



**ENJEKSİYON KALIPLAMA PARAMETRELERİNİN ŞEKİL HAFIZALI
POLİÜRETAN ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Şükran KATMER

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2017

Şükran KATMER tarafından hazırlanan “ENJEKSİYON KALIPLAMA PARAMETRELERİNİN ŞEKİL HAFIZALI POLİÜRETAN ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Çetin KARATAŞ

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan :Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye : Prof. Dr. H. İbrahim ÜNAL

Kimya Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye : Prof. Dr. Adem ÇİÇEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 27/02/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde her hangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şükran KATMER

27/02/2017

ENJEKSİYON KALIPLAMA PARAMETRELERİNİN ŞEKİL HAFIZALI POLİÜRETAN ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Şükran KATMER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2017

ÖZET

Şekil hafıza etkisi, malzemenin sıcaklık, nem, pH, elektrik akımı, manyetik alan, ışık gibi bir uyarıcıyla karşılaştığında tepki olarak şekil değiştirme kabiliyetidir. Enjeksiyon kalıplama hâlihazırda plastiklerden ürün/parça üretilmesinde kullanılan en yaygın yöntemdir. Enjeksiyon kalıplama parametrelerinin plastiklerin çarpılma, çekme, kalıntı gerilme, boyut kararlılığı, çekme dayanımı, vb. özelliklerini etkilediği bilinmekte ancak, kalıplanan şekil hafızalı parçalara enjeksiyon kalıplama parametrelerinin etkileri bildiğimiz kadarıyla henüz belirlenmemiştir. Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama parametrelerinin (enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresi) sıcaklığa duyarlı şekil hafızalı termoplastik poliüretan parçaların özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Kalıplanan numunelerin şekil hafıza, çekme oranı, çarpılma ve kalıntı gerilme özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, kalıp ve enjeksiyon sıcaklığı parametrelerinin kalıplanan parçaların şekil hafıza özellikleri üzerinde birinci derecede etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, soğutma süresinin parçalardaki çekme, çarpılma, kalıntı gerilme ve kalıcı şekil kararlılığı üzerinde en etkili parametre olduğu bulunmuştur. Soğutma süresi arttıkça parçalardaki çekme ve çarpılma azalırken, kalıcı şekil kararlılığı artmıştır. Korelasyon analizi sonucunda, çekme ile çarpılmanın doğru, çarpılma ile basma kalıntı gerilmelerinin ise ters ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Şekil hafızalı polimerler, enjeksiyon kalıplama, mekanik özellikler, kalıntı gerilme

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Doç. Dr. Çetin KARATAŞ

INVESTIGATION OF EFFECTS OF INJECTION MOULDING PARAMETERS ON
SHAPE MEMORY POLYURETHANE

(Ph.D. Thesis)

Şükran KATMER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2017

ABSTRACT

The shape memory effect is the ability of shape changing as a response when the material is exposed to an external stimulus such as temperature, moisture, pH, electric current, magnetic field, light etc. Injection moulding is currently the most common method which is used to produce parts/products from plastics. It is known that injection moulding process parameters have influences on the properties of the plastic parts such as warpage, shrinkage, residual stress, dimensional accuracy, tensile strength etc. On the other hand, to the best of our knowledge, the effects of injection moulding parameters on the moulded parts having shape memory have not been determined yet. In this study, the effects of injection moulding parameters (i.e. injection pressure, melt temperature, mould temperature, packing pressure, packing time and cooling time) on properties of temperature sensitive thermoplastic shape memory polyurethane parts were investigated. The properties of shape memory, shrinkage ratio, warpage and residual stress of the moulded parts were examined. The results showed that the mould temperature and the melt temperature have significant effects on shape memory properties of the moulded parts. Also the cooling time was determined to be the most influential parameter on shrinkage, warpage, residual stress and permanent shape accuracy of the parts. As the cooling time was increased, permanent shape accuracy increased while the shrinkage and warpage decreased. It was concluded that there was a proportional relationship between shrinkage and warpage and inverse relationship between warpage and compression residual stress by correlation analysis.

Science Code : 91438
Key Words : Shape memory polymers, injection moulding, mechanical properties, residual stress
Page Number : 81
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Çetin KARATAŞ

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam boyunca bilgi ve tecrübe birikimini ve sabırla yönlendirmelerini benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Çetin KARATAŞ'a,

Bu tez çalışması içerisinde deneysel çalışmalarımın bir kısmını RWTH Aachen Üniversitesi, Plastik İşleme Enstitüsü'nde (IKV) 2214/a programı kapsamında gerçekleştirmemi sağlayan TÜBİTAK BİDEB'e,

Tez çalışmam süresince değerli fikir ve yönlendirmeleriyle beni aydınlatan tez izleme komitesi üyesi hocalarım, Sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR ve Sayın Prof. Dr. H. İbrahim ÜNAL'a,

Doktora çalışmamın başlangıç yıllarında çalıştığım Arçelik A.Ş. Ankara Bulaşık Makinesi İşletmesindeki ve özellikle Ar-Ge bölümündeki mesai arkadaşlarıma,

Tez çalışmam süresinde 3 yıl öğretim görevlisi olarak çalıştığım Yalova Üniversitesi, Yalova Meslek Yüksekokulu ve Mühendislik Fakültesi akademik ve idari çalışanlarına ve özellikle Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri ve Polimer Mühendisliği bölümlerindeki mesai arkadaşlarıma,

IKV Aachen'da bulunduğum süre boyunca oradaki çalışmalarına yardımcı olan ve değerli yönlendirmelerde bulunan enstitü başkanı Sayın Prof. Dr. –Ing. Christian HOPMANN'a, enjeksiyon kalıplama eski bölüm başkanı Sayın Dr. Mathias WEBER'a ve aynı projede birlikte çalıştığım Sayın Philipp OCHOTTA'ya ve Aachen'da bulunduğum süre boyunca benden dostluklarını esirgemeyen bütün mesai arkadaşlarıma, özellikle Enjeksiyon Kalıplama bölümü çalışanlarına,

Malzeme analizinde yardımlarını esirgemeyen Dr. Nurcan KARACA ve tez yazımındaki düzeltmeleri ve fikirleriyle bana yardımcı olan Dr. Özlem EROL'a,

Hayatımın her döneminde yanımda olan ve beni destekleyen kardeşlerim;

Hilal, Metin ve Tuğba KATMER'e,

Son olarak beni bir birey olarak yetiştiren, kararlarıma saygı duyarak beni destekleyen aynı zamanda sabırla yol gösteren;

sevgili annem ve babam, Huriye ve Tahir KATMER'e, teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ŞEKİL HAFIZA ETKİSİ VE ŞEKİL HAFIZALI POLİMERLER	3
2.1. Polimerlerde Şekil Hafıza Etkisi	3
2.1.1. Tek yönlü şekil hafıza etkisi	5
2.1.2. İki yönlü şekil hafıza etkisi	6
2.1.3. Üçlü şekil hafıza etkisi	9
2.2. Sıcaklık Duyarlı Şekil Hafızalı Polimerler	9
2.2.1. Doğrudan ısıtmayla aktifleşen şekil hafıza etkisi.....	9
2.2.2. Dolaylı ısıtmayla aktifleşen şekil hafıza etkisi.....	10
2.3. Işık Duyarlı Şekil Hafızalı Polimerler.....	12
2.4. Şekil Hafızalı Poliüretan (ŞHPU)	13
3. ŞEKİL HAFIZALI PARÇA UYGULAMALARI.....	15
3.1. Taşıt Uygulamaları.....	15
3.2. Sağlık Uygulamaları.....	16
3.3. Kendi Kendine Montaj veya Demontaj Uygulamaları.....	17
4. PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA	21

Sayfa

5. MATERYAL VE METOT	25
5.1. Hammadde ve Özellikleri	25
5.2. Deney Tasarımı	26
5.3. Numunelerinin Kalıplanması	28
5.4. Boyut, Çarpılma ve Ağırlık Ölçümleri.....	31
5.5. Şekil Hafıza Testleri.....	32
5.6. Kalıntı Gerilme Ölçümleri	34
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	37
6.1. Çekme Oranı	37
6.2. Çarpılma Sonuçları.....	40
6.3. Ağırlık Sonuçları	43
6.4. Şekil Hafıza Etkisi.....	44
6.4.1. Kalıcı şekil	45
6.4.2. Programlama	46
6.4.3. Toparlanma	48
6.5. Kalıntı Gerilme Sonuçları	50
6.5.1. Soğutma süresinin etkisi	53
6.5.2. Ütüleme basıncının etkisi.....	55
6.5.3. Enjeksiyon basıncının etkisi.....	56
6.5.4. Kalıp sıcaklığının etkisi	57
6.5.5. Enjeksiyon sıcaklığının etkisi	58
6.5.6. Ütüleme süresinin etkisi.....	59
6.6. Sonuçlar Arasındaki İlişkiler.....	60
7. SONUÇLAR.....	63

	Sayfa
8. ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR.....	67
EKLER	77
EK-1.....	78
ÖZGEÇMİŞ	79
DİZİN.....	81



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kalıplama parametrelerinin parça özelliklerine etkileri	24
Çizelge 5.1. Şekil hafızalı poliüretanın özellikleri.....	25
Çizelge 5.2. Deney şartları tablosu	27
Çizelge 5.3. Taguchi L27 (ortogonal dağılım) deney tasarımı	28
Çizelge 5.4. Enjeksiyon kalıplama presinin özellikleri	30
Çizelge 5.5. Kalıp şartlandırıcının özellikleri	30
Çizelge 6.1. Çekme oranı varyans analizi sonuçları	38
Çizelge 6.2. Çarpılma sonuçları varyans analizi tablosu	41
Çizelge 6.3. Ağırlık verileri varyans analizi tablosu.....	43
Çizelge 6.4. Kalıcı şekil kararlılık değeri varyans analizi sonuçları.....	45
Çizelge 6.5. Programlama test değerleri varyans analizi sonuçları	47
Çizelge 6.6. Toparlanma test değerleri varyans analizi sonuçları	49
Çizelge 6.7. Sonuçların kolerasyon çizelgesi	61
Çizelge 6.8. Enjeksiyon kalıplama parametrelerinin ŞHPU parça özelliklerine etkileri	62

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1.(a) Şekil hafıza etkisi ve (b) süper elastiklik	4
Şekil 2.2. Sıcaklık duyarlı bir ŞHP'nin kalıcı şekline toparlanması.....	4
Şekil 2.3. Sıcaklık duyarlı bir ŞHP'de programlama adımları	5
Şekil 2.4. ŞHP'lerin şekil hafıza fonksiyonlarının gösterimi	6
Şekil 2.5. İki yönlü ŞHE'nin gözlenmesi.....	9
Şekil 2.6. Kızılötesi radyasyon altında şekil toparlanması (soldan sağa doğru).....	11
Şekil 2.7. Manyetik duyarlı şekil hafıza etkisi.....	11
Şekil 2.8. Şekil hafıza etkisinin suyla aktifleştirilmesi	12
Şekil 2.9. Foto-şekil hafıza etkisi.....	13
Şekil 2.10. ŞHPU elastiklik modülünün sıcaklıkla değişimi	14
Şekil 3.1. Şekil hafızalı bir menteşe (üst) ve onun güneş paneli uygulaması (alt)	16
Şekil 3.2. Açılabilen yansıtıcı tasarımı (sol), yansıtıcının detayı (sağ)	16
Şekil 3.3. Bir ilaç salım sisteminin şematik açıklaması.....	17
Şekil 3.4. Müzik çalarda ŞHP civata uygulaması (sağ)	18
Şekil 3.5. Kendi kendine açılabilir tırnak tasarımı	19
Şekil 3.6. Akıllı valf tasarımı.....	20
Şekil 5.1. Diaplex MM4520 ŞHPU malzemenin TGA grafiği	26
Şekil 5.2. Diaplex MM4520 ŞHPU malzemenin DSC grafiği	26
Şekil 5.3. Numune, yolluk ve dağıtıcı tasarımı ve ölçüleri.....	29
Şekil 5.4. Enjeksiyon kalıplama presi.....	29
Şekil 5.5. Kalıp yerleşim planı.....	31
Şekil 5.6. Parçalardaki çarpılmanın şematik gösterimi.....	31
Şekil 5.7. Şekil hafıza test aşamalarının şematik gösterimi; (I) kalıptan alınan parça, (II) programlama sonundaki parça, (III) toparlanma sonundaki parça	33

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. Sıcaklık kontrollü çekme test cihazı	33
Şekil 5.9. Kalıntı gerilme ölçüm numunesi ve ölçüleri	34
Şekil 5.10. Parçalardaki eğriliğin ölçülmesi	34
Şekil 5.11. Numunelerdeki eğriliğin şematik gösterimi ve değişkenler	35
Şekil 6.1. Çekme oranı ana etki grafikleri	39
Şekil 6.2. Çarpılma sonuçları ana etki grafikleri	41
Şekil 6.3. Ağırlık sonuçları ana etki grafikleri.....	44
Şekil 6.4. Şekil kararlılığı ana etki grafiği	46
Şekil 6.5. Programlama (hafızalaştırma) ana etki grafikleri	48
Şekil 6.6. Toparlanma ana etki grafikleri.....	49
Şekil 6.7. Kalınlık boyunca kalıntı gerilme dağılımı	51
Şekil 6.8. Kalıntı gerilmelerin kalıplama parametrelerine göre değişim	52
Şekil 6.9. Soğutma süresinin kalıntı gerilmelere etkisi.....	54
Şekil 6.10. Ütüleme basıncının kalıntı gerilmelere etkisi	55
Şekil 6.11. Enjeksiyon basıncının kalıntı gerilmelere etkisi.....	56
Şekil 6.12. Kalıp sıcaklığının kalıntı gerilmelere etkisi.....	58
Şekil 6.13. Enjeksiyon sıcaklığının kalıntı gerilmelere etkisi.....	59
Şekil 6.14. Ütüleme süresinin kalıntı gerilmelere etkisi	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

T_m

Erime sıcaklığı

T_g

Camsı geçiş sıcaklığı

T_c

Kristalleşme sıcaklığı

Kısaltmalar

Açıklamalar

ABS

Akrilonitril bütadien stiren

ANOVA

Varyans analizi

EAI

Ergime akış indeksi

EHK

Elastik hafızalı kompozit

DSC

Diferansiyel taramalı kalorimetre

LDI

Lizin metil-ester diizosiyanat

PBA

Poli(butilen adipat)

PC

Polikarbonat

PCL

Poli(ϵ -kaprolakton)

PEG

Poli(etilen glikol)

PEU

Poli(ester üretan)

PS

Polistiren

SKE

Sıvı kristal elastomer

ŞHA

Şekil hafızalı alaşım

ŞHE

Şekil hafıza etkisi

ŞHP

Şekil hafızalı polimer

ŞHPU

Şekil hafızalı poliüretan

TGA

Termogravimetrik analiz

YYPE

Yüksek yoğunluklu polietilen

1. GİRİŞ

Akıllı malzemeler, çevresel faktörlere duyarlı veya sahip oldukları konumu hisseden ve bunlardaki bir değişimle belirlenen yön doğrultusunda fonksiyonunu değiştiren malzemelerdir. Akıllı malzemelerden hazırlanan sistemler, karmaşık uyarıcı-tepki geri bildirim sistemlerine ihtiyaç duymadıkları için diğer mekanizmalardan veya yapılardan farklıdırlar. Bunun yerine, sıcaklık, ışık dalga boyu, nem, pH değeri gibi çevresel değişkenlere aşırı duyarlıdırlar. Bu uyarıcılardaki bir değişimle malzeme özelliklerini değiştirme kabiliyetine sahiptirler.

Polimerlerde şekil hafıza etkisi ise sadece tek bir polimerin değil bütün polimerlerin bir özelliği olup, bu, polimer yapısının ve morfolojisinin, süreç ve programlama teknolojisinin birleşiminin sonucudur. Son yıllarda geliştirilmekte olan akıllı malzemelerden şekil hafızalı polimerler (ŞHP) havacılık ve uzay, medikal, tekstil, otomatik de-montaj gibi alanlarda yer bulması ile dikkat çekmektedir. Literatürde bu malzemelerden farklı uygulama alanlarına yönelik parçalar için çok sayıda patent ve yayın bulunmaktadır. ŞHP'ler sağladığı kolay işlenebilirlik, benzer özellikler taşıyan diğer malzemelere kıyasla düşük hammadde maliyeti, yüksek şekil değiştirme kabiliyeti, tek başına bir “makine gibi” çalışabilme özellikleri sayesinde gittikçe daha çok alanda yer almaktadır. Enjeksiyon kalıplama genel plastik parçaların üretilmesinde önemli yer tuttuğu gibi ŞHP parçaların daha fazla ticarileşmesiyle ŞHP parçaların üretilmesinde de önemli bir yer alacaktır.

Enjeksiyon kalıplamanın kalıplanan plastik parçalar üzerinde etkileri olduğu literatür de rapor edilmiştir [1]. Enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, enjeksiyon basıncı, ütüleme süresi, soğutma süresi, enjeksiyon hızı gibi kalıplama şartlarının değişimiyle parçalardaki çekme oranı, çarpılma, kalıntı gerilme, boyutsal kararlılık, çekme dayanımı vb. gibi özellikler değişmektedir. Fakat enjeksiyon kalıplama şartlarının kalıplanan şekil hafızalı parçalara etkileri halen tam olarak bilinmemektedir.

Bu çalışmada bir ŞHP olan sıcaklık duyarlı şekil hafızalı termoplastik poliüretan (ŞHPU) malzemeden numunelerin enjeksiyonla kalıplanmasında, kalıplama sürecinin kalıplanan parçaların çekme, çarpılma, kalıntı gerilme ve *şekil hafıza kabiliyeti* üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Altı farklı enjeksiyon kalıplama parametresi baz alınarak

enjeksiyon kalıplama sürecinin ŞHPU'dan kalıplanan parçaların özelliklerine etkileri belirlenmiştir. Sonuçlar, hemen her kalıplama parametresinin en az bir özellik üzerinde etkili olduğunu ayrıca bazı özelliklerin birbirini de etkilediğini ortaya koymuştur.



2. ŞEKİL HAFIZA ETKİSİ VE ŞEKİL HAFIZALI POLİMERLER

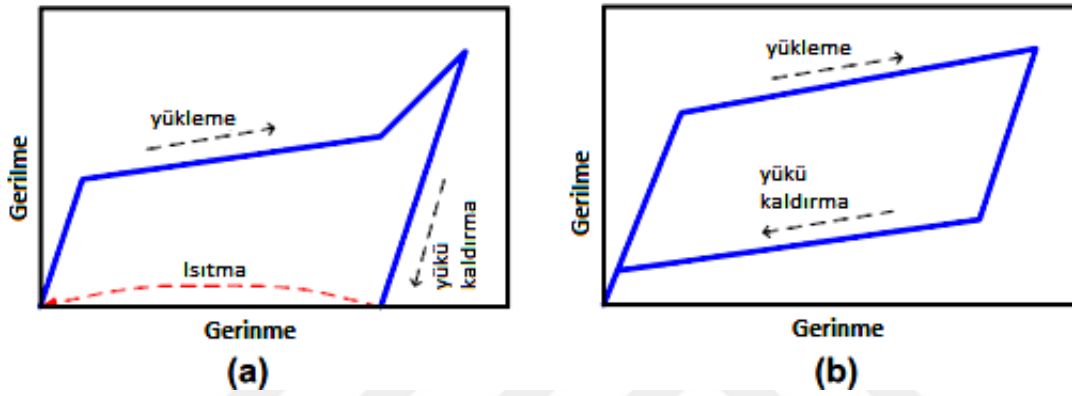
Akıllı malzemelerin en önemli tiplerinden biri şekil hafızalı malzemelerdir. Şekil hafızalı malzemeler şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), şekil hafızalı seramikler, şekil hafızalı polimerler (ŞHP), şekil hafızalı jeller ve şekil hafızalı hibrid malzemeler olarak beş gruba ayrılırlar [2-6]. Şekil hafızalı malzemeler, kalıcı bir şekli hatırlama ve bir veya birden çok geçici şekle programlanabilme kabiliyetine sahiptir ve dışarıdan bir uyarıcıyla (ısı, ışık, nem, basınç, pH, manyetik alan, sıcaklık, vb.) karşılaştığında geçici şekillerinden kalıcı şekillerine toparlanırlar [2, 7]. Uyarıcıyla karşılaştığında malzemenin sahip olduğu şekli değiştirme özelliği malzemenin şekil hafıza etkisi (ŞHE) olarak adlandırılmaktadır.

2.1. Polimerlerde Şekil Hafıza Etkisi

1960'lardan beri iyon radyasyonuyla çapraz bağlanan polietilen, ısı çekme filmi veya tüpü olarak özellikle elektrik tellerinin yalıtımında ve boruların korozyondan korunmasında uygulama alanı bulmuştur. Bu malzemeler "ısıyla çekebilen malzemeler" adı altında pazarlanmıştır. Isıyla çekme sürecinin mekanizması, ısı duyarlı şekil hafıza etkisidir. Burada, kalıcı şekil kovalent bağlarla sabitlenmiştir ve polietilenin erime sıcaklığı (T_m) ile süreç kontrol edilmektedir [6].

Lineer, faz ayrımlı çok bloklu kopolimerlerin, çoğunlukla poliüretanların, "şekil hafızalı polimerler" olarak bahsedildiği literatürde görülebilir. Bu elastik malzemeler ayrılmış iki faz içerirler. Fiziksel çapraz bağlar nedeniyle en yüksek geçiş sıcaklığı ($T_{kalıcı}$) sergileyen faz kalıcı şekli oluşturur. Bu sıcaklığın üzerinde (enjeksiyon veya işleme sıcaklığı) polimer enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi klasik kalıplama yöntemleriyle işlenebilir. İkinci faz, moleküler bir anahtar olarak çalışır ve geçici şeklin sabitlenmesini sağlar. Anahtar grubunun (switching segment) kontrolü için geçiş sıcaklığı ($T_{geçiş}$), camsı geçiş sıcaklığı (T_g) veya T_m baz alınabilir. Malzemenin anahtar sıcaklığında, fakat $T_{kalıcı}$ 'nın altında, şekillendirilmesinden sonra geçici şekil polimerin anahtar sıcaklığının altına soğutulmasıyla sabitlenebilir. Malzemenin yeniden $T_{geçiş}$ sıcaklığının üzerine ısıtılmasıyla fiziksel çapraz bağlar açılır. Elastiklik entropisi sonucunda malzeme kalıcı şekline dönmeye zorlanır [6]. Şekil hafıza etkisi ve süper elastiklik arasındaki fark Şekil 2.1'de görülmektedir [8].

Şekil 2.2’de poli(ϵ -kaprolakton) dimetilakrilat ve butilakrilat’tan (ko-monomer içeriği: ağırlıkça %50) sentezlenmiş şekil hafızalı polimerin geçici şekilden (spiral) kalıcı şekline (çubuk) geçiş görülmektedir. Polimerin düz tüp olan kalıcı şekli, programlama süreciyle bir spirale (geçici şekil) dönüştürülmüştür. $T_{\text{geçiş}}$ sıcaklığı 46°C olan polimerin 70°C ’deki sıcak havanın etkisiyle parçanın toparlanma süreci 35s sürmüştür. Kalıcı şekil en iyi programlama şartlarıyla %99’ un üzerinde bir oranda kararlılıkla toparlanmıştır. Bu kararlılık bu malzemeleri yüksek hassasiyetli uygulamalar için uygun kılmaktadır [6].



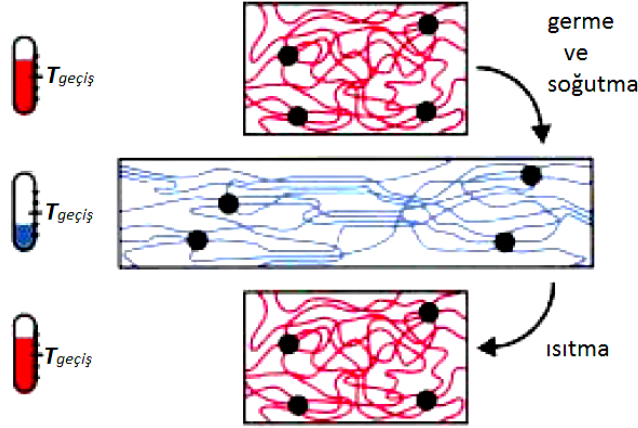
Şekil 2.1.(a) Şekil hafıza etkisi ve (b) süper elastiklik [8]



Şekil 2.2. Sıcaklık duyarlı bir ŞHP’nin kalıcı şekline toparlanması [6]

Sıcaklık duyarlı bir ŞHP için programlama ve toparlanma süreci şematik olarak Şekil 2.3’te açıklanmıştır. Burada $T_{\text{geçiş}}$ polimerin ŞHE’sinin ortaya çıkması için gereken sıcaklık eşliğini ifade eder. İlk önce, polimer klasik yöntemle kalıcı şekline getirilir. Sonra, polimer ısıtılır ve deforme edilir böylece geçici şekline sabitlenir. Bu süreç programlama olarak adlandırılır. Programlama süreci ya, numunenin ısıtılması, deforme edilmesi ve soğutulmasını ya da düşük sıcaklıkta şekillendirilmesini (soğuk şekillendirme) içerir. Parça geçici şeklindeki kalıcı şekil saklı kalır. Şekil hafızalı polimerin geçiş sıcaklığı ($T_{\text{geçiş}}$) üzerine ısıtılması şekil hafıza etkisinin ortaya çıkmasına neden olur. Sonuç olarak, toparlanmayla birlikte, saklı olan kalıcı şekil ortaya çıkar. Polimerin geçiş sıcaklığının altına soğutulmasıyla malzemenin

katılaşması başlar fakat geçici şekil yeniden ortaya çıkmaz. Bu etki tek yönlü şekil hafıza etkisi olarak adlandırılır. Mekanik deformasyon içeren yeniden programlamayla, iş parçasına yeniden geçici şekil kazandırılmış olur. Yeni geçici şeklin ilk geçici şekille bire bir aynı olması gerekli değildir [6].



Şekil 2.3. Sıcaklık duyarlı bir ŞHP’de programlama adımları [6]

Farklı şekil hafıza fonksiyonlarının tasarlanması için yaklaşımlar, araştırmacıların ŞHP'lerin şekil hafıza etkisine (ŞHE) daha fazla hâkim olmalarını ve ŞHP malzemelerin sayısının hızla artmasını sağlamıştır. Tek yönlü ŞHE’den, iki yönlü, üçlü ve çoklu ŞHE’ye ve sıcaklık-hafıza etkisi ŞHP’lerde genişçe araştırılmıştır. Dahası, iki hatta üç farklı şekil hafıza fonksiyon tipi, aynı anda bir ŞHP malzemedeki bulunabilir. Buna bir örnek, PDCL olarak anılan, farklı programlamalarla tek yönlü, iki yönlü ve üçlü ŞHE gösteren, PPD (yıldız şekilli hidroksi-telechelic ve poly(ω -pentadekalakton)’dan (PCL) elde edilmiş polimerdir [2].

2.1.1. Tek yönlü şekil hafıza etkisi

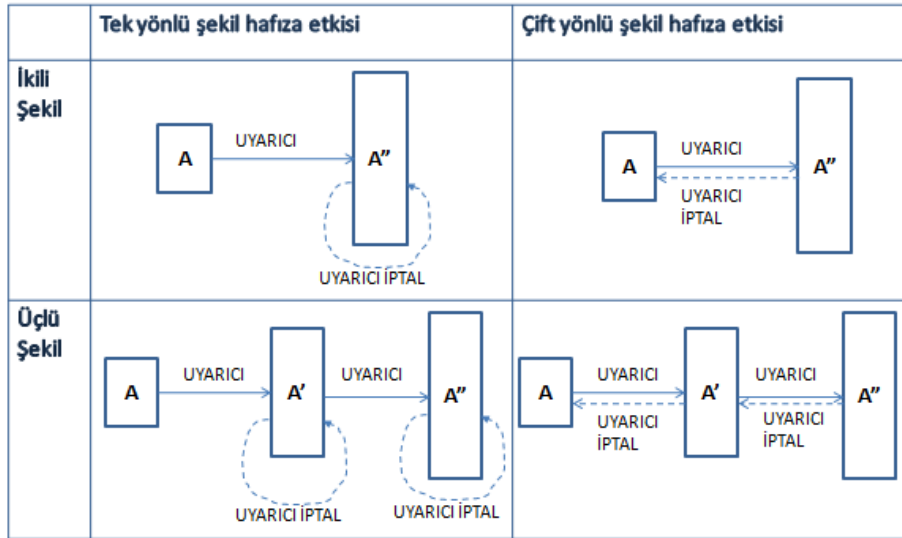
Tek yönlü şekil hafıza etkisi; malzemenin, kalıcı şeklinden geçici şekline kuvvet uygulanarak deforme edilmesi ve bu formda yeniden katılaştırılmasından sonra, uyarıcı etkisine maruz bırakılarak tersinmez olarak kalıcı şekline toparlanmasıdır (Şekil 2.4). Yani, her yeni toparlanma işlemi için parça tekrar tekrar kalıcı şekilden geçici şekle dış kuvvet uygulanarak deforme edilmelidir. Tek yönlü ŞHE, üretim esnasında tanımlanan tek orijinal şekle ve farklı şekil hafıza programlama süreçleriyle oluşturulan çok geçici şekle sahiptir [2]. Tek yönlü ŞHE'nin tespit edilmesi için birçok yöntem vardır. Örneğin; çevrimsel çekme

testi [9], gerilme toparlanma süreci [10], bükülme testi [11, 12] ve çekme oranı tesbîti [2, 13].

Bilim adamları başlarda tek yönlü şekil hafıza etkisinin (ŞHE) en basit ve yaygın özellik olması sebebiyle birçok uygulama için yeterince iyi olmadığını düşünmüştü. Böylece polimerlerin iki yönlü ŞHE keşfetmek için çalışmalara başlandı. Hafızalaştırma yöntemleri üzerine çok sayıda çalışmaların sonunda tek yönlü ŞHE iki yönlü ŞHE'ye oranla daha fazla esnek ve uygulanabilir olduğu rapor edilmiştir [6]. Çünkü iki yönü ŞHE'nin hafızalaştırılması zor veya gereksizdir.

2.1.2. İki yönlü şekil hafıza etkisi

İki yönlü şekil hafıza etkisi malzemenin kalıcı ve geçici şekli arasındaki dönüşümü, uyarıcı haricinde dışarıdan ek kuvvete ihtiyaç duymaksızın tekrar tekrar yapabilmesidir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. ŞHP'lerin şekil hafıza fonksiyonlarının gösterimi [2]

Sıvı kristal elastomerler (SKE), gerilme altındaki ŞHP'ler ve tabakalı polimer kompozitler gibi polimerik malzemelerin iki yönlü şekil hafıza etkisi üzerine çalışmalar devam etmektedir [1].

Sıvı kristal elastomerler

1975'te Gennes tarafından SKE'ye tanımlanmış bir dış uyarıcının (örneğin; ısı, ışık, elektrik alan ve nem) uygulandığında şeklini değiştirebilme kabiliyeti gösterdiği fark edilmiş ve 1981'de Finkelmann ve diğerleri tarafından ilk uygulaması gerçekleştirilmiştir [14]. Bu fenomen, SKE'lerde "tersinir kısalma/uzama" olarak adlandırılmış, son zamanlarda birçok yazar "şekil hafıza etkisi" veya "iki yönlü şekil hafıza etkisi" ifadelerini kullanmayı tercih etmiştir. Geçmiş otuz yıl süresince, SKE'ler tersinir gerinme özellikleri ve potansiyel uygulamaları sayesinde (örneğin, yapay kaslar) bilimsel ve endüstriyel alanda ilgi çekmiştir [2].

İki yönlü şekil hafıza etkisine sahip SKE'lerin sıcaklık duyarlılığı sıvı kristalin mezojenik gruplarının ve polimerin elastik özelliklerinin sonucudur. SKE film anizotropik-izotropik faz geçiş sıcaklığına ısıtıldığında, mezojenler dağılır ve film genellikle büzülür. Sıcaklık faz geçiş sıcaklığının altına düşürüldüğünde, SKE film orijinal boyutlarına genişler. Fakat SKE'lerin bu eşsiz özelliğinin makroskopik boyutta görülebilmesi için mezojenler bütün parça boyunca her yönde eşit olarak hizalanmalıdır, bu en önemli ön şarttır [2, 14].

SKE'ler fotomekanik polimerlerin iki yönlü ışık duyarlı SHE'leri için genişçe araştırılan azobenzen birimleri içerirler. Bu sistemlerde, deformasyonun oluşması için yürütücü güç hizalanmanın varyasyonlarından gelir. UV-ışığı altında azobenzen içeren SKE'ler hizalanmada ve faz geçişi izotropisinde azalma gösterirler. Böylece, makroskopik seviyede, bükülme ve düzelme gibi tersinir şekil değişiklikleri azobenzen içeren SKE'lerde görülür [14].

Gerilim altında şekil değiştiren (T_m tip) ŞHP'ler

İki yönlü SHE'ye sahip ŞHP'lerin bir diğer türü soğutma esnasında yapısındaki "kristalleşme nedeniyle uzama" ve gerilme altına oluşan ısınmayla "erime nedeniyle kısalma" gösteren T_m tip ŞHP'lerdir. Gerilim altındayken soğutulması ($T < T_{\text{düşük}}$) esnasında, yük yönünde kristallerin oluşmasıyla uzama ortaya çıkar. $T_{\text{düşük}}$ 'ten $T_{\text{yüksek}}$ 'e ısıtıldığı zaman kristalleşme etkisiyle artan uzama, erimenin etkisiyle tersine döner. Böylece, gerilmenin uygulanmasıyla, bu sistemlerde kristaller tek yön boyunca yerleşir ve yarı-kristal faz tersinir şekil değişimi gösterir. Bu nedenle, yarı kristal polimer ağ yapılarında tek yönlü, iki yönlü

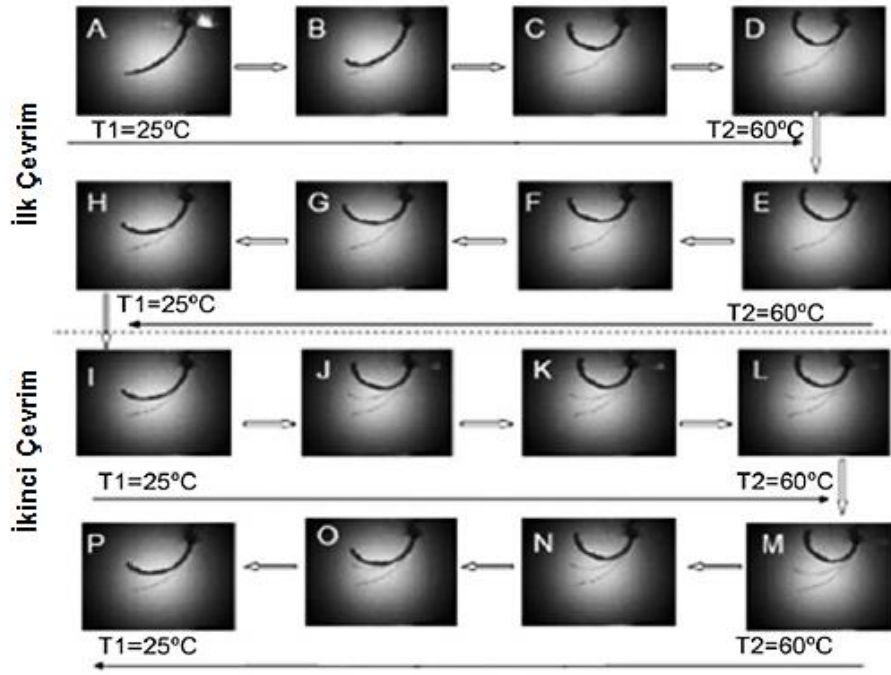
ve hatta üçlü ŞHE'leri görülebilir [2]. Gerilme altında iki yönlü şekil hafıza etkisi ilk olarak 2008'de Chung ve diğerleri tarafından rapor edilmiştir [15].

ŞHP tabakalı kompozitler

Çoğu araştırma iki yönlü ŞHE'lerinin kompozit teknolojisi kullanılarak geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Son geliştirilen iki yönlü ŞHP tabakalı kompozitler ana olarak şekil hafızalı alaşım (ŞHA) ve polimer kompozitlerine odaklanmıştır [16, 17]. Aslında, ŞHA/polimer veya ŞHA/ŞHP kompozitlerinin iki yönlü ŞHE'leri, ŞHA'nın ısıtma ve soğutma esnasındaki ŞHE' si ve süper elastikliğinin sonucudur [2].

Sadece polimerik malzemeye dayanan tabakalı iki yönlü ŞHP kompozitler üzerindeki ilk çalışma 2008'de yayımlanmıştır. Hu ve diğerleri iki tip tek yönlü ŞHP filmler kullanılarak hazırlanmış saf ŞHP kompozitlerde tersinir bükülme ve düzlenme davranışını elde etmişlerdir [18, 19]. İki yönlü ŞHE'de yürütücü kuvvet, polimer katmanlarının ısıtılma esnasındaki toparlanma kuvvetlerinin birleşimive diğer polimer katmanlarının elastikliği veya sertliğidir. Şekil 2.5'te iki ayrı tersinir şekil hafızalı poliüretan tabakalı kompozitlerinde iki yönlü ŞHE çevrimi görülmektedir ve dinamik mekanik analiz sonuçları bu çevrimin beşten fazla tekrarlanabileceğini göstermektedir [2, 19].

ŞHP kompozitleri, iki yönlü ŞHA'lar veya ŞHA/polimer tabakalı kompozitleriyle kıyaslandığında bu daha yüksek toparlanma gerinmesine sahip olduğu ve ŞHP katmanlarının sertlik, kalınlık ve deformasyon oranlarıyla tersinir deformasyonları kolaylıkla kontrol edilebilir olduğu ortaya çıkarılmıştır [2]. Dahası, iki yönlü ŞHE'leri herhangi bir dış gerilim olmaksızın oluşturulabilir. Böylelikle, ŞHP tabanlı kompozit teknolojisi, kolay üretim ve uygulama, mekanik ve şekil hafıza özellikleri gibi avantajları sayesinde gelecek uygulamalarda büyük yer tutacaktır [2].



Şekil 2.5. İki yönlü SHE'nin gözlenmesi [19]

2.1.3. Üçlü şekil hafıza etkisi

Geleneksel tek yönlü ŞHP'lerden farklı olarak üçlü ŞHP'ler iki geçici şekle sahip olabilir ve birinci geçici şekilden (A'') ikinci geçici şekle (A') ve oradan da kalıcı şekle (A) toparlanabilirler (Şekil 2.2). Genellikle üçlü ŞHP, her biri ayrı geçiş sıcaklığına sahip farklı iki fazlı ağ yapısıyla açıklanır. Bu nedenle, üçlü SHE'ye, kimyasal veya fiziksel çapraz bağlı ağ yapısı ve iki katmanlı yapıyla ulaşılır [2].

2.2. Sıcaklık Duyarlı Şekil Hafızalı Polimerler

2.2.1. Doğrudan ısıtmayla aktifleşen şekil hafıza etkisi

Fiziksel çapraz bağlı şekil hafızalı polimerlerin önemli bir grubu lineer blok kopolimerlerdir. $T_{geçiş} = T_m$ eşitliği sağlayan blok kopolimerler incelenmiştir [6] ve yapıları genellikle poliüretan ve polyesterlerden oluşur. Poli-ester-üretanlarda; polikaprolakton ($T_m = 44-55^\circ\text{C}$) anahtar fonksiyonel grup olarak yer alırken, üretan fonksiyonel grubu sert kısmı oluşturur. Ek olarak, poli-ester-üretanların mezojenik fonksiyonel gruplar (sıvı kristal elastomerlerde olduğu gibi) içerdiği rapor edilmiştir [9, 10, 20-24].

Blok kopolimerlerde, şekil hafıza etkisi camsı geçiş sıcaklığına da ($T_{\text{geçiş}} = T_g$) bağlı olabilir. Bunun tipik bir örneği, çoğu durumlarda, anahtar fazlara karışmış olduğu poliüretanlardır. Burada, poliüretan gruplar fiziksel olarak çapraz bağlı gibi davranır ve küresel alanlarda birleşirler. $T_{\text{geçiş}}$ sıcaklığı transpoliizopren anahtar gruplarının erime geçişine bağlıdır [20, 25].

Termoplastik şekil hafızalı polimerler sınıfı içinde diğer sıcaklık duyarlı ($T_{\text{geçiş}} = T_g$ olan) poliesterdir. Polikaprolakton ve polibutilen teraftalat'tan oluşan ko-poliesterlerde, poli butilen teraftalat çapraz bağlayıcıdır [26].

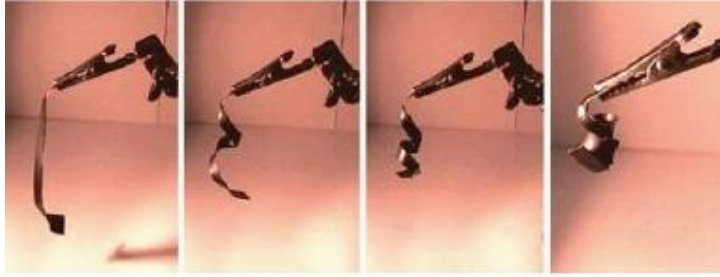
Kovalent çapraz bağlı polimerlerde çapraz bağlama sentez esnasında veya polimerleşme tepkimesinden sonra radyasyon veya kimyasal yöntemlerle oluşturulabilir. Örneğin; çift şekil kabiliyeti polietilen ve kopolimerlerine iyon radyasyonu (gama radyasyonu, nötron bombardımanı) ile çapraz bağlanmayla kazandırılabilir. Poli(ϵ -kaprolakton)'un radyasyonla çapraz bağlanması, ana moleküler zincirin kırılması ve faydalı mekanik özelliklerin kaybıyla sonuçlanır. Polikaprolakton'un poli-metilsiloksan ile karışımının radyasyonla çapraz bağlanmasıyla malzemeye şekil hafıza özellikleri eklenebilir [20, 27-29].

2.2.2. Dolaylı ısıtmayla aktifleşen şekil hafıza etkisi

Şekil hafıza etkisinin dolaylı etkinleştirilmesi iki farklı yöntemle yapılır. Birinci yöntem, radyasyon gibi dolaylı ısıtmayı içerir. Diğer yöntem, plastikleştirici gibi çalışan düşük molekül ağırlıklı moleküllerin polimerin içine düşük $T_{\text{geçiş}}$ 'te nüfuz etmesidir. Bu, numune sıcaklığı sabit kalırken şekil hafıza etkisinin devreye girmesine imkân sağlar [20].

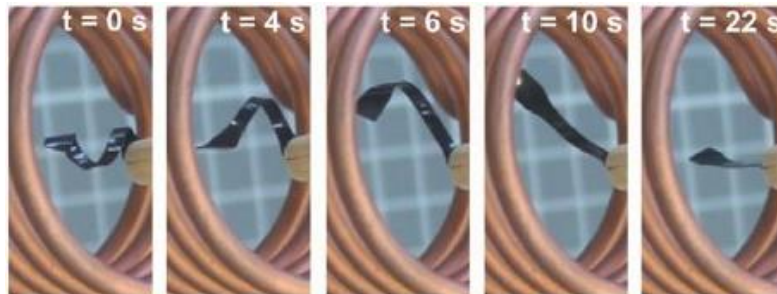
Sıcaklık duyarlı şekil hafıza polimerleri, ortam sıcaklığının artırılması yerine, kızılötesi ışıkla da ısıtılabilir. Bu yöntem lazerle aktifleştirilen poliüretan medikal aletlerde kullanılmıştır [20, 30, 31]. Bazı aletlerde, ısı transferi iletken seramik, karbon siyahı ve karbon nanotüp gibi iletken liflerin katkısıyla sağlanmıştır (Şekil 2.6) [20, 32]. Mikron boyutta parçacıkların katkı malzemesi olarak, ŞHP'lerde sertlik, toparlanabilir gerinme miktarı gibi mekanik özelliklerde olumlu etkiye yol açmaktadır. Nano boyutlu parçacıkların benzer amaçla kullanılması malzemenin geliştirilmesinde büyük oranda katkı sağlamaktadır. Karbon nanotüple veya aynı boyutlarda karbon siyahıyla katkılanmış poliüretanın gerinim ve kararlılık artışı gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır [20, 33, 34].

İletkenlik karbon nanotüplerin şekil hafızalı poliüretana katılmasıyla ulaşılabilir. Elektrik iletkenliği uygulamalarında, numune sıcaklığı, kompozitin yüksek iletkenlik direncinin bir sonucu olarak yükselir. Bu etki şekil hafızayı aktifleştirmek için kullanılır [20, 33].



Şekil 2.6. Kızılötesi radyasyon altında şekil toparlanması (soldan sağa doğru) [34]

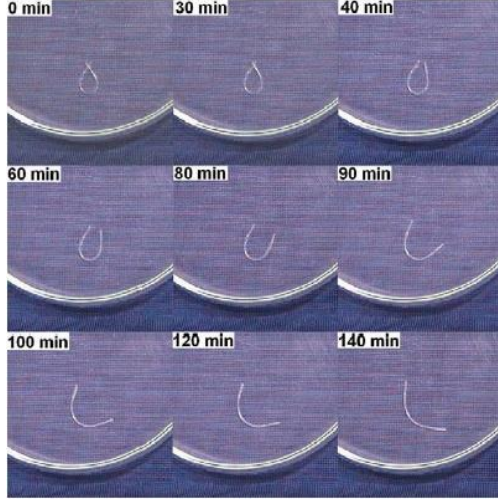
Silika matrisin çekirdeğinde demir(III)oksit manyetik nano parçacıklarının şekil hafızalı termoplastiklere katılması, manyetik alan altında şekil hafıza etkisinin uzaktan kontrol edilebilmesine imkan sağlamıştır (Şekil 2.7) [20, 35]. Burada, matris olarak iki farklı termoplastik malzemeden oluşan örneğin sıcaklığı, manyetik alanda nano parçacıkların indüksiyon ısılarıyla artırılmıştır. Birinci malzeme metilen bis(p-sikloheksil izosiyanat), bütandiol ve poli(tetrahidrofuran)’dan elde edilen alifatik poliüretan ve ikinci malzeme biyo-bozunur multiblok kopolimerdir (sert grup poli(p-dioksan) ve anahtar grup poli(ϵ -kaprolakton)). Alifatik poliüretan amorf fazı oluştururken, biyo-bozunur multiblok kopolimer kristallenebilir gruptur. Başka bir çalışmada, dolaylı manyetik aktifleştirme Ni-Zn ferrit parçacıklarının ester tabanlı ticari termoset poliüretan içerisine karıştırılmasıyla gerçekleştirilmiştir [20, 36].



Şekil 2.7. Manyetik duyarlı şekil hafıza etkisi [35]

Ticari poliüretanlarda şekil hafıza etkisinin düşük $T_{geçiş}$ 'te dolaylı aktifleşmesinin, karbon nanotüp içeren kompozitlerinde de geçerli olduğu görülmüştür. Suyu temas ettiğinde, nem

polimer numuneye nüfuz eder ve şekil toparlanmayı sağlayan bir plastikleştirici gibi davranır[20, 37-40]. Şekil 2.8’de suyla aktifleşen şekil hafıza etkisinin bir örneği görülmektedir. Dairesel geçici şekilli şekil hafızalı poliüretan suyun içerisine atılmış ve düz kalıcı şekline toparlanması 30 dakika sonra başlamıştır [38].



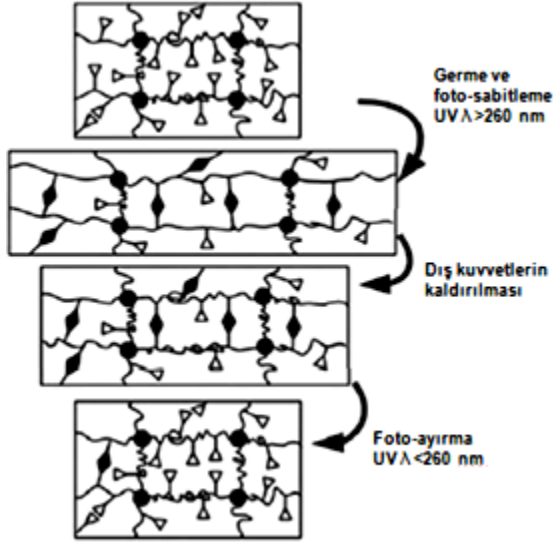
Şekil 2.8. Şekil hafıza etkisinin suyla aktifleştirilmesi [38]

2.3. Işık Duyarlı Şekil Hafızalı Polimerler

Şekil hafızalı polimerlerin ışıkla uyarılması, tersinir foto-reaktif moleküler anahtarların katkısıyla elde edilmiştir. Bu uyarıcı herhangi bir sıcaklık etkisinden bağımsızdır ve sıcaklık duyarlı şekil hafıza etkisinin dolaylı aktivasyonundan farklıdır [20, 41].

Işık duyarlılığının şekil hafızalı polimerlere girişi, ışık duyarlı fonksiyonel gruplar olan sinamik asit veya sinamilidin asetik asitin polimer yapısına katılmasıyla sağlanabilir. Bu yapıları içeren ışık duyarlı ŞHP’ler uygun dalga boyunda ışık ile bombardıman edildiğinde çapraz bağlanma gerçekleşir. Farklı dalga boyundaki ışık bombardımanı da yeni oluşan bağların kırılmasını sağlar [20, 41].

Şekil 2.9’da ağ yapıda graft polimerlerde, ışık duyarlı şekil hafıza etkisinin mekanizması şematik olarak gösterilmektedir. Kromoforlar (açık üçgenler) kalıcı polimer ağları (dolu daireler, kalıcı çapraz bağlar) içine eklenmiştir. Foto-tersinir çapraz bağlar (dolu eşkenar dörtgen) uygun dalga boyunda ultraviyole (UV) ışık radyasyonu ile geçici şekil sabitlenmesi esnasında oluşurlar. Toparlanma, ikinci dalga boyunda UV radyasyonu ile gerçekleşir [41].

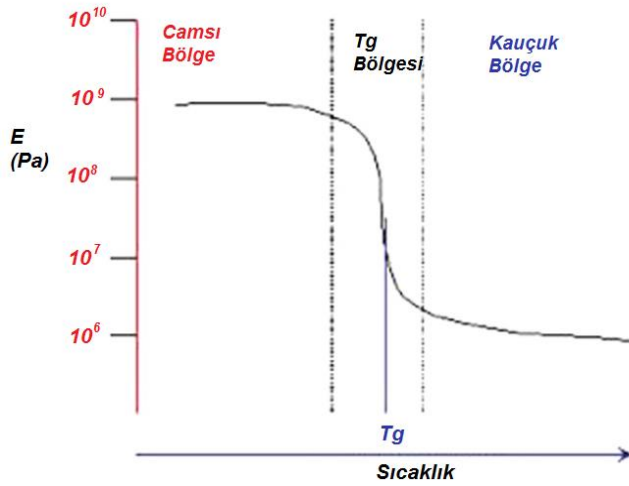


Şekil 2.9. Foto-şekil hafıza etkisi [41]

2.4. Şekil Hafızalı Poliüretan (ŞHPU)

Poliüretan esaslı şekil hafızalı polimer malzemeler yaklaşık 25 yıldır geliştirilmektedir. Bu malzemeler geniş uygulama alanları için eşsiz özellikler sunmaktadırlar. Bunlardan birisi, malzemelerin, camsı geçiş sıcaklığı üzerinde ve altındaki sıcaklıklarda elastiklik modüllerindeki (E) büyük değişimdir. Bu değişim Şekil 2.10'da görülmektedir. Şekil hafıza fonksiyonu şekil değişimini ve şekil tekrarlanmasını sağlamaktadır. T_g sıcaklığının üzerinde malzeme kauçuk hale geçmekte ve her hangi bir şekle kolayca deforme edilebilmektedir. Malzeme T_g sıcaklığı altına soğutulduğunda, deformasyon sabitlenmekte ve şekil kararlı hale gelmektedir. Bu aşamada malzemenin kauçuk elastikliği kaybolmakta ve yapı sertleşmektedir. Ancak malzeme T_g üzerine tekrar ısıtıldığında parça kolayca orijinal şekline toparlanabilmektedir. Bu davranış moleküler yapıya ve hareketliliğine bağlıdır [42].

Şekil hafızalı poliüretan (ŞHPU) serisi, enjeksiyon, ekstüzyon gibi kalıplama yöntemleriyle kolayca şekillendirilebilen ve toparlanma sıcaklığı oda sıcaklığının 50°K altında veya üstünde her hangi bir noktaya ayarlanabilen bu sayede geniş uygulama alanı bulan polimerlerdir. Poliester poliöl serisinden olan ŞHPU'lar yüksek elastik modüle sahipken, polieter poliöl serisinden olan ŞHPU'lar düşük elastik modüle sahiptir [43].



Şekil 2.10. ŞHPU elastiklik modülünün sıcaklıkla değişimi [42]

Gu ve Mather (2012) tarafından poli(ϵ -kaprolakton) (PCL)-diol, poli(etilen glikol) (PEG) ve lizin metil-ester diizosiyanat'tan (LDI) sentezlenen çok bloklu termoplastik poliüretan sentezlenmiştir (Şekil 2.8), oda sıcaklığında plastik deformasyonla yüksek oranda deforme edilmiş (>%800), geçiş sıcaklığı üzerine ısıtıldığında 1 dakika içerisinde ilk şekline toparlandığı belirtilmiştir. Gözlemlenen bu toparlanabilir ve hızlı tepki veren geniş deformasyon malzemeyi kendi kendine bağlanabilen yara dikiş ipliği gibi medikal uygulamalar için uygun olduğunu göstermektedir [44].

Bir diğer çalışmada da, ortodontik uygulamalar için ŞHPU, iki aşamalı süreçle 4,40-metilen bis(fenilizosiyanat), poli(ϵ -kaprolakton)diol (PCL), ve 1,4-bütandiol'dan sentezlenmiştir [45].

3. ŞEKİL HAFIZALI PARÇA UYGULAMALARI

Şekil hafızalı polimerlerin ve onların kompozitlerinin uygulamaları alanlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

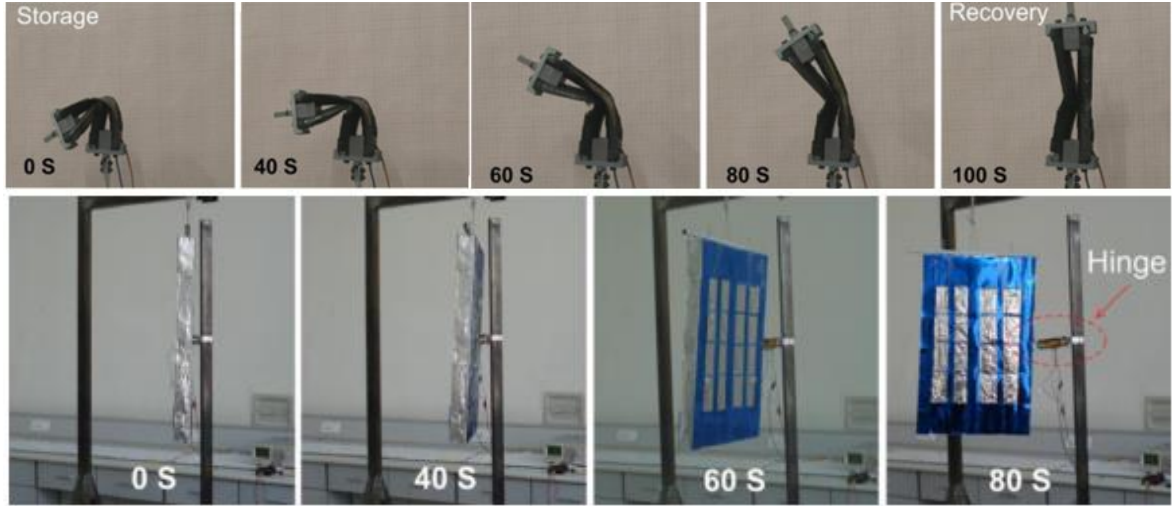
- Taşıtlar –taşıt dinamiğini etkileyen veya taşıtlar üzerindeki aksesuarları kontrol eden parçalar (uzay/havacılık ve otomobil uygulamaları)
- Sağlık (Medikal)
- Geri dönüşüm (kendi kendine montaj/demontaj)

3.1. Taşıt Uygulamaları

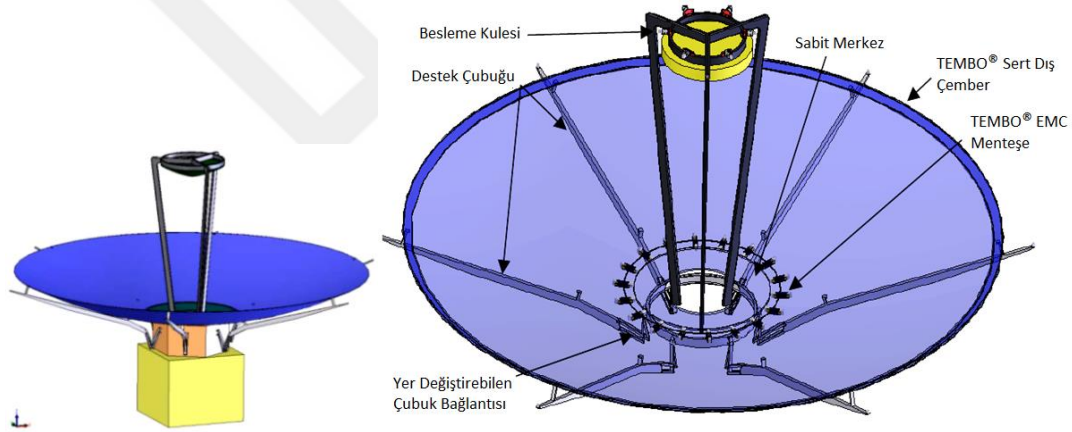
Taşıt uygulamaları başlığı altında ŞHP'lerin uzay araçlarından, uçak ve otomobillere kadar her tür taşıttaki uygulamaları da yer bulmaktadır.

Arzberger ve diğerleri, ticari olarak üretilen ester ve siyanat ester bazlı ŞHP kompozitlerinin uzay ve havacılık uygulamalarına uygunluklarını bazı test etmişlerdir [46]. Makalede hâlihazırda çalışılan bazı uygulamalara yer vermişlerdir. Bunlar; elastik hafızalı kompozit (EHK) menteşe, açılabilir ve akıllı nanosat operasyon uydusu (DINO Sat) açılabilir paneli, RoadRunner güneş paneli, EHK direk (Falcon Sat 3) ve DSX/PowerSail adıyla anılan güçlü ve hafif güneş panelidir [46]. Ayrıca yakın zamanda çalışmayı planladıkları çalışmalar olarak açılabilir optik sistem, açılabilir antenler, açılabilen uzayabilen direk, çok genişleyebilen yapılardan bahsetmişlerdir. Malzeme geliştirme üzerine de, şekil hafızalı polimerlerin nano-kompozitleri, şekil hafızalı köpükler ve ŞHP biyomedikal malzemelere değinmişlerdir [46]. Bir başka menteşe uygulaması şekil hafızalı polistiren (CRG Industries, Veriflex®) ve karbon lifi kumaşıyla hazırlanan kompozitten yapılmıştır (Şekil 3.1) [47].

Şekil 3.2'de Barrett ve diğerlerinin küçük uydular için yaptıkları yeni bir açılabilir yansıtıcı tasarımı görülmektedir [48]. Yansıtıcı hareketi [46] numaralı kaynakta anlatılan menteşelerle sağlanmıştır. Yeni tasarımın özelliği yansıtıcının hareketi için ŞHE özellikli menteşeler kullanılarak, karmaşık mekanizmalardan kaçılmasını dolayısıyla maliyetlerin azaltılmasını sağlamıştır.



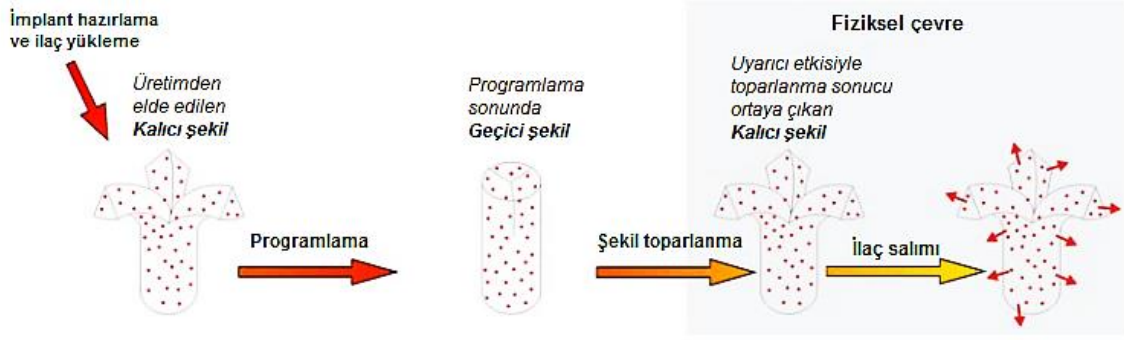
Şekil 3.1. Şekil hafızalı bir menteşe (üst) ve onun güneş paneli uygulaması (alt) [47]



Şekil 3.2. Açılabilen yansıtıcı tasarımı (sol), yansıtıcının detayı (sağ) [48]

3.2. Sağlık Uygulamaları

ŞHP'ler sağlık alanında vücut içi ilaç salım sistemi (Şekil 3.3) [49-51], tıkalı damarların açılması için stent [52-55], hamileliğin önlenmesi amacıyla yumurtalık kanalının kapatılması için parça (coil) [56], yara dikiş ipliği [42], ortodontik tel [45], kateter [57] gibi uygulamalarda yer bulmaktadır.



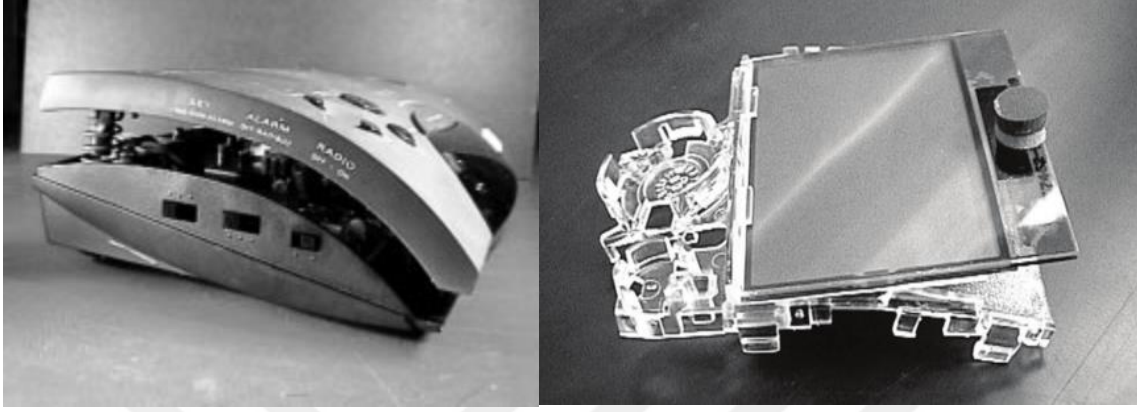
Şekil 3.3. Bir ilaç salım sisteminin şematik açıklaması [58]

3.3. Kendi Kendine Montaj veya Demontaj Uygulamaları

Aktif demontaj, geri dönüşümde ürünlerin daha kolay daha kısa sürede sökülmesini sağlamak üzere geliştirilen bir yöntemdir. Aktif demontajın daha kısa sürede tamamlanması için termoset [59, 60] veya termoplastik ŞHP'lerin ürünlerde cıvata [59, 60], tırnak [61-63] veya kart tutucu [60] veya diğer bağlantı detayları olarak kullanılmalarının geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda farklı ısıtma yöntemleri [59] ısıtma ortamları [59, 61], sıcaklık değerleri [61], vb. gibi parametrelerin sökülme (demontaj) süresine etkileri araştırılmıştır ve çok az sayıda numunelere ihtiyaç duyulduğu için numunelerin hazırlanmasında silikon kalıplama [59, 60] ve talaşlı üretim [61-63] yöntemleri tercih edilmiştir.

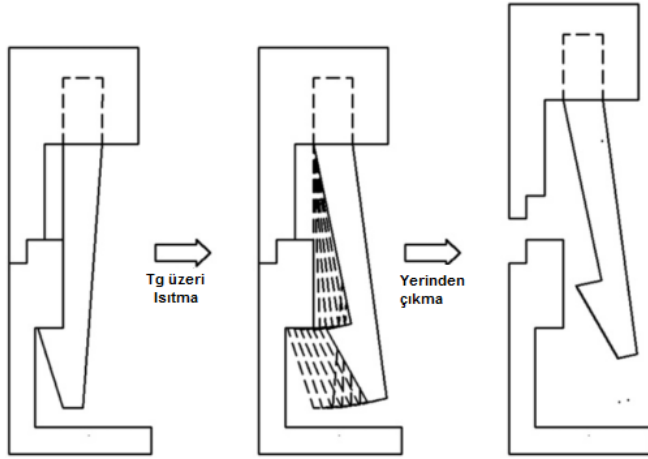
Şekil hafızalı cıvatalar, Chiodo ve diğerleri tarafından ilk adımda silikon kalıplamayla kalıplanmış ve sonrasında hafızalaştırma işlemi yapılmıştır. Bu cıvatalar, müzik çalar (Şekil 3.4), oyun kolu, cep telefonu gibi ürünlerde mevcut cıvatalar yerine kullanılmış ve cıvataların kızılötesi ısıtma ve doğrudan ısıtma (su ortamı) yöntemleriyle telefonlar üzerinden kendi kendilerine sökülme sürelerini araştırmışlardır. Kızılötesi ısıtmanın cıvata sökülmeden önce ürünün diğer kısımlarına zarar verdiği fakat su ortamında ısıtmanın hem daha kısa sürede sonuç verdiği hem de ürünün diğer kısımlarını etkilemediğini rapor edilmiştir [59, 64]. Bu çalışmalarının devamı niteliğindeki bir başka çalışmada, elektronik kart tutucu plastik parça ŞHP'den kalıplanmış ve kartın çok daha kısa sürede kart tutucudan sökülmesi araştırılmıştır (Şekil 3.4). Bu çalışmada da ŞHP numuneler mevcut kart tutucu üzerinden hazırlanan silikon kalıpla kalıplanmışlardır. Elektronik ürün ömrünün sonuna geldiğinde veya değişmesi gerektiğinde, kart tutucunun ısıtılması neticesinde, ilk şekline dönmesiyle karttan ayrılması sağlanmıştır. Kullanılan ŞHP malzemenin T_g 'si 45°C 'dir. Bu

sıcaklığın bir elektronik ürünün çalışma sıcaklığı için düşük bir sıcaklık olduğunu ve bir sonraki çalışmada $T_g = 85^\circ\text{C}$ olan bir ŞHP ile çalışılmasının daha uygun olacağını belirtmişlerdir [60].



Şekil 3.4. Müzik çalarda ŞHP civata uygulaması (sağ) [64] ŞHP kart tutucu (sol) [60]

Carrell ve diğerleri şekil hafızalı termoplastik malzeme kullanarak sıcaklığa duyarlı, kendi kendine sökülebilir tırnak (snap) tasarımı yapmışlar (Şekil 3.5). Tırnağı ticari olarak satılan Veriflex (CRG) ticari adlı termoset levhadan işleyerek üretmişlerdir [61]. Çalışmalarında, yağ ve hava olmak üzere iki farklı ısıtma ortamı kullanmışlar ve ısıtma ortamlarının da etkisini araştırmışlardır. Yağ ortamının daha verimli ısıtma sağladığı sonuçta ifade etmişlerdir. Ortam sıcaklığının da toparlanma süresine etkili olduğu da bu çalışmanın sonuçlarında yer almaktadır. Yüksek sıcaklık çok daha kısa sürede toparlanma sağlamaktadır, özellikle ısı iletimi yüksek bir ortam olursa (yağ gibi) süre saniyenin altına inmektedir [61].

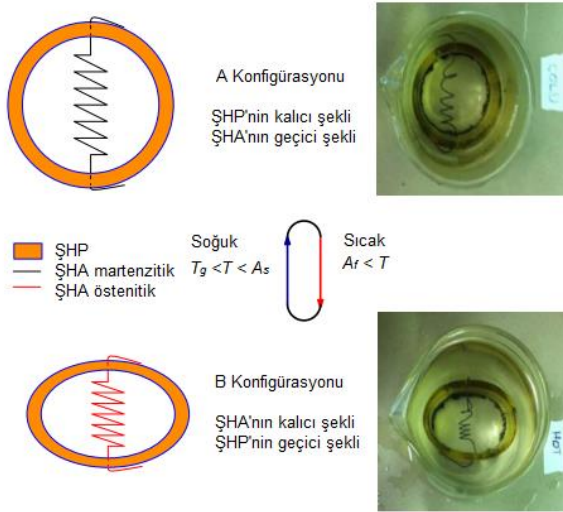


Şekil 3.5. Kendi kendine açılabilir tırnak tasarımı [61]

He ve diğerleri, boşluklu tırnak tasarımı adını verdikleri dış kısmı akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemeden kabuk şeklinde, iç kısmı da ŞHP'den oluşan bir tutma tırnağı tasarlamışlardır. Tırnak üzerinden tasarım parametreleri ve maksimum yer değiştirme ile temas kuvveti arasındaki korelasyonu sonlu elemanlar metodu ile analiz etmişlerdir. Tırnak boyutlarının optimizasyonunu da incelemişlerdir [62].

Li ve diğerleri, içi termoset ŞHP dışı 3 boyutlu yazıcıda hazırlanmış bir tırnak geliştirmişler ve bu tırnağın şekil hafıza etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Tırnağın içine yerleştirilen ŞHP parça ticari olarak satılan bir levhadan, açılmış formda işlenmiş ve hafızalaştırma süreciyle düz hale getirilerek kabuğun içine yerleştirilmiştir. Sonrasında tırnak ısıtılmış ve yeniden bükülmesi sağlanmıştır [62, 63].

Zhang ve diğerleri, ŞHPU içerisine manyetik alana duyarlı demir (III) oksit nano parçacıklar ekleyip karıştırarak farklı hacim kesirlerinde karışımlar hazırlamışlardır. Hazırlanan karışımdan döküm yöntemiyle ürettikleri levhadan talaşlı üretimle tırnaklar hazırlanmış ve bir kutu kapağına sabitlenerek manyetik alan ile tırnağın hareketlenmesini sağlamıştır [65]. Ghosh ve diğerleri, ŞHA ve ŞHP'yi aynı parçada birleştirmişler ve her iki malzemenin şekil hafıza etkilerini kullanarak üç konumlu dikdörtgen parça üretmişlerdir. Her iki malzeme için ortak hafızalaştırma (programlama) sistemi tasarlamışlardır. Bu sistemin, akıllı valfler (Şekil 3.6), akıllı çadırlar, akıllı şemsiyeler gibi yerlerde kullanılabileceğini belirtmişlerdir [66].



Şekil 3.6. Akıllı valf tasarımı [66]

4. PLASTİK ENJEKSİYON KALIPLAMA

Plastik enjeksiyon kalıplama, ergimiş veya yumuşatılmış plastik malzemenin kalıp boşluğuna yüksek basınç altında doldurulması ve kalıp boşluğunun şeklinde katılaştırılması sürecidir. Bir enjeksiyon kalıplama sisteminin temel adımları;

- Kalıbın kapanması
- Ergimiş veya yumuşatılmış plastiğin kalıp boşluğuna enjekte edilmesi
- Plastik soğuyup kalıptan çıkmaya hazır olana kadar kalıbın kapalı tutulması
- Kalıbın açılması ve
- Bitmiş ürünün kalıptan alınmasıdır [67-70].

Herhangi bir malzeme için başarılı bir kalıplama işlemi; malzeme seçimi ve kalıp tasarımı ile birlikte enjeksiyon parametrelerini doğru ayarlamakla mümkündür. Ekonomik bakış açısına göre kalıplamada amaç, her parçanın, yüksek kalitede ve kısa süreli bir kalıplama çevriminde üretilmesidir [68]. Kalıplama çevrimi üç temel aşamada incelenebilir. Bunlar, dolum, ütüleme ve soğutma aşamalarıdır.

1. *Dolum:* Plastik malzemenin sıcaklığı, basınç altında akabileceği bir noktaya kadar yükseltilir. Bu işlemde, enjeksiyon kalıplama presinin silindiri içinde pistonlu vida ile katı granüller her noktada aynı sıcaklık ve viskozite değerine sahip ergiyik haline gelene kadar ısıtılır ve karıştırılır. Bu safhada son olarak, ergitilmiş malzeme basınç altında, şeklini alması istenen kalıp boşluğuna enjekte edilir. Dolum safhasının önemli parametreleri, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon hızı ve dolum süresidir.

2. *Ütüleme:* Kalıp boşluğunun doldurulması sonrasında, malzemedede soğuma nedeniyle çekme meydana gelir. Çekme sonucunda meydana gelen hacim kaybı ütüleme safhasına ekstra malzeme enjekte edilerek tamamlanır. Bu safha ütüleme olarak adlandırılmaktadır. Ütüleme safhasında en önemli parametreler, ütüleme basıncı ve süresidir. Bu safhada basınç ve süre, parçanın boyutsal kararlılığını ve görünüşünü etkileyen parametrelerdir.

3. *Soğutma ve kalıptan çıkartma:* Ütüleme safhası sonrasında, ürün kalıptan çıkma sıcaklığına kadar soğutulur. Herhangi bir enjeksiyon kalıplama çevriminde soğutma süresi

toplam çevrim süresinin %70'ini tutar. Gerçekte soğutma safhası, malzemenin enjeksiyonunun hemen ardından başlar enjeksiyon, ütüleme ve tutma safhalarını kapsar. Son olarak kalıp açılır, sıcaklık ve basınç altında kalıp boşluğu şeklini almış olan parça kalıptan dışarı alınır.

Enjeksiyon kalıplama sürecinde her bir safhanın kontrol edildiği parametreler irdelenecek olursa;

Enjeksiyon basıncı: Enjeksiyon basıncı parametre olarak vida üzerinden plastiğe uygulanan hidrolik basıncı ifade etmektedir ve ergiyik plastiğin kalıp boşluğuna doldurulmasını sağlar. Çevrim süresince ütüleme aşamasına kadar uygulanır.

Enjeksiyon sıcaklığı: Enjeksiyon sıcaklığı enjekte edilmek üzere silindir içerisinde, vida yardımıyla eritilen plastik malzemenin sıcaklığıdır. Bu sıcaklık malzemenin akmasını kolaylaştıracak kadar yüksek olmalıdır ancak malzemenin bozunmasına neden olacak kadar yüksek olmamalıdır. Her bir plastik malzeme için kendine has optimum enjeksiyon sıcaklığı aralığı vardır.

Kalıp sıcaklığı: Kalıp sıcaklığı enjeksiyon kalıp yarımlarının sıcaklığını ifade eder ve çoğunlukla bir soğutma/ısıtma sistemi tarafından ayarlanır. Eğer sıcaklık kalıp üzerinden termokapla doğrudan ölçülmemişse bu değer kalıp şartlandırıcı üzerinden ayarlanan değerdir. Kalıp soğutma sistemi tasarımına göre kalıp üzerinde farklı bölgelerde sıcaklıkta küçük farklılıklar oluşabilir. İdeal olan kalıp sıcaklığının kalıp yarımlarında ve bütün bölgelerinde aynı değerde olmasıdır. Kalıp yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı çarpılmanın ana sebebidir [71, 72].

Ütüleme basıncı ve süresi: Ütüleme basıncı ütüleme safhasında vida üzerinden plastiğe uygulanan basıncı ve süresini ifade etmektedir.

Soğutma süresi: Ütüleme safhasından sonra parçanın kalıptan çıkma sıcaklığına kadar soğutulması için kalıp içinde ek basınç olmaksızın tutulduğu süredir. Bu aşamada kalıp, kalıp şartlandırıcı vasıtasıyla soğutma kanalları üzerinden su veya yağ dolaştırılarak soğutulur.

Enjeksiyon kalıplama sürecinde uygulanan sıcaklık, basınç, süre, hızı ayarlayan parametrelerin kalıplanan parçaların, çekme, çarpılma, mukavemet, ağırlık, kalıntı gerilme vb. gibi özellikleri üzerinde etkili olduğu bu alandaki çalışmaların sonuçlarından bilinmektedir. Bu çalışmada da altı farklı enjeksiyon kalıplama parametresinin şekil hafızalı poliüretandan kalıplanmış parçaların ağırlık, çekme, çarpılma, kalıntı gerilme, şekil programlanma ve şekil toparlanma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu parametreler, enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresidir. Bu bölümün devamında bu parametrelerin ticari, mühendislik veya performans plastiklerinden kalıplanan parça özelliklerine etkileri kısaca özetlenmiştir (Çizelge 4.1).



Çizelge 4.1. Kalıplama parametrelerinin parça özelliklerine etkileri [1]

Kalıplama Parametresi	Çekme, çarpılma veya kalıntı gerilmeye etkisi
Ütüleme basıncı	Yüksek ütüleme basıncında çekme düşer [73-77]. Yüksek ütüleme basıncında çift kırınım düşer [78, 79]. Çarpılma üzerindeki en etkili parametredir [80-84]. Çökme izleri üzerindeki en etkili parametredir [85, 86]. Kalıp gözü basıncı, parça kalitesini belirler [87]. Ütüleme basıncının etkisi katılan lif oranıyla düşer [71]. Ütüleme basıncı kalıbın elastik deformasyonundan etkilenir [88, 89] Ütüleme basıncı arttıkça; YYPE parçadaki kalıntı gerilmeler düşmekte, PP parçaların çekme dayanımı artmaktadır [90].
Enjeksiyon sıcaklığı	Yüksek enjeksiyon sıcaklığında, kalıntı gerilme düşer [91]. Yüksek enjeksiyon sıcaklığında, çekme düşer [76]. Çökme izi derinliği üzerinde ikinci önemli faktör[85] . Kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili ikinci parametredir. Enjeksiyon sıcaklığı arttıkça kalıntı gerilmeler düşer [90].
Kalıp sıcaklığı	Yüksek kalıp sıcaklığında, kalıntı gerilme düşer [91-93]. Özellikle yüzeyde ve çekirdekteki kalıntı gerilmeler üzerinde ikinci etkili kalıplama parametresi [93]. Yüksek kalıp sıcaklığında, çekme düşer [74]. Yüksek kalıp sıcaklığında, yüzeyde çekme kalıntı gerilmesi artar [94]. Çarpılma üzerindeki ikinci etkili faktör [80, 95]. Kalıp yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı çarpılmanın ana sebebidir [71, 72].
Enjeksiyon hızı	Düşük enjeksiyon hızında çekme gerilmesi oluşur [91]. Yüksek akış hızında basma gerilmesi oluşur [91]. Yüksek akış hızında, toplam basma gerilmesi azalır [91].
Ütüleme süresi	Uzun ütüleme süresinde çekme oranı azalır [96]. Çekme üzerindeki en önemli parametredir [83]. Yüzeydeki kalıntı gerilmeler üzerinde etkilidir [93].
Soğutma süresi	Uzun soğutma süresinde, çarpılma azalır [82, 97]. Soğutma hızı kalıntı gerilmelerin oluşumunda en etkin faktördür [98-103]. Soğutma süresi kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili parametredir. Uzun soğutma süresinde kalıntı gerilmeler YYPE parçalarda azalmış, kısa soğutma süresinde PP parça yüzeyinde basma kalıntı gerilmesi oluşmuştur [90].
Enjeksiyon basıncı	PS parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili kalıplama parametresidir. Enjeksiyon basıncı arttıkça kalıntı gerilme artar [93].

5. MATERYAL VE METOT

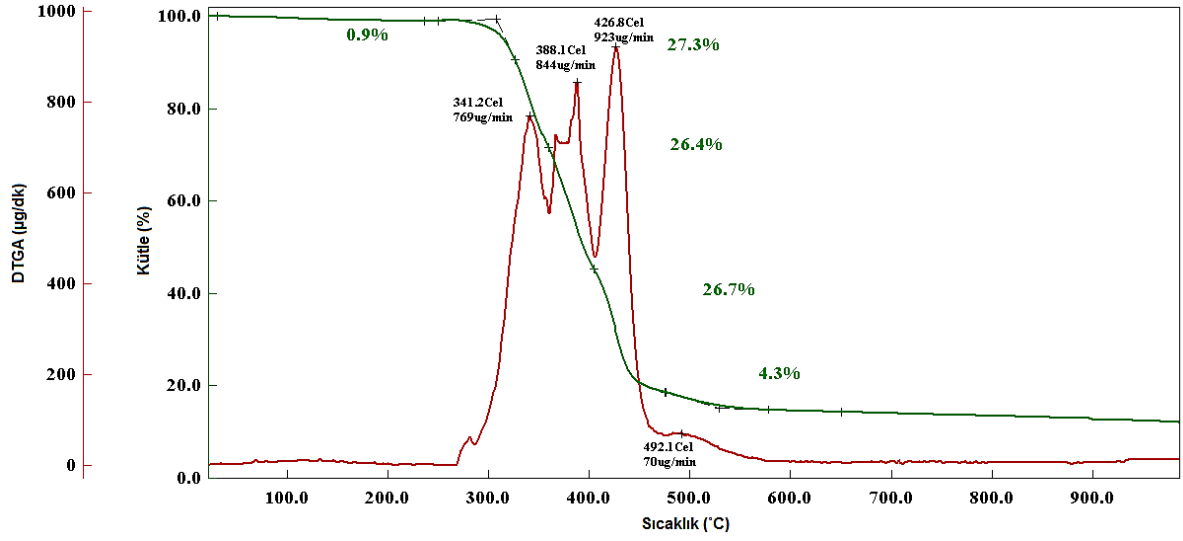
5.1. Hammadde ve Özellikleri

Bu doktora tez çalışmasında SMP Technologies Inc. (Japonya)'den temin edilen enjeksiyonla kalıplamayla şekillendirilmeye uygun, termoplastik şekil hafızalı poliüretan (ŞHPU), Diaplex MM 4520 (Eter tip) kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Üretici firmanın belirttiği malzeme özelliklerini doğrulamak için malzemeye Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC), Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Ergime Akış İndeksi (EAI) testleri yapılmıştır. TGA ve DSC grafikleri malzemenin beklenen özelliklere sahip olduğunu ispat etmiştir (Şekil 5.1 ve 5.2). Şekil 5.1'de verilen TGA grafiği malzemenin 240°C'de bozunmaya başladığını, bu sıcaklığa kadar olan %0,9'luk kütle kaybının malzemedeki nemin uzaklaşmasından kaynaklandığını göstermektedir. Yaklaşık 650°C'de malzemenin kütle kaybı durmuş ve geriye %14,4 kül kalmıştır.

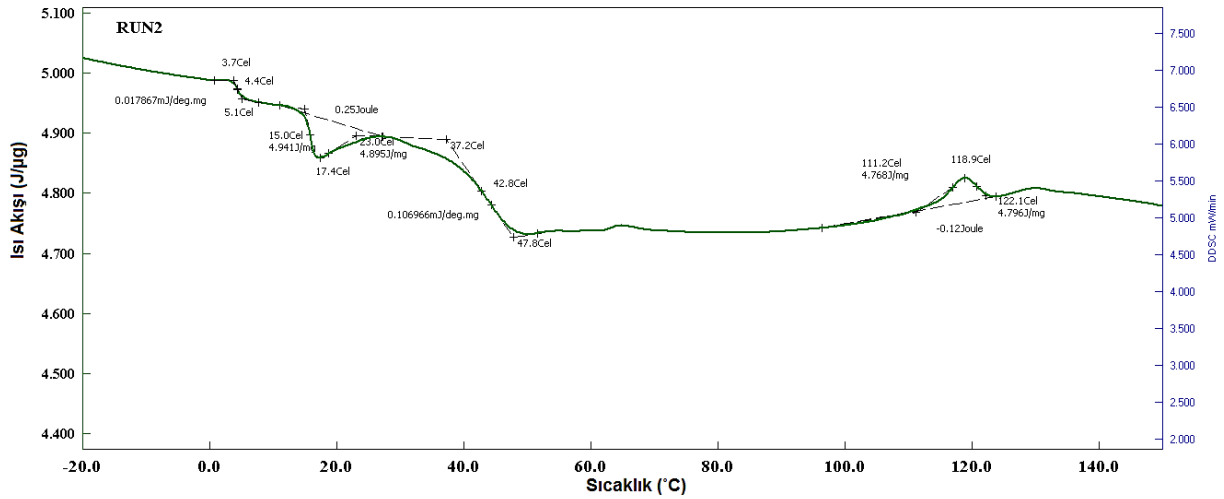
Çizelge 5.1. Şekil hafızalı poliüretanın özellikleri

Özellikler	Birim	Camsı Bölge	Kauçuk Bölge
Sertlik	H _D D	76	30
Çekme Dayanımı	MPa	55	10
Uzama	%	30-50	>600
Elastiklik Modülü	MPa	2150	-
Bükülme Dayanımı	MPa	80	-
Özkütle	gr/cm ³		1,25
Poisson Oranı	-		0,5
T _g	°C		45
EAI (200°C, 5.00 kg)	g/10dak		48

Şekil 5.2'de görülen DSC grafiğinde 15,0°C (T_{g1}) ve 42,8°C (T_{g2})'da iki camsı geçiş sıcaklığı (T_{g1} ve T_{g2}) görülmektedir. Bunlar malzemenin iki fazlı yapısıyla örtüşmektedir. T_{g1} yapıdaki kauçuk fazın oda sıcaklığı altındaki yumuşama sıcaklığı iken, T_{g2} yapıdaki camsı fazın yumuşama sıcaklığını göstermektedir. T_{g2} sıcaklığı aynı zamanda şekil hafıza etkisinin aktifleşmesi için gerekli sıcaklıktır. 118,9°C de erimeden önce kristalleşme oluşmaktadır ve bu kristalleşme sıcaklığıdır (T_c).



Şekil 5.1. Diaplex MM4520 ŞHPU malzemenin TGA grafiği



Şekil 5.2. Diaplex MM4520 ŞHPU malzemenin DSC grafiği

5.2. Deney Tasarımı

Enjeksiyon kalıplama şartlarının termoplastik ŞHPU malzemeden kalıplanmış parçaların şekil toparlanma kabiliyetine ve kalıntı gerilmelerine etkilerinin anlaşılması için altı kalıplama parametresi ve bunları üzer seviyesi deney faktörleri olarak seçilmiştir. Bu parametreler; enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı (nozul sıcaklığı), kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresidir. Kalıplama parametrelerinin seviyeleri, malzeme üreticisinin önerileri ve yapılan ön testlerin sonuçlarına göre belirlenmiştir. Ütüleme ve soğutma süreleri kalıplanacak numune kalınlığına bağlı olarak, Eşitlik 5.1, 5.2

ve 5.3 kullanılarak hesaplanmıştır [69]. Kalıplama şartları ve bunların seviyeleri Çizelge 5.2’de sunulmuştur. Altı faktör ve bunların üçer seviyesi için Taguchi’nin L27 ortogonal dağılım deney tasarımı uygulanmıştır (Çizelge 5.3). Ütöleme basıncı, enjeksiyon sıcaklığının bir fonksiyonu olarak uygulanmıştır. Çizelge 5.3’te her bir satırdaki enjeksiyon basıncı değeri, aynı satırdaki ütöleme basıncı yüzde oranı ile çarpılarak enjeksiyon presine girilecek ütöleme basıncı değeri hesaplanmıştır.

$$t_{kn} = d(1+2d) \quad (5.1)$$

$$t_n = 0,3 t_{kn} \quad (5.2)$$

$$t_k = 0,7 t_{kn} \quad (5.3)$$

Çizelge 5.2. Deney şartları tablosu

Faktörler	Seviyeler		
(A) Enjeksiyon basıncı (bar)	500	600	700
(B) Enjeksiyon sıcaklığı (°C)	195	200	205
(C) Kalıp sıcaklığı (°C)	30	35	40
(D) Ütöleme basıncı (bar)	A*%40	A*%50	A*%60
(E) Ütöleme süresi (s)	6	9	12
(F) Soğutma süresi (s)	15	22,5	30

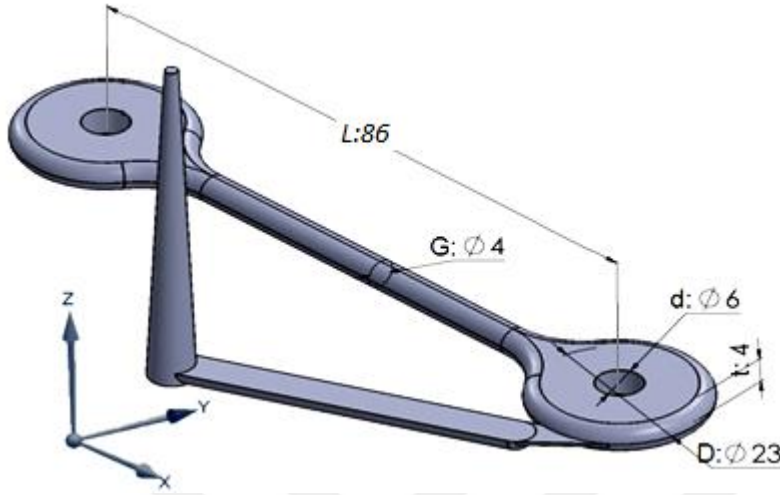
Çizelge 5.3. Taguchi L27 (ortogonal dağılım) deney tasarımı

No	A	B	C	D	E	F
L1	500	195	30	%40	6	15
L2	500	195	30	%40	9	22,5
L3	500	195	30	%40	12	30
L4	500	200	35	%50	6	15
L5	500	200	35	%50	9	22,5
L6	500	200	35	%50	12	30
L7	500	205	40	%60	6	15
L8	500	205	40	%60	9	22,5
L9	500	205	40	%60	12	30
L10	600	195	35	%60	6	22,5
L11	600	195	35	%60	9	30
L12	600	195	35	%60	12	15
L13	600	200	40	%40	6	22,5
L14	600	200	40	%40	9	30
L15	600	200	40	%40	12	15
L16	600	205	30	%50	6	22,5
L17	600	205	30	%50	9	30
L18	600	205	30	%50	12	15
L19	700	195	40	%50	9	30
L20	700	195	40	%50	9	15
L21	700	195	40	%50	12	22,5
L22	700	200	30	%60	6	30
L23	700	200	30	%60	9	15
L24	700	200	30	%60	12	22,5
L25	700	205	35	%40	6	30
L26	700	205	35	%40	9	15
L27	700	205	35	%40	12	22,5

5.3. Numunelerinin Kalıplanması

Parçaların şekil toparlanma kabiliyetlerinin belirlenmesi için kopma olmaksızın çekme testi (uzama-toparlanma) uygulanmıştır. Şekil 5.3'te yolluk ve dağıtıcı tasarımıyla birlikte gösterilen ve ölçüleri verilen parça, Gazi Üniversitesi, Prof. Dr. Süleyman Sarıtaş Toz Metalürjisi Laboratuvarı'nda bulunan (Şekil 5.4) ve Çizelge 5.4'te özellikleri verilmiş olan Arburg Allrounder 220s (250-60) (Almanya) enjeksiyon kalıplama presi kullanılarak kalıplanmıştır. Çizelge 5.3'ün her bir satır satırındaki değerler enjeksiyon presi elektronik kontrol paneline tanımlanmış ve her satır 8 kez tekrarlanarak şekil hafıza etkisi test ve kalıntı gerilme ölçüm numuneleri üretilmiştir. Toplamda $8 \times 27 = 216$ parça kalıplanmıştır. Bütün parçalar boyut, ağırlık ve çarpılma ölçümlerinde kullanılmıştır. Bunlardan 3 adedi şekil

hafıza testlerinde, 3 adedi kalıntı gerilme testlerinde kullanılmıştır. ŞHPU malzeme kalıplanmadan önce 60°C’de 4 saat etüvde kurutulma işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.3. Numune, yolluk ve dağıtıcı tasarımı ve ölçüleri



Şekil 5.4. Enjeksiyon kalıplama presi

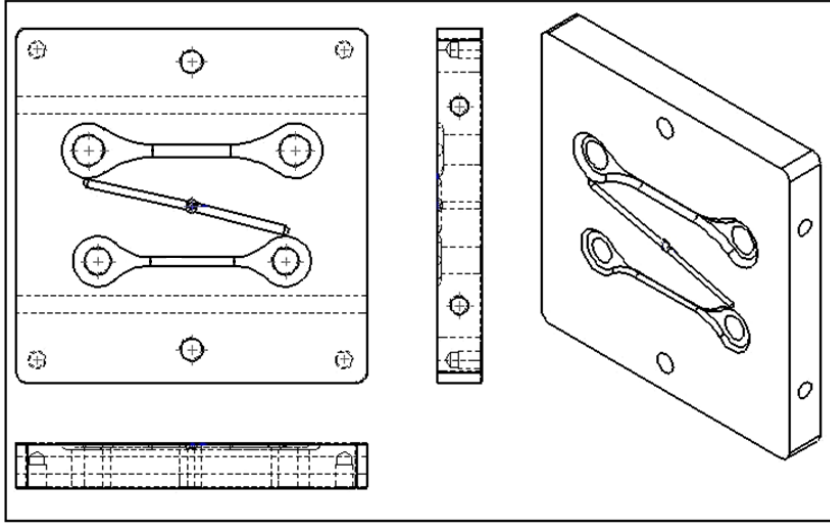
Çizelge 5.4. Enjeksiyon kalıplama presinin özellikleri

Özellikler	Birim	Değerler
Hidrolik Yağ	Lt	120
Makine net ağırlığı	kg	1900
Mengene kilitleme kuvveti	kN	250
Mengene kapama kuvveti	kN	20
Mengene açılma kuvveti	kN	14
En büyük mengene açılma mesafesi	mm	275
En küçük mengene kapanma mesafesi	mm	150
Mengene ebatları	mm	400x400
Kolon genişlikleri	mm	221x211
Hareketli mengene taşıma kapasitesi	kg	300
Hidrolik pompa motoru	kW	5,5
Vida uzunluğu	L/D	24,5
Vida Çapı	mm	18
En yüksek enjeksiyon basıncı	bar	2500
En yüksek vida kursu	mm	80
En yüksek baskı hacmi	cm ³	20
En yüksek enjeksiyon ağırlığı	g/PS	17
En yüksek vida torku	Nm	147
Vida dairesel hızı	m/d	27
Silindir ısıtma	W	1250+2x3
Besleme hunisi kapasitesi	lt	25

Kalıplama süresince sabit sıcaklığın korunabilmesi ve istenen kalıplama sıcaklığının sağlanabilmesi için Çizelge 5.5'te özellikleri verilen kalıp şartlandırıcı (TOOL-TEMP TT-157E) kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 5.5'te enjeksiyon kalıbının soğutma sistemi görülmektedir.

Çizelge 5.5. Kalıp şartlandırıcının özellikleri

Model	Birim	TT-157 E
Isıtma aralığı	°C	Su ile en çok 90, Yağ ile en çok 150
Isıtma kapasitesi	kW	Su ile 9, Yağ ile 3-9
Pompa gücü	kW	9
Basınç	Bar	4
Debi	lt/dk	75
Depo	lt	6



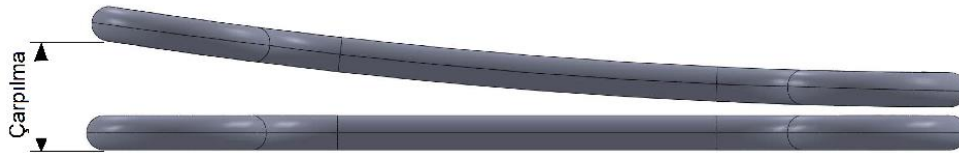
Şekil 5.5. Kalıp yerleşim planı

5.4. Boyut, Çarpılma ve Ağırlık Ölçümleri

Kalıplanan numunelerin kalıptan alındıktan 24 saat sonra uzunluk ($L=80$ mm), girişe yakın dış çap ($D=23$ mm), girişe yakın delik çapı ($d=6$ mm), kalınlık ($t=4$ mm) ve uzama bölgesi çapı ($G=4$ mm) (Şekil 5.3) ölçülmüştür. Yüzde çekme oranı değerleri Eşitlik 5.4 ile her bir ölçü için hesaplanmıştır. Çekme oranları X, Y ve Z eksenlerine göre sınıflandırılmıştır (Şekil 5.3). L, d ve D ölçüsü X eksenindeki çekme, d ve D ölçüsü Y eksenindeki çekme, G ve t ölçüleri de Z eksenindeki çekme oranını göstermektedir.

$$\text{Yüzde çekme oranı} = \frac{\text{anma ölçüsü} - \text{gerçek ölçü}}{\text{anma ölçüsü}} \times 100 \quad (5.4)$$

Boyut ve çarpılma ölçümleri 0,001 mm, ağırlıklar 0,001 g hassasiyetinde ölçülmüş ve tartılmıştır. Çarpılma Şekil 5.6'da gösterilen noktalardan ölçülmüştür.



Şekil 5.6. Parçalardaki çarpılmanın şematik gösterimi

5.5. Şekil Hafıza Testleri

Şekil hafıza testi, şematik olarak Şekil 5.7’de açıklanmıştır. Birinci adımda, çekme çubuğu şeklindeki parça, sıcaklık kontrol kabinli çekme test cihazı (Instron 5982, Illinois, ABD) (Şekil 5.8) çeneleri arasına bağlanmış ve parça sıcaklığı kabin sıcaklığıyla (55°C) dengeye gelene kadar 2 dakika beklenmiştir. İkinci adımda, numune 10 mm/dak hızla eksenler arası mesafenin ($L=80$ mm) %25’i oranında (20 mm) çekilerek uzatılmıştır. Parça uzatılmış halde cihaz çeneleri arasında tutulurken sıcaklık kontrollü kabin açılmış ve uzaklaştırılmıştır. Parçanın ortam sıcaklığına ($\sim 23^\circ\text{C}$) kadar soğuması beklenmiştir. Parça soğuduktan sonra, cihaz çeneleri arasından çıkartılmış ve parçadaki uzamayı tespit için L boyu ölçülmüştür (L_{II}). Üçüncü adımda, uzatılmış numuneler 60°C ’ye ısıtılmış etüv fırınına konulmuş ve 40 dakika sonunda fırından çıkartılmıştır. Numunelerdeki toparlanmayı tespit için yeniden L boyu ölçülmüştür (L_{III}).

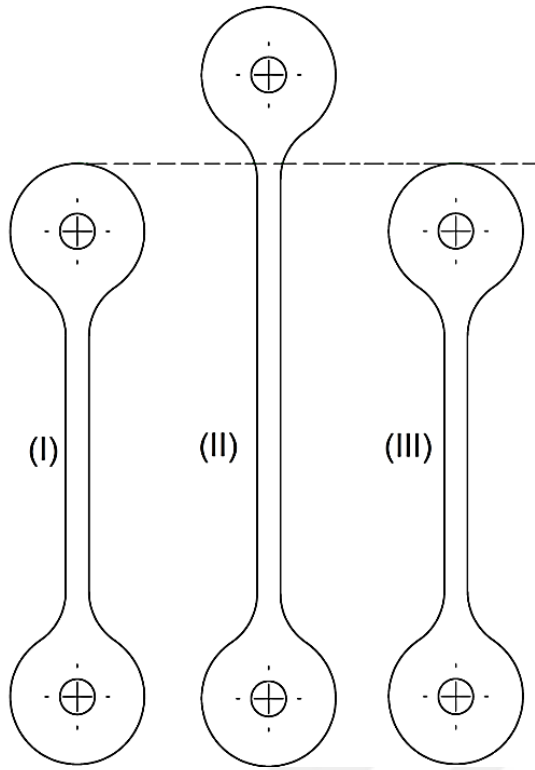
Her bir aşamada ölçülen L boyları üzerinden kalıcı şekil kararlılığı, programlanma oranı ve toparlanma oranı değerleri yüzde olarak hesaplanmıştır. Bu formüller sırasıyla Eşitlik 5.5, 5.6 ve 5.7’de verilmiştir.

$$\text{Kalıcı şekil kararlılığı} = \frac{L_I}{L} \times 100 \quad (5.5)$$

$$\text{Programlanma Oranı} = \frac{L_{II}-L_I}{20} \times 100 \quad (5.6)$$

$$\text{Toparlanma Oranı} = \left(\frac{(L_{III}-L_I)}{L_I} \times 100 \right) + 100 \quad (5.7)$$

L ; kalıpta parçanın eksenler arası ölçüsü, L_I ; kalıptan çıkartılan parçanın eksenler arası ölçüsü, L_{II} ; programlanmış parçanın eksenler arası ölçüsü, 20 mm; programlamada uygulanan çekme miktarı, L_{III} ; toparlanmış parçanın eksenler arası ölçüsüdür.



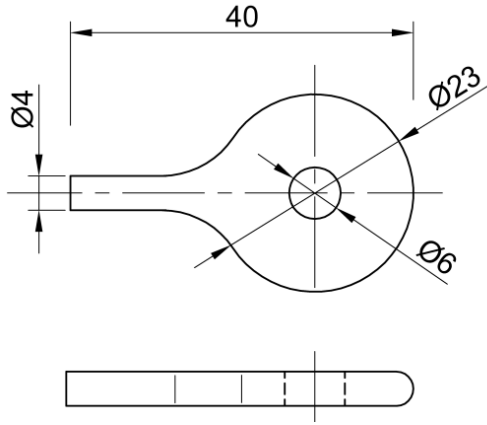
Şekil 5.7. Şekil hafıza test aşamalarının şematik gösterimi; (I) kalıptan alınan parça, (II) programlama sonundaki parça, (III) toparlanma sonundaki parça



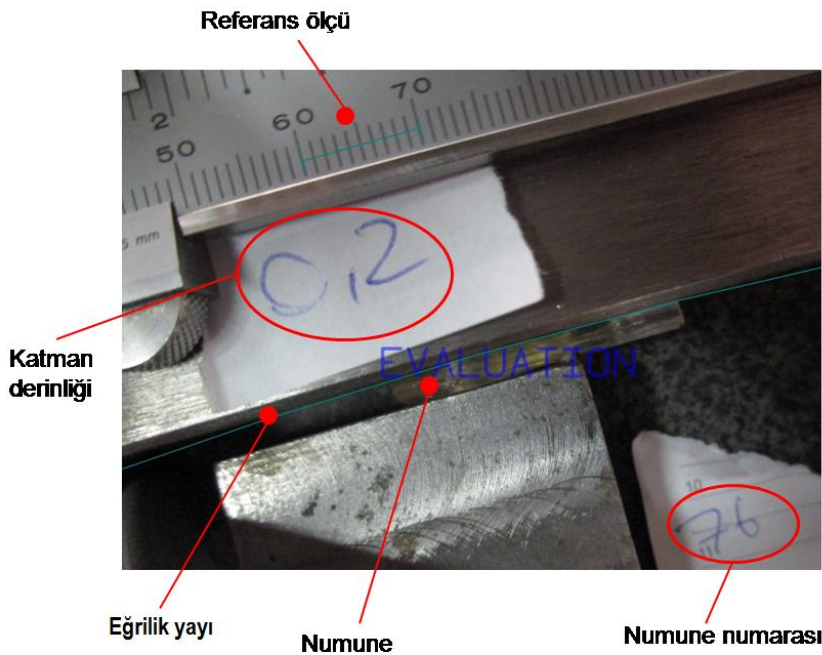
Şekil 5.8. Sıcaklık kontrollü çekme test cihazı

5.6. Kalıntı Gerilme Ölçümleri

Kalıntı gerilme ölçümleri için kalıplanmış numuneler Şekil 5.9’da gösterildiği boyutlarda kesilmiş ve ölçümler katman kaldırma metoduyla yapılmıştır. Bu yöntemde numunelerin üst yüzeyinden başlanarak 0,2 mm derinliğinde tabakalar halinde, kalınlık yönünde orta düzleme kadar, üniversal freze tezgâhında 7 mm çapında HSS parmak freze kesici kullanılarak, 56 mm/dak kesme hızı ve 750 dev/dak dönme hızıyla katmanlar kaldırılmıştır. Her bir tabaka kaldırma işleminden sonra parçalarda meydana gelen eğilme, Şekil 5.10’da açıklanan sistem ve Bell Photonic® mikroskop yazılımı kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 5.9. Kalıntı gerilme ölçüm numunesi ve ölçüleri



Şekil 5.10. Parçalardaki eğriliğin ölçülmesi



6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil hafızalı termoplastik poliüretandan enjeksiyonla kalıplanmış numunelerin boyut, çarpılma, şekil hafıza etkisi ve kalıntı gerilme ölçüm sonuçları, JMP paket programı yardımıyla Taguchi deney tasarımı üzerinden varyans analizi (ANOVA) ve ana etki testiyle çözümlenmiştir.

ANOVA tablolarında P değeri; olasılığı, F değeri; F testini ve % değeri; parametrelerin sonuçlar üzerindeki yüzde etkilerini ifade etmektedir. Bu çalışmada, $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyi seçilmiştir. Kritik F değeri $\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyi, 2 faktör serbestlik derecesi ve 26 toplam serbestlik derecesi için F değeri standart tablolarından 3,37 olarak okunmuştur (Ek 1). F testi değerlendirmesinde, faktörün (parametre) hesaplanan F değeri, kritik F değerinden yüksekse, bu parametrenin etkisinin diğerlerinden farklı ve istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. % sütununda, parametrelerin sonuçlara yüzde etkileri kareler toplamı üzerinden hesaplanmıştır. ANOVA tablolarının en sol sütununda etkisi araştırılan parametreler sıralanmıştır. Bunlar, A: Enjeksiyon basıncı, B: Enjeksiyon sıcaklığı, C: Kalıp Sıcaklığı, D: Ütuleme basıncı, E: Ütuleme süresi ve F: Soğutma süresidir. Sonuçlar, çekme oranı, çarpılma, ağırlık, şekil hafıza etkisi testi ve kalıntı gerilmeler başlıkları altında ayrı ayrı irdelenmiştir.

Literatürdeki şekil hafızalı polimerler üzerine yapılmış benzer çalışmalar sınırlı olduğu için sonuçlar çoğunlukla ticari, mühendislik veya performans plastikleriyle yapılmış benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır.

6.1. Çekme Oranı

Kalıplanan numunelerin beş farklı boyutu ölçülmüş ve anma değerleriyle aradaki fark üzerinden kalıp dışı yüzde çekme oranları hesaplanmıştır. Çizelge 6.1’de parçanın X, Y ve Z eksenleri doğrultusunda, beş ölçü üzerinden hesaplanan yüzde çekme oranlarının ANOVA sonuçları verilmiştir. Sırasıyla soğutma süresi (F: 37,55; 32,63), kalıp sıcaklığı (F: 5,08; 4,78) ve ütuleme süresi (F: 4,36; 3,5) parçanın X ve Y eksenleri (boy ve en) yönündeki çekme oranları üzerinde etkili bulunmuştur. Z yönündeki (kalınlık) çekme oranları üzerinde

de enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon sıcaklığının etkileri, sırasıyla 22,2 ve 7,25 F değerleriyle anlamlı bulunmuştur.

Çizelge 6.1. Çekme oranı varyans analizi sonuçları

Faktör	SD	X (L, d, D)					Y (d, D)					Z (G, t)				
		F _c	KT	KO	F	P	%	KT	KO	F	P	%	KT	KO	F	P
A	2		0,102	0,051	0,927	0,419	1,62	0,234	0,117	1,063	0,372	2,09	7,815	3,908	22,194	0,000
B	2		0,040	0,020	0,361	0,703	0,63	0,092	0,046	0,417	0,667	0,82	2,553	1,277	7,250	0,007
C	2		0,559	0,279	5,082	0,022	8,92	1,052	0,526	4,778	0,026	9,41	0,508	0,254	1,442	0,269
D	2		0,184	0,092	1,675	0,223	2,93	0,306	0,153	1,388	0,282	2,73	0,217	0,109	0,617	0,553
E	2		0,480	0,240	4,362	0,034	7,66	0,772	0,386	3,508	0,038	6,90	0,395	0,198	1,122	0,353
F	2		4,129	2,064	37,547	0,000	65,92	7,181	3,591	32,629	0,000	64,24	0,201	0,100	0,570	0,578
Kalıntı	14		0,770	0,055			12,29	1,541	0,110	0,000		13,78	2,465	0,176	0,002	17,41
Hata																
Toplam	26		6,263					11,177					14,155			

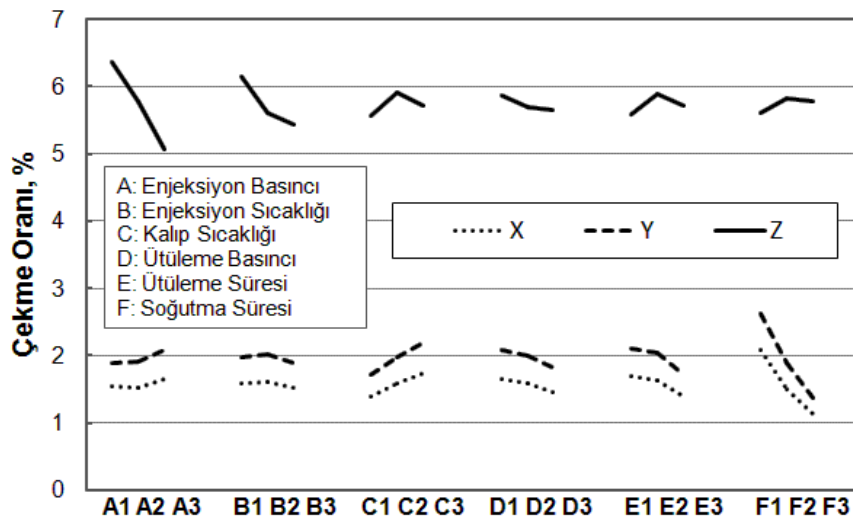
KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalaması, SD: Serbestlik Derecesi, F_c: Kritik F değeri ($\alpha=0,05$), F: F testi, P: Olasılık

A: Enjeksiyon Basıncı, B: Enjeksiyon Sıcaklığı, C: Kalıp Sıcaklığı, D: Ütülme Basıncı, E: Ütülme Süresi, F: Soğutma Süresi, L: Ekserler arası mesafe, d: Delik çapı, D: Dış çap, G: Uzama bölgesi çapı, t: Kalınlık

Şekil 6.1, çekme oranı ana etki grafikleriyle parametrelerin her bir ölçü üzerindeki etkisinin yönünü göstermektedir. Grafiğin dikey ekseninde parçada oluşan yüzde çekme oranı, yatay ekseninde de parametreler ve seviyeleri girilmiştir. Her eksen farklı çizgi tipiyle tanımlanmıştır. Eksenlere göre ortalama çekme oranları; X ekseninde (boy yönü) %1,5; Y ekseninde (en yönü) %2,0 ve Z ekseninde (kalınlık yönü) %5,8 olarak bulunmuştur.

Parametrelerin etkileri X ve Y (boy ve en) yönlerinde paralellik göstermiştir. Soğutma süresinin (F) artırılmasıyla yüzde çekme oranı azalmıştır. Benzer etki ütüleme süresinde (E) de görülmektedir. Fakat özellikle yüksek seviye ütüleme süresinde çekme oranı diğer seviyelere oranla daha düşük gerçekleşmiştir. Kalıp sıcaklığının (C) etkisi ise bundan ters yönde olmuştur; kalıp sıcaklığın artırılmasıyla çekme oranları artmıştır. Z yönünde (kalınlık), etkili olan enjeksiyon basıncı (A) ve enjeksiyon sıcaklığı (B) arttıkça çekme oranı azalmıştır.

Bu çalışmada enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı parametrelerinin sadece kalınlık yönünde etkili olması, parça kalınlığının (4 mm) bir etkisi olabilir. Normalde daha yüksek çekme oranı beklenen boy yönünde, daha düşük çekme oranı oluşmasının sebebi parçanın ortasındaki pimlerin kısıtlaması olarak görülmüştür. Uzun ütüleme ve soğutma süreleri neticesinde parçanın kalıptan çıkma sıcaklığı düşmekte ve kalıplama sonrasında çekme miktarı azalmaktadır. Bu teori kalıp sıcaklığı arttıkça çekme oranının azalmasıyla da örtüşmektedir.



Şekil 6.1. Çekme oranı ana etki grafikleri

Jansen ve diğerleri, ABS, polistiren (PS), polikarbonat (PC) ve yüksek darbe dayanımlı PS parçalardaki çekmenin yüksek enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme basıncıyla azaldığını ifade etmişlerdir [76]. Kurt ve diğerleri de ABS parçalarda yüksek kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon basıncında ABS parçalarda çekmenin azaldığını belirtmişlerdir [74]. Lu ve Khim, polikarbonat (PC) malzemeden üretilmiş optik lensler üzerinde süreç şartlarının etkilerini araştırdıkları bir çalışmada kalıp sıcaklığının lenslerdeki yüzey formu hatalarının %34 oranında arttırdığını saptamışlardır. Kalıp sıcaklığının bu etkisine sebep olarak, kalıp sıcaklığına bağlı değişen çekme ve basma gerilme değerlerini göstermişlerdir [104]. Bir diğer çalışmada da ütüleme basıncının ve enjeksiyon sıcaklığının ABS parçalardaki çökme izi derinliği üzerinde etkili parametreler oldukları Mathivanan ve Parthasarathy tarafından rapor edilmiştir [85]. Zhilt'sova ve diğerleri, YYPE numunelerin ölçüsel kararlılığı üzerinde en etkili kalıplama şartının ütüleme basıncı olduğunu ve ütüleme basıncının artışı ile ölçüsel kararlılığın arttığını ifade etmişlerdir [105].

Yapılan çalışmada, ŞHPU plastiklerle literatürdeki diğer plastiklerin kalıplamadaki enjeksiyon sıcaklığının etkileri Jansen ve diğerlerinin [76] sonuçlarıyla benzeşmektedir. Kurt ve diğerlerinin [74] bulgularına benzer olarak enjeksiyon basıncının artırılması çalışmamızdaki ŞHPU parçalardaki çekmeyi artırmıştır. Ancak kalıp sıcaklığının etkisi bu çalışmanın sonuçlarıyla örtüşmemektedir. Fakat kalıp sıcaklığının ŞHPU parçalardaki çekmeye etkisi Lu ve Khim'in [104] çalışmalarındaki sonuca benzerlik göstermiştir. Yüksek kalıp sıcaklığında parça, malzemenin aktifleşme sıcaklığı olan T_g 'ye yakın sıcaklıktayken kalıptan çıkarılması bu sonucun sebebi olabilir. Önceki çalışmalarda [85] ütüleme basıncı çekme üzerinde etkili bulunmuş olmasına rağmen ŞHPU parçalarda ütüleme süresi etkili bulunmuştur. Bunun sebebi bu çalışmada uygulanan ütüleme basınçlarının yüksek olmaması ve enjeksiyon basıncına bağlı olarak 200 bar ve 420 bar aralığında değişmesi olabilir.

6.2. Çarpılma Sonuçları

Çizelge 6.2'de enjeksiyonla kalıplanmış numunelerin çarpılma değerleri üzerinden hesaplanmış varyans analizi sonuçları görülmektedir. F testi değerlendirmesine göre soğutma süresi ($F=6,69$) ve enjeksiyon basıncı ($F=6$) faktörlerinin etkileri diğerlerinden farklı ve istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu etkilerin yönleri Şekil 6.2'de çarpılma ana etki grafikleriyle ortaya konulmuştur.

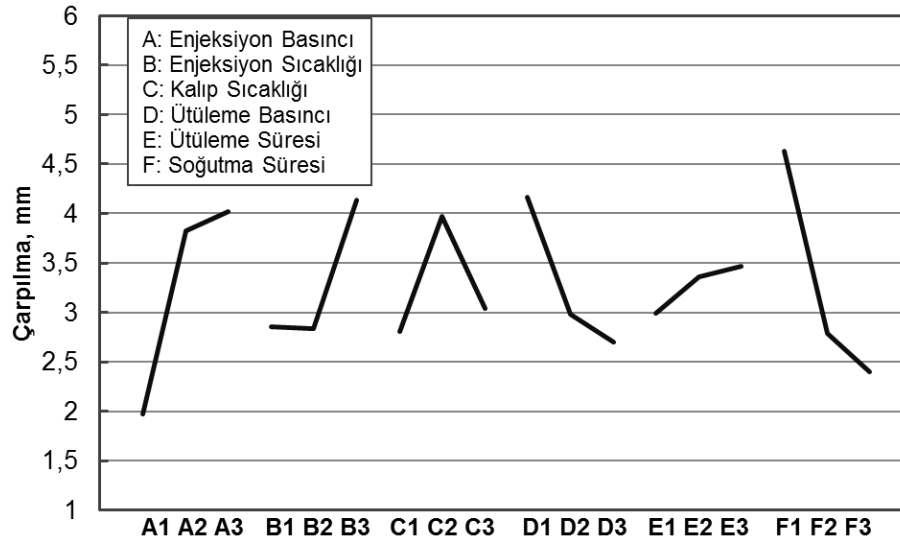
Çizelge 6.2. Çarpılma sonuçları varyans analizi tablosu

Faktör	SD	Fc	KT	KO	F	P	%
Enjeksiyon Basıncı	2	3,37	23,12	11,56	6,0	0,013	22,03
Enjeksiyon Sıcaklığı	2		9,98	4,99	2,59	0,11	9,51
Kalıp Sıcaklığı	2		6,85	3,43	1,78	0,205	6,52
Ütuleme Basıncı	2		11,12	5,56	2,89	0,089	10,59
Ütuleme Süresi	2		1,13	0,56	0,29	0,751	1,07
Soğutma Süresi	2		25,77	12,88	6,69	0,009	24,55
Kalıntı Hata	14		26,96	1,93			25,69
Toplam	26		104,93				

KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalaması, SD: Serbestlik Derecesi, Fc: Kritik F değeri ($\alpha=0,05$)

F: F testi, P: Olasılık

Şekil 6.2 faktörler ve onların seviyeleri için numunelerde gerçekleşen çarpılma değerlerini göstermektedir. Grafiklerden parçalardaki ortalama çarpılma değerinin 3,3 mm olduğu anlaşılmaktadır. Enjeksiyon basıncındaki değişimle bu çarpılmanın 2 ile 4 mm arasında değiştiği ve enjeksiyon basıncının artırılmasıyla parçalardaki çarpılmanın arttığı, özellikle düşük seviye ve orta seviye arasında bu artışın keskin yükseldiği anlaşılmaktadır. Soğutma süresinin de çarpılma üzerinde etkili olduğu ve soğutma süresinin uzatılmasının, parçalardaki çarpılma değerini 4,6 mm'den 2,4 mm'ye düşürdüğü görülmektedir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Çarpılma sonuçları ana etki grafikleri

Kabanemi ve diğerleri, YYPE malzeme ile enjeksiyonla kalıplanmış kutu parçaların çarpılma değerlerinin, en fazla enjeksiyon sıcaklığı ve soğutma süresinden etkilendiğini belirtmiş ve çarpılmanın enjeksiyon sıcaklığı ile doğru, soğutma süresi ile ters orantılı

olduğunu ifade etmişlerdir [106]. Huang ve diğerleri, Gao ve Wang, Chiang enjeksiyonla kalıplanmış PC/ABS karışımı parçalardaki çarpılma değerlerinin enjeksiyon sıcaklığındaki artış ile azaldığını belirtmişlerdir [80, 107, 108]. Gao ve Wang, düşük sıcaklıktaki eriyiğin iyi bir akışkan olmadığı için dolum esnasında yüksek kayma gerilmelerinin oluştuğunu ve bu gerilmelerin rahatlamak için yeterli süreyi bulamadığı durumlarda çarpılmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir [107]. Kalıp sıcaklığının artırılmasıyla PP düz şekilli parçalardaki çarpılmalar azalmaktadır [90]. Chiang tarafından rapor edilen çalışmada, PC/ABS ile kalıplanmış cep telefonu kapağı özelliklerine, bilhassa çekme ve çarpılma değerlerini azaltan etkili faktörün, kalıp sıcaklığı olduğunu belirtilmiştir [108]. Bir diğer çalışmada ütüleme basıncının YYPE düz parçalardaki çarpılmalar üzerinde etkili olduğunu ve düşük ütüleme basıncında numunelerdeki çarpılmayı azalttığı ortaya konulmuştur [90]. Gao ve Wang çalışmalarında, yüksek ütüleme basıncının daha fazla gerilmeye dolayısıyla daha fazla çarpılmaya neden olacağını ifade etmişlerdir [90, 107]. PS düz parçalarda düşük ve orta ütüleme basınçları çarpılma üzerinde yakın etki gösterirken, yüksek ütüleme basıncında çarpılma azalmaktadır [93]. Gao ve Wang, amorf yapıda olan PC/ABS karışımı malzemenin enjeksiyonla kalıplanmasında yüksek ütüleme basıncının parça girişi ve girişe yakın bölgelerde basınç farkına neden olarak çarpılmayı artırdığını ifade etmişlerdir [107]. Huang ve Tai de, ütüleme basıncının artırılması ile çarpılmanın arttığını saptamışlardır [80]. Ütüleme süresi YYPE parçaların çarpılması üzerinde en etkili kalıplama parametresidir. Kısa ve orta seviye ütüleme süreleri çarpılma üzerinde yakın etkiler gösterirken, uzun ütüleme süresinde çarpılma daha az olmuştur [90]. Ütüleme süresinin artırılması ile PS düz numunelerdeki eğrilme (çarpılma) azalmıştır [93]. Huang ve Tai orta seviye ütüleme süresinde çarpılmanın düştüğünü, yüksek ütüleme süresinde maksimum değeri aldığını tespit etmişlerdir. Ütüleme süresinin etkisi için benzer sonuçlar Gao ve Wang tarafından da rapor edilmiştir [80, 107]. Soğutma süresi de çarpılma ile ters orantılıdır [82, 97, 106].

Yukarıda açıklanan kısa literatür özetinde enjeksiyon ve kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı ve süresi parametrelerinin farklı plastiklerden kalıplanmış parçalardaki çarpılmalar üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak Çizelge 6.2’de görüldüğü üzere bu çalışmada ŞHPU parçalardaki çarpılma üzerinde etkili bulunmamışlardır. Kabanemi ve diğerlerinin [106] bulgularına benzer olarak, bu çalışmada uzun soğutma süresinin ŞHPU parçalardaki çarpılmayı azalttığı bulunmuştur (Şekil 6.2). Enjeksiyon basıncındaki artışla çarpılmaların artması, dolum esnasındaki gerilmelerin ŞHPU parçaların üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Benzer bir ifade Gao ve Wang [107] tarafından ütüleme basıncının

etkileri açıklamak için kullanılmıştır. PS parçalardaki çarpılmaların incelediği bir çalışmamızda, yüksek ütüleme basıncında çarpılmaların azaldığı görülmüştür [93]. Sonuç olarak çarpılma parçasındaki gerilmelerin fiziksel deformasyonla rahatlaması durumudur. Malzeme özelliklerine ve parça geometrisine bağlı olarak bu gerilmeler kalıplamadan hemen sonra çarpılma olarak ortaya çıkabileceği gibi bu süreç zamana yayılarak uzun bir süre sonunda deformasyon veya kırılma olarak da ortaya çıkabilir.

6.3. Ağırlık Sonuçları

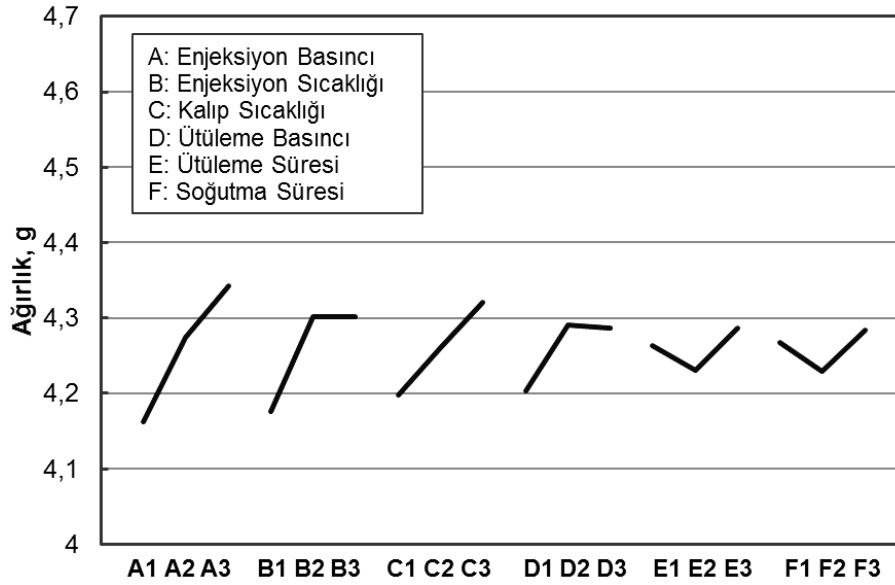
Kalıplanan test numunelerinin tamamının ağırlıkları tartılmış ve sonuçlar varyans analizine tabi tutulmuştur. Analiz sonuçları Çizelge 6.3 ve Şekil 6.3'te verilmiştir. Varyans analizi sonucunda elde edilen F değerleri kritik F değeriyle ($F_c=3,37$) kıyaslanmış ve sırasıyla enjeksiyon basıncı ($F= 12,66$), enjeksiyon sıcaklığı ($F= 8,07$), kalıp sıcaklığı ($F= 5,78$) ve ütüleme basıncı ($F= 3,8$) parametrelerinin parça ağırlığı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Çizelge 6.3. Ağırlık verileri varyans analizi tablosu

Faktör	SD	F _c	KT	KO	F	P	%
Enjeksiyon Basıncı	2	3,37	0,15	0,07	12,66	0,001	31,91
Enjeksiyon Sıcaklığı	2		0,09	0,05	8,07	0,005	19,15
Kalıp Sıcaklığı	2		0,07	0,03	5,78	0,015	14,89
Ütüleme Basıncı	2		0,04	0,02	3,8	0,048	8,51
Ütüleme Süresi	2		0,01	0,01	1,17	0,339	2,13
Soğutma Süresi	2		0,01	0,01	1,22	0,326	2,13
Kalıntı Hata	14		0,08	0,01			17,02
Toplam	26		0,47				

KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalaması, SD: Serbestlik Derecesi, F_c: Kritik F değeri ($\alpha=0,05$), F: F testi, P: Olasılık

Ağırlık sonuçlarının ana etki grafikleri (Şekil 6.3), kalıplama parametrelerinin ağırlık üzerindeki etkilerinin yönünü göstermektedir. Ortalama ağırlık 4,26 g bulunmuştur. En etkili parametre olarak enjeksiyon basıncı bulunmuş, enjeksiyon basıncının artırılmasıyla parça ağırlığı artmıştır. Düşük ve yüksek seviyeleri arasında 0,20 g ağırlık farkı oluşmuştur. Benzer etki enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığında da görülmektedir.



Şekil 6.3. Ağırlık sonuçları ana etki grafikleri

Amran ve diğerleri PP parçaların ağırlığı üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla kalıp ve enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon ve soğutma süresi olduğunu rapor etmişlerdir [109]. Uyguladıkları yüksek seviye kalıp sıcaklığında ağırlık azalırken, yüksek enjeksiyon basıncında artmıştır. Jiang ve diğerleri mikro lens ağırlıklarının enjeksiyon ve kalıp sıcaklığındaki artışla arttığını bulmuşlardır. Mikro lens ağırlığı enjeksiyon hızıyla artarken orta seviyeden sonra düşmektedir. Ütuleme basıncının yükselmesi önce ani yükselmeye neden olurken sonrasında değişimin daha az olduğunu ifade etmişlerdir [110]. Literatürdeki sonuçlarla bu çalışmanın sonuçları özellikle enjeksiyon ve kalıp sıcaklıklarının etkileri örtüşmektedir.

6.4. Şekil Hafıza Etkisi

Şekil hafıza etkisi sonuçları, “materyal ve metot” başlığında açıklandığı üzere, üç ayrı adım için incelenmiştir: (I) kalıplama, (II) programlama ve (III) toparlanma (Şekil 3). Şekilde birinci adım parçanın kalıptan çıktıktan sonraki halini temsil etmektedir (L_I). Programlama adımında elde edilen delikler arası yeni mesafe L_{II} ve toparlanma sonundaki yeni mesafe L_{III} ile ifade edilmiştir.

6.4.1. Kalıcı şekil

Kalıplama sonuçlarında, parçanın kalıp üzerinden seçilen bir ölçü üzerinden kalıcı şeklinin hangi düzeyde kararlılıkla elde edildiği analiz edilmiştir. Çizelge 6.4 F testi değerlendirmesine göre sırasıyla soğutma süresi (F: 39,13), ütüleme süresi (F: 6,97) ve kalıp sıcaklığı (F: 4,83) kalıcı şekil kararlılığı üzerinde etkili parametrelerdir.

Şekil 6.4, ana etki grafiğinde ŞHPU parçaların kalıcı şekil kararlılığına parametrelerin etkilerini göstermektedir. Ortalama şekil kararlılığı %99,3 olmuştur. Soğutma süresi ve ütüleme süresinin artırılması şekil kararlılığını artırmaktadır. Kalıp sıcaklığının artırılmasıyla şekil kararlılığı düşmüş ancak orta ve yüksek seviyelerin sonuçları eşit çıkmıştır.

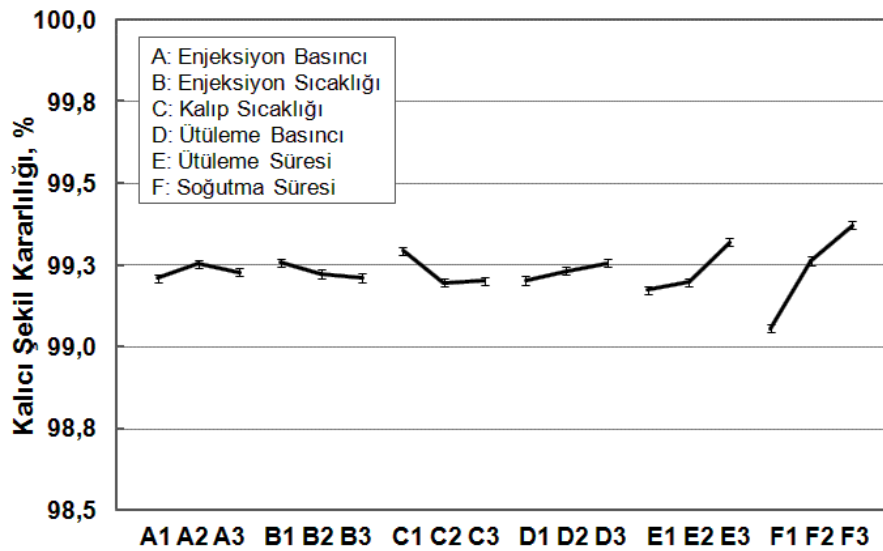
Çizelge 6.4. Kalıcı şekil kararlılık değeri varyans analizi sonuçları

Faktör	SD	Fc	KT	KO	F	P	%
(A) Enjeksiyon Basıncı	2	3,37	0,011	0,005	0,87	0,442	1,44
(B) Enjeksiyon Sıcaklığı	2		0,001	0,000	0,06	0,945	0,13
(C) Kalıp Sıcaklığı	2		0,061	0,030	4,83	0,025	8,00
(D) Ütüleme Basıncı	2		0,023	0,012	1,85	0,193	3,01
(E) Ütüleme Süresi	2		0,088	0,044	6,97	0,008	11,54
(F) Soğutma Süresi	2		0,491	0,246	39,13	0,000	64,43
Kalıntı Hata	14		0,088	0,006	0,00		11,54
Toplam	26		0,762				

KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalaması, SD: Serbestlik Derecesi, Fc: Kritik F değeri ($\alpha=0,05$), F: F testi, P: Olasılık (Probability)

Kalıcı şekil kararlılığı sonuçları, çekme ve çarpılma sonuçlarıyla birlikte değerlendirilmelidir. Kalıpta soğutma süresinin uzatılması çekmeyi ve çarpılmayı azaltıp parçanın kalıcı şekil kararlılığını artırmaktadır. Burada ütüleme süresi ve soğutma süresi kalıpta içinde soğutmayı sağladıkları için birlikte değerlendirilebilir. Bu parametreler parça geometrisinin boy ve en yönündeki çekmenin azaltılmasında etkili olmuştur. Kalınlık yönünde çekmeyi kısıtlayacak bir unsur olmaması bu doğrultudaki çekme oranının daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. ŞHPU parçaların T_g sıcaklığının altına kadar soğutulduktan sonra kalıptan alınması gerekliliği kalıp sıcaklığı sonuçlarından anlaşılmaktadır. Farklı toparlanma sıcaklıklarının termoset ve termoplastik ŞHPU (MP5510

ve MM5520 SMP Technologies Co., Japonya) toparlanma performansı üzerine yapılan bir çalışmada, malzemelerin T_g sıcaklığının 15°C altı ve 5°C üstü sıcaklık aralığındaki toparlanma davranışları incelenmiştir. Bu çalışma sonuçlarına göre termoplastik ŞHPU T_g sıcaklığının 15°C altında şekil sabitliği göstermekte bu sıcaklığın üstünde ise şekil toparlanma başlamaktadır [111]. Bu çalışmanın DSC sonucunda da malzemenin T_g sıcaklığı $42,8^\circ\text{C}$ bulunmuştur. Malzeme üreticisinin önerileri ışığında kalıp sıcaklığı 30°C , 35°C ve 40°C olarak alınmıştır. Kalıp sıcaklığı sonuçlarına parça kalıptan çıkartıldığında maksimum $\sim 29^\circ\text{C}$ civarında sıcak olmalıdır denilebilir. Bunu sağlamak için kalıp sıcaklığı biraz daha düşük tutulabilir veya soğutma hızı ve süresi arttırılabilir. Daha düşük kalıp sıcaklığının parça üzerindeki etkileri de incelenmelidir. Uzun soğutma süresi seri üretim açısından ekonomik olmayacağı için hızlı soğutma sağlanmalıdır.



Şekil 6.4. Şekil kararlılığı ana etki grafiği

6.4.2. Programlama

Programlanma yüzde oranı, kalıplama sonrasında sıcak şekillendirmeyle, parçaya geçici şeklinin hafızalaştırılması aşamasındaki başarı oranını göstermektedir. Programlama adımında, F testi değerlendirmesi, kalıp sıcaklığının ($F=3,87$) etkisiyle diğer parametrelerin etkileri arasında fark olduğunu ve bu etkinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermiştir (Çizelge 6.5). Diğer parametrelerin etkileri varyans analizi sonucunda istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Varyans analizi sonucunda toplam %42 hata oranı

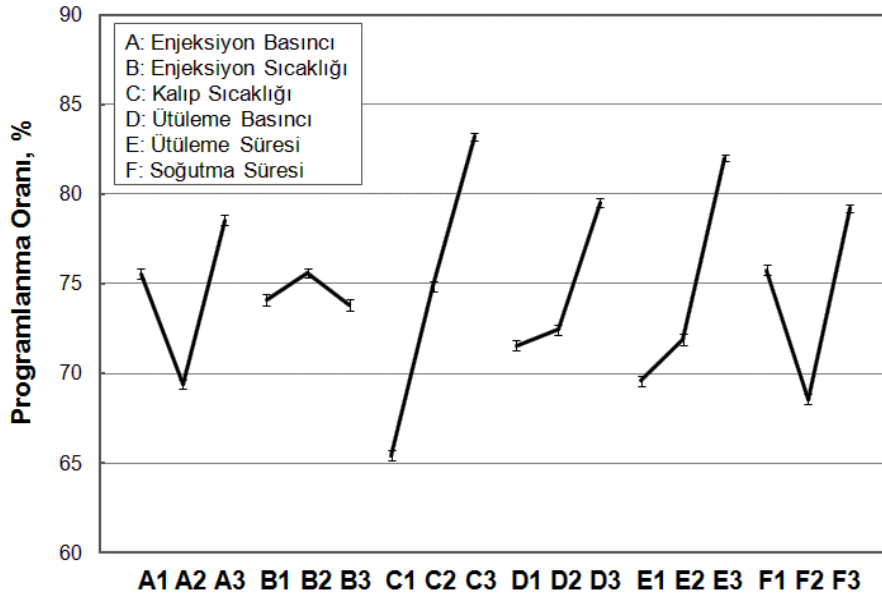
çıkması bize programlama sonrasında parçadaki çekmenin tam olarak kontrol edilemediğini göstermektedir.

Çizelge 6.5. Programlama test değerleri varyans analizi sonuçları

Faktör	SD	Fc	KT	KO	F	P	%
(A) Enjeksiyon Basıncı	2	3,37	393,302	196,651	1,069	0,370	6,48
(B) Enjeksiyon Sıcaklığı	2		16,490	8,245	0,045	0,956	0,27
(C) Kalıp Sıcaklığı	2		1424,401	712,201	3,872	0,046	23,47
(D) Ütüleme Basıncı	2		340,577	170,288	0,926	0,419	5,61
(E) Ütüleme Süresi	2		788,690	394,345	2,144	0,154	12,99
(F) Soğutma Süresi	2		530,924	265,462	1,443	0,269	8,74
Kalıntı Hata	14		2575,364	183,955	0,205		42,42
Toplam	26		6069,747				

KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalaması, SD: Serbestlik Derecesi, Fc: Kritik F değeri ($\alpha=0,05$), F: F testi, P: Olasılık

Programlama (hafızalaştırma) ana etki grafikleri kalıp sıcaklığı ve diğer parametrelerin etki yönlerini göstermektedir (Şekil 6.5). Grafiklerden ortalama programlanma oranının %74,5 olduğu anlaşılmaktadır. Bu oran, en yüksek ortalama %83,2 (kalıp sıcaklığı:40°C), en düşük %65,4 (kalıp sıcaklığı:30°C) olarak gerçekleşmiştir. Kalıp sıcaklığının artırılmasıyla geçici şekil kararlılığı (programlanma) yüzde oranı artmıştır. Ancak çalışılmış olan şekil hafızalı poliüretan malzemenin T_g sıcaklığı 42,8°C'dir (DSC sonuçlarından) ve yüksek seviye kalıp sıcaklığı yaklaşık 3°C farkla bu değere çok yakındır. Aradaki farkın düşük olması, kalıplama esnasında, kalıptaki soğutmanın çok etkili olmasını ve uzun soğutma süresi kullanımını gerektirmektedir. Aksi durumda parça sıcaklığı, T_g altına düşmeden kalıptan çıkartılmış olacak ve bu da parçanın kalıcı şekli ve şekil hafıza etkisi üzerinde olumsuz etki edecektir. Ek olarak, sonuçlar parçanın istenen şekli ve ölçüyü alması için programlama adımı bir "kayıp oranının" dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Bu oran kalıplama öncesinde kalıp ölçülerine eklenen verilen çekme oranı gibi programlama işlemi öncesinde programlama kalıbı veya sistemine eklenmelidir.



Şekil 6.5. Programlama (hafızalaştırma) ana etki grafikleri

Pandini ve diğerleri bir çalışmalarında, epoksi ŞHP malzemedan soğuk şekillendirmeye ($T_g - 65^\circ\text{C}$) programlamada, %60-85 aralığında programlanma oranları elde etmişlerdir [112]. Wu ve diğerleri de ticari bir eter vinil asetat kopolimer (EVA) numunelerde soğuk şekillendirmeye ($T_g - 20^\circ\text{C}$) %70, T_g sıcaklığında şekillendirmeye %85 ve sıcak şekillendirmeye de ($T_g + 20^\circ\text{C}$) %95 programlama oranlarına ulaşmışlardır ve kalıcı şekil ile programlanan şekil arasındaki enerji bariyeri sıcaklığa bağlıdır sonucuna varmışlardır [113]. Bu çalışmadan elde edilen programlama sonuçları da literatürdeki bilgiyle örtüşmektedir. Kalıp sıcaklığı parça sıcaklığını etkilediği için programlama üzerinde etkili olmuştur. Bunun yanı sıra parça sıcaklığı üzerinde etkili oldukları için enjeksiyon sıcaklığı ve soğutma süresi parametrelerinin de programlama üzerinde etkili olması beklenirdi. Ancak bu parametrelerin özellikle de enjeksiyon sıcaklığının etkisiz olduğu Çizelge 6.5 ve Şekil 6.5'te açıkça görülmektedir. Bunun sebebi programlama adımıda sıcak şekillendirme uygulandığı için parça yeniden ısıtıldığında kalıplama parametrelerinin etkilerinden kaynaklanan moleküler yerleşim farklılıklarının düzelmesi olabilir.

6.4.3. Toparlanma

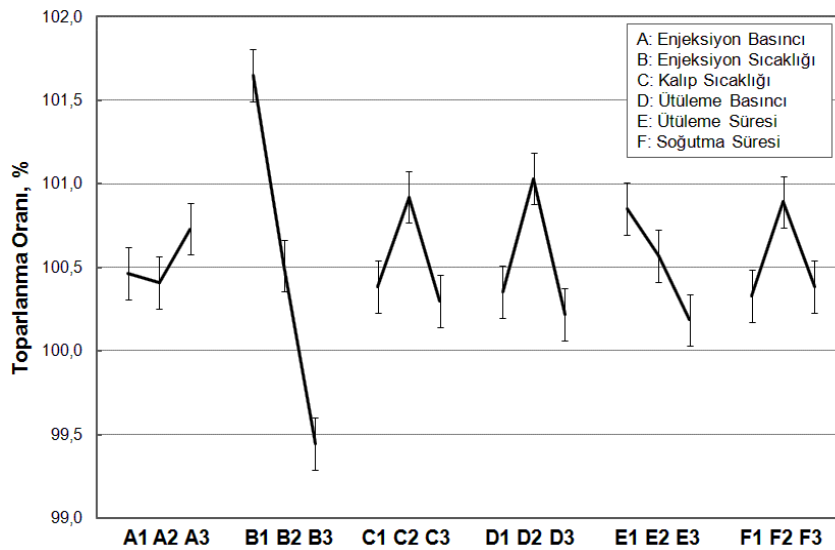
Toparlanma adımıda parçaların geçici şeklinden yeniden kalıcı şekline toparlanması test edilmiştir. Çizelge 6.6'dan sadece enjeksiyon sıcaklığı ($F = 12,48$) parametresinin parçaların toparlanma oranı üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 6.6. Toparlanma test değerleri varyans analizi sonuçları

Faktör	SD	Fc	KT	KO	F	P	
(A) Enjeksiyon Basıncı	2	3,37	0,533	0,266	0,305	0,742	1,22
(B) Enjeksiyon Sıcaklığı	2		21,836	10,918	12,488	0,001	49,82
(C) Kalıp Sıcaklığı	2		2,048	1,024	1,171	0,339	4,67
(D) Ütuleme Basıncı	2		3,418	1,709	1,955	0,178	7,80
(E) Ütuleme Süresi	2		2,023	1,011	1,157	0,343	4,62
(F) Soğutma Süresi	2		1,731	0,865	0,990	0,396	3,95
Kalıntı Hata	14		12,239	0,874	0,026		27,92
Toplam	26		43,828				

KT: Kareler Toplamı, KO: Kareler Ortalaması, SD: Serbestlik Derecesi, Fc: Kritik F değeri ($\alpha=0,05$), F: F testi, P: Olasılık

Şekil 6.6'da ortalama toparlanma oranı %100,5 olmuştur. Burada %100'den fazla olan toparlanma, numunelerin toparlanma sonunda kalıplama boylarından daha kısa bir boy a çıktıklarını göstermektedir. İdeal bir şekil hafızalı parça %100 programlama ve %100 toparlanma oranına sahip olmalıdır. Bu çalışmada elde edilen ortalama toparlanma sonucu iyi bir sonuçtur ve aradaki sapma üzerinde enjeksiyon parametrelerinin etkisinin olup olmadığı, varsa hangi derecede etkili olduğunun araştırılması bu çalışmanın amacıdır. Toparlanma, sırasıyla alçak (B1: 195°C), orta (B2: 200°C) ve yüksek (B3: 205°C) enjeksiyon sıcaklıklarında %101,6, %100,5 ve %99,4 olarak sırasıyla gerçekleşmiştir. Enjeksiyon sıcaklığı artarken toparlanma oranı ideale yaklaşmış ve seviyeler arasında %2,2 fark oluşmuştur. Burada orta seviye ve yüksek seviye %100'e en yakın değerlerdedir.



Şekil 6.6. Toparlanma ana etki grafikleri

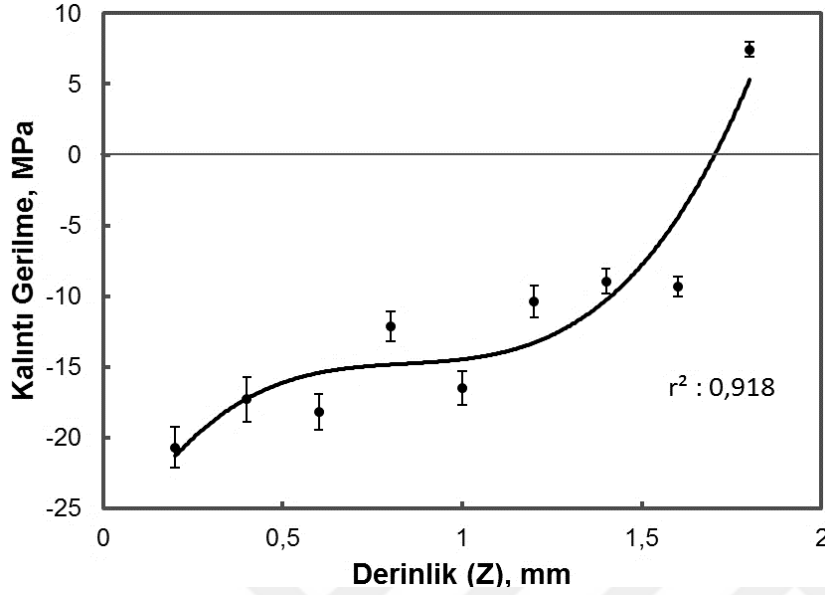
Literatürde, soğuk şekillendirilen şekil hafızalı epoksi ve şekil hafızalı polistiren malzemelerin toparlanma oranlarının sırasıyla %100, %60 olduğu rapor edilmiştir [114, 115]. Bir başka çalışmada, poli(butilen adipat) (PBA) kristallenebilir segmentler içeren faz dağılımlı poli(ester üretan) (PEU) parçaların -10°C ve 40°C aralığında farklı sıcaklıklarda programlanması sonucu toparlanma oranları sırasıyla %88, 87, 89, 87, 86, 86 olduğu sonucuna ulaşılmıştır [116, 117]. Bu çalışmalar toparlanmanın programlama sıcaklığına göre farklı oranlarda gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca, düşük sıcaklıkta programlama, düşük sıcaklıkta toparlanma [118] ve yüksek toparlanma gerilimine neden olmaktadır [111, 118]. Bu çalışmada da Tg üstü sıcaklıkta (55°C) programlanan ŞHPU parçaların ortalama %100,5 oranında toparlanma gösterdiği ve toparlanmanın enjeksiyon sıcaklığından etkilendiği bulunmuştur. Literatüre bakıldığında her malzemenin farklı programlama ve toparlanma oranı gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi parça üretim yöntemi, üretim parametreleri ve programlama farklılıklarının yanı sıra malzeme yapısal özellikleri olabilir.

6.5. Kalıntı Gerilme Sonuçları

Taguchi L27 deney tasarımı tablosundan üç tekrarla üretilen toplam 81 (27×3) parça için kalınlık boyunca kalıntı gerilmeler hesaplanmış ve Şekil 6.7’de verilen kalıntı gerilme ortalama dağılım grafiği elde edilmiştir. Grafiğin yatay ekseninde derinlik yani katman kaldırma işleminden sonra parçanın orta düzlemine kadar olan kalınlık değeri, dikey ekseninde de kalıntı gerilme değeri bulunmaktadır. Grafikteki her bir nokta o katmandaki kalıntı gerilme değerini MPa cinsinden göstermektedir. Grafikten elde edilen değerler üzerinden polinomik bir eğri hesaplanmış ve bu eğrinin sonuçları temsil hassasiyeti r^2 (0,918) değeriyle ifade edilmiştir. Ayrıca her bir sonuç noktası için hata barları eklenmiştir. Hata barlarının bir birini örtmemesi sonuçların güvenilirliğini ve aralarında dikkate değer fark olduğunu göstermektedir. Eğri altında kalan alanlar da hesaplanmıştır. Eksi bölgedeki alan basma, artı bölgedeki alan çekme kalıntı gerilmesini ifade etmektedir. Kalıntı gerilmeler açısından dengeli bir parçada çekme ve basma gerilmelerinin eşit olması gerekmektedir. Birinin diğerinden yüksek olması parçada deformasyona neden olmaktadır. Bu çalışmada da parçalarda çoğunlukla çarpılma gözlenmiş ve ölçülmüştür.

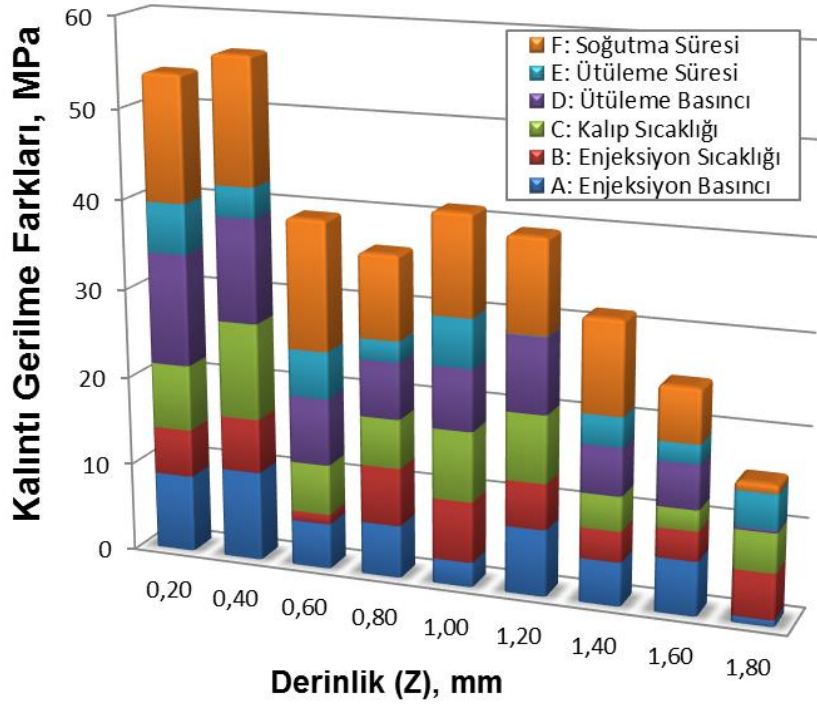
Kalıntı gerilme değeri, -21 MPa ile 5 MPa arasında, yüzeyden çekirdeğe kadar sırasıyla basma gerilmesi ve çekme gerilmesi olarak değişmektedir. Deney tasarımı tablosundaki her bir satır için farklı kalıntı gerilme dağılımı ve değerleri elde edilmiştir. Şekil 6.7’deki grafik,

bu çalışmada kullanılan ve şekil hafızalı poliüretan'dan (ŞHPU) kalıplanan parçaların tamamı için ortalama bir grafikdir.



Şekil 6.7. Kalınlık boyunca kalıntı gerilme dağılımı

Şekil 6.8’de verilen grafik, bütün parçalardaki kalıntı gerilme dağılımlarından oluşturulmuş ve kalıplama esnasında değişken olarak kullanılan kalıplama parametrelerinin, kalınlık boyunca kademe kademe parçadaki kalıntı gerilmelere etkilerini göstermektedir. Buna göre, kalıntı gerilmeler üzerindeki en etkili parametre soğutma süresidir ve bunu sırasıyla ütüleme basıncı, enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme süresi takip etmektedir.



Şekil 6.8. Kalıntı gerilmelerin kalıplama parametrelerine göre değişim

Parça kalınlık boyunca üç bölgeye ayrılıp, parametrelerin etkileri buna göre incelenmiştir.

(i) yüzey (0-0,40 mm), (ii) ara bölge (0,60-1,20 mm) ve (iii) çekirdek (1,40-1,80 mm). Derine doğru inildikçe soğutma süresinin kalıntı gerilmeler üzerindeki etkisinin zayıfladığı görülmektedir. Bu bölgelere parametrelerin etkileri detaylı olarak aşağıda verilmiştir.

(i) *Yüzey (0-0,40 mm)*: Bu bölgede en etkili parametreler soğutma süresi ve ütüleme basıncıdır. Bunları kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon basıncı takip etmektedir. Enjeksiyon sıcaklığı ve ütüleme süresinin etkileri diğer dört parametreye nispeten düşüktür.

(ii) *Ara bölge (0,60-1,20 mm)*: Bu bölgede de soğutma süresi etkisini devam ettirmektedir. Ütüleme basıncı, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon basıncının etkileri nispeten azalmış fakat devam etmektedir. 0,6 mm kademedede enjeksiyon sıcaklığının etkisi çok düşük olsa da, daha sonraki kademelerde etkisi yükselmiştir hatta ara bölgede yüzeydekinden daha fazla etkili olmuştur.

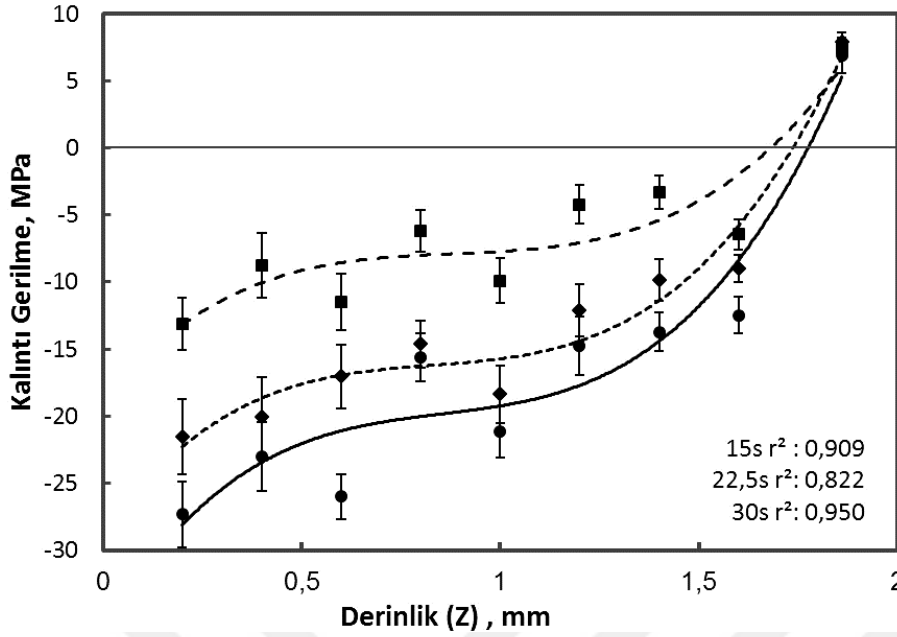
(iii) *Çekirdek (1,40-1,80 mm)*: Yüzeyden çekirdeğe doğru inildikçe parçadaki kalıntı gerilme değeri düşmektedir. Diğer iki bölgede en etkili parametre olan soğutma süresi bu bölgede de etkisini göstermekte fakat son tabakada etkisi kaybolmaktadır. Çekirdek üzerinde etkili olan

diğer iki parametre; enjeksiyon basıncı ve ütüleme basıncıdır. Enjeksiyon sıcaklığı ve kalıp sıcaklığının da etkisi görülmektedir. Özellikle çekirdekdeki son tabakada parçanın soğumasını etkilediği için enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı ve ütüleme süresinin etkileri öne çıkmaktadır.

Parametrelerin etkileri ayrı başlıklar altında incelenmiştir. Başlıkların veriliş sıralaması parametrelerin etki derecelerine göre yapılmıştır.

6.5.1. Soğutma süresinin etkisi

ŞHPU parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili kalıplama parametresi olarak soğutma süresi tespit edilmiştir. Şekil 6.9, parçalarda kalınlık boyunca üç farklı soğutma süresi seviyesinde oluşan kalıntı gerilme dağılımlarını göstermektedir. Kalıntı gerilmeler üç seviye (15 s, 22,5 s, 30 s) için eğilim çizgileri, sonuçları 0,909; 0,822 ve 0,95 hassasiyetinde temsil etmektedir. Kalıntı gerilmeler üç seviyede de yüzeyden çekirdeğe doğru sırasıyla, basma ve çekme gerilmeleri olarak değişmiştir. Soğutma süresindeki değişim ile yüzeydeki kalıntı gerilme değerleri arasında 14,0 MPa'lık bir fark oluşmuştur. Toplam kalıntı gerilme, 22,5 s soğutma süresinde en düşük -10,5 MPa mm olarak gerçekleşmiştir. 15 s ve 30 s soğutma süreleri için bu değer sırasıyla -27,5 ve -21,5 MPa mm olmuştur. Bu değerler orta seviye soğutma süresinin düşük kalıntı gerilme gelişimi için optimum seviye olduğunu göstermiştir.



Şekil 6.9. Soğutma süresinin kalıntı gerilmelere etkisi

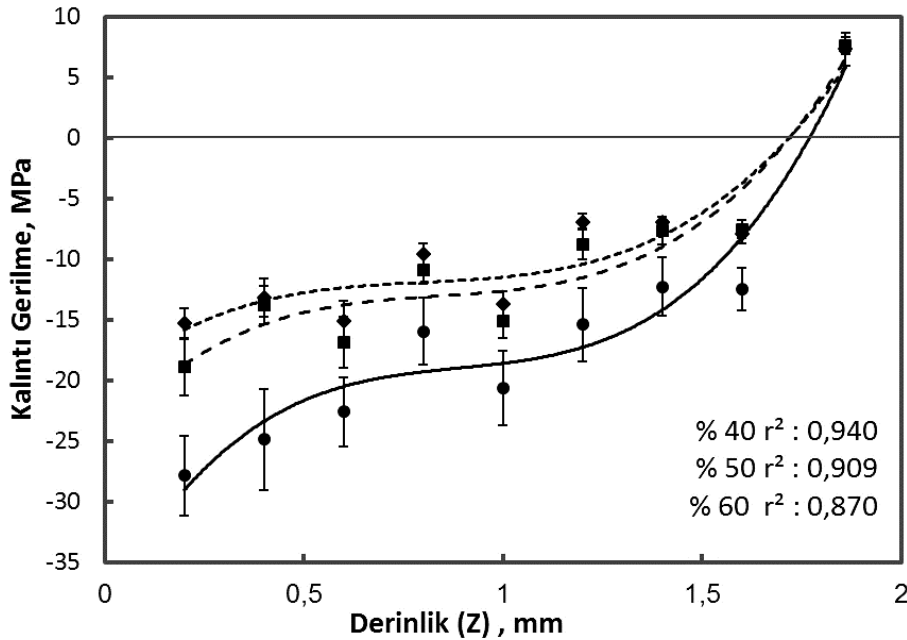
Literatürde, soğutma süresi PP parçaların yüzeyindeki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili, ara katmandaki kalıntı gerilmeler üzerinde ise üçüncü en etkili faktör bulunmuştur [90]. Bir diğer sonuç soğutma hızının kalıntı gerilmelerin oluşumunda en etkin faktör olduğudur [98-103]. Literatürdeki çalışmalara benzer olarak, bu çalışmada soğutma süresi ŞHPU parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili kalıplama parametresi olduğu ve kalıntı gerilmenin en az orta seviye soğutma süresinde elde edildiği bulunmuştur. Elde edilen bu sonucun olası nedenleri; (i) uzun soğutma süresi parçanın kalıp içerisinde soğutulmasını ve soğutma etkisiyle oluşacak çekmenin engellenerek parçada gerilmeleri artırması, (ii) kısa süreli kalıp içi soğutma sonunda, parçanın tamamen katı hale gelmeden kalıptan çıkarılması sonucu çıkartma esnasında parçada gerilme yüklenmesi oluşması olabilir.

Şekil 6.9'da her bir seviyede diğer seviyelerden farklı sonuçlar olduğu görülmektedir. Kalıntı gerilme sonuçları çarpılma sonuçlarıyla karşılaştırılınca, parçanın kalıpta optimum bir süre soğutulması gerektiği, bundan kısa veya uzun sürelerin kalıntı gerilmeleri arttırdığı yargısına ulaşılmaktadır. Kısa soğutma süresi sonunda kalıptan alınan parça henüz tamamen katılaşmadığı için çarpılma ile gerilim rahatlaması gösterirken, uzun süre sonunda kalıpta tamamen katılaşan parçada kalıntı gerilmeler kısa sürede çarpılma ile rahatlamamakta ve parçada hapsolmektedir.

6.5.2. Ütöleme basıncının etkisi

Ütöleme basıncı değerleri enjeksiyon basıncı değerine bağlı olarak uygulanmıştır. Deney tasarımı tablosunda her bir numunenin kullanılan enjeksiyon basıncı değerinin belirlenen yüzdeleri ütöleme basıncı olarak alınmıştır.

Şekil 6.10 üç farklı ütöleme basıncı için ŞHPU parçalardaki kalıntı gerilme dağılımlarını göstermektedir. Veri noktaları üzerinden elde edilen eğriler veri noktalarını sırasıyla, 0,94 0,909 ve 0,87 hassasiyet oranlarında temsil etmektedir ve eğri altında kalan alanlar sırasıyla, -26,9; -17,2 ve 15,3 MPa mm'dir. Grafikte, kalıntı gerilmelerin yüzeyden çekirdeğe doğru sırasıyla, basma ve çekme gerilmeleri olarak değişmektedir. %60 (-15 MPa) ve %50 (-19 MPa) ütöleme basıncı seviyeleri arasında kalıntı gerilmelere etki açısından fark olmazken, %40 (-28 MPa) ütöleme basıncında kalınlık boyunca kalıntı gerilmeler yükselmiştir. Hata barları incelendiğinde %60 ve %50 ütöleme basıncı seviyelerinin hata barlarının birbirini kestiği görülmektedir. Bu da bu iki seviye arasında sonuçlara etki açısından önemli fark olmadığını göstermektedir. Bunun yanında %40 ütöleme basıncı seviyesinin etkisi önemlidir.



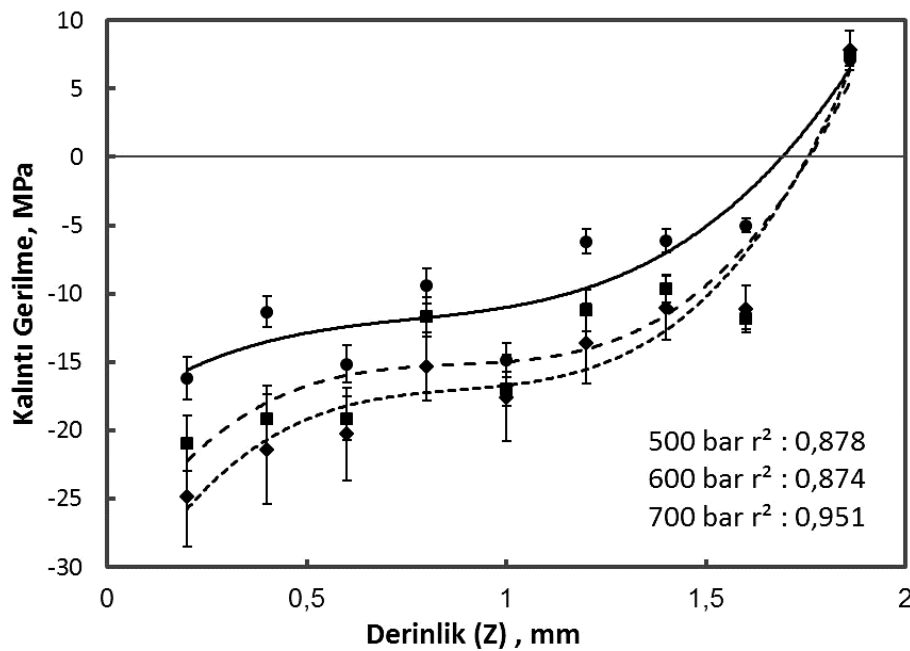
Şekil 6.10. Ütöleme basıncının kalıntı gerilmelere etkisi

Literatürde rapor edilen çalışmalarda, yüksek ütöleme basıncının daha yüksek kalıntı gerilme ve buna bağlı olarak daha fazla çarpılma oluşturması gerektiği ortaya çıkarılmıştır

[90, 107]. Bu çalışmanın sonuçları ise bu çıkarımın tersini göstermektedir. Bu sonucun ŞHPU malzemenin yapısal özellikleriyle ilgili olduğu öngörülmektedir. ŞHPU malzemenin kalıplama esnasında yüksek ütüleme basıncına (yüksek paketlemeye) ihtiyaç duyduğu sonucuna varılabilir. Ek olarak, Bölüm 6.1 ve 6.2 ütüleme basıncı ŞHPU parçaların çekme ve çarpılması üzerinde etkili olmadığını, görülen etkinin de istatistiksel olarak ihmal edilebilir olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 6.10 orta ve yüksek ütüleme basıncında kalıntı gerilmelerin azalığını göstermektedir. Buradan parçadaki çekme ve çarpılmaların basınç nedeni olmasından ziyade sıcaklık nedeni oldukları sonucuna ulaşılabilir.

6.5.3. Enjeksiyon basıncının etkisi

Üç farklı enjeksiyon basıncında elde edilen kalıntı gerilme dağılım grafikleri Şekil 6.11’de verilmiştir. Her bir enjeksiyon basıncı seviyesi için polinomik eğriler, sonuçları sırasıyla 0,878; 0,874; 0,951 r^2 değerlerinde temsil etmektedir. Grafikler altında kalan alan sırasıyla, -14,5; -21,1 ve -23,7 MPa mm olmuştur. Grafiklerin üçünde de kalıntı gerilmeler yüzeyden çekirdeğe, basma ve çekme kalıntı gerilmeleri olarak dağılmıştır. 500 bar enjeksiyon basıncında toplam kalıntı gerilme, 600 ve 700 bar basınçlardakinden daha düşük değer almıştır. Kalınlık boyunca en yüksek kalıntı gerilme değerleri üç farklı seviye için de yüzeyde oluşmuştur. Bunlar sırasıyla 16 MPa, 22 MPa ve 25 MPa’dır.



Şekil 6.11. Enjeksiyon basıncının kalıntı gerilmelere etkisi

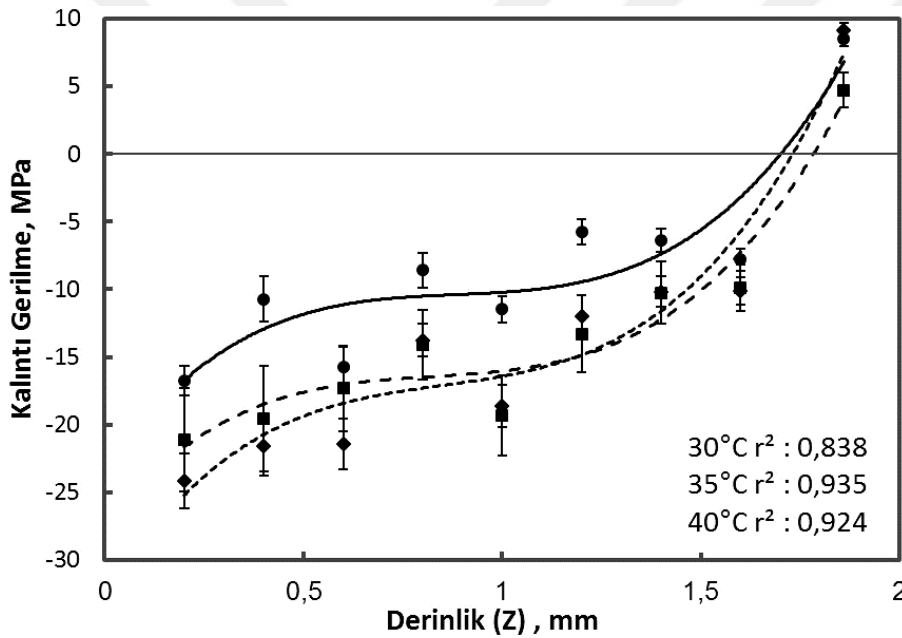
Çeşitli parametrelerin PS parçalardaki kalıntı gerilmelere etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, enjeksiyon basıncının kalıntı gerilmeler üzerinde en etkili kalıplama parametresi olduğu, önceki bir çalışmada ifade edilmiş ve enjeksiyon basıncı arttıkça kalıntı gerilmelerin arttığı belirtilmiştir [93]. ŞHPU parçalardaki kalıntı gerilme sonuçları bu çalışmanın sonuçlarıyla örtüşmektedir. Yalnız, Şekil 6.11’de hata barları özellikle 500 bar enjeksiyon basıncının etkisinin diğer iki seviyenin etkisinden farklı olduğunu ve bu farkın anlamlı olduğunu göstermektedir. Yani düşük seviye ütüleme basıncında kalıntı gerilmeler daha az oluşurken, orta ve yüksek seviye arasında önemli bir fark yaratmamıştır.

6.5.4. Kalıp sıcaklığının etkisi

Kalıp sıcaklığının ŞHPU parçalardaki kalıntı gerilmelere etkileri üç farklı sıcaklıkta (30°C, 35°C ve 40°C) araştırılmıştır. Şekil 6.12’de her bir kalıp sıcaklığı seviyesinde elde edilen kalıntı gerilme grafikleri görülmektedir. Her bir seviye için değer noktalarından geçen eğriler sırasıyla 0,838; 0,935 ve 0,924 doğrulukla sonuçları temsil etmektedir. Bu oranlar eğrilerin temsil kabiliyetinin yüksek olduğunu göstermektedir. Grafiklerdeki eğri altında kalan alan alt seviyeden üst seviyeye sırasıyla, -14,0; -22,5 ve -22,9 MPa mm olmuştur. Kalıntı gerilmeler basma-çekme gerilmeleri olarak kalınlık boyunca yüzeyden çekirdeğe dağılmıştır. Grafikte, en yüksek basma kalıntı gerilmesi 40°C kalıp sıcaklığında, -25 MPa olarak gerçekleşmiştir ve bunu -21 MPa (35°C), -16 MPa (30°C) takip etmiştir. Sonuçlar arasındaki farkın önemini gösteren bir diğer gösterge, hata barlarıdır. 35°C ve 40°C kalıp sıcaklıklarında elde edilen kalıntı gerilme dağılım grafiklerinin, hata barları kalınlık boyunca her bölgede birbiriyle kesişmektedir, fakat 30°C diğer iki seviyenin hata barlarıyla kesişmemektedir. Bu da 35°C ve 40°C kalıp sıcaklıklarının kalıntı gerilmeler üzerinde etkilerinin aynı olduğunu fakat 30°C kalıp sıcaklığının kalıntı gerilmeler üzerinde diğer ikisinden farklı etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Yüksek kalıp sıcaklığında, kalıntı gerilmelerin azaldığı literatürde rapor edilmiştir [91-93]. Ancak bir diğer çalışmada da yüksek kalıp sıcaklığında yüzeyde çekme kalıntı gerilmesinin arttığı belirtilmiştir [94]. Aradaki farkın, bu çalışmada kullanılan ŞHPU numunelerde basma kalıntı gerilmelerinin daha ağır basmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Daha düşük kalıntı gerilme oluşması açısından 30°C kalıp sıcaklığının daha uygun olduğu Şekil 6.12’de görülmektedir. Bu sonuç Bölüm 6.4.2’de programlama işlemi sonuçlarıyla çakışmaktadır. Şöyle ki kalıp sıcaklığı arttıkça programlama sonunda parça şeklinde oluşan kayıp

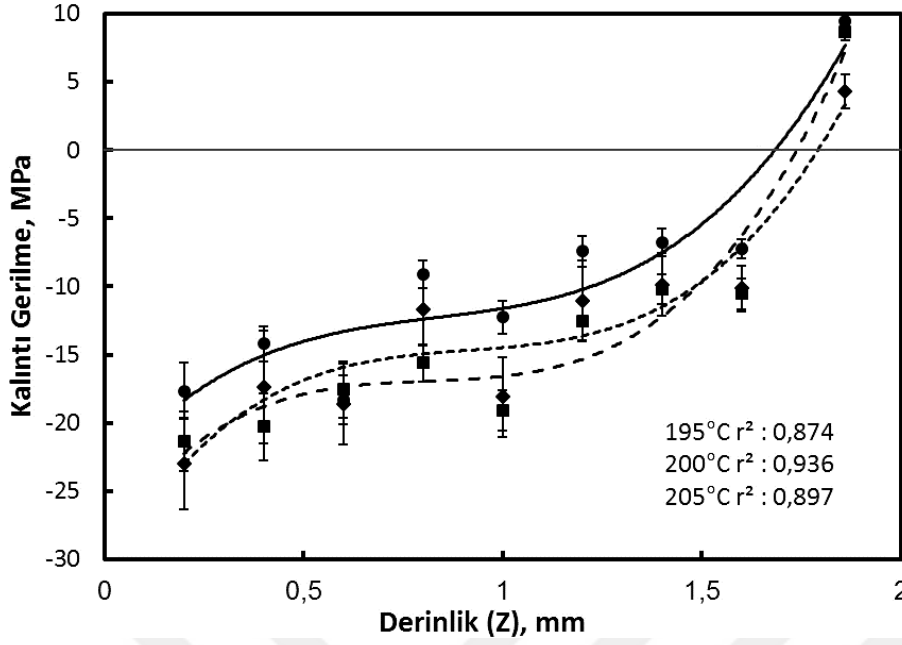
azalmaktadır. Malzemenin T_g sıcaklığının 45°C (DSC analizinden $T_g = 42,8^\circ\text{C}$) olması, T_g sıcaklığına yakın kalıp sıcaklığının kullanılmasının ŞHPU parçadaki kalıntı gerilmeleri artırıcı etki yaptığını göstermektedir. Bunda soğutma süresinde olduğu gibi parçanın tam olarak sertleşmeden kalıptan alınması ve çıkartılma esnasında olası gerilme yüklenmesinin ihtimali de göz önünde bulundurulmalıdır. Kalıp sıcaklığının ŞHPU parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerindeki etkilerine bakıldığında diğer çalışmalara göre farklı olan etkinin, yüksek kalıp sıcaklığının malzemenin camsı geçiş sıcaklığına 5°C yakın olması parçanın bütün bölgelerinin özellikle iç kısımlarının camsı geçiş sıcaklığı altına soğumadan kalıptan çıkartılması neticesinde oluştuğu düşünülmüştür. Yüksek kalıp sıcaklığı kullanıldığında daha uzun soğutma süresi uygulanması uygun bir çözüm olabilir.



Şekil 6.12. Kalıp sıcaklığının kalıntı gerilmelere etkisi

6.5.5. Enjeksiyon sıcaklığının etkisi

Şekil 6.13, üç farklı enjeksiyon sıcaklığında (195°C , 200°C ve 205°C) elde edilen kalıntı gerilme grafiklerini göstermektedir. Grafikler altında kalan alanlar sırasıyla, -15,6; -22,4 ve -21,4 MPa mm'dir. Her biri için kalıntı gerilmeler yüzeyden çekirdeğe basma ve çekme kalıntı gerilmeleri olarak değişmektedir. Grafikler bu üç farklı sıcaklığın ŞHPU parçalardaki kalıntı gerilmeler üzerindeki etkileri arasında fark olmadığını hata barlarıyla ortaya koymaktadır.

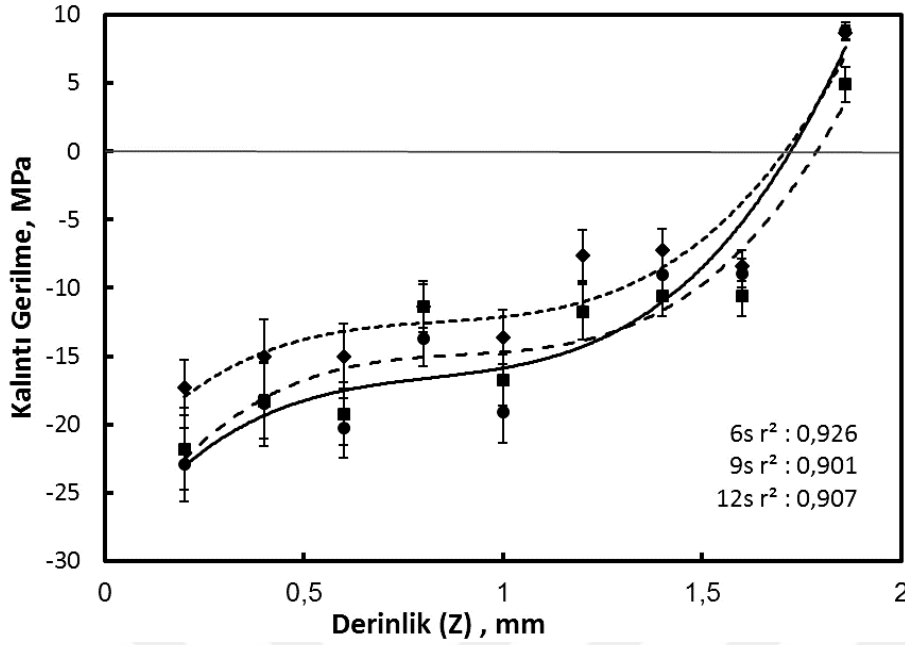


Şekil 6.13. Enjeksiyon sıcaklığının kalıntı gerilmelere etkisi

Önceki çalışmalar da yüksek enjeksiyon sıcaklığında parçalardaki kalıntı gerilmelerin azaldığı ifade edilmektedir [90, 91]. Fakat bu çalışmanın deneysel sonuçları enjeksiyon sıcaklığının ŞHPU parçalardaki kalıntı gerilmeleri etkilemediğini göstermiştir. Çalışılan seviyeler arasında sadece 5°C'lik sıcaklık farkı olması ve malzeme farklılığı bu sonucun sebepleri olabilir. ŞHPU malzeme üreticisinin önerdiği çalışma aralığının dışına çıkmamıştır.

6.5.6. Ütöleme süresinin etkisi

Şekil 6.14, 6s, 9s ve 12s ütöleme sürelerinde ŞHPU parçalarda kalınlık boyunca oluşan kalıntı gerilme grafiklerini göstermektedir. Polinomik eğriler sonuçları her bir seviye için 0,926; 0,901 ve 0,907 hassasiyetinde temsil etmektedir ve eğri altındaki alanlar -21,6; 21,4 ve -16,3 MPa mm'dir. 6 ve 9s ütöleme sürelerinde elde edilen grafikler birbirine yakın çıkmıştır. 12s ütöleme süresinin etkisi az da olsa farklılık gösterse de bu fark hata barları değerlendirmesi neticesinde anlamlı bulunmamıştır.



Şekil 6.14. Ütöleme süresinin kalıntı gerilmelere etkisi

6.6. Sonuçlar Arasındaki İlişkiler

Çizelge 6.7'deki korelasyon sonuçları X (boy) ve Y (en) yönlerindeki çekmeler arasında doğrusal ve pozitif yönlü ilişki olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde X ve Y yönlerindeki çekme parçalardaki çarpılma sırasıyla 0,01 ve 0,05 önem düzeylerinde doğrusal ve pozitif yönde ilişkilidir. Çarpılmanın önemli düzeyde ($\alpha=0,05$) ilişkili olduğu bir diğer özellik, parçalardaki basma kalıntı gerilmeleridir. Basma kalıntı gerilmeleri ile çarpılma arasında negatif yönlü bir ilişki bulunmuştur, yani basma kalıntı gerilmeleri arttıkça parçalarda gözlenen çarpılma azalmaktadır. Programlanma ve toparlanma oranlarıyla diğer özellikler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. Z yönündeki (kalınlık) çekme oranı, parça ağırlığı ve çekme kalıntı gerilmesi özelliklerinin çarpılma veya şekil hafıza etkisi gibi özelliklere etki etmediği anlaşılmıştır. Özellikle çekme kalıntı gerilmesinde gözlenen bu sonuç, çekme gerilmesi değerlerinin basma gerilmesine nazaran çok daha düşük olması sebebiyle, olası etkileri örttüğünden kaynaklanmaktadır.

Kalıplama parametrelerinin şekil hafızalı polimerlerden kalıplanmış parçaların özelliklerine etkileri ilk kez araştırılmıştır. Bu sebeple elde edilen sonuçlar diğer plastik malzemelerin sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Bu çalışmada etkisi araştırılan parametrelerin, sonuçlara etkileri Çizelge 6.8'de özetlenmiştir. Çizelgede çalışılan her bir kalıplama parametresinin etki ettiği

özellikler tablo halinde verilmiştir. Tablodaki renkler, kalıplama parametresindeki değişimle özelliklerdeki değişimin yönünü belirtmektedir.

Çizelge 6.7. Sonuçların kolerasyon çizelgesi

	X çekme [%]	Y çekme [%]	Z çekme [%]	Programlanma Oranı [%]	Toparlanma Oranı [%]	Basma Kalıntı Gerilme Alanı [MPa mm]	Çekme Kalıntı Gerilme Alanı [MPa mm]	Çarpılma [mm]	Ağırlık [g]
X çekme [%]	1								
Y çekme [%]	0,999**	1							
Z çekme [%]	-0,149	-0,167	1						
Programlanma Oranı [%]	-0,055	-0,045	-0,054	1					
Toparlanma Oranı [%]	0,087	0,077	0,274	-0,327	1				
Basma Kalıntı Gerilme Alanı [MPa mm]	-0,355	-0,348	0,481*	-0,152	0,138	1			
Çekme Kalıntı Gerilme Alanı [MPa mm]	-0,074	-0,068	0,002	0,152	-0,174	0,304	1		
Çarpılma [mm]	0,494**	0,486*	-0,342	-0,106	0,017	-0,458*	0,099	1	
Ağırlık [g]	0,273	0,256	-0,093	0,223	0,086	-0,198	-0,023	0,069	1

**0,01 düzeyde önemli (çift yönlü), *0,05 düzeyde önemli (çift yönlü)

Çizelge 6.8. Enjeksiyon kalıplama parametrelerinin ŞHPU parça özelliklerine etkileri

Parametre seviyesi arttıkça özelliklerin değişimi	Enjeksiyon Basıncı	Enjeksiyon Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	Ütölleme Basıncı	Ütölleme Süresi	Soğutma Süresi
Çekme	X (boy)	Etkisiz	↑ (2)	Etkisiz	↓ (3)	↓ (1)
	Y (en)	Etkisiz	↑ (2)	Etkisiz	↓ (3)	↓ (1)
	Z (kalınlık)	↓ (1)	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz
Çarpılma	↑ (2)	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz	↓ (1)
Ağırlık	↑ (1)	(2) orta seviye en uygun	↑ (3)	(4) orta seviye en uygun	Etkisiz	Etkisiz
ŞH	Kalıcı Şekil	Etkisiz	↓ (3) orta ve üst seviye eşit	Etkisiz	↑ (2) alt ve orta seviye eşit	↑ (1)
	Programlanma (geçici şekil)	Etkisiz	↑ (1)	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz
	Toparlanma	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz	Etkisiz
Kalıntı Gerilmeler	↑ (3) orta ve üst seviye eşit	Etkisiz	↑ (4) orta ve üst seviye eşit	↓ (2) orta ve üst seviye eşit	Etkisiz	(1) Alt ve üst seviye eşit, orta seviye en uygun

Parametrelerin seviyesi arttıkça sonuçlar; ■ Etkisiz, ■ Azalmış, ■ Artmış, ■ Orta seviye en uygun. (1) en etkili faktör, (2) ikinci etkili faktör, (3) üçüncü etkili faktör, (4) dördüncü etkili faktör

7. SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Enjeksiyon basıncının enjeksiyonla kalıplanmış ŞHPU parçaların çekme oranı, çarpılma, ağırlık ve kalıntı gerilmeler üzerinde anlamlı etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Enjeksiyon basıncındaki artış ile parçalardaki toplam çekme oranı azalırken çarpılma ve parça ağırlığının arttığı ortaya çıkarılmıştır. Çarpılma ve kalıntı gerilmeler enjeksiyon basıncı arttıkça artmıştır, ancak orta ve yüksek seviye enjeksiyon basınçlarının etkisi aynı olmuştur.
- Enjeksiyon sıcaklığındaki değişimler, ŞHPU parçaların çekme oranı, ağırlık ve şekil hafızasını istatistikî manada anlamlı etkilemiştir. Malzemenin enjeksiyon sıcaklığı artırıldıkça, parçalardaki çekme oranı azalmış, parça ağırlığı artmış ancak orta ve yüksek seviye için sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır. Enjeksiyon sıcaklığı şekil hafıza etkisi üzerinde en etkili iki parametreden biridir ve enjeksiyon sıcaklığı arttıkça toparlanma oranı istenen %100'e yaklaşmıştır. Yüksek enjeksiyon sıcaklığı ŞHPU malzemenin akış özelliklerini ve dolayısıyla moleküler oryantasyon üzerinden toparlanmayı etkilemiştir.
- Kalıp sıcaklığı ŞHPU parçaların çekme oranı, ağırlık, şekil hafızası ve kalıntı gerilmeler üzerinde etkili bulunmuştur. Kalıp sıcaklığının artırılmasıyla, parçalardaki çekme oranı özellikle alt ve orta seviye arasında artmış ve ağırlıkta sürekli bir artış gözlenmiştir. Orta ve yüksek seviye kalıp sıcaklığında kalıntı gerilmeler birbirine yakın ve yüksek değerde oluşurken, düşük seviye kalıp sıcaklığında kalıntı gerilmeler azalmıştır. Şekil hafıza testlerinin programlama adımı, *programlanma oranı kalıp sıcaklığıyla birlikte artmış* ve en yüksek programlanma oranı yüksek kalıp sıcaklığında elde edilmiştir.
- Ütüleme basıncı ŞHPU parçaların ağırlık ve kalıntı gerilmeleri üzerinde etkili bulunmuştur. Orta ve üst seviye ütüleme basınçlarında kalıntı gerilmeler birbirine yakın ve düşük seviyeye göre daha az oluşmuştur. Parça ağırlığı orta seviye ütüleme basıncında en büyük değere ulaşmıştır.
- Ütüleme süresi parametresinin ŞHPU parçaların boy ve endeki çekme oranları üzerinde etkili olduğu bulunmuştur. Parçaların çarpılma, ağırlık, şekil hafıza etkisi ve kalıntı gerilme özelliklerinin ütüleme süresiyle değişmediği anlaşılmıştır. Ütüleme süresinin artırılmasıyla, şekil hafıza etkisi testlerinde, parçaların programlanma oranı üzerinde %12'lik bir fark oluşmuştur ancak, bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

- Soğutma süresinin parçaların çekme oranı, çarpılma ve kalıntı gerilme değerleri üzerinde istatistiksel olarak en etkili parametre olduğu bulunmuştur. Soğutma süresinin artmasıyla çekme ve çarpılma azalmıştır. Kalıntı gerilmelerin orta seviye soğutma süresinde azaldığı, üst ve alt seviyelerde yükseldiği, en yüksek kalıntı gerilmenin kısa soğutma süresince olduğu bulunmuştur.
- Korelasyon sonuçları basma kalıntı gerilmeleri ve çarpılma arasında ($\alpha=0,05$ anlamlılık düzeyinde) ters orantı göstermektedir. Bunun sebebi olarak gerilmelerin fiziksel deformasyonla rahatlaması (gerilme durulması) görülmüştür.
- Gerilme rahatlaması gerçekleşen parçalarda çarpılma artarken, kalıntı gerilmeler de azalmaktadır.
- Çekme oranı, basma kalıntı gerilmeleri ve çarpılmanın birbiriyle ilişkili olduğu bulunmuştur.
- Yüksek kalıplama sıcaklıkları (enjeksiyon ve kalıp) ŞHPU malzemenin akışını kolaylaştırmakla birlikte kalıptan çıkma sıcaklığını da arttırdığı için ŞHPU parçaların çekme oranı ve dolayısıyla çarpılma ve kalıntı gerilmelerine de etki etmektedir.
- ŞHPU parçalar için programlama işleminde kalıplamadaki çekme oranı kadar ek deformasyon uygulanarak, işlem sonunda istenen parça boyutları elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

8. ÖNERİLER

Bu çalışmada enjeksiyon basıncı, enjeksiyon sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, ütüleme basıncı, ütüleme süresi ve soğutma süresi parametrelerinin sıcaklık duyarlı ŞHPU parçaların çekme, çarpılma, ağırlık, şekil hafıza ve kalıntı gerilme özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın neticesinde ŞHPU parçaların özellikle soğutma süresi, enjeksiyon ve kalıp sıcaklıkları parametrelerinden etkilendiği bulunmuştur. Bu çalışmanın devamında parça kalıptan çıkma sıcaklığı, soğutma hızı ve daha düşük kalıp sıcaklıklarının ayrıca, farklı parça geometrilerinin de ŞHPU parçaların özelliklerine etkileri araştırılabilir. Ek olarak, elde edilen bilgiler ışığında ŞHPU endüstriyel parça üretimi üzerine çalışmalar, ŞHPU malzemeye özel kalıp ve programlama sistem tasarımı yapılması devam etmesi beklenen çalışmalardır.



KAYNAKLAR

1. Guevara-Morales, A. and Figueroa-López, U. (2014). Residual stresses in injection molded products. *Journal of Materials Science*, 49 (13), 4399-4415.
2. Hu, J., Zhu, Y., Huang, H. and Lu, J. (2012). Recent advances in shape-memory polymers: Structure, mechanism, functionality, modeling and applications. *Progress in Polymer Science*, 37 (2012), 1720–1763.
3. Wei, Z.G., Sandström, R. and Miyazaki, S. (1998). Review: Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems. Part I Shape-memory materials. *Journal of Materials Science*, 33 (1998), 3743-3762.
4. Wei, Z.G., Sandström, R. and Miyazaki, S. (1998). Review: Shape-memory materials and hybrid composites for smart systems. Part II Shape-memory hybrid composites. *Journal of Materials Science*, 33 (1998), 3763-3783.
5. Sun, L., Huang, W.M., Ding, Z., Zhao, Y., Wang, C.C., Purnawali, H. and Tang, C. (2012). Stimulus-responsive shape memory materials: A review. *Materials and Design*, 33 (2012), 577–640.
6. Lendlein, A. and Kelch, S. (2002). Shape-Memory Polymers. *Angewandte Chemie International Edition*, 41 (17), 2034-2057.
7. Hu, J. and Chen, S. (2010). A review of actively moving polymers in textile applications. *Journal of Materials Chemistry*, 20 (17), 3346-3355.
8. Huang, W. (2002). On the selection of shape memory alloys for actuators. *Materials and Design*, 23 11-19.
9. Kim, B.K., Lee, S.Y. and Xu, M. (1996). Polyurethanes having shape memory effects. *Polymer*, 37 (26), 5781–5793.
10. Li, F., Zhang, X., Hou, J., Xu, M., Luo, X., Ma, D. and Kim, B. (1997). Studies on thermally stimulated shape memory effect of segmented polyurethane. *Journal of Applied Polymer Science*, 64 1511–1516.
11. Lin, J.R. and Chen, L.W. (1998). Study on shape-memory behavior of polyetherbased polyurethanes. I. Influence of the hard-segment content. *Journal of Applied Polymer Science*, 69 (8), 1563–1574.
12. Lin, J.R. and Chen, L.W. (1998). Study on shape-memory behavior of polyetherbased polyurethanes. II. Influence of soft-segment molecular weight. *Journal of Applied Polymer Science*, 69 (8), 1575–1586.
13. Kumar, S. and Pandya, M.V. (1997). Thermally recoverable crosslinked polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 64 (5), 823–829.
14. Ikeda, T. and Ube, T. (2011). Photomobile polymer materials: from nano to macro. *Materials Today*, 14 (10), 480-487.

15. Chung, T., Rorno-Urbe, A. and Mather, P. (2008). Two-way reversible shape memory in a semicrystalline network. *Macromolecules*, 41 (1), 184–192.
16. Tobushi, H., Hayashi, S., Sugimoto, Y. and Date, K. (2010). Fabrication and twoway deformation of shape memory composite with SMA and SMP. *Materials Science Forum*, 638–642 (2010), 2189–2194.
17. Winzek, B., Schmitz, S., Rumpf, H., Sterzl, T., Hassdorf, R., Thienhaus, S., Feydt, E., Moske, M. and Quandt, E. (2004). Recent developments in shape memory thin film technology. *Materials Science and Engineering: A*, 378 (1-2), 40–46.
18. Chen, S., Hu, J., Zhuo, H. and Zhu, Y. (2008). Two-way shape memory effect in polymer laminates. *Materials Letters* 62 (25), 4088–4090.
19. Hu, J.L., Chen, S.J. and Zhuo, H.T. (2010). Properties and mechanism of two-way shape memory polyurethane composites. *Composites Science and Technology*, 70 (10), 1437–1443.
20. Behl, M. and Lendlein, A. (2007). Shape-memory polymers. *Materials Today*, 10 (4), 20-28.
21. Ma, Z., Zhao, W., Liu, Y. and Shi, J. (1997). Synthesis and properties of intumescent, phosphorus-containing, flame-retardant polyesters. *Journal of Applied Polymer Science*, 63 (12), 1511-1515.
22. Jeong, H.M., Lee, J.B., Lee, S.Y. and Kim, B.K. (2000). Shape memory polyurethane containing mesogenic moiety. *Journal of Materials Science*, 35 (2), 279-283.
23. Jeong, H.M., Lee, S.Y. and Kim, B.K. (2000). Shape memory polyurethane containing amorphous reversible phase. *Journal of Materials Science*, 35 (7), 1579-1583.
24. Ni, X. and Sun, X. (2006). Block copolymer of trans-polyisoprene and urethane segment: Shape memory effects. *Journal of Applied Polymer Science*, 100 (2), 879-885.
25. Cho, J.W., Jung, Y.C., Chung, Y.-C. and Chun, B.C. (2004). Improved mechanical properties of shape-memory polyurethane block copolymers through the control of the soft-segment arrangement. *Journal of Applied Polymer Science*, 93 (5), 2410-2415.
26. Booth, C.J., Kindinger, M., McKenzie, H.R., Handcock, J., Bray, A.V. and Beall, G.W. (2006). Copolyterephthalates containing tetramethylcyclobutane with impact and ballistic properties greater than bisphenol A polycarbonate. *Polymer*, 47 (18), 6398-6405.
27. Charlesby, A. (1960). *Atomic Radiation and Polymers*. New York: Pergamon Press.
28. G. Zhu, G. Liang, Q. Xu and Yu, Q. (2003). Shape-memory effects of radiation crosslinked poly(ϵ -caprolactone). *Applied Polymer Science*, 90 (6), 1589-1595.
29. Zhu, G., Xu, S., Wang, J. and Zhang, L. (2006). Shape memory behaviour of radiation-crosslinked PCL/PMVS blends. *Radiation Physics and Chemistry*, 75 (3), 443-448.

30. Maitland, D.J., Metzger, M.F., Schumann, D., Lee, A. and Wilson, T.S. (2002). Photothermal properties of shape memory polymer micro-actuators for treating stroke. *Lasers in Surgery and Medicine*, 30 (1), 1-11.
31. Small IV, W., Wilson, T.S., Benett, W.J., Loge, J.M. and Maitland, D.J. (2005). Laser-activated shape memory polymer intravascular thrombectomy device. *Optics Express*, 13 (20), 8204-8213.
32. Biercuk, M.J., Llaguno, M.C., Radosavljevic, M., Hyun, J.K., Johnson, A.T. and Fischer, J.E. (2002). Carbon nanotube composites for thermal management. *AIP Applied Physics Letters*, 80 (15), 2767-2769.
33. Cho, J.W., Kim, J.W., Jung, Y.C. and Goo, N.S. (2005). Electroactive Shape-Memory Polyurethane Composites Incorporating Carbon Nanotubes. *Macromolecular Rapid Communications*, 26 (5), 412-416.
34. Koerner, H., Price, G., Pearce, N.A., Alexander, M. and Vaia, R.A. (2004). Remotely actuated polymer nanocomposites—stress-recovery of carbon-nanotube-filled thermoplastic elastomers. *Nature Materials*, 3 (2), 115-120.
35. Mohr, R., Kratz, K., Weigel, T., Lucka-Gabor, M., Moneke, M. and Lendlein, A. (2006). Initiation of shape-memory effect by inductive heating of magnetic nanoparticles in thermoplastic polymers. *PNAS*, 103 (10), 3540–3545.
36. Buckley, P.R., Mckinley, G.H., Wilson, T.S., Small, W., Benett, W.J., Bearinger, J.P., Mcelfresh, M.W. and Maitland, D.J. (2006). Inductively Heated Shape Memory Polymer for the Magnetic Actuation of Medical Devices. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 53 (10), 2075-2083.
37. Yang, B., Huang, W.M., Li, C., Lee, C.M. and Li, L. (2004). On the effects of moisture in a polyurethane shape memory polymer. *Smart Materials and Structures*, 13 (1), 191-195.
38. Huang, W.M., Yang, B., An, L., Li, C. and Chan, Y.S. (2005). Water-driven programmable polyurethane shape memory polymer: Demonstration and mechanism. *AIP Applied Physics Letters*, 86 (2005), 114105-1 - 114105-3.
39. Yang, B., Huang, W.M., Li, C. and Li, L. (2006). Effects of moisture on the thermomechanical properties of a polyurethane shape memory polymer. *Polymer*, 47 (4), 1348-1356.
40. Yang, B., Huang, W.M., Li, C., Li, L. and Chor, J.H. (2005). Qualitative separation of the effects of carbon nano-powder and moisture on the glass transition temperature of polyurethane shape memory polymer. *Scripta Materialia*, 53 (1), 105-107.
41. Lendlein, A., Jiang, H., Junger, O. and Langer, R. (2005). Light-induced shape-memory polymers. *Nature*, 434 (7035), 879-882.

42. Sokolowski, W., Metcalfe, A., Hayashi, S., Yahia, L.H. and Raymond, J. (2007). Medical applications of shape memory polymers. *Biomedical Materials*, 2 (2007), 23-27.
43. H. Tobushi, S. Hayashi, A. Ikai and Hara, H. (1996). Thermomechanical Properties of Shape Memory Polymers of Polyurethane Series and their Applications. *Journal de Physique IV Colloque*, 06 (C1) C1-377-C1-384.
44. Gu, X. and Mather, P.T. (2012). Entanglement-based shape memory polyurethanes: synthesis and characterization. *Polymer*, 53 (25), 5924-5934.
45. Jung, Y.C. and Cho, J.W. (2010). Application of shape memory polyurethane in orthodontic. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 21 (2010), 2881–2886.
46. Arzberger, S.C., Tupper, M.L., Lake, M.S., Barrett, R., Mallick, K., Hazelton, C., Francis, W., Keller, P.N., Campbell, D., Feucht, S., Codell, D., Wintergerst, J., Adams, L., Mallioux, J., Denis, R., White, K., Long, M., Munshi, N.A. and Gall, K. (2005, June). *Elastic Memory Composites (EMC) for deployable industrial and commercial applications*. Paper presented at the Smart Structures and Materials 2005: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies. San Diego, CA.
47. Lan, X., Liu, Y., Lv, H., Wang, X., Leng, J. and Du, S. (2009). Fiber reinforced shape-memory polymer composite and its application in a deployable hinge. *Smart Materials and Structures*, 18 (2), 024002-1 - 024002-6.
48. Barrett, R., Taylor, R., Keller, P.N., Codell, D. and Adams, L. (2007, August 13-16). *Deployable Reflectors for Small Satellites*. Paper presented at the 21st Annual Conference on Small Satellites. Logan, UT.
49. Wache, H.M., Tartakowska, D.J., Hentrich, A. and Wagner, M.H. (2003). Development of polymer stent with shape memory effect as a drug delivery system. *Journal of Material Science: Materials in Medicine* 14 (2), 109-112.
50. Farokhzad, O.C., Dimitrakov, J.D., Karp, J.M., Khademhosseini, A., Freeman, M.R. and Langer, R. (2006). Drug Delivery Systems In Urology—Getting “Smarter”. *Urology*, 68 (3), 463–469.
51. Huang, W.M., Song, C.L., Fu, Y.Q., Wang, C.C., Zhao, Y., Purnawali, H., Lu, H.B., Tang, C., Ding, Z. and Zhang, J.L. (2013). Shaping tissue with shape memory materials. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 65 (4), 515–535.
52. Chew, B.H., Paterson, R.F., Clinkscales, K.W., Levine, B.S., Shalaby, S.W. and Lange, D. (2013). In Vivo Evaluation of the Third Generation Biodegradable Stent: A Novel Approach to Avoiding the Forgotten Stent Syndrome. *The Journal of Urology*, 189 (2), 719-725.
53. Mani, G., Feldman, M.D., Patel, D. and Agrawala, C.M. (2007). Coronary stents: A materials perspective. *Biomaterials*, 28 (9), 1689–1710.

54. Erbel, R., Böse, D., Haude, M., Kordish, I., Churzidze, S., Malyar, N., Konorza, T. and Sack, S. (2007). Absorbable Coronary Stents. New Promising Technology. *Herz*, 32 (4), 308-319.
55. Venkatraman, S., Poa, T.L., Vinali, T., Mak, K.H. and Boey, F. (2003). Collapse pressures of biodegradable stents. *Biomaterials*, 24 (12), 2105–2111.
56. Tang, S., Zhang, C.-Y., Huang, M.-N., Luo, Y.-F. and Liang, Z.-Q. (2013). Fallopian tube occlusion with a shape memory polymer device: evaluation in a rabbit model. *Contraception*, 87 (2), 235–241.
57. Hayashi, S. (1993). Properties and applications of polyurethane series shape memory polymer. Amsterdam: Elsevier Science B.V.
58. Wischke, C. and Lendlein, A. (2010). Shape-Memory Polymers as Drug Carriers—A Multifunctional System. *Pharmaceutical Research*, 27 (4), 527-529.
59. Chiodo, J.D., Billett, E.H. and Harrison, D.J. (1999, May 11-19). *Active disassembly using shape memory polymers for the mobile phone industry*. Paper presented at the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment - ISEE. Denver, Massachusetts, USA.
60. Chiodo, J.D., Harrison, D.J. and Billett, E.H. (2001). An initial investigation into active disassembly using shape memory polymers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 215 (5), 733-741.
61. Carrell, J., Tate, D., Wang, S. and Zhang, H.-C. (2011). Shape memory polymer snap-fits for active disassembly. *Journal of Cleaner Production*, 19 (17-18), 2066-2074.
62. He, B., Li, H. and Jin, K. (2013). Shape memory polymer actuated hollow snap-fit design analysis. *Materials and Design*, 47 (May 2013), 539–550.
63. Li, H., Jin, K., He, B. and Chen, Y. (2012). Hollow structure snap-fit design embedded with shape memory polymer sheet. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (1), 31–34.
64. Chiodo, J.D., Billett, E.H. and Harrison, D.J. (1999, February). *Preliminary Investigations of Active Disassembly Using Shape Memory Polymers*. Paper presented at the Eco Design 1999, IEEE International Symposium on Electronics and the Environment Tokyo, Japan.
65. Zhang, H.-C., Carrell, J., Wang, S., Tate, D. and Imam, S. (2012). Investigation of a multiple trigger active disassembly element. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61 (1), 27–30.
66. Ghosh, P., Rao, A. and Srinivasa, A.R. (2013). Design of multi-state and smart-bias components using Shape Memory Alloy and Shape Memory Polymer composites. *Materials and Design*, 44 (February 2013), 164–171.

67. Rosato, D.V. and Rosato, D.V. (1999). *Injection Molding Handbook*. Kluwer Academic Publishers.
68. Miles, D.C. and Briston, J.H. (1996). *Polymer Technology*. New York: Chemical Publishing Co. Inc.
69. Goodship, V. (2004). *Arburg Practical Guide to Injection Moulding*. United Kingdom: Smithers Rapra.
70. Harper, C.A. (2006). *Handbook of Plastics Technologies*. New York: McGraw-Hill Professional.
71. Kovacs, J.G. and Siklo, B. (2011). Test method development for deformation analysis of injection moulded plastic parts. *Polymer Testing*, 30 (5), 543-547.
72. Akay, M., Ozden, S. and Tansey, T. (1996). Prediction of process-induced warpage in injection molded thermoplastics. *Polymer Engineering and Science*, 36 (13), 1839–1846.
73. Bushko, W.C. and Stokes, V.K. (1995). Solidification of thermovisco-elastic melts. Part II: Effects of processing conditions on shrinkage and residual stresses. *Polymer Engineering and Science*, 35 (4), 365–383.
74. Kurt, M., Kamber, O.S., Kaynak, Y., Atakok, G. and Girit, O. (2009). Experimental investigation of plastic injection molding: assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Materials and Design*, 30 (September 2009), 3217–3224.
75. Postawa, P. and Koszkuł, J. (2005). Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163 (May 2005), 109–115.
76. Jansen, K.M.B., Dijk, D.J.V. and Husselman, M.H. (1998). Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding. *Polymer Engineering and Science*, 38 (5), 838–846.
77. Aisa, J. and Castany, J. (2009). Dimensional study of thermoplastic parts made using sequential injection molding. *Polymer Engineering and Science*, 49 (9), 1832–1838.
78. Flaman, A.A.M. (1993). Buildup and relaxation of molecular orientation in injection molding. Part I: Formulation. *Polymer Engineering and Science*, 33 (4), 193–201.
79. Flaman, A.A.M. (1993). Buildup and relaxation of molecular orientation in injection molding. Part II: Experimental verification. *Polymer Engineering and Science*, 33 (4), 202–210.
80. Huang, M.C. and Tai, C.C. (2001). The effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature. *Journal of Materials Processing Technology*, 110 (1), 1-9.

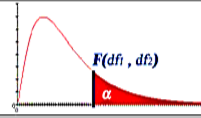
81. Ozcelik, B. and Sonat, I. (2009). Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding. *Materials and Design*, 30 (2), 367–375.
82. Wang, X., Zhao, G. and Wang, G. (2013). Research on the reduction of sink mark and warpage of the moulded part in rapid heat cycle moulding process. *Materials and Design*, 47 (May 2013), 779–792.
83. Oktem, H., Erzurumlu, T. and Uzman, I. (2007). Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part. *Materials and Design*, 28 (4), 1271–1278.
84. Chen, C.P., Chuang, M.T., Hsiao, Y.H., Yang, Y.K. and Tsai, C.H. (2009). Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis. *Expert Systems with Applications*, 36 (7), 10752–10759.
85. Mathivanan, D. and Parthasarathy, N.S. (2009). Sink-mark minimization in injection molding through response surface regression modeling and genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45 (2009), 867–874.
86. Mathivanan, D. and Parthasarathy, N.S. (2009). Prediction of sink depths using nonlinear modeling of injection molding variables. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43 (7), 654–663.
87. Kazmer, D. and Barkan, P. (1997). Multi-cavity pressure control in the filling and packing stages of the injection molding process. *Polymer Engineering and Science*, 37 (11), 1865–1879.
88. Leo, V. and Cuvellez, C. (1996). The effect of the packing parameters, gate geometry, and mold elasticity on the final dimensions of a molded part. *Polymer Engineering and Science*, 36 (15), 1961–1971.
89. Delaunay, D., Le Bot, P., Fulchiron, R., Luye, J.F. and Regnier, G. (2000). Nature of contact between polymer and mold in injection molding. Part II: Influence of mold deflection on pressure history and shrinkage. *Polymer Engineering and Science*, 40 (7), 1692–1700.
90. Katmer, Ş. and Karataş, Ç. (2015). Effects of Injection Molding Conditions on Residual Stress in HDPE and PP Parts. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (3), 319–327.
91. Siegmann, A., Buchman, A. and Kenig, S. (1982). Residual stresses in polymers III: The influence of injection-molding process conditions. *Polymer Engineering and Science*, 22 (9), 560–568.
92. Hastenberg, C.H.V., Wildervanck, P.C., Leenen, A.J.H. and Schennink, G.G.J. (1992). The measurement of thermal stress distributions along the flow path in injection-molded flat plates. *Polymer Engineering and Science*, 32 (7), 506–515.

93. Katmer, Ş. and Karataş, Ç. (2012). The Effects of Molding Conditions on The Residual Stresses in Injection Molded Polystyrene Flat Parts. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (3), 501-507.
94. Wang, T.H. and Young, W.B. (2005). Study on residual stresses of thin-walled injection molding. *European Polymer Journal*, 41 (10), 2511–2517.
95. Chen, W.C., Tai, P.H., Wang, M.W., Deng, W.J. and Chen, C.T. (2008). A neural network-based approach for dynamic quality prediction in a plastic injection molding process. *Expert Systems with Applications*, 35 (3), 843–849.
96. Jansen, K. and Titomanlio, G. (1996). Effect of pressure history on shrinkage and residual stresses— injection molding with con-strained shrinkage. *Polymer Engineering and Science*, 36 (15), 2029–2040.
97. Sa’nchez, R., Aisa, J., Martinez, A. and Mercado, D. (2012). On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding. *Measurement*, 45 (5), 1051–1056.
98. Glomsaker, T., Larsen, A. and Andreassen, E. (2005). Experimental and numerical investigation of warpage of semicrystalline polymers in rotational molding. *Polymer Engineering and Science*, 45 (7), 945–952.
99. Clutton, E.Q. and Williams, J.G. (1995). On the measurement of residual stress in plastic pipes. *Polymer Engineering and Science*, 35 (17), 1381–1386.
100. Hassan, H., Regnier, N., Le Bot, C. and Defaye, G. (2010). 3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding. *International Journal of Thermal Sciences*, 49 (1), 161-169.
101. Hassan, H., Regnier, N., Pujos, C., Arquís, E. and Defaye, G. (2010). Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding. *Applied Thermal Engineering*, 30 (13), 1547–1557.
102. Tang, L.Q., Chassapis, C. and Manoochchri, S. (1997). Optimal cooling system design for multi-cavity injection molding. *Finite Elements in Analysis and Design*, 26 (3), 229–251.
103. Qiao, H. (2006). A systematic computer-aided approach to cooling system optimal design in plastic injection molding. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48 (4), 430-439.
104. Lu, X. and Khim, L.S. (2001). A Statistical Experimental Study of The Injection Molding of Optical Lenses. *Journal of Materials Processing Technology*, 113 (1-3), 189-195.
105. Zhil’tsova, T.V., Oliveira, M.S.A. and Ferreira, J.A.F. (2009). Relative influence of injection molding processing conditions on HDPE acetabular cups dimensional stability. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (8), 3894–3904.

- 106.Kabanemi, K.K., Vaillancourt, H., Wang, H. and Salloum, G. (1998). Residual Stresses, Shrinkage, and Warpage of Complex Injection Molded Products: Numerical Simulation and Experimental Validation. *Polymer Engineering and Science*, 38 (1), 21-37.
- 107.Gao, Y. and Wang, X. (2009). Surrogate-based process optimization for reducing warpage in injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (3), 1302–1309.
- 108.Chiang, K.T. (2007). The optimal process conditions of an injection-molded thermoplastic part with a thin shell feature using grey-fuzzy logic: A case study on machining the PC/ABS cell phone shell. *Materials and Design*, 28 (6), 1851–1860.
- 109.Amran, M.A.M., Idayu, N., Faizal, K.M., Sanusi, M., Izamshah, R. and Shahir, M. (2016). Part weight verification between simulation and experiment of plastic part in injection moulding process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 160 (1), 012016.
- 110.Jiang, B., Shen, L. and Weng, C. (2013). A weight analysis for the replication accuracy improvement of injection-molded microlens arrays. *Optoelectronics And Advanced Materials-Rapid Communications*, 7 (3-4), 173-178.
- 111.Charly, A., Christopher, J.G.P. and Jan-Anders, E.M. (2011). Isothermal recovery rates in shape memory polyurethanes. *Smart Materials and Structures*, 20 (8), 082002.
- 112.Pandini, S., Bignotti, F., Baldi, F. and Passera, S. (2013). Network architecture and shape memory behavior of cold-worked epoxies. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24 (13), 1583-1597.
- 113.Wu, X.L., Huang, W.M. and Tan, H.X. (2013). Characterization of shape recovery via creeping and shape memory effect in ether-vinyl acetate copolymer (EVA). *Journal of Polymer Research*, 20 (8), 150.
- 114.Meng, H. and Li, G. (2013). A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites. *Polymer*, 54 (9), 2199-2221.
- 115.Li, H., Zhong, J., Meng, J. and Xian, G. (2013). The reinforcement efficiency of carbon nanotubes/shape memory polymer nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 44 (1), 508-516.
- 116.Fritzsche, N. and Pretsch, T. (2014). Programming of Temperature-Memory Onsets in a Semicrystalline Polyurethane Elastomer. *Macromolecules*, 47 (17), 5952-5959.
- 117.Mirtschin, N. and Pretsch, T. (2015). Designing temperature-memory effects in semicrystalline polyurethane. *RSC Advances*, 5 (2015), 46307–46315.
- 118.Ji, F.L., Hu, J.L. and Chui, S.S.-Y. (2012). Influences of phase composition and thermomechanical conditions on shape memory properties of segmented polyurethanes with amorphous reversible phase. *Polymer Engineering and Science*, 52 (5), 1015-1026.





EK-1. $\alpha=0,05$ için standart F çizelgesi $\alpha = 0.05$ için F Tablosu

/	df ₁ =1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
df ₂ =1	161.4476	199.5000	215.7073	224.5832	230.1619	233.9860	236.7684	238.8827	240.5433	241.8817	243.9060	245.9499	248.0131	249.0518	250.0951	251.1432	252.1957	253.2529	254.3144
2	18.5128	19.0000	19.1643	19.2468	19.2964	19.3295	19.3532	19.3710	19.3848	19.3959	19.4125	19.4291	19.4458	19.4541	19.4624	19.4707	19.4791	19.4874	19.4957
3	10.1280	9.5521	9.2766	9.1172	9.0135	8.9406	8.8867	8.8452	8.8123	8.7855	8.7446	8.7029	8.6602	8.6385	8.6166	8.5944	8.5720	8.5494	8.5264
4	7.7086	6.9443	6.5914	6.3882	6.2561	6.1631	6.0942	6.0410	5.9988	5.9644	5.9117	5.8578	5.8025	5.7744	5.7459	5.7170	5.6877	5.6581	5.6281
5	6.6079	5.7861	5.4095	5.1922	5.0503	4.9503	4.8759	4.8183	4.7725	4.7351	4.6777	4.6188	4.5581	4.5272	4.4957	4.4638	4.4314	4.3985	4.3650
6	5.9874	5.1433	4.7571	4.5337	4.3874	4.2839	4.2067	4.1468	4.0990	4.0600	3.9999	3.9381	3.8742	3.8415	3.8082	3.7743	3.7398	3.7047	3.6689
7	5.5914	4.7374	4.3468	4.1203	3.9715	3.8660	3.7870	3.7257	3.6767	3.6365	3.5747	3.5107	3.4445	3.4105	3.3758	3.3404	3.3043	3.2674	3.2298
8	5.3177	4.4590	4.0662	3.8379	3.6875	3.5806	3.5005	3.4381	3.3881	3.3472	3.2839	3.2184	3.1503	3.1152	3.0794	3.0428	3.0053	2.9669	2.9276
9	5.1174	4.2565	3.8625	3.6331	3.4817	3.3738	3.2927	3.2296	3.1789	3.1373	3.0729	3.0061	2.9365	2.9005	2.8637	2.8259	2.7872	2.7475	2.7067
10	4.9646	4.1028	3.7083	3.4780	3.3258	3.2172	3.1355	3.0717	3.0204	2.9782	2.9130	2.8450	2.7740	2.7372	2.6996	2.6609	2.6211	2.5801	2.5379
11	4.8443	3.9823	3.5874	3.3567	3.2039	3.0946	3.0123	2.9480	2.8962	2.8536	2.7876	2.7186	2.6464	2.6090	2.5705	2.5309	2.4901	2.4480	2.4045
12	4.7472	3.8853	3.4903	3.2592	3.1059	2.9961	2.9134	2.8486	2.7964	2.7534	2.6866	2.6169	2.5436	2.5055	2.4663	2.4259	2.3842	2.3410	2.2962
13	4.6672	3.8056	3.4105	3.1791	3.0254	2.9153	2.8321	2.7669	2.7144	2.6710	2.6037	2.5331	2.4589	2.4202	2.3803	2.3392	2.2966	2.2524	2.2064
14	4.6001	3.7389	3.3439	3.1122	2.9582	2.8477	2.7642	2.6987	2.6458	2.6022	2.5342	2.4630	2.3879	2.3487	2.3082	2.2664	2.2229	2.1778	2.1307
15	4.5431	3.6823	3.2874	3.0556	2.9013	2.7905	2.7066	2.6408	2.5876	2.5437	2.4753	2.4034	2.3275	2.2878	2.2468	2.2043	2.1601	2.1141	2.0658
16	4.4940	3.6337	3.2389	3.0069	2.8524	2.7413	2.6572	2.5911	2.5377	2.4935	2.4247	2.3522	2.2756	2.2354	2.1938	2.1507	2.1058	2.0589	2.0096
17	4.4513	3.5915	3.1968	2.9647	2.8100	2.6987	2.6143	2.5480	2.4943	2.4499	2.3807	2.3077	2.2304	2.1898	2.1477	2.1040	2.0584	2.0107	1.9604
18	4.4139	3.5546	3.1599	2.9277	2.7729	2.6613	2.5767	2.5102	2.4563	2.4117	2.3421	2.2686	2.1906	2.1497	2.1071	2.0629	2.0166	1.9681	1.9168
19	4.3807	3.5219	3.1274	2.8951	2.7401	2.6283	2.5435	2.4768	2.4227	2.3779	2.3080	2.2341	2.1555	2.1141	2.0712	2.0264	1.9795	1.9302	1.8780
20	4.3512	3.4928	3.0984	2.8661	2.7109	2.5990	2.5140	2.4471	2.3928	2.3479	2.2776	2.2033	2.1242	2.0825	2.0391	1.9938	1.9464	1.8963	1.8432
21	4.3248	3.4668	3.0725	2.8401	2.6848	2.5727	2.4876	2.4205	2.3660	2.3210	2.2504	2.1757	2.0960	2.0540	2.0102	1.9645	1.9165	1.8657	1.8117
22	4.3009	3.4434	3.0491	2.8167	2.6613	2.5491	2.4638	2.3965	2.3419	2.2967	2.2258	2.1508	2.0707	2.0283	1.9842	1.9380	1.8894	1.8380	1.7831
23	4.2793	3.4221	3.0280	2.7955	2.6400	2.5277	2.4422	2.3748	2.3201	2.2747	2.2036	2.1282	2.0476	2.0050	1.9605	1.9139	1.8648	1.8128	1.7570
24	4.2597	3.4028	3.0088	2.7763	2.6207	2.5082	2.4226	2.3551	2.3002	2.2547	2.1834	2.1077	2.0267	1.9838	1.9390	1.8920	1.8424	1.7896	1.7330
25	4.2417	3.3852	2.9912	2.7587	2.6030	2.4904	2.4047	2.3371	2.2821	2.2365	2.1649	2.0889	2.0075	1.9643	1.9192	1.8718	1.8217	1.7684	1.7110
26	4.2252	3.3690	2.9752	2.7426	2.5868	2.4741	2.3883	2.3205	2.2655	2.2197	2.1479	2.0716	1.9898	1.9464	1.9010	1.8533	1.8027	1.7488	1.6906
27	4.2100	3.3541	2.9604	2.7278	2.5719	2.4591	2.3732	2.3053	2.2501	2.2043	2.1323	2.0558	1.9736	1.9299	1.8842	1.8361	1.7851	1.7306	1.6717
28	4.1960	3.3404	2.9467	2.7141	2.5581	2.4453	2.3593	2.2913	2.2360	2.1900	2.1179	2.0411	1.9586	1.9147	1.8687	1.8203	1.7689	1.7138	1.6541
29	4.1830	3.3277	2.9340	2.7014	2.5454	2.4324	2.3463	2.2783	2.2229	2.1768	2.1045	2.0275	1.9446	1.9005	1.8543	1.8055	1.7537	1.6981	1.6376
30	4.1709	3.3158	2.9223	2.6896	2.5336	2.4205	2.3343	2.2662	2.2107	2.1646	2.0921	2.0148	1.9317	1.8874	1.8409	1.7918	1.7396	1.6835	1.6223
40	4.0847	3.2317	2.8387	2.6060	2.4495	2.3359	2.2490	2.1802	2.1240	2.0772	2.0035	1.9245	1.8389	1.7929	1.7444	1.6928	1.6373	1.5766	1.5089
60	4.0012	3.1504	2.7581	2.5252	2.3683	2.2541	2.1665	2.0970	2.0401	1.9926	1.9174	1.8364	1.7480	1.7001	1.6491	1.5943	1.5343	1.4673	1.3893
120	3.9201	3.0718	2.6802	2.4472	2.2899	2.1750	2.0868	2.0164	1.9588	1.9105	1.8337	1.7505	1.6587	1.6084	1.5543	1.4952	1.4290	1.3519	1.2539
∞	3.8415	2.9957	2.6049	2.3719	2.2141	2.0986	2.0096	1.9384	1.8799	1.8307	1.7522	1.6664	1.5705	1.5173	1.4591	1.3940	1.3180	1.2214	1.0000

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :KATMER, Şükran
 Uyuğu :T.C.
 Doğum tarihi ve yeri :15.10.1984, Rize
 Medeni hali :Bekar
 e-mail :sukran.katmer@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/Makine Eğitimi	Devam Ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Makine Eğitimi	2010
Lisans	Gazi Üniversitesi/Kalıpcılık Öğretmenliği	2006
Lise	Rize İmam Hatip Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-2016	Institute für Kunststoffeverarbeitung (IKV), Aachen	Konuk Araştırmacı
2012-2015	Yalova Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2010-2012	Arçelik A.Ş. Bulaşık Makinesi İşletmesi	Ar-Ge Yapısal Tasarım Teknik Öğretmen
2006-2008	Mesa İmalat, Ankara	Tasarımcı, Teknik Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Yayınlar

-Hopmann, Christian; Ochotta, Philipp; Katmer, Sukran; Bobzin, Kirsten; Oete, Mehmet; Knoch, Martin; Liao, Xifang. "The Electrical Properties of Partially Metallized Plastics Parts and their Influencing Factors Produced with the In-Mould-Metal-Spraying (IMMS)". 12th

International Congress on Molded Interconnect Devices (MID), SEP 28-29, 2016, Wurzburg, Germany.

-Hopmann, Christian; Theunissen, Matthias; Ochotta, Philipp; Katmer, Sukran; Bobzin, Kirsten; Öte, Mehmet; Linke, Thomas Frederik; Liao, Xifang. “Production of plastics parts with partially or fully metallic surfaces using the In-Mould-Metal-Spraying (IMMS)”. (PPS-32, 25-29 July 2016, Lyon, France) In Press

-Katmer, S., Esen, H., Karatas, C., “Residual stresses in injection molded shape memory polymer parts”, AIP Conference Proceedings, Volume 1713, Issue 1, id.140003, 2016. (PPS-31 7-11 June 2015, Jeju Island, South Korea)

-Katmer, Ş., Karataş, Ç., “YYPE ve PP Parçalardaki Kalıntı Gerilmelere Enjeksiyon Kalıplama Şartlarının Etkileri”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 30, No 3, 319-327, 2015.

-Katmer, Ş., Karataş, Ç., “Plastik Enjeksiyon Kalıplama Şartlarının Polistiren Düz Parçalardaki Kalıntı Gerilmelere Etkileri”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 27, No 3, 501-507, 2012.

-Katmer, Ş., Karataş, Ç., “The Relationship Between the Residual Stress and Tensile Strength of Molded Plastic”, ISPART-13 (1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition), May 29-31, 2013, Gazi University, Ankara, Turkey.

-Katmer, Ş., Karataş, Ç., Ünal, H.İ., “Effects of Injection Molding Conditions on Residual Stresses in Injection Molded Amorphous and Semi-Crystalline Flat Plates: Experiments”, PPS 26 – IST (Proceeding of the Polymer Processing Society 26th Regional Meeting), October 20-23, 2010, Istanbul, Turkey.

-Katmer, Ş., Karataş, Ç., “Effects of Injection Molding Conditions on Warpage and Residual Stresses in Molded Semi-Crystalline Plastic Parts”, IMSP’2010 (13th International Materials Symposium), October 13-15, 2010, Pamukkale University, Denizli, Turkey.

Hobiler

İngilizce ve Almanca polisiye film izlemek ve kitap okumak, doğa ve şehir yürüyüşü yapmak.

DİZİN

A

ABS 18, 40, 42
Açılır anten 15
Ağırlık 23, 28, 31, 37, 43, 44, 63, 65
ANOVA 37, 38, 41

C

Camsı geçiş sıcaklığı 3, 9, 12, 25, 57

Ç

Çekme oranı 1, 5, 24, 31, 37, 38, 45, 47, 60, 63, 64
Çarpılma 1, 22, 23, 24, 28, 31, 37, 40, 41, 42, 43, 45, 51, 54, 55, 60, 63, 64, 65
Çekme Testi 5, 28
Çekme Test Cihazı 31, 33

D

DSC 25, 26, 45, 47, 57

E

EAİ 25
Elastik Hafızalı Kompozit 15
Enjeksiyon basıncı 1, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 51, 52, 54, 55, 56, 63, 65
Enjeksiyon sıcaklığı 1, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 58, 59, 63, 65
Eşitlik 26, 31, 32, 34, 35

G

Geçici şekil 3, 4, 8, 11, 12
Geçici şekil kararlılığı 47
Geçiş sıcaklığı 3, 4, 6, 7, 8, 9, 12, 13
Güneş paneli 15, 16

I

Işık duyarlı ŞHP 7, 11

İ

İki Yönlü SHE 6, 7
İlaç salım sistemi 16

K

Kalıcı şekil 4, 5 44, 45, 48
Kalıcı şekil kararlılığı 32, 45
Kalıntı gerilme 1, 23, 24, 26, 28, 33, 34, 35, 37, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 63, 64, 65
Kalıp sıcaklığı 1, 22, 23, 24, 26, 37, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 51, 52, 53, 56, 57, 58, 63, 65
Kateter 16
Kızılötesi 9, 10, 17

Kristalleşme Sıcaklığı 25

L

LDI 13

M

Manyetik alan duyarlı ŞHP 3, 10, 19
Menteşe 15, 16

N

Nem duyarlı ŞHP 1, 3, 6

O

Ortodontik tel 16

P

Poli(butilen adipat) (PBA) 50
Poli(ε-kaprolakton) (PCL) 10, 13
Poli(ester ürethan) (PEU) 50
Poli(etilen glikol) (PEG) 13
Polikarbonat (PC) 40
Polistiren (PS) 15, 24, 40, 42, 43, 50, 56
Programlama 1, 4, 5, 19, 32, 44, 46, 47, 48, 49, 50, 57, 63, 64, 65

S

Sıvı Kristal Elastomer (SKE) 6, 9, 8, 19
Sıcaklık duyarlı ŞHP 4, 6, 9, 10
Soğutma süresi 1, 21, 23, 24, 26, 37, 39, 40, 41, 42, 44, 46, 47, 48, 51, 52, 53, 54, 57, 64, 65
Stent 16

Ş

ŞHA 3, 7
ŞHPU 4, 20, 21, 23, 25, 28, 47

T

Tek yönlü SHE 4, 5
TGA 25, 26
Toparlanma 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 18, 23, 26, 28, 31, 32, 44, 45, 48, 49, 50, 60, 63

U

UV ışık 7, 11

Ü

Üçlü SHE 8
Ütüleme basıncı 1, 21, 22, 23, 2, 26, 27, 40, 42, 43, 44, 51, 52, 54, 55, 56, 63, 65
Ütüleme süresi 1, 23, 24, 26, 37, 39, 40, 42, 45, 51, 52, 53, 59, 60, 63, 65

Y

Yara dikiş ipliği 16
YYPE 24, 40, 41, 42



GAZİ GELECEKTİR..