T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AL 5754 SAC MALZEMENİN ILIK SICAKLIKLARDAKİ AKMA EĞRİLERİNİN ŞİŞİRME DENEYİYLE BELİRLENMESİ

Emine Feyza ŞÜKÜR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2014

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AL 5754 SAC MALZEMENİN ILIK SICAKLIKLARDAKİ AKMA EĞRİLERİNİN ŞİŞİRME DENEYİYLE BELİRLENMESİ

Emine Feyza ŞÜKÜR

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2014, 76 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Osman YİĞİT
Doç. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Sac malzemeler farklı sıcaklıklarda farklı deformasyon davranışı gösterirler. Hidrolik şişirme testleriyle malzemelerin farklı sıcaklıklarda şekillendirilebilirliklerini incelemek ve akma eğrilerini elde etmek mümkündür. Gerçek şekillendirme proseslerinde genellikle iki eksenli gerilme durumu ortaya çıkmaktadır. Hidrolik şişirme testlerinden bu iki eksenli gerilme hali için akma eğrileri elde edilebilmekte ve ekstrapolasyona gerek duymadan çekme testlerine oranla daha fazla birim şekil değiştirme değerine ulaşılabilmektedir. Sac malzemelerin şekillendirme prosesleri sırasında karşılaşılabilecek problemleri önceden belirlemek, malzemenin mevcut basınç ve sıcaklık koşullarında şekillendirilebilirliği hakkında bilgi sahibi olmak ve proses simülasyonlarını daha doğru yapabilmek amacıyla akma eğrilerini belirlemek için çekme testleri yerine hidrolik şişirme testleri tercih edilmektedir. Bu çalışmada önce bir ılık hidrolik şişirme test düzeneğinin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Sonra Al 5754-O malzemenin ılık şişirme testlerinden akma eğrilerinin elde edilmesi, birim şekil değiştirme hızları da dikkate alınarak, kapsamlı olarak incelenmiş, eğrilerin simülasyonlarda kullanılacak bölgeleri belirlenmiş ve bu eğriler çekme testinden elde edilen akma eğrileriyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca şişirme ve çekme testlerinden elde edilen akma eğrilerinden hangisi kullanıldığında gerçeğe daha yakın simülasyonlar yapılabileceğini belirlemek üzere durum çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akma eğrisi, durum çalışması, ılık hidrolik şişirme testi, simülasyon, şekillendirilebilirlik

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF YIELD CURVES FOR WARM TEMPERATURE OF AL 5754 SHEET MATERIAL BY BULGE TEST

Emine Feyza ŞÜKÜR

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY

THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

2014, 76 Pages

Jury
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Osman YİĞİT
Assoc. Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Sheet materials have different deformation behaviors at different temperatures. It is possible to investigate the formability of a material at different temperatures and to obtain the flow curves by using hydraulic bulge tests. Generally biaxial stress state is obtained in real forming processes. Flow curves can be derived for the biaxial stress state from the hydraulic bulge tests, and the higher strain values can be achieved with respect to the tensile tests by not requiring extrapolation. Hydraulic bulge tests are preferred instead of tensile tests on account of presuming the problems can be occurred during the formation process of sheet material, being informed about the formability of material at current pressure and temperature states and obtaining flow curves to perform more accurate process simulations. In this thesis, firstly, the design and production of a warm hydraulic bulge set up is performed. Then, obtained flow curves from warm bulge tests for the material Al 5754-O examined by considering the strain rates, the areas of the curves that can be used in simulation are identified and these curves are given comparatively to the curves obtained from tensile tests. In addition, case studies for determining more realistic simulations are performed in selecting the results of the flow curves, either bulge tests or tensile tests.

Keywords: Case study, flow curve, formability, simulation, warm hydraulic bulge test

ÖNSÖZ

Daha az deneme yanılma yapılarak üretim maliyetinin düşürülmesi, homojen bir kalınlık dağılımı elde edilebilmesi, karmaşık geometrili parçaların şekillendirilmesine olanak sağlaması ve daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmesi günümüz teknolojisinde hidroşekillendirme yöntemiyle şekillendirme işlemine ilgiyi arttırmıştır. Gerçek şekillendirme prosesleriyle oldukça benzer simülasyonlar ve analizler yapabilmek için, daha gerçekçi malzeme parametrelerinin bilinmesi gerekir. Bu nedenle hidrolik şişirme testleri yapılır. Böylece üretimde kullanılacak kalıpların yapımında daha az deneme yanılma olacağı için daha az iş gücü ve maliyetle, daha kaliteli ürünlerin elde edilmesi mümkün olur. Ancak bu çalışmalar henüz istenilen ve ihtiyacı karşılayabilecek düzeyde değildir. Ülkemizde metal şekillendirme ve simülasyonları konusunda hizmet veren firmalar akma eğrileri, anizotropik pekleşme ve şekillendirme sınır diyagramları gibi birçok malzeme verilerini yurtdışındaki kuruluşlardan yüksek ücretler karşılığında temin etmektedirler. Hidrolik şişirme yöntemiyle yapılacak çalışmaların, bu anlamda ülkemizin yurtdışındaki firmalara olan bağımlılığını minimum düzeylere indirebileceğini düşünmekteyim.

Çalışmada bilimsel katkılarıyla beni yönlendiren başta danışmanım Prof.Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI olmak üzere, ikinci danışmanım Yrd.Doç.Dr. Murat DİLMEÇ'e, ayrıca bu çalışmada destekleri olan Arş.Grv. Mevlüt TÜRKÖZ'e, Öğr.Grv. Mehmet HALKACI'ya ve proje asistanı Semih AVCI'ya teşekkürlerimi sunarım. 2013-ÖYP-072 numaralı tez projesi desteğinden dolayı Selçuk Üniversitesi Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı Koordinatörlüğü'ne, çalışmanın bir kısmını içeren 112M913 numaralı projesi kapsamında aldığım burs desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışma süresince manevi desteklerini esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. Ulaş ATMACA'ya, Arş.Grv. Bahar SAYIN'a ve Arş.Grv. Havva ATEŞ'e teşekkür ederim. Gösterdikleri sevgi, anlayış ve destekle her zaman yanımda olan kıymetli aileme çok teşekkür ederim.

Emine Feyza ŞÜKÜR
KONYA-2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **x**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **3**

2.1. Al 5754 Alaşımlı Alüminyum Sac 3

2.2. Hidrolik Şişirme Testi (Hydraulic Bulge Test) 5

2.2.1. Kalıp boyutları ve ısıtma yöntemleri 7

2.2.2. Akma eğrilerinin elde edilmesi ve çekme testleriyle karşılaştırılması 8

2.2.3. Ilık sıcaklıklar için şişirme testi 11

2.3. Deformasyon Proseslerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Sınıflandırılması 12

2.3.1. Klasik sınıflandırma 13

2.3.2. Benzeş sıcaklığa göre sınıflandırma 13

2.4. Literatür Analizi 14

3. MATERYAL VE YÖNTEM **17**

3.1. Al 5754 Malzemenin Isıl İşlemi 17

3.2.Çekme Testi 18

3.3.Hidrolik Şişirme Testi 20

3.3.1. Hidrolik şişirme test ünitesinin tasarımı 21

3.3.2. Şişme yüksekliği ölçümü 25

3.3.4.Sıcaklık ölçümü 26

3.3.3. Test prosedürü 28

3.3.5. Akma eğrilerinin elde edilmesi 30

3.4. Birim Şekil Değiştirme Hızı 30

3.5. Membran Teorisinin Geçerliliği 32

3.6. Durum Çalışması 36

4. TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA 37

4.1. Çekme Testi Sonuçları 37

4.2. Şişirme Testi Sonuçları 39

4.2.1. Şişirme testlerinde birim şekil değiştirme hızı 41

4.2.2. Küresellik ölçümü 43

4.2.3. Şişme yüksekliği ölçümü 45

4.3. Simülasyonlarda Kullanılacak Akma Eğrileri 45

4.4. Testlerin Karşılaştırılması 47

4.5. Testlerin Tekrarlanabilirliği ve Güvenilirliği 50

4.6. Durum Çalışması 53

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 56

5.1. Sonuçlar 56

5.2. Öneriler 57

KAYNAKLAR 59

EKLER 62

EK-1 Farklı çekme hızlarında yapılan çekme testi akma eğrileri 62

EK-2 Farklı sıcaklık ve hızlarda elde edilen çekme testi akma eğrileri 63

EK-3 Al 5754-O malzeme için bütün sıcaklıklarda BŞD hızının zamana göre değişimi 65

EK-4 Farklı çekme hızlarında elde edilen çekme testi akma eğrilerinin şişirme testi akma eğrileriyle karşılaştırılması 68

EK-5 Farklı sıcaklıklarda şişirme testlerinin bütün tekrarları 71

ÖZGEÇMİŞ 76

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	:	-	Büyük (majör) birim şekil değiştirme
A	:	mm^2	Kesit alanı
A_0	:	mm^2	İlk kesit alanı
b	:	-	Küçük (mimör) birim şekil değiştirme
D	:	mm	Daire çapı
dA	:	-	Alan değişimi
dF	:	-	Kuvvet değişimi
de	:	-	Mühendislik BŞD değişimi
dl	:	-	Boydaki değişim
dt	:	-	Zaman değişimi
$d\sigma$	:	-	Gerilme değişimi
$d\varepsilon$	:	-	Gerçek BŞD değişimi
e	:	-	Mühendislik birim şekil değişimi
$\acute{e}$	:	1/s	Mühendislik birim şekil değiştirme hızı
F	:	N	Kuvvet
h_d	:	mm	Şişme yüksekliği
l_0	:	mm	İlk boy
l	:	mm	Son boy
L_0	:	mm	Malzemenin ilk ölçü uzunluğu
L_i	:	mm	Deformasyonun herhangi bir anındaki ölçü uzunluğu
r_c	:	mm	Kalıp yarıçapı
r_f	:	mm	Kalıp radyüsü
P	:	MPa	Basınç
R	:	mm	Eğrilik yarıçapı (membrandaki)
$R_\varnothing$	:	mm	Hadde doğrultusundaki eğrilik yarıçapı
R_θ	:	mm	Hadde doğrultusuna dik olan eğrilik yarıçapı
S	:	s	İstenen basınca ulaşma süresi
t	:	mm	Tepe noktası kalınlığı
t_0	:	mm	İlk kalınlık
T	:	K^o	Deformasyon sıcaklığı
T_m	:	K^o	Benzeş sıcaklık
T_{yk}	:	K^o	Yeniden kristalleşme sıcaklığı
V	:	mm/dak	Çene hızı (çekme testi)
ε	:	-	Gerçek birim şekil değişimi
$\dot{\varepsilon}$	:	1/s	Gerçek birim şekil değiştirme hızı
$\bar{\varepsilon}$	:	-	Eşdeğer gerçek birim şekil değişimi
ε_1	:	-	Gerçek majör birim şekil değişimi
ε_2	:	-	Gerçek minör birim şekil değişimi
σ	:	N/mm^2	Gerilme
σ_1	:	N/mm^2	Hadde doğrultusundaki asal gerilme
σ_2	:	N/mm^2	Hadde doğrultusuna dik asal gerilme
σ_b	:	N/mm^2	Bükme gerilmesi
$\sigma_{gerçek}$	:	N/mm^2	Gerçek gerilme
σ_m	:	N/mm^2	Asal gerilme

$\sigma_{müh}$	:	N/mm^2	Mühendislik gerilmesi
ρ	:	mm	Eğrilik yarıçapı
Q	:	m^3/s	Akışkan debisi

Kısaltmalar

BŞD	:	Birim şekil değişimi

1. GİRİŞ

Otomotiv, beyaz eşya sektörleri başta olmak üzere seri üretim teknolojisinin kapsamına giren sac metal parçaların yaklaşık %99'u kalıplama ile üretilmektedir. Her parça için kalıp tasarımı ve imalatı; sac malzemenin geometrik karmaşıklığı ve şekillendirme parametrelerinin belirlenmesinin zorluğu nedeniyle, oldukça zaman almaktadır. Özellikle bazı büyük boyutlu parçalar (otomotiv kaportaları, savunma sanayisinde kullanılan büyük gövdeler vb.) için kalıp tasarımı ve imalatı ve metal sacın şekillendirilmesi çok büyük altyapı ve yatırım maliyeti gerektirmektedir (Karaağaç ve ark, 2009).

Şekillendirilmeleri zor olan malzemelerin bu sınırlamalarının üstesinden gelmek için, uygulanan yöntemlerden biri de hidroşekillendirme prosesidir. Hidroşekillendirme sac veya boru şeklindeki malzemelerin sıvı basıncı yardımıyla şekillendirilmesinde kullanılan bir imalat yöntemidir. Klasik bir kalıpla, parçalar iki kalıp arasında şekillendirilirken, sac hidroşekillendirme yönteminde tek bir kalıp kullanılmaktadır. Böylece kalıp masrafları azalmakta, kalıp uyumu aranmamakta ve farklı kalınlıktaki saclar tek bir kalıpla şekillendirilebilmektedir. Ayrıca sıvının esnekliğinden yararlanılarak çok karmaşık şekillerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu yöntemde sac malzemenin tüm yüzeyinde homojen dağılmış bir yük dağılımı olduğu için sacda incelmeler daha az olmakta ve homojen bir kalınlık dağılımı elde edilebilmektedir. Dolayısıyla saclar daha fazla şekillendirilebilmektedir. Ayrıca hidroşekillendirme ile üretilen parçalar daha yüksek mukavemete, daha iyi boyutsal ve geometrik doğruluğa ve daha düşük yüzey pürüzlüğüne sahip olabilmektedir. Bu sayede hassas ve kaliteli üretiminin gerçekleştirilmesi için gerekli olan malzeme, zaman ve enerjiden ciddi anlamda kazançlar elde edilmektedir.

Günümüz imalat teknolojilerinde, deneme yanılma işlemlerini en aza indirmek için, üretim yöntemlerinin simülasyonları yapılarak imalat proses parametrelerinin önceden tahmin edilmesi mümkündür. Analiz olarak da adlandırılan bu simülasyonlarda takım geometrileri katı modelleme yazılımları ile hassas olarak modellenebilmektedir, malzemelerin tanımlanmasında farklı malzeme modelleri kullanılmaktadır, malzeme takım etkileşimleri ve bu etkileşimlerdeki sürtünme özellikleri de modellenebilmektedir.

Bu analizlerde kullanılacak malzemenin mekanik özelliklerinin testerle tespit edilmesi oldukça önem arz eder. Örneğin yaygın olarak bilinen çekme testlerinden elde edilen akma eğrileri, malzemenin şekillendirilmesi sırasında birim şekil değiştirme (BŞD) ve gerilme arasındaki ilişkileri ortaya koymaktadır. Ancak tek eksenli çekme testlerinden elde edilecek bilgiler genellikle iki eksenli gerilme durumunun oluştuğu sac şekillendirme analizleri için yeterli olmayabilir. Bu nedenle hidrolik şişirme (hydraulic bulge test/ hidrolik şişirme testi) testi ile elde edilecek akma eğrilerine gerek duyulabilir. Hidrolik şişirme testleri, sac şekillendirme yöntemlerinde malzemenin iki eksenli gerinim durumunu yansıtmakta ve malzemenin temel mekanik özellikleri hakkında daha fazla bilgi vermektedir. Bu testler oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Mekanik işlemler sırasında deformasyon sıcaklığının (T°K), malzemenin ergime sıcaklığına (Tm°K) oranı olan "benzeş sıcaklığa" göre, şekillendirme işlemleri sıcak, ılık ve soğuk şekillendirme olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre $0.5 > T/Tm > 0.3$ sıcaklık aralığındaki şekillendirmeler ılık şekillendirme olarak tanımlanmaktadır. Tanım olarak ılık şekillendirme çok yüksek sıcaklıkları çağrıştırmasa da, kullanılan malzemenin ergime sıcaklığına göre 300 ^{o}C veya daha fazla sıcaklıklar bile ılık şekillendirme olarak tanımlanmaktadır. Yapılan çalışmalarda oda sıcaklığında yapılan testlerle ılık sıcaklıklarda yapılan testler karşılaştırıldığında, malzemedeki kalınlık değişimimin ve elde edilen şişme yüksekliğinin ılık sıcaklıklarda daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra ılık sıcaklıklardaki şekillendirmede yüksek sıcaklıklardakine göre daha iyi yüzey kalitesi elde edilmektedir. Tüm bu avantajların yanında, sıcak şekillendirmeye göre daha az enerji harcanması, soğuk şekillendirmeye göre deformasyon oranının yüksek olması ve aynı zamanda da soğuk işlenmiş malzeme mukavemetine yakın mukavemetlerde ürün elde edilebilmesi ılık şekillendirmeyi ve dolayısıyla ılık şişirme testlerini cazip hale getirmiştir.

Bu çalışmada sacların şekillendirilebilirliği ile ilgili testler gözden geçirilmiş, ılık şekillendirilebilirliği belirlemede şişirme testlerinin kullanılması ayrıntılı olarak araştırılmış, ılık sıcaklıklarda akma eğrilerini elde edebilecek bir test ünitesi tasarlanmıştır. Al 5754 malzemenin farklı sıcaklıklardaki akma eğrileri şişirme testleriyle belirlenmiş ve çekme testlerinden hadde doğrultusunda elde edilen akma eğrileriyle karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde çalışmada kullanılan alüminyum sacın özellikleri, şekillendirilebilirliği belirlemede kullanılan testler, şişirme testinin detayları, sıcaklığa bağlı olarak deformasyon işlemlerinin sınıflandırılması üzerinde durulacak ve sonunda bir literatür analizi verilecektir.

2.1. Al 5754 Alaşımlı Alüminyum Sac

Saf alüminyum hafif, yumuşak, sünek, korozyona dayanıklı ve yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. Ancak saf halde düşük dayanıma sahip olduğundan dolayı, başka alanlarda kullanabilmek için alaşım elemanları ilave ederek mukavemetini artırmak gereklidir. Alüminyumun düşük oranlardaki alaşımlarında bile mukavemetli olması, korozyona dayanıklılığı, hafif olması, düşük kuvvetlerle şekillendirilebilmesi ve ucuz olması gibi özellikleri bakımından yaygın olarak kullanılan bir mühendislik malzemesidir.

Ana alaşım elemanları bakır, çinko, magnezyum, silisyum, mangan ve lityumdur. Krom, titanyum, zirkonyum, kurşun, bizmut ve nikel ise düşük miktarlarda ilave edilebilir. Demir tüm alaşımlarda düşük miktarlarda kirlilik olarak bulunur. Ama özellikle bir iki folyo alaşımında alaşım elemanı olarak da kullanılır. Alüminyum alaşımlarını tanımlamak için Amerika'da geliştirilen dört rakamlı sistem kullanılır. İlk rakam belirli alaşım elementlerini içeren alaşım grubunu belirtir. Son iki rakam alüminyumun saflığını belirtir. İkinci rakam başlangıçtaki alaşım üzerinde yapılan değişiklikleri belirtir (Anonim, 2013). Çizelge 2.1'de alüminyum alaşım grupları verilmiştir.

Çizelge 2.1. Alüminyum alaşım grupları (Anonim, 2013)

Ana Alaşım Elemanı	Dizisi
Saf alüminyum (%99 veya daha fazla alüminyum)	1XXX
Bakır	2XXX
Mangan	3XXX
Silisyum	4XXX
Magnezyum	5XXX
Magnezyum ve silisyum	6XXX
Çinko	7XXX
Kullanılmayan dizi	8XXX

Kullanım alanının geniş olması ve aşağıda sıralanacak avantajlarından dolayı bu çalışmada Al5754 alaşımlı sac malzeme incelenmiştir. Bu malzemenin genel özellikleri yoğunluğunun düşük olması, kaynak kabiliyetinin yüksek olması, korozyon dayanımı, yüksek tokluk ve orta dereceli mukavemete sahip olması olarak sıralanabilir.

5XXX grubunda yer alan Al 5754 alaşımlı alüminyum sac malzemenin ana alaşım elementi magnezyumdur. $AlMg_3$ sertleştirilemeyen bir alaşımdır. % 0,6-0,7 Mg ve % 0,2-0,6 ihtiva eder. Deniz suyuna dayanıklılığı fazladır. Mg oranına göre çok farklı yerlerde kullanılır. $AlMg_3$, saf alüminyum gibidir. Mg'un % 5'den fazla olması halinde, kaynak yapılması ve işlenmesi zorlaşır, gerilme nedeniyle korozyona uğrar ve çok iyi olan anot oksitlenmesi yapabilme özelliğine sahiptir. (Yaşar ve ark., 2011)

Çizelge 2.2. Al 5754 alaşımlı alüminyumun mekanik özellikleri (Referans Metal)

Isıl Islem (Temper)	Çekme Dayanımı, R_m MPa	Akma Dayanımı, $R_p0,2$ MPa	Uzama Dayanımı %	Kayma Modülü (G) MPa	Elastisite Modülü (E) GPa
O, H111	215	-	25	140	68
H22	245	-	15	150	68
H24	270	-	14	160	68
H26	290	-	10	170	68

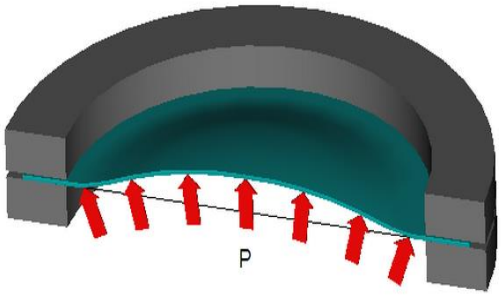
Isıl işlem ile sertleşmeyen alaşımlar genel olarak folyo, ince levha ve plaka olarak kullanılır. 1000 ve 5000 grubu alaşımlar az miktarda profil olarak da üretilmektedirler. Bu alaşım sac halinde özellikle otobüs, kamyon ve deniz taşıtlarında kullanılır.

2.2. Hidrolik Şişirme Testi (Hydraulic Bulge Test)

Sac malzemelerin şekillendirilme proseslerindeki davranışlarını belirleyebilmek için tek eksenli çekme testleri yapılmaktadır. Bu testlerden akma ve çekme mukavemeti, pekleşme üssü, deformasyon hızı duyarlılık üssü, kesit daralması gibi çeşitli mekanik özellikler belirlenebilir. Tek eksenli çekme testleri, basit olmaları, uygulamalarının kolaylığı ve test düzeneklerinin tüm laboratuarlarda kullanılabilir olmaları sebebiyle, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde çoğunlukla tercih edilmektedir. Buna karşılık sac şekillendirme işlemlerinde çoğunlukla iki eksenli gerilme halinin meydana gelmesi, şekillendirme sırasında malzemenin sergilediği davranışın daha iyi belirlenmesinde iki eksenli çekme gerilmelerinin elde edilebildiği şişirme testlerini tek eksenli çekme testlerinin bir alternatifi haline getirmiştir. Yapılan birçok teorik ve deneysel çalışmada hidrolik şişirme testlerinden elde edilen verilerin tek eksenli çekme testlerinden elde edilen verilere göre gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

Hidrolik şişirme testi sac malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan ve malzeme üzerinde çok fazla tahribata neden olmayan iki eksenli çekme testi olarak da tanımlanmaktadır. Şekil 2.1'de görülen hidrolik şişirme testinde, sac levha iki kalıp arasında, genellikle süzdürme çubuğu da kullanılarak sıkıştırılır ve stampa yerine akışkan basıncından yararlanılarak kalıbın ortasındaki boşluk kısmından tek taraflı olmak üzere şişirilir. Hidrolik şişirme testleri genellikle proses içerisinde pompalanan bir akışkanın sağladığı hidrolik basınç ile gerçekleştirilmekte ve böylece hidrolik şişirme adını almaktadır. Ancak hidrolik şişirme testine bir alternatif olarak, ERC/NSM (Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing) tarafından viskoz basınçla şişirme (VPB, Viscous Pressure Bulge) testi geliştirilmiştir. Söz konusu sistemde sac malzeme, hidrolik şişirme testlerindeki gibi pompalanan hidrolik akışkan yerine; sabit stampa, sac ve baskı plakası arasındaki özel bir viskoz ortamda, pres başlığı veya üst tablanın hareketi ile sağlanan basınç sayesinde şişirilmektedir (Erhuy ve ark., 2008). Şişirme testlerinde akışkan yerine viskoz malzemelerin kullanılması, testi daha kolay ve basit hale getirmektedir. Sac numunenin yırtılması sırasında çevreye daha az zarar verir. Buna karşılık viskoz malzeme kullanılmasının bazı dezavantajları da vardır. Viskoz malzemelerin şekil değiştirme davranışları deformasyon hızına bağlı

olarak değişir. Bu nedenle yüksek deformasyon hızlarında ölçülen statik basınçlar sadece statik basınç değerini göstermez, buna ilave olarak malzemenin sertleşmesini, yani deformasyon hızının artması nedeniyle viskoz malzemenin viskozitesinin artmasıyla oluşan basınç artışını da içerir. Düşük deformasyon hızlarında bu etki göz ardı edilebilir (Gutscher ve Altan, 2004). Bazen şişirmede kullanılan akışkan hava da olabilmektedir. Hidrolik şişirme testi bu çalışmanın bundan sonraki kısmında "*şişirme testi*" olarak adlandırılacaktır.



Şekil 2.1. Hidrolik şişirme testi (Escárpita ve ark., 2012)

Şişirme testlerinin diğer yöntemlere göre avantajlarını ve üstünlüklerini şu şekilde sıralayabiliriz. Gerçek şekillendirme proseslerinde genellikle iki eksenli gerilme hali oluştuğu için, çekme testlerindeki tek eksenli şekillendirme durumu için elde edilen en büyük uzamalardan daha büyük uzamalar ortaya çıkmaktadır. Çekme testlerinden elde edilen akma eğrileri simülasyon programlarında kullanılacağı zaman verilerin dışında kalan kısımları ekstrapolasyon yapılarak tahmin edilmektedir. Şişirme testlerinden elde edilen akma eğrilerinde böyle bir ekstrapolasyona gerek kalmadan analiz yapılmaktadır. Ayrıca saclar farklı haddeleme doğrultularında farklı davranışlar sergilerler. Bu nedenle, tek eksenli testlerde birkaç farklı haddeleme doğrultusunda testler yapılarak anizotropi katsayılarının belirlenmesiyle malzeme davranışı tahmin edilmektedir. Birçok çalışmada plastik anizotropiye duyarlılık gösteren bilhassa anizotropik saclarda, iki eksenli deformasyon davranışı şişirme testleri ile belirlenmiş ve bu yöntemin daha uygun olduğu belirtilmiştir.

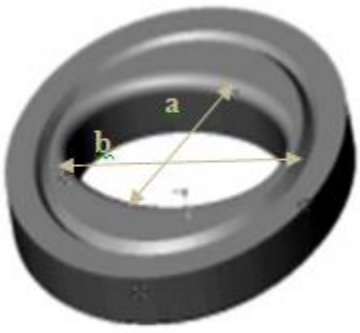
Şişirme testleri ile malzemelerin akma eğrileri, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, pekleşme üssü, çok ince malzemelerdeki kalıntı gerilme değerleri, deformasyon hızı duyarlılık üssü, elastisite modülü, kesit daralması, poisson oranı, kırılma tokluğu gibi temel mekanik özelliklerinin yanı sıra şekillendirme sınır diyagramlarında majör ve minör gerinimlerin pozitif olduğu sağ taraftaki çekme-çekme bölgesinde, gerilmenin iki eksende dengelenmiş hali için sınır gerinim değerlerine ulaşılabilmektedir (Erhuy ve ark., 2008).

2.2.1. Kalıp boyutları ve ısıtma yöntemleri

Şişirme testleri, yaygın olarak kullanılmasına ve sac metallerin şekillendirilebilirlik proseslerindeki mekanik özelliklerin belirlenmesinde, tek eksenli çekme testlerinin bir alternatifi olmasına rağmen, birim şekil değiştirmeleri hesaplarken veriler üzerinde hangi hesaplama yöntemlerinin kullanılacağına ait henüz bir standart olmadığı gibi, kullanılacak kalıplar ve boyutları için de belirlenen bir standart mevcut değildir (Koç ve ark., 2011). Şişirme testlerinde dairesel (Şekil 2.2) ve eliptik kalıplar (Şekil 2.3) kullanılmaktadır. Dairesel kalıplarla akma eğrileri elde edilirken, şekillendirme sınır diyagramlarının sağ tarafındaki deformasyonları ve sınır eğrilerini elde etmek için, farklı elips oranlarına yani farklı *a/b* oranına sahip eliptik kalıplar kullanılırlar.



Şekil 2.2. Dairesel şişirme kalıbı



Şekil 2.3. Eliptik şişirme kalıbı

(Chamekh ve ark., 2006)

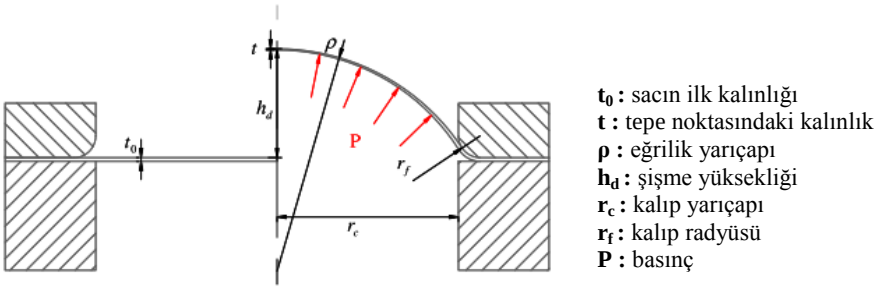
Koç ve Mahabunphachai (2008) mikro/orta ölçeklerde hidrolik şişirme testi kullanarak boyutun sac metal malzeme davranışları üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, 2.5, 5, 10, 20 ve 100 mm çaplarında (Şekil 2.2'deki *d* çapı) kalıplar kullanmışlardır. Koç ve arkadaşları (2011), hidrolik şişirme testi analiz yöntemlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmelerini yaptıkları diğer bir testsel çalışmalarında, 100 mm çapında şişirme kalıpları kullanmışlardır. Banabic ve arkadaşları (2012) ise hidrolik şişirme testi ile sac metallerin plastik davranış karakterizasyonunu inceledikleri çalışmalarında 80 mm'lik kalıplar kullanmışlardır. Testlerde, şişirilen kısmın yüksekliği ve şişirme basıncı değerleri kullanılarak birim şekil değiştirmeler arasındaki ilişkiler kurulurken, genellikle membran teorisi kullanıldığı için bu teorinin geçerli olabildiği kalınlık/çap oranına uygun kalıpların kullanılması gerekir. Şişirme testlerinde kullanılan kalıplarda genellikle, sac kalınlığı 1 mm ve kalıp çapı da 100 mm olarak tercih edilmektedir.

Şişirme testlerinde kalıpları ve akışkanı ısıtmak için fişek ısıtıcılar kullanılmaktadır. Bu ısıtıcılar silindirik tüp formunda olup ısıtma rezistansı, yalıtım, kılıf ve kablo gibi temel parçalardan oluşmaktadır. Fişek ısıtıcılar alt ve üst kalıbın yarısına kadar bağlanarak monte edilir ve ardından ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Kalıp ve kalıp boşluğu içindeki yağ üzerinde düzgün sıcaklık dağılımı sağlamak için 5-10 dakikalık bir bekleme süresi kullanılır (Koç ve ark., 2011). Fişek ısıtıcılarda çevrim süresi ayarlanan sıcaklık değerine bağlı olup, kalıpların ve akışkanın ısıtılma işlemi mümkün olan en kısa sürede yapılmaya çalışılmaktadır. Isıtma işleminde kullanılan akışkan ve özellikleri de oldukça önemlidir. Yapılan bazı çalışmalarda akışkan olarak 0~350 °C sıcaklıklarda kullanılabilen ve üniform sıcaklık dağılım sağlayan Marlotherm SH yağı kullanılmıştır. Kalıpların ısıtılmasında fişek rezistanslar kullanıldığı gibi kelepçe rezistans ve indüksiyonla ısıtma gibi sistemlerde kullanılabilir.

2.2.2. Akma eğrilerinin elde edilmesi ve çekme testleriyle karşılaştırılması

Şişirme testlerinden akma eğrisi elde edilmesine yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, verilerin elde edilme aşaması, efektif gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerinin hesaplanmasına yönelik kullanılan bağıntılar birbirinden farklılık gösterebilmektedir. Literatürde efektif gerilme değeri Hill'in quadratik akma kriteri

(1948), üç parametreli Barlat akma kriteri veya izotropik akma kriterleri (Von-Mises ve Tresca) ile elde edilebilmektedir. Şişirme testindeki efektif gerilme, test parçasının geometrisine ve basınca bağlı olarak, bükme gerilmelerini ihmal eden membran teorisi ile de hesaplanabilmektedir. Küre formunda şiştiği kabul edilen parçanın ve kullanılan kalıbın karakteristik geometrisi Şekil 2.4.'te görülmektedir (Koç ve ark., 2011).



Şekil 2.4. Şişirilen bir test parçasının ve kullanılan kalıbın karakteristik geometrisi (Koç ve ark., 2011)

Membran teorisinde iki eksenli gerilme ve eksenel simetri göz önüne alınarak, sacın küre formunda şiştiği kabul edilmekte ve tepe noktasındaki asal gerilmeler Eşitlik (2.1) bağıntısı ile hesaplanabilmektedir.

$$\sigma = \frac{P\rho}{2t} \quad , \quad \tau = 0 \tag{2.1}$$

Akma eğrisi için efektif birim şekil değiştirme değeri ise plastik deformasyonda hacim sabitliği ilkesinden hesaplanır.

$$\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_{zz} = ln\left(\frac{t_0}{t}\right) \tag{2.2}$$

Test sırasında düzenli olarak basınç ve şişme yüksekliği değerleri okunur ve kaydedilir. Basınç ve şişme yüksekliği değerleri kullanılarak çeşitli ampirik bağıntılar yardımıyla kubbe formunda şişen sac parçanın tahmini eğrilik (tepe, kubbe) yarıçapı ve tepe noktasındaki kalınlığı hesaplanır. Koç ve arkadaşları (2011) bu ampirik bağıntılar üzerinden yaptıkları çalışmalarında sacın eğrilik yarıçapı için Hill (1950) ve Panknin tarafından geliştirilen bağıntıları, tepe noktasındaki kalınlık için ise Hill (1950), Chakrabarty ve Alexander (1970), ve Kruglov (2002) yaklaşımlarını kıyaslamışlardır. Çalışma sonunda eğrilik yarıçapı hesabı için en uygun yaklaşımın Panknin'e, tepe noktasındaki kalınlık hesabı için ise Kruglov'a ait olduğu kanısına varmışlardır.

Eğrilik yarıçapı için Panknin yaklaşımı;

$$\rho = \frac{\left(r_c + r_f\right)^2 + h_d^2 - 2 r_f h_d}{2 h_d} \tag{2.3}$$

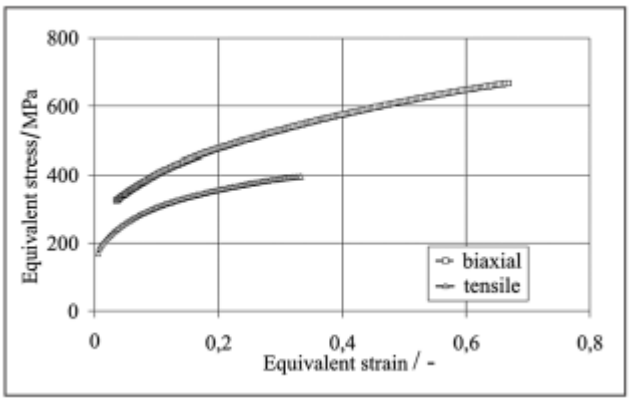
Tepe noktası kalınlık hesabı için Kruglov yaklaşımı;

$$t = t_0 \left[\frac{(r_c/\rho)}{\sin^{-1}(r_c/\rho)}\right]^2 \tag{2.4}$$

olarak verilmiştir. Sembollerin anlamları Şekil 2.4'de verilmiştir.

Kullanılacak yaklaşıma karar verildikten sonra, şişirme testleri süresince anlık ölçülen basınç ve şişme yüksekliği değerleri bu bağıntılardaki yerlerine konularak eğrilik yarıçapı (ρ) ve tepe noktasındaki kalınlık (t) değerleri hesaplanır. Ardından hesaplanan ρ ve t değerleri yardımıyla efektif gerilme-birim şekil değiştirme değerleri bulunur ve MS Excel programında akma eğrileri çizilir.

Şekil 2.5'de DDQ çelik sacına ait akma eğrileri verilmiştir. İki eksenli gerilme halinde kullanılan şişirme testlerinden elde edilen akma eğrisi, tek eksenli çekme testlerinden elde edilene göre daha uzundur. Elde edilen grafik incelendiğinde şişirme testlerinde, tek eksenli çekme testlerine kıyasla yaklaşık iki kat daha fazla maksimum birim şekil değiştirme değerlerine çıkılabildiği görülmektedir. Böylece tek eksenli çekme testlerinden elde edilemeyen değerlere kolaylıkla ulaşılabilmekte ve herhangi bir ekstrapolasyona ihtiyaç duyulmadan malzemenin bu bölgedeki deformasyon davranışları modellenebilmektedir. Ayrıca görüldüğü gibi iki eksenli gerilme halinde aynı birim şekil değiştirme için gerilme değerleri %37 kadar fazla olabilmektedir. Literatürde farklı malzemeler için bu değerler % 6~40 arasında değişebilmektedir.

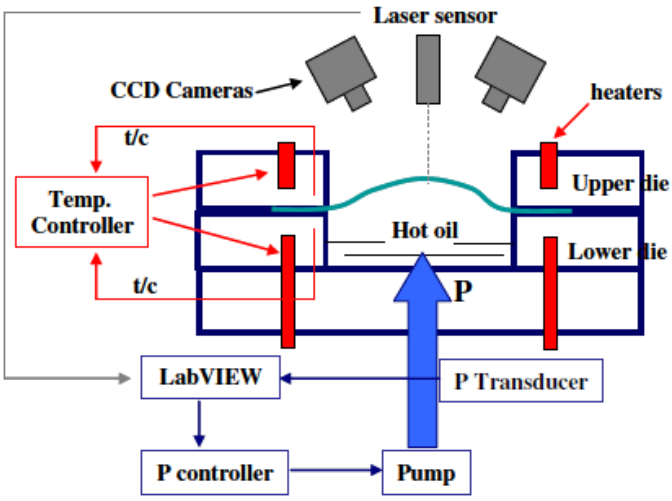


Şekil 2.5. DDQ çelik sacına ait tek eksenli çekme ve iki eksenli şişirme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (J.Slota ve E. Spısak, 2008)

2.2.3. Ilık sıcaklıklar için şişirme testi

Ilık şişirme testlerinde de henüz bir standarda sahip olmayan dairesel kalıplar kullanılmaktadır. Koç ve Mahabunphachai (2010) yaptıkları çalışmada Şekil 2.6'da görülen ılık şişirme test düzeneğini dört alt kısma ayırmışlardır.

1) Hidrolik / Pnömatik Sistem : Pompa, basınç kontrolörü, basınç transdüseri
2) Şişirme Kalıpları : Alt ve üst kalıp, kapama ve sızdırmazlık mekanizması (slikon O-ring, bakır O-ring)
3) Isıtma Sistemi: Isıtıcı, sıcaklık kontrolörü, termokupullar
4) Ölçme Sistemleri : Temaslı veya temassız mesafe ölçerler (LVDT, Lazer sensör, CCD kamera)



Şekil 2.6. Şematik ılık şişirme testi test düzeneği (Koç ve Mahabunphachai, 2010)

Ilık şişirme testlerinde öncelikle kalıplar ve akışkan ayarlanan sıcaklık değerine kadar ısıtılmaktadır. Kalıpların ısıtılmasında fişek rezistans kullanılmıştır. Pompa tarafından basınçlı yağ sacı şekillendirmek üzere alt kalıptan enjekte edilirken, eş zamanlı olarak Lazer sensör yardımıyla sacda meydana gelen kubbe yükseklik bilgisi ve basınç sensörü yardımıyla yağ basınç bilgisi ölçülmekte ve bilgisayara gönderilmektedir. Labview yazılımında oluşturulan özel bir ara yüz vasıtasıyla bu değişimler izlenebilmektedir. Ilık şişirme testlerinde malzeme akışı ve gerilme davranışı sıcaklığa ve deformasyon hızına duyarlıdır. Bu nedenle birim şekil değiştirme hızı kontrol edilebilmelidir. Buna bağlı olarak, enjekte edilen yağın basıncı bir PID kontrolör tarafından kontrol edilmekte ve strain rate (şekillendirme hızı) kontrol altına alınmaktadır. Bu süreç sacda yırtılma meydana gelene kadar sürmektedir. Sac yırtıldığında patlama sesi, ani basınç düşüklüğü ve yağ kaçakları görüldüğünden manuel olarak hem sistem hem de yazılım durdurularak veriler kayıt altına alınmaktadır. (Karalı ve ark., 2012)

2.3. Deformasyon Proseslerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Sınıflandırılması

Sac malzemeler oda sıcaklığında şekillendirildikleri gibi daha yüksek sıcaklıklardaki proseslerde de şekillendirilebilir. Sıcaklıktaki yükseliş; şekillendirmeyi zorlaştıran dayanımda düşüş, süneklikte artış ve pekleşme hızında düşüş yaratır.

Prosesler soğuk, sıcak, ılık ve izotermal şekillendirme gibi farklı sıcaklıklarda yapılabilir. Bu proseslerdeki şekillendirme parametreleri doğal olarak genellikle çok fazla değişiklik gösterebilir. Bu nedenle daha yüksek sıcaklıklarda da testlerin yapılması gerekebilir.

Sıcaklığa bağlı olarak deformasyon prosesleri klasik ve benzeş sıcaklığa göre olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır (Anonim, 2014) ;

a) Klasik sınıflandırma
b) Benzeş sıcaklığa (T/Tm) Göre Sınıflandırma

2.3.1. Klasik sınıflandırma

Şekillendirme prosesleri sıcak ve soğuk şekillendirme olarak ikiye ayrılmıştır.

Sıcak şekillendirme, deformasyonla aynı anda yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği prosestir.

Soğuk şekillendirme, ise deformasyon sırasında yeniden kristalleşmenin gerçekleşemediği prosestir. Tyk; Yeniden kristalleşme sıcaklığı olmak üzere,

1) T>Tyk ise Sıcak Şekillendirme
2) T<Tyk ise Soğuk Şekillendirme

olarak adlandırılır.

2.3.2. Benzeş sıcaklığa göre sınıflandırma

Mekanik prosesler sırasında deformasyon sıcaklığının (T °K), malzemenin ergime sıcaklığına (Tm °K) oranı olan "benzeş sıcaklığa" göre mekanik şekillendirmeler üç gruba ayrılırlar.

1) **Sıcak Şekillendirme: T/Tm> 0.5 ise**; Sıcak şekillendirme şartlarında plastik gerilme deformasyon hızına karşı çok duyarlıdır, buna karşılık deformasyon sertleşmesi ihmal edilecek kadar azdır.

2) **Ilık Şekillendirme: 0.5 > T/Tm> 0.3 ise;** Ilık şekillendirme sıcaklıklarında ise plastik gerilmeye hem deformasyon oranı hem de deformasyon hızı etki edebilir.

3) **Soğuk Şekillendirme: T/Tm< 0.3 ise;** Düşük sıcaklıklarda plastik gerilmeye deformasyon hızının etkisi önemsizdir. Bu durumda plastik gerilme, deformasyon sertleşmesi nedeni ile, deformasyon oranına bağlıdır.

Ilık şekillendirmede malzemenin plastik gerilmesi, deformasyon sertleşmesi nedeni ile deformasyon miktarına ve sıcaklık etkisi ile deformasyon hızına karşı duyarlıdır. Bu tip şekillendirme sırasında yeniden kristalleşme olmaz, fakat dinamik toparlanma olur, dislokasyonlar bir düzene girerek alt tane yapısı oluştururlar. Ilık şekillendirmenin sıcak ve soğuk şekillendirmelere göre avantajları vardır. Sıcak şekillendirmeye göre daha az enerji harcar. Soğuk şekillendirmeye göre avantajı ise, gerçekleştirilebilen toplam deformasyon oranının soğuk şekillendirmeden fazla olması, aynı zamanda da soğuk şekillendirilmiş malzeme mukavemetine yakın mukavemetlerde ürün elde edilebilmektedir.

İzotermal şekillendirmede, ılık ve sıcak şekillendirme işlemleri sırasında, sadece iş parçası değil de takımlar (kalıplar) da iş parçası sıcaklığına kadar ısıtılır. Bu durumda takım ömrü kısalırsa da, genellikle daha dar toleranslardaki iş parçaları üretilebilir, düşük artık gerilmeler oluşur ve oldukça düzgün metal akışı elde edilir.

2.4. Literatür Analizi

Kaynak araştırması kısmında belirtilen değerlendirmeler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Uygun ılık hidroşekillendirme stratejilerinin geliştirilebilmesi için öncelikle şekillendirmede kullanılacak malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki davranışını belirlemek gerekmektedir. Bu nedenle malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki davranışı özellikle çekme ve hidrolik şişirme testleri ile tespit edilmektedir. Sadece malzeme

karakterizasyonunu kapsayan çalışmalar olduğu gibi (Novotny ve Geiger, 2003; Kaya ve ark. 2008; Koç ve ark. 2011), ılık hidroşekillendirme ile ilgili çalışmalarda da bu konu araştırılmıştır (Mahabunphachai ve Koç, 2010; Groche ve ark., 2002; Siegert ve Jager, 2004). Alüminyum ve magnezyum alaşımları ile ilgili testlerde sünekliliğin ılık şekillendirme sıcaklıklarında önemli derecede arttığı ve akma gerilmesinin pekleşmeyi ortadan kaldıracak derecede düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca akma eğrisi hidrolik şişirme testinde, çekme testine göre çok daha büyük BŞD değerlerine kadar belirlenebilmektedir.

Şişirme testleri ile malzemelerin akma eğrileri, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, pekleşme üssü, çok ince malzemelerdeki kalıntı gerilme değerleri, deformasyon hızı duyarlılık üssü, elastisite modülü, kesit daralması, poisson oranı, kırılma tokluğu gibi temel mekanik özelliklerin yanı sıra şekillendirme sınır diyagramlarında majör ve minör BŞD'lerin pozitif olduğu sağ taraftaki çekme-çekme bölgesinde, gerilmenin iki eksende dengelenmiş hali için sınır BŞD değerlerine ulaşılabilmektedir (Erhuy ve ark., 2008). Şişirme testleri, yaygın olarak kullanılmasına ve sac metalleri şekillendirme proseslerindeki mekanik özelliklerin belirlenmesinde, tek eksenli çekme testlerinin bir alternatifi olmasına rağmen, BŞD'leri hesaplarken hangi verilerin ölçüleceğine ait henüz bir standart olmadığı gibi, kullanılacak kalıplar ve boyutları için de belirlenen bir standart yoktur (Koç ve ark., 2011). Koç ve Mahabunphachai (2008) mikro/orta ölçeklerde hidrolik şişirme testi kullanarak boyutun sac metal malzeme davranışları üzerine etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, 2.5, 5, 10, 20 ve 100 mm çaplarında kalıplar kullanmışlardır. Bu araştırmacılar (2011), hidrolik şişirme testi analiz yöntemlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmelerini yaptıkları diğer bir deneysel çalışmalarında, 100 mm çapında şişirme kalıpları kullanmışlardır. Banabic ve arkadaşları (2012) ise hidrolik şişirme testi ile sac metallerin plastik davranış karakterizasyonunu inceledikleri çalışmalarında 80 mm lik kalıplar kullanmışlardır. Şişirme testlerinden akma eğrisi elde edilmesine yönelik yapılan çalışmalar incelendiğinde, verilerin elde edilme aşaması, efektif gerilme ve BŞD değerlerinin hesaplanmasına yönelik kullanılan bağıntılar birbirinden farklılık göstermektedir. Test sırasında düzenli olarak okunup ve kaydedilen basınç ve şişme yüksekliği değerleri kullanılarak çeşitli ampirik bağıntılar yardımıyla kubbe formunda şişen sac parçanın tahmini eğrilik (tepe, kubbe) yarıçapı ve tepe noktasındaki kalınlığı hesaplanır. Koç ve arkadaşları bu ampirik bağıntılar üzerinden yaptıkları çalışmalarında sacın eğrilik

yarıçapı için Hill (1950) ve Panknin tarafından geliştirilen bağıntıları, tepe noktasındaki kalınlık için ise Hill (1950), Chakrabarty ve Alexander (1970), ve Kruglov (2002) yaklaşımlarını kıyaslamışlardır. Çalışma sonunda eğrilik yarıçapı hesabı için en uygun yaklaşımın Panknin'e, tepe noktasındaki kalınlık hesabı için ise Kruglov' a ait olduğu kanısına varmışlardır (Koç ve ark., 2011).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde testlerde kullanılan malzemenin ısıl işlemleri, çekme ve hidrolik şişirme testlerinden bahsedilecektir. Daha sonra birim şekil değiştirme hızının akma eğrilerine etkisi, membran teorisinin geçerliliği ve testlerin tekrarlanabilirliği üzerinde durulacaktır.

3.1. Al 5754 Malzemenin Isıl İşlemi

Alüminyum alaşımlı saclar ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Çalışmada kullanılan Al 5754 malzeme, ısıl işlem ile sertleştirilemeyen alaşım grupları içerisinde yer alır.

Satın alınırken H-14 temperi halinde bulunan malzeme şekillendirilebilirliği yüksek olan O temperine dönüştürülmüştür. Malzeme H-14 temperi halinde deformasyonla yarı sertleştirilmiş durumda iken tavlama işlemi ile O temperine dönüştürüldüğünde deformasyonların etkisi giderilmiş ve sünekliği yüksek duruma getirilmiştir. Tavlama işlemi Selçuk Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan Protherm marka kül fırınında yapılmıştır. Fırının doğruluğu TSE Konya Sojuztest Metroloji ve Kalibrasyon Merkezince ±0,5 C° olarak bulunmuştur.

Tavlama yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki bir ısıl işlemdir. İşlem sonunda meydana gelen kristallerin yoğunluğu en düşük seviyededir. Tavlama öncesinde ince taneli bir yapıya sahip olan malzeme, işlem sonrasında tane yapısında meydan gelen büyüme ile kaba taneli bir yapıya dönüşür. Malzemenin mukavemeti ve sertliği düşerken sünekliği artar. 380°'de 4 saat tavlandıktan sonra oda sıcaklığında havada soğutulan Al 5754-H14 malzemesi Çizelge 3.1'de mekanik özellikleri verilen Al 5754-O temperine dönüştürülmüştür.

Çizelge 3.1. Al 5754-O temperli malzemenin mekanik özellikleri

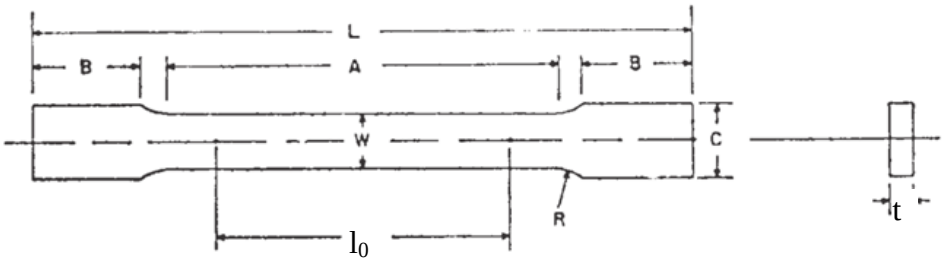
Özellik	Değer
Çekme Mukavemeti	200-270 MPa
Akma Mukavemeti	80-100 Mpa
% Uzama	% 17–26
Yoğunluğu	2,67 g/cm3
Pekleşme katsayısı	0,245-0,3
Anizotropi Katsayısı (r)	0,72

3.2.Çekme Testi

Çekme testleri ASTM E8-04 standardına göre, Niğde Üniversitesi Laboratuvarı'nda bulunan 100 kN kapasiteli Shimadzu AG-IS marka çekme cihazında hizmet alımı yoluyla yaptırılmıştır. Bu testler 20~300˚C arasında 40 °C aralıklarla, üç haddeleme doğrultusu (0°, 45°, 90°) ve üç başarılı tekrar olacak şekilde yapılmıştır.

Numuneler, 1 mm kalınlığındaki Al 5754 sac levhadan Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi standarda uygun olacak şekilde freze tezgâhında kestirilmiştir. Numunelerin kenarları zımparalanmış, daha sonra ısıl işlem uygulanarak çentik etkisi ortadan kaldırılmıştır. Uygulanan plastik deformasyonun miktarı ve metalin ergime sıcaklığı, tavlama süresini etkileyen faktörlerdir. Al 5754-H14 malzemesi 380°C'de 4 saat tavlanmış ve havada soğutulmuştur.

Testden önce 50 mm'lik bir ilk ölçü boyu ile işaretlenmiş numune tutma kısımlarından çekme cihazının çenelerine bağlanıp 25, 100 ve 250 mm/dk hızlarında kopuncaya kadar çekilmiştir. Yük değeri yük hücresi yardımıyla ölçülmüş, ölçü boyundaki değişim ise ± 0.003 mm doğrulukla video ekstansiyometre ile ölçülerek bilgisayara aktarılmıştır. Bu verilerden malzemeye ait mühendislik ve gerçek, gerilme-BŞD değerleri hesaplanarak, akma eğrileri çizilmiştir.



L	:	Tam boy	= 200 mm
C	:	Tutma kısmının genişliği	= 20 mm
A	:	İndirgenmiş kesitin boyu	= 82 mm
l_0	:	İlk boy	= 50 ± 0.01 mm
W	:	Genişlik	= 12.5 ± 0.20 mm
B	:	Tutma kısmının boyu	= 50 mm
R	:	Radyüs	= 12.5 mm
t	:	Numune kalınlığı	= 1 mm

Şekil 3.1. Sac çekme testi numunesi (ASTM E 8M-04)

Numuneye herhangi bir anda uygulanan kuvvetin (F), anlık kesit alanına (A) bölünmesiyle gerçek gerilme elde edilir ve

$$\sigma_{gerçek} = \frac{F}{A} \tag{3.1}$$

ile tanımlanır. Gerçek gerilme, üniform deformasyon bölgesinde hacim sabitliği ilkesinden yola çıkılarak şu şekilde hesaplanır;

$$A_0 l_0 = Al \tag{3.2}$$

$$\frac{l - l_0}{l_0} = e \text{ ve } \frac{l}{l_0} = e + 1 \tag{3.3}$$

$$\sigma_{gerçek} = \frac{F}{A_0}\frac{l}{l_0} \tag{3.4}$$

$e = (l - l_0)/l_0$ ve Eşitlik (3.3.) ‘den

$$\sigma_{gerçek} = \sigma_{müh}(1 + e) \tag{3.5}$$

ifadesi elde edilir. Gerçek ölçü boyundaki küçük bir artışın (*dl*), anlık ölçü boyuna (*l*) bölümünün integresiyle de gerçek BŞD elde edilir.

$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} \tag{3.6}$$

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 = e \tag{3.7}$$

den gerçek ve mühendislik BŞD 'si arasında

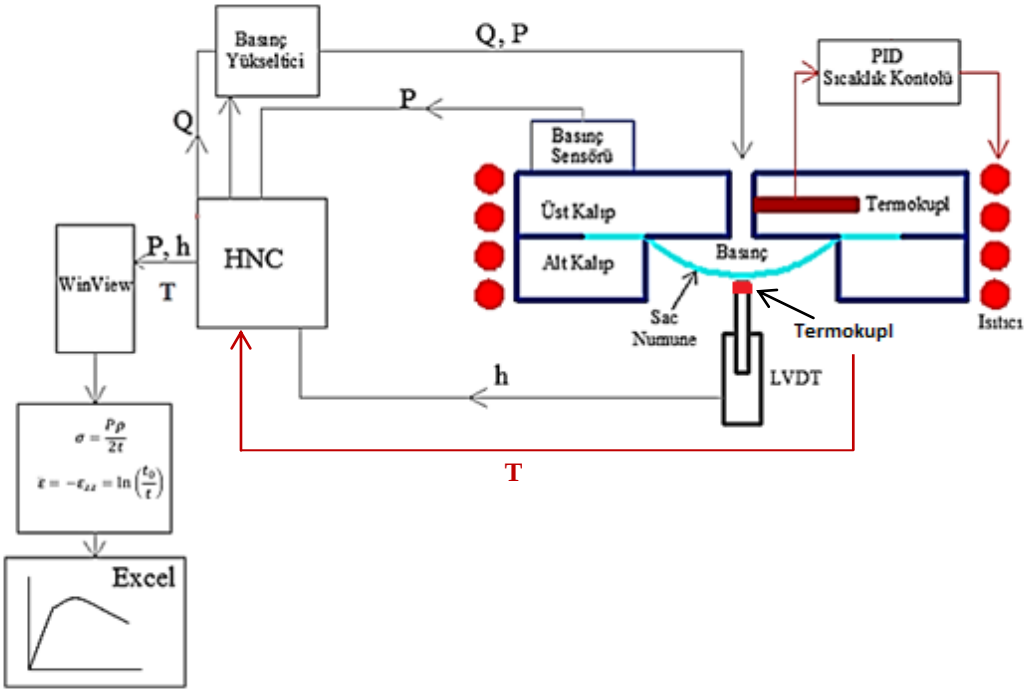
$$\varepsilon = \ln(e + 1) \tag{3.8}$$

şeklinde bir ilişki kurulur.

3.3.Hidrolik Şişirme Testi

Bu çalışmada şişirme testlerini yapmak için Selçuk Üniversitesi Hidroşekillendirme Laboratuvarı'nda mevcut olan bir hidroşekillendirme presi kullanılmıştır (Halkacı, 2011). Sistemdeki basınç bir basınç yükseltici ile sağlanmaktadır. Bu nedenle akışkanın debisi (Q), basınç (P) ve zamana göre kontrol edilebildiği gibi, LVDT (Linear Variable Differential Transformer)'nin konumuna göre de ayarlanabilmektedir. Şekil 3.2'de sistem şeması verilen, şişirme test ünitesi beş ana gruba ayrılabilir. Bunlar

1) Hidrolik Sistem: Basınç yükseltici, basınç kontrolörü (HNC; Hidrolic Numeric Control), basınç sensörü
2) Şişirme Kalıpları: Alt ve üst kalıp, ısı yalıtım elemanları
3) Isıtma Sistemi: İndüksiyon ısıtıcı, PID sıcaklık kontrolörü, termokupullar
4) Ölçme Sistemi: Temaslı mesafe ölçer (LVDT)
5) Veri Toplama Sistemi: WinView yazılımı



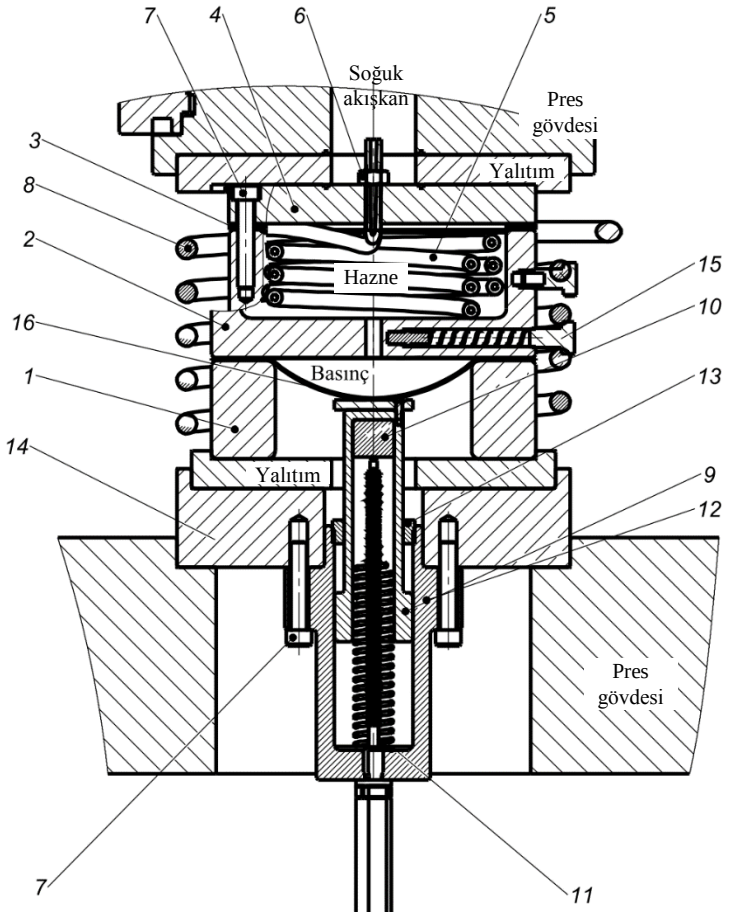
Şekil 3.2. Hidrolik şişirme testi sistem şeması

Alt kalıba yerleştirilen sac numune üst kalıpla sıkıştırılır, akışkan hazneye basınçsız olarak doldurulur ve ısıtıcılar devreye girerek kalıpları, haznedeki akışkanı ve numuneyi istenen sıcaklığa kadar ısıtır. Isıtma sıcaklığı PLC sistemle PID kontrollü olarak yapılır. HNC kontrol ile basınç istenen bir zaman aralığında belirlenen bir değere ulaşacak kadar kontrollü olarak artırılır. Sac numuneye temas halinde olan LVDT şişme yüksekliğini, termokupl ise tepe noktasındaki sıcaklık değerini, basınç sensörü ise akışkanın basıncını anlık olarak HNC kontrol sistemine gönderir. Bu değerler WinView yazılımı tarafından Ms Excell programına aktarılır.

3.3.1. Hidrolik şişirme test ünitesinin tasarımı

Şekil 3.3.'te montaj teknik resmi verilen hidrolik şişirme test ünitesinin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, numune şişirilirken sıcaklığı sabit tutmak, yüksek sıcaklıklardan ve numunenin patlamasından LVDT'yi korumak, ısının pres gövdesine

iletilmesini önlemektir. Aşağıda önce kalıp tasarımından bahsedilecek sonra da bu fonksiyonları sağlamak için yapılan tasarım ve iyileştirmeler detaylıca anlatılacaktır.



1. Kalıp
2. Şişirme Baskı Plakası
3. Bakır Conta
4. Kalıp Kapağı
5. Doldurma Borusu
6. Doldurma Borusu Somunu
7. LVDT ve Kalıp Bağlama Cıvatası
8. İndüksiyon Isıtıcı
9. LVDT Koruma Kovanı
10. LVDT Yalıtım Parçası
11. LVDT
12. LVDT Bağlantı Parçası
13. LVDT Tahdit Somunu
14. Baskı Plakası Ara Parçası
15. Termokupl
16. Sac Numune

Şekil 3.3. Hidrolik şişirme test ünitesi

3.3.1.1. Kalıp tasarımı

Testlerde, şişme (kubbe) yüksekliği ve şişirme basıncı değerleri kullanılarak gerilme ve birim şekil değiştirmeler (BŞD) arasındaki ilişkiler kurulurken genellikle membran teorisi kullanılır. Bu teorinin kullanılabilmesi için Şekil 2.4'de tanımlanan

geometrik büyüklüklere ihtiyaç vardır ve kalınlık/çap oranının 1/10'dan küçük olması gerekir (Koç ve ark., 2011). Bu çalışmada, literatürde genellikle tercih edilen değerler olan, sac kalınlığı için 1 mm ve kalıp çapı için de 100 mm değeri seçilmiştir. Bu ayrıntılar göz önünde bulundurularak, testlerde kullanılmak üzere ilk aşamada iç çapı ($2r_c$) 100 mm, kalıp radyüsü (r_f) 4 mm ve dış çapı 165 mm, olan dairesel kalıplar tasarlanmıştır (Şekil 2.2 ve Şekil 3.3'deki 1 numaralı parça). Kaynak araştırması kısmında detaylıca verildiği gibi eğrilik yarıçapı için Panknin, tepe noktası kalınlık hesabı için ise Kruglov yaklaşımları kullanılmıştır. Panknin formülasyonunda kalıp radyüslerinin de hesaba katılması gerekmektedir. Ancak $r_f \leq 2r_c / 20$ olduğunda radyüsün etkisi ihmal edilmektedir (Mahabunphachai ve Koç, 2008). 4 mm radyüslü kalıplarla testler yapılırken oda sıcaklığında problem oluşmazken, yüksek sıcaklıklarda yırtılma, tepe noktasından önce, radyüs kenarlarında olmuştur. Bu nedenle kalıp radyüsü büyütülerek önce 5 mm'ye daha sonra 6,5 mm'ye çıkartılmıştır. Ancak bu durumda radyüsün etkisi ihmal edilemez ve Formül 2.3'deki gibi r_f değeri de hesaba katılmış ve kalıplar imal ettirilmiştir.

3.3.1.2. Numune sıcaklığının sabit tutulması

Şişirme sırasında hazneye yeni giren soğuk akışkan sıcaklığı düşürür. Bu düşüş oldukça hızlı olmaktadır. Çünkü yoğunluğu yüksek olan soğuk akışkan hemen tepe noktasına ulaşarak sıcaklığı düşürmektedir. Şişirme sırasında basınç kabına giren akışkan sıcaklığının proses süresince değişmemesi ve hazneye ısınarak girmesi için, akışkan Şekil 3.3'de 5 numara ile gösterilen paslanmaz çelikten üretilmiş ~2.4 m uzunluğunda ve 4 mm iç çapındaki helisel borudan geçerek ısıtılmıştır. 220˚C ye kadar yapılan testlerde bu tasarım başarılı olduysa da, daha yüksek sıcaklıklarda yırtılma tepe noktası yerine kalıp radyüslerinde oluşmuştur. Kalıp radyüsleri ve sac sıcaklığı ölçüldüğünde homojen bir dağılım olmadığı ve radyüslerin daha yüksek sıcaklıklarda olduğu bu nedenle radyüslerde mukavemetin düştüğü sonucuna varılmıştır. Bunun iki nedeni olabilir. Birincisi hazneye giren akışkan yeteri kadar hızlı ısıtılamayabilir. İkincisi de şişen kısmın hava ile temasta olan yüzeyinden çevreye olan ısı transferi fazla olabilir.

Bu problemi çözmek için tasarımda iki değişiklik yapılabilir. Birinci çözüm olarak radyüsler soğutulabilir, incisinde ise giren akışkan daha hızlı ısıtılabilir. Önce

kolay olduğu için hazneye helisel boru yerine Şekil 3.3'te görülen, helisel borudan daha fazla iç dirence sahip olan bir silindirik kütle yerleştirilerek hem akışkan daha hızlı ısıtılmıştır hem de sac numuneye daha yakın bir yüzey olduğu için numune daha homojen ısıtılabilmiştir.

3.3.1.2. LVDT nin bağlanması

Şekil 2.11'deki h_d şişme yüksekliğinin ölçülmesi için, mesafe ölçüm sensörü olarak bir LVDT kullanılmıştır. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi LVDT'nin prese montajı 12 numaralı bağlantı parçasıyla yapılmıştır ve sıcaklıktan, patlama anındaki darbe etkisinden ve sıvıdan etkilenmemesi için 9 numaralı bir koruma kovanı kullanılmıştır. LVDT, üzerinde bir yaya sahiptir ve son konumuna sıkıştırıldıktan sonra bırakıldığında kendiliğinden geri dönmektedir. Ancak üzerine yerleştirilen koruma kovanının ağırlığı ve sürtünme kuvveti nedeniyle ilk konumuna dönmesi mümkün olamayacağı için, kovanın ağırlığı şekilde görülen başka bir yay (11) ile karşılanmıştır. Bu yay sac numunenin şeklini değiştirecek kadar kuvvet de uygulamamalıdır. Kovan direkt olarak sac ve LVDT ile temas halinde olursa yüksek sıcaklıklarda sac ile kovan arasında ısı akışı olur. Dolayısıyla sac numunenin sıcaklığı değişir. Bunu önlemek için kovan ile LVDT milinin arasına 10 numara ile gösterilen bir yalıtım parçası yerleştirilmiştir. Ayrıca kovanın üzerine de bir yalıtım parçası eklenmiştir.

Ayrıca patlama halinde sıcak akışkanın kovan içerisine dolup LVDT'yi bozmaması için 13 numaralı parça üzerine bir delik açılmış, kovan içerisine soğuk akışkanın dolması sağlanmıştır ve böylece LVDT nin ısınması önlenmiştir.

3.3.1.3. Isı yalıtımın sağlanması

Kalıpların hedeflenen sıcaklıklara kadar ısınıp sıcaklığını proses süresince koruyabilmesi için, yüksek sıcaklıklara ve basma gerilmelerine dayanabilen yalıtım malzemesi ile de kalıplar pres gövdesinden yalıtılmalıdır. Yalıtım malzemesinde aranan özellikler; ısı iletim katsayısının düşük olmasının yanında 300-400℃ sıcaklıklara kadar dayanması, en az 25 MPa basma mukavemetine sahip olması ve talaşlı işleme kabiliyetinin iyi olmasıdır. Bu amaçla mikanit, seramik fiber levha ve battaniye, cam elyaf, taş yünü, kağıt ve meşe ağacı temin edilerek kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Malzemelerin ısıl dayanımı ve ısı geçirgenliği rezistanslı bir elektrik ocağı yardımıyla, basma dayanımı da pres tablaları arasında sıkıştırılarak test edilmiştir. Testler sonucunda:

- Mikanitin ısı yalıtım özelliği çok az bulunmuş ve bu malzemenin daha çok elektrik yalıtımında kullanıldığı öğrenilmiştir.
- Seramik battaniye ve cam elyafın 300-400℃ civarında, kâğıdın 220℃'de ve meşenin ise 300℃'de bozunmaya başladığı görülmüştür.
- Seramik levhanın ısıl dayanımı ve ısı yalıtım özelliği iyi olmakla birlikte baskı kuvveti altında ufalanarak dağıldığı görülmüştür.
- Taş yünü ise ısıyı çok iyi yalıttığı halde, 200 mm çapındaki kalıplar arasında 10 ton kuvvetle sıkıştırıldığında toz haline gelmiştir.

Yapılan araştırmalarda yalıtımın istenen özellikleri sağlayacak şekilde kalsiyum silikat matrisli kompozit levhalar ile sağlanabileceği belirlenmiş ve bu ürün ancak yurt dışından temin edilebilmiştir. Bu yalıtım malzemesi kalıp yalıtımına uygun olup 1200℃ sıcaklık dayanımı ile 48 MPa basma mukavemeti değerlerine sahiptir ve talaşlı işlenebilirlik özeliği de bulunmaktadır. Yalıtım levhaları Şekil 3.3'deki gibi kalıpların üst ve altına yerleştirilerek yalıtım sağlanmıştır.

3.3.2. Şişme yüksekliği ölçümü

Hidrolik şişirme testlerinde malzemenin akma eğrisinin elde edilebilmesi için basınçla birlikte şişme yüksekliğinin eş zamanlı olarak saniyede en azından 20 veri olacak şekilde kaydedilmesi gerekmektedir. Bu nedenle LVDT, test presinde kontrol ve veri toplama işlemlerini yapan hidrolik nümerik kontrol sistemine (HNC) bağlanmıştır. HNC kontrol yazılımıyla bir saniyede kaydedilecek veri adetinin ayarlanması mümkündür. Testlerde genellikle saniyede 50 veri kaydedilmiştir.

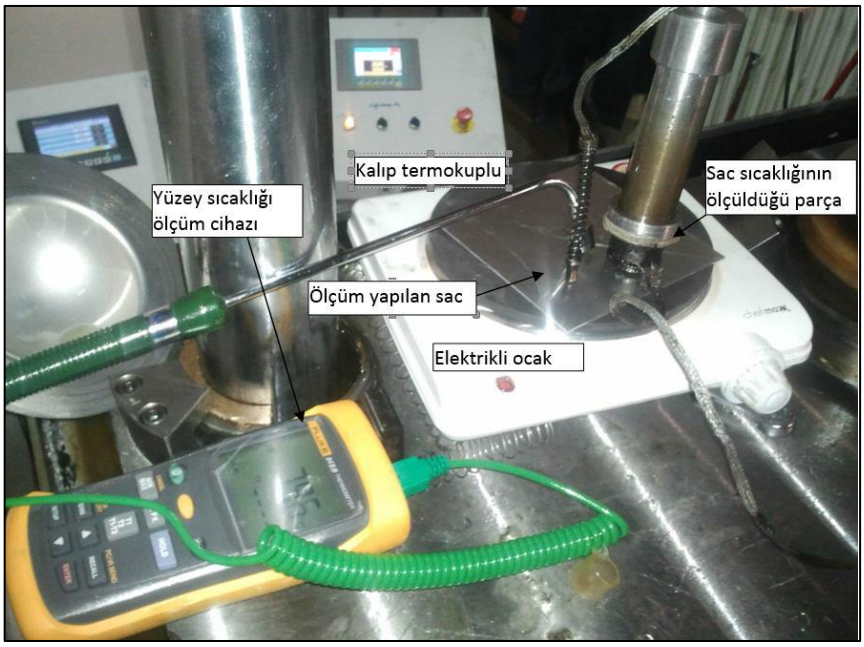
LVDT' nin ne kadar doğru ölçüm yaptığının belirlenmesi için 10, 25, 50, 75 ve 100 mm' lik ölçü mastarları kullanılarak ölçümler yapılmıştır. 2 mm hata ile ölçüm yaptığı tespit edilen LVDT' ye HNC kontrol yazılımında kalibrasyon yapılmış ve sonuçta ±0,1 mm belirsizlikte doğru ölçümler elde edilmiştir.

3.3.4.Sıcaklık ölçümü

Şekil 3.3'de sistem şemasında görüldüğü gibi şişirme testi sisteminde iki adet termokupl bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi indüksiyonla ısıtılan üst kalıba yerleştirilmiştir ve kalıbın sıcaklığını ölçmek ve kontrol etmek için kullanılmıştır. Sıcaklık kontrolü bir PLC sistemde aç/kapat PID kontrolü ile yapılmıştır. İkinci termokupl ise LVDT'yi muhafaza eden kovanın üzerine yerleştirilmiştir ve sacın tepe noktasındaki sıcaklığı ölçülmek için kullanılmıştır. Bu sıcaklık test süresince kaydedilmektedir. İki termokupl arasındaki sıcaklık farkı, *fark sıcaklık* olarak adlandırılmıştır ve test boyunca PLC sistemin ekranında görülebilmektedir.

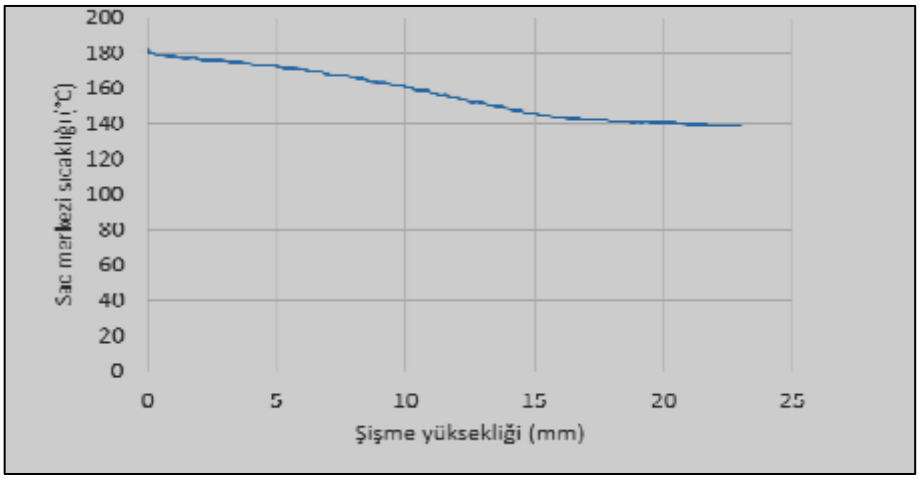
Hidrolik şişirme testleri yapılırken fark sıcaklığın en düşük olduğu anda teste başlanmıştır. İlk denemelerde tepe sıcaklığı 140 °C iken, kalıp sıcaklığı 200 C'yi göstermiş dolayısıyla fark sıcaklık 60 °C'yi bulmuştur. Sacın sıcaklığı arttıkça fark sıcaklık daha da artarak 200°C de 90-100 °C'leri bulmuştur. Kalıp ve sacın sıcaklıkları arasındaki farkın oldukça yüksek olduğu testlerde sac merkezden değil, kalıp radyüsünden patlamış ve sonuç başarısız olmuştur. Bunun nedeni sacın merkezinin kalıp radyüsünden ve radyüse yakın kısımlardan daha soğuk olmasıdır.

Yüksek fark sıcaklığının nedenleri araştırılırken, ölçüm yapılan termokuplların doğruluğunu tespit etmek için sac numune, test ünitesi dışında elektrikli bir ocak yardımıyla ısıtılmıştır. Numune sıcaklığı kalıp termokupulu, iç kovana montajlı durumda bulunan sac termokuplu ve ±0.01°C doğrulukla ölçüm yapan hassas bir yüzey probu ile ölçülmüştür (Şekil 3.4). Ölçümler sonucunda tepe sıcaklığı termokuplunun, sac sıcaklığını gerçek değerinden çok daha az gösterdiği görülmüştür. Bu fark üzerine sac termokuplu yalıtım plakası ve bakır parça arasından çıkartılmış ve bu şekilde yapılan ölçümler doğru değerleri göstermiştir. Ölçümlerdeki farklılığın, sac merkezindeki ısının önemli ölçüde önce bakır parçaya ardından cıvatalar vasıtasıyla iç kovana geçişinden kaynaklandığı bulunmuştur. Bu nedenle bakır parça çıkartılmış, termokupl yalıtımın üzerinde serbest bırakılarak ölçümler yapılmıştır. Böylelikle ilk etapta 90-100 °C' leri bulan fark sıcaklığı 5 °C ye kadar düşürülmüştür.

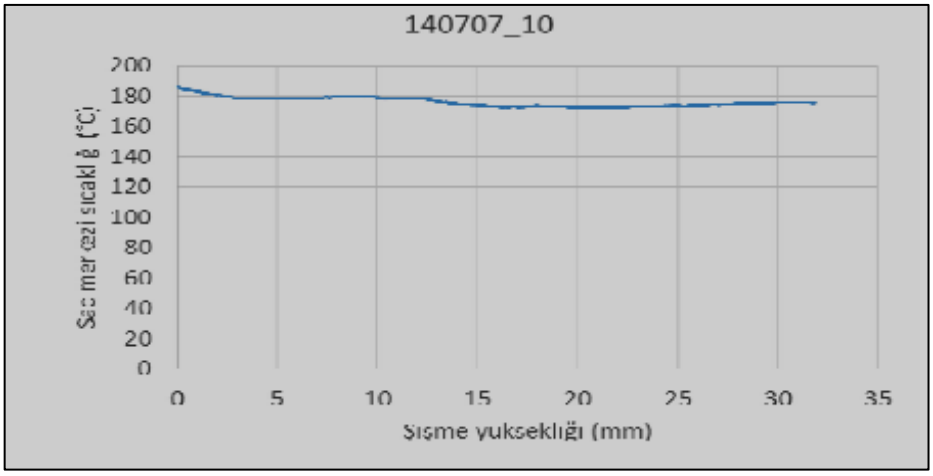


Şekil 3.4. Termokupların doğru ölçüm yapıp yapmadıklarının araştırıldığı sistem

Sac ve kalıp arasındaki fark sıcaklık problemi çözüldükten sonra yapılan testlerde sacın merkezinden ölçülen sıcaklık değerinin test süresince 40-45 °C düştüğü görülmüştür (Şekil 3.5). Sacın tepe sıcaklığı radyüs sıcaklığından daha düşük olduğu için sac yine radyüs bölgesinden yırtılmıştır. Bu sorunun nedeni olarak testler sırasında hazneye giren soğuk yağın yoğunluğu yüksek olması sebebiyle tepe notasına daha önce gelerek sıcaklığı düşürmüş olduğu kararına varılmıştır. Bunun üzerine üst kalıbın içerisindeki kütlenin tabanındaki kanallar kapatılarak, yağın kütlenin merkezinden açılan yeni bir delikle tahliyesi sağlamıştır. Bu sayede yoğunluğu yüksek olan soğuk yağ alt kısımda kalırken ısınan yağ üst taraftan kalıp dışına çıkmıştır. Bu şekilde yapılan testlerde sıcaklık düşüşünün 10 °C civarında olduğu görülmüştür (Şekil 3.6). Sıcaklıkla ilgili problemlerin çözülmesiyle testler tüm sıcaklıklarda en az 3 başarılı tekrar olacak şekilde sorunsuz yapılmıştır.



Şekil 3.5. Sac merkez sıcaklığının sac şekillendikçe düşmesi



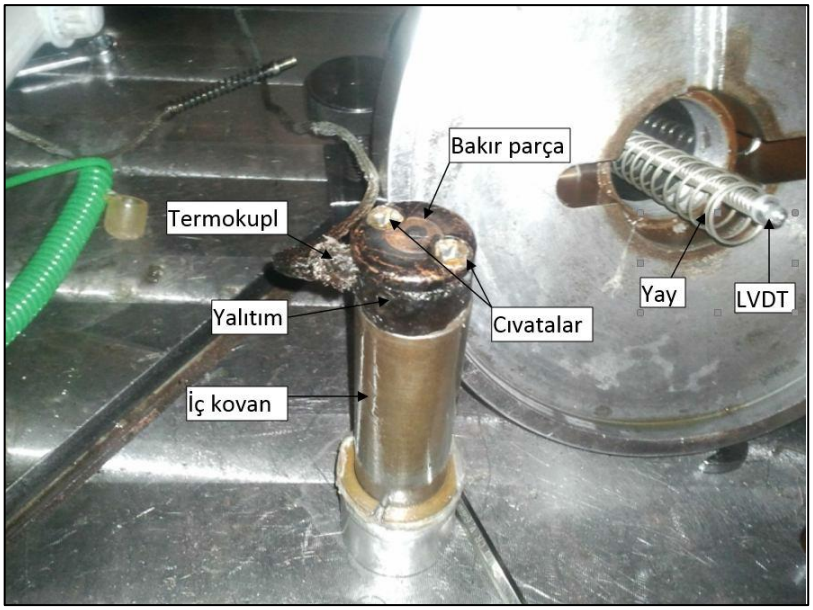
Şekil 3.6. Sac sıcaklığındaki düşme sorunu çözüldükten sonra

3.3.3. Test prosedürü

1 mm kalınlığındaki Al 5754 sacdan 165 mm çapında numuneler kesildikten sonra tavlanarak O temperine dönüştürülmüştür. Kalıp üzerine yerleştirilen sac numune baskı plakası yardımıyla şişirme sırasında kaymayacak ve sızdırma olmayacak kadar büyük bir kuvvetle sıkıştırılmıştır. Kalıplara sacın kalıp içerisine kaymasını önleyecek süzdürme çubuğu ile kilitleme yapılmamıştır. Çünkü süzdürme çubuklarının sacı sıkıştırması sırasında sacda bir ön gerilme oluşabilmektedir (Dilmeç, 2012). Bu da akma eğrilerinin belirli bir öteleme ile elde edilmesine sebep olur. Sıkıştırma işleminden sonra şekillendirmede kullanılacak hidrolik akışkan üst kalıp içerisine doldurulmuş, alt kalıp

ve üst kalıp ile birlikte üst kalıp içerisindeki hidrolik akışkan da indüksiyon ısıtıcılar (Şekil 3.3, 8 nolu parça) yardımıyla test sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. Kalıpların ve akışkanın ısıtılmasında diğer ısıtma yöntemlerine göre daha hızlı olmasından dolayı indüksiyon ısıtıcı kullanılmıştır. İndüksiyon ısıtmada kullanılan bakır boru, kalıpların etrafına dairesel olarak, kalıplara temas etmeyecek şekilde minimum uzaklıkta üç sargı olarak sarılmıştır. Sistem otomasyonu indüksiyon sargının üç adet oluşuna göre ayarlanmıştır.

Kalıp içerisinde sıkışan hava şişirme testlerini olumsuz olarak etkilemektedir. Bu olumsuz etkilerin giderilmesi için, üst kalıba sıvı giriş kanalının yanına hava tahliye borusunun takılacağı delik açılmıştır. Hava tahliye borusu kanala dikey olarak yerleştirilmiş, üst ucu akışkan girişini engellemek için kapatılmış ve boruya yandan delik açmak suretiyle sistemde sıkışan hava dışarı atılmıştır. Böylece testler daha sağlıklı yapılmıştır.



Şekil 3.7. Sac sıcaklığı ölçme sistemi

Numune kalıplara yerleştirilip büyük kuvvetlerle sıkıştırıldıktan sonra, istenilen sıcaklık değerine ulaşabilmek için teste başlamadan önce kalıplar ısıtılmıştır. Ön doldurma işlemi yapıldıktan sonra kalıp ve sac arasındaki fark sıcaklığı en aza indirgemek için bir süre beklenmiştir. Sac, test sıcaklığına ulaşıncaya kadar beklemek yerine, test yapılacak sıcaklığın yaklaşık 20˚C üzerinde bir sıcaklığa kadar ısıtılıp istenilen sıcaklık değerine ulaşması beklenerek fark sıcaklık değeri en aza indirgenmiş,

fark sıcaklık azaldıkça daha sağlıklı sonuçlar elde edilmiştir. Testlerde bekleme süresi yaklaşık 10 dakika olup, ulaşılan minimum fark sıcaklık değeri 10˚C'dir. Sıcaklık termokupl ile ölçülerek istenilen değere ulaştığı zaman basınç Hidrolik Nümerik Kontrol (HNC) sistemiyle kontrollü olarak artırılarak şişirme işlemi başlatılmıştır. Şişirme işlemi sacda yırtılma meydana gelinceye kadar devam ettirilmiştir.

3.3.5. Akma eğrilerinin elde edilmesi

Sac numunenin, şişme yüksekliği (h_d), sıcaklık değerleri ve akışkan basıncı (P) gerçek zamanlı olarak (real time) ölçülmüş ve bilgisayara kaydedilmiştir (Şekil 3.2).

Basınç ve şişme yüksekliği verileri yardımıyla, Panknin (1) ve Kruglov (2) yaklaşımları kullanılarak eğrilik yarıçapı (ρ) ve tepe noktası kalınlığı (t) değerleri MS Excel programında hesaplanmıştır.

$$\rho = \frac{(r_c + r_f)^2 + h_d^2 - 2 r_f h_d}{2 h_d} \tag{2.3}$$

$$t = t_0 \left[\frac{(r_c/\rho)}{sin^{-1}(r_c/\rho)} \right]^2 \tag{2.4}$$

Daha sonra, ρ ve t değerlerinden σ ve ε Eşitlik (3.3) ve (3.4) kullanılarak gerilme ve BŞD'ler hesaplanarak akma eğrileri çizilmiştir.

$$\sigma = \frac{P\rho}{2t} \tag{2.1}$$

$$\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_{zz} = ln\left(\frac{t_0}{t}\right) \tag{2. 2}$$

3.4. Birim Şekil Değiştirme Hızı

Malzemenin mukavemeti; birim şekil değiştirme (ε), deformasyon hızı ($\dot{\varepsilon}$) ve deformasyon sıcaklığının (T) bir fonksiyonu olarak, σ = f (ε, $\dot{\varepsilon}$, T) şeklinde ifade edilebilir (Kayalı, 1986). Deformasyon hızı bu çalışmada birim şekil değiştirme hızı (BŞD hızı) olarak ifade edilmiştir.

Deformasyon sıcaklığının gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin şekline, mukavemet, süneklik ve kırılma özelliklerine etkisi çok fazladır. Düşük sıcaklıklarda (T < 0.3 Tm), gerilmeye deformasyon hızının etkisi önemsizdir. Yüksek sıcaklıklarda (T > 0.5 Tm) ise, gerilme deformasyon hızına karşı çok duyarlı olup, deformasyon sertleşmesi ihmal edilebilecek seviyededir.

Deformasyon sıcaklığı ılık şekillendirme sıcaklıklarında (0.5 Tm > T > 0.3 Tm) ise gerilme değerlerine deformasyon oranının, deformasyon sertleşmesinin ve deformasyon hızının birbirine yakın derecede müşterek etkileri vardır (Meriç ve ark.,1997)

Çekme Testi

Çekme testleri için BŞD hızı, mühendislik BŞD hızı (é) ve gerçek BŞD hızı ($\dot{\varepsilon}$) olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir. Bunlardan Mühendislik BŞD hızı (é) çekme testinde test cihazının çene hızı ($V= dL_i/dt$) ile doğru orantılı olup,

$$\acute{e} = \frac{de}{dt} = \frac{V}{L_0} \tag{3.9}$$

bağıntısı ile hesaplanabilir

Burada, L_0 malzemenin ilk ölçü uzunluğu, L_i ise deformasyonun herhangi bir anındaki ölçü uzunluğudur.

Gerçek BŞD hızı ($\dot{\varepsilon}$) ise, birim zamanda meydana gelen gerçek şekil değiştirme miktarını gösterir ve,

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d[\ln(L_i/L_0)]}{dt} = \frac{V}{L_i} \tag{3.10}$$

bağıntısı ile belirlenir.

Gerçek BŞD hızı, numune boyundaki değişimin etkisini de gösterdiğinden, mühendislik BŞD hızına göre daha doğru sonuç vermektedir. Söz konusu deformasyon hızları arasındaki ilişki ise,

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\acute{e}}{1+e} \tag{3.11}$$

bağıntısı ile verilebilir (Kayalı, 1986; Dieter, 1976).

Şişirme Testi

Hidrolik şişirme testi için birim şekil değiştirme hızı değeri;

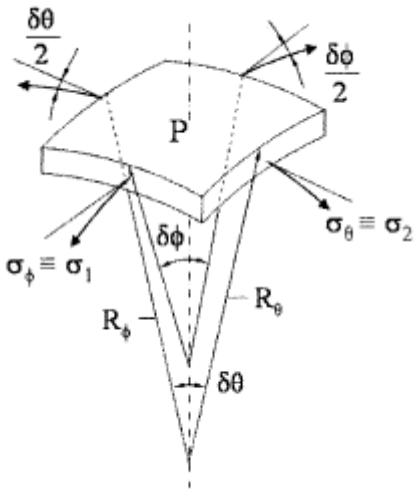
$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{3.12}$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır.

3.5. Membran Teorisinin Geçerliliği

Malzemelerin şişirme testi ile akma eğrileri elde edilirken, gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerinin hesaplanmasında kullanılan bağıntılar numunelerin küresel formda şiştiğini varsayan membran teorisine dayanmaktadır. Membran teorisinde eksenel simetri göz önüne alınmaktadır. Yani malzeme izotropik kabul edilmekte, dolayısıyla hadde yönündeki eğrilik yarıçapının hadde yönüyle açı yapan herhangi bir doğrultudaki eğrilik yarıçapına eşit olduğu varsayımı yapılmaktadır.

Şekil 3.8'de görüldüğü gibi eksenel simetrik bir kabuk eleman için uniform basınç dağılımı altında düzlem gerilmeler, basınç ve geometri arasındaki ilişki (Koh, 2008) ;



Şekil 3.8. Membran eleman üzerindeki gerilmeler (Koh, 2008)

$$\frac{\sigma_1}{R_\emptyset} + \frac{\sigma_2}{R_\theta} = \frac{P}{t} \tag{3.13}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada; σ_1, σ_2 : membran üzerindeki asal gerilmeler, $R_\varnothing$, R_θ : eğrilik yarıçapları (ρ), P : uniform basınç ve t : tepe noktasındaki membran kalınlığıdır.

Malzeme izotropik varsayıldığı için, küresel elemanın merkezinde düzlem gerilmelerin ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_m$) ve eğrilik yarıçaplarının ($R_\varnothing = R_\theta = R$) birbirine eşit olduğu söylenebilir. Buna göre gerilme basitleştirilmiş bir ifadeyle;

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_m = \frac{PR}{2t} \tag{3.14}$$

olarak verilebilir.

Ugural ve Fenster (1995) membrandaki maksimum eğilme gerilmesini

$$\sigma_b = \frac{p}{4} \tag{3.15}$$

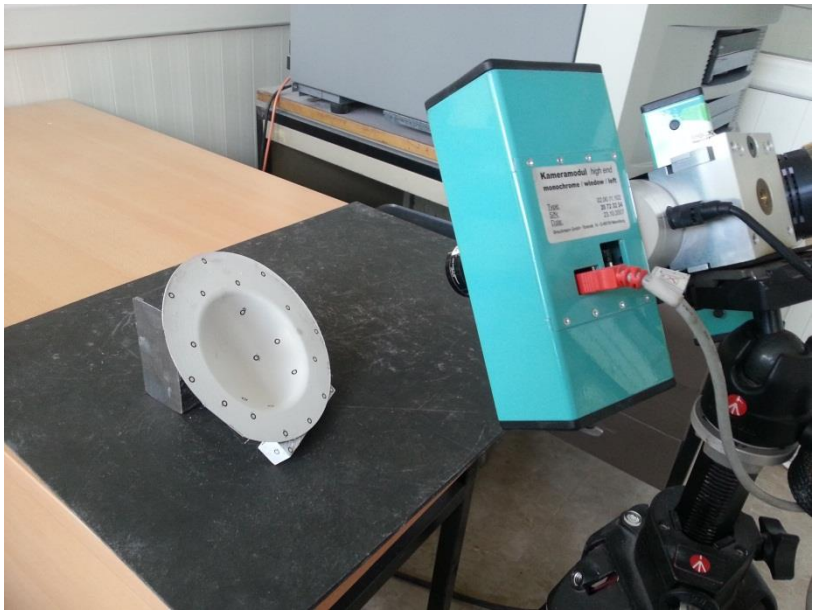
şeklinde türetmişlerdir. Buradan asal gerilmenin bükme gerilmesine oranı;

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_b} = \frac{2R}{t} \tag{3.16}$$

olur. Dairesel membranda kalınlığın radyüse oranının küçük olduğu durumlarda bükme gerilmeleri ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

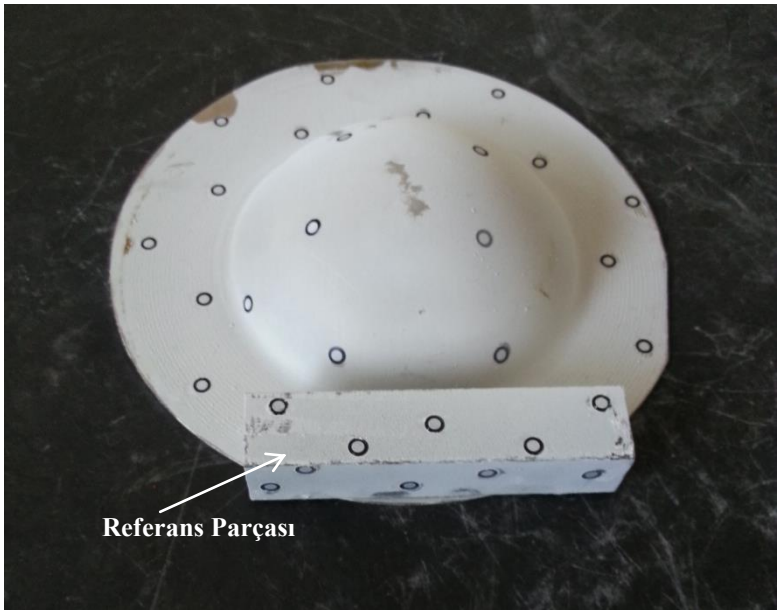
Çalışmada akma eğrileri belirlenirken öncelikle membran teorisinin geçerli olup olmadığına karar vermek için, numunelerin küreselliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için şişirilen numunelerin eğrilik (küre) yarıçapları ölçülmüş bağıntılarla hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca şişme yükseklikleri de ölçülerek karşılaştırılmıştır.

Şişirilen numuneler, 3B Optik tarama yöntemi kullanılarak taranmış ve nokta bulutları halindeki veriler elde edilmiştir. 1 mm kalınlığındaki test numuneleri Şekil 3.9'da görülen optoTop-HE 3B optik tarama cihazıyla taranmıştır. Tarama işlemi yaparken, parça üzerinde referans noktaları oluşturulması gerekmektedir. Referans noktaları parçanın iç ve dış yüzeylerine yapıştırılan indeks etiketleri ile sağlanmıştır.



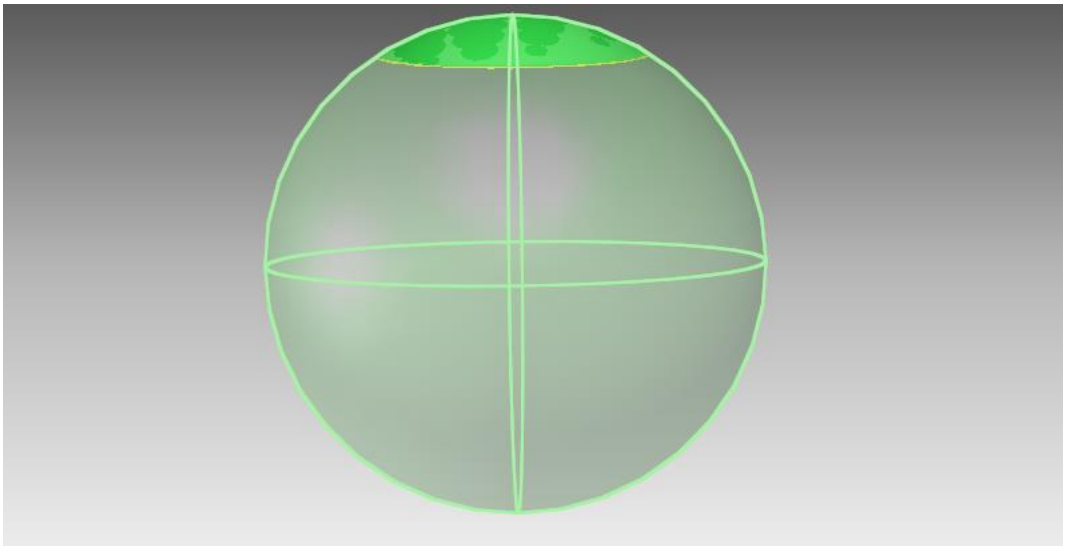
Şekil 3.9. Şişirme test numunelerinin optik tarama cihazı ile taranması

Numunelerin iç ve dış yüzeyleri ayrı ayrı tarandıktan sonra çakıştırılmaya çalışıldığında problem ortaya çıkmaktadır. Tarama tek işlemde bütün olarak yapıldığında ise, iç yüzeyden dış yüzeye geçerken ortak indeks etiketlerinin olacağı bir açının yakalanması gerekmekte ancak mümkün olmamaktadır. Bu sorunu çözmek için numunelerin flanş bölgelerine dikdörtgenler prizması şeklindeki referans parçaları yapıştırılmıştır (Şekil 3.10). Bu sayede indeks etiketleri farklı açılardan rahatça görülerek numuneler bir bütün halinde taranmıştır.



Şekil 3.10. Optik tarama cihazında taranan test numunesi

Nokta bulutları oluşturulduktan sonra elde edilen modele Rapidform 2004 yazılımında bir küre uydurulmuş ve geometrik ölçüm ile küre yarıçapı değeri elde edilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Optik tarama cihazı ile uydurulan örnek bir küre profili

3.6. Durum Çalışması

Bu bölümde çekme ve şişirme testlerinden elde edilen akma eğrilerinin hangisinin gerçek şekillendirme proseslerine daha yakın olduğunu belirlemek ve simülasyonlarda kullanılacak eğrilere karar vermek amacıyla iki farklı durum çalışması yapılmıştır.

Birinci durum çalışmasında Şekil 3.12'de görülen hidromekanik derin çekme ile üretilmiş olan silindirik bir parçanın Abaqus v6.9.1. yazılımı kullanılarak analizleri yapılmıştır. Sac malzeme Al 5754-O'nun akma eğrisinin yazılıma girilmesiyle modellenmiştir (Tınkır ve ark., 2014).



Şekil 3.12. Hidromekanik derin çekme yöntemiyle üretilmiş silindirik parça. Ölçme için çeyrek dilimi atılmıştır.

Testlerden elde edilen her iki akma eğrisi ayrı ayrı kullanılarak hidromekanik derin çekme ile üretilmiş bu iş parçasının simülasyonu yapılmıştır. Üretilen parçanın kalınlık dağılımı optik komparatör ile ölçülmüştür. Simülasyonlardan elde edilen kalınlık dağılımları ile ölçülen kalınlık dağılımları karşılaştırılmıştır.

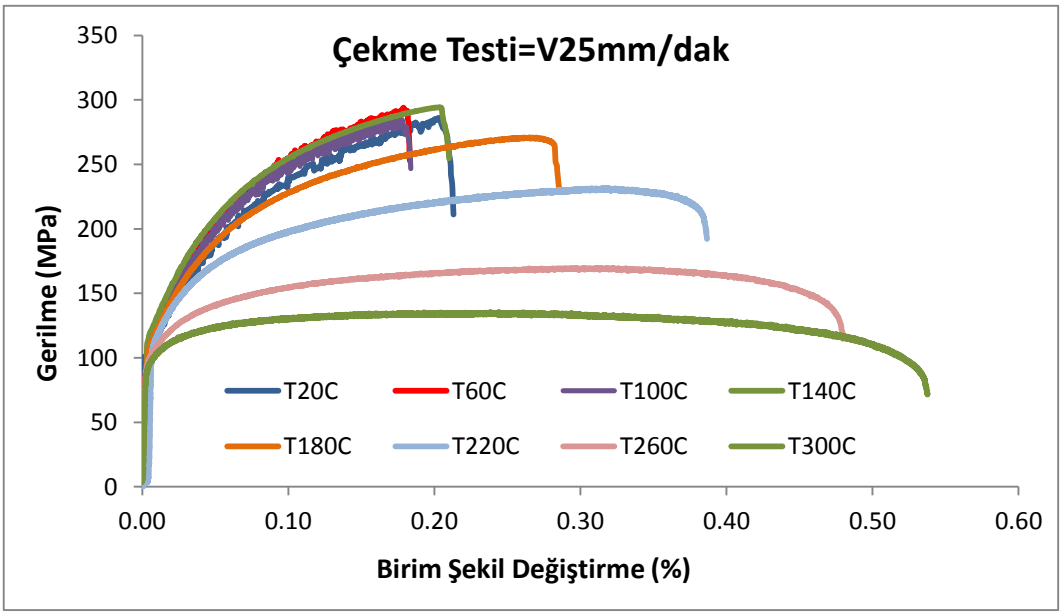
İkinci durum çalışmasında hidrolik şişirme testiyle şekillendirilen numunenin yine Abaqus v6.9.1. yazılımı kullanılarak analizleri yapılmıştır. Sac malzeme Al 5754'ün akma eğrisinin yazılıma girilmesiyle modellenmiştir. Testlerden elde edilen her iki akma eğrisi ayrı ayrı kullanılarak hidrolik şişirme ile şekillendirilmiş numunenin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonlardan elde edilen şişme yükseklikleri ile ölçülen şişme yüksekliği karşılaştırılmıştır.

4. TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde çekme ve şişirme test sonuçları verilip, eğrilerin simülasyonlarda kullanılacak kısımlarının belirlenmesi ve testlerin hata, güvenilirlik ve tekrarlanabilirlikleri üzerinde durulacaktır. Ayrıca durum çalışması test sonuçları da verilecektir. Testlerde kullanılan parametreler ve bu parametrelerin tezde kullanılan simgeleri; deformasyon sıcaklığı (*T*), şişirme basıncı (*P*), çekme testi çene hızı (*V*) ve şişirme testi hızını ifade eden istenen basınca ulaşma süresi (*S*) dir. Örneğin 140 ˚C sıcaklıkta ve 25 mm/dak hızda yapılan çekme testi T140-V25 ile gösterilmiştir. Yine T20-P40-S60 ile de 20 ˚C'de maksimum 4 MPa basınçta yapılan şişirme testi gösterilmiştir. Burada basınç eğrisi 10 MPa basınca 60 saniyede ulaşılacak şekilde ayarlanmıştır.

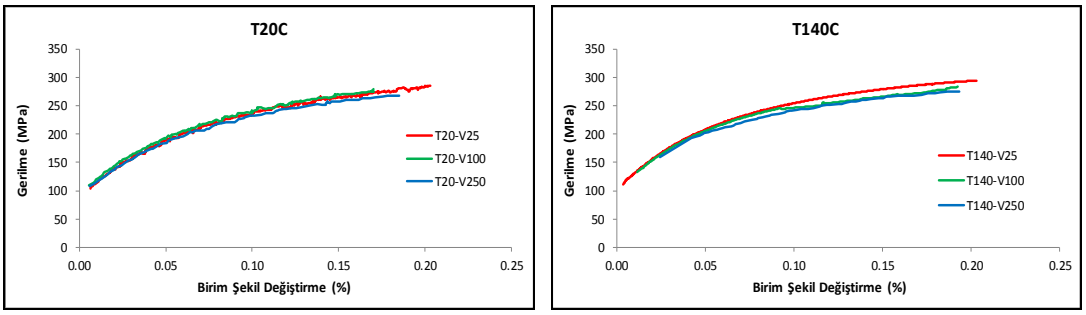
4.1. Çekme Testi Sonuçları

20, 60, 100, 140, 180, 220, 260 ve 300 ˚C sıcaklıklarda 25 mm/dak hız için çekme testiyle elde edilen akma eğrileri Şekil 4.1'de, 100 ve 250 mm/dak hızlar için elde edilen akma eğrileri de EK-1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; malzemenin akma eğrisinin 140 °C sıcaklıklara kadar önemli olabilecek şekilde değişmediği gözlenmiştir. 140 °C ile 300 °C arasındaki sıcaklıklar için ise, sıcaklığın artmasıyla gerilme değerleri önemli oranda düşerken, BŞD değerlerinin arttığı görülmektedir.

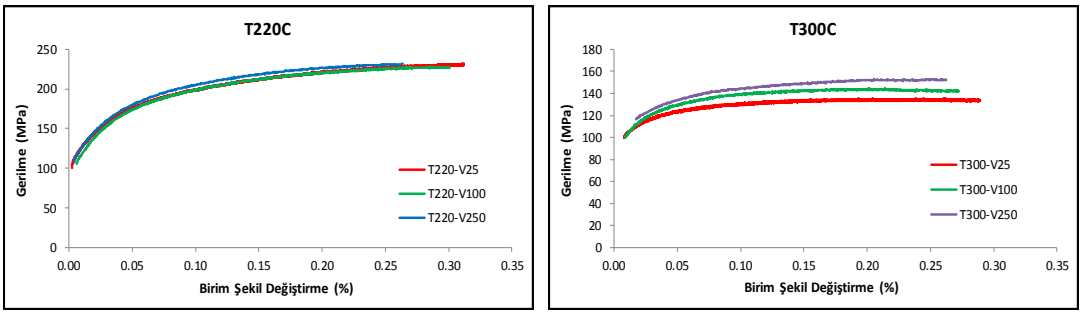


Şekil 4.1. Al 5754-O malzeme için çekme testinden V=25 mm/dak hızda elde edilen akma eğrileri

Şekillendirme hızının etkisi değerlendirildiğinde, Şekil 4.2'de 140 °C'ye kadar sıcaklıklar için şekillendirme hızının BŞD üzerinde bir etkisi olmazken, 140 ile 300 °C arasındaki sıcaklıklar için, şekillendirme hızının artmasıyla maksimum BŞD değerlerinin düştüğü görülmektedir. Örneğin 300 °C sıcaklık için, 25 ve 250 mm/dak çekme hızlarında maksimum BŞD'de %12 civarında bir azalma olmaktadır. Ayrıca 220 °C'ye kadar sıcaklıklar için şekillendirme hızı meydana gelen gerilmeleri değiştirmezken, 260 ile 300 °C arasındaki sıcaklıklar için, şekillendirme hızı artarken malzemenin pekleşerek gerilmelerinin arttığı görülmektedir. Diğer sıcaklıklar için benzer grafikler Ek 2'de verilmiştir. Bu grafiklerden malzemenin 260 °C'den yüksek sıcaklıklar için birim şekil değiştirme hızına duyarlı olduğu söylenebilir. Bu nedenle Al5754 malzeme şekillendirilirken, 260 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yüksek şekillendirme hızlarının kullanılması proses süresini kısaltacağı için uygun olurken, daha yüksek sıcaklıklarda malzemeyi mümkün olduğunca fazla şekillendirmek için düşük hızlar tercih edilmelidir.



a) 20 °C **b) 140 °C**



c) 220 °C **d) 300 °C**

Şekil 4.2. 20, 140, 220 ve 300 °C sıcaklıklar için farklı hızlarda elde edilen çekme testi akma eğrileri

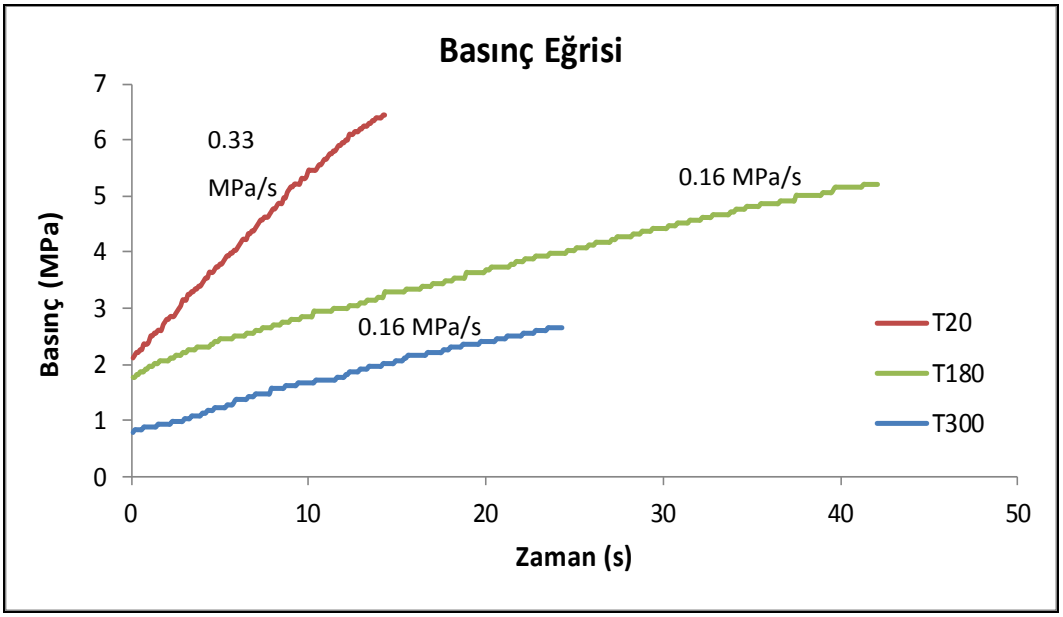
4.2. Şişirme Testi Sonuçları

20, 60, 100, 140, 180, 220, 260 ve 300 ˚C sıcaklıklarda şişirme testiyle şekillendirilen numune örnekleri Şekil 4.3'de görülmektedir. Şişirme testlerinde sürtünmenin sıfıra yakın olduğu düşünüldüğünden parçanın tam merkezden yırtılması beklenir. Testlerde numuneler 100 ˚C'ye kadar tam merkezden yırtılırken, daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında sıcaklık dağılımının tam homojen olmaması nedeniyle yırtılma merkezden 15-20 mm uzakta meydana gelmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalarda da, yüksek sıcaklıklardaki numunelerin benzer şekilde merkezden belirli mesafe uzakta yırtıldığı görülmüştür.



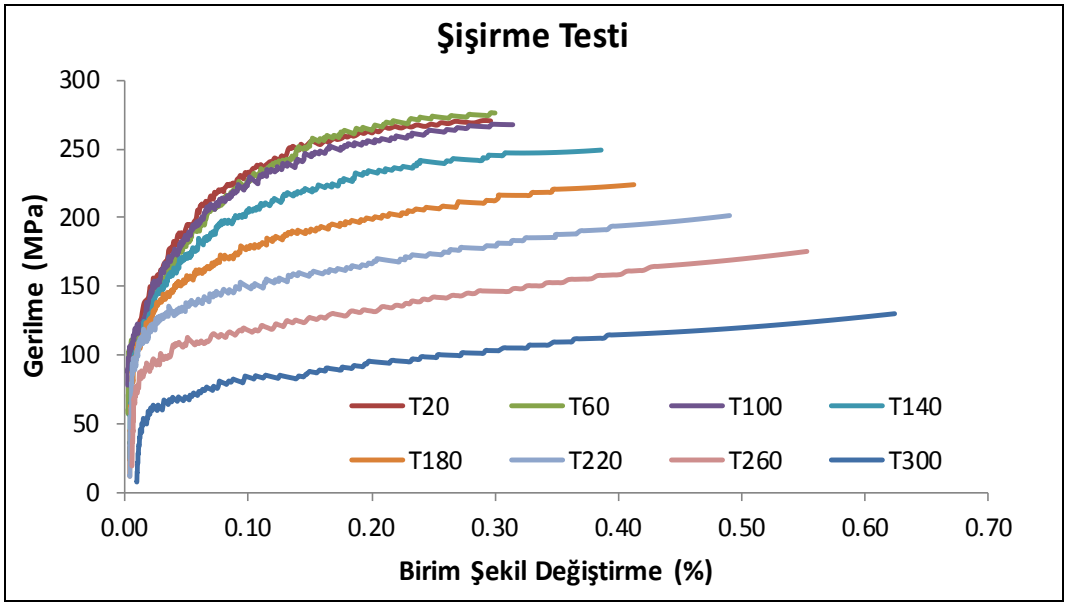
Şekil 4.3. Şekillendirilen hidrolik şişirme testi numuneleri

Testlerdeki şekillendirme hızı 10 MPa basınca 30 saniyede ulaşacak şekilde ayarlanmıştır. Fakat daha sonra özellikle 220 ˚C ve üzerindeki sıcaklıklarda test sırasındaki sıcaklık düşüşünü azaltmak ve numunelerin merkezden yırtılmasını sağlamak amacıyla bu süre 60 saniyeye çıkartılmıştır. Basınç artışı Şekil 4.4'te görüldüğü gibi lineer olarak değişmektedir.



Şekil 4.4. Şişirme testlerinde basınç eğrileri

Test sonuçları 60, 100, 140, 180 ve 220 ˚C sıcaklıklarda her iki şekillendirme hızı için de elde edilmiştir. Sadece 300 ˚C'de tek bir test yapılabilmiştir. Bu yapılan testte kapalı bir ortamda sıcak yağ içerisinde buharlaşan havanın, basınç altında sıkışıp, yırtılma anında ani genişlemesi sonucunda şiddetli patlama olmuş ve bu durum şişme yüksekliğini ölçen LVDT nin bozulmasına neden olmuştur.



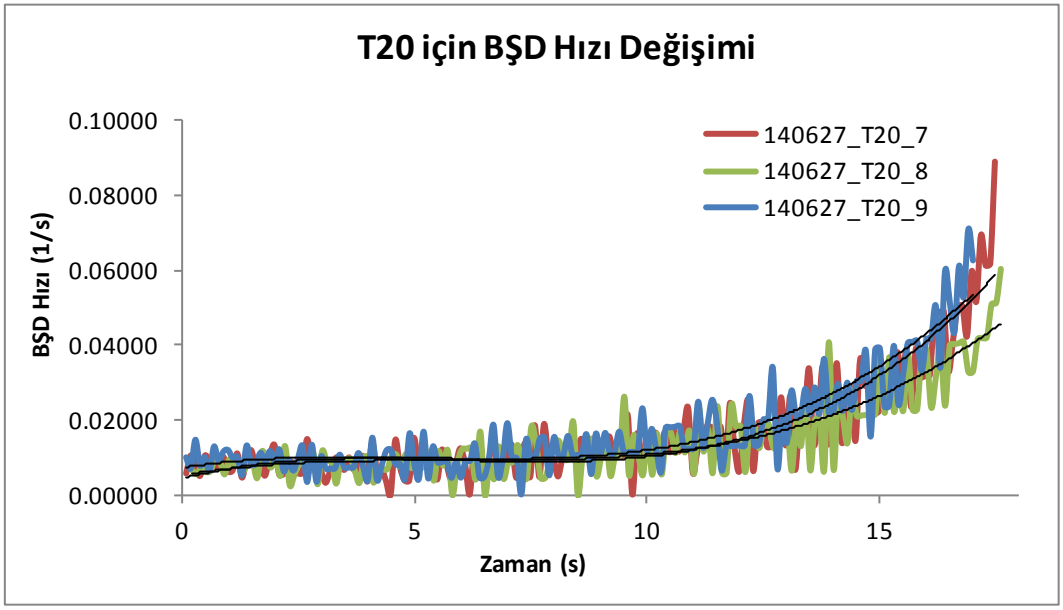
Şekil 4.5. Al 5754-O malzeme için hidrolik şişirme testinden elde edilen akma eğrileri

Şekil 4.5'de şişirme testine ait akma eğrileri verilmiştir. Malzemenin mekanik özellikleri 100 ˚C'ye kadar hemen hemen değişmezken, daha yüksek sıcaklıklarda normalde beklendiği gibi gerilme önemli oranda düşerken, maksimum BŞD artmıştır.

4.2.1. Şişirme testlerinde birim şekil değiştirme hızı

Bu çalışmada şişirme testleri sabit birim şekil değiştirme hızlarında ($\dot{\varepsilon}$) yapılamamış, belirli bir aralıkta değişmiştir. Bunun nedeni akışkan debisinin BŞD hızları, testlerden elde edilen verilerle hesaplanan BŞD değerlerinin zamana göre değişiminden yola çıkarak, Eşitlik 3.16 yardımıyla hesaplanmıştır. Çeşitli sıcaklıklar için yapılan tekrarlı testlerde ortalama BŞD hızları ve bunların standart sapmaları Çizelge Ek5'de verilmiştir.

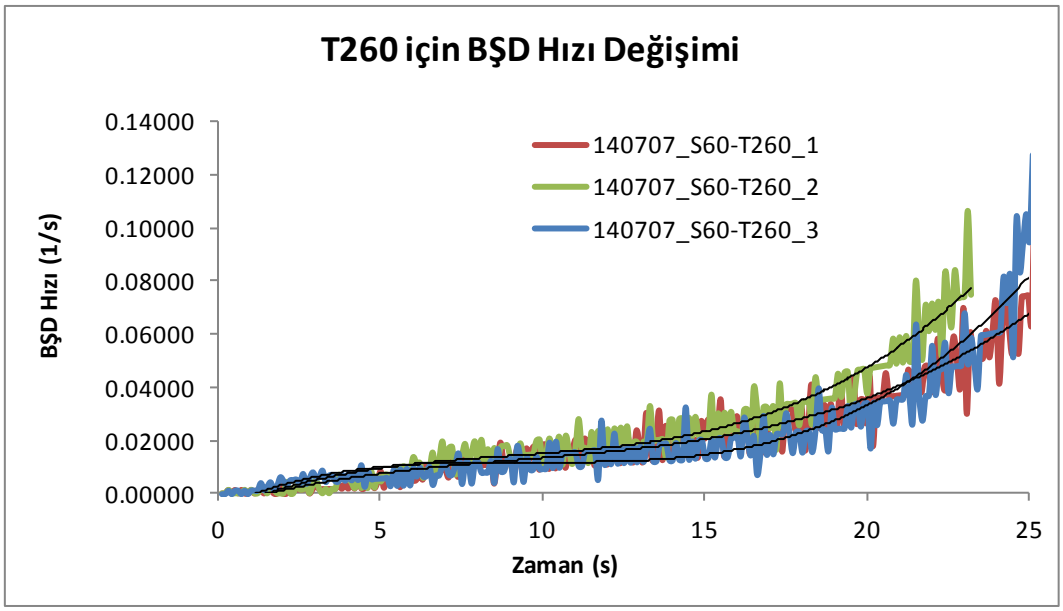
Al 5754-O malzemeye ait T 20 °C'de üç farklı tekrar için BŞD hızı değişimi Şekil 4.6'da görülmektedir. BŞD hızının tekrarlardaki karakteristiklerinin benzerliğini daha iyi gözlemleyebilmek için grafiklere eğriler uydurulmuştur. 20 °C'deki bu tekrarlarda BŞD hızı ortalama 0.015 1/s olarak bulunmuştur.



Şekil 4.6. Al 5754-O malzeme için T 20 °C 'de BŞD hızının zamana göre değişimi

Şekil 4.7'de ise 260 °C'deki üç tekrara ait BŞD hızının değişimi grafiği verilmiştir. 260 °C'deki bu tekrarlarda BŞD hızı ortalama 0.21 1/s olarak bulunmuştur.

Bütün sıcaklıklarda BŞD hızı değişimi grafikleri aynı karakteristiktedir ve uydurulan eğriler 3. dereceden polinomdur. Diğer sıcaklıklara ait BŞD hızı değişimi grafikleri EK-4'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Al 5754-O malzeme için T 260 °C 'de BŞD hızının zamana göre değişimi

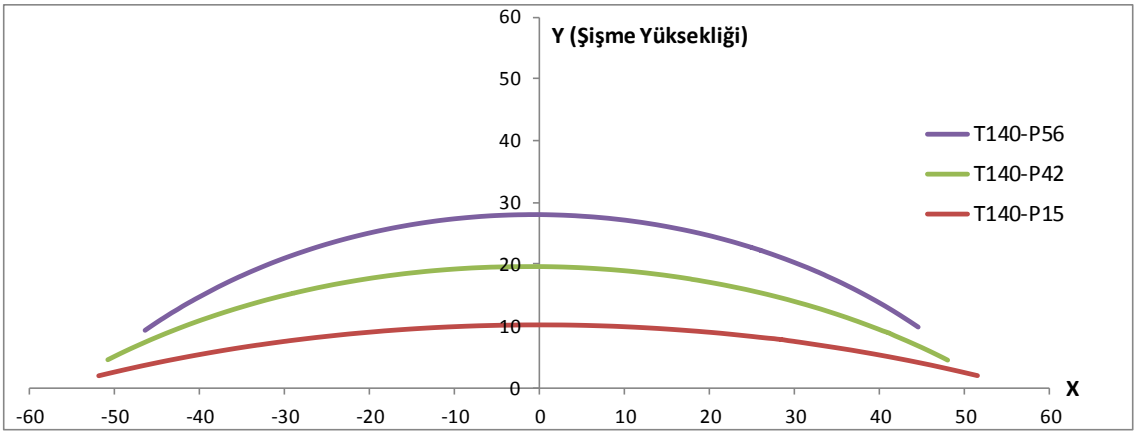
4.2.2. Küresellik ölçümü

Akma eğrileri şişirme testiyle belirlenirken, gerilme ve BŞD hesaplamalarının doğru olması membran teorisinin geçerli olmasına bağlıdır. Daha önce detaylıca anlatıldığı gibi bu hesaplamalar küresel şişme durumunda geçerlidir. Bu amaçla şişirmenin çeşitli safhalarında numunelerin küresellikleri ölçülmüştür. 20, 140 ve 220 °C sıcaklıklarda giderek arttırılan basınç değerlerinde şişirme işlemi yapılmıştır. Numuneler en son patlamadan önceki basınç değerine kadar şişirilmiştir. Farklı basınç değerlerinde şişirilen numunelerin eğrilik yarıçapları Panknin yaklaşımına göre hesaplanmıştır. Daha sonra optik tarama yöntemiyle nokta bulutu oluşturulan numunelere Rapidform 2004 programında küre uydurulmuş ve küre yarıçapları ölçülmüştür. Optik tarama ile ölçülen ve Panknin yaklaşımına göre hesaplanan eğrilik yarıçapı değerleri ve yüzde hataları Çizelge 4.1'de görülmektedir. Teorik ve testsel veriler ortalama olarak % 0.41 hata ile uyuşmaktadır. En yüksek hataya sahip T220-P15 testinde bile, ölçülen (135.2 MPa) ve hesaplanan (136.1 MPa) gerilme değerleri % 0.66 hata ile elde edilebilmektedir. Bu değerlere karşılık gelen BŞD'ler ise sırasıyla 0.0516, 0.0508 olup hata % 0.015'dir.

Çizelge 4.1. Farklı sıcaklık ve basınç değerlerinde ölçülen-hesaplanan eğrilik yarıçapları

Testler	Optik tarama ile ölçülen eğrilik yarıçapı (mm)	Panknin yaklaşımına göre hesaplanan eğrilik yarıçapı (mm)	% Hata
T20-P20	161.5730	161.9895	- 0.2578
T20-P40	101.0205	101.2147	- 0.1922
T20-P60	73.3296	73.4197	+ 0.1228
T140-P15	170.4584	170.8823	- 0.2487
T140-P42	88.5541	89.3321	+ 0.8786
T140-P56	66.8650	66.5952	- 0.4035
T220-P15	130.6375	131.8162	+ 0.9023
T220-P25	101.0415	101.1205	+ 0.0783
T220-P37	59.4884	59.0862	- 0.6761

140 °C sıcaklıkta 15, 42 ve 56 bar basınca kadar şişirilen numunelere ait, optik tarama yöntemiyle elde edilen küre formu Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. 140 °C'de şişirilen numunenin geometrisi

Sonuç olarak, testlerdeki numunelerin küreselliklerinin, membran teorisi kullanılarak gerilmelerin elde edilebilmesi için uygun olduğu yargısına varılabilir.

4.2.3. Şişme yüksekliği ölçümü

Akma eğrilerini oluşturabilmek için şişme yüksekliğinin anlık olarak ölçülmesi gerekmektedir. Şişme yüksekliği ölçümü LVDT konum sensörü ile yapılmıştır. Optik taramada nokta bulutları şeklinde elde edilen numune profilinin tabanına Rapidform 2004 yazılımında bir yüzey atanmış, bu yüzeyden tepe noktasına kadar olan dik uzaklık ölçülmüştür. LVDT'nin doğru ölçüm yapıp yapmadığını kontrol etmek için LVDT ile yapılan ölçümün sonuçları, optik tarama yöntemiyle elde edilen nokta bulutu verilerinden yapılan ölçümlerle karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.2). Teorik ve testsel veriler ortalama olarak % 1.6 hata ile uyuşmaktadır. En yüksek hatanın olduğu T220-P15 testinde bile küresellik ölçümünde verildiği gibi gerilme değerleri % 0.66, BŞD'ler ise % 0.015 hata ile elde edilebilmiştir.

Çizelge 4.2. Optik tarama ve LVDT ile ölçülen şişme yükseklikleri

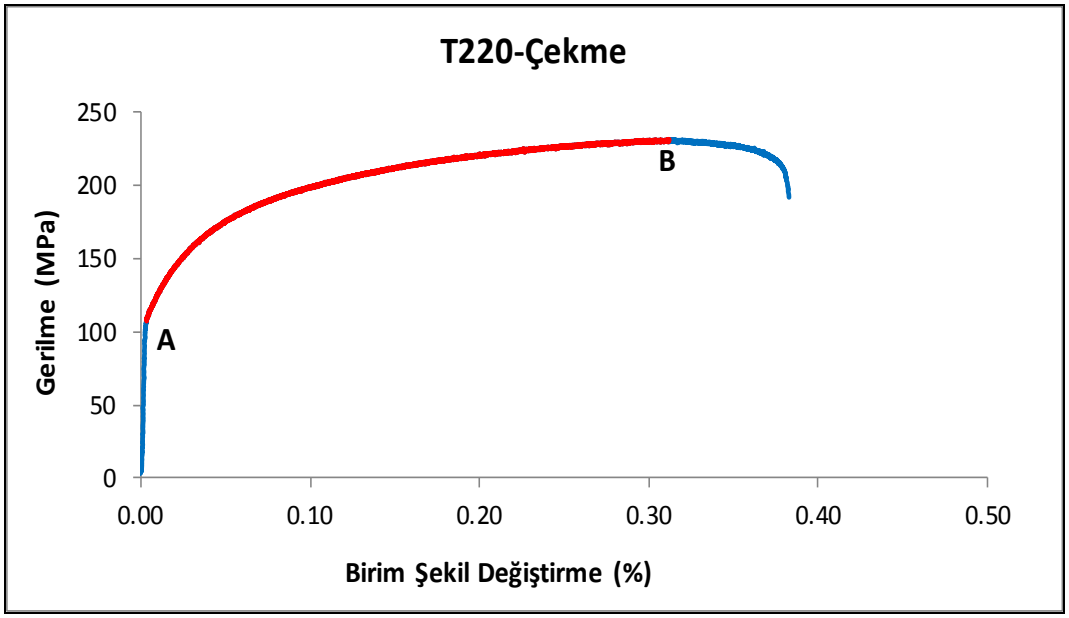
Testler	Optik tarama ile ölçülen yükseklik (mm)	LVDT ile ölçülen yükseklik (mm)	% Hata
T20-P20	10.8096	10.7556	0.5022
T20-P40	17.0690	17.0075	0.3613
T20-P60	24.4245	24.3962	0.1159
T140-P15	10.1231	10.2388	1.1300
T140-P42	19.5724	19.4271	0.7484
T140-P56	27.9925	27.7200	0.9829
T220-P15	13.7230	13.0660	5.0286
T220-P25	17.4603	17.0240	2.5632
T220-P37	34.4900	33.2801	3.6356

4.3. Simülasyonlarda Kullanılacak Akma Eğrileri

Çekme ve şişirme testlerinden elde edilen akma eğrileri elastik, plastik ve boyunlaşma bölgelerindeki verileri içerirler. Ancak bu testlerle elastik bölge yeterli hassasiyette elde edilemez. Ayrıca boyunlaşmanın başladığı andan itibaren malzeme

kararsız bir şekil değişimine uğramaktadır. Bu nedenle bu testlerle malzemelerin sadece plastik bölgesindeki mekanik özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabileceği için eğrilerin ne kadarlık bir bölgesinin dikkate alınacağı tespit edilmeli ve testlerin karşılaştırılmasında ve analizlerde akma eğrilerinin plastik bölgeleri baz alınmalıdır.

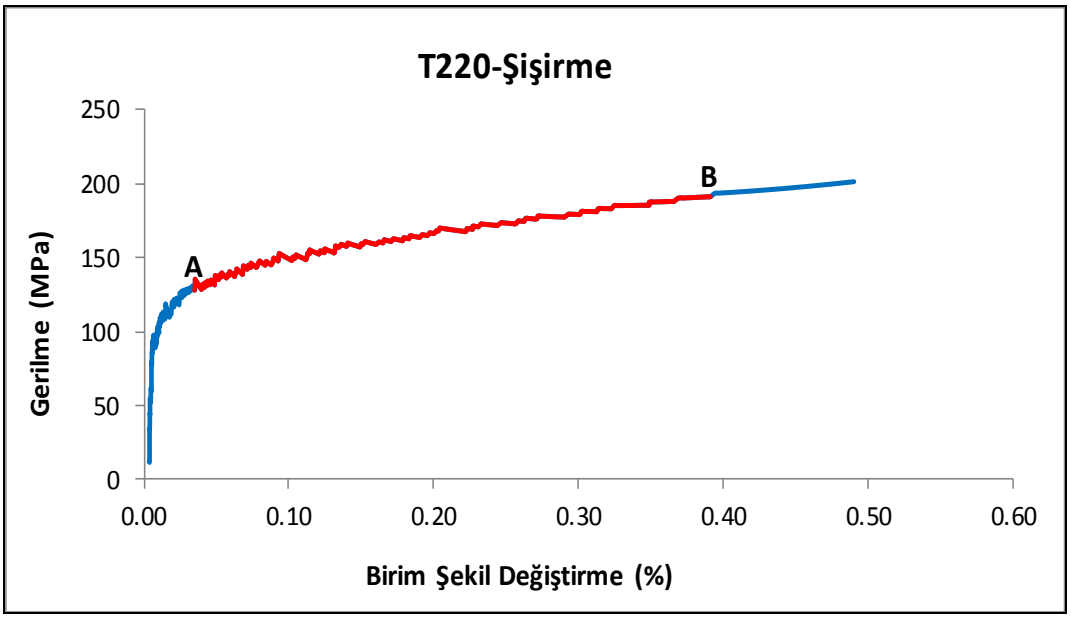
Şekil 4.9' da malzemenin örnek bir çekme testinden elde edilen akma eğrisinde *A* noktasından itibaren malzeme plastik şekil değiştirme bölgesine geçmektedir. *B* noktası ise maksimum çekme mukavemetine ulaşılan yani boyunlaşmanın başladığı noktadır. Yapılacak analizlerde çekme testi akma eğrilerinin, plastik bölge başlangıcı olan *A* ve boyunlaşmanın başladığı B noktaları arasında kalan kısımları kullanılacaktır.



Şekil 4.9. Simülasyonlarda kullanılacak çekme testi akma eğrisi örneği

Şekil 4.10'da malzemenin örnek bir şişirme testinden elde edilen akma eğrisinde *A* noktası membran teorisinin ve dolayısıyla akma eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan bağıntıların geçerli olmaya başladığı noktadır. Membran teorisine göre küre formunda şiştiği kabul edilen malzeme, şişirme testlerinde $\frac{h_d}{r_c} > 0.2$ değerinden itibaren küre formunu almaktadır (Koç ve Mahabunphachai 2010). Burada h_d şişme yüksekliği, r_c ise kalıp iç yarıçapıdır. Çalışmada kullanılan kalıplar 50 mm iç yarıçapına sahiptir. Bu

durumda şişirilen numune h_d >10 mm değerinden itibaren küre formuna geçmeye başlamaktadır. Buna göre *A* noktası 10 mm şişme yüksekliğinden itibaren elde edilen değerlerin başlangıç noktasıdır. *B* noktasında ise basınç değeri sabit kalmasına rağmen şişme yüksekliği ve birim şekil değiştirme değeri artmaya devam etmektedir. Eğriler bu noktada kesilmelidir, çünkü malzeme artık kararsız şekil değişimine uğramaya başlamıştır. Yapılacak analizlerde şişirme testi akma eğrilerinin, numunenin küre formunu almaya başladığı *A* noktası ile, kararsız şekil değişimine uğramaya başladığı *B* noktası arasında kalan bölgeleri kullanılacaktır.



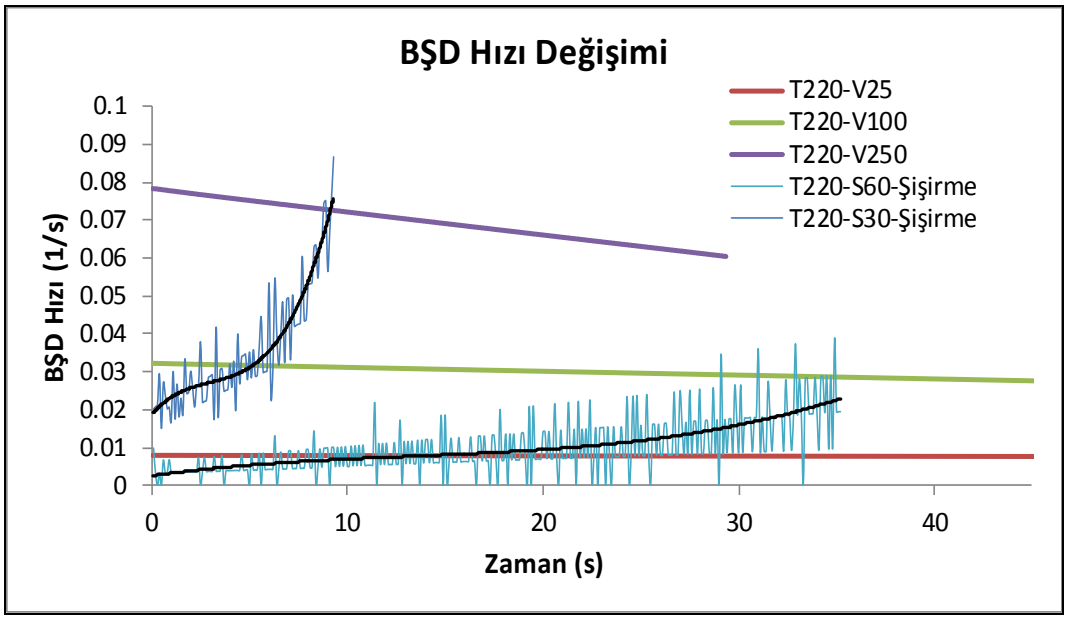
Şekil 4.10. Simülasyonlarda kullanılacak şişirme testi akma eğrisi örneği

4.4. Testlerin Karşılaştırılması

Çalışma kapsamında hidrolik şişirme testleri 10 MPa basınca 30 ve 60 saniyelerde ulaşacak şekilde ayarlanarak iki farklı hızda gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri ise 25, 100 ve 250 mm/dak hızlarda yapılmıştır. Testlerden elde edilen akma eğrilerinin birbiriyle karşılaştırılabilmesi için öncelikle karşılaştırmanın hangi hızlarda

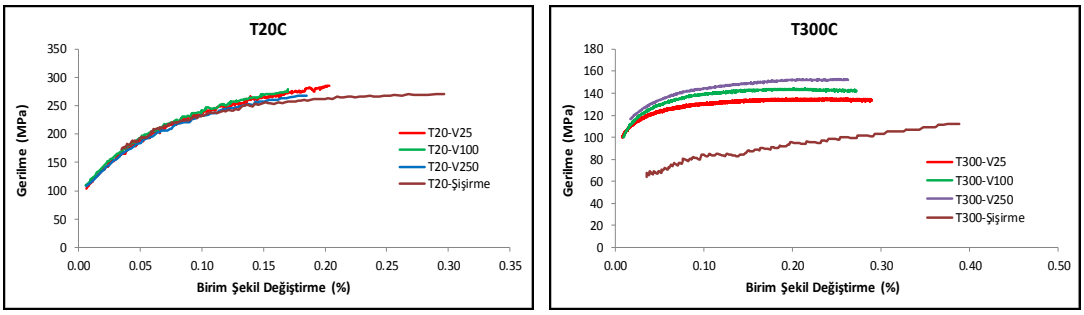
yapılacağının belirlenmesi gerekmektedir. Şişirme testleri ilk olarak basınca ulaşma süresi 30 saniye olacak şekilde ayarlanmıştır. Ancak 220 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edebilmek için bu süre arttırılarak 60 saniyeye çıkarılmış ve bu şekilde yapılan testler daha başarılı olmuştur. Şekil 4.11'de 220 °C sıcaklık için çekme ve şişirme testlerindeki BŞD hızı değişimi görülmektedir.

Basınca 30 saniyede ulaşılacak şekilde yapılan şişirme testinde BŞD hızı, 100 ve 250 mm/dak çekme hızlarında yapılan testlerdeki BŞD değerleri arasında kalmaktadır. Basınca ulaşma süresi 30 saniye olarak ayarlandığında 220 °C üzerindeki testler gerçekleştirilemediğinden dolayı şişirme testi için süresi 60 saniye olarak ayarlanan testlerin akma eğrileri kullanılmıştır. Bu testlerde BŞD hızları 25 ve 100 mm/dak çekme hızlarında yapılan testlerdeki değişim aralığında ve 25 mm/dak hızdaki değerlere daha yakındır. Sonuç olarak testlerin karşılaştırılmasında ve simülasyonlarda kullanılacak olan akma eğrileri için, çekmede 25 mm/dak hızda yapılan, şişirmede ise basınca 60 saniye sürede çıkılan test verilerinin kullanılmasının daha uygun olacağına karar verilmiştir.



Şekil 4.11. 220 °C sıcaklık için çekme ve şişirme testlerinde BŞD hızı değişimi

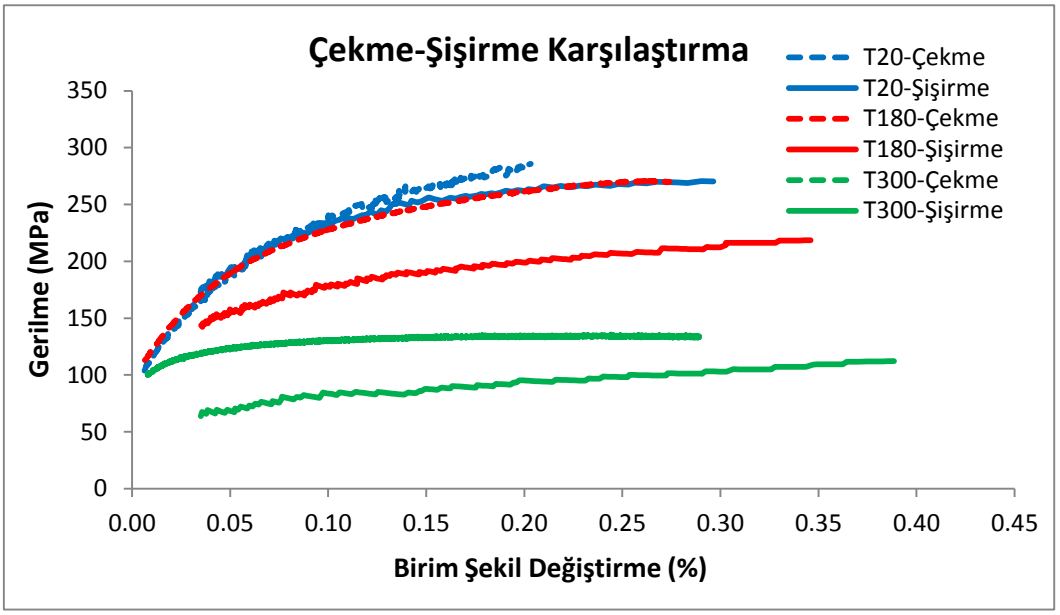
Şekil 4.12'de 20 ve 300 C° sıcaklıklarda ve farklı BŞD hızlarında yapılan çekme ve şişirme testi akma eğrileri birbirleriyle karşılaştırılmış, diğer sıcaklıklar için



Şekil 4.12. 20 ve 300 C° sıcaklıklarda ve farklı BŞD hızlarında yapılan çekme ve Şişirme testi akma eğrileri

karşılaştırma grafikleri EK-4'te verilmiştir. 20 °C'deki testlerde eğriler birbirine oldukça yakındır. 300 °C'de ise malzemenin birim şekil değiştirme hızına duyarlı olduğu açıkça görülmekte, çekme ve şişirme testi akma eğrileri daha düşük sıcaklıklardakine göre ekstrapolasyon yapıldığında birbirine yaklaşmaktadır.

Karşılaştırmada kullanılacak olan hızlara karar verildikten sonra, hidrolik şişirme testinden elde edilen sonuçlar ile çekme testinin sonuçları birbiriyle oda sıcaklığı, 180 ve 300 °C sıcaklıklar için Şekil 4.13'te karşılaştırılmıştır. Tüm sıcaklıklarda hidrolik şişirme testinden elde edilen akma eğrileri literatürde de belirtildiği gibi çekme testinden daha yüksek birim şekil değiştirme elde edilmiştir. Oda sıcaklığında çekme ve şişirme testi akma eğrileri birbirine yakın sonuçlar verirken 180 ve 300 °C sıcaklıklarda sonuçlar birbirinden oldukça farklıdır. Ayrıca şişirme testinde tüm sıcaklıklarda akma eğrisinde gerilme giderek artmış yani malzeme pekleşmiştir. Oysaki çekme testinde 260 ve 300 °C sıcaklıklarda pekleşmenin ortadan kalktığı görülmektedir.

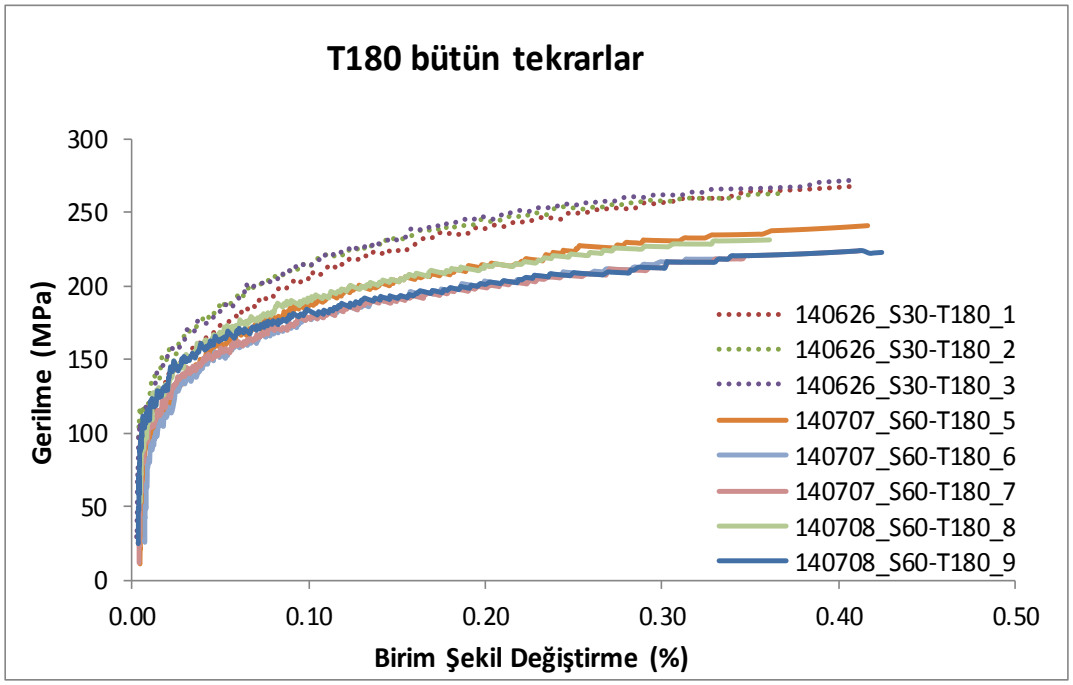


Şekil 4.13. Hidrolik şişirme ve çekme testi sonuçlarının karşılaştırılması

4.5. Testlerin Tekrarlanabilirliği ve Güvenilirliği

Deneysel çalışmalarda, elde edilen sonuçların ne kadar güvenilir olduğunun bilinmesi ve sonuçların ne kadarlık bir hatayla elde edildiğinin belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle bu bölümde şişirme testlerinden elde edilen verilerin tekrarlanabilirliği ve güvenilirliği incelenmiştir.

Şekil 4.14'te 180 °C sıcaklıkta 10 MPa basınca ulaşma süresi 30 ve 60 saniyelerde olmak üzere yapılan şişirme testlerinin farklı tekrarlarından elde edilen akma eğrileri verilmiştir. Bu grafikten artan hızla birlikte gerilme değerinin de arttığı görülmektedir. Grafiğe, diğer tekrarlarla uyumlu olan ve yaklaşık ortalamayı temsil eden eğriler alınmıştır. Şişirme işlemi daha yavaş yapıldığında gerilme düşmekte bunun yanında birim şekil değiştirme hızı da bir miktar artmaktadır. Buradan birim şekil değiştirme hızının akma eğrileri üzerinde bir etkisi olduğu sonucuna varılabilir. Testlerin tekrarları incelendiğinde 60 saniye sürede gerçekleştirilen testler de kendi içerisinde farklılıklar göstermektedir.



Şekil 4.14. Al 5754-O malzeme için T 180 °C 'deki akma eğrileri

Bunun nedeni test süresince sıcaklığın istenen değerde tam olarak sabit tutulamamasıdır. Çizelge 4.3'te de görüldüğü gibi ilk üç tekrarda sıcaklığın standart sapmasının yüksek olmasının nedeni, bu testlerde henüz sıcaklığın ani düşmesi ve fark sıcaklığın oldukça yüksek olması problemlerinin çözülememiş olmasıdır. Özet olarak 180 ˚C sıcaklıktaki testler 3.7 standart sapma ile ortalama 178˚C sıcaklıkta ve 0.0078 standart sapma ile ortalama 0.008 BŞD hızında gerçekleştirilmiştir. Tüm bu tekrarlar incelendiğinde deformasyon sıcaklığının da akma eğrileri üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3. Al 5754-O malzeme için T 180 °C 'deki ortalama sıcaklık ve BŞD hızı değerleri

	Sıcaklık		BŞD Hızı	
T180	**ortalama**	**stdsapma**	**ortalama**	**stdsapma**
140626_S30-T180_1	157	13.16773	0.02383	0.01790
140626_S30-T180_2	158	9.63839	0.02377	0.01607
140626_S30-T180_3	149	16.38058	0.02309	0.01913
140707_S60-T180_4	188	2.37022	0.01611	0.01362
140707_S60-T180_5	172	6.40002	0.00641	0.00793
140707_S60-T180_6	180	2.38689	0.00601	0.00621
140707_S60-T180_7	177	4.04168	0.00705	0.00743
140708_S60-T180_8	171	4.35257	0.00678	0.00385
140707_S60-T180_9	183	3.04486	0.00758	0.00790

Bütün sıcaklıklarda meydana gelen tekrarlar EK-5'de verilmiştir. 220 ˚C ve üzerindeki sıcaklıklarda tekrarlanabilirlikler daha düşüktür. Diğer sıcaklıklarda şekillendirme hızının değişmesi tekrarlanabilirliği biraz değiştirse de aynı hızda gerçekleştirilen testler genellikle kendi aralarında uyumludur. Buradan şekillendirme hızının da akma eğrileri üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılabilir. Tekrarlanabilirliğe şekillendirme hızından başka, şekillenme bölgesindeki sıcaklığın homojen dağılımı ve şekillenme sırasında sıcaklıkta meydana gelen değişim de etki etmektedir. Şekillenme bölgesindeki sıcaklığın homojenliğinden, sacın merkez sıcaklığı ile kalıp ve kalıbın radyüs sıcaklığının birbirleriyle farklı olması kastedilmektedir. Test sırasındaki sıcaklık değişimi ise şekillendirme sırasında ortama giren sıvıdan kaynaklanmaktadır. Test süresince sac merkezindeki sıcaklığın değişimi anlık olarak kaydedilmiştir. Testlerdeki sıcaklıklar genellikle ±10˚C aralığında sabit tutulabilmiştir. Tüm tekrarlara ait bu sıcaklıklar ve bu sıcaklıkların dağılımını belirten standart sapma değerleri Çizelge Ek5.1'de verilmiştir.

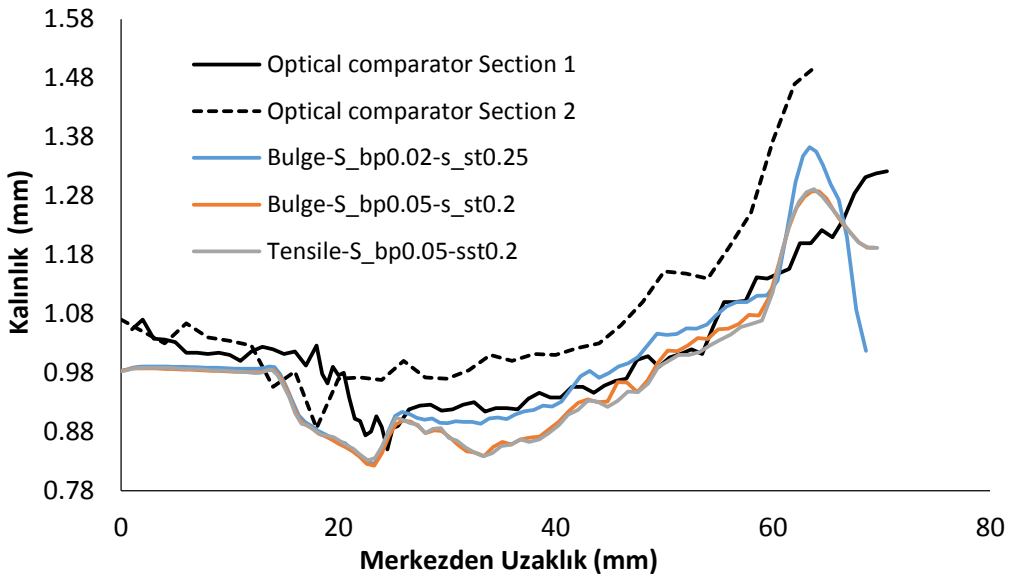
Farklı sıcaklıklar için minimum üç başarılı tekrar olacak şekilde elde edilen numunelerin aynı BŞD değerlerine ait gerilme değerlerinin ortalaması ve standart sapması bulunmuştur. Sonuçlar % 95 güvenilirlikle Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Bütün sıcaklıklar için testlerin tekrarlanabilirliği

Sıcaklık (°C)	Gerilmedeki Maksimum % hata	Gerilmedeki stdsapma	%95 Güvenilirlikle Gerilme
20	8.77	7.29	14.58
60	3.85	2.79	5.58
100	5.66	3.75	7.50
140	7.69	7.25	14.50
180	8.73	7.66	15.32
220	16.64	10.96	21.91
260	9.52	5.15	10.29

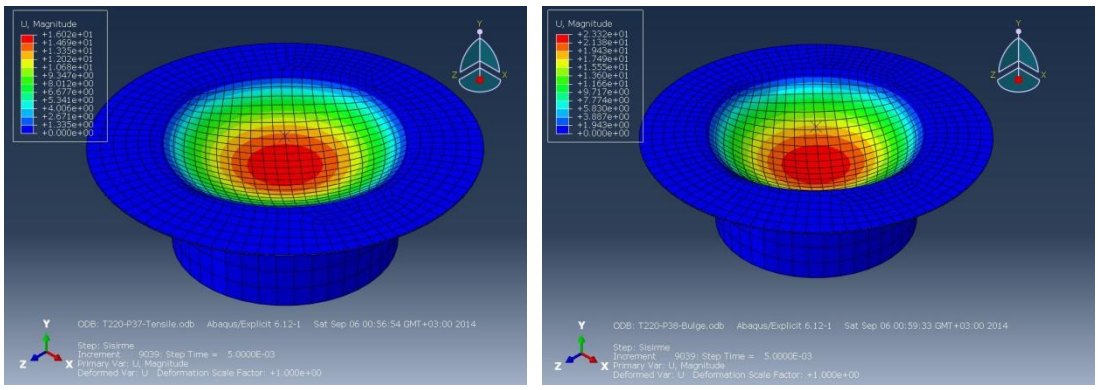
4.6. Durum Çalışması

Simülasyonlardan elde edilen kalınlık dağılımları ile ölçülen kalınlık dağılımları Şekil 4.15'te verilmiştir. Şekil 4.12'de oda sıcaklığında (20 °C) verilen akma eğrileri birbirlerine oldukça yakın olup şişirme testinde daha büyük BŞD'ler görülmektedir ve kalınlık dağılımları birbiriyle örtüşmektedir. Sürtünme katsayısı 0.25 alındığı zaman ölçülen değerlere daha yakın sonuçlar elde edilmektedir. Bu tez çalışması sırasında henüz ılık hidro şekillendirme analizleri tamamlanmadığı için diğer sıcaklıklarda karşılaştırma yapılamamıştır. Bu nedenle diğer sıcaklıklar için ikinci bir durum çalışması yapılmıştır.



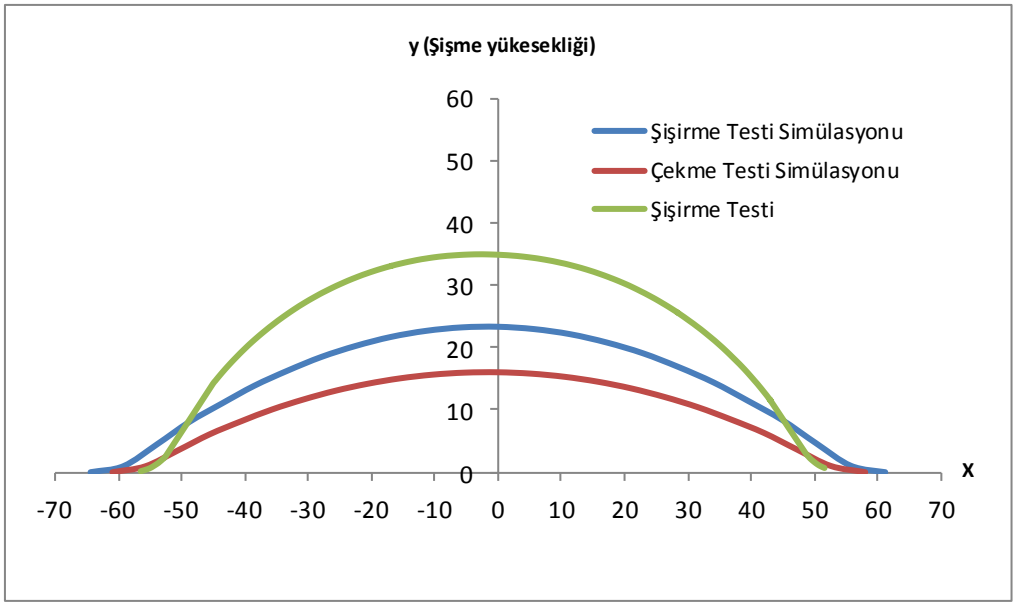
Şekil 4.15. Hidromekanik derin çekmeyle şekillendirilen parçanın kalınlık dağılımının analiz sonuçlarıyla karşılaştırılması

Bu durum çalışması için çekme ve şişirme testlerine ait simülasyonlar Şekil 4.16'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Çekme ve şişirme testleri için yapılan şişirme simülasyonları

Simülasyonlardan elde edilen şişme yükseklikleri Şekil 4.17'de karşılaştırılmıştır. 220 °C sıcaklık ve 38 bar basınçta yapılan şişirme analizlerinde, çekme akma eğrileriyle 16 mm şişme yüksekliği elde edilirken, bu değer şişirme akma eğrilerinde 23 mm'dir. Şişirme testinde ise gerçek şişme yüksekliği 34 mm'dir. Yapılan bu karşılaştırmalar neticesinde, şişirme testinden elde edilen akma eğrilerinin gerçek şekillendirme proseslerine daha yakın sonuçlar verdiği söylenebilir. Elde edilen şişme yükseklikleri gerçek şişme yüksekliğine göre daha düşüktür. Bu değerleri gerçeğe daha fazla yaklaştırmak için simülasyonlar üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılabilir.



Şekil 4.17. Simülasyonlardan çekme ve şişirme testleri için elde edilen şişme yüksekliklerinin gerçek test sonucuyla karşılaştırılması

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Şişirme testleri 4 mm radyüslü kalıplarla yapıldığında oda sıcaklığında problem oluşmazken, yüksek sıcaklıklarda tepe noktasından önce radyüs kenarlarında yırtılma oluşmaktadır. Bu nedenle kalıp radyüsü büyütülerek önce 5 mm'ye daha sonra 6.5 mm'ye çıkartılmıştır. Böylece daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Buradan testlerin sağlıklı yapılmasında kalıp radyüsünün etkili olduğu görülmektedir.

- Çekme testlerinde malzemenin mekanik özelliklerinin 140 °C sıcaklıklara kadar önemli olabilecek şekilde değişmediği gözlenmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise, sıcaklığın artmasıyla gerilme değerleri önemli oranda düşerken, maksimum BŞD değerleri artmaktadır.

- Şişirme testlerinde malzemenin mekanik özellikleri 100 ˚C'ye kadar hemen hemen değişmezken, daha yüksek sıcaklıklarda normalde beklendiği gibi gerilme önemli oranda düşmüş, maksimum BŞD artmıştır.

- 260 °C ve üzerindeki sıcaklıklar için, malzeme şekillendirme hızına duyarlı iken daha düşük sıcaklıklarda duyarlı değildir. Buna göre 260 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yüksek şekillendirme hızlarının kullanılmasının proses süresini kısaltacağı, daha yüksek sıcaklıklarda ise malzemeyi mümkün olduğunca fazla şekillendirmek için düşük hızların tercih edilebileceği sonucuna varılmıştır.

- Akma eğrileri elde edilirken malzemenin küresel formda şiştiğini kabul eden membran teorisine dayanan bağıntılar kullanılmıştır. Bunun için elde edilen küreselliklerin yeterli olup olmadığı belirlenmiştir. Yapılan küresellik ölçümlerinde, teorik ve testsel veriler ortalama olarak % 0.41

hata ile uyuşmaktadır. Buradan, testlerdeki numunelerin küreselliklerinin, membran teorisi kullanılarak gerilmelerin elde edilebilmesi için uygun olduğu yargısına varılabilir.

- Şişirme testlerinde deformasyon sıcaklığının akma eğrileri ve testlerin tekrarlanabilirliği üzerinde önemli etkileri olmaktadır.
- Oda sıcaklığında çekme ve şişirme testlerinden elde edilen akma eğrileri benzer karakteristiğe sahipken, 100°C üstündeki sıcaklıklarda eğriler oldukça farklı olmaktadır.
- Yapılan durum çalışmaları dikkate alındığında, şişirme testinden elde edilen akma eğrileri prosesleri daha iyi karakterize etmektedir.

5.2. Öneriler

- Bu çalışmada şişirme testleri belirli bir sıcaklık değerinde yapılmış, sıcaklık sabit tutulmaya çalışılmıştır. Ancak sıcaklık dağılımı tam olarak homojen değildir. Test düzeneği sıcaklık dağılımının daha homojen olmasını sağlayacak ve sıcaklık değerini istenen değere en yakın olarak tutabilecek şekilde geliştirilebilir.
- Çalışmalarda birim şekil değiştirme hızı sabit tutulamamış, belirli aralıkta değişmiştir. Bu değişimin de akma eğrilerini ve şekillendirilebilirliği etkilediği gözlemlenmiştir. Ancak birim şekil değiştirme hızının akma eğrileri üzerindeki etkisini tam olarak kestirebilmek için testler sabit BŞD hızlarında da yapılmalı ve değiştiği durumlarla kıyaslanabilir.
- Bu çalışmada Al 5754 malzemenin ılık hidrolik şişirme testleri yapılmış, şişme yüksekliği sonuçlarına bakılarak sıcaklık arttıkça malzemenin daha fazla şekillendiği gözlemlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda testler yapılarak, malzemenin farklı deformasyon sıcaklıklarında şekillendirilebilirliğini

inceleyen çalışmalar da yapılabilir. Ayrıca “dinamik toparlanma hızı” ile “BŞD hızı” karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

Anonim, 2013, http://www.dincermetal.com.tr/teknik_yazdir.asp?urunid=42 [Ziyaret Tarihi: 22 Ekim 2013].

Anonim, 2014, http://www.istanbul.edu.tr/eng/metalurji/selim/B1Y%C3%BCksekSic .pdf [Ziyaret Tarihi: 18 Haziran 2014].

Banabic, D., 2012, Characterization of plastic behaviour of sheet metals by hydraulic bulge test, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22, 275−279.

Dilmeç, M., 2012, 2024 T4 Alüminyum sacların şekillendirme sınır eğrilerinin kalınlığa göre değişimi, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 69.

Erhuy, C. G., Yurci, M. E. and Altan, T., 2008, Determining the effective stress – effective strain curve of a high-strength low-alloy steel sheet from the viscous pressure bulge test, *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 26 (4), 281-300.

Escarpita, D. A. A., Cardenas D., Elizalde H., Ramirez R. and Probst O., 2012, Composites and Their Properties, Biaxial Tensile Strength Characterization of Textile Composite Materials, 83-107.

Groche P., Huber R., Dorr J., Schmoeckel D., 2002, Hydromechanical Deep-Drawing of Aluminium Alloys at Elevated Temperatures, CIRP Annals- Manufacturing Technology, 51, 215-218.

Guscher, G., Altan, T., 2004, Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test, *Journal of Materials Processing Technology* 146, 1-7.

Halkacı H. S., 2011, Sac Hidrolik Şekillendirme Deney Ünitesi Gerçekleştirildi, *Mühendis ve Makina,* 52 (615), 37-40

Karaağaç, İ., Gürün H., Özdemir A., 2009, AISI 304 Paslanmaz Çelik Sac Malzemenin Klasik Olarak ve Sıvı Basıncıyla Derin Çekilebilirliklerinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Karşılaştırmalı Analizi, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye.

Karalı, M., Cora, Ö. N. and Koç, M.,2012, DP780 çelik sacların mekanik özelliklerinin hidroşişirme yöntemiyle incelenmesi, *I. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu (IISS'12)*, Karabük Üniversitesi, 1316-1323.

Kaya S., Altan T., Groche P., Klopsch C., 2008, Determination of the flow stress of magnesium AZ31-O sheet at elevated temperatures using the hydraulic bulge test, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,48: 550–557.

Kayalı E. S. ve Çimenoğlu, H. 1986. Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İTÜ Kimya Metalurji Fak. İstanbul.,

Koç, M., Billur, E. and Cora, Ö. N., 2011, An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods, *Materials and Design* 32, 272-281.

Koç, M. and Mahabunphachai, S., 2008, Investigation of size effects on material behavior of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scales, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48, 1014–1029.

Koh, C. W., 2008, Design of a Hydraulic Bulge Test Apparatus, Yüksek Lisans Tezi, *Master of Science in Naval Architecture and Marine Engineering at the Massachusetts Institute of Technology*,36-37

Mahabunphachai S., Koç M., 2010, Investigations on forming of aluminum 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures, *Materials and Design*, 31, 2422–2434.

Meriç, C., Atik, E. ve Özkaya, E., 1997, Deformasyon sıcaklığının ve deformasyon hızının Al 99.0'un mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (3), 293-298

Novotny S., Geiger M., 2003, Process design for hydroforming of lightweight metal sheets at elevated temperatures, *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 594–599.

Siegert K. and Jager S., 2004, Pneumatic Bulging of Magnesium AZ31 Sheet Metal at Elevated Temperatures, Magnesium Technology 2004.

Siegert K. and Jager S., 2004, Warm forming of magnesium sheet metal, SAE 2004 World Congress & Exhibition, March 2004, Detroit.

Slota, J. and Spısak, E., 2008, Determination of flow stress by the hydraulic bulge test, METABK 47(1), 13-17.

Tınkır M., Dilmeç M., Türköz M. and Halkacı H. S., 2014, "Investigation of the effect of hydromechanical deep drawing process parameters on formability of AA5754

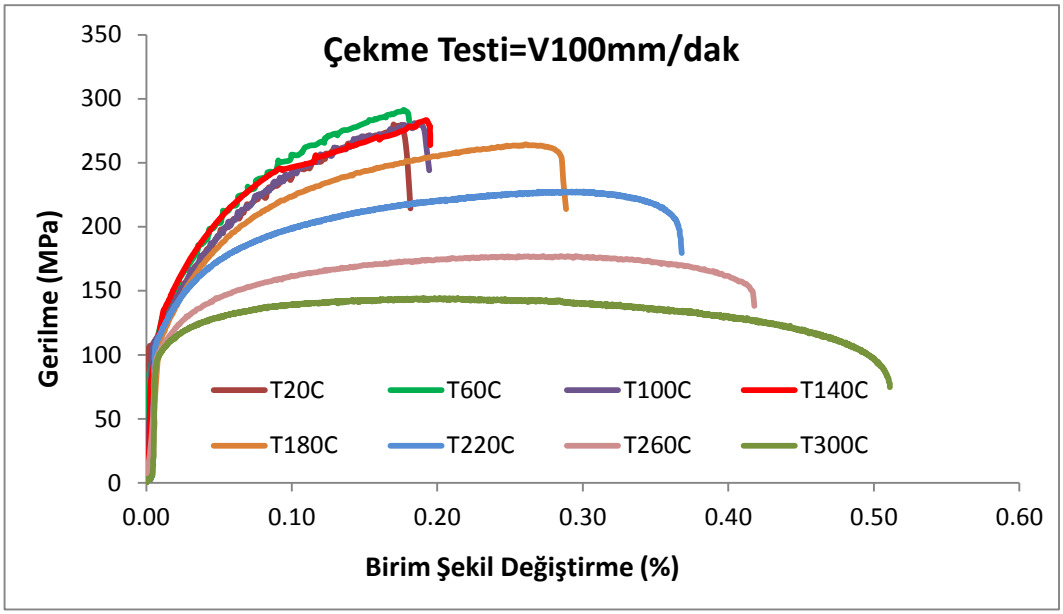
sheets metals by using neuro-fuzzy forecasting approach", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, (accepted) DOI:10.3233/IFS-141346.

Türköz, M., 2009, Al 5754 ve Al 2024 alaşımlı alüminyum sacların şekillendirilebilme kabiliyetinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 18-24.

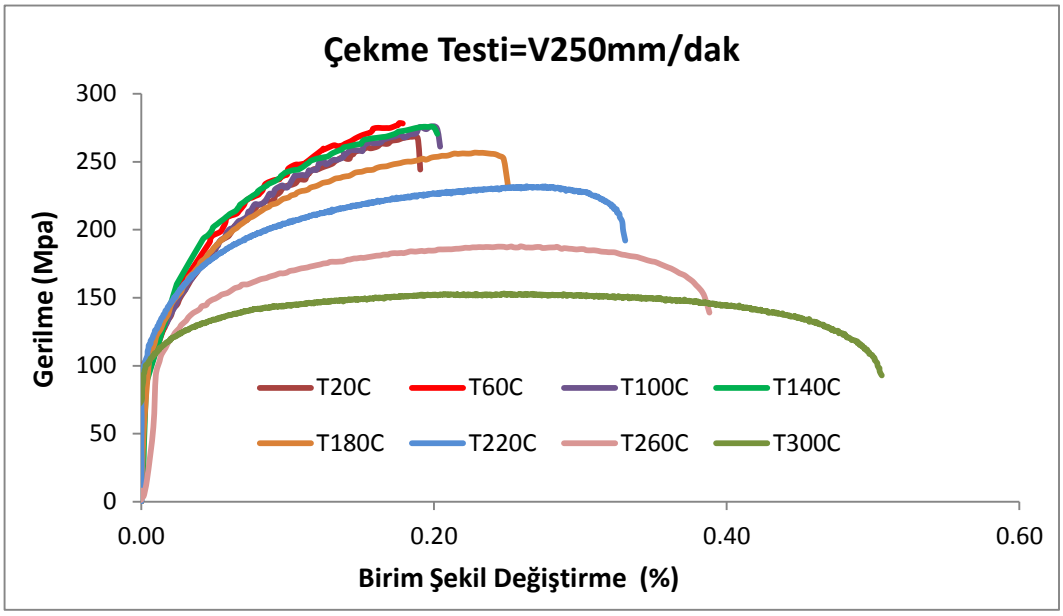
Yaşar, M., Kadı, İ. and Evlen, H., 2011, AA 5754 sacının farklı sıcaklıklarda hidrolik akışkanla şekillendirilmesi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.

EKLER

EK-1 Farklı çekme hızlarında yapılan çekme testi akma eğrileri

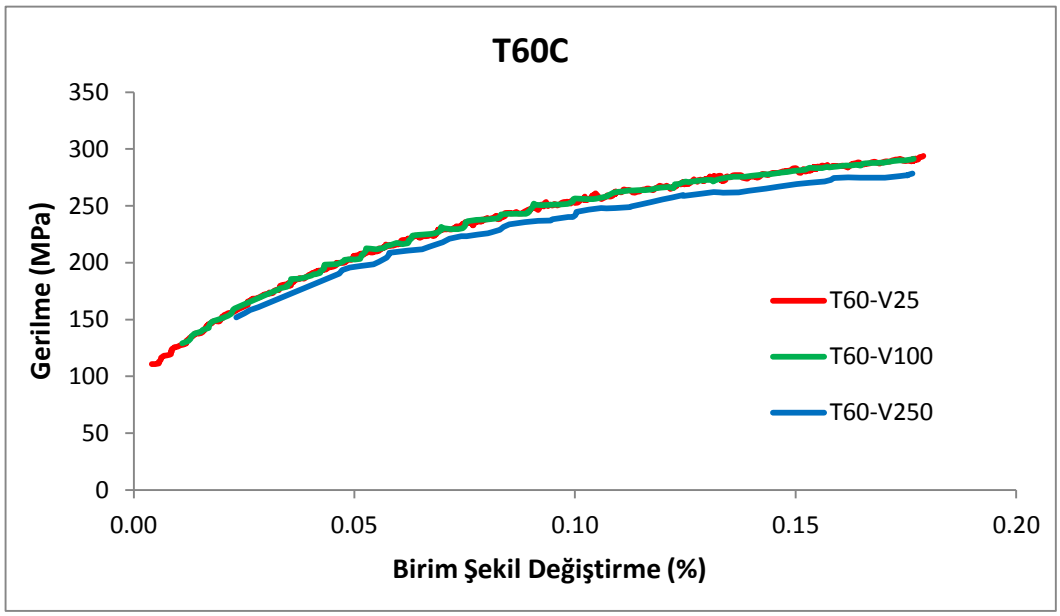


Şekil Ek1.1. Al 5754-O malzeme için çekme testinden V=100 mm/dak hızda elde edilen akma eğrileri

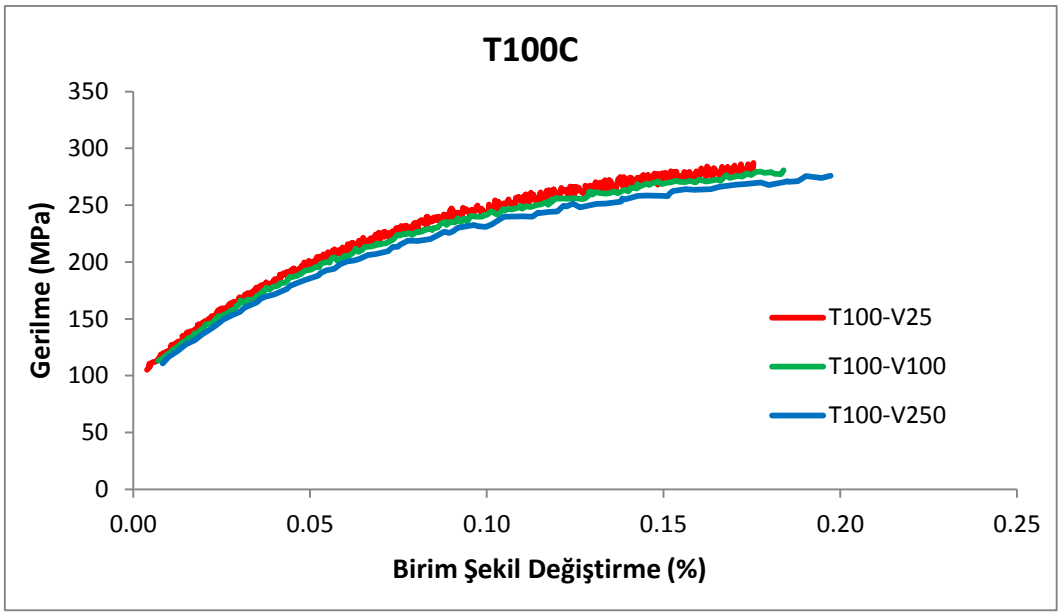


Şekil Ek1.2. Al 5754-O malzeme için çekme testinden V=250 mm/dak hızda elde edilen akma eğrileri

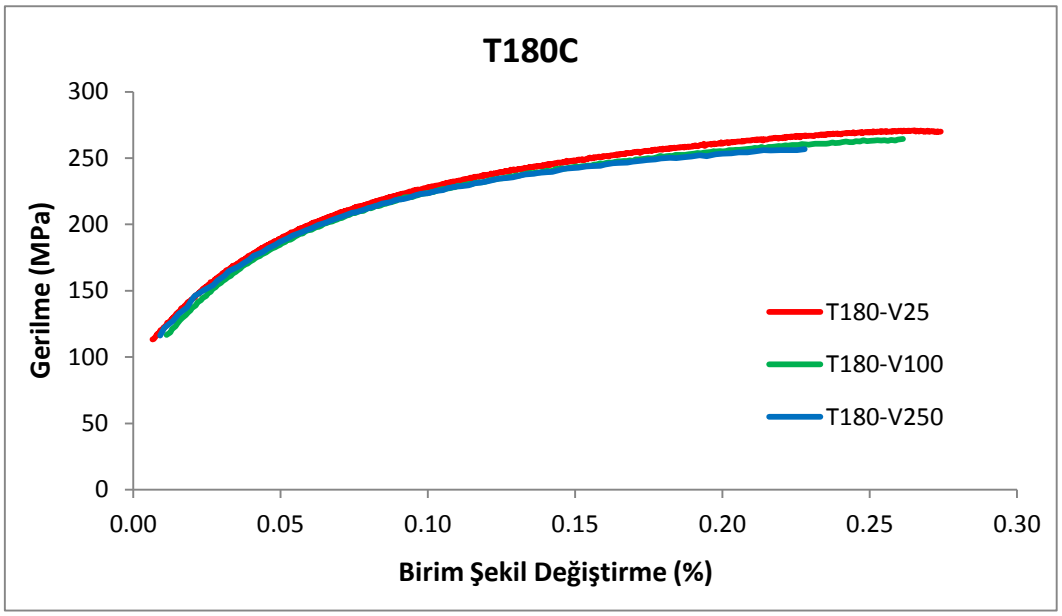
EK-2 Farklı sıcaklık ve hızlarda elde edilen çekme testi akma eğrileri



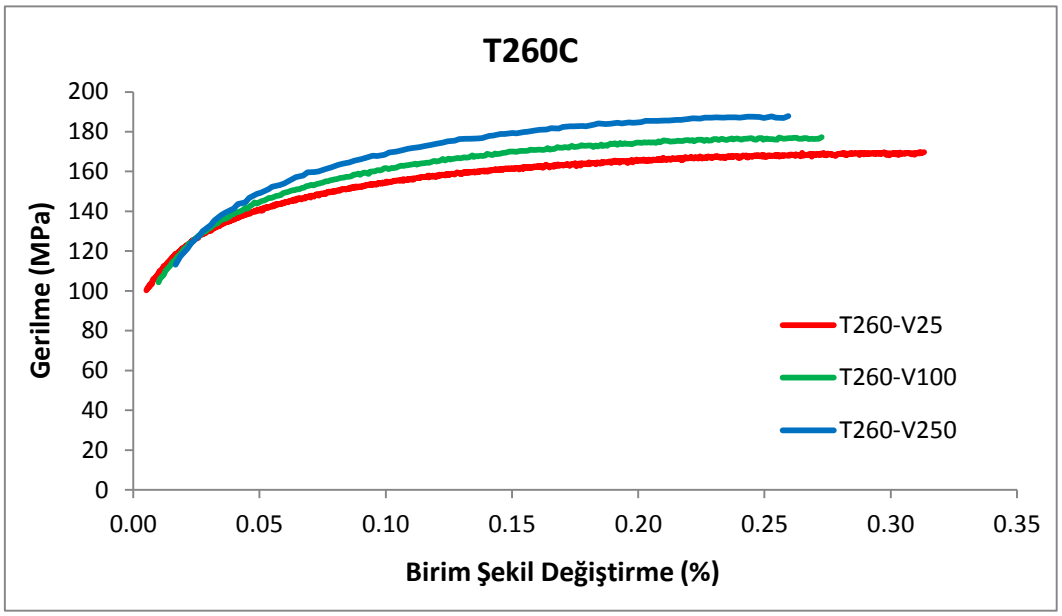
a)



b)



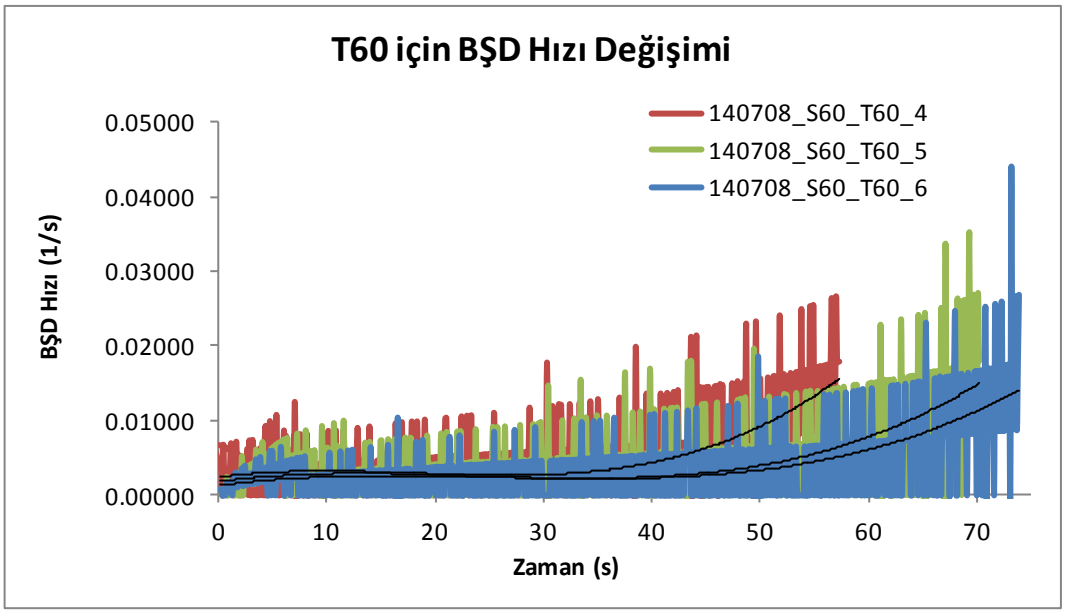
c)



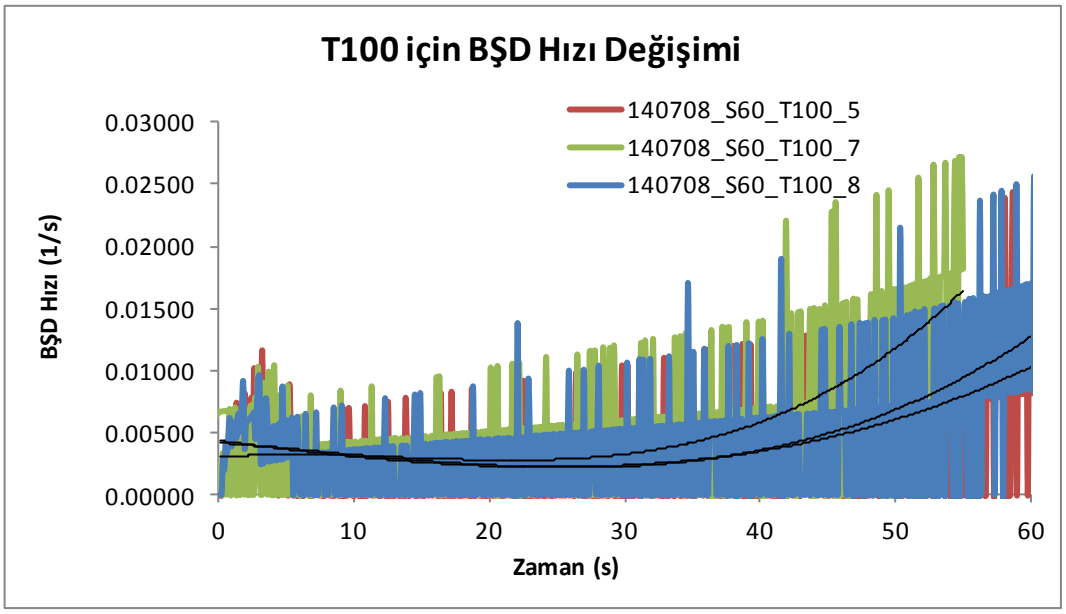
d)

Şekil Ek2.1. Farklı hızlarda elde edilen çekme testi akma eğrileri a) 60 °C, b) 100 °C, c) 180 °C ve d) 260 °C

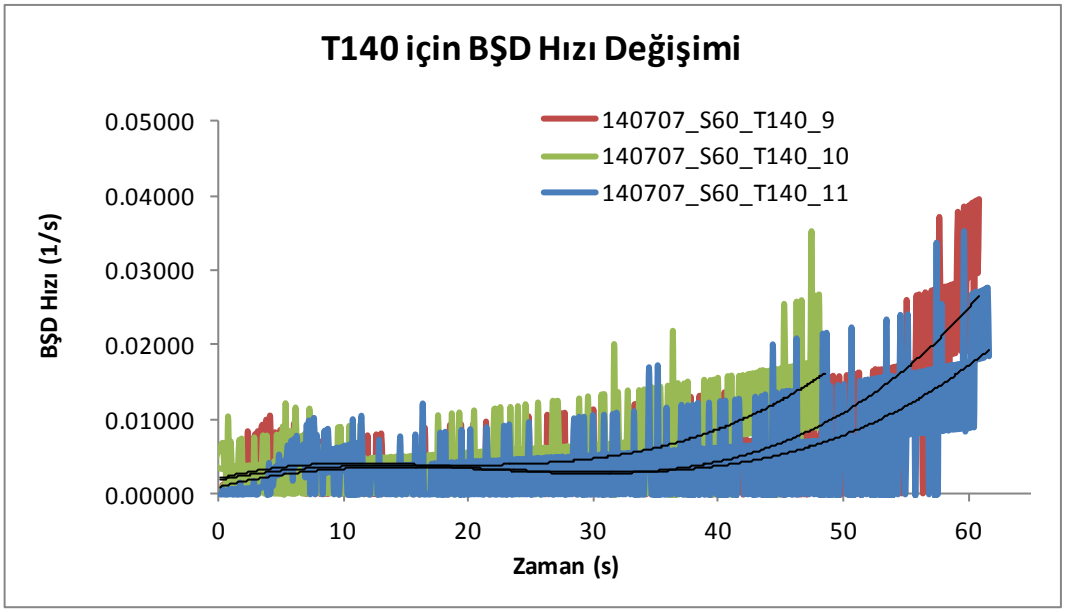
EK-3 Al 5754-O malzeme için bütün sıcaklıklarda BŞD hızının zamana göre değişimi



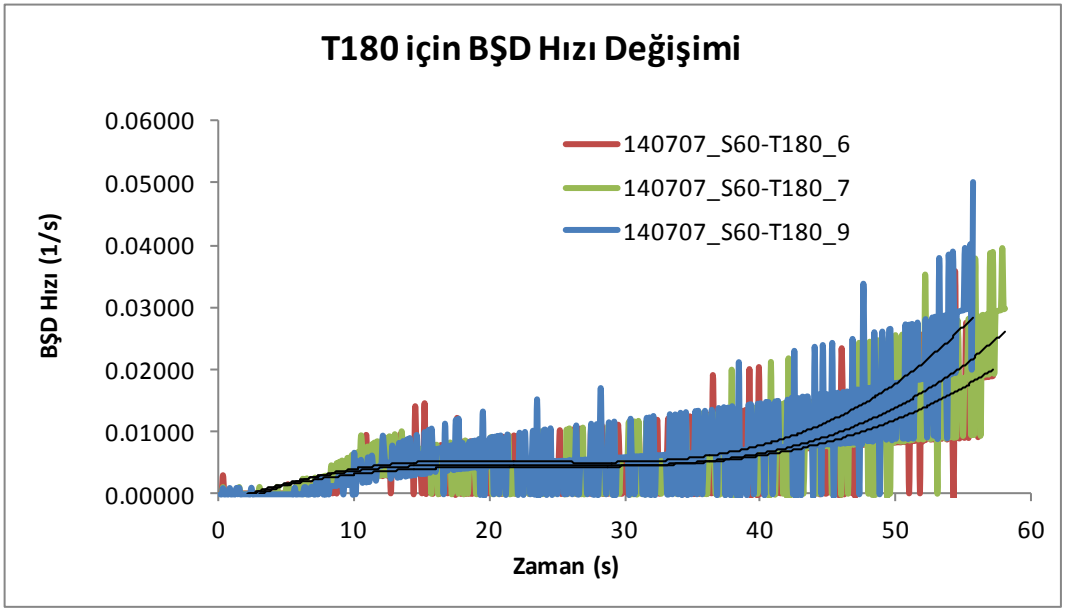
a)



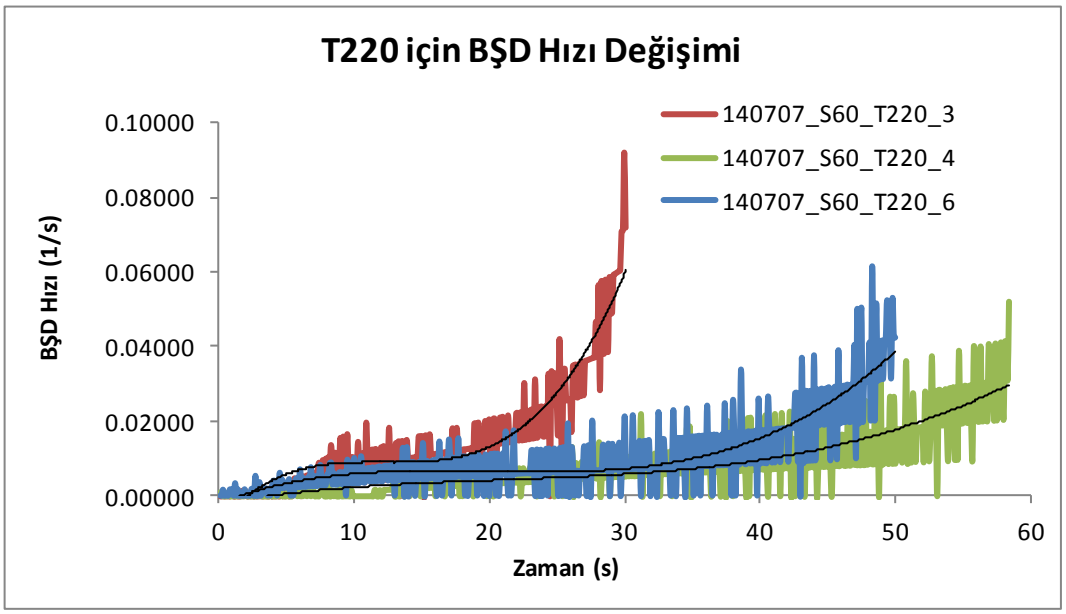
b)


T140 için BŞD Hızı Değişimi
140707_S60_T140_9
140707_S60_T140_10
140707_S60_T140_11
BŞD Hızı (1/s)
0.05000
0.04000
0.03000
0.02000
0.01000
0.00000
0
10
20
30
40
50
60
Zaman (s)

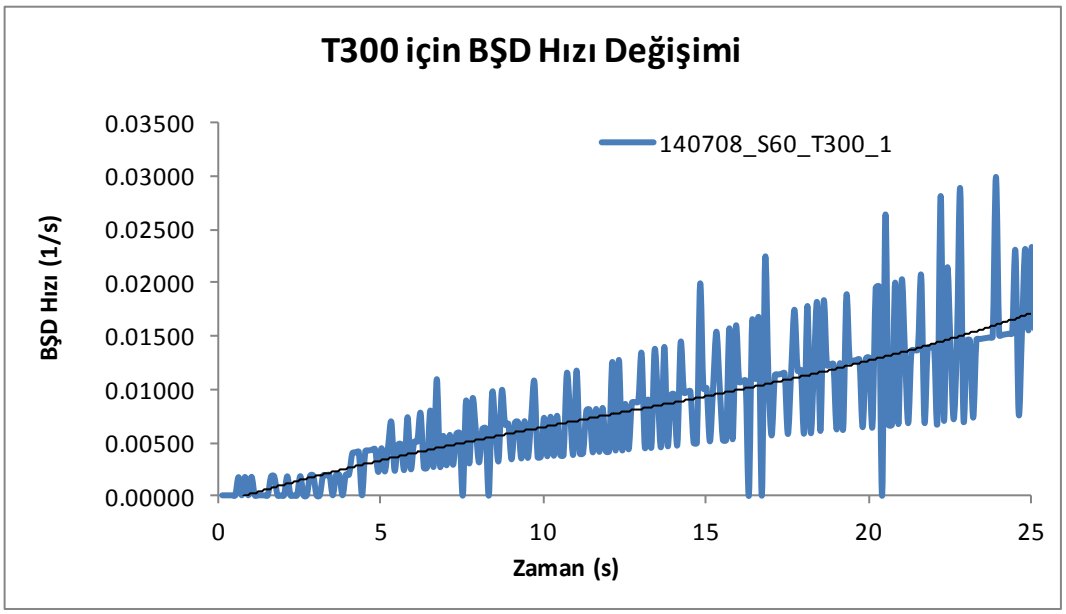
c)


T180 için BŞD Hızı Değişimi
140707_S60-T180_6
140707_S60-T180_7
140707_S60-T180_9
BŞD Hızı (1/s)
0.06000
0.05000
0.04000
0.03000
0.02000
0.01000
0.00000
0
10
20
30
40
50
60
Zaman (s)

d)



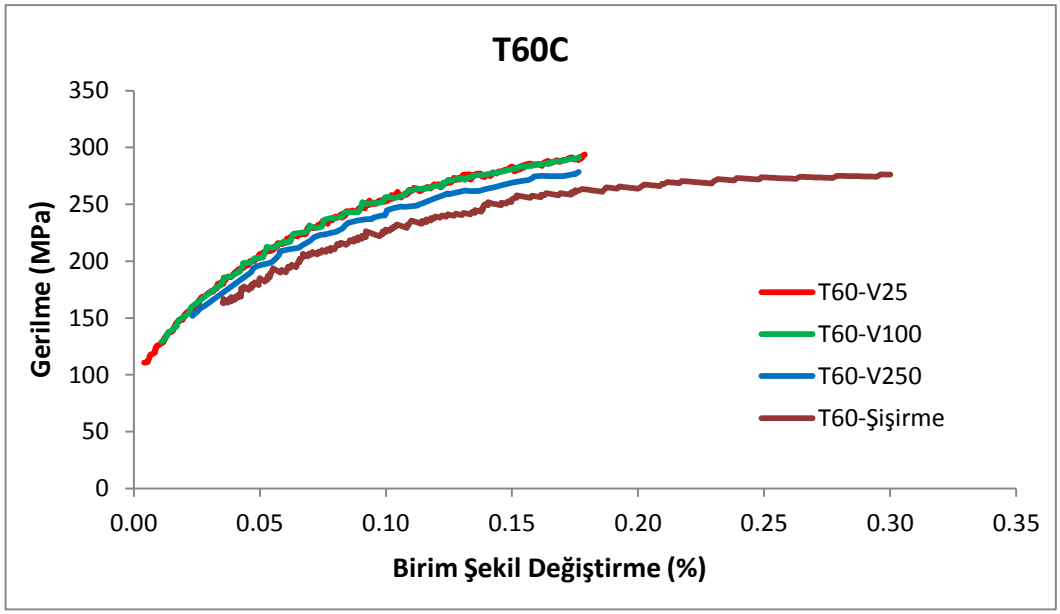
e)



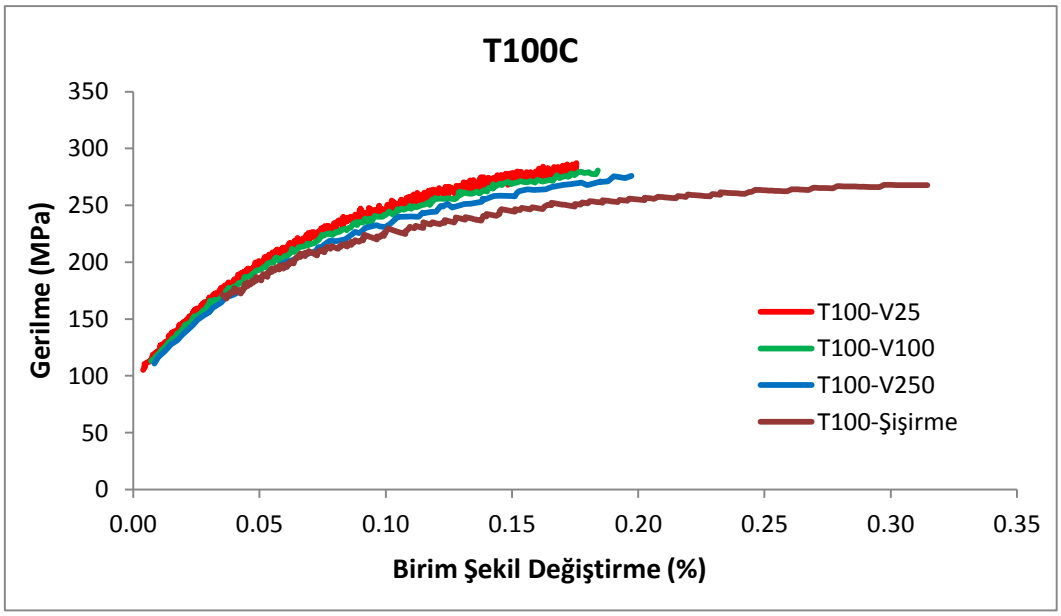
f)

Şekil Ek3.1 Al 5754-O malzeme için BŞD hızının zamana göre değişimi a) 60 °C, b) 100 °C, c) 140 °C, d) 180 °C, e) 220 °C ve f) 300 °C

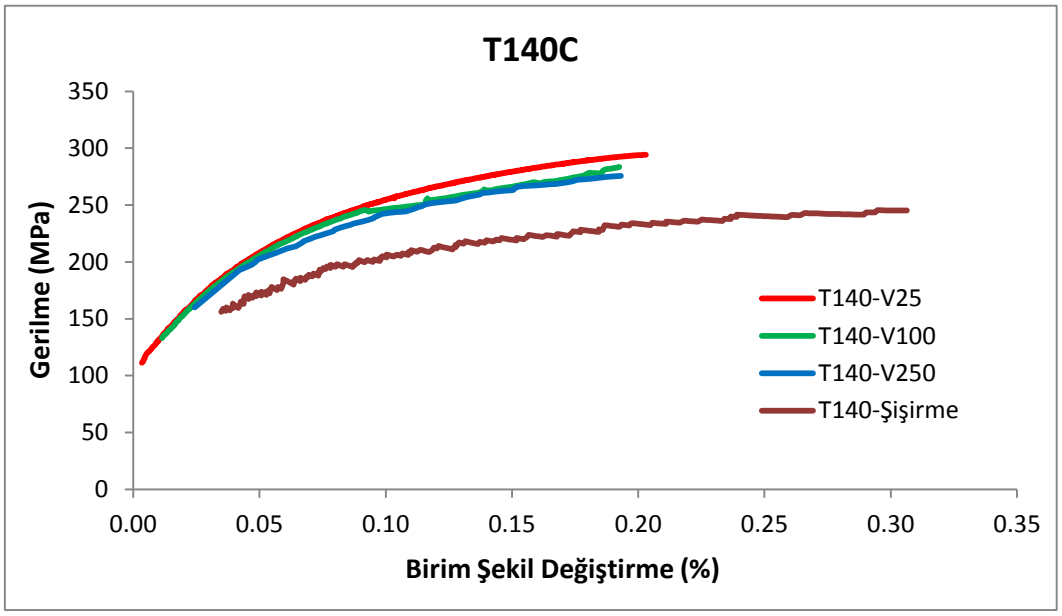
EK-4 Farklı çekme hızlarında elde edilen çekme testi akma eğrilerinin şişirme testi akma eğrileriyle karşılaştırılması



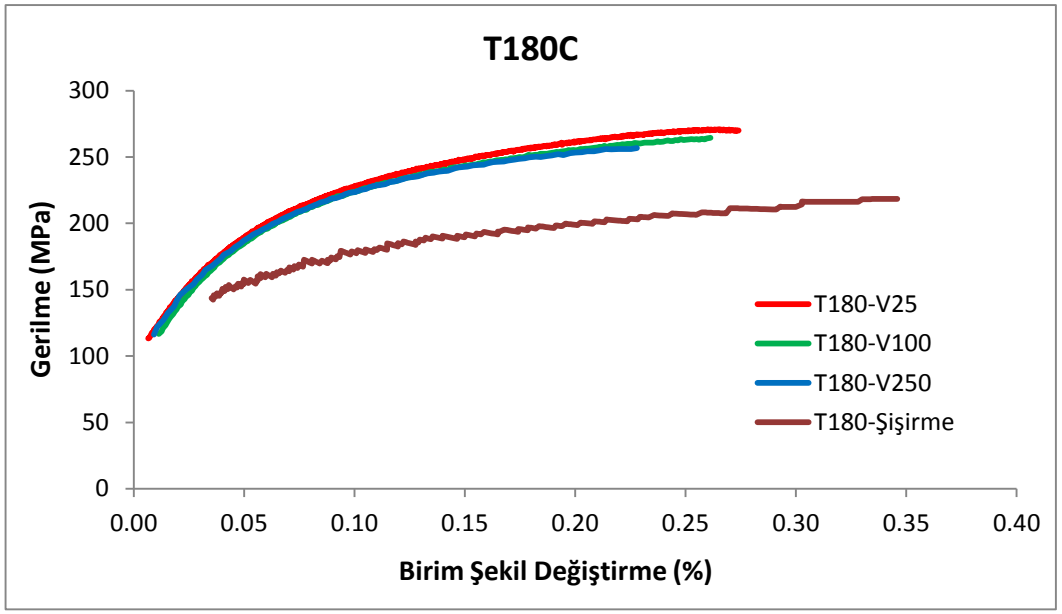
a)



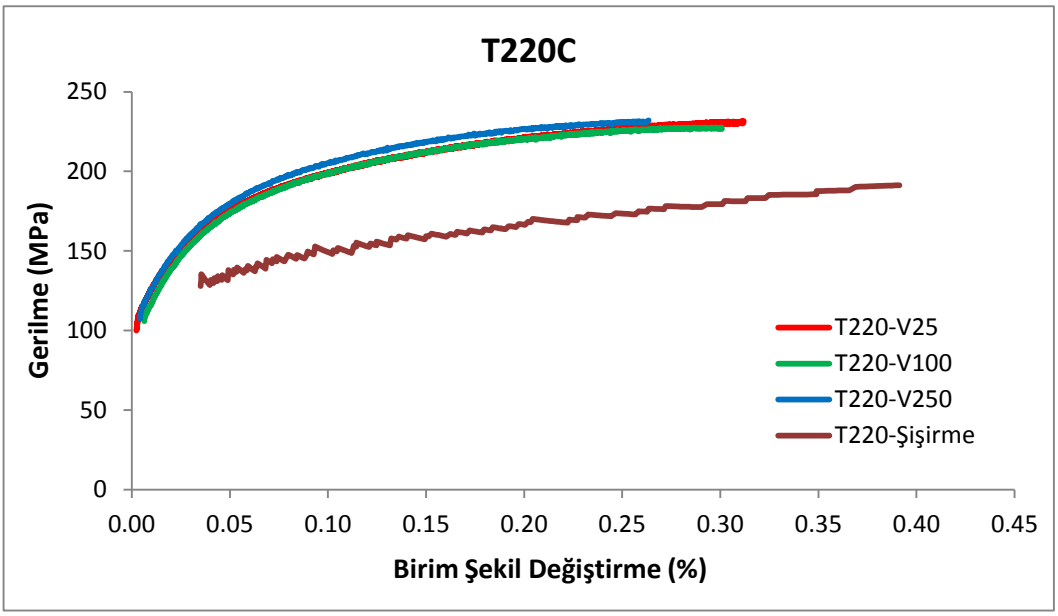
b)


T140C
Gerilme (MPa)
Birim Şekil Değiştirme (%)
T140-V25
T140-V100
T140-V250
T140-Şişirme

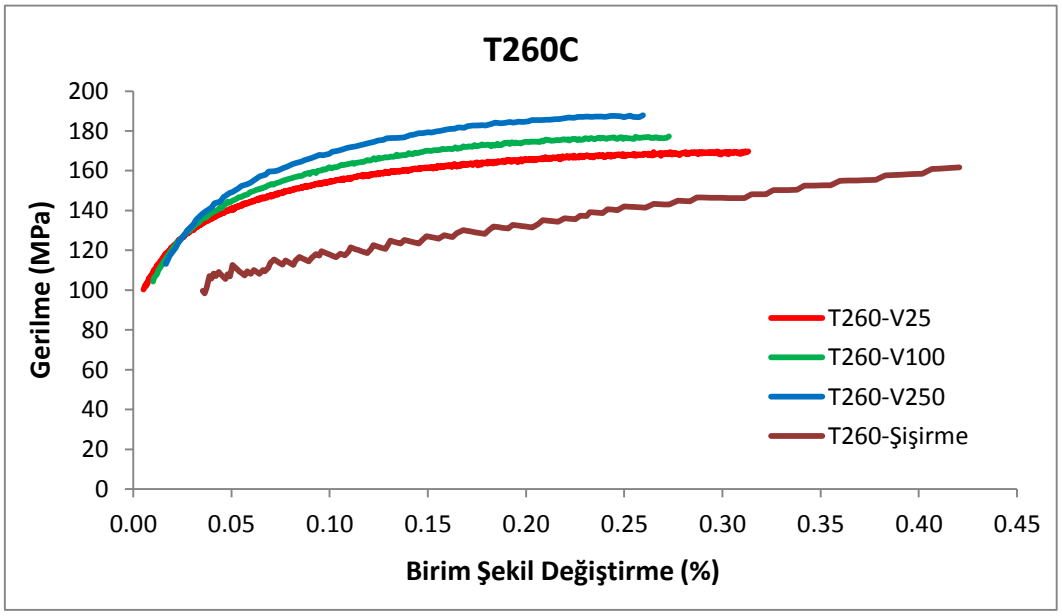
c)


T180C
Gerilme (MPa)
Birim Şekil Değiştirme (%)
T180-V25
T180-V100
T180-V250
T180-Şişirme

d)



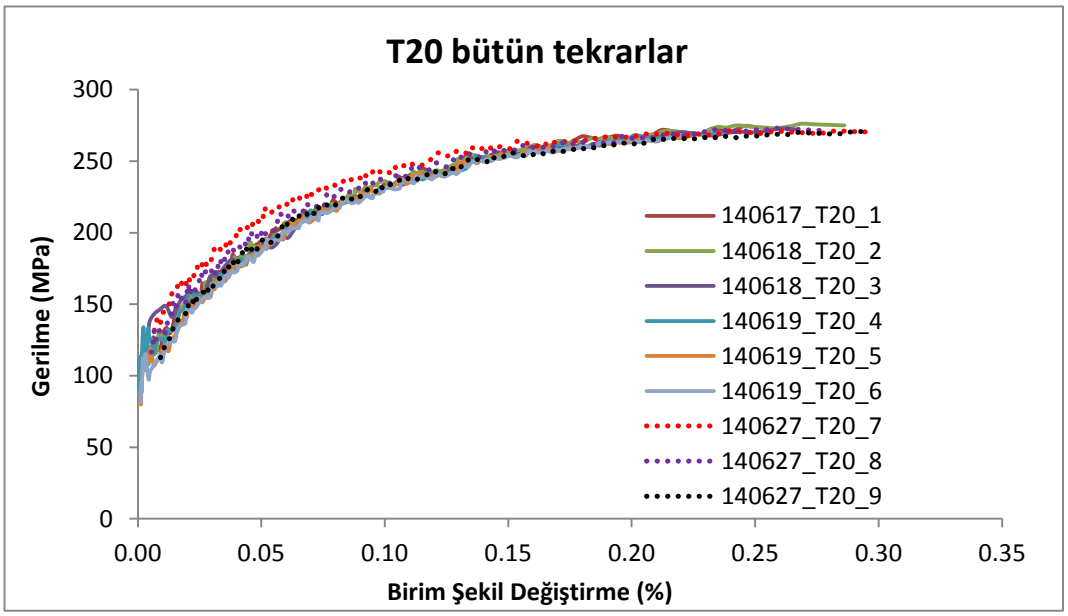
e)



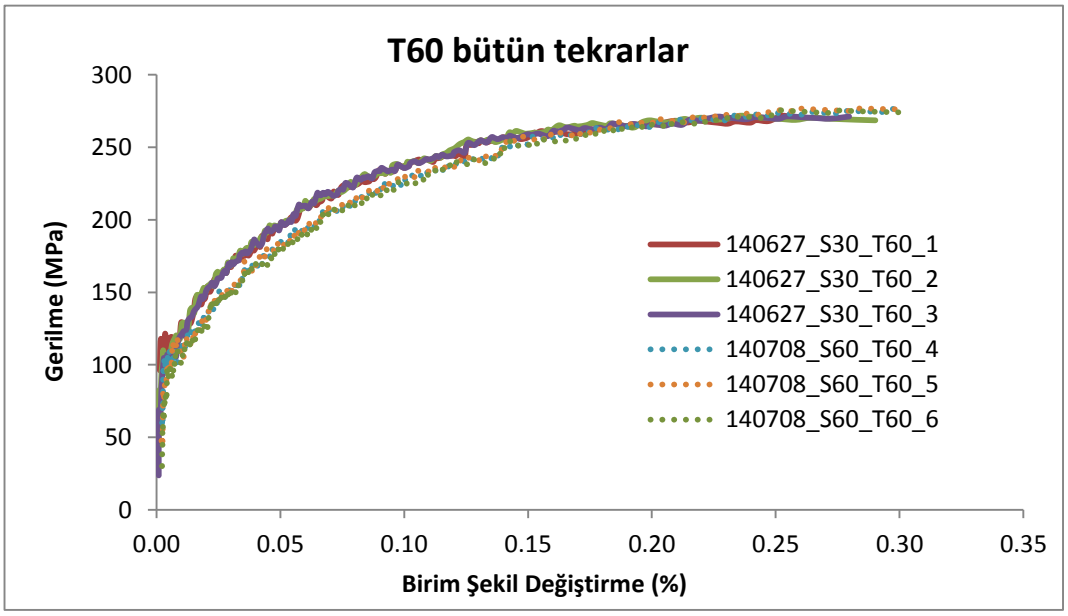
f)

Şekil Ek4.1. Farklı çekme hızlarında elde edilen çekme testi akma eğrilerinin şişirme testi akma eğrileriyle karşılaştırılması a) 60 °C, b) 100 °C, c) 140 °C, d) 180 °C, e) 220 °C ve f) 260 °C

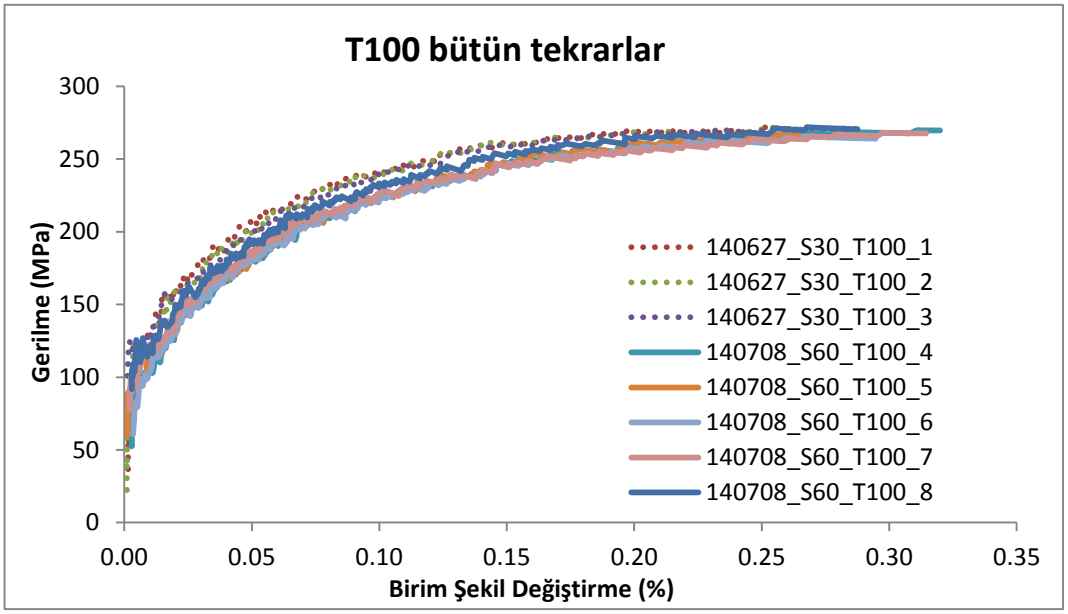
EK-5 Farklı sıcaklıklarda şişirme testlerinin bütün tekrarları



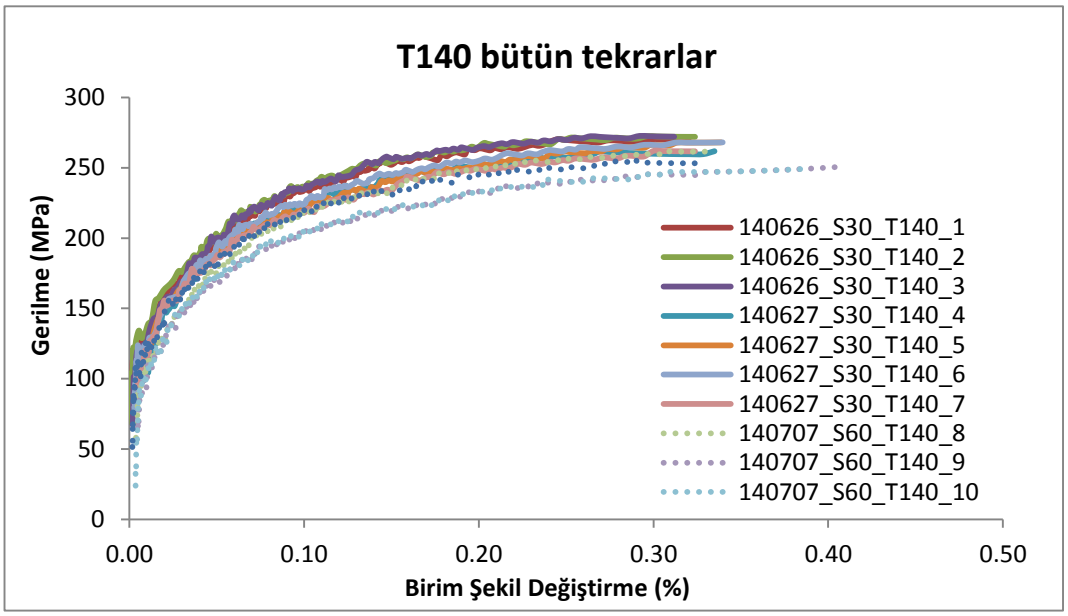
a)



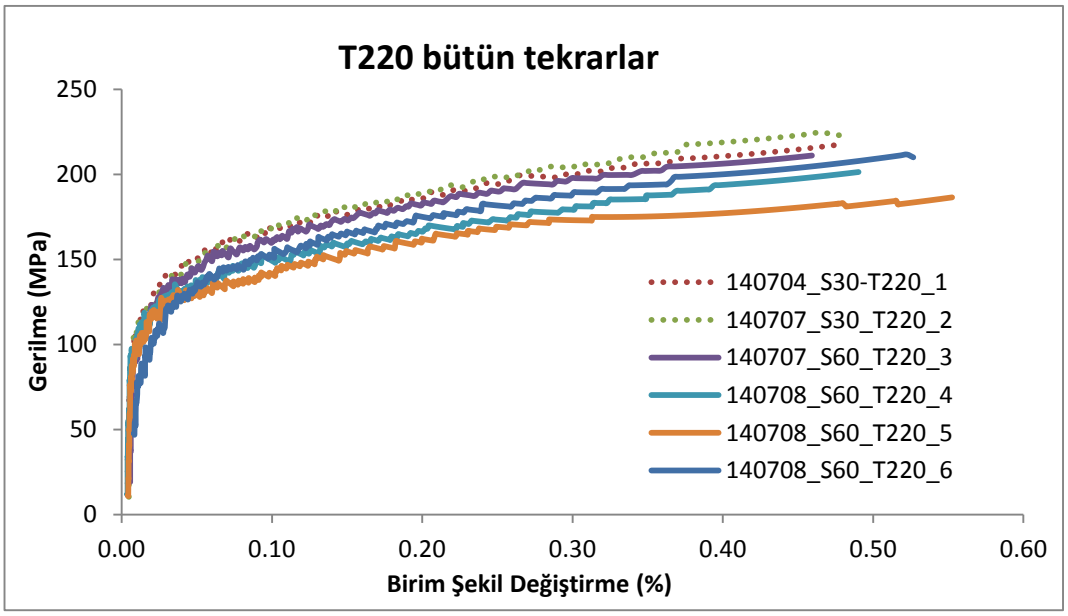
b)


T100 bütün tekrarlar
Gerilme (MPa)
Birim Şekil Değiştirme (%)
140627_S30_T100_1
140627_S30_T100_2
140627_S30_T100_3
140708_S60_T100_4
140708_S60_T100_5
140708_S60_T100_6
140708_S60_T100_7
140708_S60_T100_8

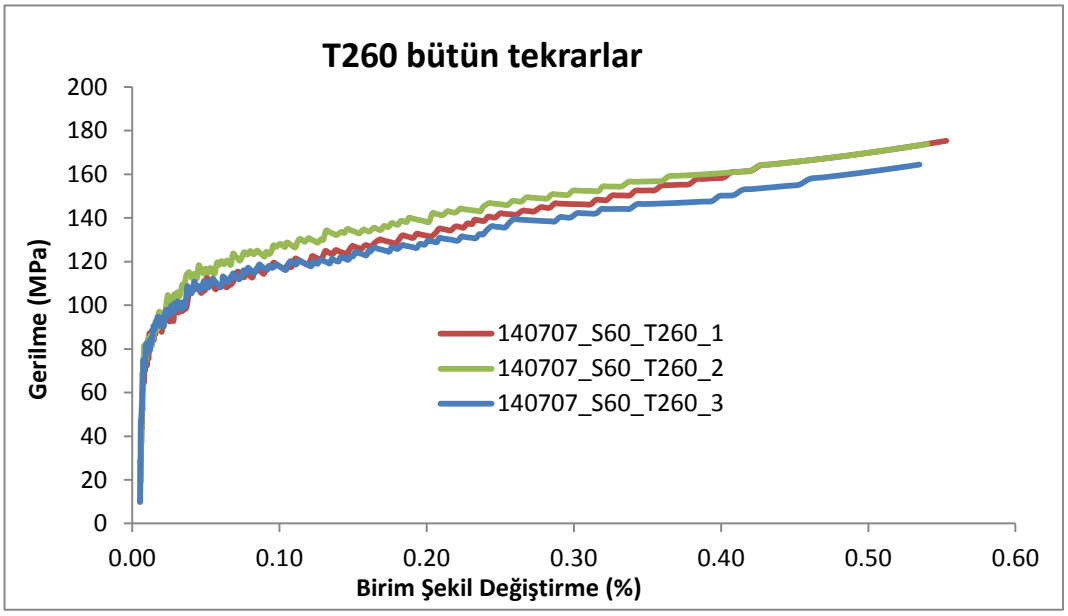
c)


T140 bütün tekrarlar
Gerilme (MPa)
Birim Şekil Değiştirme (%)
140626_S30_T140_1
140626_S30_T140_2
140626_S30_T140_3
140627_S30_T140_4
140627_S30_T140_5
140627_S30_T140_6
140627_S30_T140_7
140707_S60_T140_8
140707_S60_T140_9
140707_S60_T140_10

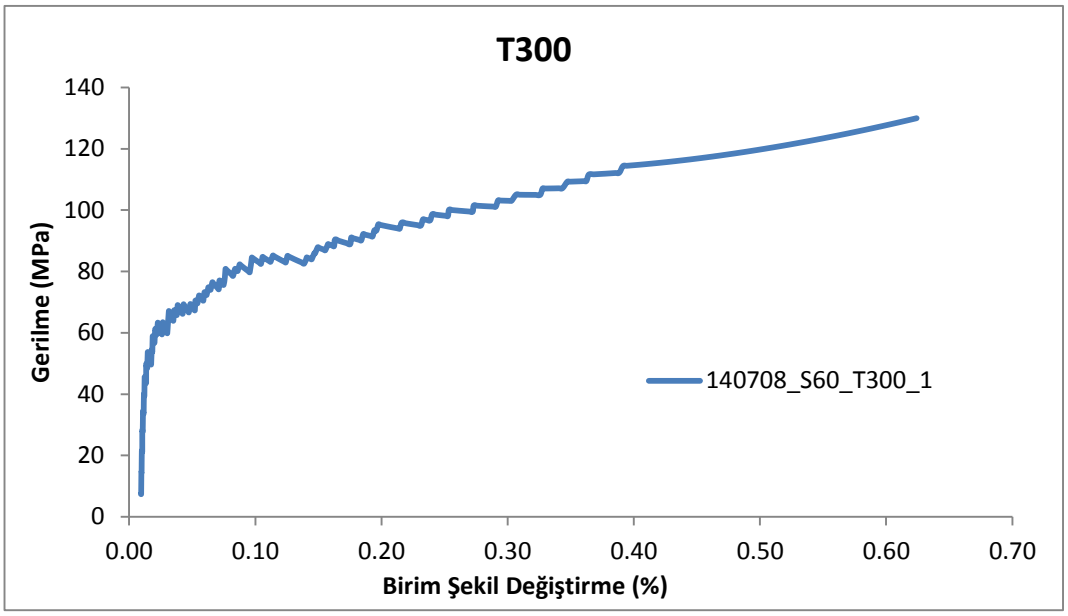
d)


T220 bütün tekrarlar
Gerilme (MPa)
250
200
150
100
50
0
0.00
0.10
0.20
0.30
0.40
0.50
0.60
Birim Şekil Değiştirme (%)
140704_S30-T220_1
140707_S30_T220_2
140707_S60_T220_3
140708_S60_T220_4
140708_S60_T220_5
140708_S60_T220_6

e)


T260 bütün tekrarlar
Gerilme (MPa)
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
0.00
0.10
0.20
0.30
0.40
0.50
0.60
Birim Şekil Değiştirme (%)
140707_S60_T260_1
140707_S60_T260_2
140707_S60_T260_3

f)



g)

Şekil Ek5.1. Al 5754-O malzeme için tüm tekrarlara ait akma eğrileri a) 60 °C, b) 100 °C, c) 140 °C, d) 180 °C, e) 220 °C, f) 260 °C ve g) 300 °C

Çizelge Ek5.1. Şişirme testlerinde ortalama sıcaklık ve BŞD hızları

	Sıcaklık (°C)		**BŞD Hızı (1/s)**	
T20	**orrtalama**	**stdsapma**	**ortalama**	**stdsapma**
140617_T20_1	28	0.11773	0.01398	0.00972
140618_T20_2	28	0.15422	0.01605	0.01194
140618_T20_3	28	0.15352	0.02601	0.01169
140619_T20_4	28	0.11982	0.01395	0.00914
140619_T20_5	28	0.119701	0.01279	0.00798
140619_T20_6	28	0.12008	0.01282	0.00781
140627_T20_7	31	0.39601	0.01664	0.01429
140627_T20_8	33	3.216291	0.01539	0.01181
140627_T20_9	33	3.53290	0.01686	0.01280
T60	**ortalama**	**stdsapma**	**ortalama**	**stdsapma**
140627_S30_T60_1	64	1.17716	0.01453	0.01110
140627_S30_T60_2	65	1.33512	0.01499	0.01359
140627_S30_T60_3	64	1.14735	0.01459	0.01240
140708_S60_T60_4	67	1.111706	0.00456	0.00526
140708_S60_T60_5	71	2.76863	0.00429	0.00570
140708_S60_T60_6	67	0.94860	0.00404	0.00506

T100	**ortalama**	**stdsapma**	**ortalama**	**stdsapma**
140627_S30_T100_1	98	1.89241	0.01431	0.01275
140627_S30_T100_2	97	1.67670	0.01405	0.01286
140627_S30_T100_3	88	3.75439	0.01775	0.01140
140708_S60_T100_4	101	1.08799	0.00482	0.00551
140708_S60_T100_5	100	1.67177	0.00427	0.00451
140708_S60_T100_6	106	2.74975	0.00470	0.00499
140708_S60_T100_7	100	1.24692	0.00503	0.00544
140708_S60_T100_8	101	1.45431	0.00462	0.00512
T140	**ortalama**	**stdsapma**	**ortalama**	**stdsapma**
140626_S30_T140_1	116	9.26731	0.02068	0.01466
140626_S30_T140_2	117	10.29733	0.01994	0.01525
140626_S30_T140_3	115	9.01162	0.01962	0.01396
140627_S30_T140_4	135	5.99209	0.01778	0.01517
140627_S30_T140_5	117	8.87515	0.02161	0.01367
140627_S30_T140_6	125	8.13875	0.01840	0.01509
140627_S30_T140_7	129	8.80616	0.01725	0.01364
140707_S60_T140_8	131	4.05403	0.00538	0.00607
140707_S60_T140_9	138	2.89583	0.00663	0.00747
140707_S60_T140_10	138	3.39098	0.00631	0.00705
140708_S60-T140_11	134	3.23830	0.00532	0.00620
T180	**ortalama**	**stdsapma**	**ortalama**	**stdsapma**
140626_S30-T180_1	157	13.16773	0.02383	0.01790
140626_S30-T180_2	158	9.63839	0.02377	0.01607
140626_S30-T180_3	149	16.38058	0.02309	0.01913
140707_S60-T180_4	188	2.37022	0.01611	0.01362
140707_S60-T180_5	172	6.40002	0.00641	0.00793
140707_S60-T180_6	180	2.38689	0.00601	0.00621
140707_S60-T180_7	177	4.04168	0.00705	0.00743
140708_S60-T180_8	171	4.35257	0.00678	0.00385
140707_S60-T180_9	183	3.04486	0.00758	0.00790
T220	**ortalama**	**stdsapma**	**ortalama**	**stdsapma**
140704_S30_T220_1	211	6.42605	0.02875	0.02733
140707_S30_T220_2	201	7.95704	0.02935	0.02731
140707_S60_T220_3	215	2.84199	0.01513	0.01542
140708_S60_T220_4	211	4.31453	0.00835	0.00907
140708_S60_T220_5	214	4.42214	0.00415	0.00523
140708_S60_T220_6	212	2.88653	0.01039	0.01035
T260	**ortalama**	**stdsapma**	**ortalama**	**stdsapma**
140707_S60-T260_1	267	6.12852	0.02181	0.01889
140707_S60-T260_2	261	3.02247	0.02315	0.02007
140707_S60-T260_3	261	1.80607	0.02119	0.02067
T300	**ortalama**	**stdsapma**	**ortalama**	**stdsapma**
140708_S60_T300_1	300	1.73110	0.01576	0.01429

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Emine Feyza ŞÜKÜR
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	Samsun / 27.04.1987
Telefon	**:**	0 332 223 20 45 / 0 506 655 25 07
Faks	**:**	-
e-mail	**:**	efeyzasukur@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Cumhuriyet Lisesi (YDA), SAMSUN	2005
Üniversite	:	Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, KIRIKKALE	2010

İŞ TESTİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2013-…..	Selçuk Üniversitesi Müh. Fakültesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI: Sac Metal Şekillendirme, Hidroşekillendirme, Makine Elemanları, Makine Tasarımı,

YABANCI DİLLER: Almanca, İngilizce

YAYINLAR: "Determination of flow curves by using bulge test for various temperatures, ***"Innovative Trends in Multidisciplinary Academic Research" (ITMAR-October 20-21, 2014) Istanbul, Turkey,*** (Yüksek lisans tezinden yapılmış)