif hava basıncı kullanılabilir. Bu metotla şekil verilen parçanın tabanı kalın, yan duvarları ise ince olmaktadır(Şekil 2.12)[1].



Şekil 2.12 Erkek kalıp uygulamalarında prosesin şematik gösterimi ve Ürün cidar kalınlığının değişimi.

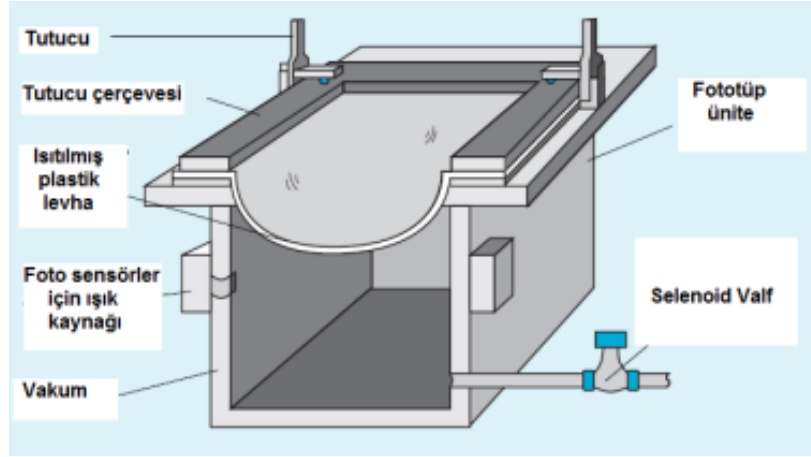
- ◆ **Dişi kalıpla şekil verme:** Şekil verilecek plastik esaslı levha dişi kalıp yatay düzlemi üzerine rijit bir şekilde, sızdırmazlık koşulları sağlandıktan sonra sabitlenir. Sonrasında uygun sıcaklığa ısıtılan levha vakumun uygulanmasıyla beraber şekil değiştirmeye başlar. Kalıp yüzeyiyle ilk temas eden noktalarda cidar kalınlığı soğuma nedeniyle daha fazladır. Bu proseste kalıptan çıkan son parçada pot çemberi altından çıkan artık kısımlar kalın kalmakta, yan duvar cidar kalınlıkları artan derinlikle beraber incelmektedir. En ince cidar kalınlığı ise levhanın en son kalıp yüzeyine temas ettiği noktalar olan alt taban köşeleridir. Bu proses Şekil 2.13'te şematize edilmiştir[1].



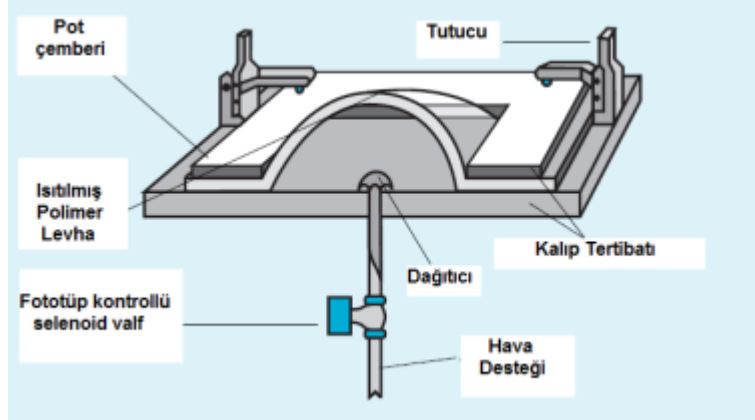
Şekil 2.13 Dişi kalıpla şekil verme operasyonu.

- ◆ **Serbest şişirme prosesi:** Bu proseste sıkıca sabitlenmiş ve uygun sıcaklığa ısıtılmış polimer levha sızdırmazlık unsuru unutulmaksızın pozitif hava basıncı veya vakum oluşumu sonrasında serbest formlara şişirilir. Levhaya temas eden hava, kontrollü soğutularak levhanın aldığı son şekilde katılaşması sağlanır. Bu yöntemde levha herhangi bir kalıp yüzeyiyle temas etmediğinden dolayı oldukça pürüzsüz bir yüzeye sahip olmaktadır. Bunu yanında sadece hava basıncı, levhanın şekillenmesinde rol oynadığı için üretilen son şeklin cidar kalınlığı hemen hemen her noktada aynıdır. Proses işleyişi içerisinde levhanın nereye kadar şişirileceğini bir fotosel ünitesi belirlemektedir. Hava basıncı oluşumu sonrasında şişirilen geometrik oluşumun yüksekliği istenen değere geldiğinde fotosel tarafından algılanarak basınç

sabitlenir. Sonrasında soğuma ile birlikte son ürün elde edilir. Şekil 2.14 ve Şekil 2.15 bu süreci şematize etmektedir[1].



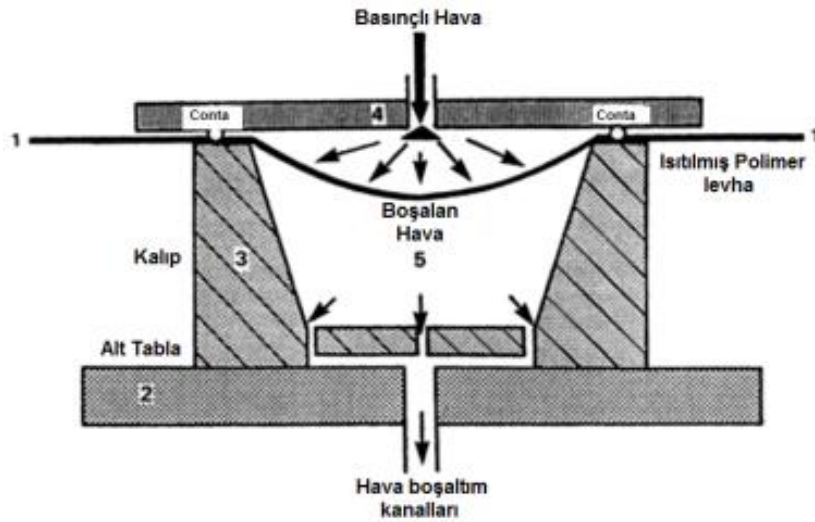
Şekil 2.14 Vakum yardımıyla serbest şekil verme prosesi(Free Blowing with vacuum)



Şekil 2.15 Hava basıncıyla serbest şekil verme prosesi(Free Blowing with air pressure)

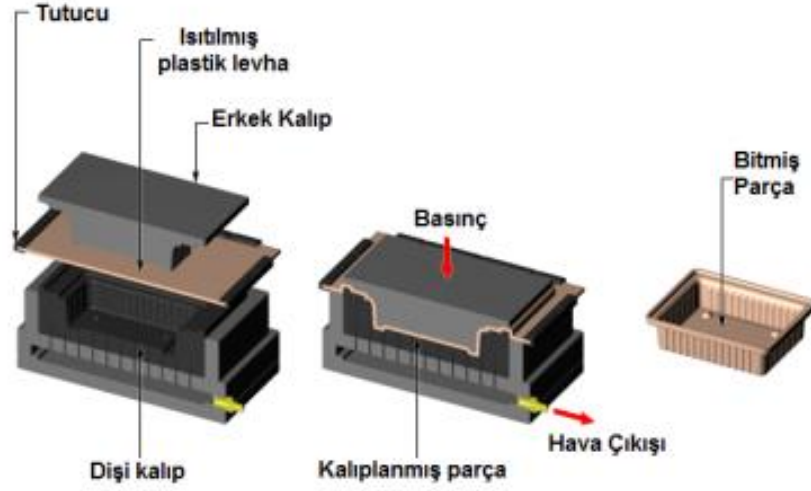
- ♦ **Hava basıncıyla şekil verme:** Pozitif hava basıncıyla şekil verme prosesinin vakumla şekil verme yönteminden tek farkı diferansiyel basınç değişiminin pozitif hava basıncından sağlanmasıdır. İşleyiş olarak süreçler benzerdir. Bu proseste levha uygun şekil verme sıcaklığına getirilir, tutucular yardımıyla sabitlenir. 1.4 MPa (200

psi)'lık basınç değerlerine dahi ulaşılabilir. Sonrasında hava basıncı levhayı kalıp yüzeyine iterek şekil verme işlemi tamamlanmış olur. Bu yöntem ile şekil verilmesi zor polimerlerin kullanıldığı süreçler başarı ile sonuçlandırılabilir. Yüksek detaylı kalın cidar kalınlığına sahip ürünlerin bu yöntemle üretilmesi mümkün olabilmektedir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Basınçlı hava ile şekil verme prosesi(Pressure Forming) 1-Isıtılmış plastik esaslı levha, 2-Alt tabla, 3-Kalıp tertibatı, 4-Sızdırmazlığı sağlayan contalar ve basınç oluşumunu sağlayan üst tabla, 5. levhanın yer değişimiyle birlikte kalıp içerisindeki havanın kalıp dışına tahliyesi.

- ♦ **Eşlenik kalıplarla şekil verme:** Oldukça rijit olan (PS köpük) polimerlerin şekillendirilmesinde sıklıkla kullanılan bir süreçtir. Bu yöntemde şekil verme sıcaklığındaki plastik esaslı levha alt ve üst kalıp yarılarına karşın sıkıca sabitlenir. Erkek ve dişi kalıpların eş zamanlı hareketi sonrasında iki kalıp yarıları kapanır ve levha şekillenir. Levha cidar kalınlığındaki tolerans iki kalıp arasındaki hacimsel toleransla belirlenir. Tatmin edici bir malzeme akışının sağlanması, uygulanan şekil verme kuvvetinin oldukça yüksek olmasıyla sağlanabilir. Fakat uygulanan basınç genelde 1MPa (150 psi) ile 0.34 MPa (50 psi) arasında değişmektedir. Bu süreç Şekil 2.17’de gösterilmiştir[1].



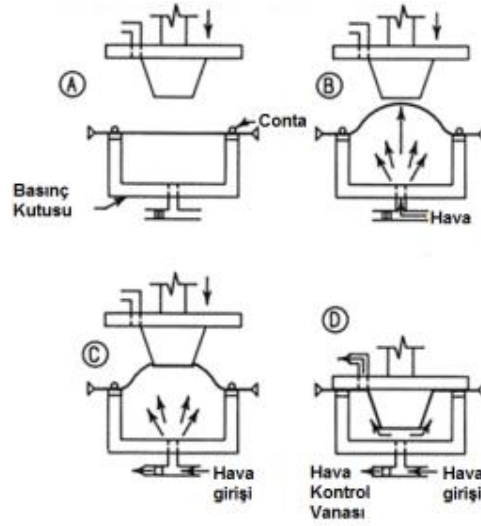
Şekil 2.17 Mekanik şekil verme prosesi (Matched Die Forming)

2.2.2.2.Çok Adımda Şekil Verme Prosesi

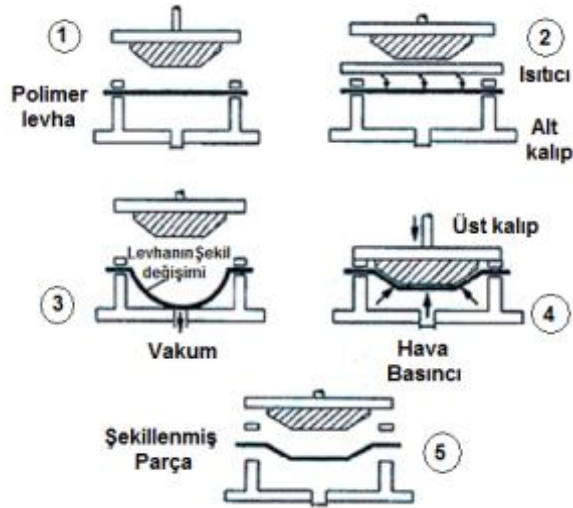
Dört farklı türde çok adımda şekil verme operasyonu bulunmaktadır;

- ◆ **Basınçla şişirerek erkek kalıpla şekil verme:** Tutucular tarafından sabitlenmiş uygun şekil verme sıcaklığında olan levha, hava basıncıyla gerdirilerek bir yarı balon oluşturulur. Genelde kullanılan basınç değerleri, 0.014 MPa ve 0.055 MPa(2-8 psi) değerini aşmaz. Sonrasında erkek kalıp bu balon içerisine daldırılır. Soğuma gerçekleştiğinde hava basıncı kesilir. Oluşan parçanın cidar kalınlığı erkek kalıpla şekil verme operasyonuna nazaran daha düzgün dağılımlı olmaktadır. Bu üretim yöntemi Şekil 2.18'de gösterilmiştir[1].
- ◆ **Vakum ve hava basıncı ile şekil verme:** Bu yöntem işleyiş açısından izlenen adımlar göz önüne alındığında bir önceki şekil verme prosesinin değişik bir uygulamasıdır. Bunun dışında tüm aşamalar Şekil 2.18'de bahsedilen adımlara uygun gerçekleştirilir. Yine uygun şekil verme sıcaklığında tutulan polimer levha, tutucular yardımıyla sabitlenir. Sonrasında vakum uygulanarak levha dişi kalıp içerisine çekilerek yarı küresel geometriye sahip olması sağlanır. Bu ön şekil verme sonrasında erkek kalıp levhaya temas etmek üzere hareket eder. Temas sağlandıktan hemen sonra vakum yerini hava basıncına bırakır. Uygulanan basınçla beraber erkek

kalıp yüzeyine yapışan levha soğuyarak şekillenir. Tüm aşamalar Şekil 2.19'da gösterilmiştir[1].

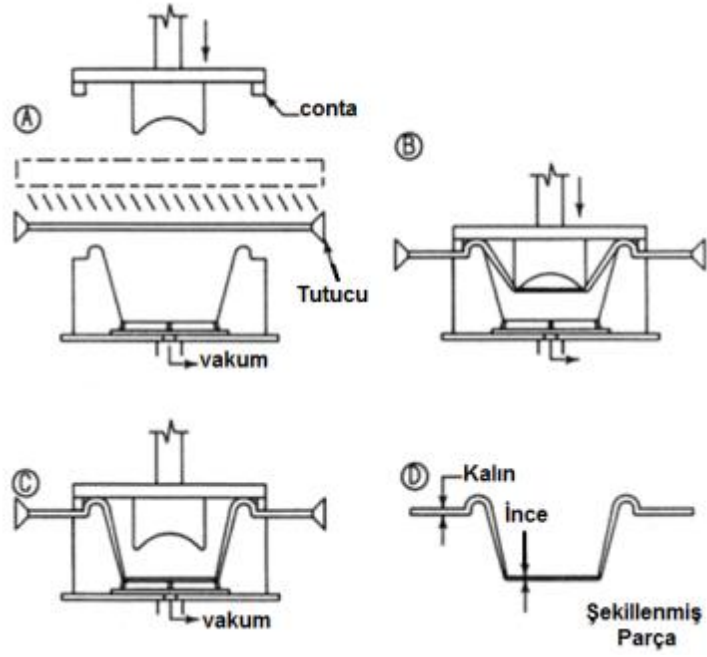


Şekil 2.18 Basınçla şişirerek erkek kalıpla şekil verme prosesi (Billow Drape Forming)

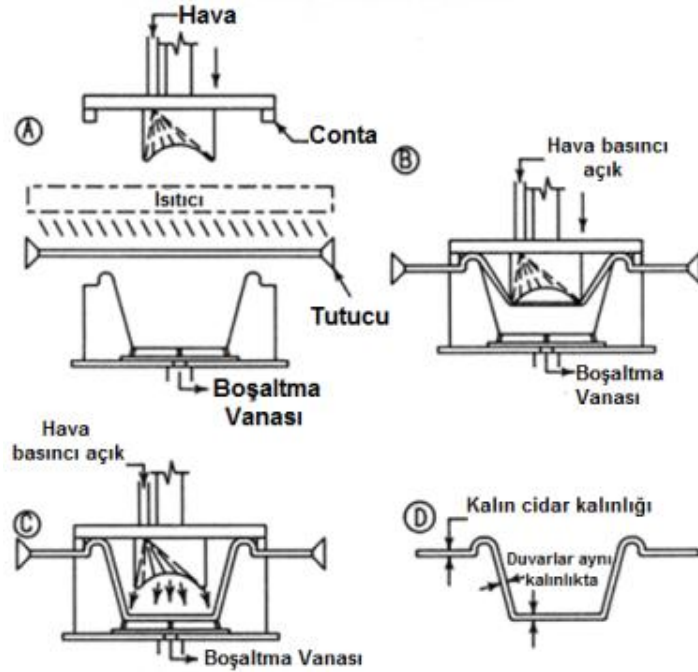


Şekil 2.19 Vakum ve hava basıncı ile şekil verme prosesi, 1-Isıtılmış plastik levhanın tutucular yardımıyla sabitlenmesi, 2-Polimer levhanın ısıtıcılar tarafından uygun sıcaklığa kadar ısıtılması, 3-Vakum sonrası şekil değişimi, 4-Hava basıncı uygulaması sonrasında levhanı erkek kalıp yüzeyine yapışması, 5-Tutucuların açılmasıyla birlikte soğuyan ve katılaştıran levhanın son ürün haline gelmesi.

- ◆ **Hava basıncı ile ön gerdirme sonrası vakumla şekil verme:** Şekil verme için gerekli işlemler yerine getirildikten sonra, levha uygulanan hava basıncı sonrasında bir ön gerdirmeye maruz bırakılır. Bunun amacı levha kalıp yüzeyine temas etmeden cidar kalınlığı dağılımının birbirine yakın olmasını sağlamaktır. Sonrasında hava basıncı kesilerek vakum uygulanır. Soğuma gerçekleştiğinde parça kalıptan çıkarılarak kesim ve çapak alma ünitesine aktarılır. Bu yöntem bir dişi kalıp uygulamasıdır. Dişi kalıpla şekil verme prosesinden tek farkı işlem öncesinde cidar kalınlığının her noktada aynı olmasını sağlamak için bir ön şişirme yapılmasıdır[1].
- ◆ **Mekanik yardımcı destekli şekil verme prosesi:** Şekil verme işlemi öncesinde çoğunlukla bir ön gerdirme aşaması bulunmaktadır. Bu çoğu zaman vakum veya hava basıncı ile tahrik edilerek oluşturulsa da kalın ve orta kalınlıktaki levhalara şekil verilmesi gerektiğinde mekanik yardımcıları kullanılır. Bunlar en kaba tanımla deforme edilecek levhanın yüzeyine temas eden prizmatik kesitli takoz, ıstampa olarak adlandırılan parçalardır. Bu yöntem dâhilinde şekil verme işlemi öncesinde polimer esaslı levha, tutucular tarafından sıkıca sabitlenir. Isıtıcılar tarafından yeterli sıcaklığa ulaşabilmesi için ısıtıcılar levhaya uygun konuma getirilir. Isıtma işlemi tamamlandıktan sonra iki kalıp yarısı kapanarak sızdırmazlık koşulları sağlanmış olur. Mekanik yardımcının düşey yönde hareketi ile levha alt kalıba doğru itilerek bir ön gerdirme gerçekleştirilir. Sonrasında alt kalıpta oluşan vakum sayesinde levha şekillenerek soğuma işlemi tamamlanır. Bu şekil verme prosesi mekanik yardımcı destekli vakumla şekil verme prosesi (Plug Assist Vacuum Forming) olarak adlandırılır. Bu proses Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Eğer şekil verme operasyonunda ön gerdirme işleminden sonra levhanın şekillendirilmesi için vakum yerine hava basıncı kullanılıyorsa şekil verme prosesi Mekanik yardımcı destekli hava basıncı ile şekil verme (Plug Assist Pressure Forming) adını alır. Bu proses Şekil 2.21'de gösterilmiştir. Mekanik yardımcı olarak kullanılan eleman ön gerdirme işlemini yaparken levha yüzeyine temas etmektedir. Bu yüzeyin şekil verme esnasında kalınlığının değişmediği ve şekil değiştirmedeği kabul edilir. Bu yüzden mekanik yardımcıların levha yüzeyine değen yüzey alanı mümkün olduğunca küçük olmalıdır[1].



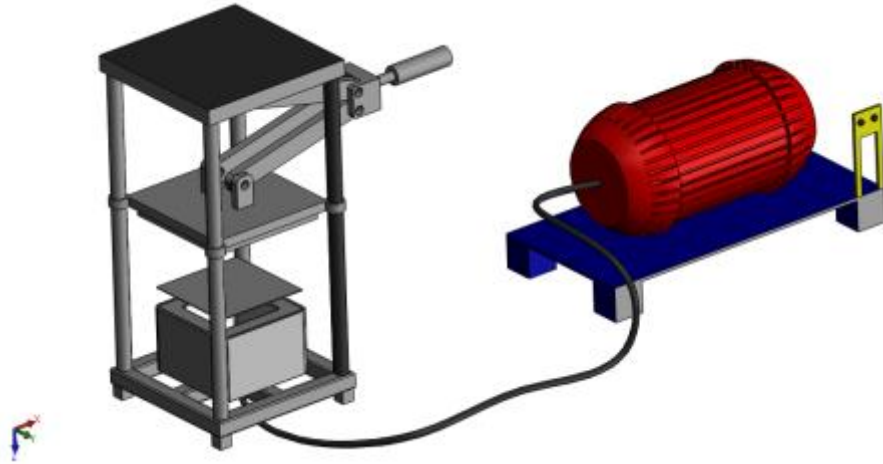
Şekil 2.20 Mekanik yardımcı destekli vakum ile ısıl şekil verme prosesi(Plug Assist Vacuum Forming).



Şekil 2.21 Mekanik yardımcı destekli hava basıncı ile şekil verme prosesi (Plug Assist Pressure Forming)

2.2.2.3. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Ünitesinin Tasarım ve Üretim Aşamaları

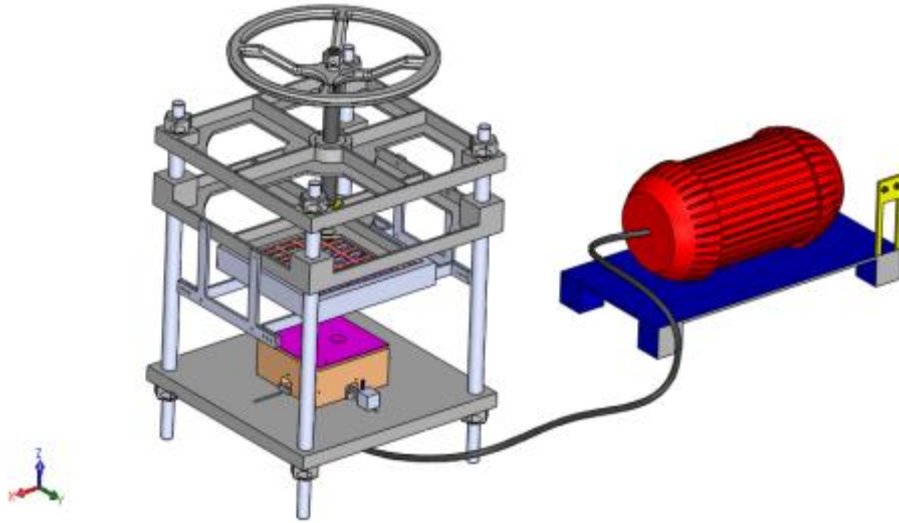
Ünitenin genel parçaları, şekil verme bölümü, kalıplar, vakum oluşumunu sağlayan elemanlar ve ısıtıcılar olarak sıralanabilir. Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi tasarımında ticari bir bilgisayar destekli tasarım yazılımı olan SolidWORKS yazılımı kullanılmıştır. Yazılım, Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunmaktadır. Öncelikle mevcut ünitenin boyutlandırması taslak olarak yapılmıştır. Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesini oluşturan temel ekipmanlar üç boyutlu olarak katı model haline getirilmiş, ünitenin hareketli olarak çalışması ve mekanik şekil verme kabiliyetine karar verilmiştir. Bu aşamadan sonra tasarım, yürütülen bilimsel araştırma projesinin proje ortağı olan Yenyurt Makine A.Ş. yöneticilerine bir seminer dâhilinde tanıtılmıştır. Tasarım aşaması içerisinde gerek kullanılacak malzeme, gerek toplam maliyet ve diğer unsurlarda göz önüne alınarak gerekli fizibilite çalışmaları yapılmış, tasarıma devam edilmiştir. Ünitenin ilk tasarımı Şekil 2.22'de gösterilmiştir.



Şekil 2.22 Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinin taslak katı modeli.

İlk tasarım aşaması sonrasında ortaya çıkan vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi; gövde ve gövdeyi oluşturan dört sabit kolon, pnömatik tahrikli biri hareketli ikisi sabit üç tabla, hareketli tabla üzerinde ısıtıcı ve tutucu çerçeve, alt sabit tabla üzerinde kalıp ve gövde dışında bulunan vakum elemanlarından oluşmaktaydı. Ancak yapılacak çalışmanın deneysel bir çalışma olması ve bir levhaya şekil verme operasyonu için

gerekli zamanın yani çevrim zamanının kısıtlı olmamasından dolayı hareketli tablanın pnömatik piston ile tahrikinin mekanik olarak bir vidalı sistem ile sağlanmasına karar verilmiştir. Yapılan bu değişiklikte bir vida mekanizması ile mekanik tahrikin daha ekonomik imal edilebilecek olması da düşünülmüştür. Tasarlanan ünitenin üretime uygun hale getirilmesi yapılan yoğun geri besleme ile AR-GE çalışmaları sonrasında sağlanmıştır. Geri besleme ile tasarım aşamasında vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinin eski üç boyutlu görünümü Şekil 2.23'te gösterilmiştir. Hareketli ve sabit tablalar 10 mm kalınlığında sac malzemedan imal edilmiştir. Tablaların daha mukavim ve rijit olabilmesi için birbirine dik konumda 10 mm kalınlığında lamalar kaynaklanarak konstrüksiyonun sağlamlaştırılması öngörülmüştür. Sonrasında sabit tablalardan fazla kısımlar simetrik dekoratif unsurlar halinde kesilerek tasarımdan çıkarılmıştır. Sabit tablalara son şeklini veren bu değişiklik yapılırken tablanın daha hafif olması ve dayanım/ağırlık oranının geliştirilmesi amaçlanmıştır.




Şekil 2.23 Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinin tasarım aşamasından üç boyutlu bir görünüş.

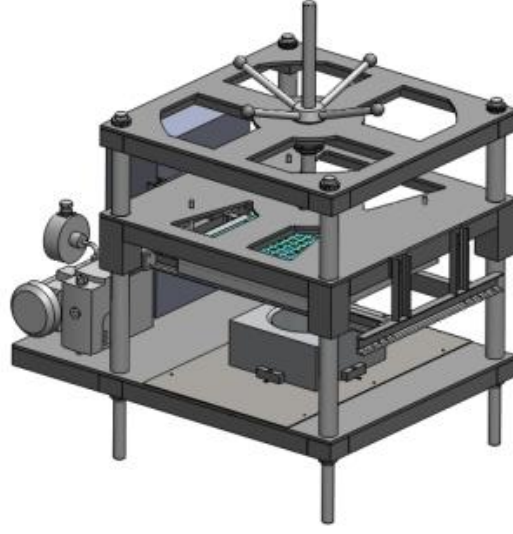
Hareketli tabla, ısıtıcıları ve tutucu çerçeveyi taşıdığından, düşeyde kısıtlı hareket etmesinden dolayı diğer iki sabit tabladan farklı tasarlanmıştır. Isıtıcılara daha fazla hava girebilmesi ve ısınarak yoğunluk kaybı nedeniyle yükselen havanın tahliyesi

için hareketli tablanın yüzey alanı azaltılmış ve azalan rijitlik daha çok lama ile desteklenerek giderilmiştir. Tutucu çerçeve 10 mm kalınlığında sac malzemeden alınan lamaların birbirine kaynaklanması ile elde edilmiş ve hareketli tablaya cıvatalı bağlantı ile monte edilmiştir. Isıtıcılar, yaklaşık 50 mm uzaklıktan polimer levhaya ışınlama ile yeterli ısı geçişini sağlayacak kapasitede seçilmiş (9,5 kW) ve rezistanslar iki ayrı bölgeye ayrılmıştır. İki ayrı bölgeye ayrılan rezistanslar orta ve dış bölge olmak üzere farklı iki aşamada aktive edilebilmektedir. Isıtıcı tava içerisinde kullanılan rezistanslar polimer levha sıcaklığını 800 °C civarına çıkarabilecek kapasitede dijital kontrollü olarak seçilmiştir. Vakum pompasının seçimi, üç ayrı kalıp içerisindeki boşluk hacmini ne kadar sürede emebileceği düşünülerek yapılmıştır. Tercihen yağlı tip bir vakum pompası seçilmiş ve vakum ünitesinin şekil verme ünitesiyle aynı platformu paylaşması benimsenmiştir. Vakum pompasının çalışması esnasında, titreşimi en aza indirmek için gövde platformu üzerine montajı lastik vibrasyon emici takozlar vasıtasıyla yapılmıştır. Vakum pompası spesifikasyonları Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinde kullanılan vakum pompasının özellikleri

Marka	Model	Motor Gücü (Kw)	Debisi (m ³ /h)	Basınç (mbar)
 BECKER	U 4.20	0.55	18	-999

Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinin tasarım geçmişi göz önüne alındığında, tüm bu değişkenleri içine alan nihai tasarım Şekil 2.24'te verilmiştir. Şekil verme ünitesi geri beslemeli geliştirme süreci sonrasında imalata hazır hale gelmiştir. Tasarımı biten parçaların teknik resimleri ve imalat resimleri hazırlanarak, işlenecekleri atölyelere sevk edilmiştir.



Şekil 2.24 İmalat sürecine hazır olan nihai tasarımın üç boyutlu bir görünüşü.

2.2.2.4. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Kalıplarının Tasarımı ve İmalatı

Kalıpların tasarımı h/d oranı $1/2$ olacak şekilde seçilmiş ve GEA uyarınca tüm kalıplardaki yerel cidar kalınlığını veren ifadeler Microsoft EXCEL kullanılarak hazırlanmıştır. Alüminyum malzemeden imal edilmiş vakum ve ısı ile şekil verme kalıpları üç ayrı geometride üretilmiştir. Kesik koni, kübik ve silindirik kalıp geometrileri deneysel çalışmada kullanılmıştır. Kalıpların tasarımı SolidWorks bilgisayar destekli tasarım yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalıpların imalatı ise alüminyum malzemeden Nümerik kontrollü freze ve torna gibi talaş kaldırma tezgâhları kullanılarak icra edilmiştir.



Şekil 2.25 Konik, silindirik ve kübik vakum ve ısı ile şekil verme kalıplarının tam kesit görünümü.

2.3.Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Temini

Çalışmada kullanılan Polipropilen (PP) ve Polivinil klorür (PVC) termoplastik levhalar TEKSAN TEKNİK MALZEMELER VE İMALAT SANAYİ TİCARET LTD.ŞTİ. tarafından üretilmiştir. PP ve PVC levhaların kalınlıkları 3 mm olarak tespit edilmiş ve her birinin yüzey alanı 300x300 mm² olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. PP ve PVC levha malzemelere ait bazı mekanik ve ısıl özellikler ise üretici firma tarafından sağlanan katalog bilgilere dayanarak belirlenmiştir (Tablo 2.2). Polypropylene PP-H grey RAL 7032 ticari adıyla sunulan 3 mm kalınlığındaki 2000x1000 mm ebadındaki PP tabakaların ağırlığı 5.5 kg/m² olarak verilmiştir. PP levha malzeme yarı kristalin, PVC levha malzeme ise amorf yapıda bir malzemedir. Çalışmada farklı iki zincir dizilişine sahip termoplastik malzemenin ısıl şekil verme kabiliyeti ve davranışı araştırılmış, malzeme seçimi bu yönde yapılmıştır. PVC levha malzemenin üretici firma bilgilerine dayanarak sıcaklık dayanımı 65 °C, PP levha malzeme için ise 100 °C olarak verilmiştir. Çalışma içerisinde PP ve PVC levha malzemelerin yanında ısıl şekil verme kabiliyeti yüksek Polistiren (PS) levhalarında şekil verme kabiliyeti ve davranışı araştırılmıştır. PS levhalar AKAY STAND PAZARLAMA ve SAN. LTD. ŞTİ. vasıtasıyla temin edilmiştir. PS levhaların kalınlıkları 2-2.5 ve 3 mm olarak tespit edilmiş, yüzey alanı 300x300 mm² olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. PS levhalar SABIC PS 825E (High Impact Polystyrene) granüller kullanarak üretilmiştir.

Deneysel çalışma bünyesinde Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Araştırma Laboratuvarında bulunan Levha Ekstrüzyon hattı kullanılarak muhtelif kalınlıklarda karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit levhalar elde edilmiştir. Yüksek Yoğunluklu Polietilen (Tablo 2.3) termoplastik granüller matris malzemesi olarak kullanılmış, ağırlıkça % 5 oranında, Şişecam bünyesinde faaliyet gösteren Cam Elyaf Sanayi tarafından üretilen kırılmış elyaf (Tablo 2.4) takviyesiyle kompozit levhalar muhtelif uzunluklarda ve kalınlıklarda elde edilmiştir. Aynı yöntemle PP (Tablo 2.3) termoplastik granüller kullanılarak % 5 ve 15 oranlarında ağırlıkça karbon elyaf (Tablo 2.4) ile ağırlıkça % 5 cam elyaf takviyeli muhtelif uzunluklarda ve kalınlıklarda kompozit levhalar üretilmiştir. Ekstrüzyon hattı çıkışında 310–320 mm genişliğinde elde edilen kompozit levhalar 2-2.5 m uzunluğunda kesilerek istiflenmesi sağlanmıştır. Elde edilen kompozit levhaların

laboratuvar tipi vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinde şekillendirilebilmesi için levhalar 300x300 mm² yüzey alanına sahip olacak şekilde kesici bir takım vasıtasıyla istenen boyutlara getirilmiştir.

Şekil verme operasyonu çok aşamalı bir süreçtir. İlk olarak, 300x300 mm² yüzey alanına sahip polimer levha şekil verme ünitesi alt tablası üzerinde sabitlenmiş olan vakum ve ısı ile şekil verme kalıbının üzerine yerleştirilir. Sonrasında hareketli tablanın aşağı yönde hareketiyle şekil verilecek polimer levha, tutucu çerçeve ile kalıp düzlemi arasında sıkıştırılır. Bu işlem polimer levha ile kalıp düzlemi arasındaki sızdırmazlığın sağlanması için gereklidir. Kalıp üst yüzeyi ile tutucu çerçeve arasında bulunan polimer levha, ısıtıcı sistemin çalıştırılmasıyla istenilen sıcaklığa istenilen sürede ulaştırılabilir. Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinin yapısı itibari ile tek taraflı ısıtmanın yapıldığı bu çalışmada 500x500 mm² ısıtma alanına sahip 6 adet 500 W, 6 adet 1000 W gücünde 12 adet Elstein marka seramik ısıtıcı eleman kullanılmıştır. Bu ısıtıcı elemanların sıcaklık kontrolü dijital olarak yapılabilmektedir. Isıtıcı elemanlar ile polimer levha yüzeyi arasındaki uzaklık ayarlanabilmekle beraber çalışmada 50 mm olarak seçilmiştir. Polimer levha sıcaklığı, RAM DT-8855 kızılötesi ölçüm yapan bir termometreyle levha yüzeyinden alınan veriler yardımıyla belirlenmiştir. Uygun ısıtıcı eleman sıcaklığı ve süresi belirlendikten sonra vakumlama sistemi çalıştırılır ve şekil verme işlemi için uygun hale gelen polimer levha kalıp yüzeyine temas edip kalıbın şeklini alana kadar beklenir. Bu süre vakumlama hattındaki ve kalıp boşluğundaki havanın sistemden tahliye edilmesi için gereken süredir. Yaklaşık olarak 2 saniyede gerçekleşen bu süreç, ısıtıcılar kapatıldıktan sonra toplamda 30 saniye devam eder. Vakum oluşumunun sonlandırılması ile şekil değiştiren polimer levha soğumaya bırakılmaktadır. Bu aşamada ise yaklaşık 3 dakikalık bir süre beklemede kalınır. En son aşamada ise hareketli tablanın yukarı yönde hareketi ile şekil değiştirmiş levha kalıptan çıkarılarak alınır.

% 5 cam elyaf takviyeli PP levha ile % 5 ve 15 karbon elyaf takviyeli PP levha için sadece konik geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı kullanılmış ve üç başarılı şekil verme operasyonundan elde edilen numunelere deneysel sonuç eldesinde yer verilmiştir. Ağırlıkça % 5 cam elyaf takviyeli HDPE matrisli kompozit levhaların şekillendirilmesinde konik, silindirik ve kübik geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıpları kullanılmıştır.

Tablo 2.2 Deneysel çalışmada kullanılan PP ve PVC levha malzemelere ait özellikler.

	PVC	PP
Yoğunluk(gr/cm^3) DIN 53479	1,45-1,49	0,94
% Kopma Uzaması	> 15-20	70
Eğilme Modülü (N/mm^2)	3000	1200
Isıl iletkenliği (W/mK) DIN 52612	0,159	0,22
Elektrik Yalıtkanlığı (kV/mm) DIN 53481	34-39	52
Sıcak şekil verme	İyi	İyi
Kaynak edilebilme	İyi	İyi

Tablo 2.3 Takviyeli levhaların üretiminde kullanılan termoplastik granüllere ait özellikler.

Malzeme	Üretici Firma	Yoğunluk (ASTM D792)	MFI ($\text{g}/10\text{min}$) (ASTM D 1238)	Erime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) (ASTM D 3418)	Vicat Yumuşama Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Çekme Dayanımı (MPa) (ASTM D638)	Su Emme (%) (ASTM D 570)
Polipropilen (S.R.L)	ROM Petrol Petrochemicals	0.90	20	165	132	32	<0.010
Yüksek Yoğunluklu Polietilen (EL-LENE)	SCG Chemicals	0.962	18	134	121	28	<0.010

Tablo 2.4 Takviyeli levhaların üretiminde kullanılan elyaf malzemelere ait özellikler.

Malzeme	Üretici Firma	Boyut Ölçüleri	Yoğunluk (gr/cm^3)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Ek Açıklamalar
Cam Elyaf	Cam Elyaf A.Ş.	Çapı: 10.5 μm Boy: 4.5 mm	2.54	3450	1725	0.6 % Silan bağlayıcı içermektedir.
Karbon Elyaf	DOWAKSA	Uzun Elyaf Çap: 8 μm	1.78	4200	4000	

BÖLÜM 3

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1.PP, PVC ve PS Termoplastik Polimer Levhaların Proses Parametrelerinin Belirlenmesi

Deneysel çalışmada kullanılan farklı kalınlıklardaki PP, PVC ve PS termoplastik levhaların vakum ve ısı ile şekil verme parametreleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1 PP, PVC ve PS levha malzemeler için Laboratuvar tipi şekil verme ünitesinde belirlenen şekil verme parametreleri

Malzemenin Türü	Isıtıcı Sıcaklığı(°C)		Isıtma Süresi (dakika)	Levha kalınlığı (mm)	Vakum değeri (mmHg)	Vakumlama süresi(saniye)	Soğuma Süresi(dakika)	Şekil verme sıcaklığı(°C)
	I. Bölge	II. Bölge						
PP	350	75	6,5	3	-720	30	3	160-165
PVC	350	75	6	3	-720	30	3	145-154
PS	350	75	4	2	-720	30	3	175-180
PS	350	75	5	2,5	-720	30	3	175-180
PS	350	75	6	3	-720	30	3	175-180

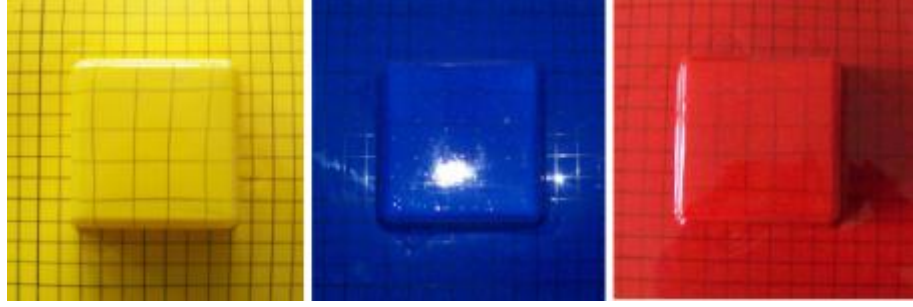
3.2.Vakum ve Isı ile Şekil Verilen PP, PVC ve PS Levhalarda Deneysel Cidar Kalınlık Dağılımının Tespit Edilmesi

Deneysel çalışma kapsamında şekil verilen PP, PVC ve PS yarı mamullerin görüntüleri Şekil 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 ve 3.6'da verilmiştir. Ürün kalınlık dağılımının deneysel olarak tespit edildiği kesitler, Şekil 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10'da verilen figürlerle görsel olarak ifade edilmiştir.

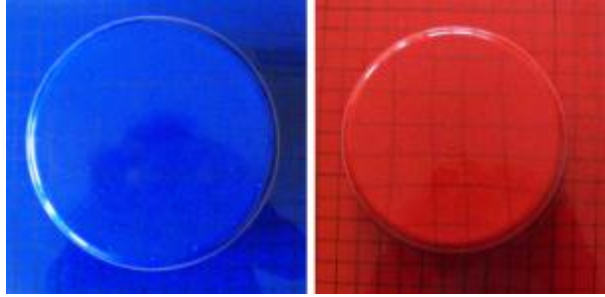
Bu yöntem uyarınca, konik yarı mamul tam ortadan ikiye kesilerek ölçüm yapılacak kesit yüzeyi temizlenmektedir. Ölçüm yapılacak noktaların yerleri yani ürün tabanının merkezi, radüsün başlangıç noktası ve bitiş noktası ile ürün yan duvarında ölçüm yapılacak son nokta tespit edilir. Bunu takiben konik parçada 1-2-3-4 noktaları (Şekil 3.7) boyunca kesit üzerinde 36 ayrı noktada ürün kalınlık ölçümü yapılmıştır. Silindirik yarı mamul için de aynı yöntem uygulanarak ürünü tam ikiye ayıracak bir kesit alınır. Bu kesit üzerinde 1-2-3-4 noktaları boyunca (Şekil 3.8) toplam 37 farklı noktada eşit aralıklarla ürün kalınlık tespiti yapılmıştır. Kübik geometrili yarı mamul için ise ürünü tam ikiye ayıracak bir kesit alınmış bunu müteakiben ürün köşegeni doğrultusunda bir kesit daha belirlenmiştir. Şekil 3.9'da verilen ürünü iki eşit parçaya bölen kesit üzerinde 1-2-3-4 noktaları boyunca eşit aralıklarla toplam 27 ayrı noktada ürün kalınlık ölçümü yapılmıştır. Şekil 3.10'da da verilen köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte 1-2-3-4 noktaları doğrultusunda birbirine eşit aralıklarla toplam 32 ayrı noktada kalınlık tespiti yapılmıştır. Kübik, silindirik ve konik geometrili yarı mamuller üzerinde ölçülerek tespit edilen ürün cidar kalınlık dağılımları, Geometrik Elemanlar Analizi kullanılarak tespit edilen dağılımlar ile karşılaştırmalı olarak grafik yöntemle incelenmiştir.



Şekil 3.1 Vakum ve ısı ile şekil verilen sırasıyla 2, 2.5 ve 3 mm kalınlığındaki PS konik yarı mamuller.



Şekil 3.2 Vakum ve ısı ile şekil verilen sırasıyla 2, 2.5 ve 3 mm kalınlığındaki PS kübik yarı mamuller.



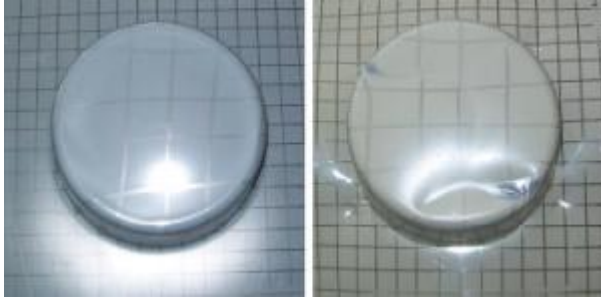
Şekil 3.3 Vakum ve ısı ile şekil verilen sırasıyla 2.5 ve 3 mm kalınlığındaki PS silindirik yarı mamuller.



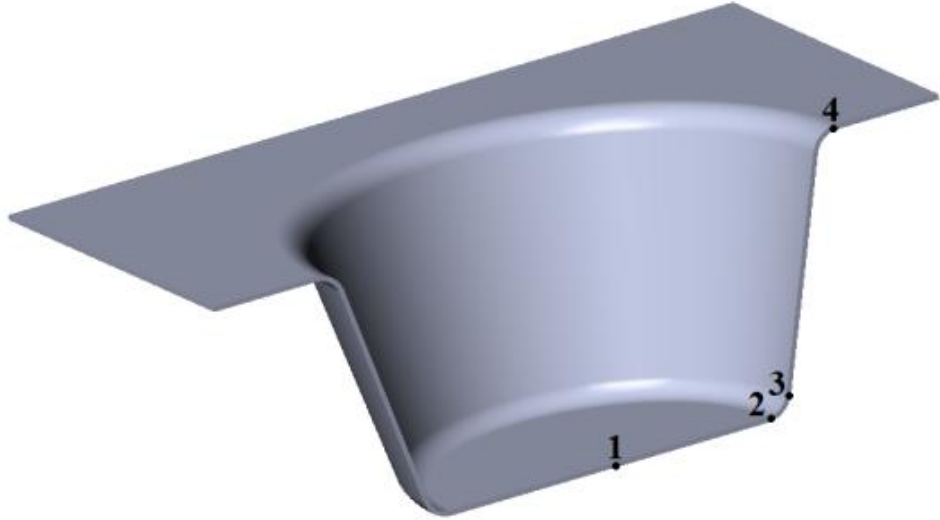
Şekil 3.4 Vakum ve ısı ile şekil verilen 3 mm kalınlığındaki sırasıyla PVC ve PP kübik yarı mamuller.



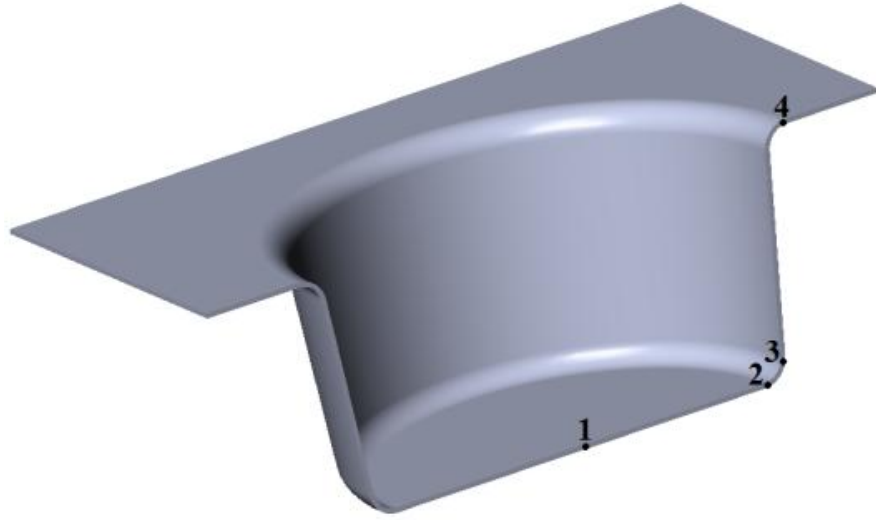
Şekil 3.5 Vakum ve ısı ile şekil verilen 3 mm kalınlığındaki sırasıyla PVC ve PP konik yarı mamuller.



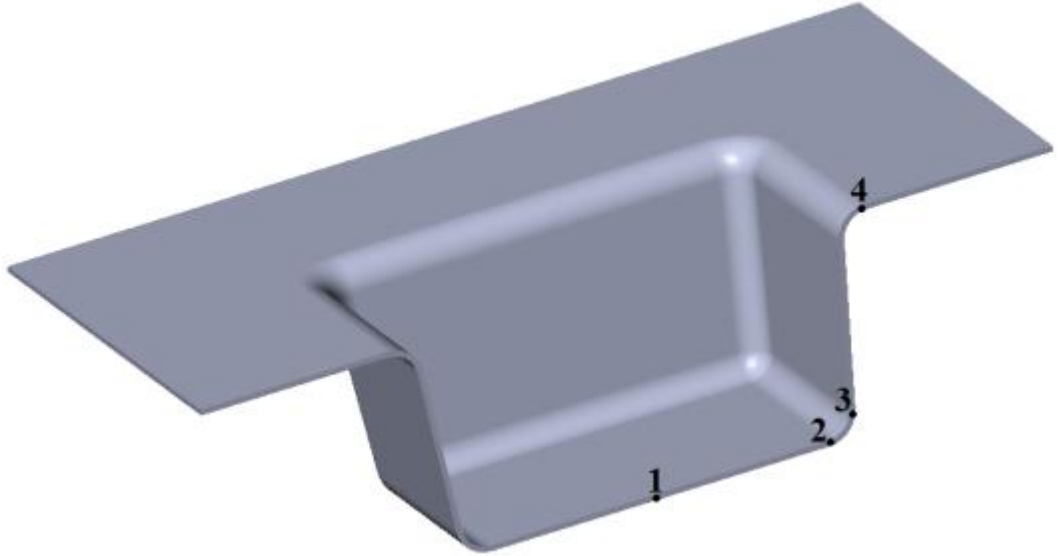
Şekil 3.6 Vakum ve ısı ile şekil verilen 3 mm kalınlığındaki sırasıyla PVC ve PP silindirik yarı mamuller.



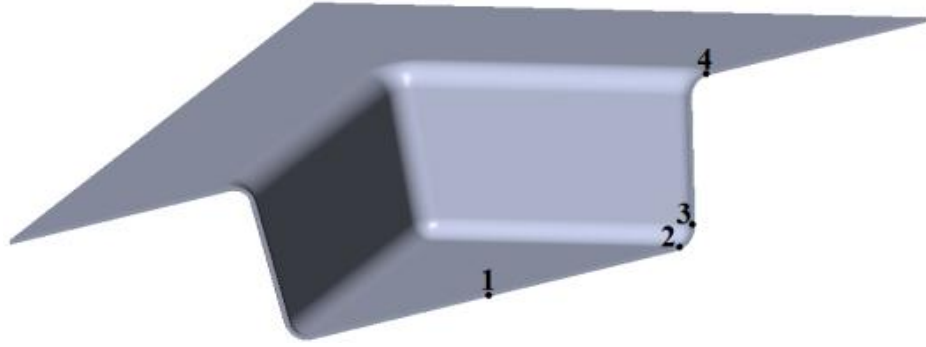
Şekil 3.7 Vakum ve ısı ile şekil verilen konik yarı mamulde deneysel metotla ölçüm yapılan noktalar.(1-Ürün tabanının merkezi, 2-Ürün tabanında 10 mm'lik radüsün başlangıç noktası, 3-10 mm'lik radüsün bitiş noktası, 4-Ürün yan duvarında ölçüm yapılan son nokta)



Şekil 3.8 Vakum ve ısı ile şekil verilen silindirik yarı mamulde deneysel metotla ölçüm yapılan noktalar.(1-Ürün tabanının merkezi, 2-Ürün tabanında 10 mm'lik radüsün başlangıç noktası, 3-10 mm'lik radüsün bitiş noktası, 4-Ürün yan duvarında ölçüm yapılan son nokta)

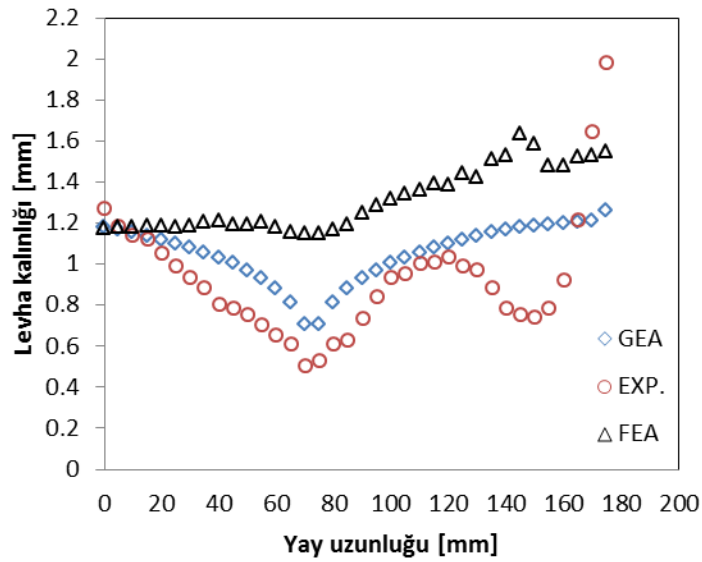


Şekil 3.9 Vakum ve ısı ile şekil verilen kübik yarı mamulde deneysel metotla ölçüm yapılan noktalar.(1-Ürün tabanının merkezi, 2-Ürün tabanında 10 mm'lik radüsün başlangıç noktası, 3-10 mm'lik radüsün bitiş noktası, 4-Ürün yan duvarında ölçüm yapılan son nokta)

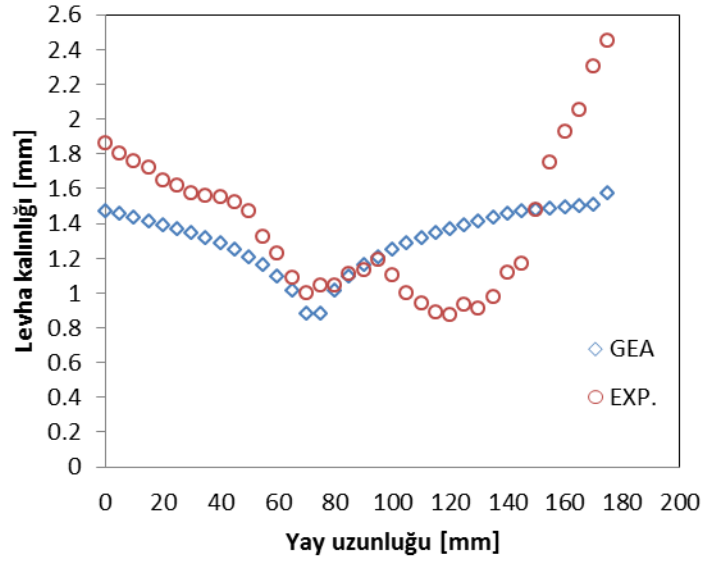


Şekil 3.10 Vakum ve ısı ile şekil verilen kübik yarı mamulde köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte deneysel metotla ölçüm yapılan noktalar.(1-Ürün tabanının merkezi, 2-Ürün tabanında 10 mm'lik radüsün başlangıç noktası, 3-10 mm'lik radüsün bitiş noktası, 4-Ürün yan duvarında ölçüm yapılan son nokta)

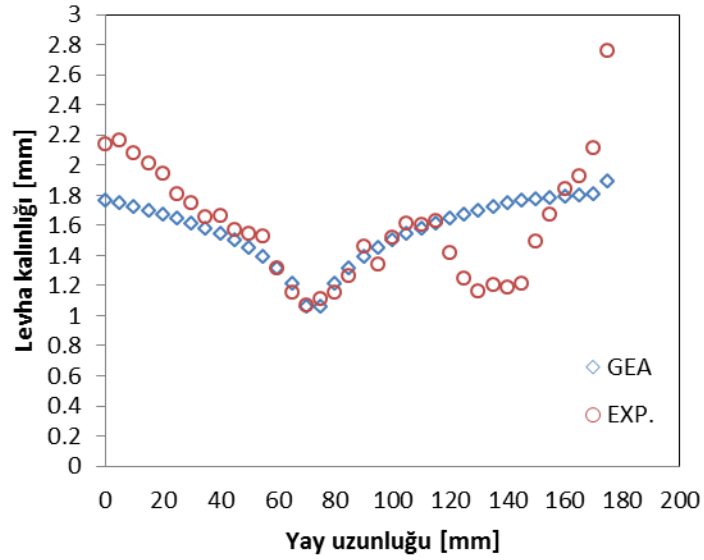
Vakum ve ısı ile şekil verilen PP, PVC ve PS levhalardan elde edilen ürünlerin cidar kalınlık dağılımları, Şekil 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29'da gösterilmektedir.



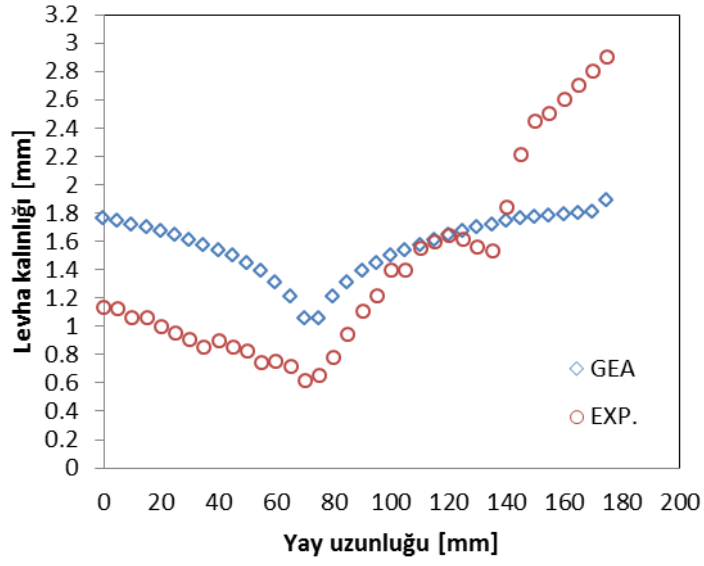
Şekil 3.11 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı, FEA: Sonlu Elemanlar Analizi uyarınca hesaplanan kalınlık dağılımı. (PS, t=2mm)



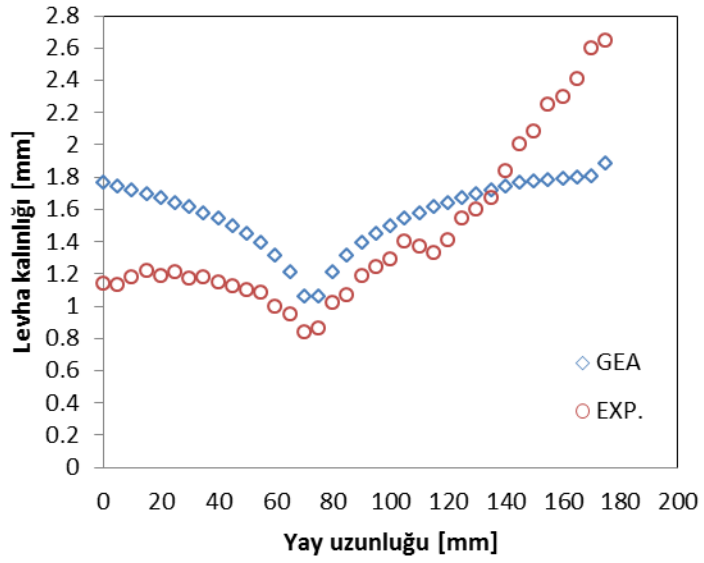
Şekil 3.12 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2.5mm)



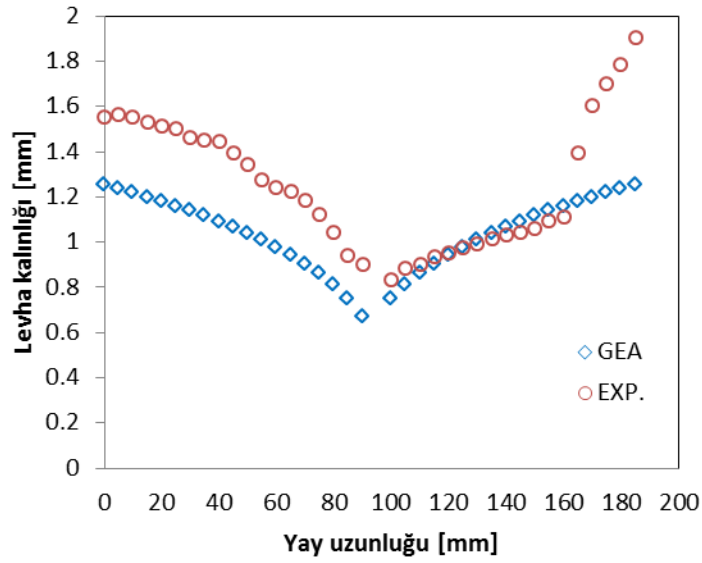
Şekil 3.13 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=3mm)



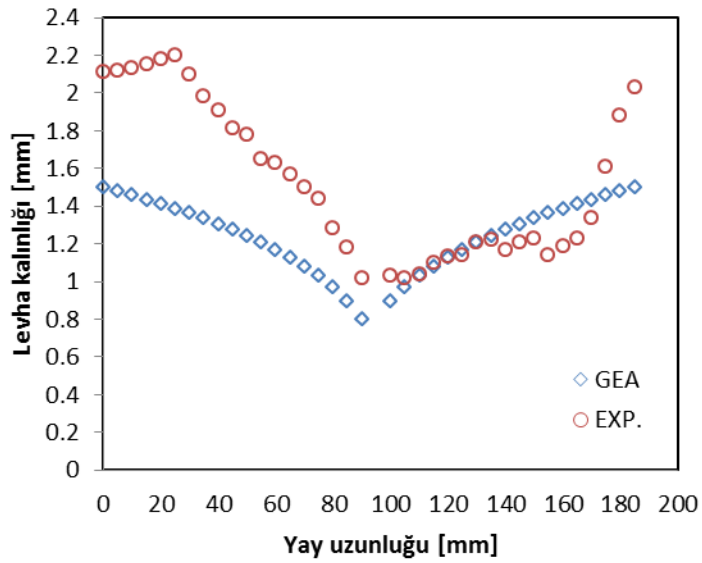
Şekil 3.14 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PP, t=3mm)



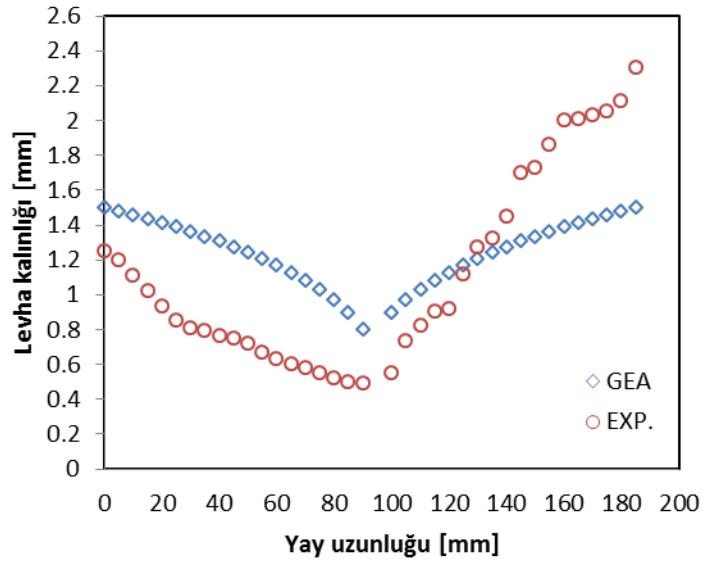
Şekil 3.15 Konik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PVC, t=3mm)



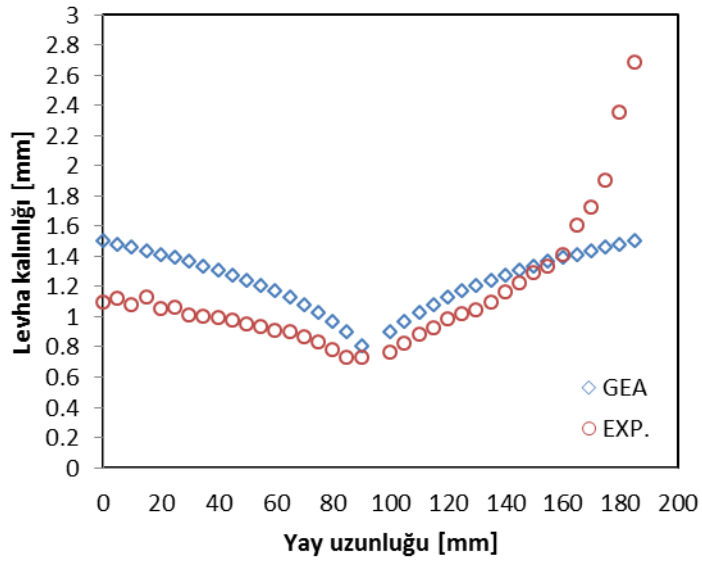
Şekil 3.16 Silindirik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2.5mm)



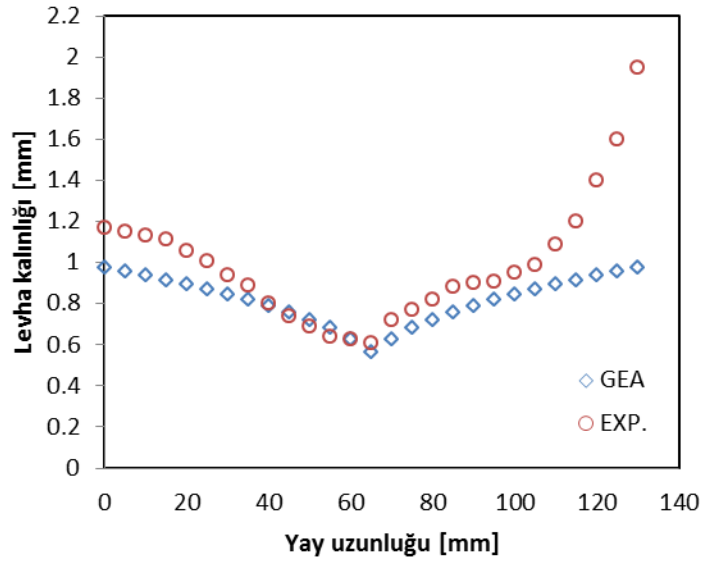
Şekil 3.17 Silindirik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=3mm)



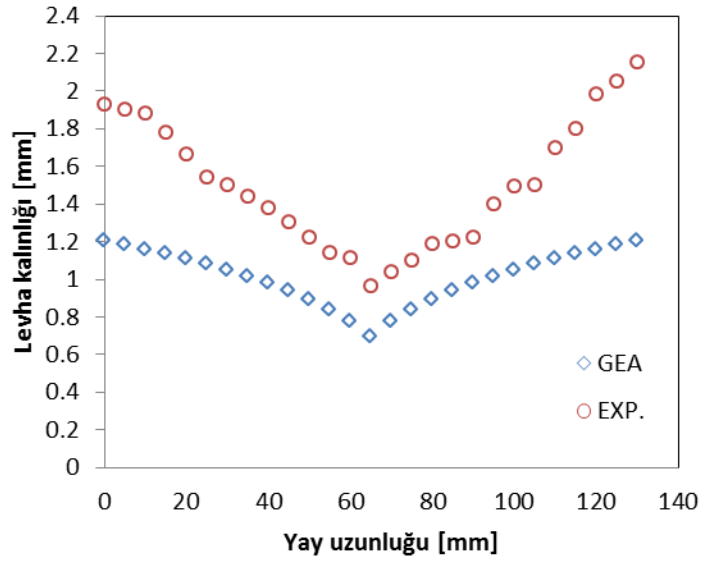
Şekil 3.18 Silindirik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PP, t=3mm)



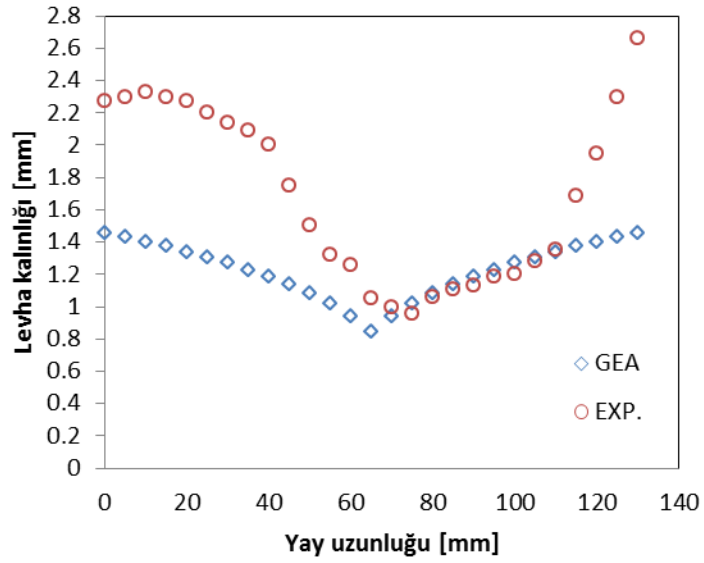
Şekil 3.19 Silindirik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PVC, t=3mm)



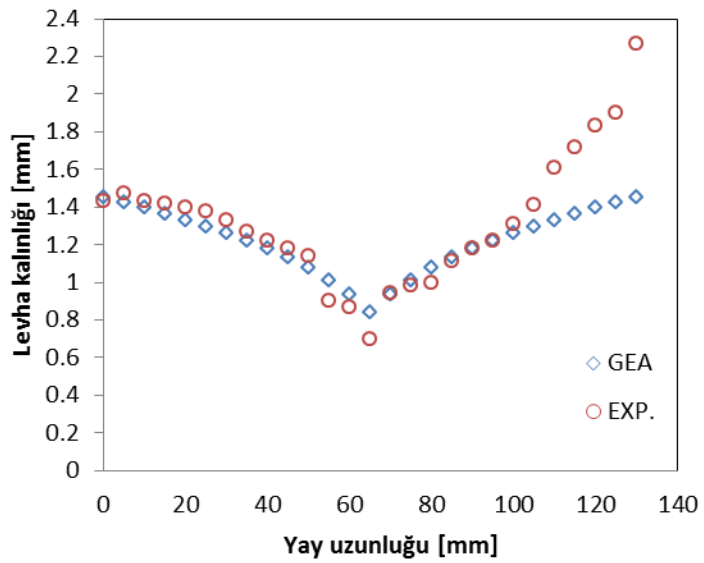
Şekil 3.20 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2mm)



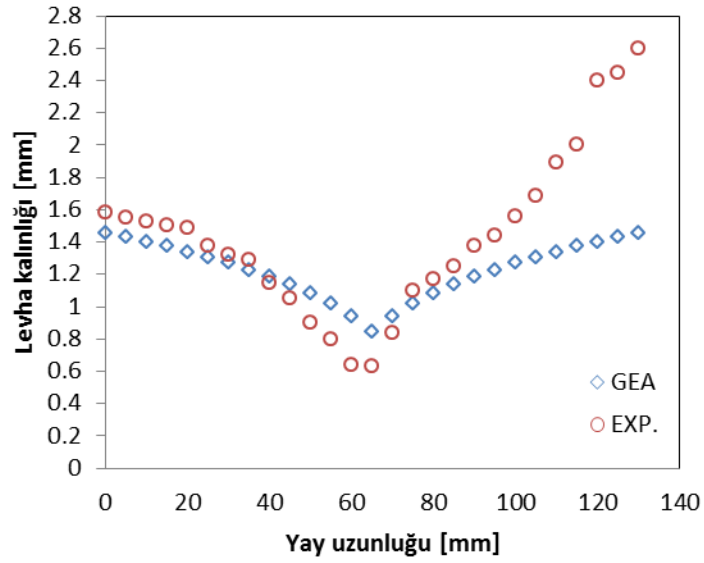
Şekil 3.21 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2.5 mm)



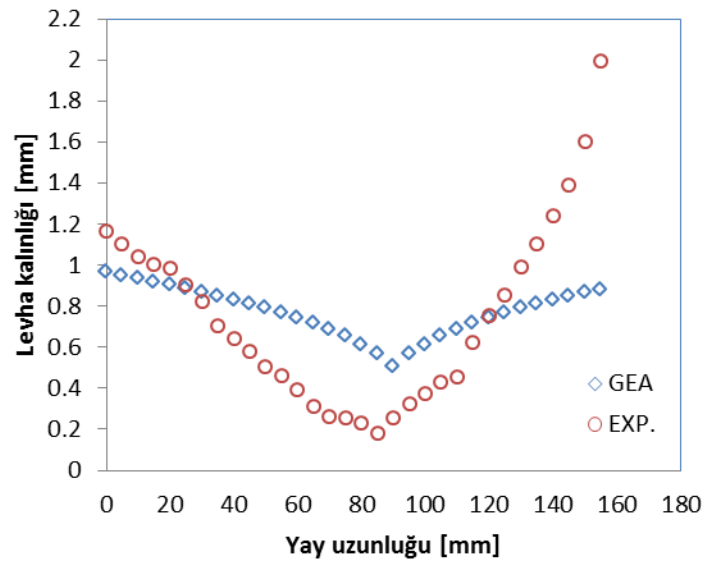
Şekil 3.22 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=3 mm)



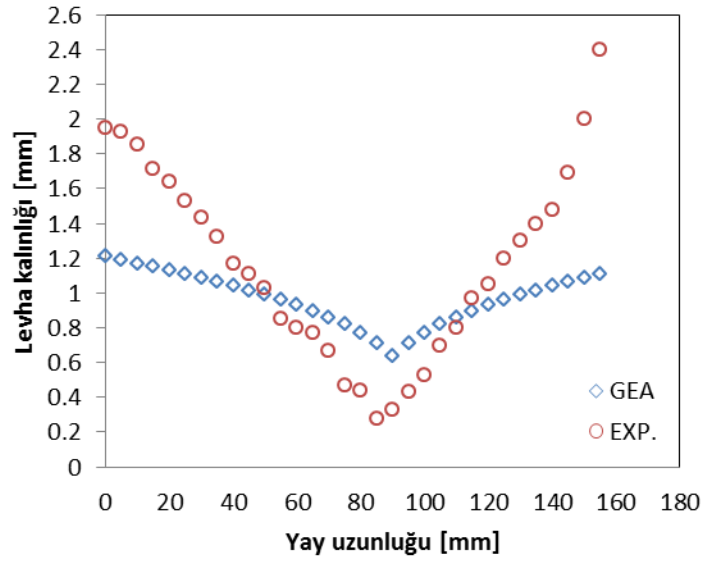
Şekil 3.23 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PP, t=3 mm)



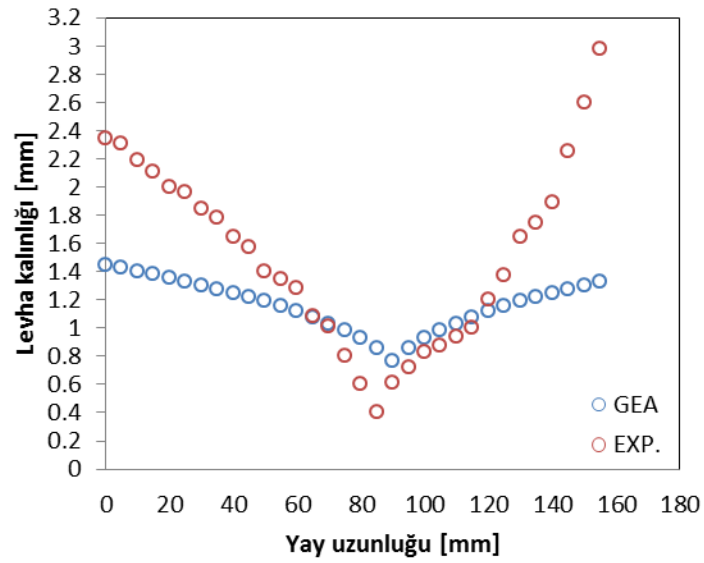
Şekil 3.24 Kübik geometrili kalıplarda ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PVC, t=3 mm)



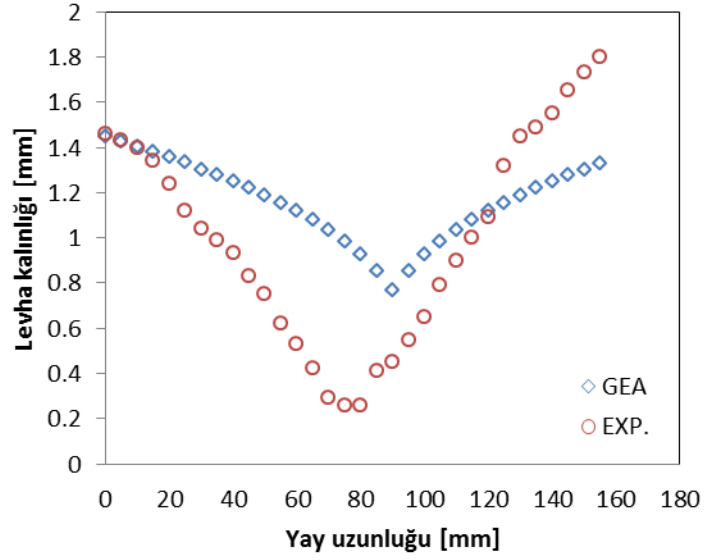
Şekil 3.25 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, t=2 mm)



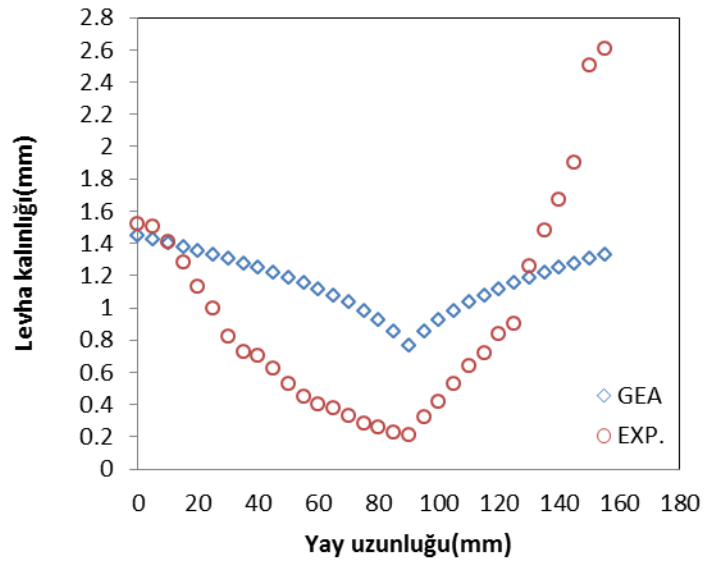
Şekil 3.26 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, $t=2.5$ mm)



Şekil 3.27 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PS, $t=3$ mm)



Şekil 3.28 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PP, t=3 mm)



Şekil 3.29 Kübik geometrili kalıplarda köşegen uzunluğu boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (PVC, t=3 mm)

3.3.PP, PVC ve PS Termoplastik Polimer Levhaların Vakum ve Isı ile Şekil Verme Prosesinde Deformasyon Karakteristiğinin Oluşturulması

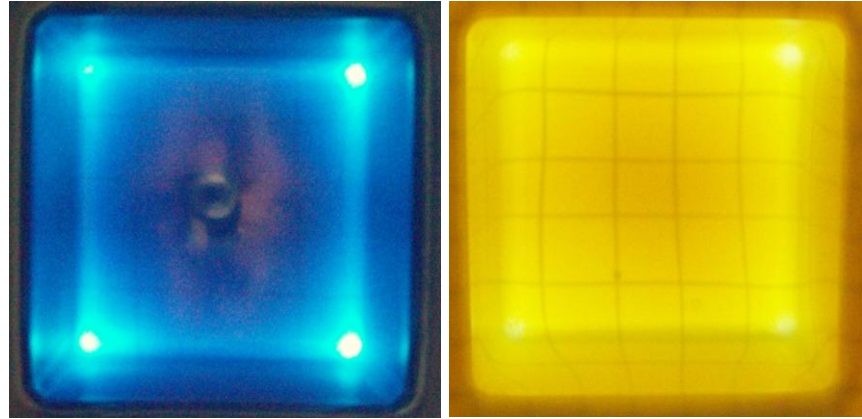
Bir termoplastik polimer levhaya vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi ile şekil verilmesi sürecinde Geometrik Elemanlar Analizi ile yarı ürünün cidar kalınlık profili, teorik olarak tespit edilebilir. Bu çalışmada da farklı kalınlıklardaki PP, PVC ve PS levhalar için ürün kalınlık dağılımı farklı geometrilere sahip kalıplar için tespit edilmiştir. Sonrasında ise deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ancak GEA analitik çözümleme yönteminin bu çalışmada kullanılabilmesi için bazı kabullerin yapılması gerekmektedir. Bunlar;

- ◆ Şekil verilen levha izotropiktir.
- ◆ Şişirme esnasında levha, küresel bir şekle sahiptir ve bu kısmi kürenin kalınlığı her noktasında aynıdır.
- ◆ Şişirilen serbest kubbe şeklindeki levhanın sıcaklığı sabittir ve zamanla değişmez.
- ◆ Polimer levha soğuk kalıp yüzeyine dokunduğu an o noktada katılaşıp kalır. Şekil değiştiren kısım, kalıpla temas etmeyen küresel kısmın bölgeleridir. Bu bölgelerde inceleme ise her noktada üniform olarak gerçekleşir.
- ◆ Pot çemberi altındaki polimer levhanın şekil değişimine dâhil olmadığı kabul edilir.
- ◆ Polimer malzeme şekil değiştirirken sıkıştırılmaz kabul edilir ve Poisson oranı 0.5 olarak alınır.

Yapılan tüm bu kabuller sonrasında kalıbın sığ ya da derin olduğu tespitinden sonra ürün cidar kalınlık dağılımı yay uzunluğuna göre oluşturulur. Ancak bu açılımlar ardında levhanın hangi kalıp geometrisinde nasıl şekil değiştirdiğinin de tespit edilmesi gerekir. Hangi bölgelerde hangi kuvvetler nasıl rol almaktadır tüm bunların tespiti üniform cidar kalınlığına sahip ve daha kaliteli ürünlerin oluşmasında büyük önem taşımaktadır.

Şekil verilen ürünlerdeki cidar kalınlık dağılımını göstermek amacıyla yarı mamuller bir ışık kaynağının önüne yerleştirilmiş ve görüntüler kaydedilmiştir. Ürün cidar kalınlığının ince olduğu bölgeler ışığı geçirerek daha parlak bir görünüm sağlamaktadır. Ürün cidar kalınlığının fazla olduğu yerler ise ışığı daha az geçirir, daha koyu ve mat bir görünüm teşkil eder. Şekil 3.30 ve 3.31'de ışık kaynağı önüne yerleştirilen kübik ve konik yarı mamuller görülmektedir. Şekil 3.30 ve 3.31 aynı zamanda oluşan ürünlerin dayanımı hakkında da bir öngörü teşkil etmektedir. Yarı

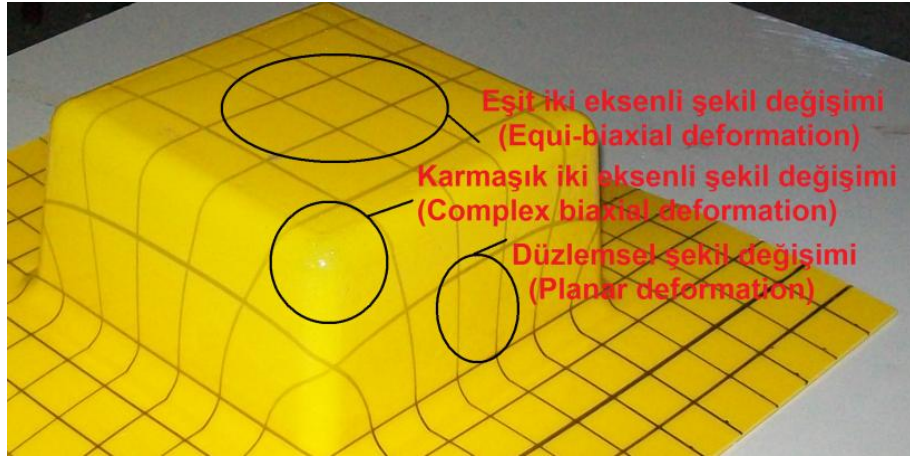
mamullerde görülen parlak bölgeler polimer levhanın kalıp tabanına en son temas ettiği bölgelerdir. Bu bölgelerde polimer levha yüksek şekil değiştirme oranlarına maruz kaldığı için levha malzemenin en ince noktaları bu bölgelerdir. Dolayısıyla elde edilen yarı mamulün en zayıf noktaları bu bölgelerdir. Kübik, konik ve silindirik yarı mamullerde en kritik bölgeler yani polimer levhanın en ince olduğu bölgeler kalıp tabanında bulunan 10 mm'lik yarıçap yüzeyleridir. Şekil verilen ürünlerdeki şekil değiştirme mekanizmalarının tespiti için Martin ve diğerleri[33], Tan ve diğerleri[34], Martin ve diğerleri[35] incelenerek farklı geometrilerdeki yarı mamullerde şekil değiştirme karakteristiği belirlenmiştir. Karakterizasyon işleminin başında 300x300 mm² yüzey alanına sahip levha, 30x30 mm² yüzey alanına sahip karelere bölünmüştür. Sonrasında kare yüzey elemanlarındaki şekil değişimi, literatür çalışmalarında belirtilen şekil değiştirme mekanizmaları ile özdeşleştirilmiştir. PP, PVC ve PS polimer levhaların şekil değiştirme davranışı Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te gösterilmektedir.



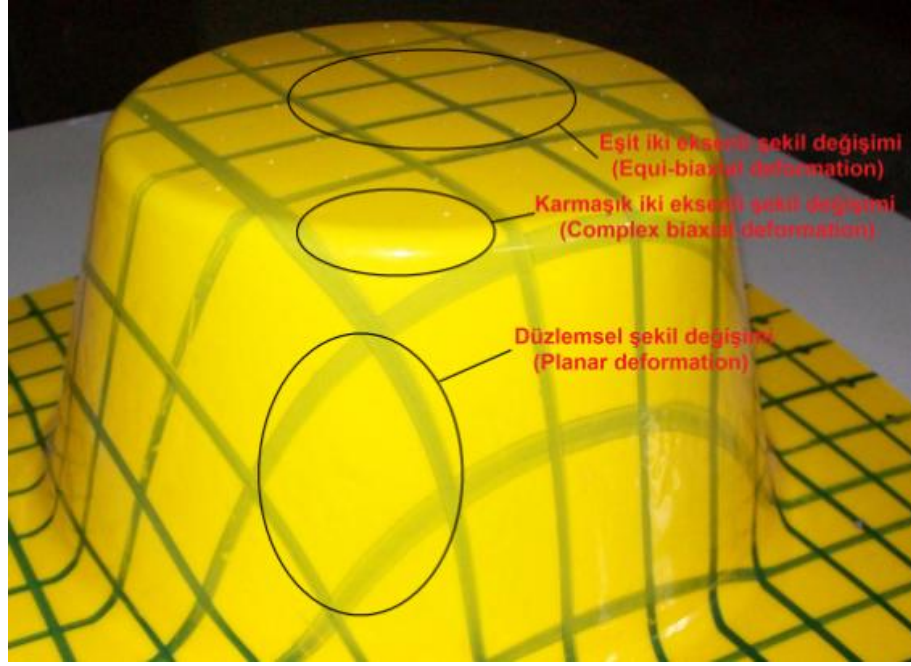
Şekil 3.30 Işık kaynağı önüne yerleştirilen farklı kalınlıklardaki PS kübik yarı mamullerin görünümü.



Şekil 3.31 Işık kaynağı önüne yerleştirilen PS konik yarı mamullerin görünümü.



Şekil 3.32 PS kübik yarı mamulde şekil değişiminde rol oynayan deformasyon mekanizmaları.



Şekil 3.33 PS konik yarı mamulde şekil değişiminde rol oynayan deformasyon mekanizmaları.

3.4.Ağırlıkça Cam Elyaf ve Karbon Elyaf İçeren Termoplastik Polimer Levhaların Proses Parametrelerinin Belirlenmesi

Rasgele dağılımlı kısa elyaf takviye elemanı içeren termoplastik matrisli kompozit levhaların vakum ve ısı ile şekil verme proses parametreleri Tablo 3.2, 3.3 ve 3.4'te gösterilmektedir.

Tablo 3.2 % 5 cam elyaf takviyeli PP levha malzeme için deneysel proses parametreleri(GF=Glass Fibre)

Malzemenin Türü	Isıtıcı Sıcaklığı(°C)		Isıtma Süresi (dakika)	Levha kalınlığı (mm)	Vakum değeri (mmHg)	Vakumlama süresi (saniye)	Soğuma Süresi (dakika)	Sonuç	Şekil verme sıcaklığı(°C)
	Zone-1	Zone-2							
PP (% 5GF)	350	75	3.75	2	-400	30	3	+	185-190
PP (% 5GF)	350	75	3	2	-420	30	3	-	-
PP (% 5GF)	350	75	2.5	2	-420	30	3	-	-
PP (% 5GF)	350	75	2	2	-440	30	3	-	-
PP (% 5GF)	350	75	4	2	-	30	3	-	-
PP (% 5GF)	350	75	4.25	2	-	30	3	-	-
PP (% 5GF)	350	75	4.5	2	-	30	3	-	-

Tablo 3.3 % 5 ve % 15 karbon elyaf takviyeli PP levha malzemeler için deneysel proses parametreleri(CF=Carbon Fibre)

Malzemenin Türü	Isıtıcı Sıcaklığı(°C)		Isıtma Süresi (dakika)	Levha kalınlığı (mm)	Vakum değeri (mmHg)	Vakumlama süresi (saniye)	Soğuma Süresi (dakika)	Sonuç	Şekil verme sıcaklığı(°C)
	Zone-1	Zone-2							
PP(%5CF)	350	75	3.5	2	-400	30	3	+	185-190
PP(%5CF)	350	75	3	2	-	30	3	-	-
PP(%5CF)	350	75	2.5	2	-	30	3	-	-
PP(%5CF)	350	75	2	2	-	30	3	-	-
PP(%5CF)	350	75	4	2	-	30	3	-	-
PP(%5CF)	350	75	4.25	2	-	30	3	-	-
PP(%5CF)	350	75	4.5	2	-	30	3	-	-
PP(%15CF)	350	75	3.75	2	- 420	30	3	+	190-195
PP(%15CF)	350	75	3	2	-	30	3	-	-
PP(%15CF)	350	75	2.5	2	-	30	3	-	-
PP(%15CF)	350	75	2	2	-	30	3	-	-
PP(%15CF)	350	75	4	2	-	30	3	-	-
PP(%15CF)	350	75	4.25	2	-	30	3	-	-
PP(%15CF)	350	75	4.5	2	-	30	3	-	-

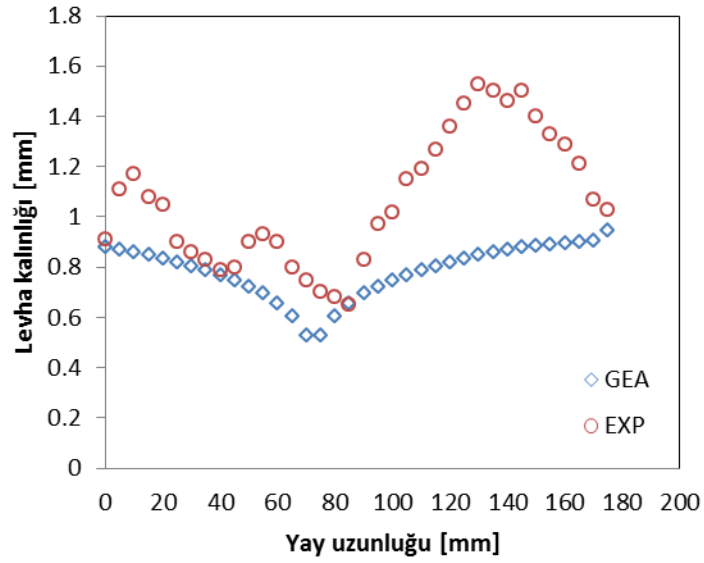
Tablo 3.4 % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzeme için deneysel proses parametreleri(GF=Glass Fibre)

Malzemenin Türü	Isıtıcı Sıcaklığı(°C)		Isıtma Süresi (dakika)	Levha kalınlığı (mm)	Vakum değeri (mmHg)	Vakumlama süresi (saniye)	Soğuma Süresi (dakika)	Sonuç	Şekil verme sıcaklığı(°C)
	Zone-1	Zone-2							
HDPE(%5GF)	350	75	3.5	1.5	-680	30	3	+	170-175
HDPE(%5GF)	350	75	3.33	1.5	-660	30	3	-	-
HDPE(%5GF)	350	75	3.25	1.5	-620	30	3	-	-
HDPE(%5GF)	350	75	3	1.5	-600	30	3	-	-
HDPE(%5GF)	350	75	2.75	1.5	-380	30	3	-	-

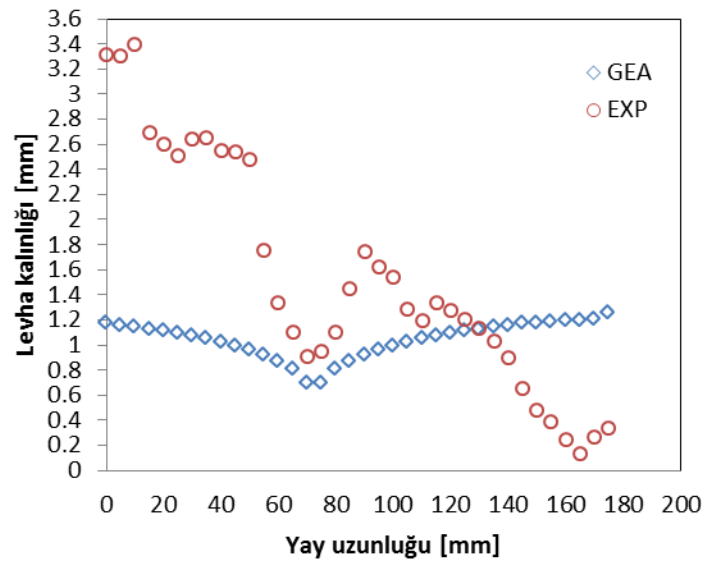
3.5. Vakum ve Isı ile Şekil Verilen Takviyeli Termoplastik Levhaların Deneysel Cidar Kalınlık Dağılımının Tespit Edilmesi ve Deformasyon Karakteristiğinin Oluşturulması

% 5 cam elyaf ve % 5-15 karbon elyaf takviyeli PP levha malzeme için sadece konik geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı kullanılmış ve üç başarılı şekil verme operasyonundan elde edilen numunelere deneysel sonuç eldesinde yer verilmiştir. Ağırılıkça % 5 cam elyaf takviyeli HDPE matrisli kompozit levhaların şekillendirilmesinde konik, silindirik ve kübik geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıpları kullanılmıştır. Takviye elemanı içeren konik geometrili yarı mamullerde cidar kalınlık dağılımı belirlenirken, Şekil 3.7'de gösterilen kesit üzerinde 1-2-3-4 noktaları boyunca farklı noktalarda ölçümler yapılmış ve karşılaştırmalı olarak grafik yöntemle sunulmuştur. Takviyeli silindirik yarı mamuller üzerinde de Şekil 3.8'de gösterilen 1-2-3-4 noktaları boyunca kesit kalınlık değerleri tespit edilmiş karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Takviye elemanı içeren kübik yarı mamullerde Şekil 3.9 ve 3.10'da verildiği üzere kesit üzerinde bulunan 1-2-3-4 noktaları boyunca alınan kesit kalınlık değerleri grafik yöntemle incelenmiştir. Farklı geometrilerdeki kompozit yarı mamullerin cidar kalınlık dağılımları Şekil 3.34, 3.35, 3.36, 3.37, 3.38 ve 3.39'da verilmiştir.

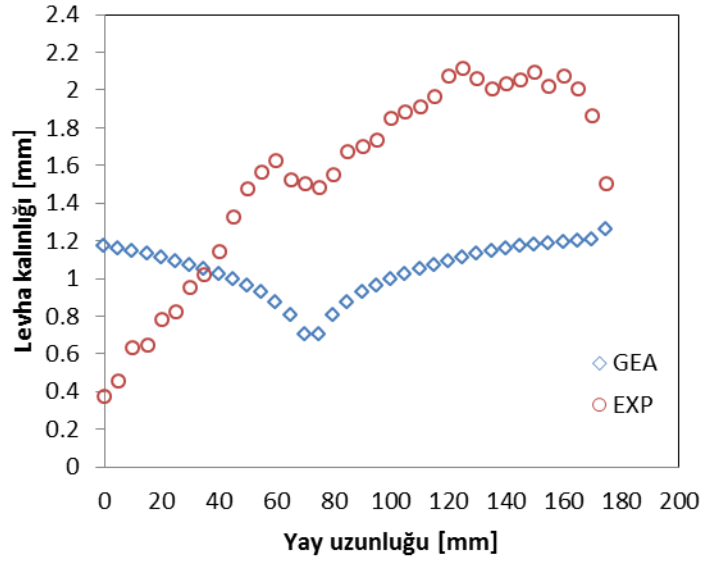
Bununla birlikte takviyeli levhalar üzerine şekil verme öncesinde tel kafes görünümlü çizgiler çizilerek her malzemenin şekil değiştirme davranışı araştırılmıştır. Böylelikle hangi bölgelerde aşırı ve lineer olmayan şekil değişiminin gerçekleştiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Tespit edilen şekil değiştirme eğilimleri kayıt altına alınmıştır. Kompozit yarı mamullere ait görüntüler Şekil 3.40, 3.41 ve 3.42'de verilmiştir. Şekil verilen ürünlerdeki şekil değiştirme mekanizmalarının tespiti için Martin ve diğerleri [33], Tan ve diğerleri [34], Martin ve diğerleri [35] incelenerek farklı geometrilerdeki yarı mamullerde şekil değiştirme karakteristiği belirlenmiştir. Karakterizasyon işleminin başında 300x300 mm² yüzey alanına sahip levha; 30x30 mm² yüzey alanına sahip karelere bölünmüştür. Sonrasında kare yüzey elemanlarındaki şekil değişimi, literatür çalışmalarında belirtilen şekil değiştirme mekanizmaları ile özdeşleştirilmiştir. Takviye elemanı içeren bir konik yarı mamulün şekil değiştirme davranışı Şekil 3.43'te şematize edilmiştir.



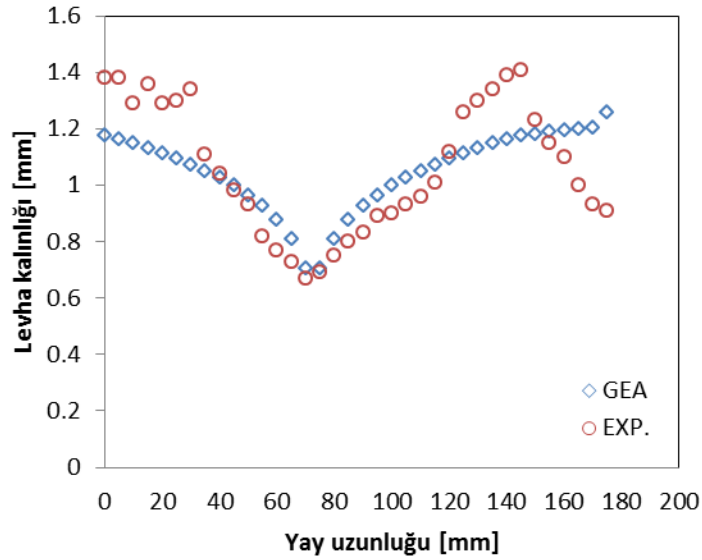
Şekil 3.34 Konik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (%5 cam elyaf takviyeli HDPE, t=1.5 mm)



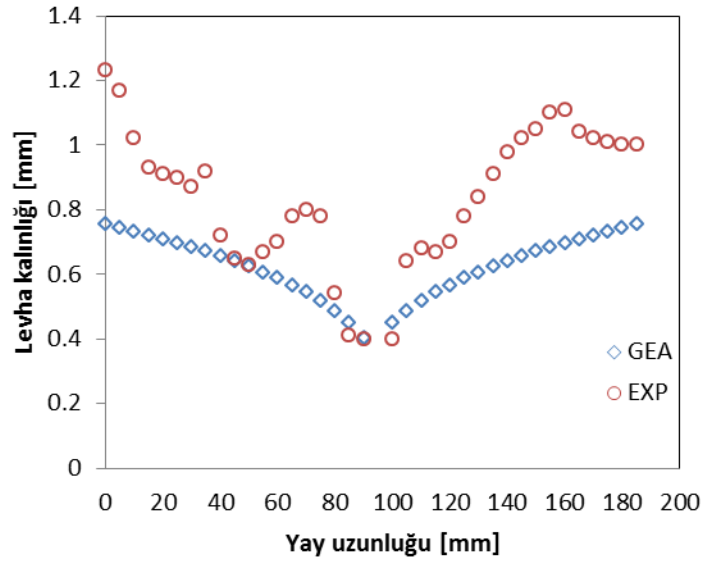
Şekil 3.35 Konik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (%5 karbon elyaf takviyeli PP, t=2 mm)



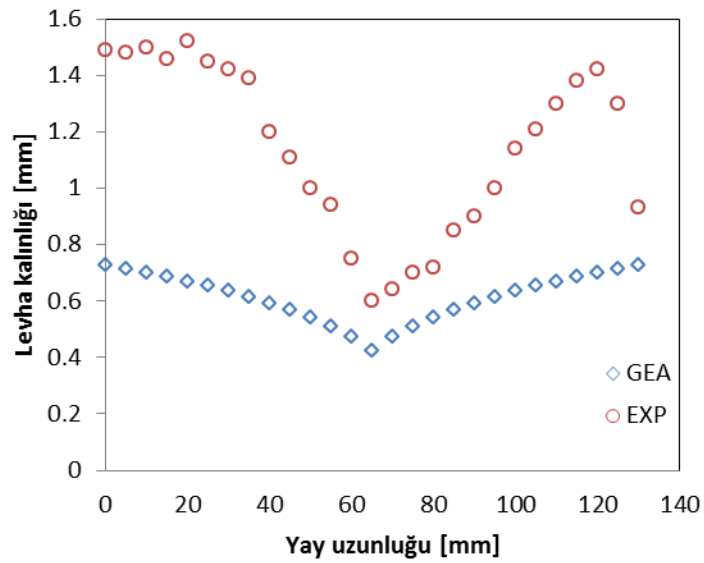
Şekil 3.36 Konik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (%15 karbon elyaf takviyeli PP, t=2 mm)



Şekil 3.37 Konik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (%5 cam elyaf takviyeli PP, t=2 mm)



Şekil 3.38 Silindirik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (% 5 cam elyaf takviyeli HDPE, $t=1.5\text{mm}$)



Şekil 3.39 Kübik geometrili kalıpta ürün kalınlığı dağılımı. GEA: Geometrik Elemanlar Analizi ile tespit edilen kalınlık dağılımı, EXP: Deneysel metot kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımı. (% 5 cam elyaf takviyeli HDPE, $t=1.5\text{mm}$)



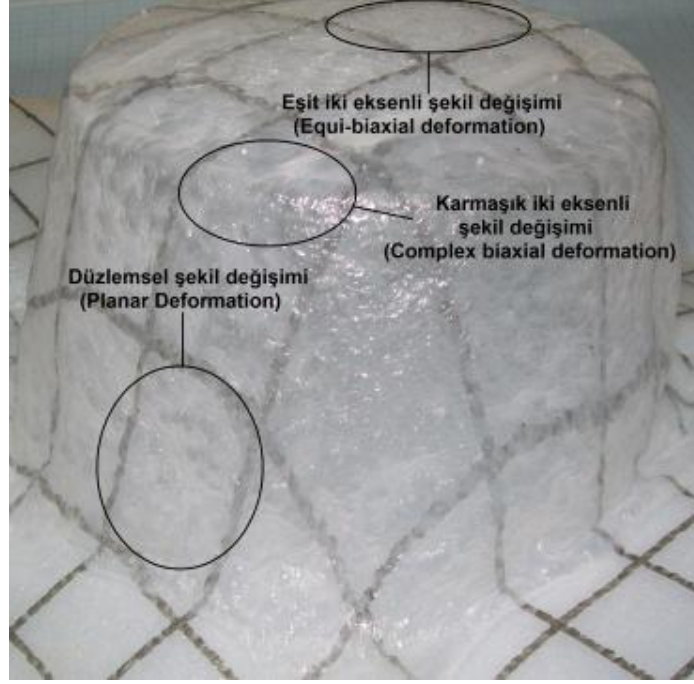
Şekil 3.40 Konik geometrili kalıpta şekil verilen % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzemenin farklı açılardan görünüşü.



Şekil 3.41 Kübik geometrili kalıpta şekil verilen % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzemenin farklı açılardan görünüşü.



Şekil 3.42 Silindirik geometrili kalıpta şekil verilen % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzemenin farklı açılardan görünüşü.



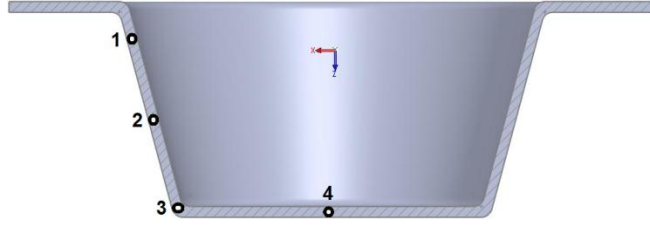
Şekil 3.43 Konik geometrili kalıpta şekil verilen % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levha malzemenin deformasyon mekanizmaları.

3.6. Kompozit Levhaların Şekillendirilmesi Sonucu Elde Edilen Yarı Mamullerde Oluşan Elyaf Dağılımlarının İncelenmesi

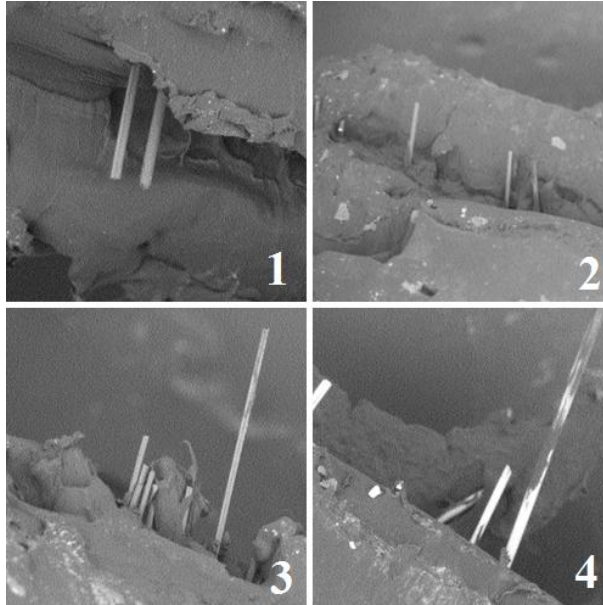
Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesi ile şekil verilen ağırlıkça muhtelif oranlarda elyaf ile takviye edilmiş termoplastik matrisli kompozit levhalardaki elyaf dağılımlarını daha iyi analiz edebilmek amacı ile belirli kesitlerde alınan numunelerin elektron mikroskobu yardımıyla görüntüleri alınmıştır. Taramalı elektron mikroskobuna ait bir görüntü Şekil 3.44'te verilmiştir. Cihaz iki ayrı bölümünde görüntü alımına imkân sağlamaktadır. Numune hazırlama işleminden sonra hem optik olarak hem de 1/30000 büyütme kapasiteli elektron mikroskobu yardımıyla görüntü alınabilmektedir. Cihaz kurulumundan önce vakum oluşumunun sağlanabilmesi için elektron mikroskobu 12 saat süre ile vakum pompasına bağlı olarak kalmıştır. Vakum ve ısı ile şekil verilen konik yarı mamul üzerinde dört ayrı noktada elyaf yönlenmeleri incelenmiştir. Konik parçanın tabanında merkezde(Nokta 4), taban yarıçap yüzeyi üzerinde(Nokta 3) ve yan duvarda iki adet olmak üzere (Nokta 1-2) elyaf yönlenmeleri incelenmiştir (Şekil 3.45). Belirlenen noktalardaki elyaf dağılımları Şekil 3.46, 3.47, 3.48, 3.49, 3.50 ve 3.51'de gösterilmiştir.



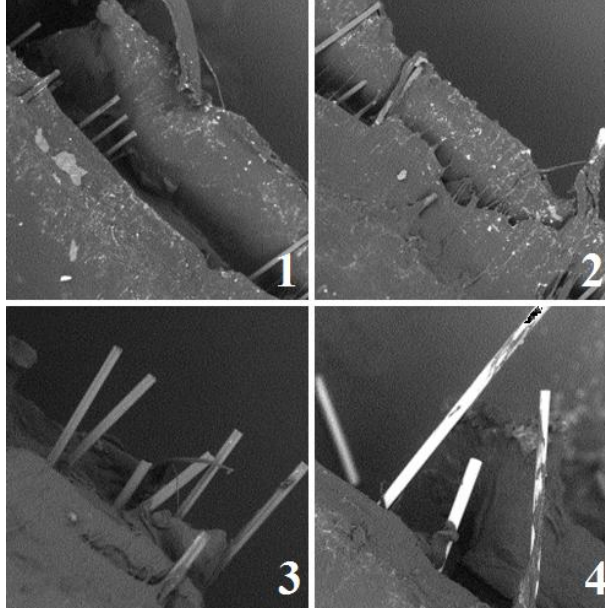
Şekil 3.44 Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM).



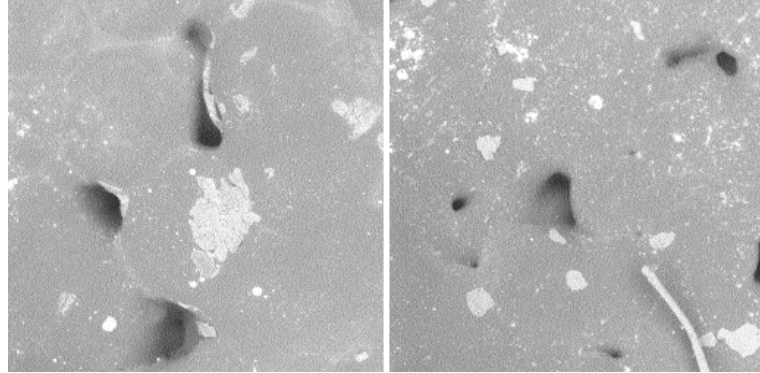
Şekil 3.45 Elyaf dağılımları incelenen noktaların konik yarı mamul üzerindeki konumları.



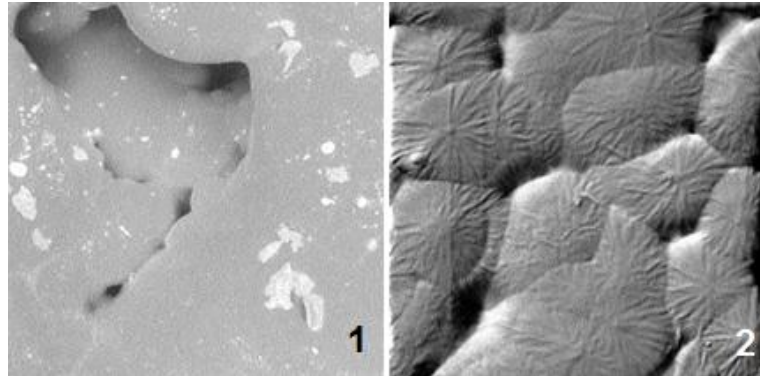
Şekil 3.46 % 5 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul kesitinden alınan SEM görüntüleri, büyütme:500x, (Nokta 1-2-3-4)



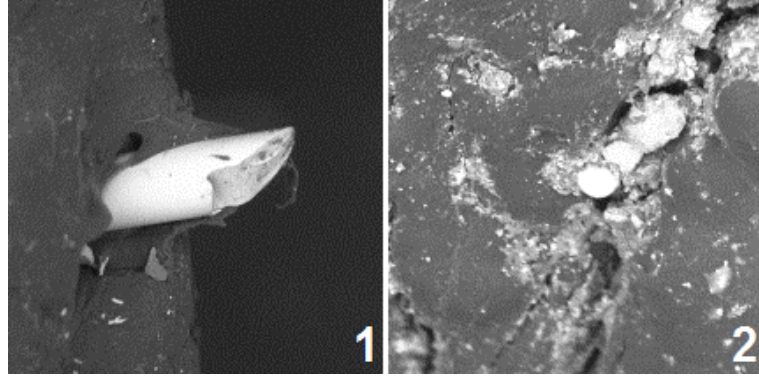
Şekil 3.47 % 15 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul kesitinden alınan SEM görüntüleri, büyütme:500x, (Nokta 1-2-3-4)



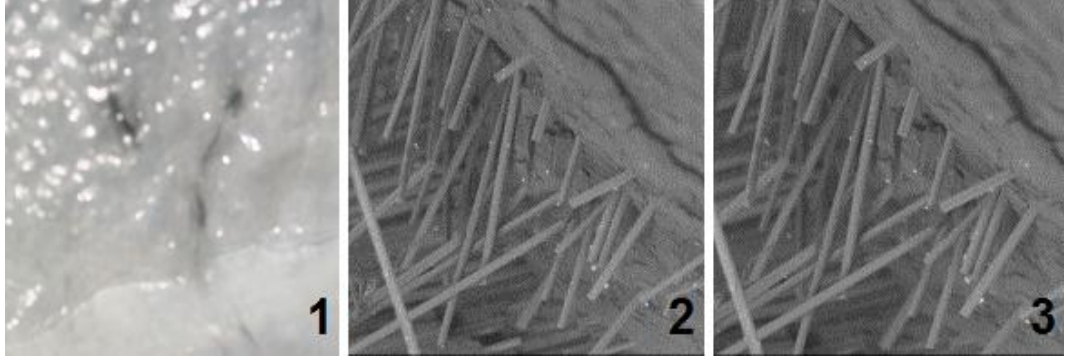
Şekil 3.48 % 5 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul yüzeyinden alınan SEM görüntüleri, büyütme:500x.



Şekil 3.49 1-% 5 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul yüzeyinden alınan SEM görüntüsü, büyütme:500x, 2-% 15 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamul yüzeyinden alınan Topografik SEM görüntüsü, büyütme:3800x.



Şekil 3.50 % 15 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamulde matris ve takviye bileşenlerinin etkileşimi, 1-Elyaf doğrultusuna karşıdan bakış, büyütme:2940x, 2-Elyaf doğrultusunda bakış, büyütme:3750x

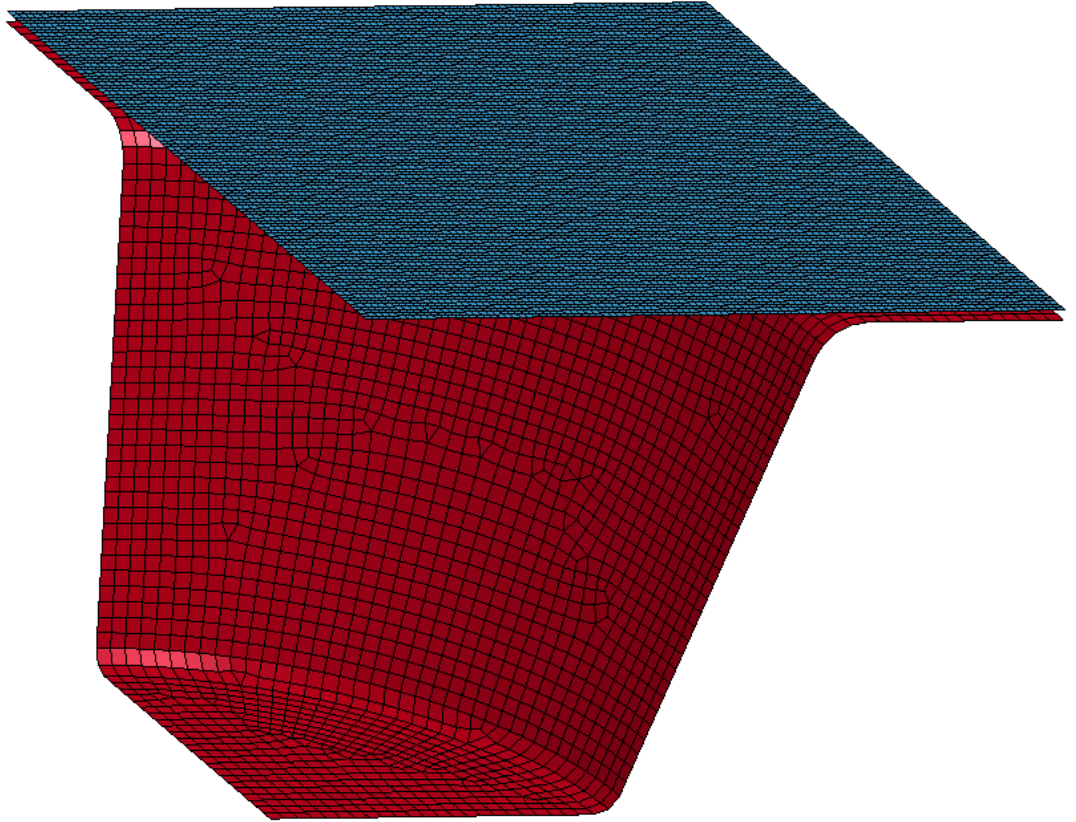


Şekil 3.51 1-% 15 karbon elyaf takviyeli PP konik yarı mamulde elyaf kümelenmesi, 2-Elyaf kümesinde alınan kesitteki SEM görüntüsü, büyütme:745x, 3-Elyaf kümesinde alınan kesitteki SEM görüntüsü, büyütme:850x.

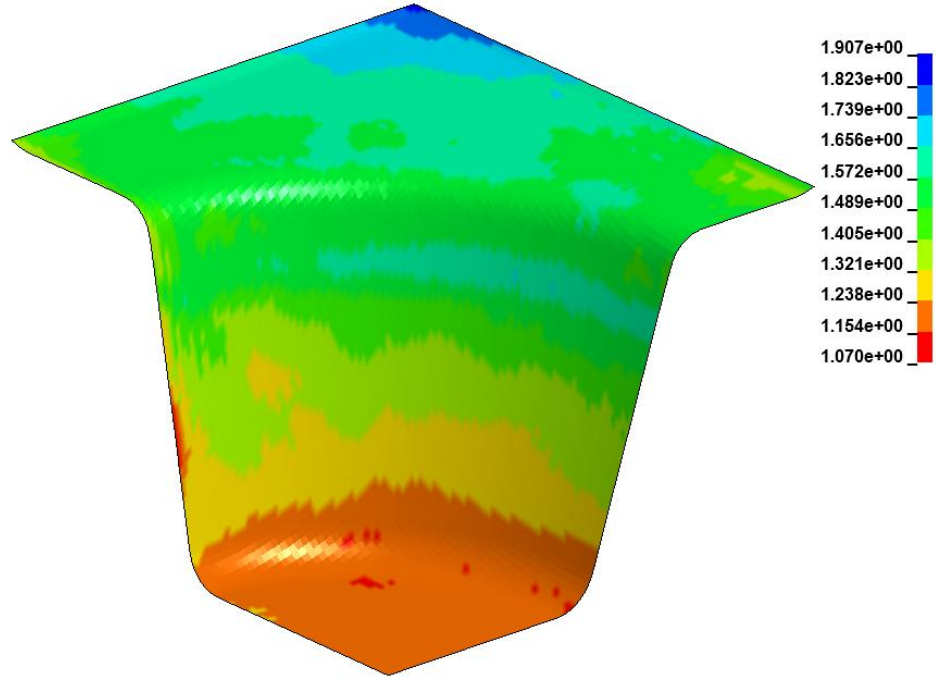
3.7. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Simülasyonu

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde üç farklı geometride kalıp bulunmaktadır. Mevcut şekil verme metodunun simülasyonunun yapılabilmesi amacıyla konik kalıp seçilmiştir. Şekil verilen polimer, 2 mm kalınlığında 300x300 mm² yüzey alanına sahip PS termoplastik levha malzeme seçilmiştir. Çalışmada levha ve kalıbın tümü değil dörtte biri hesaba katılmış ve sonlu elemanlar modeli hazırlanırken dikkate alınmıştır. Bu seçim simülasyonun daha kısa zamanda yapılabilmesi için öngörülmüştür. Polimer malzeme elasto-plastik malzeme modeli uyarınca mevcut malzeme parametrelerinin girilmesiyle tanımlanmıştır [85]. Şekil verilen polimer levha tamamen yüzey elemanlardan (Shell elements) oluşmaktadır. Kalıp malzemesinin bu süreçte deforme

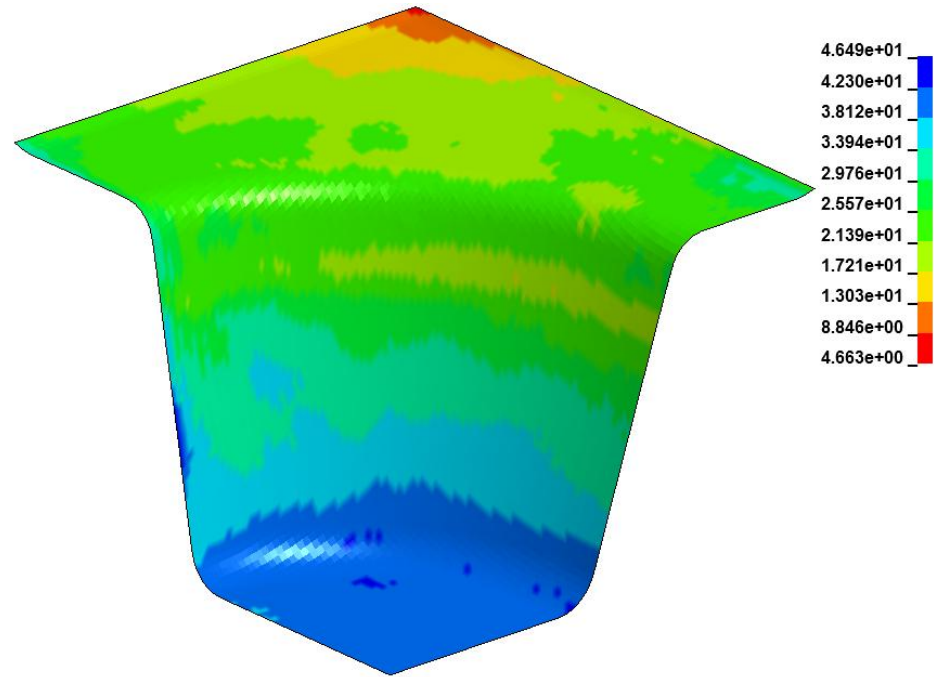
olmadığı kabulü yapılmış ve rijit yüzey elemanları(Rigid shell elements) ile oluşturulmuştur. Kalıp üç boyutlu uzayda ankastre olarak sabitlenmiştir. Kartezyen koordinatlarda; x, y ve z eksenleri doğrultusunda öteleme (Deflection); "0", x, y ve z eksenleri etrafında dönme (Rotation); "0" olarak kabul edilmiştir. Polimer levha ile tutucu pot çemberinin temas ettiği yüzeyler ankastre olarak sabitlenmiş, diğer iki kenarı boyunca ise simetri sınır koşulları kullanılmıştır. Levhaya uygulanan basınç değeri zamana bağlı olarak 4 saniye içerisinde uygulanmıştır. Uygulanan basınç değeri 0.1 MPa olarak belirlenmiştir. Zamana bağlı çözüm oluşturabilmek ve simülasyonu gerçekleştirebilmek için LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Polimer levha ile kalıp yüzeyi arasında kontak parametreleri düğüm noktası-yüzey (node-to-surface) esasına bağlı kalarak atanmıştır. Polimer levha ve kalıbın sonlu elemanlar modeli Şekil 3.52'de verilmiştir. Simülasyon sonucu elde edilen görseller Şekil 3.53, 3.54, 3.55 ve 3.56'da gösterilmektedir.



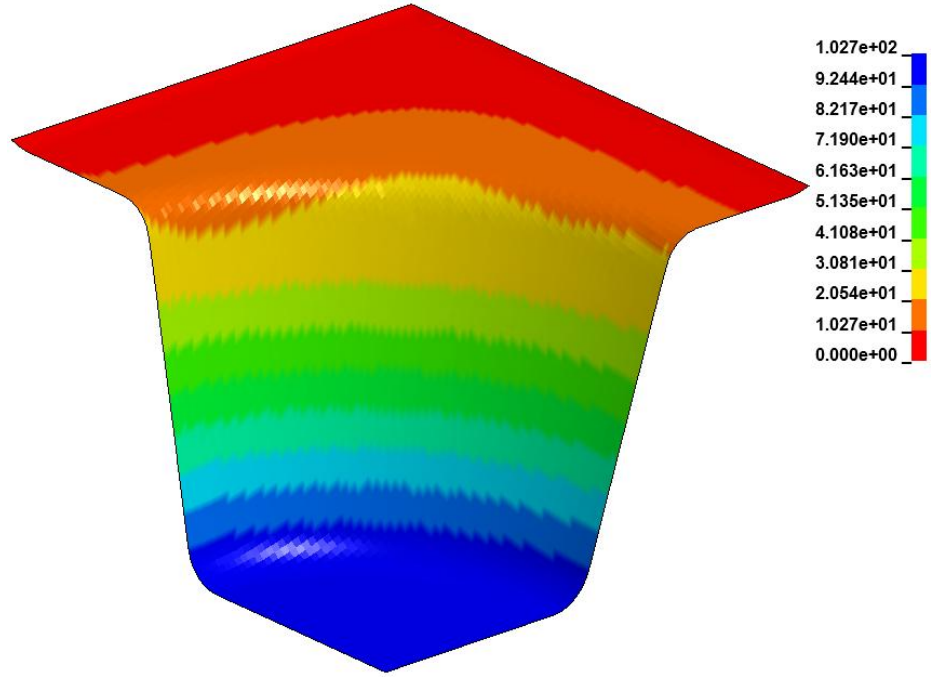
Şekil 3.52 Ağ örülmüş(Meshed) ve yüzey elemanlarından(Shell elements) oluşan konik geometrili vakum ve ısı ile şekil verme kalıbı ile polimer levhanın dörtte bir modeli.



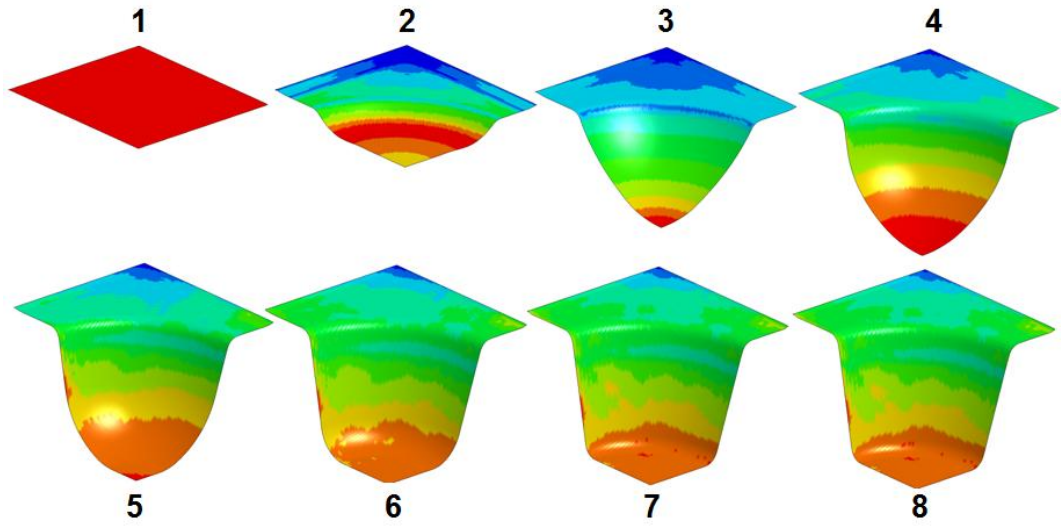
Şekil 3.53 Polimer levhada oluşan nihai cidar kalınlık dağılımı.



Şekil 3.54 Polimer levhada oluşan % kalınlık düşüşü dağılımı.



Şekil 3.55 Polimer levhada meydana gelen toplam deplasman dağılımı.



Şekil 3.56 Polimer levhanın kademeli şekil değişimi. Sırasıyla 1-8.

3.7.1. Alansal Çekme Oranı (Areal Draw Ratio) Kullanılarak, Deneysel Çalışmada Şekil Verilen Konik ve Silindirik Yarı Mamullerdeki Cidar Kalınlık Dağılımının Tespiti.

Alansal Çekme Oranı (Areal Draw Ratio) vakum ve ısı ile şekil verme prosesi öncesinde üretilmek istenen ürünün kalınlık değerinin ne kadar azalacağını pratik olarak ortaya koyan bir öngörüdür. Hesaplama tamamen hacim dengesine dayanır. Şekil verme öncesinde polimer levhanın hacmi ile şekil verme sonrasındaki hacminin birbirine eşit olması temeline dayanarak Alansal Çekme Oranı hesaplanır. Başlangıçta A_0 yüzey alanına (mm^2), t_0 kalınlığına (mm) sahip polimer levha; şekil verme işleminden sonra A_d yüzey alanına (mm^2) ve t_d kalınlığına (mm) sahip olsun [1, 2, 3, 4];

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

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

Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılarak şekil verilen yarı mamuldeki cidar kalınlığı değişimi hesaplanabilir. Eğer polimer levhanın kademeli deformasyonu ve o anki yüzey alanı tespit edilirse; o noktalar için cidar kalınlık dağılımı oluşturulabilir. Deneysel çalışmada kullanılan konik ve silindirik yarı mamuller için şekil değiştirme kademeleri Şekil 3.57 ve 3.58'de verilmiştir. Her iki yarı mamuldeki cidar kalınlık dağılımı, Geometrik Elemanlar Analizi kullanılarak da oluşturulmuştur. Silindirik ve konik yarı mamulde alınan kesitteki asıl cidar kalınlık dağılımının tespiti için 0.8 mm kalınlığında PVC film malzeme kullanılarak vakum ve ısı ile şekil verme yöntemiyle şekillendirilmiştir. PVC film malzeme Plasko Plastik San. ve Tic. A.Ş. tarafından $300 \times 300 \text{ mm}^2$ yüzey alanına sahip kare şeklinde tedarik edilmiştir. Ortalama şekil verme sıcaklığı $140-145 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak, RAM DT-8855 kızılötesi ölçüm yapan bir termometreyle levha yüzeyinden alınan veriler yardımıyla tespit edilmiştir. Kalınlık profili hem Alansal Çekme Oranı hem de Geometrik Elemanlar Analizi uyarınca hesaplanan kesitteki gerçek kalınlık değerleri ürün tabanının merkezinden başlayarak ürün yan duvarının bittiği noktadaki 10 mm'lik yarıçapın son noktasına kadar olan yay uzunluğu boyunca 19 farklı noktada 1/100 hassasiyetli dijital kumpas(Electronic Digital Caliper, 0-150 mm) yardımıyla tespit edilmiştir. Alansal Çekme Oranı kullanılarak tespit edilen kalınlık profili, deneysel metotla belirlenen değerlerle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Böylelikle Alansal Çekme Oranı vasıtasıyla oluşturulan kalınlık dağılımının doğruluğu sınanmıştır.

Bununla birlikte vakum ve ısı ile şekil verilmiş, "çanak" olarak adlandırılan bir

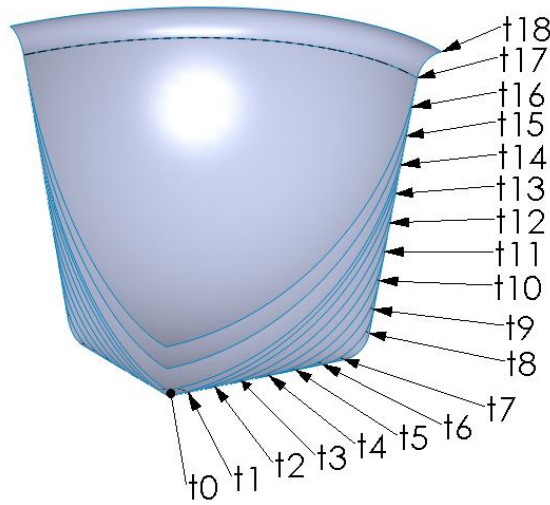
ürün için T-SIM vakum ve ısı ile şekil verme simülasyon yazılımı kullanılarak kalınlık dağılımı belirlenmiştir. Çanakta farklı kesitler alınarak bu kesitlerdeki cidar kalınlık dağılımı Alansal Çekme Oranı vasıtasıyla da hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak grafik yöntemle incelenmiştir.

T-SIM yazılımı kullanılarak yapılan simülasyonda tek kalıp yani dişi kalıp kullanılmış (Negative Forming), levha malzeme boyutları 200x200 mm² seçilmiştir. DOW Material Magnum 500 (Mass ABS for sheet thermoforming) ticari adıyla verilen levha malzeme için şekil verme sıcaklığı 200 °C ve kalınlık 3 mm olarak belirlenmiştir. Şekil verme sıcaklığında malzemenin şekil değiştirme davranışı K-BKZ WAGNER I malzeme modeliyle tanımlanmıştır. Şekil verme sıcaklığında basıncın zamanla değişimi doğrusaldır. 500 ms'lik zaman içinde 300 kPa pozitif basınç oluşumu hedeflenmiştir. Kullanılan takımın sürtünme katsayısı "1" olarak verilmiştir. Bu koşul; şekil değiştirme esnasında kalıp yüzeyine temas eden polimer levhanın sertleşerek katılaşp rijit bir hal aldığı, daha sonra kalıp yüzeyi üzerinde kaymadığını ve gerdirme sonrasında incelmediğini ifade etmektedir.

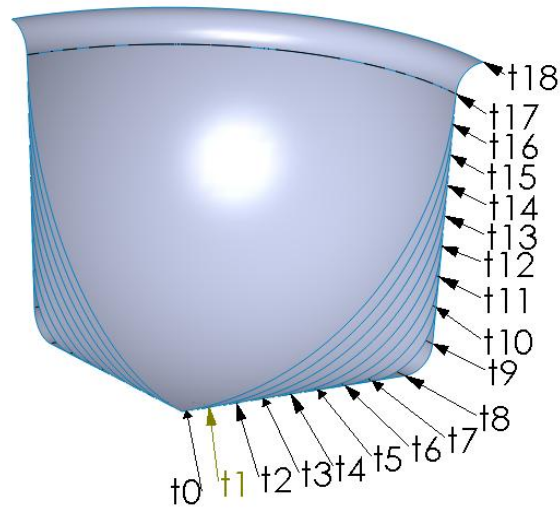
K-BKZ (Kaye-Bernstein, Kearsley, Zapas) Wagner I malzeme modeli zamana bağlı lineer olmayan viskoelastik (Non-linear viscoelastic) şekil değişimini temsil etmektedir [86]. Simülasyon içerisinde malzeme modelinin tanımlı hale gelebilmesi için gerekli katsayılar; farklı deformasyon oranlarıyla icra edilen tek eksenli çekme deneyleri sonunda tespit edilmiş ve sürece dâhil edilmiştir. Şekil 3.59 simülasyonda kullanılan takımın katı modelini göstermektedir. Çanak üzerinde x=0, y=0 ve köşegen doğrultusunda kesit alınarak ürün kalınlık dağılımı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 3.60, 3.61 ve 3.62 alınan kesitleri ve doğrultularını, buna ek olarak ürün kalınlık dağılımını göstermektedir.

Karşılaştırmak ve Alansal Çekme Oranı ile tespit edilen ürün kalınlık dağılımının tespit edilmesi için çanağın katı modeli DXF dosya formatında, Solidworks yazılımı ile görüntülenmiştir. *.sldprt formatına dönüştürülerek yüzey elemanlarından oluşan modeli hazırlanan çanak adlı parçanın kademeli şekil değişimi adım adım gerçekleştirilmiş ve her adımdaki yüzey alanı belirlenmiştir. Buna göre Alansal Çekme Oranı kullanılarak cidar kalınlık dağılımı tespit edilmiş ve simülasyon sonucu elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 3.63'te Alansal Çekme Oranı kullanılarak oluşturulan şekil değişim kademeleri verilmiştir.

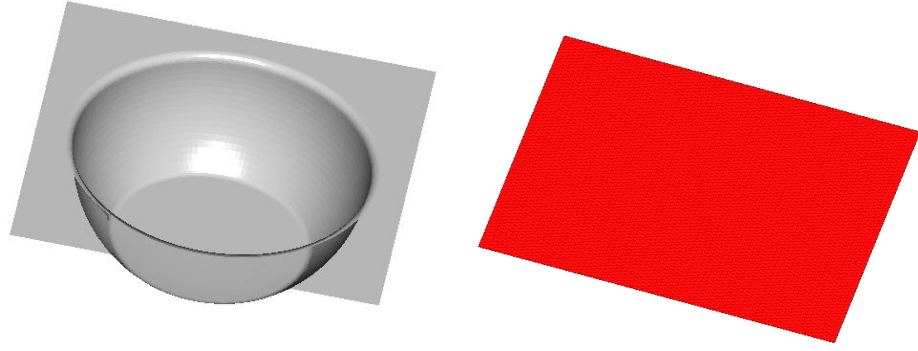
Bugüne kadar gerçekleştirilen deneysel çalışma bünyesindeki tüm polimer levhaların şekil değiştirme davranışları göz önüne alınarak; 0.8 mm kalınlığında PVC termoplastik film malzemenin kademeli şekil değişimi Solidworks yardımıyla yüzey modelleme tekniği kullanılarak oluşturulmuş ve her adım için şekil değiştiren ürün yüzey alanı tespit edilmiştir. Alansal Çekme Oranı kullanılarak elde edilen konik ve silindirik yarı mamul cidar kalınlık dağılımları karşılaştırmalı olarak Şekil 3.64 ve 3.65'te gösterilmiştir. Ayrıca "çanak" isimli farklı bir ürün için icra edilen vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonu sonucunda elde edilen ürün kalınlık dağılımı karşılaştırmalı olarak Şekil 3.66'da verilmiştir.



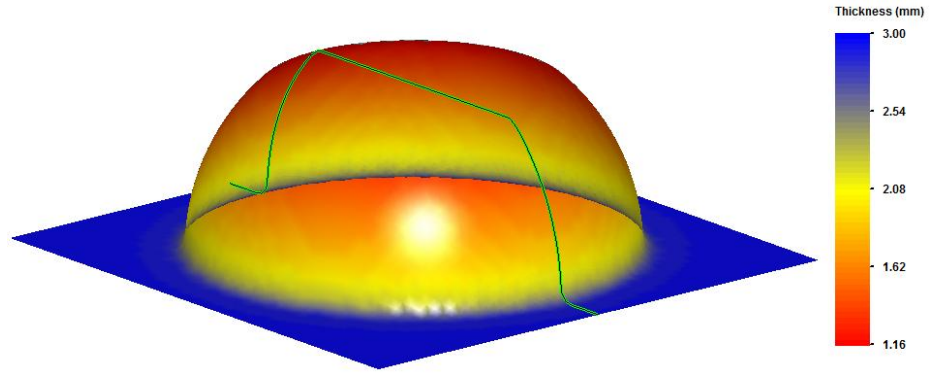
Şekil 3.57 ¼ Konik yarı mamulün şekil değiştirme kademeleri ve tespit edilen kalınlıklar.



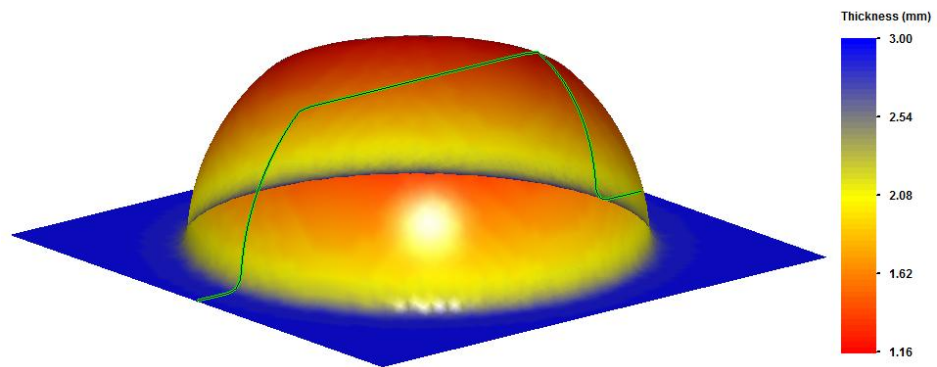
Şekil 3.58 ¼ Silindirik yarı mamulün şekil değiştirme kademeleri ve tespit edilen kalınlıklar.



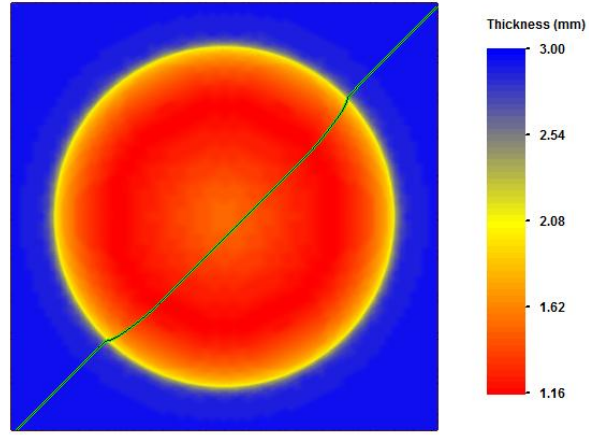
Şekil 3.59 T-SIM yazılımıyla gerçekleştirilen simülasyonda kullanılan kalıp geometrisi ve ABS polimer levha.



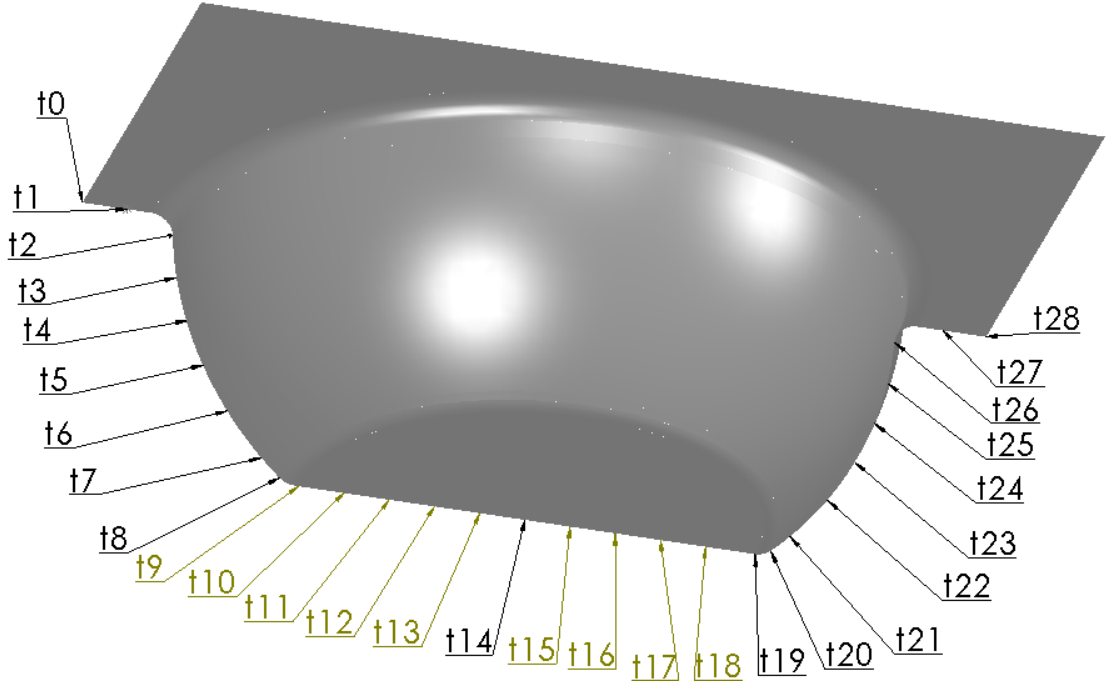
Şekil 3.60 Çanak üzerinde alınan $x=0$ doğrultusundaki kesit(Yeşil çizgi) ve kalınlık değişimi.



Şekil 3.61 Çanak üzerinde alınan $y=0$ doğrultusundaki kesit(Yeşil çizgi) ve kalınlık değişimi.

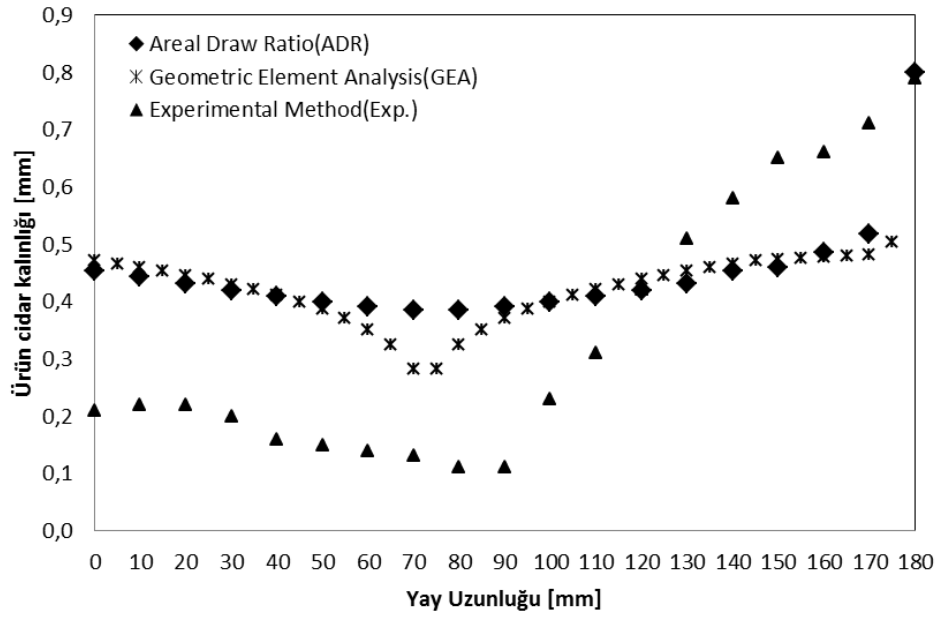


Şekil 3.62 Çanak üzerinde alınan köşegen doğrultusundaki kesit(Yeşil çizgi) ve kalınlık değişimi.

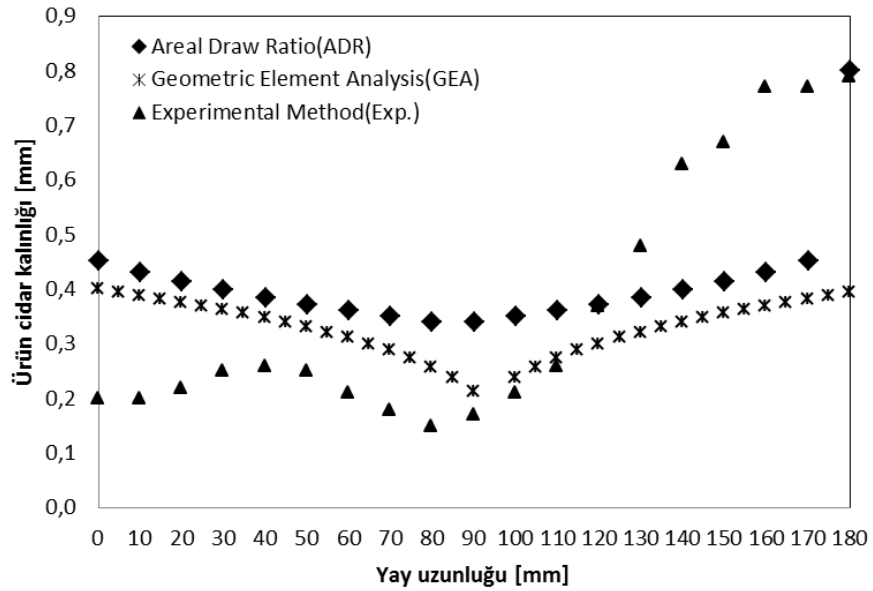


Şekil 3.63 Çanak üzerinde kalınlığı Alansal Çekme Oranı ile tespit edilen noktalar.

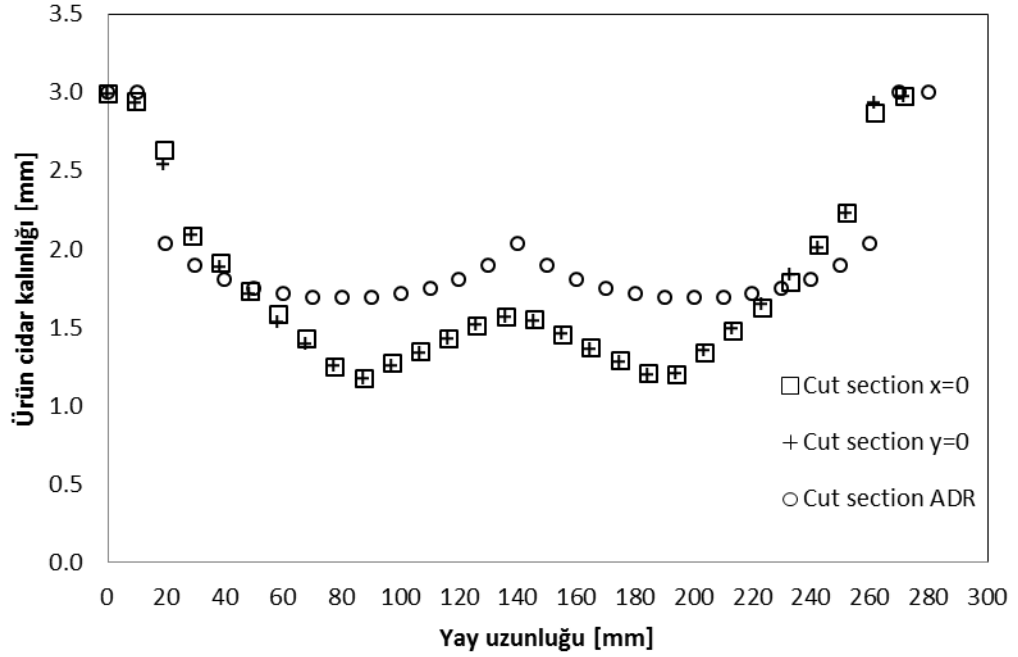
Yapılan çalışma, Alansal Çekme Oranı ile tespit edilen kalınlık profilinin gerçekte olduğundan farklı değerler aldığını ortaya koymaktadır. Şekil 3.64, 3.65 ve 3.66'dan da görüleceği üzere bu yöntemin, ürün kalınlık dağılımından ziyade üründe en zayıf noktanın yani en ince kalınlık değerinin olduğu noktanın tespiti için kullanılması daha makul sonuçlar ortaya koyacaktır.



Şekil 3.64 Konik yarı mamul üzerinde alınan kesitte belirlenen kalınlık dağılımının karşılaştırmalı gösterimi.



Şekil 3.65 Silindirik yarı mamul üzerinde alınan kesitte belirlenen kalınlık dağılımının karşılaştırmalı gösterimi.



Şekil 3.66 Çanak üzerinde farklı doğrultularda alınan kesitlerdeki ürün kalınlık dağılımının karşılaştırmalı gösterimi.

3.8. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Bazı Mekanik Özelliklerinin Tespiti

Deneysel çalışma içerisinde vakum ve ısı ile şekil verilen plastik levhaların bazı mekanik özelliklerinin tespit edilmesi ve araştırılması amacıyla bir dizi tahribatlı muayene gerçekleştirilmiştir.

3.8.1. Çekme Deneyi(ASTM D 638)

Çekme deneyinde, Zwick-Roell Type 1455, 20 kN (Materials Testing Machine, Floor-Standing Model) çekme deney cihazı kullanılmıştır. Numuneler levhalar üzerinden numune kesme kalıbı vasıtasıyla çıkarılmıştır. Her levha malzeme için üç adet çekme deney numunesi alınmıştır. Deney sonuçlarında verilen Elastisite Modülü, Akma Dayanımı, Maksimum Kopma Dayanımı, % Kopma Uzaması gibi değerlerin tespiti elde edilen verilerin ortalaması alınarak yapılmıştır.

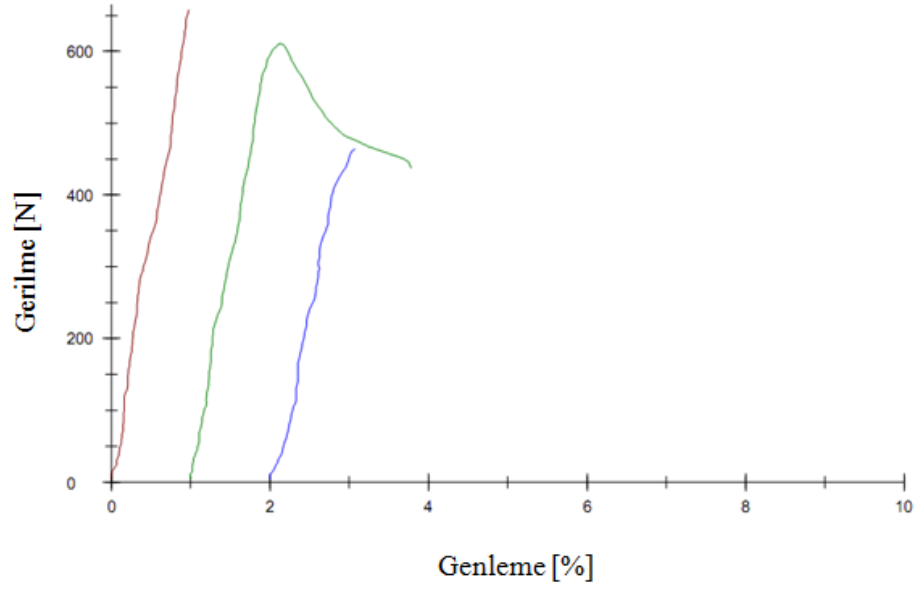


Şekil 3.67 Deneylerde kullanılan Zwick-Roell Type 1455-20 kN (Materials Testing Machine, Floor-Standing Model) çekme deney cihazı

Vakum ve ısı ile şekil verilen katkısız PP ve PVC levhaların gerekli mekanik özellikleri, üretici firma tarafından sağlanan kataloglardan temin edilmiştir. Ancak kullanılan PS levhalar için bu bilgiler tedarik edici firma tarafından verilmemiştir. Bu maksatla; Akay Stant firması tarafından tedarik edilen Sabic PS 825E (High Impact Polystyrene for Thermoforming) 30x30 cm² yüzey alanına sahip 2 mm kalınlığında levhalardan 3 adet çekme deney numunesi, numune kesme kalıbı vasıtasıyla çıkarılmıştır. Sonuçlar Tablo 3.5 ve Şekil 3.68'de verilmiştir.

Tablo 3.5 PS malzemeye ait çekme deneyi sonuçları.

ELASTİSİTE MODÜLÜ(N/mm ²)	MAKSİMUM ÇEKME DAYANIMI(N/mm ²)	MAKSİMUM KOPMA DAYANIMI(N/mm ²)	% KOPMA UZAMASI
3158	22.74	20.3	2.75

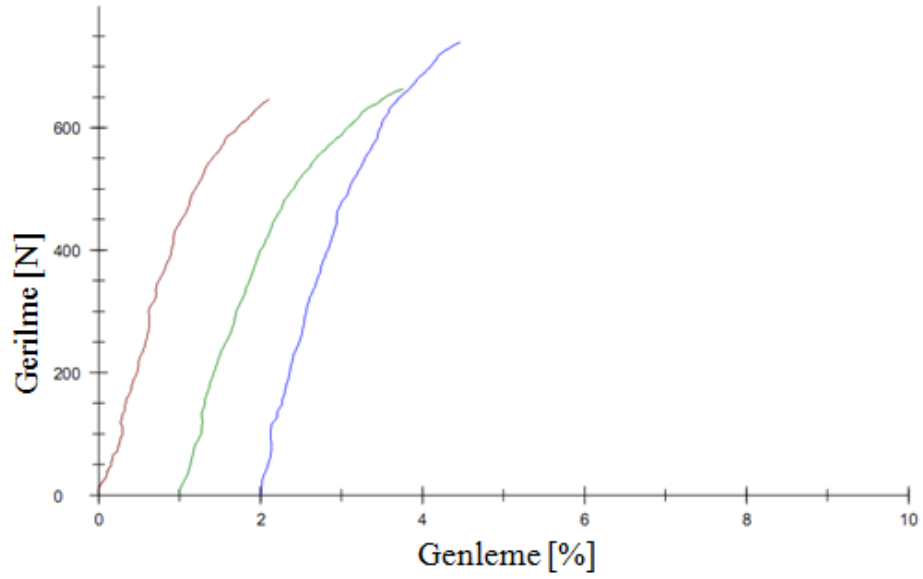


Şekil 3.68 PS malzemeye ait numunelerin Gerilme-Genleme diyagramı.

Takviyeli levha malzemeler içinde çekme deneyi yapılmıştır. Ancak % 5 ve % 15 karbon elyaf takviyeli PP ve % 5 cam elyaf takviyeli PP levhadan kesme kalıbı kullanılarak çekme numunesi çıkarılamamıştır. Sadece % 5 cam elyaf takviyeli HDPE levhadan üç adet çekme numunesi çıkarılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 3.6 ve Şekil 3.69, % 5 cam elyaf takviyeli HDPE malzeme için çekme deneyi sonuçlarını ortaya koymaktadır.

Tablo 3.6 % 5 cam elyaf takviyeli HDPE malzemeye ait çekme deneyi sonuçları.

ELASTİSİTE MODÜLÜ(N/mm ²)	MAKSİMUM ÇEKME DAYANIMI(N/mm ²)	MAKSİMUM KOPMA DAYANIMI(N/mm ²)	% KOPMA UZAMASI
2284	29.43	29.43	2.71



Şekil 3.69 % 5 cam elyaf takviyeli HDPE malzemeye ait numunelerin Gerilme-Genleme diyagramı.

3.8.2. Erime Akış İndeksi (MFI) Deneyi (ISO 1133)

Erime Akış Hızı; termoplastiklerin kalite kontrolü için tipik bir indeksi temsil etmektedir. Erime Akış İndeksi ya da Erime İndeksi olarak adlandırılmakta olan bu kavramın günümüzdeki standart gösterimi; g/10 dakika birimiyle (SI Units) ifade edilen, Kütleli Erime Akış hızı ya da MFR şeklindedir. Tipik Erime Akış ekipmanları hem kompakt hem de kullanımı kolaydır. Temel prensip; termoplastik örneklerin (esas olarak granül, toz ve pul şeklinde) ısıtılarak akışkan hale getirilmesi ve kapiler kalıp boyunca silindir içinden akmaya zorlanmasıdır. Ekstrüzyon pistonu; genelde 21,6 kg değerine kadar olan ağırlıklarla yüklenmiştir. MFR değerleri; sıcaklık, her bir malzeme çeşidi için tanımlanmış olan uygulanan yükün standart olduğu koşullar altında ve ayrıca sabit kalıp çeşidinin (2,095 mm iç çap, 8 mm uzunluk) kullanımıyla elde edilmiştir. Erime akış hızı; malzeme özelliklerinin derinden anlaşılmasına gerek olmadığı durumda, bir dizi malzemenin karşılaştırılması ya da farklı malzemelerin akış özelliklerinin değerlendirilmesi (genellikle ekstrüzyon prosesleri) için kullanılabilir hızlı bir araçtır. Gerçek reolojik karakterizasyon; reometrelerin kullanımıyla gerçekleştirilebilmektedir. Erime akış hızı; viskozite ile ters orantılıdır ancak viskozitenin belirlenmesi için kullanılmamaktadır. Vakum ve ısı ile şekil verme

işlemlerinde kullanılan malzemelerinin MFI değerlerinin belirlenmesinde Zwick melt flow tester series 4100 cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.70). Sonuçlar ve deneyde kullanılan parametreler Tablo 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.70 Zwick 4100 Melt Flow Index akışkanlık ölçme cihazı.

Tablo 3.7 Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde kullanılan malzemelerin MFI deney sonuçları.

Deney	Standart/Kontrol Değeri	İlgili Standart					
			%5 CAM ELYAF TAKVİYELİ HDPE	%15 KARBON ELYAF TAKVİYELİ PP	PP NUMUNE	PS NUMUNE	PVC NUMUNE
MFI	190°C-5kg'da gr/10dk	ISO 1133	25,73	-	-	-	-
	230°C-2,16kg'da gr/10dk		-	~41	3,56	-	-
	200°C-5kg'da gr/10dk		-	-	-	18,08	-
	230°C-5kg'da gr/10dk		-	-	-	-	38,53

3.8.3. Darbe Deneyi (Gardner Impact Test-ASTM D 5420)

Vakum ve ısı ile şekil verilen plastik levhaların darbe dayanımı Şekil 3.71'de gösterilen Devotrans plastik darbe test cihazı SAH-YP kullanılarak belirlenmiştir. Her plastik malzeme için 60x60 mm² yüzey alanına sahip 20 adet numune hazırlanmıştır. Deneyde kullanılan test cihazında kırıcı pim geometrisi ve düşen ağırlık E-Tipi ASTM

D 5420 deney standardına uymaktadır. Kullanılan ağırlık 3.6 kg, kırıcı pim çapı ise 1 inç olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.71 Devotrans plastik darbe test cihazı SAH-YP

Tablo 3.8 PS (t=2.5 mm) levha malzemenin darbe deneyi ölçümleri.

Total dart height (mm)	Outcome of Test (X = failure, O = non-failure)																				n _x	n _o	i	n _i	i n _i	i ² n _i
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20						
250														X							1	0	2	1	2	
240				X		X		X				X		O		X		X		X	7	1	1	7	7	
230	X		O		O		O		X		O		O				O		O		2	7	0	2	0	
220		O									O										0	2				
Totals											10	10		10	9											
(N _x)											(N _o)		(N)	(A)	(B)											
h ₀ =230 mm		N=N _x =10, d=10 mm																								
h = h ₀ +d _i (A/N-0,5)																										
h=234 mm																										

Tablo 3.9 PS (t=2 mm) levha malzemenin darbe deneyi ölçümleri.

Total dart height (mm)	Outcome of Test (X = failure, O = non-failure)																				n _x	n _o	i	n _i	in _i	i ² n _i
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20						
220															X						1	0	2	1	2	
210		X		X		X		X				X		O		X		X		O	7	2	1	7	7	
200	O		O		O		O		X		O		O				O		O		1	8	0	1	0	
190											O										0	1				
Totals																					9	11		9	9	
																					(N _x)	(N _o)		(N)	(A)	(B)
h ₀ =200 mm		N=N _x =9, d=10 mm																								
		h = h ₀ +d _i (A/N-0,5)																								
		h=205 mm																								

Tablo 3.10 PVC (t=3 mm) levha malzemenin darbe deneyi ölçümleri.

Total dart height (mm)	Outcome of Test (X = failure, O = non-failure)																				n _x	n _o	i	n _i	in _i	i ² n _i
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20						
590							X				X										2	0	4	2	8	
580				X		O		X		O		X									3	2	3	3	9	
570			O		O				O				X				X				2	3	2	2	4	
560		O												X		O		X			2	2	1	2	2	
550	O														O				X		1	2	0	1	0	
540																				O	0	1				
Totals																					10	10		10	23	
																					(N _x)	(N _o)		(N)	(A)	(B)
h ₀ = 550 mm		N=N _x =10, d=10mm																								
		h = h ₀ +d _i (A/N-0,5)																								
		h= 568 mm																								

Tablo 3.11 PP (t=3 mm) levha malzemenin darbe deneyi ölçümleri.

Total dart height (mm)	Outcome of Test (X = failure, O = non-failure)																				n _x	n _o	i	n _i	in _i	i ² n _i
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20						
780																				X	1	0	6	1	6	
770											X									O	1	1	5	1	5	
760										O		X		X					O		2	2	4	2	8	
750	X								O				O		X		O				2	3	3	2	6	
740		X						O								O					1	2	2	1	2	
730			X				O														1	1	1	1	1	
720				X		O															1	1	0	1	0	
710					O																0	1				
Totals																					9	11		9	28	
																					(N _x)	(N _o)		(N)	(A)	(B)
h ₀ =720 mm		N=N _x =9, d=10 mm																								
		h = h ₀ +d _i (A/N-0,5)																								
		h= 746,111 mm																								

Vakum ve ısı ile şekil verme işlemlerinde kullanılan takviye elemanı içeren levhalarında darbe dayanımı bu muayene yöntemiyle araştırılmak istenmiştir. Levhalardan uygun boyutlarda numuneler çıkarılmış ancak numune üzerinde hasar yani çatlak veya çatlak başlangıcı tespit edilememiştir. Numuneye temas eden pim ile birlikte numune birden fazla parçaya ayrılarak çatlak oluşumunun başladığı kırılma enerjisinin tespitini ortadan kaldırmıştır. Bu olgu, takviye elemanı içeren levhaların aşırı gevrek yapısından kaynaklanmaktadır.

3.9. Tartışma

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesi (Thermoforming) II. Dünya savaşından sonra öncelikle Birleşik Amerika sonrasında da Avrupa ve tüm dünya ülkelerinde yaygın olarak kullanılan bir polimer şekillendirme metodu olmuştur. Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin özellikle ambalaj ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılması ve bu üretim dallarının ülkemiz ekonomisine katkısı hesaba katıldığında vakum ve ısı ile şekil verme prosesinin önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Bu maksatla vakum ve ısı ile şekil verme prosesiyle takviye elemanı içermeyen muhtelif kalınlıklarda yarı kristalin ve amorf yapıda termoplastikler şekillendirilmiş ve ürün kalitesine etki eden unsurlar araştırılmıştır. Buna ek olarak ağırlıkça cam elyaf ve karbon elyaf takviyesi ile kompozit levhalar elde edilmiş ve vakum ve ısı ile şekil verme parametreleri araştırılmıştır. Başlıca amaç ürün kalitesine etki eden unsurları belirlemek olduğundan deneysel çalışma, vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonu ve Geometrik Elemanlar Analizi gibi yöntemlerle desteklenmiştir. Deneysel çalışmaya etki eden unsurların başında takviye elemanı içeren levhaların üretimi gelmektedir. Matris malzemesi olarak PP ve HDPE granüller kullanılmış ve üretim öncesinde nem alma işlemi uygulanamamıştır. Levha üretim hattında bulunan ekstrüderin gaz alma ünitesinin olmayışı üretilen takviye elemanı içeren levhalarda gaz kabarcıklarının oluşumunu kaçınılmaz kılmıştır. Levha üretim hattından çıkışta su soğutmalı silindirler arasından geçirilen plastik malzemenin sıcaklığı kademeli olarak düşürülemediği için. Bunun yerine zorlanmış taşınım ile levha yüzeyine fan yardımıyla ani soğutma işlemi uygulanabilmiştir. Bu da oluşan levhaların çarpılmasına ve aşırı sert, gevrek yapıda olmasına neden olmuştur. Tüm bu unsurlar maddeler halinde sayılırsa;

- ◆ Kullanılan PP ve HDPE granüllerin nem alma işlemi gerçekleştirilmemiştir.

- ◆ Kullanılan ekstrüder üç ısıtma zonlu bir ekstrüder olmakla birlikte, kalıbın ısıtılması ve sıcaklığının ayarlanması hassas bir şekilde yapılamamaktadır. Kalıbın üstünden ve altından ısıtılması tel rezistans ısıtıcılar vasıtasıyla sağlanmış, ısı kaybını önleme amacıyla ısıtıcılar cam yünü ile sarılmıştır. Kalıp sıcaklığı ise kovan üzerindeki üçüncü plaka ısıtıcıya seri bağlı olarak ısıtıcı sıcaklığıyla aynı sıcaklığa ayarlanabilmektedir.
- ◆ Ergimiş polimer malzeme levha kalıbından çıkışta iki adet fan yardımıyla zorlanmış taşınım ile soğutulmaktadır. Modern levha ekstrüzyon hatlarında ise çoklu soğutma zonları ile ergimiş polimerin levha haline gelirken daha yavaş soğuması dolayısıyla artık termik gerilmelerden arındırılması sağlanmaktadır. Mevcut sistemde bu yer almamaktadır. Dolayısıyla üretilen levhalarda farklı soğuma hızlarından kaynaklanan ısıl çarpılma yüksek miktarda görülmektedir.
- ◆ Levhaların üretiminde kullanılan ekstrüderin gaz alma ünitesi bulunmadığından polimer granüllerin ergimesi esnasında kovan içerisinde oluşan su buharı ve gazlar oluşan levhanın içerisinde mikro boşluklar halinde yer almaktadır. Bu gaz boşlukları hem levhanın mekanik dayanımını azaltmakta hem de oluşan levhanın mekanik özelliklerinin doğrultuya bağlı olmasına neden olmaktadır. Ekstrüzyon yönüne bağlı olarak yoğunlaşan bu boşluklar levhaya vakum ve ısı ile şekil verilmesini de zorlaştırarak levhanın lineer şekil değiştirme davranışını bozmaktadır.
- ◆ Üretilen kompozit levhaların yüzey pürüzlülüğü istenen hassasiyette ayarlanamamaktadır. Bunun nedeni ise kalıp çıkışındaki iki adet su soğutmalı metal milin istenen levha kalınlığını ve levha yüzey pürüzlülüğünü bir defada gerçekleştirememesidir.
- ◆ Kullanılan matris malzemeleri HDPE ve PP olarak seçilmiştir. PP ve HDPE yarı kristalin yapıda termoplastikler olduğundan şekil verme sıcaklık aralıkları oldukça dardır. Mevcut vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinde levha yüzey sıcaklığı direkt olarak tespit edilememekte ve ısıtıcı sıcaklığıyla ısıtma süresi birlikte ayarlanarak şekil verme şartları oluşturulmaktadır. Buda malzemenin şekil verme sıcaklığının ayarlanmasını zorlaştırmaktadır. PS ve PVC gibi amorf yapıdaki termoplastikler için şekil verme sıcaklık aralığı 20-30 °C olmakla birlikte bu sıcaklık aralığı yarı kristalin yapıdaki HDPE ve PP gibi termoplastikler için ise 3-5 °C olabilmektedir.

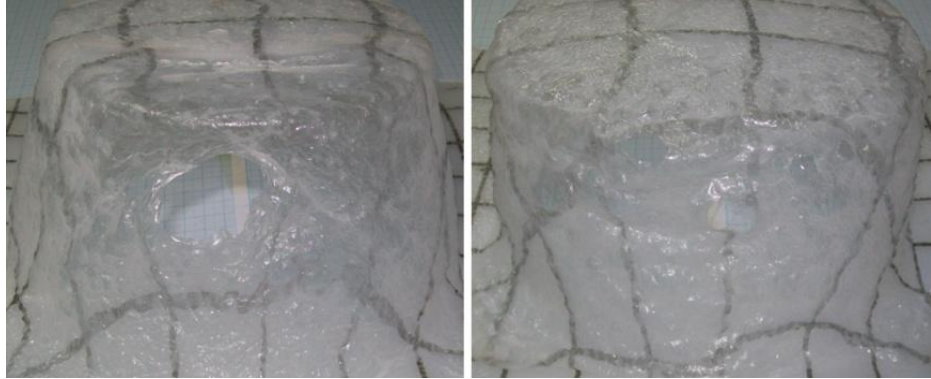
Buda işlenen malzemeye deneme-yanılma yöntemiyle ne denli zor şekil verileceğinin bir göstergesidir.

- ◆ Takviye elemanı olarak ağırlıkça muhtelif boyutlarda karbon ve cam elyaflar kullanılmıştır. Ancak matris malzemesi ile takviye elemanı arasındaki mekanik ve kimyasal bağ oluşumunu destekleyen bir bağlayıcı malzeme kullanılmamıştır. Takviye elemanı üzerine matris malzemesinin nüfuz etmesini kolaylaştıracak herhangi bir kimyasal uygulaması takviye elemanlarına yapılmamıştır. Buda kompozit levhanın şekil değiştirme kabiliyetini ve vakum ve ısı ile şekil verme parametrelerini etkileyen bir unsurdur.
- ◆ Vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinde tek taraflı ısıtma yapılmaktadır. Yani şekil verilecek levhanın tek yüzü ısıtılmaktadır. Modern vakum ve ısı ile şekil verme ünitelerinde ise iki taraflı ısıtma yapılarak levha kalınlığı boyunca daha üniform bir sıcaklık dağılımı sağlanmaktadır. Mevcut vakum ve ısı ile şekil verme ünitesinde ise bu sağlanamamaktadır. Levhanın ısıtılması sırasında rol oynayan ısı geçiş mekanizmaları ışınlama ile ısı geçişi ve taşınım ile ısı geçiştir. Isıtıcı elemanların levhaya olan uzaklığı ve konumları, levhanın ısındıkça sarkması gibi etmenler dikkate alındığında levha üzerinde izotermal bir dağılımın yakalanması zordur. Farklı noktalarda farklı sıcaklıkların oluşması ve bölgeler arası sıcaklık farkının 5 °C'yi aşması şekil verme esnasında farklı genleme oranlarına maruz kalan levhanın yırtılmasına veya katlanarak, kalıbın şeklini almasına engel olmaktadır.
- ◆ Vakum ve ısı ile şekil verme kalıbında soğumaya bırakılan yarı mamul kalıptan çıkarıldıktan sonra farklı soğuma hızlarından kaynaklanan ısıl çarpılmanın da etkisindedir.

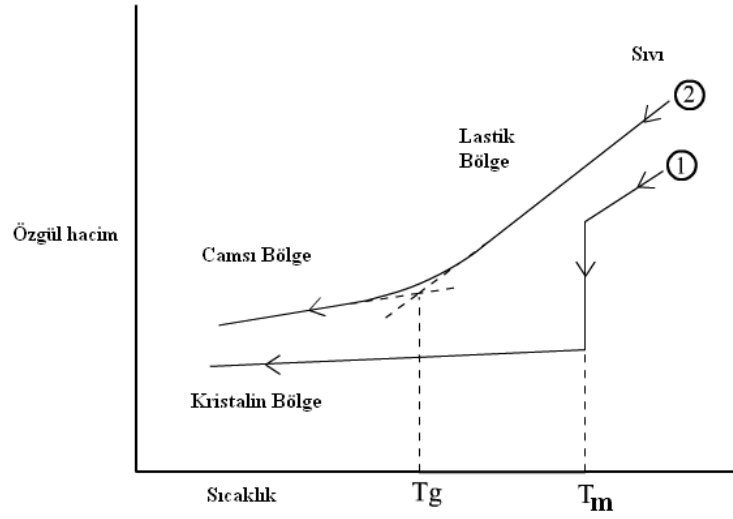
Vakum ve ısı ile şekil verilen takviyeli ürünlerde oluşan kusurlar görsel olarak Şekil 3.72 ve 3.73'te verilmiştir. Buna ek olarak Şekil 3.74 yardımıyla yarı kristalin ve amorf yapıdaki termoplastik polimer levhaların şekil verme sıcaklık aralıklarının farklılığı ifade edilmiştir.



Şekil 3.72 Takviye elemanı içeren levhalarda vakum ve ısı ile şekil verme işlemi sonrasında oluşan üretim kusurları. (Katlanma, büzülme, aşırı deformasyon, yüzey pürüzlülüğü.



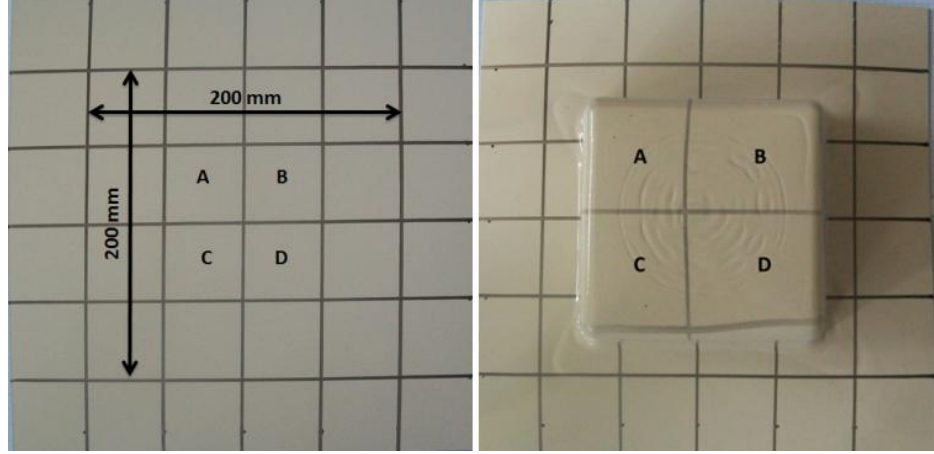
Şekil 3.73 Şekil verme sıcaklığında aşırı şekil değiştirme oranlarıyla yırtılan ürünlere ait görüntüler



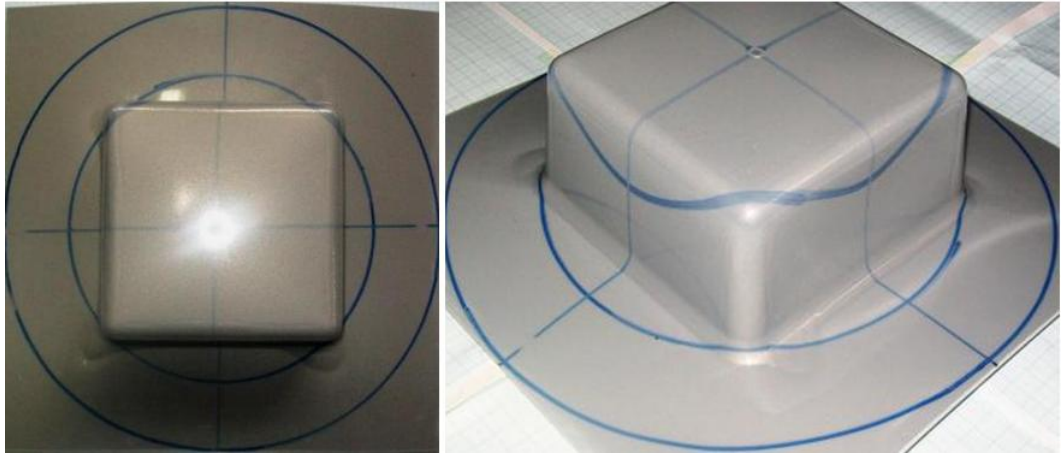
Şekil 3.74 1-Kristal yapıdaki polimerin sıcaklık eğrisi, 2-Amorf yapıdaki polimerin sıcaklık eğrisi

Kübik, silindirik ve konik kalıp ile şekil verilen farklı kalınlıklardaki levhalardan elde edilen yarı mamuller vasıtasıyla malzemenin kalıp geometrisine bağlı olarak şekil değiştirme davranışı araştırılmıştır. Buna ek olarak; levha malzeme üzerine 50 mm aralıklarla çizilen tel kafes görümlü çizgilerle levhanın hangi bölümlerinde aşırı şekil değişiminin meydana geldiği araştırılmıştır. Kübik yarı mamullerde şekil değişiminin Şekil 3.75'te gösterildiği biçimde levhanın $200 \times 200 \text{ mm}^2$ yüzey alanına sahip merkez kısmında olduğu gözle muayene yöntemiyle tespit edilmiştir. Şekil 3.75'te $100 \times 100 \text{ mm}^2$ alana sahip A+B+C+D yüzey elemanları verilmiştir. Kübik geometrili mamulde asıl şekil değişiminin bu dört yüzey elemanında gerçekleştiği deneysel çalışma neticesinde tespit edilmiştir. A, B, C, D yüzey elemanlarını da içine alan $200 \times 200 \text{ mm}^2$ alan içerisinde şekil verme sıcaklığında, üç farklı şekil değiştirme mekanizması rol oynamıştır. Eşit iki eksenli şekil değişimi (Equi-biaxial deformation), Karmaşık iki eksenli şekil değişimi (Complex biaxial deformation), Düzlemsel şekil değişimi (Planar deformation)[33-35]. Asıl şekil değişiminin gerçekleştiği bölgenin belirlenmesi amacıyla polimer levha üzerine yarıçapı 50, 100, 150 mm olan çember çizgiler çizilerek kübik yarı mamulün oluşumunda çizgilerin değişimi incelenmiştir. Şekil 3.76 göstermektedir ki; kübik yarı mamulün oluşumunda şekil değiştiren bölge, yarıçapı 100 mm olan çemberin içinde kalan dairesel alandır. Silindirik yarı mamul ise dönel

simetriye sahip olması nedeniyle şekil değiştirme davranışı ilkin çember şekil değiştirme çizgileri ile araştırılmıştır. Şekil 3.77 göstermektedir ki; silindirik yarı mamulün oluşumunda yarıçapı 100 mm olan dairesel alan büyük oranda rol oynamaktadır.



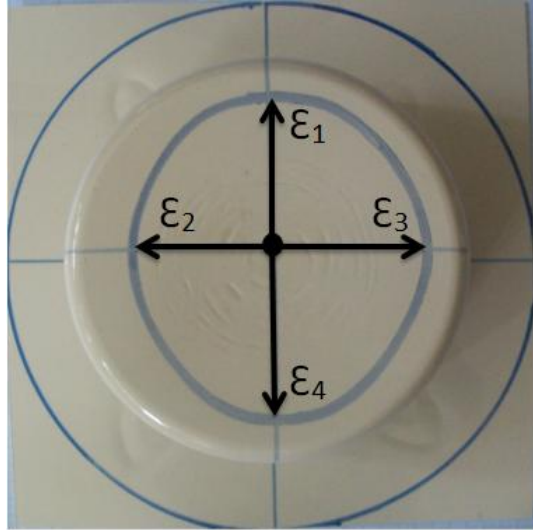
Şekil 3.75 Kübik yarı mamul ve tel kafes görünümlü çizgilerin değişimi.



Şekil 3.76 Kübik yarı mamulün perspektif görünüşü ve çember şekil değiştirme eğrileri.



Şekil 3.77 Silindirik yarı mamul ve çember şekil değiştirme çizgilerinin perspektif görünüşü.



Şekil 3.78 Silindirik yarı mamulde düzlemsel gerçek şekil değiştirme bileşenleri.

Şekil 3.77 ve 3.78 göstermektedir ki; yarıçap doğrultusunda şekil değişimi her yönde aynı oranda gerçekleşmemiştir. Şekil değişimi radyal yönde lineerliğini yitirmiş ve gerçek şekil değişimi bileşeni (ϵ) farklı doğrultularda farklı değerler almıştır. Bu durum levha üzerindeki sıcaklık dağılımının her noktada farklı olmasıyla açıklanabilir. Isıtma işlemi başladığında ısıtıcı elemanlar ve levha yüzeyi arasındaki mesafe 50 mm olarak ölçülmüştür. Ancak ilerleyen süre zarfında levhada meydana gelen sarkma ve çökme nedeniyle ısıtıcı elemana yakın noktalarda levha yüzey sıcaklığı daha yüksek, ısıtıcı elemana daha uzak noktalarda ise levha yüzey sıcaklığı daha düşük değerlerde

olmaktadır. Buda şekil değişimini lineerliğinin kaybolması anlamına gelmektedir. Bu durumun ortadan kaldırılması için iki taraflı ısıtma veya fırın içerisinde ısıtma işlemi uygulanabilir. Buna ek olarak ısıtıcı eleman (Rezistans) büyüklüğünün azaltılarak aynı alana daha fazla ısıtıcı eleman yerleştirilmesinin, termoplastik levha üzerindeki sıcaklık dağılımını daha homojen kılacağı anlaşılmıştır.

Konik yarı mamulün şekil değişimi incelendiğinde ise; asıl deformasyonun $200 \times 200 \text{ mm}^2$ alanda gerçekleştiği görülmüştür. Şekil 3.79'da verilen tel kafes çizgilerin değişiminden, kübik ve silindirik yarı mamullerin oluşmasında rol oynayan şekil değiştirme mekanizmalarının, konik yarı mamulün oluşmasında da rol aldığı söylenebilir.



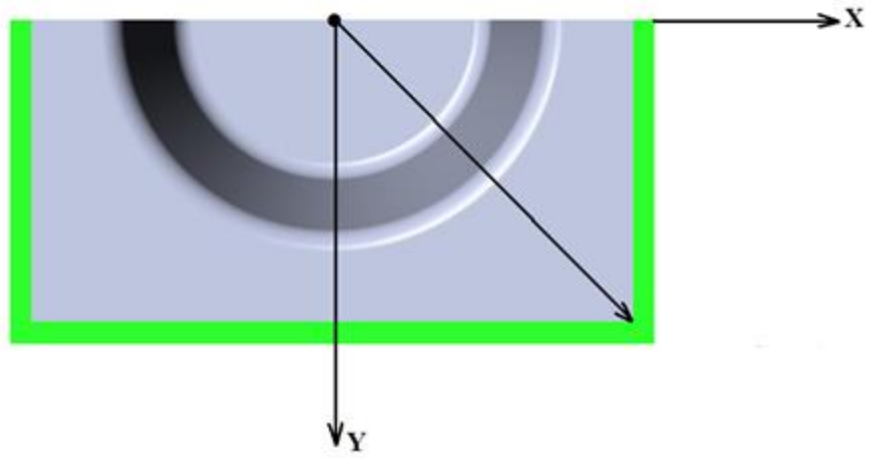
Şekil 3.79 Konik yarı mamul ve tel kafes görünümlü çizgilerin değişimi.

Sonuç olarak konik, silindirik ve kübik yarı mamullerde şekil değişiminin lineerliğini yitirmesi, kullanılan termoplastik levha malzemenin türü, kristal veya amorf yapıda olması, takviye elemanı içermesi, vakum ve ısı ile şekil verme proses parametreleri (ısıtıcı eleman sıcaklığı, polimer levha sıcaklığı, polimer levha ile kalıp arasındaki sürtünme şartları, kalıp sıcaklığı, vakum uygulama süresi v.b) gibi bir çok

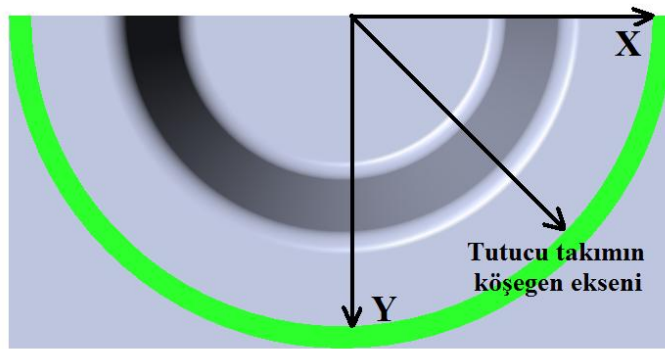
parametrenin değişiminin sonucudur. Ancak kalıp geometrisinin gerçek şekil değiştirme bileşenini en çok etkileyen unsur olduğu anlaşılmıştır [33, 35].

Çalışmada üzerinde durulan önemli unsurlardan biride elde edilen ürünlerdeki ürün kalınlık dağılımıdır. Elde edilen ürünün üniform cidar kalınlık dağılımına sahip olması mevcut kalite standartları içerisinde bir gerekliliktir. Elde edilen ürünlerde öncelikle gözle muayene yöntemiyle ürün kalınlık dağılımı incelenmiştir (Şekil 3.30, 3.31). Sonuç olarak; ürünün en zayıf noktalarının polimer levhanın kalıpta en son temas ettiği bölgeler olduğuna kanaat getirilmiştir. Bunu engelleyebilmek için aynı ürünü erkek kalıpla şekillendirebilir (Positive Forming) veya dişi kalıpla şekil vermeden önce erkek kalıpla derin çekildikten sonra vakum uygulanabilir (Plug-Assist Thermoforming). Şekil 3.30 ve 3.31'e göre konik ve silindirik yarı mamuller dönele simetriye sahip olmalarına rağmen ürün kalınlık dağılımı farklı yönlerde farklı değerler almıştır. Bu olguyu destekleyen şey ise konik yarı mamulün vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonu olmuştur. Şekil 3.55'te verilen PS polimer levhanın toplam deplasman değeri özellikle ürün yan duvarlarında kalınlık dağılımının farklı olduğunu göstermiştir. Bunun nedeni ise deneysel çalışmada kullanılan tutucu çerçevenin kare şeklinde olması buna karşın konik yarı mamulde ise yarıçap yönünde şekil değişiminin gerçekteşmesidir. Tutucu takımın köşegeni doğrultusunda daha az malzeme kalıp yan duvarına gerdirilerek akmakta buna karşın diğer yönlerde daha fazla polimer malzeme kalıp yan duvarına transfer olmaktadır. Bu durum başlıca ürün kalınlık dağılımını etkileyen unsur olmuştur [1, 2, 3, 4, 83, 84]. Şekil 3.80'de konik yarı mamul ve tutucu takımın üst görünüşü verilmiştir. Yeşil alan, tutucu takımın levha üzerinde kapladığı ve basınç uyguladığı alanı temsil etmektedir. Tutucu takımın köşegeni doğrultusunda daha çok polimer malzeme vakum etkisinde gerdirilerek kalıp yan duvarlarına aktarılır. Buna karşın x ve y eksenleri doğrultusunda (Şekil 3.80) ise daha az malzeme kalıp yan duvarlarına doğru gerdirilir. Bu da dönele simetriye sahip konik yarı mamuldeki cidar kalınlığı dağılımını değiştiren en önemli etmendir. Gerek deneysel çalışma içinde gerekse simülasyon kullanılarak farklı geometrilere tutucu takımlar ile vakum ve ısı ile şekil verme işlemi yapılmamıştır. Ancak silindirik ve konik ürünlerin sahip olduğu dairesel geometri hesaba katılarak tutucu takımın da dairesel geometriye sahip olması gerektiği önermesinde bulunulmuştur (Şekil 3.81). Tutucu takım geometrisi eğer dönele simetriye sahip olursa, konik ve silindirik ürünlerde 360⁰ boyunca her yönde (X, Y ve tutucu

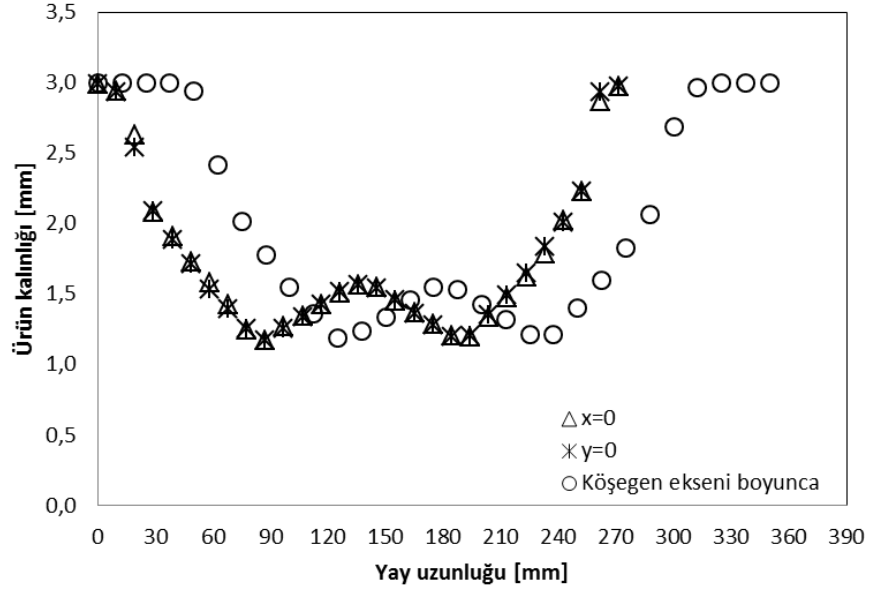
takımın köşegen eksenini boyunca) eşit miktarda malzeme kalıp yan duvarlarına gerdirilir. Oluşan üründe kalıp yan duvarlarındaki cidar kalınlık değerlerinin hemen hemen birbirinin aynı olacağı öngörüsü ağır basmaktadır. Kalınlık dağılımının, dönele simetriye sahip parçalarda değişik kesitlerde farklılık göstermesi mevcut simülasyon sonuçlarıyla da desteklenmektedir. Şekil 3.60, 3.61 ve 3.62'de gösterilen kesitlerde elde edilen ürün kalınlık dağılımları karşılaştırmalı olarak Şekil 3.82'de verilmektedir.



Şekil 3.80 Konik yarı mamul ve tutucu takıma ait üst görünüş.



Şekil 3.81 Konik yarı mamul ve dairesel tutucuya ait üst görünüş.

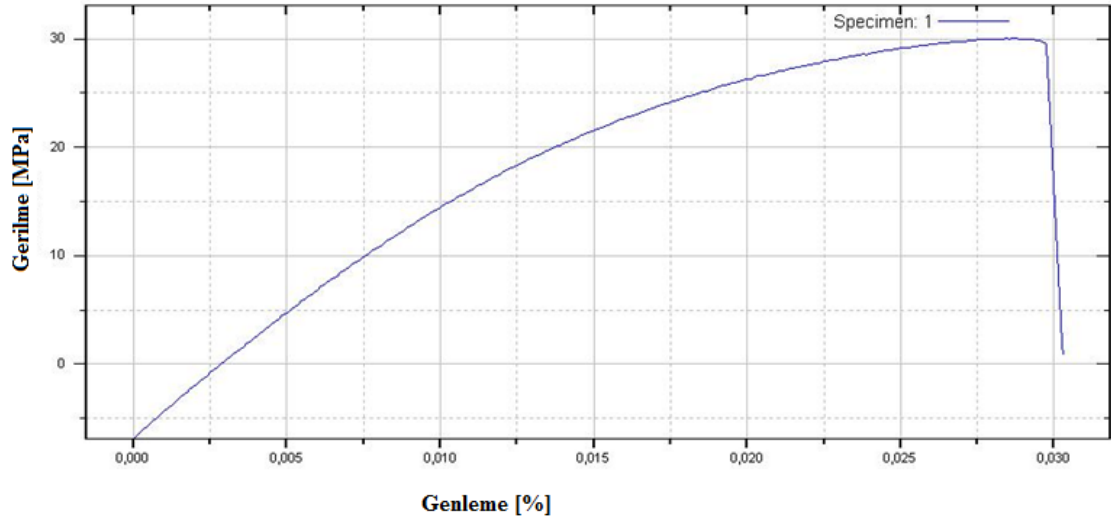


Şekil 3.82 T-SIM yazılımıyla "çanak" adlı parça üzerinde farklı kesitlerde alınan ürün kalınlık dağılımları.

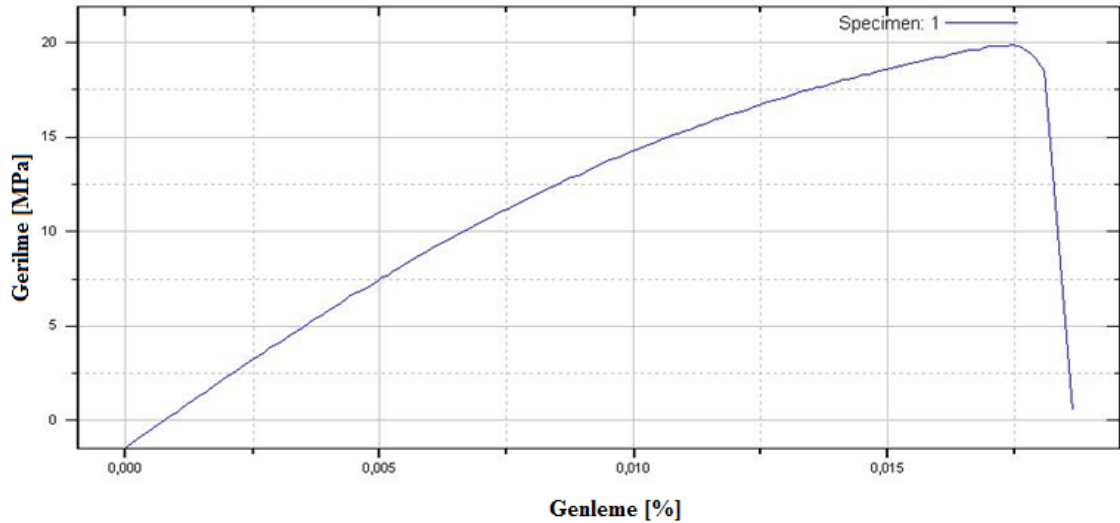
Şekil 3.82'de $x=0$ ve $y=0$ kesitlerinde alınan kalınlık profili eğrileri birbirine yakın değerler almıştır. Polimer levhanın en ince yerindeki kalınlık değeri kalıp tabanına en son değdiği noktadır. Bu nokta ise "çanak" adlı parçanın tabanında yer alan yarıçap yüzeyi üzerinde yer almaktadır. Yay uzunluğu, 87.3 mm değerini aldığı anda ürün kalınlığı $x=0$ kesitinde; 1.17175, $y=0$ kesitinde ise 1.17307 değerini almıştır. İki değer arasındaki fark; 0.00132 mm ve % 0.11 oranında fark oluşturmaktadır. En ince kalınlık değeri köşegen eksen boyunca alınan kesitte, Yay uzunluğu=125 değerini aldığı anda ürün kalınlığı=1.19018 olarak tespit edilmiştir. Bu kalınlık ile $x=0$ kesitindeki değer arasındaki fark 0.01843 mm (% 1.54), $y=0$ kesitindeki değer arasındaki fark 0.01711 mm (% 1.43) olarak tespit edilmiştir. Buna ek olarak LS-DYNA yazılımıyla elde edilen 2 mm kalınlığındaki PS levhanın, deplasman sonuçları da (Şekil 3.55) mevcut önermeyi desteklemektedir.

Takviye elemanı içeren malzemelerin ürün kalınlık dağılımları ve GEA ile elde edilen ürün kalınlık profilleri arasında katkısız levhalara nazaran daha az uyum gözlenmiştir. Bunun nedeni ise takviyeli kompozit ürünlerin bazı durumlarda katlanma ve büzülme nedeniyle özellikle ürün yan duvarında kalınlık değişimlerine neden

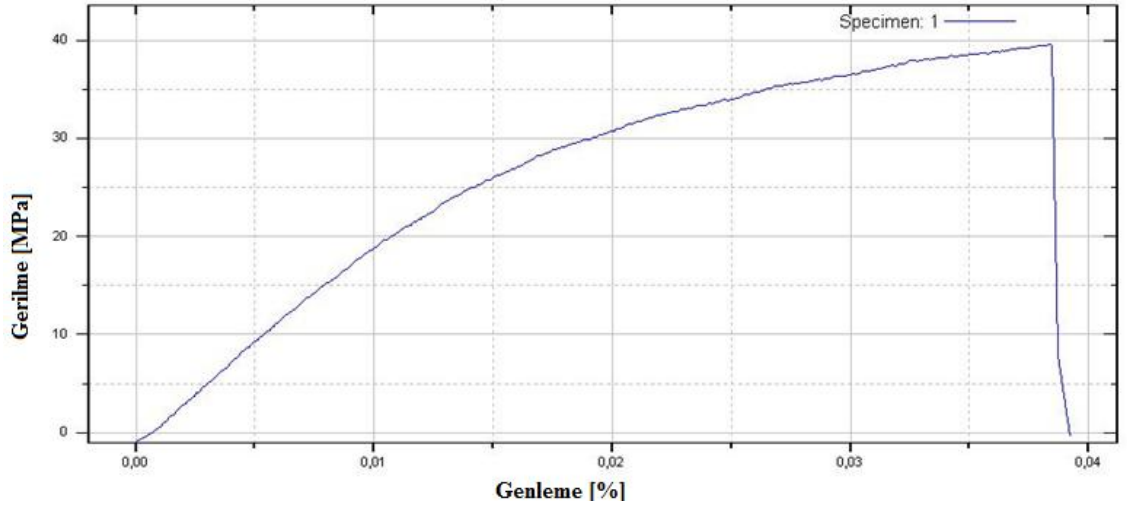
olmasıdır [20, 63, 69, 76]. Üretim aşamasında elyafların polimer levha içerisinde rasgele dağılımı sağlanmıştır. Ancak elyaf yönlendirme için özel bir işlem uygulanmamış ve aparat kullanılmamıştır. Bu nedenle karbon elyaf takviyeli levhalardan ekstrüzyon yönünde ve ekstrüzyon yönüne dik alınan numunelerle çekme deneyi gerçekleştirilmiş, Maksimum Çekme Dayanımı ve Elastisite Modülü gibi parametrelerin tespiti sağlanmıştır.



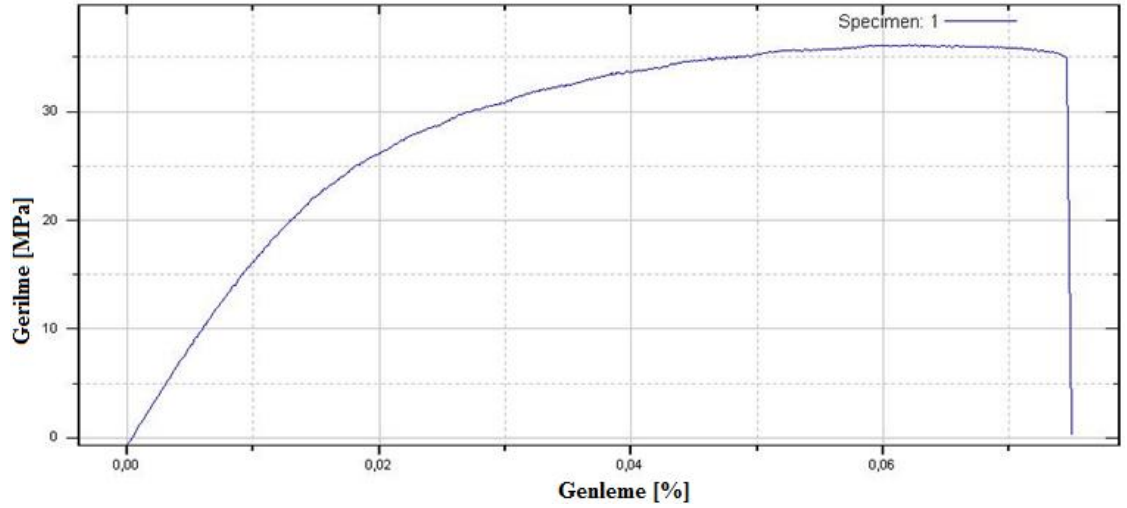
Şekil 3.83 % 5 karbon elyaf takviyeli PP levhadan ekstrüzyon yönünde alınan numunenin Gerilme-Genleme diyagramı.



Şekil 3.84 % 5 karbon elyaf takviyeli PP levhadan ekstrüzyon yönüne dik alınan numunenin Gerilme-Genleme diyagramı.



Şekil 3.85 % 15 karbon elyaf takviyeli PP levhadan ekstrüzyon yönünde alınan numunenin Gerilme-Genleme diyagramı.



Şekil 3.86 % 15 karbon elyaf takviyeli PP levhadan ekstrüzyon yönüne dik alınan numunenin Gerilme-Genleme diyagramı.

% 5 karbon elyaf takviyeli PP levhalardan ekstrüzyon yönünde alınan numunelerden elde edilen sonuçlara göre; Elastisite Modülü, 2.3 GPa, Maksimum Çekme Dayanımı ise, yaklaşık 30 MPa olarak tespit edilirken, ekstrüzyon yönüne dik bulunan sonuçlara göre, Elastisite Modülü, yaklaşık 1.9 GPa, Maksimum Çekme Dayanımı ise, yaklaşık 20 MPa olarak belirlenmiştir. % 15 karbon elyaf takviyeli PP levhalarda ekstrüzyon yönünde Elastisite Modülü, 2.2 GPa, Maksimum Çekme

Dayanımı ise, yaklaşık 40 MPa olarak belirlenmiştir. Ekstrüzyon yönüne dik doğrultuda Elastisite Modülü, 1.85 GPa, Maksimum Çekme Dayanımı ise, yaklaşık 36 MPa değerini almıştır. Eldeki veriler ışığında takviye elemanı içeren levhaların anizotropik mekanik özelliklere sahip olduğu söylenebilir. Bu da levhaların homojen şekil değiştirme davranışını bozan ve cidar kalınlık dağılımının doğrusallığını etkileyen bir unsur olmuştur. Takviyeli levhalardan elde edilen ürünlerdeki cidar kalınlık dağılımını etkileyen en önemli unsurlardan biri şekil verme öncesi levhanın üretim aşamasında oluşan kusurlardır. Bunlar elyaf kümelenmeleri ve yüzey pürüzlülüğüdür. Elde edilen ürünün dayanımını ve görselliğini büyük ölçüde etkileyen kusurlardır. Bunun yanında vakum ve ısı ile şekil verme işlemi sırasında oluşan hatalar ve kusurlarda bulunmaktadır. Bunlar ise; polimer levhadaki izotermal olmayan sıcaklık dağılımı ve PP'nin yarı kristalin yapısı nedeniyle oluşan katlanmalar, büzülmelerdir.

Şekil 3.51 % 15 karbon elyaf takviyeli PP levhadaki elyaf kümelenmesini görsel olarak ortaya koymaktadır. Şekil 3.72 ise ekstrüzyon ve vakum ve ısı ile şekil verme aşamasındaki hata ve kusurları göstermektedir. Bu kusurlar arasında en önemli yeri sıcaklık dağılımından kaynaklanan polimer levhaların katlanması alır. Öyle ki; Şekil 3.35 ve 3.36 incelendiğinde ilk polimer kalınlığı 2 mm olarak verilmesine rağmen diyagramda 2 mm'nin üzerinde hatta 3 mm değerinde kalınlıklar ölçülmüştür. Bunun nedeni PP malzemenin yarı kristalin yapıda olmasıdır. Bunun gereği olarak şekil verme sıcaklığı 3 ile 5 °C'lik bir aralıkta değişir. Ancak yapılan ölçümlerde polimer levhanın merkezi ile kenarları arasındaki sıcaklık farkı 5 ile 10 °C'yi bulmaktadır. Bu durumlarda takviyeli dahi olsa PP levha, sıcaklığın yüksek olduğu noktalarda eriyik haline geçerek katlanmalara neden olmaktadır. Şekil 3.35'te % 5 karbon elyaf takviyeli PP malzemenin cidar kalınlık dağılımı verilmiştir. Kalınlık değişimi azalan bir eğilim göstermiştir. Bunun aksine Şekil 3.36'da % 15 karbon elyaf takviyeli PP malzemenin kalınlık değişimi ise artan bir karakteristikte olmuştur. Bunun nedeni katlanmanın ürünün farklı noktalarında gerçekleşmesidir. Kalınlık ölçümü ürünün tabanının merkezinden başlanarak yapılmıştır. Dolayısıyla eğer katlanma ürünün tabanında olduysa ürün kalınlık dağılımı eğrisi azalan eğilimde (Şekil 3.35), eğer katlanma yan duvarlarda olduysa kalınlık dağılımı eğrisi artan eğilimde (Şekil 3.36) olur. Cam ve karbon elyaflar ile takviye edilen PP ve HDPE malzemelerin en kritik noktaları en ince polimer kalınlığının olduğu noktalardır. Bu noktalarda genellikle polimer levhanın kalıp

tabanına en son temas ettiği bölgelerdir. Konik, silindirik ve kübik yapıdaki kalıpların tümünde kalıp tabanında yer alan yarıçap yüzeyleri tüm ürünlerde en ince kalınlıkların olduğu bölgelerdir. Şekil 3.35'te ürün tabanındaki yarıçap yüzeyinde en düşük cidar kalınlık değeri yay uzunluğu, 70 mm değerini aldığı anda 0.9 mm olarak ölçülmüştür. Aynı noktada bu değer GEA ile 0.704 mm olarak hesaplanmıştır. Aradaki fark % 21.7 olmuştur. Şekil 3.36'da ürün tabanındaki yarıçap yüzeyinde en düşük cidar kalınlık değeri yay uzunluğu, 75 mm değerini aldığı anda 1.48 mm olarak ölçülmüştür. Aynı noktada bu değer GEA ile 0.704 mm olarak hesaplanmıştır. Aradaki fark % 52.4 olmuştur. Şekil 3.37'de ise % 5 cam elyaf takviyeli PP levhanın kalınlık değişimi karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. GEA ile hesaplanan kalınlık değişim eğrisi, ürün kalınlık dağılımı ile yakın sonuçlar içermektedir. En ince cidar kalınlık değeri yay uzunluğu, 70 mm iken; 0.67 mm olarak ölçülmüştür. GEA ile bu değer 0.704 mm olarak hesaplanmış ve aradaki fark % 5'tir. Konik geometrili kalıp kullanılarak karbon ve cam elyaf takviyesiyle PP levhaların vakum ve ısı ile şekil verilmesi sonrasında, cam elyaf takviyeli PP malzemenin GEA ile hesaplanan kalınlık dağılımlarıyla daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Karbon elyaf takviyeli PP malzemede ise oluşan katlanmalar ve büzülme nedeniyle kalınlık dağılımı eğrisi artan ve azalan eğilimde gerçekleşmiş, GEA ile hesaplanan sonuçlar ile büyük farklar ortaya koymuştur.

Şekil 3.34, 3.38 ve 3.39 konik, silindirik ve kübik geometrili HDPE yarı mamullerde oluşan kalınlık dağılımını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Şekil 3.34'te kalıp tabanındaki yarıçap yüzeyi üzerinde yay uzunluğu, 75 mm iken kalınlık 0.7 mm ölçülmüş ve bu noktadaki kalınlık GEA ile 0.528 mm hesaplanmıştır. Sonuçlar arasında % 24.6 fark bulunmaktadır. Şekil 3.38'de kalıp tabanında yer alan yarıçap yüzeyi üzerindeki en zayıf noktada (yay uzunluğu = 90 mm) kalınlık, 0.4 mm ölçülmüş ve bu değer GEA ile 0.4 mm hesaplanmıştır. Şekil 3.39'da kübik yarı mamuldeki en zayıf noktanın (yay uzunluğu = 65 mm) kalınlığı, 0.6 mm olarak ölçülmüş ve GEA ile 0.418 mm olarak hesaplanmıştır. Değerler arasındaki fark % 30.3'tür. Konik, silindirik ve kübik yarı mamullerde oluşan kalınlık dağılımları ile GEA kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında büyük oranda farklar tespit edilmiştir. GEA ürünlerin kalınlık dağılımlarını geometriye bağlı birebir tespit edememiştir. Fakat en zayıf noktanın yerini hemen hemen tüm kalıplarda ve tüm ürünlerde tespit edebilmiştir. Dolayısıyla GEA'nin

ürün kalınlık dağılımının elde edilmesinden ziyade üründeki en zayıf noktanın tespitinde kullanılmasının elde edilen veriler ışığında daha makul olacağı görülmektedir.

Ürün cidar kalınlık dağılımları katkı elemanı içermeyen PP, PS ve PVC levhalar için de tespit edilmiştir. Elde edilen deneysel veriler GEA ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Şekil 3.11, 2 mm kalınlığa sahip PS malzeme için deneysel metod, GEA ve simülasyon kullanılarak elde edilen kalınlık dağılımlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Konik yarı mamuldeki en düşük kalınlık değeri, 0.5 mm (yay uzunluğu = 70 mm) ölçülmüştür. Bu değer simülasyon sonucunda 1.1412 mm, GEA ile ise 0.704 mm hesaplanmıştır. GEA ile hesaplanan kalınlık değeriyle, deneysel metotla bulunan kalınlık arasında % 40.8 fark oluşurken simülasyon sonucu ile asıl kalınlık değeri arasında % 128 fark bulunmaktadır. Malzeme parametrelerinden bağımsız sadece kalıp geometrisine göre çözüm üreten GEA için mevcut fark göz ardı edilebilirken, malzeme parametrelerine bağımlı, proses değişkenlerine göre çözüm üreten simülasyonun kalınlık dağılımı tespitinde çok verimli sonuçlar ortaya koymadığı tespit edilmiştir. Simülasyon sonucu ortaya çıkan fark, PS için kullanılan malzeme modeli, sınır koşulları ve sürtünme şartları değiştirilerek azaltılabilir niteliktedir. PS malzemenin kalınlığının artarak değişmesi (2.5 ve 3 mm) Şekil 3.12 ve 3.13'te cidar kalınlık dağılımının eğilimini değiştirmemiştir. Şekil 3.12'de ürün tabanındaki yarıçap yüzeyinde en düşük kalınlık değeri yaklaşık 1mm (yay uzunluğu = 70 mm) ölçülmüş, GEA ile ise 0.88 mm olarak hesaplanmıştır. İki kalınlık arasındaki fark % 12 olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.13'te en ince kalınlık değeri (yay uzunluğu = 70 mm) 1.07 mm, aynı noktada GEA ile hesaplanan kalınlık değeri ise 1.056 mm olarak verilmiştir. İki değer arasındaki fark % 1.3'tür. PS levha malzemenin kalınlığı 2 mm iken GEA'nin hesapladığı değer ile arasındaki fark; % 40.8, kalınlık 2.5 mm iken fark % 12 ve kalınlık 3 mm iken fark % 1.3'tür. PS malzeme için artan kalınlık ile GEA'nin doğruluk oranı artmıştır. Şekil 3.14'te 3 mm ilk kalınlığa sahip PP levhadan vakum ve ısı ile şekil verme yöntemiyle elde edilen konik yarı mamulün kalınlık dağılımı karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ürünün en zayıf noktası yine ürün tabanındaki yarıçap yüzeyinde (yay uzunluğu = 70 mm) 0.61 mm olarak ölçülmüş ve 1.056 mm olarak hesaplanmıştır. İki değer arasındaki fark % 73.1 olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.15'te 3 mm ilk kalınlığa sahip PVC konik yarı mamulün cidar kalınlık dağılımı verilmektedir. Ölçülen en düşük kalınlık değeri (yay uzunluğu = 70 mm) 0.84 mm, hesaplanan ise 1.056 mm'dir (Fark % 25.7).

Tablo 3.12 Farklı geometrilerdeki yarı mamuller üzerinde tespit edilen en düşük kalınlık değerleri.

İlgili diyagram	Şekil verilen malzeme	Yay uzunluğu [mm]	Ölçülen değer [mm]	Hesaplanan değer [mm]	Fark [%]
Şekil 3.16	Silindirik yarı mamul (PS, t=2.5mm)	100	0.83	0.744	10.4
Şekil 3.17	Silindirik yarı mamul (PS, t=3mm)	90	1.02	0.8	21.6
Şekil 3.18	Silindirik yarı mamul (PP, t=3mm)	90	0.49	0.8	63.3
Şekil 3.19	Silindirik yarı mamul (PVC, t=3mm)	90	0.73	0.8	9.6
Şekil 3.20	Kübik yarı mamul (PS, t=2mm)	65	0.61	0.558	8.5
Şekil 3.21	Kübik yarı mamul (PS, t=2.5mm)	65	0.96	0.697	27.4
Şekil 3.22	Kübik yarı mamul (PS, t=3mm)	75	0.96	1.011	5.3
Şekil 3.23	Kübik yarı mamul (PP, t=3mm)	65	0.7	0.837	19.6
Şekil 3.24	Kübik yarı mamul (PVC, t=3mm)	65	0.63	0.837	32.9
Şekil 3.25	Kübik yarı mamul (PS, t=2 mm)	85	0.18	0.57	216.7
Şekil 3.26	Kübik yarı mamul (PS, t=2.5mm)	85	0.28	0.713	154.6
Şekil 3.27	Kübik yarı mamul (PS, t=3 mm)	85	0.4	0.855	113.8
Şekil 3.28	Kübik yarı mamul (PP, t=3 mm)	80	0.26	0.925	255.8
Şekil 3.29	Kübik yarı mamul (PVC, t=3 mm)	90	0.21	0.766	264.8

Tablo 3.12'de verilen sonuçlara dayanarak; ürün geometrisi ve şekil verilen malzeme değişikçe ortaya konan ürün kalınlık dağılımının doğruluğu değişmektedir. Bu nedenle GEA'nin basit geometrili yarı mamullerin kalınlık dağılımlarının tespitinde değil en zayıf veya en kritik noktanın tespitinde kullanılması daha uygundur.

Sonuç olarak; vakum ve ısı ile şekil verilen yarı mamullerde GEA ile hesaplanan ve deneysel metot vasıtasıyla ölçülen en düşük kalınlık değerleri arasındaki % 10 ve daha az fark oranı normal kabul edilirse; GEA metodunun daha ziyade silindirik ve kübik geometriye sahip vakum ve ısı ile şekil verilmiş ürünlerde kullanılmasının daha verimli olacağı görülmüştür. Buna ek olarak, GEA kübik yarı mamullerde köşegen eksenini boyunca alınan kesitte ürün kalınlık dağılımını hemen hemen tüm parçalarda % 100 ve daha yüksek oranlarda hatalı hesaplamıştır. Bu nedenle kübik geometrili parçalarda köşegen eksenini boyunca kalınlık dağılımının oluşturulmasında bu yöntemin kullanılması uygun değildir. Takviye elemanı içeren PP ve HDPE ürünlerde ise HDPE malzemenin PP levhaya nazaran daha düzgün cidar kalınlık dağılımına sahip ürünler ortaya koyduğu saptanmıştır. Bu dağılımı elyaf türünün, miktarının ve kalıp geometrisinin büyük oranda değiştirmedeği de saptanan sonuçlar arasındadır.

Çalışmadaki takviye elemanı içeren ve saf plastik levhaların şekil değiştirme mekanizmaları malzemenin türüne bağlı olarak değişirken, kalıp geometrisi bu değişimi en çok etkileyen unsur olmuştur. Konik yarı mamulde serbest kırılma yüzeyinde farklı noktalarda alınan SEM görüntüleri, elyaf yönelmesinin ve dağılımının vakum ve ısı ile şekil verme neticesinde büyük oranda değişmediğini göstermektedir. Kesit üzerinde farklı doğrultularda yönelmiş elyafların daha ziyade üretim aşamasında, ekstrüzyon yönünde ve ekstrüzyon yönüne dik yönlendiği anlaşılmıştır. Bu nedenle oluşan kompozit PP ve HDPE levhalar anizotropdur. Anizotropi, malzemenin şekil değiştirme kabiliyetini, vakum ve ısı ile şekil verilebilirliğini noktadan noktaya farklılaştırmıştır. Bu da ürün kalınlık dağılımına etki eden unsurların başında gelmektedir. Malzeme içerisinde oluşan elyaf kümeleri ve mikro boşluklarda arzu edilen ürün kalınlık dağılımının yakalanmasını olumsuz yönde etkilemiştir. Ürün kalınlık dağılımına etki eden diğer önemli unsur ise tutucu çerçevenin (pot çemberi) geometrisidir. Silindirik ve konik yarı mamullerde cidar kalınlık dağılımına etki eden önemli bir parametredir. Vakum ve ısı ile şekil verme operasyonları ve iki farklı yazılımla gerçekleştirilen simülasyonlar sonucu tutucu takım geometrisinin üretilmek istenen ürün ile aynı şekilde olması gerektiği anlaşılmıştır.

Çalışma içerisinde Ls-DYNA yazılımı kullanılarak konik yarı mamulün (PS, $t=2$ mm) vakum ve ısı ile şekil verme simülasyonu gerçekleştirilmiş ancak elde edilen kalınlık dağılımı sonuçlarının deneysel verilerle büyük farklılıklar içerdiği görülmüştür.

GEA sadece ürün geometrisine bağlı olarak sonuç vermesine karşın simülasyon sonuçlarına nazaran gerçek verilere daha yakın sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu amaçla PS malzeme için lineer olmayan malzeme modelleri kullanılarak ta simülasyon tekrarlanmalıdır. Bunun yanında sınır koşulları da optimize edilerek simülasyona dâhil edilmelidir.

Çalışma içerisinde şekil verme sıcaklığının tespitinde ortalama değerler alınmıştır. Deneyler esnasında levha merkezi ile kenarları arasında zaman zaman 5-8 C⁰ fark olduğu tespit edilmiştir. Polimer levha üzerinde istenen izotermal sıcaklık dağılımının yakalanamadığı anlamına gelmektedir. Sıcaklık dağılımının her noktada birbirine en yakın değeri alması için ısıtıcı elemanların sayısı arttırılmalıdır. Isıtıcı eleman boyutları düşürülmeli yani daha küçük ısıtıcı elemanlara yer verilmelidir. Çalışmada 12 adet ısıtıcı eleman kullanılmışken bu sayı 24, 48 veya 96 adete çıkarılabilir. Buna ek olarak, çalışmada kullanılan ısıtıcı elemanlar yarım ay şeklinde ışınım ile ısı geçişine imkân veren rezistanslardır. Isıtıcı elemanın sahip olduğu şekil nedeniyle plastik levha ile arasındaki mesafe yer yer değişmektedir. Bu değişim aynı ısıtıcı elemanın altında farklı sıcaklıklara yol açmaktadır. Bu sorun düz yüzeye sahip ısıtıcıların kullanımı ve daha sık aralıklarla yerleştirilmesi ile aşılabilir.

KAYNAKLAR

- [1].James L. Throne, *Thermoforming*, (Hanser Publishers, Munich, 1987)
- [2].James L. Throne, *Technology of Thermoforming*, (Hanser/Gardner Publications, Inc., USA, 1996)
- [3].Peter W. Klein, *Fundamentals of Plastics Thermoforming*, (Morgan&Claypool Publishers, USA, 2009)
- [4].James L. Throne, *Understanding Thermoforming*, (Hanser/Gardner Publications, Inc., USA, 2008)
- [5].<http://www.ambalaj.org.tr/images/Türkiye%20Ambalaj%20Sanayi%202012%20Yılı%20Raporu%20-%2022%20Ekim%202012.pdf> Ambalaj Sanayicileri Derneği 2012 Yılı Faaliyet Raporu, Ocak-2013.
- [6].http://www.ibp.gov.tr/pg/sectorpdf/sanayi/ambalaj_2012.pdf Türkiye Cumhuriyeti Ekonomi Bakanlığı 2012 yılı Ambalaj Sektörü Raporu, Ocak-2013.
- [7].<http://www.bccresearch.com/report/thermoformed-plastics-technologies-markets-pls047b.html> Termoform Plastikler: Teknolojiler ve Evrensel Pazar, Şubat 2013.
- [8].J.L. Throne, P.J. Mooney, *Thermoforming: Growth and Evolution I*, Thermoforming Quarterly, Vol:24, No:1, USA, Page:18-20, (2005)
- [9].S. Engelmann, G. Schubert, *Ultrasonic Sealing and Cutting in Thermoforming*, ANTEC 2009, Annual Technical Conference Proceedings, Chicago, IL, (2009)
- [10]. B. Hegemann, P. Eyerer, N. Tessier, K. Kouba, T. Bush, *Polymer-polymeric friction at temperatures and rates simulating the thermoforming process*, ANTEC 2003, Volume-I, Page:791-795, Nashville,Tennessee, USA, (2003)
- [11]. M. F. Howery, *Material selection for thermoforming applications*, ANTEC 1997, Annual Technical Conference 1997, Volume I-Processing, USA, (1997)
- [12]. M. Tabrizi, *Production of segmented mold to control the distribution of materials in the thermoforming process*, ANTEC 2003, Volume-I, Page:765-768, Nashville, Tennessee, USA, (2003)
- [13]. D. Oliver, *Comparison of aluminum, wood, and epoxy as thermoforming mold material*, Annual Technical Conference, ANTEC 2000, Conference Proceedings, Volume-3: Special Areas, Paper No:1055, Orlando, FLORIDA, (2000)
- [14]. R. Morales, O. Santana, *Effect of the Molding Process over the Adjustable Parameters in Constitutive Equations*, ANTEC 2008, 4-8 Mayıs 2008, Conference Proceedings, Milwaukee WI, (2008)
- [15]. G. Gauthier, M. Ajersch, B. Boulet, A. Haurani, P. Girard, R. DiRaddo, *A New Absorbtion Based Model for Sheet Reheat in Thermoforming*, ANTEC 2005, Conference Proceedings, Volume-I: Processing, Boston, Massachusetts, (2005)
- [16]. E. Haberstroh, L. Ederleh, *In-mold-grainig in thermoforming*, ANTEC 2007, Annual Technical Conference 2007, Conference proceedings, Page:1139-1143, Cincinnati, Ohio, (2007)
- [17]. H.S. Peng, D.K. Huang, S.C. Lee, S.C. Chen, *Study on the thermoforming of PC films used for in mold decoration*, ANTEC 2005 Plastics: Annual Technical Conference, Volume 1: Processing, Page:683-687, Boston, Massachusetts, USA, (2005)

- [18]. M. Malkani, J. Soneta, J.L. Mead, S.A. Orroth, *Direct sheet extrusion and thermoforming of TPO compounds*, ANTEC 2002 Plastics: Annual Technical Conference, Volume 1: Processing, Page:630, San Francisco, CA, USA, (2002)
- [19]. D.P. Cleir, *Polypropylene- Cup Conversion from Injection Molding to Thermoforming*, ANTEC 2009, Annual Technical Conference Proceedings, Chicago, IL, (2009)
- [20]. C.S. Harter, H.G. Fritz, *The Dependence of Wall Thickness on Changes in Material and Process Conditions in Plug Assist Thermoforming*, ANTEC 2009, Annual Technical Conference Proceedings, Chicago, IL, (2009)
- [21]. P.J. Martin, H.L. Choo, C.Y. Cheong, E.H. Jones, *Plug materials for Thermoforming: The Effect of Non-Isothermal Plug Contact*, ANTEC 2009, Annual Technical Conference Proceedings, Chicago, IL, (2009)
- [22]. F.M. Duarte, J.A. Covas, *Multilayer plug concept to enhance thickness distribution control of deep thermoformed parts*, Plastics, Rubber and Composites, Vol.37, No.7, Page: 293-300, (2008)
- [23]. H. Hosseini, B.V. Berdyshev, N. Ghaffari, *Dynamic Characteristics of Plug-Assist Thermoforming*, ANTEC 2008, 4-8 Mayis 2008, Conference Proceedings, Milwaukee WI, (2008)
- [24]. J. Dees, *Optimizing the Plug Assist Geometry Using Simulations*”, ANTEC 2008, 4-8 Mayis 2008, Conference Proceedings, Milwaukee WI, (2008)
- [25]. A. Tulsian, J. Mead, S. Orroth, N. Tessier, *Computer Simulation of the Effect of the Coefficient of Friction in Plug Assist Thermoforming*, ANTEC 2004, Conference Proceedings Volume 1:Processing, Chicago, Illinois, (2004)
- [26]. G.W. Harron, E.M.A. Harkin-Jones, P.J. Martin, *Plug force monitoring for the control and optimization of the thermoforming process*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, Vol.217, No.3, Page:181-188, (2003)
- [27]. P. Collins, J.F. Lappin, E.M.A. Harkin-Jones, P.J. Martin, *Investigation of heat transfer in the plug assisted thermoforming process*, SPE ANTEC 2000, Conference Proceedings, Volume-1:Processing, Orlando, Florida, (2000)
- [28]. K. Karjust, R. Küttner, N. Pohlak, *Technology design of composite parts*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 22, Issue:2, (2007)
- [29]. A.P. Unwin, I.M. Ward, H. Ugail, M.I.G. Bloor, M.J. Wilson, *Optimal Design and Manufacture of Thin-Walled Polystyrene Structures*, Polymer Engineering and Science, Vol:45, Page:694-703, (2005)
- [30]. R.A. Morales, M.V. Candal, *Thermoforming Prototype Mold Evaluation Using a CAE Software*, ANTEC 2004(Annual Technical Conference), Conference Proceedings, Volume 1: Processing, Chicago, Illinois, (2004)
- [31]. J.L. Throne, *Computer-aided thermoformed product and process design*, ANTEC 2000, Conference Proceedings, Volume 3:Special Areas, Orlando, Florida, (2000)
- [32]. H. Xu, J. Wysocki, D. Kazmer, P. Bristow, B. Landa, J. Riello, C. Messina, R. Marrey, *Shrinkage study of thermoformed parts*, The Annual Technical Conference of The Society of Plastics Engineers(1999)

- [33]. P.J. Martin, C.W. Tan, K.Y. Tshai, R. McCool, G. Menary, C.G. Armstrong, E.M.A. Harkin-Jones, *Biaxial characterisation of materials for thermoforming and blow moulding*, *Plastics, Rubber and Composites*, Vol.34, No:5/6, (2005)
- [34]. C.W. Tan, E.M.A. Harkin-Jones, G.H. Menary, P.J. Martin, C.G. Armstrong, *Biaxial Testing for the Modeling of the Thermoforming Processes*, ANTEC 2005, Annual Technical Conference, Volume 1: Processing, Boston, Massachusetts, (2005)
- [35]. N. Martin, E.M.A. Harkin-Jones, P.J. Martin, *Characterising the biaxial properties of materials used in thermoforming and blow molding*, ANTEC 2002, Conference Proceedings, Volume I, San Francisco, CA, (2002)
- [36]. N.J. Martin, J.F. Lappin, E.M.A. Harkin-Jones, P.J. Martin, *The use of hot impact testing in the simulation of the plug-assisted thermoforming process*, ANTEC 2000 *Plastics: The Magical Solution*, Volume 1: Processing, Page:707, Orlando, Florida, USA, (2000)
- [37]. A. Willems, S.V. Lomov, I. Verpoest, D. Vandepitte, P. Harrison, W.R. Yu, *Forming simulation of a thermoplastic commingled woven textile on a double dome*, *International Journal of Material Forming*, Page:965-968, (2008)
- [38]. C.P.J. O'Connor, G. Menary, P.J. Martin, E. McConville, *Finite element analysis of the thermoforming of Polypropylene*, *International Journal of Materials Forming*, Page:779-782, (2008)
- [39]. Y. Dong, R.J.T. Lin, D. Bhattacharyya, *Finite element simulation on thermoforming acrylic sheets using dynamic explicit method*, *Polymers&Polymer Composites*, Vol.14, No.3, Page:307-328, (2006)
- [40]. M.D. Harter, J.M. DyJack, *Determining the Accuracy of CAE on Deep Drawn Thermoformed Parts*, ANTEC 2005 *A Revolution in Plastics*, Conference Proceedings, Volume 3; Special Areas, Boston, Massachusetts, (2005)
- [41]. P. Debergue, P. Girard, C.D. Grandpre, *Improving the the prediction of thermoforming sag in simulations through experimental validation of the transition model*, SPE ANTEC 2004, Conference Proceedings, Volume-1:Processing, Page:914-918, Chicago, Illinois, (2004)
- [42]. M.K. Warby, J.R. Whiteman, W.G. Jiang, P. Warwick, T. Wright, *Finite element simulation of thermoforming processes for polymer sheets*, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 61, Page: 209-218, (2003)
- [43]. N.G. Pantelelis, T.M. Marchal, P. Megisidis, L. Fondin, A.E. Kanarachos, *Vacuum Stamping of a Refrigerator: Identifying Problems Through Numerical Simulation, Solving Them and Validating The Solution on The Production Line*, ANTEC 2000 *Plastics: The Magical Solution*, Conference Proceedings, Volume 1: Processing, Orlando, Florida, (2000)
- [44]. R. Christopherson, B. Debbaut, Y. Rubin, *Simulation of pharmaceutical blister pack thermoforming using a non-isothermal integral model*, ANTEC 2000 *Plastics: The Magical Solution*, Volume 1: Processing, Page:956, Orlando, Florida, USA, (2000)
- [45]. C.H. Wang, H.F. Nied, *Solution of inverse thermoforming problems using finite element simulation*, ANTEC 2000 *Plastics: The Magical Solution*, Volume 1: Processing, Page:786, Orlando, Florida, USA, (2000)

- [46]. Y. Song, K.F. Zhang, R. Wang, F.X. Diao, Y.N. Yan., R.J. Zhang, ***Coupled Thermo-Mechanical Analysis for Plastic Thermoforming***, Polymer Engineering and Science, Vol.40, No.8, Page:1736-1746, (2000)
- [47]. Y.H. Song, K.F. Zhang, Z.R. Wang, F.X. Diao, ***3-D Fem analysis of the temperature field and the thermal stress for plastics thermal forming***, Journal of Materials Processing Technology, Vol.97, Page:35-43, (2000)
- [48]. M. Rachik, J.M. Roelandt, ***A Unified Approach for Thermoforming***, ANTEC 1999 Bridging the Millennia (Annual Technical Conference), Conference Proceedings, Volume 1: Processing, New York City, (1999)
- [49]. P. Novotny, P. Saha, ***Optimization of Thermoforming***, ANTEC 1999 Bridging the Millennia (Annual Technical Conference), Conference Proceedings, Volume 1: Processing, New York City, (1999)
- [50]. J.F. Lappin, E.M.A. Harkin-Jones, P.J. Martin, ***Finite Element Modeling of the Plug-Assisted Thermoforming Process***, ANTEC'99, Conference Proceedings Volume 1: Processing, New York City, (1999)
- [51]. G.J. Nam, K.H. Ahn, J.W. Lee, ***Numerical and experimental studies of 3-dimensional thermoforming process***, ANTEC 1999 Plastics: Bridging the Millennia, Volume 1:Processing, Page:662, New York City, USA, (1999)
- [52]. G.J. Nam, H.W. Rhee, J.W. Lee, ***Finite element Analysis of the Effect of Processing Conditions on Thermoforming***, ANTEC'98, Conference Proceedings, Volume 1: Processing, Atlanta, Georgia, (1998)
- [53]. R. DiRaddo, D. Laroche, A. Bendada, T. Ots, , ***Optimization of thermoforming with process modelling***, ANTEC'99, Conference Proceedings, Volume-I:Processing, New York City, (1999)
- [54]. T.M. Marchal, N.P. Clemeur, A.K. Agarwal, ***Optimisation of the thermoforming process: a few industrial examples***, ANTEC'98, Volume-I, Processing, Atlanta, Georgia, USA, (1998)
- [55]. S.J. Liu, ***Modeling and simulation of the vacuum forming of wood fiber-filled thermoplastic composites***, Polymer Composites, Vol. 18, No:6, Page:673-680, (1997)
- [56]. B. Koziey, J. Pocher, J.J. Tian, J. Vlachopoulos, ***New results in finite element analysis of thermoforming***, ANTEC 1997 Plastics: Plastics Saving Planet Earth, Volume 1: Processing, Page:269, USA, (1997)
- [57]. R. Nakamura, K. Goda, J. Noda, J. Ohgi, ***High temperature tensile properties and deep drawing of fully green composites***, EXPRESS Polymer Letters, Vol. 3, No:1, Page:19-24, (2009)
- [58]. M. Sadighi, E. Rabizadeh, F. Kermansaravi, ***Effects of laminate sequencing on thermoforming of thermoplastic matrix composites***, Journal of Material Processing Technology, Vol.201, Page:725-730, (2008)
- [59]. T.A. Hogan, S.M. Hoenig, B.W. Walther, K.L. Walton, M.F. Finlayson, S.C. Costeux, ***Changing the game in thermoplastic polyolefins (TPO) for cut sheet thermoforming***, SPE ANTEC 2007, Annual Technical Conference Proceedings, Page:1127-1132, Cincinnati, Ohio, (2007)
- [60]. M. Shirani, A. Agahi, S.A. Sadough, F.R. Biglari, ***Experimental study of thermoplastic reinforced composite sheet deep drawing***, MATERIAUX 2006, Dijon, FRANCE, (2006)

- [61]. D. Bhattacharyya, M. Bowis, K. Jayaraman, *Thermoforming woodfibre-polypropylene composite sheets*, Composites Science and Technology, Vol.63, Page:353-365, (2003)
- [62]. J. Cao, P. Xue, X. Peng, N. Krishnan, *An approach in modeling the temperature effect in thermo-stamping of woven composites*, Composite Structures, Vol. 61, Page:413-420, (2003)
- [63]. T.C. Lim, S. Ramakrishna, H.M. Shang, *Analytical modelling for sheet thermoforming of knitted fabric reinforced PMC*, Journal of Materials Science, Vol. 37, Page:871-877, (2002)
- [64]. S.W. Hsiao, N. Kikuchi, *Numerical analysis and optimal design of composite thermoforming process*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 177, Page:1-34, (1999)
- [65]. K.L. Lieg, A.J. Giacomini, *Thermoforming triangular troughs*, Polymer Engineering and Science, Vol.49, No.1, (2009)
- [66]. E. McConville, P.J. Martin, E.M.A. Harkin-Jones, *Investigation into the Effect of Extrusion and Thermoforming Parameters on the Properties of Polypropylene Containers*, ANTEC 2009, Annual Technical Conference Proceedings, Chicago, IL, (2009)
- [67]. G. Kim, K. Lee, S. Kang, *Prediction of the Film Thickness Distribution and Pattern Change During Film Insert Thermoforming*, Polymer Engineering and Science, 49,11, Page: 2195-2203, (2009)
- [68]. C. Woefle, K. Koppi, S. Costeux, T. Hogan, J. Dooley, R.V. Daele, A.D. Boks, A. Droste, S.D. Vries, J. Claracq, B. Hoek, R. Salmang, *Difference in thermoforming processability observed for three high impact polystyrenes*, Annual Technical Conference, ANTEC 2007, Conference proceedings, Page:1122-1126, Cincinnati, OHIO, (2007)
- [69]. R. McCool, P.J. Martin, E. Harkin-Jones, *Process modeling for control of product wall thickness in thermoforming*, Plastics, Rubber and Composites, Vol. 35, No:8, (2006)
- [70]. H. Hosseini, B.V. Berdyshev, A.M. Zeinabad, *Modeling of deformation processes in vacuum thermoforming of a pre-stretched sheet*, Polymer-Plastics Technology and Engineering, Vol. 45 Page:1357-1362, (2006)
- [71]. K.Y. Tshai, E.M.A. Harkin-Jones, P.J. Martin, G. Menary, *A Unified Approach of Modeling Polypropylene for Thin-Gauge Solid-Phase Thermoforming Applications*, ANTEC 2004, Conference Proceedings, Volume-1 Processing, Chicago, Illinois, (2004)
- [72]. H. Hosseini, B.V. Berdyshev, *A Solution for Rupture of Polymeric Sheet in Plug-Assist Thermoforming*, ANTEC 2006, Conference Proceedings, U.S.A, (2006)
- [73]. B. Rungroungdouyboon, J.P. Coulter, *The science based optimization of material heating during thermoforming processes*, ANTEC 2003 Plastics: Annual Technical Conference, Volume 1: Processing, Page:780-784, Nashville, Tennessee, USA, (2003)
- [74]. M. Kutz, *Handbook of Materials Selection*, (John Wiley and Sons Inc., New York, ISBN:0-471-35924-6, 2002)

- [75]. G.W. Harron, E.M.A. Harkin-Jones, P.J. Martin, ***Influence of thermoforming parameters on final part properties***, ANTEC 2000, Annual Technical Conference, Conference Proceedings Volume III: Special Areas, Orlando, Florida, (2000)
- [76]. Z. Ayhan, H. Zhang, ***Wall Thickness Distribution in Thermoformed Food Containers Produced by a Benco Aseptic Packaging Machine***, Polymer Engineering and Science, Vol.40, No.1, (2000)
- [77]. C.M. Bordonaro, T.L. Virkler, P.A. Galante, B. Pineo, C.E. Scott, ***Optimization of processing conditions in thermoforming***, ANTEC'98, Volume-I, Processing, Atlanta, Georgia, USA, (1998)
- [78]. K.S. Wayne, ***On thermoforming of heavy gauge sheets***, SPE-ANTEC'96, Conference Proceedings, Volume-I, Processing, Indianapolis, USA, (1996)
- [79]. C.A. Taylor, H.G. DeLorenzi, D.O. Kazmer, ***Experimental and Numerical Investigations of the Vacuum Forming Process***, The Winter Annual Meeting of ASME(WAM), New York, (1991)
- [80]. M.R. Kamal, V. Tan, D. Kalyon, ***Measurement and Calculation of Parison Dimensions and Bottle Thickness Distribution During Blow Molding***, Polymer Engineering and Science, Vol.21, No.6, (1981)
- [81]. N. Rosenzweig, M. Narkis, Z. Tadmor, ***Wall Thickness Distribution in Thermoforming***, Polymer Engineering And Science, Vol.19, No.13, (1979)
- [82]. J.G. Williams, ***A method of calculation for thermoforming plastics sheets***, Journal of Strain Analysis, Vol. 5, No:1, Page:49-57, (1970)
- [83]. R. J. Crawford, ***Plastics Engineering***, Third Edition,(Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998)
- [84]. T.A. Osswald, ***Polymer Processing Fundamentals***, (Hanser/Gardner Publications, USA, 1998)
- [85]. Szegda D., ***Experimental Investigation and Computational Modelling of the Thermoforming Process of Thermoplastic Starch***, (The School of Engineering and Design, Brunel University, Ph.D. Thesis, UK, 2009)
- [86]. <http://www.t-sim.com/Refbsim/kbkz.htm> Mayıs – 2013.

ÖZGEÇMİŞ

18 Kasım 1981 tarihinde Kırklareli ilinin Lüleburgaz ilçesine bağlı Karamusul köyünde doğdu. İlkokul birinci sınıfı köyünde 1987 yılında tamamlayan Olcay EKŞİ ilkokul öğreniminin geri kalanını ailesinin taşındığı Lüleburgaz ilçesi Atatürk İlkokulunda 1988-1992 yılları arasında tamamladı. Orta öğrenimini Lüleburgaz ilçesi Şaban Öğünç Ortaokulu ve Lüleburgaz lisesinde 1992-1999 yılları arasında tamamlayan Olcay EKŞİ, 1999'da kazandığı Trakya Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği lisans programından 2003'te bölüm üçüncüsü olarak mezun oldu. Askerlik hizmetini Karabük/Safranbolu'da kısa dönem er olarak Aralık 2003-Mayıs 2004 tarihleri arasında yaptı. Yüksek lisans öğrenimini Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında 2007 yılında bitirdi. Halen Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve iki kız babası olan Olcay EKŞİ İngilizce bilmektedir.

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

SCI (Science Citation Index) veya SCIE (Science Citation Index Expanded) kapsamında yayınlanan bilimsel araştırma makalesi

- ◆ Selçuk ERDOĞAN, Olcay EKŞİ, *Prediction of Wall Thickness Distribution in Simple Thermoforming Moulds*, Strojnski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, Vol:60, No:3, pp:195-202, (2014).

SCI (Science Citation Index) veya SCIE (Science Citation Index Expanded) kapsamı dışında yayınlanan bilimsel araştırma makalesi

- ◆ Olcay EKŞİ, Selçuk ERDOĞAN, *Vakum ve Isı ile Şekil Verilen Bir Üründe Karşılaştırmalı Kalınlık Dağılımı Tespiti*, Electronic Journal of Vocational Colleges (EJOVOC), Vol:3, No:3, pp:107-112, (2013).
- ◆ Selçuk ERDOĞAN, Olcay EKŞİ, *Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Levhaların Isıl Şekil Verme Yöntemi ile Şekillendirilmesi*, Plastik ve Ambalaj Teknolojisi Dergisi, Sayı:152, (2010).

SCI (Science Citation Index) veya SCIE (Science Citation Index Expanded) kapsamı dışında tam metni bildiriler kitabına basılan ulusal ve uluslararası bildiriler

- ◆ Selçuk ERDOĞAN, Olcay EKŞİ, *Polimer Kompozit Levhalarda Üretim Kusurlarının Vakum ve Isı ile Şekil Verilmiş Ürün Kalitesi Üzerine Etkisi*, II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Kompozit Malzemelerin Üretim ve İşleme Metotları, pp. 230-241, Kuşadası-AYDIN, (2013).
- ◆ Selçuk ERDOĞAN, Olcay EKŞİ, *Vakum ve Isı ile Şekil Verilen Polimer Kompozit Levhalarda Ürün Kalınlık Dağılımının Karşılaştırmalı Tespiti*, II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Kompozit Malzemelerin Üretim ve İşleme Metotları, pp. 260-266, Kuşadası-AYDIN, (2013).

- ◆ Olcay EKŞİ, Selçuk ERDOĞAN, *Kompozit Levhaların Vakum ve Isı ile Şekil Verme Parametrelerinin Belirlenmesi*, KOMPEGE 2011, Ege Üniversitesi I. Ulusal Kompozit Malzeme Sempozyumu, Selçuk-İZMİR, (2011).
- ◆ Olcay EKŞİ, Selçuk ERDOĞAN, *Polimer Kompozit Levhaların Vakum ve Isı ile Şekil Verme Prosesinde, Konik Geometrilik Kalıplarda Kalıp Ayırma Açısının Levha Cidar Kalınlığı Dağılımı Üzerine Etkisinin Geometrik Elemanlar Analizi (GEA) ile İncelenmesi*, 13th International Materials Symposium (IMSP' 2010), Bildiriler Kitabı, pp.1092-1099, Pamukkale University, Denizli, Turkey, (2010).

Tamamlanan Bilimsel Araştırma Projeleri

Proje Adı:	PLASTİK ESASLI KOMPOZİT LEVHALARIN THERMOFORMING (VAKUM VE ISI İLE ŞEKİL VERME) ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
Proje Yürütücüsü:	YRD. DOÇ. DR. E. SELÇUK ERDOĞAN
Projede Görevli Araştırmacı:	Olcay EKŞİ
Destekleyen Kuruluş:	Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
Proje Bütçesi:	19.995 TL
Tarih Aralığı:	25.02.2010 - 25.03.2013