

**C67 YAY ÇELİKLERİNİN DEFORMASYON
KARAKTERİSTİKLERİNİN YÜKSEK GERİNİMLERE
KADAR BELİRLENMESİ VE SAC RULMAN BİLEZİĞİ
ŞEKİLLENDİRME ADIMLARININ SONLU ELEMENLAR
YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

**DETERMINING THE DEFORMATION
CHARACTERISTICS OF C67 SPRING STEELS UP TO
HIGH STRAINS AND ANALYSIS OF METAL FORMING
INCREMENTS OF SHEET METAL BEARING RINGS WITH
FINITE ELEMENT METHOD**

HALİL ONAT TUĞRUL

DOÇ. DR. BENAT KOÇKAR

Tez Danışmanı

YRD. DOÇ. DR. CELALETTİN KARADOĞAN

İkinci Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

2015

HALİL ONAT TUĞRUL'un hazırladığı “C67 Yay Çeliklerinin Deformasyon Karakteristiklerinin Yüksek Gerinimlere Kadar Belirlenmesi ve Sac Rulman Bileziği Şekillendirme Adımlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Caner ŞİMŞİR

Başkan

Doç. Dr. Benat KOÇKAR

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Bilsay SÜMER

Üye

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

14/07/2015

HALİL ONAT TUĞRUL

ÖZET

C67 YAY ÇELİKLERİNİN DEFORMASYON KARAKTERİSTİKLERİNİN YÜKSEK GERİNİMLERE KADAR BELİRLENMESİ VE SAC RULMAN BİLEZİĞİ ŞEKİLLENDİRME ADIMLARININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

HALİL ONAT TUĞRUL

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Benat KOÇKAR

İkinci Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Celalettin KARADOĞAN

Temmuz 2015, 66 sayfa

Özel rulmanlardan sac bilezikli rulmanların üretiminde kullanılan çelik saclar, standart rulman çeliklerine göre hem malzeme kimyasal kompozisyonu hem de kullanıldıkları imalat yöntemleri açısından farklılık gösterir. Sac malzemeden rulman bileziği standart rulman bileziği sertliğine yakın üretilmesi dolayısıyla sac malzeme yüksek karbonlu çeliklerdendir. İçeriğindeki diğer elementlerin de etkisiyle malzemenin sertleştirilebilirliği artarken, soğuk şekillenebilirliği de düşer. Sac rulman bileziklerinin üretimi için transferli kalıpta soğuk şekillendirme yöntemi kullanılır. Bu imalat sürecinde malzemede aşırı deformasyon sebebiyle çatlaklar ve yüzey bozuklukları görülebilmektedir.

Sac rulman bileziklerinin şekillendirildiği transferli kalıplarda, geleneksel yöntemlerle imalat oldukça yüksek kalıp revizyonu maliyetlerine sahiptir. Bu sebeple malzemenin deformasyon adımlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi simülasyonları ile tasarlanabilmesi gerekmektedir. Simülasyon programında malzemenin tanımlanması için malzeme elastik ve plastik davranışlarının tanımlanması, bu davranışların simülasyon programında doğru katsayılarla ifade edildiğinin belirlenmesi gereklidir.

Bu alışmada Ortadoğu Rulman Sanayi ve Tic. A.ř. bünyesinde kullanılan C67 yay çeliklerinin simülasyon programında deformasyon analizlerinin yapılabilmesi amacıyla mekanik testler kullanılarak yüksek gerinimlere kadar plastik eğrileri tanımlanmıştır. Malzemenin plastik eğrilerinin yanı sıra, elastiklik katsayısı ve sürtünme katsayısı da deneylerle çıkarılmıştır.

Deneylerden elde edilen veriler ile malzeme modeli oluşturulmuş ve Simufact[®] simülasyon programında iki yeni şekillendirme modeli oluşturularak imalat adımları tasarlanmıştır. Ortadoğu Rulman Sanayi A.ř.'de kullanılan kalıbın ve yeni tasarlanan kalıpların malzemede oluşturdukları gerilme ve gerinimler karşılaştırılmış, malzemede hasar oluşumunun en aza indirilmesi için gerekli kalıp tasarımı ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Malzeme Karakterizasyonu, Sac şekillendirme, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ABSTRACT

DETERMINING THE DEFORMATION CHARACTERISTICS OF C67 SPRING STEELS UP TO HIGH STRAINS AND ANALYSIS OF METAL FORMING INCREMENTS OF SHEET METAL BEARING RINGS WITH FINITE ELEMENT METHOD

HALİL ONAT TUĞRUL

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Benat KOÇKAR

Co- Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Celalettin KARADOĞAN

July 2015, 66 pages

Sheet steels used for special ball bearing rings have not only different chemical compositions than standard ball bearing steels but also have to be subjected to different manufacturing techniques in order to achieve required forms. Sheet steels have high carbon content like standard bearing steels since required hardness levels are high for longer service life. With additional elements, sheet steels have higher hardenability but lower manufacturability with cold forming operations. Sheet metal ball bearing rings are manufactured under transfer dies with more than one operation. Due to sheet metals manufacturability, cracks and surface problems can be seen after manufacturing operations.

Conventional die design methods like trial and error is not effective in transfer die systems due to high die revision costs. As an alternative design method, finite element methods can be used to design manufacturing increments of transfer dies. In order to use finite element tools, material's behavior during manufacturing must be fully defined in finite element programs, both in elastic and plastic regions up to necking and cracking.

In this study, a sheet metal bearing ring material C67 spring steel which is used in ORS Bearings Company is used for material characterization up to high strains in order to use

the characterization results as a material model in finite element simulations. Elastic modulus and friction coefficients of dies also tested for a complete simulation model design.

Simulation model has been constructed in Simufact[®] simulation program, material models generated from test data has been used and two different manufacturing steps designed in two different model. Old Die system that has been used in ORS Bearings also tested in simulations, stress and strain levels of manufacturing steps have been compared. Optimum die design has been selected with the results of the comparison as New Die 1 and the results of the manufacturing with New Die 1 also compared with Old Die.

Key Words: Material Characterization, Sheet Metal Forming, Finite Element Method

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez danışmanım Doç. Dr. Benat KOÇKAR'a, bana inanıp güvendiği ve bu tezdeki testlerin gerçekleştirilmesi ve tez yazımı sürecindeki danışmanlığı yanında birçok başka çalışmada bulunmama da fırsat verdiği için teşekkür ederim, bu tez sizin sayenizde yazıldı hocam. Yardımcı danışmanım Yrd. Doç. Dr. Celalettin KARADOĞAN'a tezin her aşamasında engin bilgisi ve tecrübesi ile yol gösterdiği için teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm Ortadoğu Rulman Sanayi ve Tic. A.Ş. çalışanlarına şükranlarımı sunarım, özellikle Dr. –Ing. Feridun ÖZHAN'a bana ORS'de çalışma şansı verdiği, bize yönelttiği her soruda ve her kararında mühendisliğin başka bir yönünü gösterdiği için teşekkür ederim. Sn. Turhan SAVAŞ benim çalışma hayatımdaki öğretmenim, bir mühendisin ve aynı zamanda bir yöneticinin nasıl olması gerektiğini ondan öğrendim. Onun sayesinde bu projeyi başlattık ve tamamladık. Sn. Nazmi Saydemir, ORS'de çalıştığım dönemde benim teknisyenim sıfatına sahip olsa da bana mühendislik kavramını sorgulatan kişidir, bu projede olan birçok işi hiçbir yol gösterme olmadan tek başına gerçekleştirdi, kendisine ne kadar teşekkür etsem azdır. ORS'de birlikte çalıştığım kardeşlerim Sn. Ozan MÜŞTAK ve Sn. Toprak Ozan MEMİŞ, kendileri o zaman da kardeşimdi şimdi de öyleler. Daha birçok kişi var ancak bu proje özelinde sıralamam gerekirse; Sn. Mustafa HORTAÇ, Sn. Atila ÖZBALAS, Sn. Tamer TEZCAN, Sn. Bayram BARIŞ, Sn. Ülya AKANSEL, Sn. İbrahim ESENER, Sn. Yasin ÖZÇELİK ve son olarak her başımız sıkıştığında çözüm üreten Sn. Ersen ÖZÇUBUKÇU'ya teşekkürlerimi sunuyorum. Bu kişiler dışında projede katkısı bulunan Mühendislik Müdürlüğü, Mamul Dizayn Müdürlüğü, Satın Alma Müdürlüğü, Muhasebe Müdürlüğü, Kalıp Takım Şefliği ve Pres Şefliği, Kalite Müdürlüğü ve Ölçme Laboratuvarı çalışanlarına şükranlarımı sunarım. Son olarak Sn. Dr. –Ing. Hamdullah MERDANE'ye birlikte çalıştığımız kısa süredeki desteği için teşekkür ederim. Diğer Ar-Ge Şefliği çalışanı arkadaşlarım bu projenin sonunda proje gelişimine bakarak kendi projelerini yazdılar ve görevlerini layıkıyla sürdürdüklerini biliyorum. Kendilerine teşekkürlerimi sunuyorum.

Hacettepe Üniversitesi Şekil Bellek Araştırmaları Laboratuvarı çalışma arkadaşlarım, özellikle Hasan Hüseyin SAYGILI, Bünyamin ÇÖMLEKÇİ, Şule ÇAKMAK, Onur ERDOĞAN, Hande ÖZCAN ve Vahid ATTARI'ye kendileri ile birlikte çalışmak çok güzeldi, dostlukları ve destekleri için çok teşekkür ederim.

Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi çalışanlarına, özellikle hocalarım Yrd. Doç. Dr. Ömer MUSIC, Yrd. Doç. Dr. Caner ŞİMŞİR ve Yrd. Doç. Dr. Kemal DAVUT’a şükranlarımı sunarım, kendilerinden çok şey öğrendim ve daha fazlasını öğrenebilmem için bana örnek oldular, ilham verdiler. Bu projedeki testlerin takibini yapan, simülasyonlara ve sonuçlara katkısı çok büyük olan Sn. Doğan Kıvanç AKSUNGUR’a, Sn. Yahya TUNÇ’a, Sn. Zeynep ÖZTÜRK’e, Sn. Tuba DEMİRTAŞ’a, Sn. İsmail GÜRBÜZ’e, Sn. Emin TAMER’e teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak böyle bir merkezi ülkemize kazandıran Sn. Prof. Dr. –İng. Erman TEKKAYA’ya şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu’nun TEYDEB 1501 Sanayi Ar-Ge Projeleri tarafından desteklenen 3110407 nolu “Sac Malzemeden Rulman Bileziği Dizaynı ve Prototip Üretimi için İmalat Adımlarının FEA Programları ile Belirlenmesi, Kalıp Optimizasyonu, Kalıp ve Prototip Üretimi ve Uygulama Testleri” adlı projenin bir parçasıdır. Bu fırsatı verdikleri, çalışmamızı destekledikleri için kendilerine teşekkür ediyorum. Prof. Dr. Sadık Engin KILIÇ’a da hem bu projede izleyici olduğu için hem de izleyicilik görevinin yanında çok değerli bilgiler verdiği ve yol göstericilik yaptığı için teşekkür ederim.

Sevgili aileme, benim her an yanımda oldular, ben istemesem de ihtiyacım olduğunu fark ederek yardım ettiler. Kendileri belki de bu tezin ve sürecin cefasını en çok çekenlerdir, beni affetsinler, sabırları ve yanımda oldukları için çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELER	xi
ŞEKİLLER	xii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiv
Kısaltmalar	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Rulmanlar	1
1.1.1. Rulman Çeşitleri	2
1.1.2. Rulman Üretim Süreçleri	3
1.1.3. Özel Rulmanlar	6
1.2. Problem Tanımı	8
2. MALZEME VE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK LİTERATÜR İNCELEMESİ	11
2.1. Rulman Çeliği Malzemeleri	11
2.2. Sac Malzemelerde Şekillenebilirlik Testleri	12
2.3. Elastiklik Modülü ve Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi	16
2.4. Malzeme Modelleri	17
2.5. Sac Şekillendirmede Deformasyon Çeşitleri ve Simülasyon Yöntemleri	18
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
3.1. Malzeme Testleri	21
3.1.1. Çekme Testi	21
3.1.2. Basma Testi	24
3.1.3. Hidrolik Şişirme Testi (Hydraulic Bulge Test - HBT)	25
3.1.4. Elastiklik Modülü Belirleme için Tekrarlı Çekme Testleri	28
3.1.5. Sürtünme Katsayısı Tespiti	29
3.2. Simülasyon Modeli Oluşturma	31
4. DENEY SONUÇLARI	33
4.1. Çekme Testi Sonuçları Analizi	33

4.2.	Pul Basma Testi Sonuçları Analizi	36
4.3.	Hidrolik Şişirme Testi Sonuçlarının Analizi	37
4.4.	Elastiklik Modülünün Bulunması	39
4.5.	Sürtünme Testi.....	41
5.	MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE SİMÜLASYONA EKLENMESİ	44
5.1.	Malzeme Modelinin Oluşturulması	44
5.2.	Simülasyon Modeline Malzeme Modelinin Eklenmesi	48
6.	SİMÜLASYONLAR	50
7.	SİMÜLASYON SONUÇLARI	57
8.	TARTIŞMA.....	63
	KAYNAKLAR.....	64
	ÖZGEÇMİŞ.....	67

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. AISI 52100, DIN 100Cr6 Rulman Çeliği Elemental Analizi (Sanyo Steel, SUJ2).....	11
Çizelge 2.2. C67 Standart Malzeme ve Hammadde Kalite Belgesi Elemental Analiz Sonuçları.....	11
Çizelge 4.1. Malzeme 7 için Ludwick Hollomon Bağlantı Parametreleri	35
Çizelge 4.2. Malzeme 8 için Ludwick-Hollomon Bağlantı Parametreleri.....	35
Çizelge 4.3. Malzeme 8 için Elastiklik Modülü.....	39
Çizelge 4.4. Malzeme7 için Elastiklik Modülü.....	40

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Rulman Komponentleri [3]	1
Şekil 1.2. Rulman Sınıflandırması [1].....	3
Şekil 1.3. Rulman Üretim Süreçleri [1].....	6
Şekil 1.4. Debriyaj Sistemi ve Sac Bilezikli Rulman. (Valeo ve Ortadoğu Rulman Sanayi A. Ş.'nin izniyle)	7
Şekil 1.5. Bilezik Formları için Örnek Sac Şekillendirme Adımları.....	8
Şekil 1.6. Üretilen Rulman Kesiti	8
Şekil 1.7. Dış Bilezik Bükümünde Çatlak.....	9
Şekil 1.8. Dış Bilezik Bükümü Görünüşü ve Kesitte Çatlak Örneği	9
Şekil 2.1. Çekme Testi Numunesi ASTM E8	13
Şekil 2.2. Pul Basma Testi Numune ve Simülasyon Kesit Görünümleri[11]	15
Şekil 2.3. HBT Analitik Çözüm Parametreleri [13].....	16
Şekil 3.1. Kullanılan Çekme Testi Numunesi Boyutları	22
Şekil 3.2. Çekme Testi Sonrası Malzeme ve Ekstansometreler	23
Şekil 3.3 Malzeme 7 için Çekme Testi Birinci Numune Seti Kuvvet-Deplasman Verisi... 23	
Şekil 3.4. Pul Basma Testi Kuvvet-Deplasman Grafiği.....	24
Şekil 3.5. Pul Basma Kalıbı ve Basma Sonrası Numuneler	25
Şekil 3.6. Hidrolik Şişirme Testi Şematik Görüntüsü [15]	25
Şekil 3.7. HBT Testinden Çıkan Numuneler	26
Şekil 3.8. Malzeme 7 HBT Gerilme-Gerinim Grafiği.....	27
Şekil 3.9. Malzeme 8 HBT Gerilme-Gerinim Grafiği.....	28
Şekil 3.10. Dört Nokta Bükme Testi Sonlu Elemanlar Modeli.....	29
Şekil 3.11. Sürtünme Kalıpları.....	30
Şekil 3.12. Sürtünme Testi Simülasyon Modeli.....	30
Şekil 3.13. Sac Bilezik Simülasyon Modeli	31
Şekil 4.1. Malzeme 7 Çekme Testi Ortalama Plastik Eğriler.....	34
Şekil 4.2. Malzeme 8 Çekme Testi Ortalama Plastik Eğriler.....	34
Şekil 4.3. Malzeme 7 Pul Basma Gerçek Gerilme-Gerinim Grafikleri	37
Şekil 4.4. Hidrolik Şişirme Testi Verilerine Göre Ortalama Plastik Eğri	38
Şekil 4.5. Malzeme 8 için Hidrolik Şişirme Testi Verilerine Göre Ortalama Plastik Eğri . 39	
Şekil 4.6. Malzeme 7 İçin Sürtünme Testi Gerinim Pozisyonu Verileri.....	41
Şekil 4.7. Malzeme 8 için Sürtünme Testi Pozisyonu Verileri	42

Şekil 4.8. Malzeme 7 için Coulomb 0,11 ile yapılan simülasyonun testler ile karşılaştırılması.....	42
Şekil 4.9. Malzeme 8 için Coulomb 0,9 ile yapılan simülasyonun testler ile karşılaştırılması.....	43
Şekil 5.1. Plastik Ortalama Eğrilerin Çakıştırılması	44
Şekil 5.2. Birleştirilmiş Ortalama Eğrilerin 2 Gerinim'e Kadar Uzatılması	45
Şekil 5.3. Geniş Çekme Testi Numuneleri	46
Şekil 5.4. Geniş Çekme Simülasyon Modeli.....	46
Şekil 5.5. Malzeme 7 için Geniş Çekme Testleri ve Simülasyon Kuvvet-Şekil Değişimi Karşılaştırması	47
Şekil 5.6. Hasar Parametreleri ile Yapılan Simülasyonların Çekme Testleri ile Karşılaştırılması.....	48
Şekil 5.7. Yeni Kalıp 1 Modelin Oluşturulması	49
Şekil 6.1. Eski Kalıp İlk Şekillendirme Adımı.....	51
Şekil 6.2. Eski Kalıp Son Şekillendirme Adımı	51
Şekil 6.3. Yeni Kalıp 1 Şekillendirme Adımları 1. Adım	52
Şekil 6.4. Yeni Kalıp 1 Şekillendirme Adımları 2. Adım	53
Şekil 6.5. Yeni Kalıp 1 Şekillendirme Adımları 3. Adım	53
Şekil 6.6. Yeni Kalıp 1 Şekillendirme Adımları 4. Adım	54
Şekil 6.7. Yeni Kalıp 2 Şekillendirme Adımları 1. Adım	55
Şekil 6.8. Yeni Kalıp 2 Şekillendirme Adımları 2. Adım	55
Şekil 6.9. Yeni Kalıp 2 Şekillendirme Adımları 3. Adım	56
Şekil 7.1. Eski Kalıp Simülasyonlarında Son Adımdaki Gerilme Dağılımları	57
Şekil 7.2. Yeni Kalıp 1 için Gerilme Dağılımları	58
Şekil 7.3. Yeni Kalıp 2 için Gerilme Dağılımları	59
Şekil 7.4. Şekillendirme Adımı Tasarımları için Büküm Formunda Von-Misses Gerilmelerinin Karşılaştırılması	60
Şekil 7.5. Şekillendirme Adımları için Gerinim Kıyaslamaları	61
Şekil 7.6. Eski Kalıp ve Yeni Kalıp 1 Büküm Bölgesi – Sertleştirme Isıl İşlemi Sonrası..	62

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

σ	Gerilme
σ_f	Akma Dayanımı
ϵ	Gerinim
l_0	İlk Uzunluk
l_1	Son Uzunluk – Anlık Uzunluk
w_0	İlk Genişlik
w_1	Son Genişlik – Anlık Genişlik
t_0	İlk Kalınlık
t_1	Son Kalınlık – Anlık Kalınlık
A_0	İlk Alan
A_1	Son Alan – Anlık Alan
Δr	Düzlemsel Anizotropi
r_n	Normal Anizotropi
r	Anizotropi İfadesi
r_0	Hadde Yönüne 0° Derece Doğrultuda R Değeri
r_{45}	Hadde Yönüne 45° Derece Doğrultuda R Değeri
r_{90}	Hadde Yönüne 90° Derece Doğrultuda R Değeri
K	Power Law ve Ludwick Modelinde Malzeme Katsayısı
n	Power Law ve Ludwick Modelinde Pekleşme Üsteli

Kısaltmalar

ORS	Ortadoğu Rulman Sanayi ve Tic. A.Ş.
HBT	Hidrolik Şişirme Testi

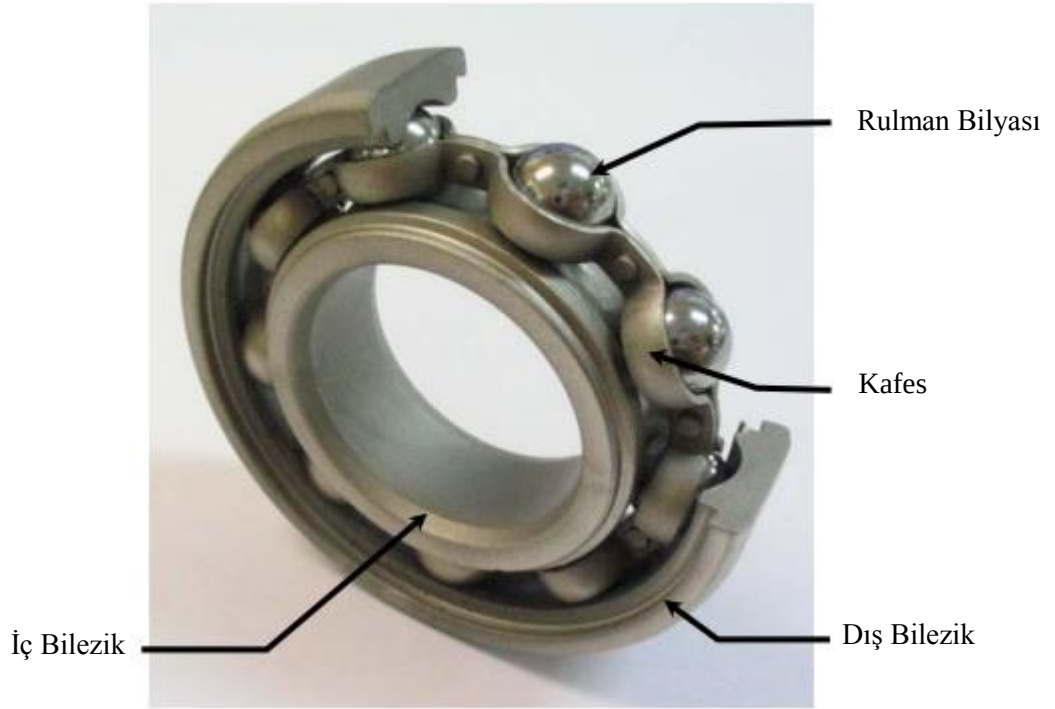
HRC

Rockwell C Biriminde Sertlik Birimi

1. GİRİŞ

1.1. Rulmanlar

En çok kullanılan makine elemanlarından olan ve özellikle değişken yük ve devirli yataklamalarda kullanılan rulman teknolojisi bugünkü haliyle artık özel rulmanlar haricinde standartlaşmıştır. Rulmanların genel yapısı Şekil 1.1.'de görüleceği gibi iki adet bilezik arasında istenilen boşluk değerlerine göre toleranslandırılmış yuvarlanma elemanları (Şekil 1.1'de "bilya") kullanılmasıyla meydana gelir [1]. Rulman bilyalarını kavrayacak şekilde yerleştirilmiş, "kafes" adı verilen ve rulman bilyalarını eşit aralıklarda tutan bir parça kullanılmaktadır. Kafes sayesinde rulman bilyaları arasında yaratılan boşluk ile yükün bilyalar arasında eşit dağıtılması sağlanmakta, bilyaların dönme eksenindeki hareketleri kısıtlanmakta ve birbirlerine sürtmeleri engellenerek sürtünme kuvveti düşürülmektedir [2]. Rulman bilyalarının küresel geometrisi sebebiyle yuvarlanma yolunda oluşan Hertz temas teorisine uygun olarak, rulman tasarımları uzun süre değişken yük ve devir altında çalışmaya uygun olarak üretilmektedir [2].

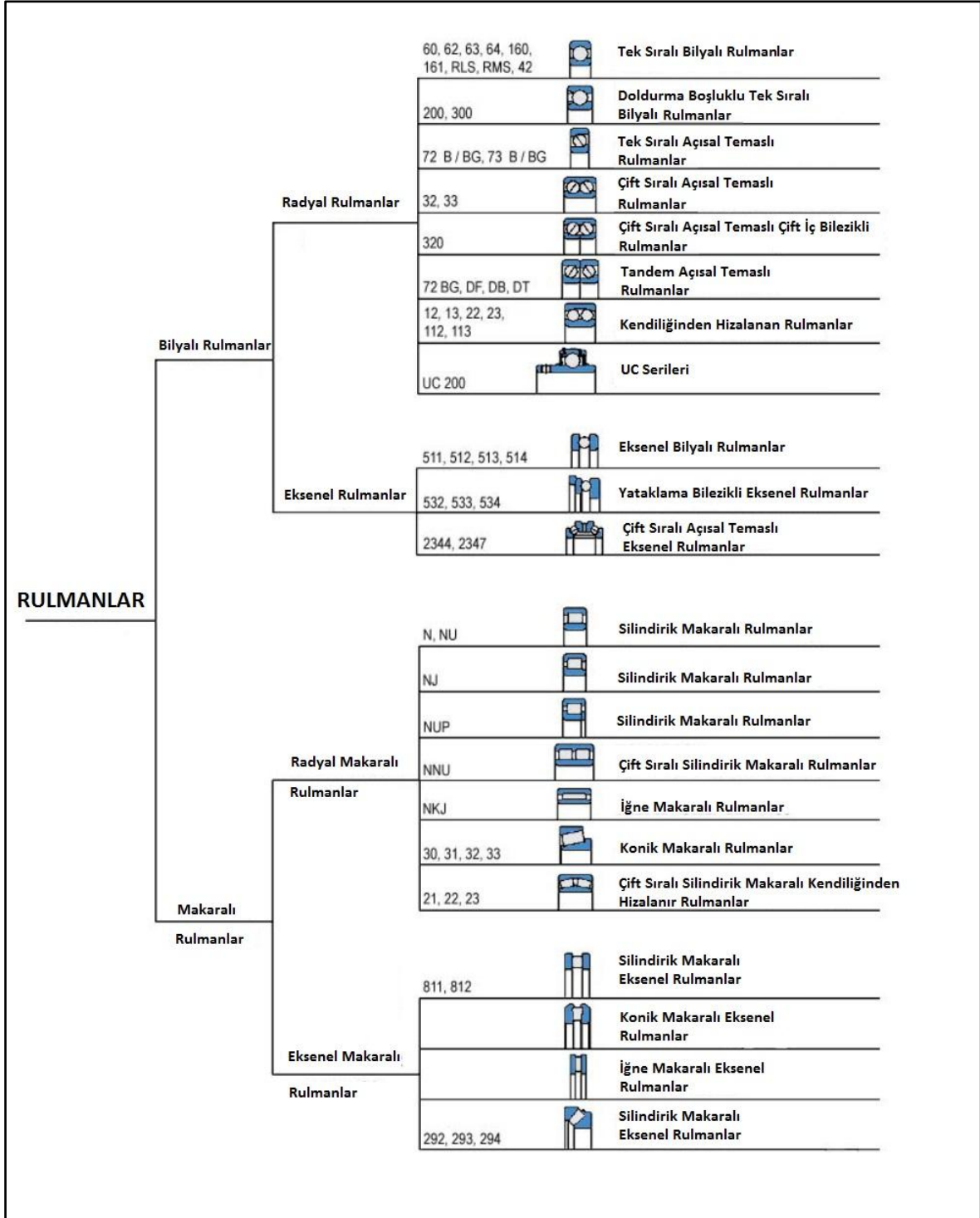


Şekil 1.1. Rulman Komponentleri [3]

1.1.1. Rulman Çeşitleri

Rulmanlar yuvarlanma elemanlarına göre bilyalı rulmanlar ve masuralı rulmanlar olarak ikiye ayrılır. Bilyalı rulmanlarda yuvarlanma elemanları küresel bilyalardır. Bilyaların rulman bilezikleri üzerindeki temas alanı teorik olarak noktasal olduğundan sürtünme kuvveti oldukça düşüktür. Ancak yük taşıma kabiliyeti noktasal temas alanında yüksek gerilmelere yol açtığı için masuralı rulmanlara göre düşüktür. Masuralı rulmanlarda yuvarlanma elemanı olarak yüzeyinde belirli bir form bulunan silindirik parçalar kullanılır. Masura ile bilezikler arasındaki temas yüzeyi teorik olarak çizgiseldir ve bilyalı rulmanlara göre daha fazladır. Bu sebeple masuralı rulmanlar daha yüksek yükler taşıyabilirler ancak yüksek hızlarda kullanılamazlar [2].

Bilyalı rulmanlar yük taşıma eksenlerine göre radyal, eksenel ve açısal temaslı olarak sınıflandırılırlar. Radyal rulmanlar dönme eksenine dik yükleri taşırlarken, eksenel rulmanlar dönme eksenine paralel yükleri taşımak için tasarlanırlar. Açısal temaslı rulmanlarda hem radyal hem de eksenel yükler taşınabilir ancak rulman tek bir yönde eksenel yük taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Bu şekilde tasarlanan rulmanlar genellikle hem radyal hem de eksenel yüke birlikte maruz kalarak daha uzun süre çalışabilirler. Kesme tezgâhı yataklamaları (spindle) genellikle açısal temaslı rulmanların her iki yönden gelebilecek eksenel yüklere karşı ikili (tandem) şekilde yerleştirilmeleri ile tasarlanır. Şekil 1. 2’de standart rulmanların sınıflandırılması görülebilir.



Şekil 1.2. Rulman Sınıflandırması [1]

1.1.2. Rulman Üretim Süreçleri

Rulman üretim adımları 100Cr6 malzemeden üretilen masif rulmanlar için çubuk olarak sürekli döküm ile üretilmiş hammadde ile başlar. Çubuklar kesilerek tek bir bilezik veya bilezik çifti üretimi için sıcak dövme prosesi gerçekleştirilir. Sıcak dövmeden iç ve dış

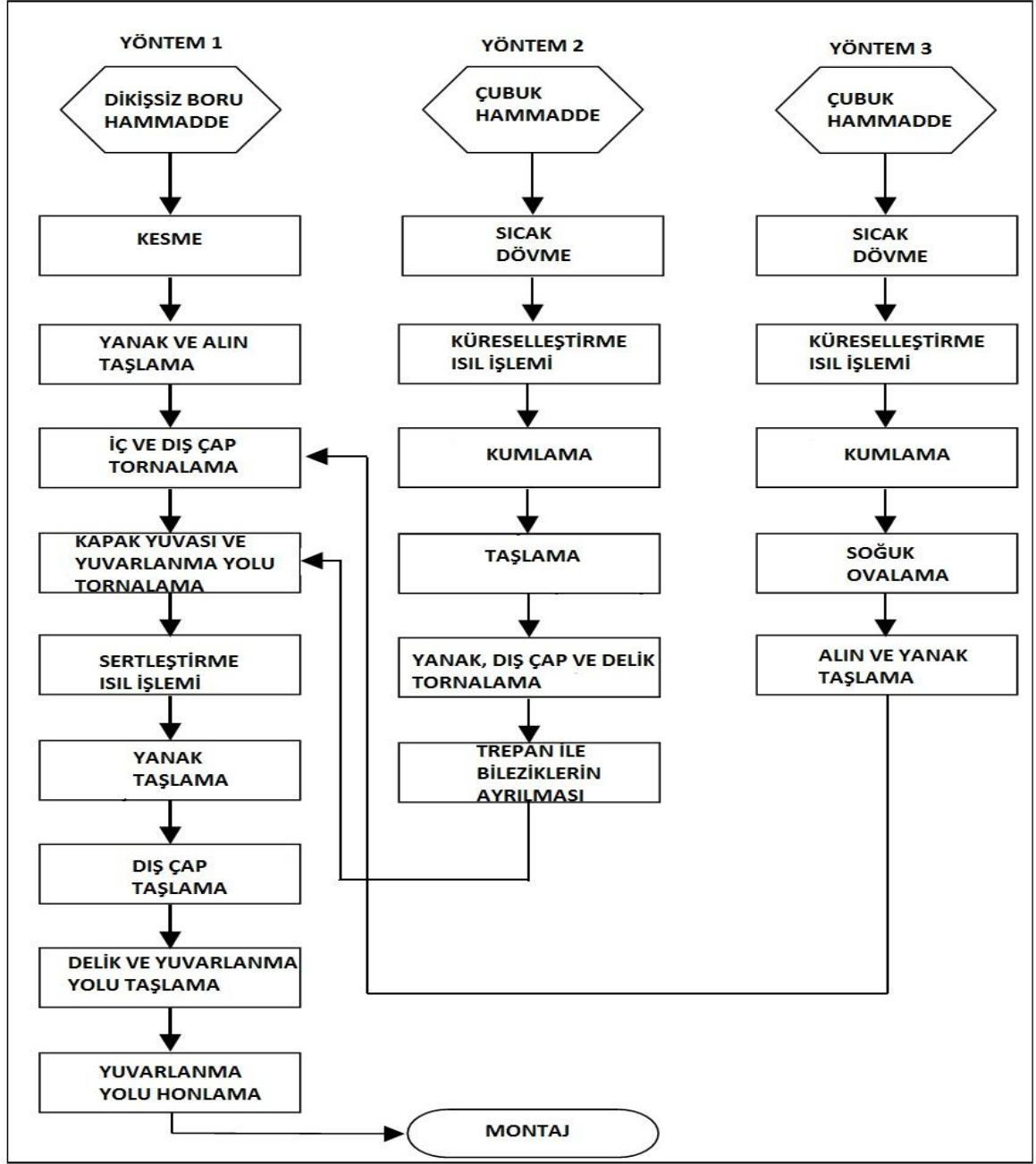
bilezik olarak iki halka elde edilir. Bu halkalar daha sonra ovalama soğuk metal şekillendirme işlemi ile istenilen çapa getirilir ve yumuşak taşlama işlemi ile gerekli referans yüzeyler parça üzerinde oluşturulur. Bu referans yüzeylere göre bilezikler tornalanarak rulman bileziği yuvarlanma yolu ve kapak yuvası formları oluşturulur. Yuvarlanma yolu ve kapak formları standart değildir ve rulmanın çalışma şartlarına göre tasarımcı tarafından değiştirilebilir.

Tornalama işleminin ardından rulman bilezikleri sertleştirme ısı işlem fırınlarında 62-66 HRC sertliğe ulaşacak şekilde sertleştirme ısı işlemine tabii tutulurlar. Sertleştirme işlemi sonrasında çok gevrek olan bilezikler temperlenerek yeterli sünekliği kazanırlar. Temperleme işlemi rulmanın kullanım şartlarına göre 150-250°C derecede gerçekleştirilir, ortalama 4 saat içerisinde temperleme işlemi tamamlanır. Bu işlem sonrasında 58-62 HRC arasında sertliğe inen rulman bilezikleri montaj ve çalışma için gerekli sünekliği elde ederler.

Sertleştirilen malzeme östenit sıcaklığına çıkmış olduğundan referans yüzeylerini kaybeder bu sebeple, sert taşlama operasyonu ile bileziklerin iç ve dış çaplarını istenilen toleranslara getirirken, yanaklarda sonraki işlemler için gerekli referans yüzeyini oluşturur. Yanaklarda oluşan referans yüzeylerden tutulan malzemenin yuvarlanma yolu taşlanır. Ardından süperfiniş veya honlama olarak bilinen son işlem ile yuvarlanma yollarında 0,025 mikron seviyesinde pürüzlülük değerlerine ulaşılır.

Rulmanda kullanılan komponentlere göre montaj işlemi değişiklik göstermektedir. Her rulman belli bir tolerans aralığında üretildiğinden, son üründe istenilen rulman boşluk değerlerine göre iç ve dış bilezikler gruplanır ve eşleştirilir. Bilyalar çap değerlerine göre 0 ile +10 mikron arasında gruplanmıştır. Her bilezik grubunun yuvarlanma yolu çap değerlerine ve istenilen boşluk miktarına göre seçilmesi gereken rulman bilyası farklı gruptan olacaktır. Buna göre seçilen bilyalar rulman yuvarlanma yoluna yerleştirilir ve son bilya bileziklerin elastik deformasyonu ile yerine oturur. Rulmanlarda bilyaların eşit aralıkta olması yük dağılımı açısından gereklidir. Bunu sağlama için iki parçadan oluşan çelik kafes sistemi her cepte bir bilya olacak şekilde merkezlenir ve iki parça birbirine perçin veya kıvrıma metodu ile birleştirilir. Kafes malzemesinin polimer olması durumunda, polimer kafes cepleri kuvvet altında esneyerek bilyaların kafese montajını kolaylaştırırlar.

Montaj işleminin sonraki aşamalarında rulmanlar gaz yağı yıkanır, dönme torkları kontrol edilir. Rulmanın yuvarlanma yolundaki son hatalar titreşim sensörü ile ölçülür ve rulman çalışma gürültüsü desibel cinsinden belirlenir. Farklı boyutlardaki hatalar farklı frekanslarda gürültünün yüksek olmasına sebep olduğundan, hatanın torna veya sert taşlamada gerçekleşmiş olduğu belirlenebilir. Eğer rulman gresli ise gres basılır ve gresin dışarı sızmasını veya dış etkenlerin içeri girmesini engelleyecek olan çelik veya elastomer kaplı çelik kapak takılır. Son olarak paslanmayı önleyici bir sıvı ile yıkanan rulman gözle kontrol edilerek ambalajlanır. Rulman üretim süreçlerinin şematik görüntüsü Şekil 1.3.'de görülebilir.

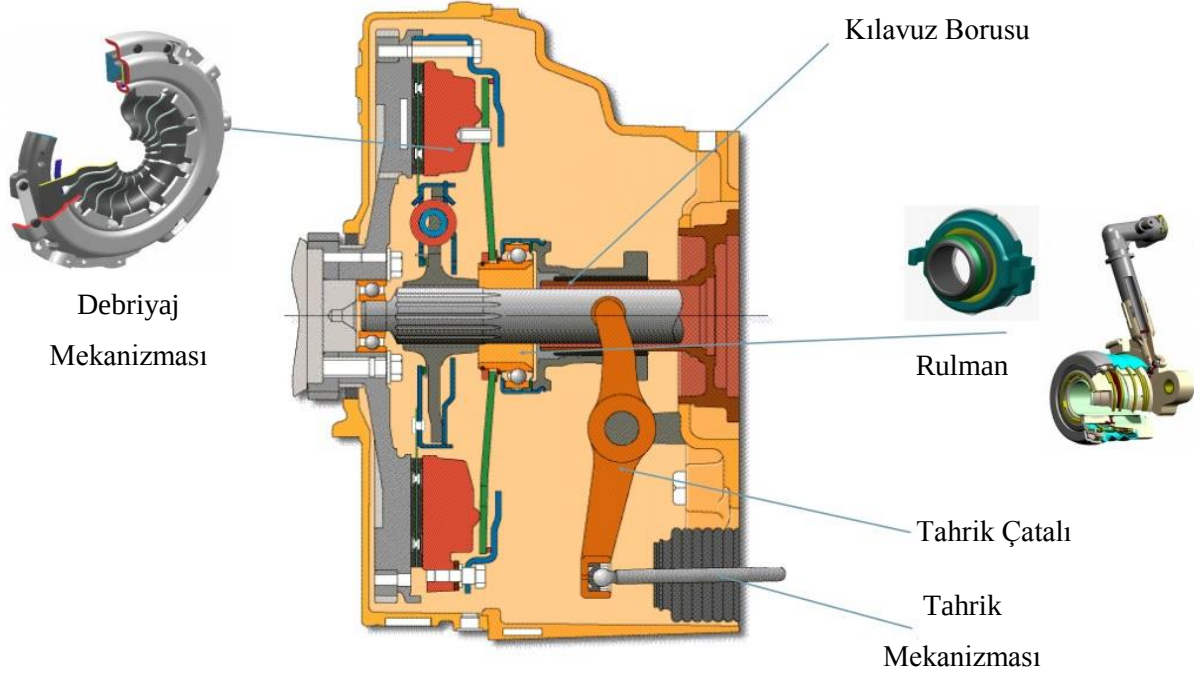


Şekil 1.3. Rulman Üretim Süreçleri [1]

1.1.3. Özel Rulmanlar

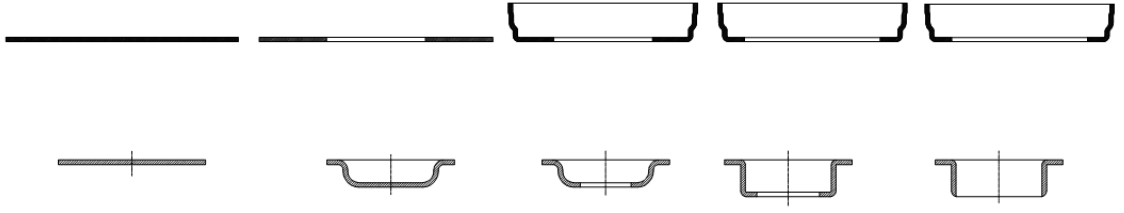
Özel rulmanlar otomotiv teknolojilerinin gelişmesi ve sektördeki yüksek rekabet sebebiyle günümüzde çok tercih edilmektedir. Bu tezin ana konusu olan sac metal bilezikli rulmanlar Şekil 1.4.'de görülebileceği gibi otomobillerde kullanılan debriyaj sistemleri için tasarlanmıştır. Bu rulmanlar masif 100Cr6 çeliği kullanımına göre daha kompakt tasarımlara izin vermekte, daha az çelik kullanılması ve imalat sürecindeki sıcak dövme,

küreselleştirme, tornalama, taşlama gibi birçok imalat yöntemini ortadan kaldırması yani düşük maliyeti sebebiyle tercih edilmektedir. 100Cr6 malzemenin farklı olarak sac malzemenin bileziklerin üretiminde DIN C67 standardında sac malzeme kullanılmaktadır. Bu malzeme %0,65-0,95 arasında karbon içeriği ile yüksek sertleşebilme özelliğine sahiptir, içerisinde bulunan Silisyum elementi ile malzemenin matris dayanımı artırıldığından, sertleştirilmesinin ardından yay çeliği olarak kullanılmaktadır [4].



Şekil 1.4. Debriyaj Sistemi ve Sac Bilezikli Rulman. (Valeo ve Ortadoğu Rulman Sanayi A. Ş.'nin izniyle)

Sac bilezikli rulmanlarda ise rulman bilezikleri sac şekillendirme işleminden geçeceği için sac olarak temin edilir ve şekillendirme prosesinde ürünün ilerde anlatılacağı şekilde anizotropi etkisinden en az şekilde etkilenmesi için ısıtılma işlemi ile hadde etkisinin en aza indirgenmiş olması şarttır. Bu şekilde satın alınan 1,5 mm kalınlığındaki çelik sac malzeme transferli kalıplarda ürün yapısına göre adım adım şekillendirilir. Şekillendirme sırasında dikkat edilen temel unsurlar: yuvarlanma yolunun derinliği, kapak için gerekli formların tasarıma uygunluğu ve sac malzemenin şekillendirme sonrasındaki hasarsızlığıdır. Şekil 1.5.'de değişik formlardaki bilezikler için farklı şekillendirme tasarımları görülebilir.



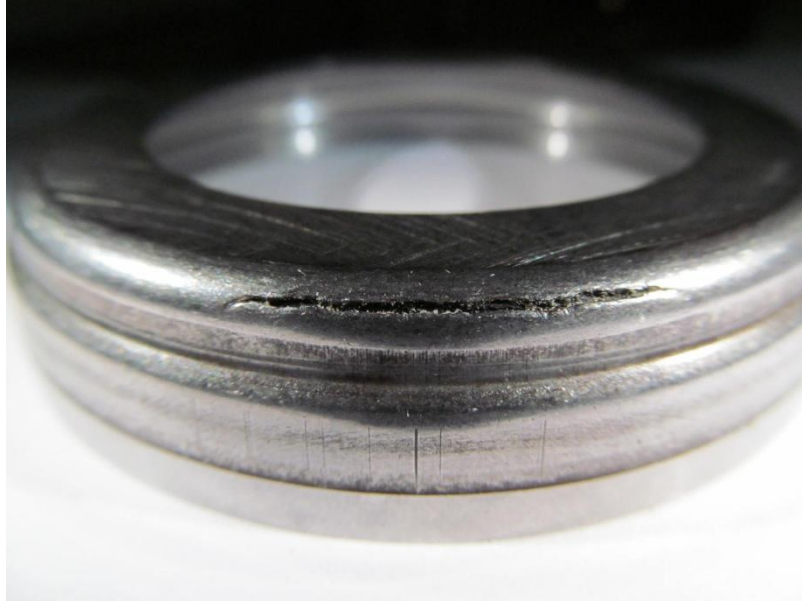
Şekil 1.5. Bilezik Formları için Örnek Sac Şekillendirme Adımları

1.2. Problem Tanımı

Ortadoğu Rulman Sanayi A.Ş. (ORS) bünyesinde sac malzemeden imal edilen rulman bilezikleri transferli kalıpta imal edilmektedir. Transferli kalıbın ilk iki istasyonu sac malzemenin rulodan istenilen ilk boyda kesilmesini içerir. Sonrasında iki adımda şekillendirilen malzeme son istasyonda ise dar toleranslara uyabilmesi için yüksek kuvvet altında sıkıştırılır. Bu imalat sürecinde şekillendirme sırasında çatlak oluşumu, ısıl işlemde çatlak oluşumu veya şekillendirmede fark edilmeyen çatlakların ısıl işlemde büyümesi, büküm yüzeyinde bozulma ve çatlakların büküm yüzeyinde bulunması gibi hatalara rastlanmıştır. Şekil 1.6.'da sac bilezik kesit formu görülebilir, Şekil 1.7.'de ise bulunan çatlaklara bir örnek mevcuttur. Şekil 1.8.'de çatlak oluşan büküm formunun kesitteki ve dışarıdan görüntüsü birlikte verilmiştir.



Şekil 1.6. Üretilen Rulman Kesiti



Şekil 1.7. Dış Bilezik Bükümünde Çatlak



Şekil 1.8. Dış Bilezik Bükümü Görünüşü ve Kesitte Çatlak Örneği

Bu tasarımların üretilmesi için gerekli transferli kalıp sistemlerinin yüksek maliyetlerinin yanı sıra, geleneksel deneme-yanılma kalıp üretim sürecindeki sürekli revizyonlar, tezgâh kapasitesi, personel ve kalıp işçiliği maliyetlerini daha da arttırmaktadır. Bu sebeple C67 çeliğinin malzeme karakterizasyonu yapılması ve bu karakterizasyon süreci sonrasında oluşturulacak malzeme modelinin bir sonlu elemanlar programında transferli kalıp tasarımlarının denenmesi için kullanılması hedeflenmiştir. Bu tez içerisinde malzemenin

incelenmesi, malzeme modelinin oluşturulması ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi için yapılan literatür çalışması aktarılacak, ardından gerçekleştirilen malzeme karakterizasyon testleri, malzeme modelinin oluşturulması, simülasyon programında kullanımı ve sonrasında oluşturulan model ile yapılan simülasyonlar sunulacaktır.

2. MALZEME VE ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİK LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1. Rulman Çeliği Malzemeleri

DIN standardında 100Cr6 olarak geçen AISI 52100 rulman çeliği günümüzde en yaygın kullanılan rulman üretim malzemesidir. 100Cr6 rulman çeliği ilk kez 1905 yılında rulman ömür testleri ile kendini kanıtlamış olup, Çizelge 2.1.'de görüldüğü gibi yüksek karbon oranı ve içeriğindeki krom elementi ile talaşlı işlenebilirliğinin yüksek olması sebebiyle tercih edilmiştir. Bugüne kadar çok sayıda yeni çelik alaşımı rulmanlarda denenmiş olmasına rağmen, mikro temizlik ile geliştirilmiş 100Cr6 halen tüm dünyada rulman pazarına hâkim çeliktir [4].

Çizelge 2.1. AISI 52100, DIN 100Cr6 Rulman Çeliği Elemental Analizi (Sanyo Steel, SUJ2)

Element	C	Cr	Si	Mn	P	S	Mo
Kütle	0,95-1,10	1,30-1,60	0,15-0,35	≤0,50	≤0,025	≤0,025	-
Yüzdesi, w%							

100Cr6'nın tercih edilmesindeki ilk etken belirtildiği gibi hem sıcak hem de soğuk şekillendirme proseslerine hem de yuvarlanma yolu ve kapak yuvası gibi hassas formlarda talaşlı işlenmesine imkân tanıyan özelliğidir. Bunun yanında yüksek karbon oranı sayesinde sertleştirme ısı işlemi sonucu 59-66 HRC arasında sertliklere ulaşabilir ve rulmanın sürekli çalışma esnasında maruz kaldığı tekrarlı yüklemelerde yüksek yorulma ömrü boyunca çalışmasını sağlar. Malzeme, sertleştirme ısı işleminin ardından kullanım için gerekli sünekliği sağlayabilmesi için gerçekleştirilen düşük sıcaklık temperlemesi için de uygundur [4][5].

Sac rulmanlarda kullanılan rulman çeliği ise DIN C67 standardında olup, 100Cr6 yerine rulman çeliği olarak geliştirilmiş Silisyum-Mangan çeliğine yakındır. C67 malzeme içeriği üretici firmanın sunduğu kalite sertifikasında Çizelge 2.2.'de sunulduğu şekilde belirtilmiştir.

Çizelge 2.2. C67 Standart Malzeme ve Hammadde Kalite Belgesi Elemental Analiz Sonuçları

Element	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
---------	---	----	----	---	---	----	----

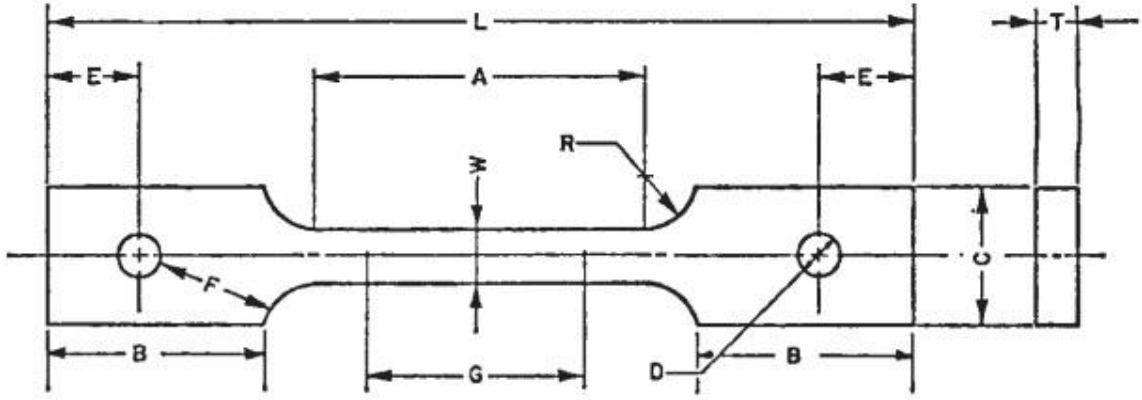
Standart C67	0,65- 0,73	0,4 – 0,9	0,15 – 0,35	Max	Max	Max	Max
w%				0,035	0,025	0,4	0,4
C67s Döküm w%	0,678	0,650	0,20	0,016	0,001	0,020	0,260

Yüksek karbonlu çelikler sınıfına giren C67 malzeme, tedarikçiden C67s olarak belirtilen çok düşük kükürt yüzdesine sahip sınıfta satın alınmıştır. Yay çeliği olarak kullanılan Silisyum-Mangan çeliğine göre düşük seviyede Silisyum ihtiva etmesine rağmen C67 de farklı uygulamalarda yay üretimlerinde kullanılmaktadır. İçeriğindeki Mangan ve Silisyum matrisi güçlendirerek azaltılan Krom'un yerine yeterli sertlik ve dayanıma olanak sağlamaktadır [5].

2.2. Sac Malzemelerde Şekillenebilirlik Testleri

Sac Malzemelerin şekillenebilirliğinin tespiti için tek eksenli ve iki eksenli gerilme altında testler yapılmaktadır. Bu testlerden en önemlileri tek eksenli çekme testi, basma testi ve burulma testidir [6]. Sac malzemelerde şekillenebilirlik tespiti için bu testlerden çekme testi ve pul basma testi (stack compression) testleri en çok kullanılanlardır.

Tek eksenli çekme testi uygulaması ve test için kullanılan numuneler ASTM, DIN, EN, ISO standartlarında belirtilen ölçülerde işlenerek yapılabilir. Bu çalışmada kullanılmış olması sebebiyle ASTM E8 standardı ele alınmıştır. Bu standarda göre malzeme Şekil 2.1.'de gösterildiği gibi ölçülendirilmiş olacak şekilde numuneler hazırlanması gereklidir. Yine aynı şekilde G ile gösterildiği üzere bu kısım ekstansometre ölçüm aralığıdır. Köpek kemiği olarak da belirtilen form ve ince kesit ile kalın kesit arasındaki dairesel geçiş türdeş (uniform) uzama miktarının maksimum olmasını ve dolayısıyla boyun verme öncesi maksimum uzamaya erişilmesi için gereklidir [7]. Sac malzemedan numunenin çıkarılması için tel erozyon, su jeti veya lazer gibi nümerik kontrol edilebilen makinelerin kullanılması dairesel ve doğrusal formların teğetliğini sağlamak ve malzeme içyapısının en az seviyede değişmesi amacıyla tercih edilmektedir. Özellikle yüzey pürüzlülüğünün değişmemesi ve pekleşme (strain-hardening) olmaması için talaşlı imalat işlemleri ve plastik şekil verme operasyonları kullanılmaz [8].



Şekil 2.1. Çekme Testi Numunesi ASTM E8

L=min 200 mm, W=12,5 mm, A=57 mm, T= maks 12,5 mm, R= min 13 mm, G = 50 mm

Çekme testi numunenin geniş kenarlarından çekme makinesindeki kafalara bağlanarak tek eksenli çekilmesi ile gerçekleştirilir. Makine kapasitesi malzemeyi kırmaya yetecek kadar büyük değilse standartta bulunan daha küçük bir numune kullanılır. Malzemenin uzama miktarı ekstansometre adı verilen bir alet ile ölçülür. Ekstansometre belirli bir boydaki değişimi hassas ölçmek için kullanılır [8]. Bu sayede çekme testi esnasında parçanın çekmeye karşı gösterdiği direnç kuvvetinin tezgâh kafaları ve gövdesinde yarattığı elastik uzama bilgisi hesaplara girmez.

Şekillendirme simülasyonlarında kullanılacak malzeme modelinde gerçek gerilme-gerinim eğrileri kullanılır. Bu eğrilerin hesaplanması aşağıdaki gibidir:

$$\sigma = F/A_1 \quad (1)$$

$$\epsilon = \ln(A_1/A_0) \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{(l_0 \times w_0 \times t_0)}{l_1 \times w_1} \quad (3)$$

Metal şekillendirme simülasyonlarında statik mukavemet simülasyonlarından farklı olarak malzemenin plastik davranışının doğru çıkarılması daha önemlidir. Elastik davranış geri yaylanma gibi işlem sonrası formların doğruluğu konusunda başarılı bilgiler almak için önemli olsa da malzemenin şekillenirliğinin modellenmesi malzemenin plastik davranışının çıkarılmasına bağlıdır [6].

Çekme testi ile tespit edilebilecek bir diğer malzeme özelliği olan anizotropi, malzemenin farklı yönlerde farklı davranış sergilemesidir. Çekme testinde malzemenin uzama yönündeki geriniminin yanında genişlik yönündeki gerinimi ölçülürse anizotropi

hesaplamaları yapılabilir. Sac malzemelerde anizotropi kristal yapı ve haddeleme sırasında oluşan yönelmiş tane yapıları sebebiyle, malzemenin farklı yönlerde farklı akma ve çekme dayanımları göstermesi sebebiyle oluşmaktadır [6]. Bu durum şekillendirme işlemleri sırasında yırtıklara, kırışıklıklara ve kulaklanma adı verilen bozulmalara sebep olabilir [9]. Anizotropi denklem 4 ve 5'deki şekilde ifade edilir.

Düzlemsel Anizotropi denklemi
$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2 \times r_{45}}{2} \quad (4)$$

Normal Anizotropi denklemi
$$r_n = \frac{r_0 + r_{90} + 2 \times r_{45}}{4} \quad (5)$$

6 ve 7 numaralı denklemlerdeki r değeri malzemenin anizotropi katsayısı olarak ifade edilir ve sac malzemenin genişlik gerinimi ile kalınlık yönündeki geriniminin birbirine oranlanması ile bulunur.

Anizotropi katsayısı
$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (6)$$

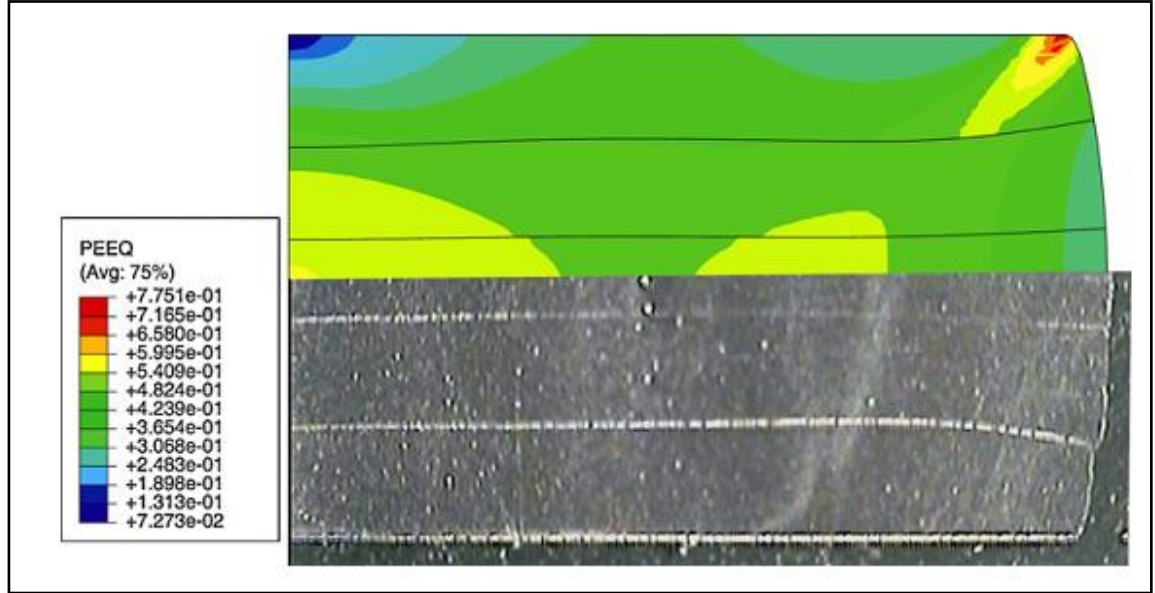
Tek eksenli çekme testlerinde malzemenin uzunluk (l) ve genişlik (w) yönündeki gerinimleri ekstansometre yardımı ile tespit edilebilirken, kalınlık yönündeki gerinimi tespit edilmez ve bunun yerine malzemenin toplam geriniminin $\epsilon_l + \epsilon_w + \epsilon_t = 0$ olduğu gerçeğinden hareketle;

Anizotropi katsayısı
$$r = (-\ln(l/l_0) / (\ln(l/l_0) + \ln(w/w_0))) \quad (7)$$

olarak ifade edilir.

Basma testi ASTM E9 standardına göre yapılır ve özellikle kütsel malzemeler için kullanışlı testlerdir. Malzeme dayanımının olduğundan daha yüksek çıkmaması ve burkulma etkisinin görülmemesi için malzeme yüksekliğinin diğer boyutlarına yakın olması gerekmektedir. Sac malzemelerde ise sac kalınlığı diğer boyutlara göre düşük olduğu için bu şekilde numune çıkarılmaz. Bunun yerine belirli bir çapta kesilen numuneler sac kalınlığına göre üst üste yığın haline getirilerek çap ve yükseklik değerleri yakın hale getirilir [10]. Basma testi silindirik alt ve üst kalıp arasında gerçekleştirilir. Numunenin daha küçük olması sebebiyle ekstansometre kullanılamaz, ancak deplasman optik yöntemlerle veya tezgah hareketi üzerinden hesaplanabilir. Malzemenin kalıba yapışarak yığından ayrılmasını engellemek için kalıp ve malzeme birleşme yüzeylerinde yağlayıcı kullanılır. Malzemenin düzgün deformasyon ile şekil alması ve her yığın parçasının birlikte şekil değiştirmesi beklenir. Tezgâhın uyguladığı kuvvet ve hareket mesafesi çekme testinde kullanılan denklemler ile kullanıldığında gerçek gerilme-gerinim

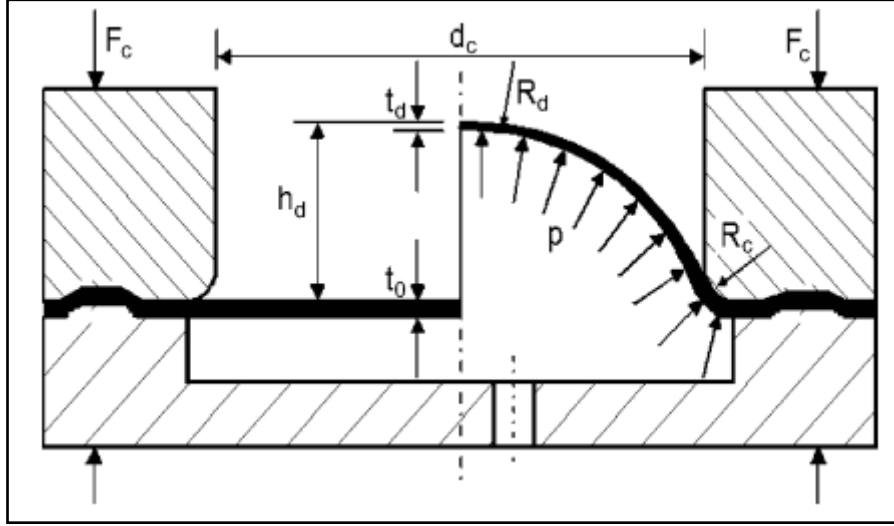
grafiği elde edilir. Coppieters yaptığı çalışmada yağlayıcı farklarının pul basma testinde şekillendirmeye etkisini göstermiştir, Şekil 2.2.'de bu çalışmadaki sonlu elemanlar analizi ile gerçek testin birleştirilmiş görüntüsü mevcuttur [11].



Şekil 2.2. Pul Basma Testi Numune ve Simülasyon Kesit Görünümleri[11]

Pul basma testi çok daha yüksek gerinimlere kadar şekillendirme yapabilir, bunun sebebi kuvvetin tek eksenli uygulanmasına rağmen gerinimin sac yüzeyindeki iki eksende birden meydana gelmesidir. Bu sebeple pul basma testi iki eksenli gerilme şartlarında şekil değişimine sebep olur [9].

Pul basma testi dışında günümüzde yaygın kullanılan ancak özel bir tezgah gerektirdiği için henüz standartlaşmamış bir diğer test ise Şekil 2.3.'de şematik olarak gösterildiği üzere Hidrolik Şişirme Testi (Hydraulic Bulge Test- HBT)'dir. Bu test aslında yarı küresel formda bir kalıp ile sac malzemenin yırtılana kadar şekillendirilmesi esasına dayalıdır. Ancak kalıp pürüzlülüğü ve dolayısıyla sürtünme değerlerinin yırtılma noktasına etkisi sebebiyle malzemenin anizotropisi hakkında ayrıntılı bilgi verse de malzeme modelini pul basma testi kadar iyi tespit edememektedir. Bu işlem kalıp yerine hidrolik yağ kullanarak yapıldığında yağ ile malzeme arasındaki sürtünme katsayısı çok düşük olduğu için malzemenin plastik eğrisi gerçeğe daha yakındır [11], [12].



Şekil 2.3. HBT Analitik Çözüm Parametreleri [13]

İki eksenli şişirilen bir malzemede gerinim ölçümü için temaslı yöntemler kullanılarak analitik hesaplama yapılması durumunda kırılma zamanlaması tam olarak ölçülememektedir. Günümüzde bu sorunun üstesinden hem kubbe yüksekliğini hem de malzemenin üzerindeki şekil değişimini gerçek zamanlı takip ederek gerinim hesaplayabilen yazılımlar sayesinde gelinmiştir, optik olarak gerinim ölçümü yapılmaktadır [13]–[15].

2.3. Elastiklik Modülü ve Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

Elastiklik modülü kuvvet altındaki malzemenin plastik deformasyona uğramadan yani akma dayanımından önceki gerilme-gerinme doğrusal davranışının eğimidir. Malzemenin kristal yapısı sebebiyle oluşan bu doğrusal gerilme-gerinim bölgesinde parça üzerindeki kuvvet kaldırılırsa kristal yapı eski haline geri dönerken parçayı da tamamen ilk ölçüsüne getirir. Elastiklik modülü kristal yapıya bağlı olmasından dolayı alaşımlardan bağımsızdır ve baz metalin kristal yapısına göre değer alır [8]. Çelikler için bu değer 200GPa seviyesindedir. Yine de simülasyon öncesi bu değer ölçülmesi için çalışma yapılabilir. Literatürde elastiklik modülünün belirlenmesi için yapılan çalışmalar V bükme testleri, üç nokta bükme testleri olarak belirtilmektedir. Bunun dışında simülasyon ile deneylerin kıyaslanması ile elastiklik modülünün tespiti ile ilgili çalışmalar mevcuttur [16]–[18].

Sürtünme katsayısı hem kullanılan malzemenin hem de şekillendirmede kullanılan kalıbın yüzey pürüzlülüğü ile belirlenen bir katsayıdır. Sürtünme katsayısının belirlenmesi için şekillendirme kalıplarının yapısında bir kalıp üretilmesi gerekmektedir. Sac şekillendirme işlemlerinde sürtünme kuvvetinin etkisi kalıp içinde veya flanşa sürtünme sırasında ortaya

çıkacağı için testlerin de sürtünmeye dayalı olarak yapılması gerekmektedir. Sürtünme testleri belirli formda işlenen kalıp malzemesinin üzerinden kayacak şekilde şekillendirilen sac malzeme ile yapılabildiği gibi, limit kubbe testi gibi yarı küresel formda bir kalıpla şekillendirilerek de yapılabilmektedir [19]. Yağ kullanımı sürtünme kuvvetini değiştireceğinden şekillendirme operasyonunda kullanılan yağın kullanılması gerekir. Bunun yanında simülasyon programlarında kullanılacak sürtünme katsayısının doğrudan etkisinin incelenmesi amacıyla yapılan testin simülasyonun yapılması ve test sonuçları ile simülasyondan elde edilen sürtünme katsayısının kıyaslanması uygulanan bir yöntemdir [11], [20], [21].

2.4. Malzeme Modelleri

Malzemeler, testler sırasında belirli yönlerden gelen yükler altında test edilmelerine rağmen mühendislik uygulamalarında birden çok farklı yönden yüke maruz kalmaktadırlar. Bu sebeple malzemenin plastik deformasyona hangi şartlarda uğrayacağını belirlenmesi gerekir. Mohr Dairesi yöntemi ile söz konusu birden çok yükün ana eksenler olan üç boyutta yarattığı gerilmeler σ_1 , σ_2 ve σ_3 bulunabilir [22].

Tresca bu üç ana gerilmenin malzemeyi ne zaman akmaya uğratacağını aşağıdaki denklemle açıklamıştır:

$$\frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_f}{2} \quad (8)$$

Bu denklemde σ_f malzemenin akma dayanımıdır. Buna göre ana eksenlerdeki gerilmelerden en büyük ve en küçüğü arasındaki fark akma dayanımına eşit olduğunda malzeme plastik deformasyona uğramaya başlar.

Von Misses ise her üç gerilmeyi birden hesaba katmak gerektiğini ifade ederek;

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} = \sigma_f \quad (9)$$

Akma noktasını açıklamıştır. Bir noktadaki gerilmenin ifadesi bu noktaya üç ana eksenlerden gelen gerilmelerin Von Misses ile bileşke gerilmenin bulunması durumunda bu gerilme Von Misses gerilmesi olarak ifade edilir [9].

Malzemelerin elastik davranışları doğrusal bir denklem ile ifade edilebilmesi sebebiyle birinci dereceden bir ifade ile tanımlanabilmekte ve bu ifadedeki katsayıya E: Elastiklik Modülü adı verilmektedir. Malzemelerin plastik davranışları üstel bir fonksiyon şeklindedir ve malzemenin atomik bağ yapısından, metalografik içyapısına kadar birçok

faktöre bağı olarak değişiklik gösterebilir. Bu sebeple plastik davranışın modellenenebilmesi ve bu modellerin malzemenin deformasyonu için gerekli kuvvetleri tahmin etmesi simülasyon ve imalat hesaplamaları için önemlidir [6].

Özellikle çeliklerde kullanılan Power Law Malzeme Modeli şu şekildedir:

$$\sigma = K \times \epsilon^n \quad (10)$$

Bu modelde σ gerilme, K test verileri ile çıkarılması gereken malzeme katsayısına ve n pekleşme üsteline (strain hardening exponent) bağıdır. Bir çekme testi verisi bu model ile modellenmek istendiğinde malzemenin çekme testinde ulaşılan maksimum kuvvet gerinimine yani boyun verme noktasına kadar veri ile uyumlu bir model oluşturulabilir.

Ludwick bu modeli şu şekilde geliştirmiştir:

$$\sigma = A + B \times \epsilon^m \quad (11)$$

Bu denklemde A ve B malzeme katsayıdır, m değeri ise pekleşme üstelidir.

Swift aynı modeli şu şekilde geliştirmiştir:

$$\sigma = K \times (\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (12)$$

Swift modelinde, power law'da olduğu gibi K ve n katsayıları mevcuttur. Bununla birlikte malzemenin plastik deformasyon başlangıcındaki gerinim değeri de ϵ_0 olarak ifade edilir.

Voice modeli özellikle alüminyum alaşımları için uygundur:

$$\sigma = A - (A - B) \times e^{-C\epsilon}$$

Voice modelinde A , B ve C malzeme katsayılarıdır [23].

2.5. Sac Şekillendirmede Deformasyon Çeşitleri ve Simülasyon Yöntemleri

Malzemenin plastik davranışının metal şekillendirme simülasyonlarının sonuçlarına etkisinin yanında simülasyonun ne şekilde tasarlandığı ve sonlu elemanlara bölme işleminde hangi tip elemanların kullanıldığı da eşit derecede önemlidir. Burada öncelikle deformasyon yapısının ne şekilde olduğunun tespiti gerekmektedir.

Sac malzemelerin simülasyonlarında işlem zamanını ciddi miktarda azaltan ve hata oranı düşük sayılabilecek kabuller yapılır. Sac şekillendirme ve kütle şekillendirme simülasyonları özellikle kesiti aynı kalan dairesel parçalarda aksenal simetrik iki boyutlu simülasyonlar olarak tasarlanabilir. Bu durumda malzemenin yalnız kesit görüntüsü üzerinden simülasyon yapılır ve işlem süresi çok kısaltılabilir. Dairesel kesitin aksenal

simetrik modellenmiş olması da kesitin bir eksen çevresinde döndürülerek gerçek parçanın değerlerine yaklaşacak bir tümevarım gerçekleştirilmesini sağlar [6].

Sac malzemelerde, özellikle otomobil kaportası gibi dairesel olmayan parçalarda malzemenin kalıba temas eden her yüzeyinin modellenmesi tüm simülasyonun doğruluğu için önemlidir. Bunun gibi simülasyonlarda malzemenin uzunluğu ve genişliği kalınlığından çok daha büyük olduğu için ($l \times w > 10t$) malzeme kalınlığını ek bir parametre olarak kullanan ancak simülasyonda sonlu elemanlara bölmeyen kabuk elemanlar kullanılabilir. Kabuk elemanlar özellikle malzemenin kalınlık yönünde bir gerilme ve gerinim olmaması, sadece uzunluk ve genişlik yönündeki gerinimlerin etkisi ile kalınlığın azalması koşulunda doğru sonuçlar verirler [24].

Bir diğer deformasyon durumu da yakın zamanda çalışılmaya başlanmış olan sac-kütle metal şekillendirmedir. Burada kullanılan malzeme sac malzeme olmasına rağmen, kalıp içinde belirli bölgelerde kalınlık yönünde gerilmeler oluşmaktadır ve bu bölgeler kütle şekillendirme şeklinde deformasyon gösterirler. Bu durumda sacın kabuk elemanlarla modellenmesi hatalı sonuç verecektir. Kalınlık boyunca malzemenin sonlu elemanlara bölünmesi ve sacın kalınlık eksenine gelen gerilmelerin yarattığı kalınlık ekseninde kütle deformasyonunun doğru modellenmesi açısından önemlidir [25], [26].

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan simülasyonlarda statik implicit ve dinamik explicit yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler sonlu elemanlara bölünmüş geometrinin her elemanı içerisinde hesaplama için kullanılan denklemin değişikliğine ve her adımda kontrol edilen parametrelere bağlıdır. Endüstride kullanılan simülasyon programları bu iki yöntemden birisini kullanmakta ve farklı metal şekillendirme operasyonları için başarılı yakınsamalarda bulunabilmektedir.

Statik implicit sonlu elemanlar yöntemi MSC Marc[®] ve Abaqus[®] programları tarafından kullanılmakta olup, statik denge denklemlerine dayanır. İmplicit çözücüler her adımda kuvvet tensörlerinin eşitliğini kontrol etmektedir, yani her adımda sistem statik denge durumunda olmalıdır. Her çözüm adımında tüm elemanların oluşturduğu stiffness matrisin tersi alınarak işlem yapıldığı ve doğrusal olmayan denklemlerin çözümünde nümerik işlem yapılması gerektiği için işlem süreleri çok uzun olabilmektedir. Eleman sayısının artışı ile simülasyon süresi dört katı ile oranlı olarak artabilir. Her adımın kontrol edilmesi ve kontrolde yakınsama sağlanamaması durumunda simülasyonun hata vermesi olasıdır ancak bu durum sorunun tanımlanmasını sağladığı için kötü olarak değerlendirilmez [24].

Dinamik Explicit yöntemler Ls-Dyna®, Abaqus® gibi pek çok endüstriyel simülasyon programının kullandığı yöntemdir. Simülasyon denklemlerinde parça ivmesi ve hareket denklemleri mevcuttur. Bu simülasyon yapısında her adımda dengelenmemiş kuvvet kontrolü yoktur dolayısıyla yakınsama kontrolü yoktur. Bu sebeple bilgisayar belleği gereksinimi daha azdır ve işlem hızı implicit çözücülere göre fazladır. Yakınsama kontrolü olmadığı için simülasyon hata vermez ancak sonuç vermeyen çözümler yapabilir. Sac malzemelerde önemli çıktılar olan geri yaylanma ve kalıntı gerilme bilgilerini doğru olarak veremezler. Ancak özellikle kırışma (wrinkle) oluşumu gibi hataların yerlerini doğru olarak tespit ederler. Genel gerilme ve gerinim dağılımını doğru olarak verse de yerel gerilme ve gerinimlerde hata miktarı implicit çözücülere göre fazladır. Otomotiv sanayinde parça şekillendirilmesindeki eksikleri belirlemek, kırışma hatalarını hızlı ve doğru olarak saptamak için kullanılmaktadırlar [24]. Yerel gerilme ve gerinimlerdeki hata oranının fazlalığı, dinamik explicit çözücülerin genellikle kabuk elemanlarla kullanılması sebebiyle, kalınlık doğrultusunda gerinim olan sac-kütle şekillendirmeye yakın simülasyonlar için implicit çözücüler kullanılmaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Malzeme Testleri

Malzeme testleri için sıklıkla kullanılan çekme testinin, malzemenin birden fazla eksen altında yük taşıması durumunda yeterli olmadığı, şekillendirmenin de istavroz şeklinde veya eksenel simetrik olması durumunda iki eksenli malzeme verisinin elde edilmesi gerektiği bilinmektedir [27]. Buna göre yapılması gereken testler şu şekilde belirlenmiştir:

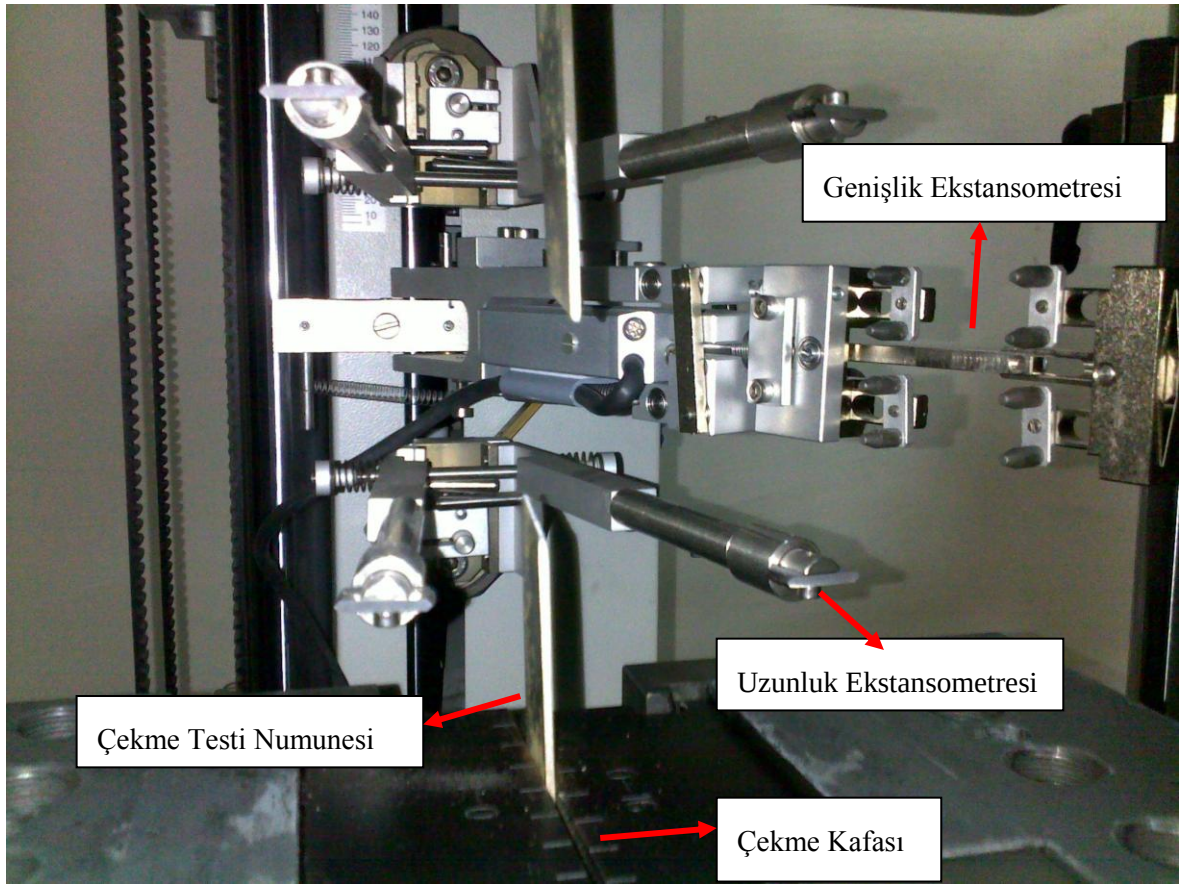
1. Çekme testi: ASTM E8 standardı baz alınmış ancak malzeme enine göre numuneler daha kısa olacak şekilde kestirilmiştir. Hadde yönüne göre 0°, 45°, 90° derece olacak şekilde üç farklı eksenden numuneler çıkarılmıştır.
2. Basma Testi: Pul basma testinde 1,5 mm kalınlığındaki malzemeden tel erozyon yöntemi ile 10 mm çapında dairesel numuneler çıkarılmıştır. Numunelerin burkulma deformasyonu göstermemesi için yedi puldan oluşan yığınlar pul basma testine tabii tutulmuştur.
3. Hidrolik Şişirme Testi: Malzeme genişliği 165 mm ile sınırlı olduğu için 100 mm çapında dairesel kalıp açıklığı ve 150 mm çapında sabitleme çubuğu (lockbead) bulunan hidrolik şişirme kalıpları imal edilmiştir. Bu kalıplar ile 165 x 165 mm genişliğinde kare numuneler teste tabii tutulmuştur.
4. Dört Nokta Bükme Testi: Yerel gerilme yoğunlaşmasını engelleyerek geri yaylanma miktarının hesaplanması ve simülasyon ile karşılaştırmalı olarak elastiklik modülünün çıkarılması planlanmıştır.
5. Sürtünme Katsayısı Testleri: Yarı küresel formda, gerçek şekillendirme kalıpları ile aynı üretim süreçlerinden geçmiş kalıplar kullanılmıştır. Kalıpların pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve gerçek kalıpların pürüzlülük değerleri ile kıyaslanmıştır. Çekme numuneleri yarı küresel kalıpta şekillendirilmiş ve deneyde yırtılma oluşan noktalar belirlenmiştir. Yırtılma noktaları ile deneyin simülasyon modelindeki maksimum gerinim bölgeleri kıyaslanmıştır.

3.1.1. Çekme Testi

Çekme testi için Şekil 3.1'deki boyutlarda hadde yönüne göre 0°, 45° ve 90° derecelerde numuneler hazırlanmıştır. Rulman imalatı için satın alınan hammaddenin maksimum genişliği 165 mm olduğu için 90° derecelik numunelerin boyu 165 mm olarak sabitlenmiştir. Tüm testler Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde bulunan Zwick/Roell Z300 model 24 tonluk çekme-basma tezgâhında yapılmıştır.

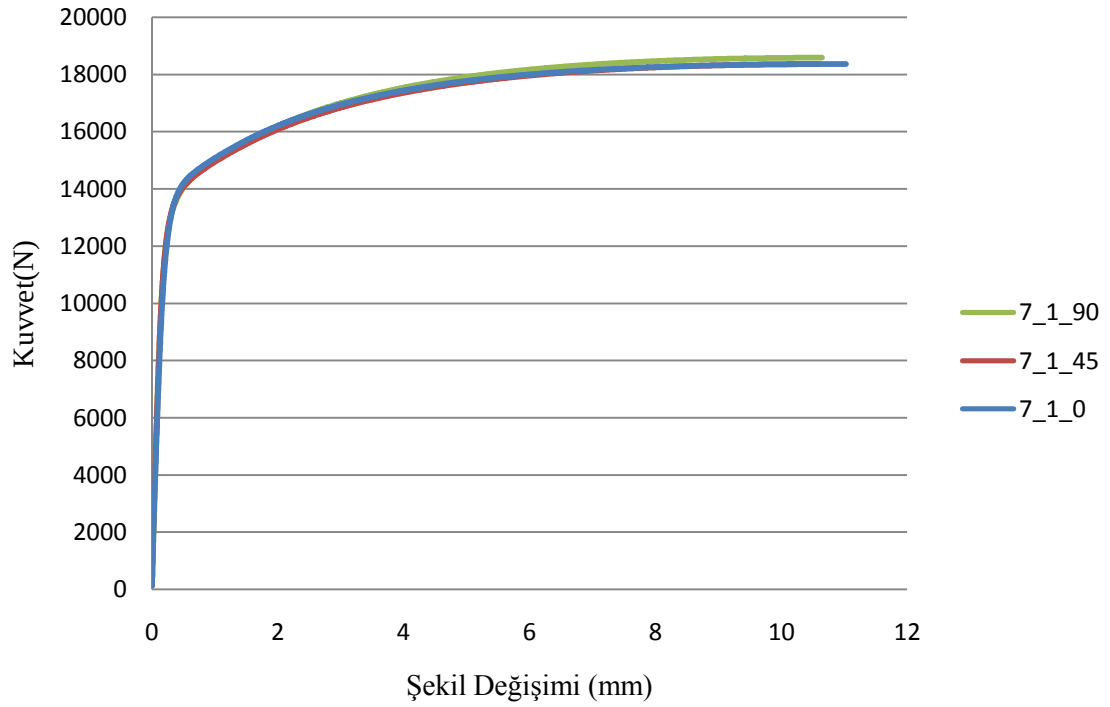
Technical drawing of a mechanical part with dimensions: L, A, E, R, T, F, B, G, C, and D.

22



Şekil 3.2. Çekme Testi Sonrası Malzeme ve Ekstansometreler

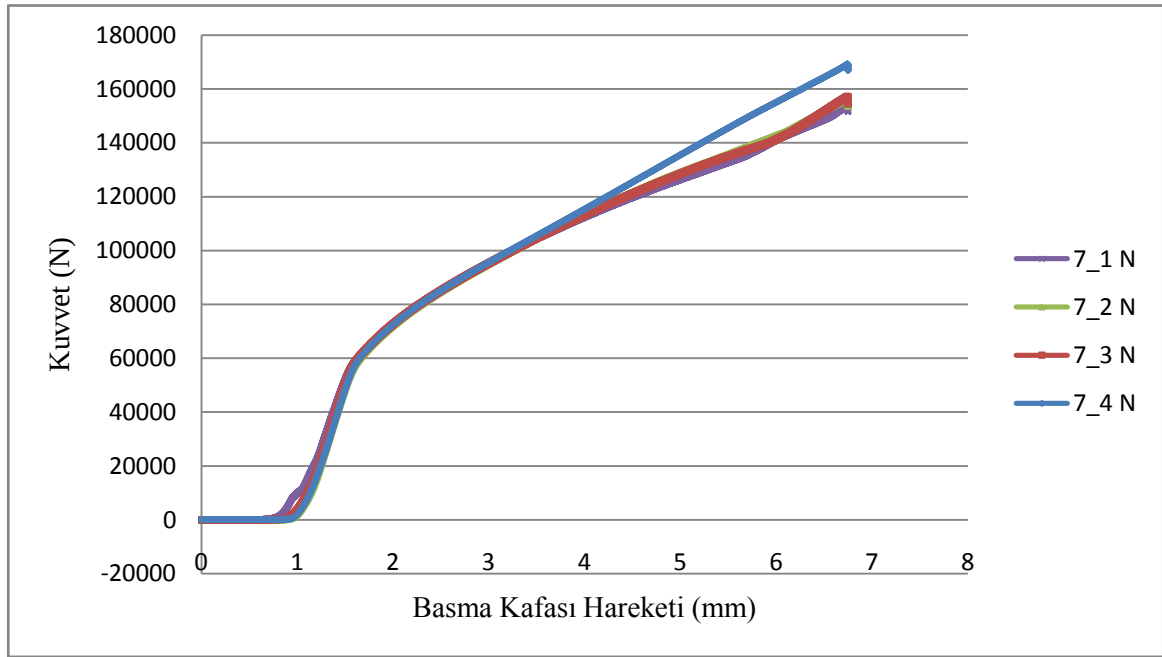
Çekme testinden elde edilen kuvvet-deplasman verisi Şekil 3.3’de görülebilir.



Şekil 3.3 Malzeme 7 için Çekme Testi Birinci Numune Seti Kuvvet-Deplasman Verisi

3.1.2. Basma Testi

Basma testleri için tel erozyon yöntemi ile sac malzemeden 10 mm çapında dairesel numuneler çıkarılmış ve anizotropi etkisinin görülebilmesi için aynı hadde yönünde olacak şekilde 7 parçalı yığınlar haline getirilmiştir. Basma testleri de Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde bulunan Zwick/Roell Z300 model 24 tonluk çekme-basma tezgâhında yapılmıştır. Pullar kapalı kalıp içinde, kalıp sürtünmesini azaltmak için yağlayıcı kullanılarak basma testi uygulanmıştır. Uygulanan dört basma testinin sonuçları Şekil 3.4.'de görülebilir.



Şekil 3.4. Pul Basma Testi Kuvvet-Deplasman Grafiği

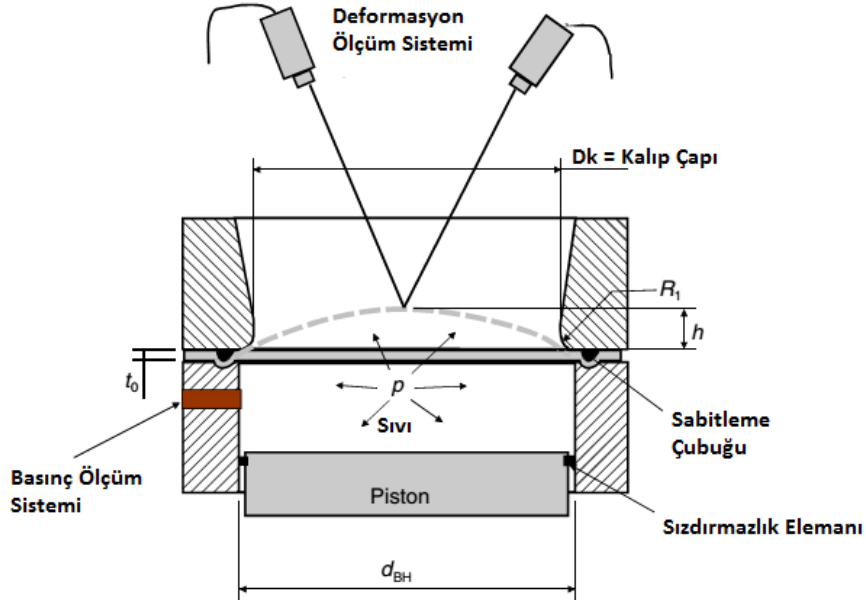
Basma testi sonucunda yığın içindeki pulların eşit miktarda şekillenmediği, şekillendirme kuvvetinin parçalar arası sürtünme kuvvetinden yüksek olması sebebiyle kaymalar veya yığındaki bazı parçaların şekillenen parçalar sebebiyle şekillenmeyerek kalıp gibi davrandığı Şekil 3.5.'de görülebilir.



Şekil 3.5. Pul Basma Kalıbı ve Basma Sonrası Numuneler

3.1.3. Hidrolik Şişirme Testi (Hydraulic Bulge Test - HBT)

Hidrolik Şişirme Testi Şekil 3.6’da görüleceği gibi, belirli bir çapta sabitlenmiş sac malzemenin hidrolik yağ basıncı ile şekillendirilmesi esasına dayanır. Hidrolik yağ tüm malzeme yüzeyine eşit basınç uyguladığından ve bir kalıp parçası kullanımında ortaya çıkan sürtünme kuvvetlerinin hidrolik yağda çok düşük olmasından dolayı, malzemenin en üst noktadan kırılmasını sağlar [19]. Hidrolik yağın basıncı ile şişen malzeme yukarıya doğru şekillenirken üst yüzeydeki gerinimler analitik olarak hesaplanabileceği gibi, optik metodlarla da incelenebilmektedir.



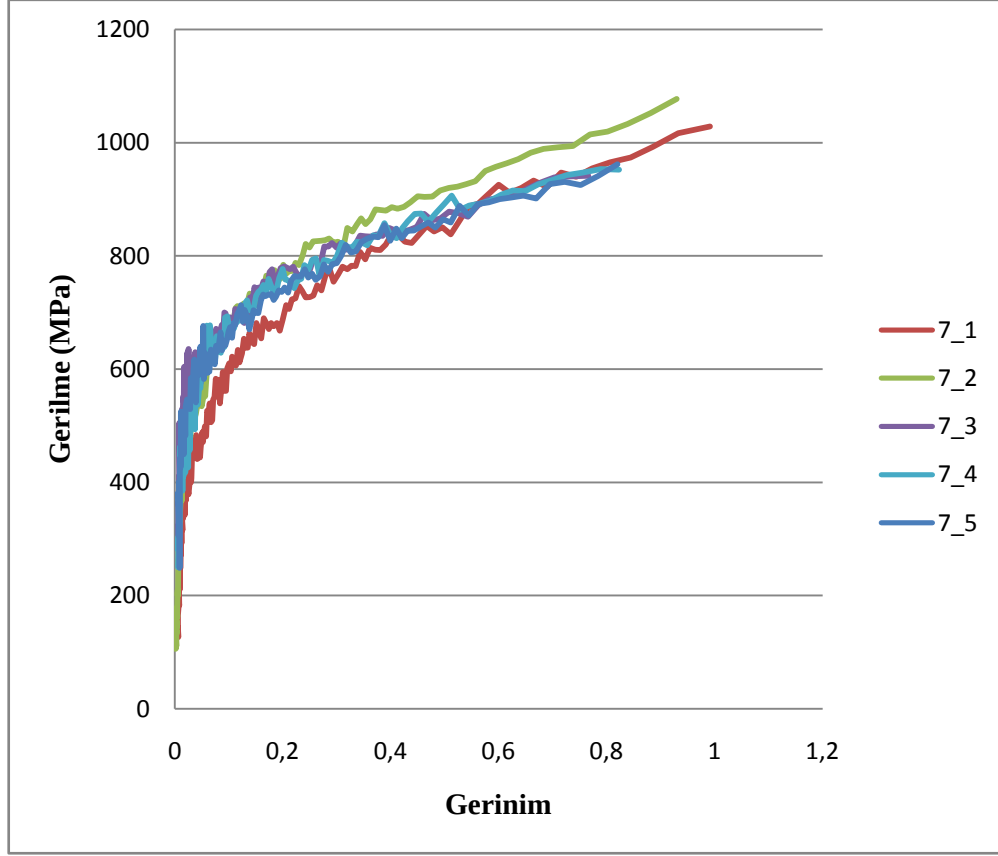
Şekil 3.6. Hidrolik Şişirme Testi Şematik Görüntüsü [15]

Hidrolik şişirme testi 165 mm genişliğindeki numunelerin kullanılabilmesi için 150 mm çapında süzdürme çubuklarına sahip 100 mm'lik şekillendirme boşluğu olan kalıplar imal edilmiştir. Testler Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde bulunan HBP600 BUP HBT tezgahı ile yapılmış, gerinimler GOM-ARAMIS-4M optik gerinim ölçüm sistemi ile elde edilmiştir. Şekillendirilen parçaların örnekleri Şekil 3.7.'de görülebilir.

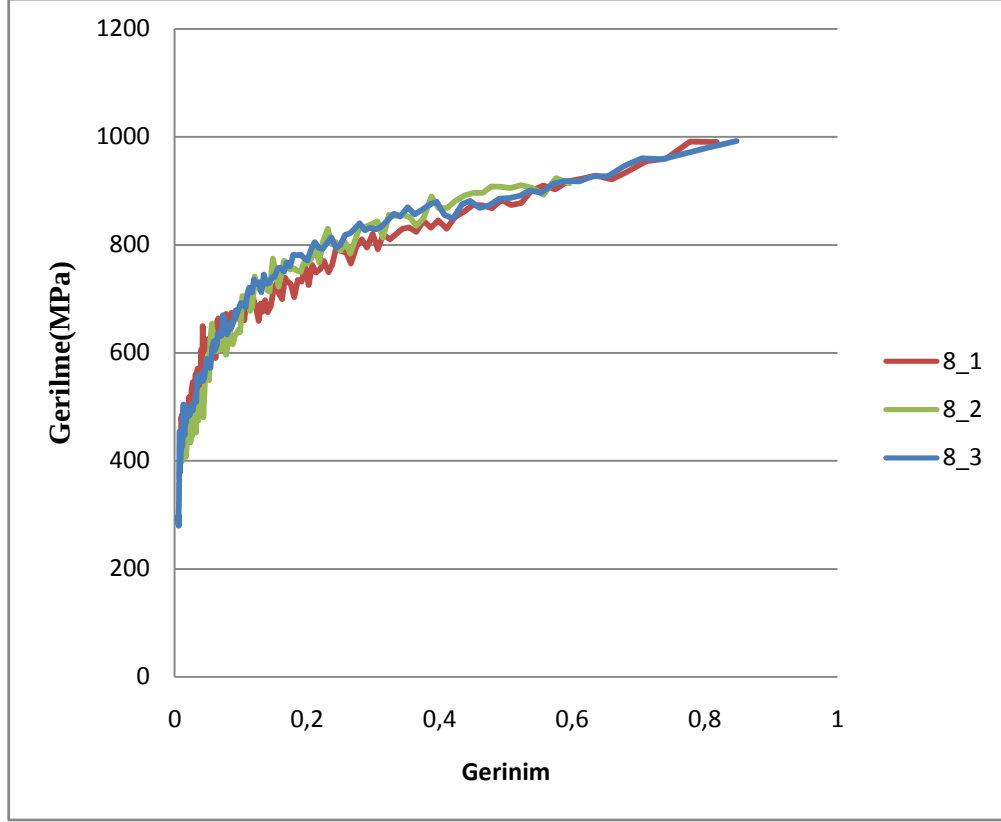


Şekil 3.7. HBT Testinden Çıkan Numuneler

Şekillendirme sonrası Aramis programının aldığı gerinim verileri incelenmiş ve gerilme-gerinim grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 3.8. ve Şekil 3.9.'da iki malzemeye ait gerinim-gerilme grafikleri görülebilir.



Şekil 3.8. Malzeme 7 HBT Gerilme-Gerinim Grafiği

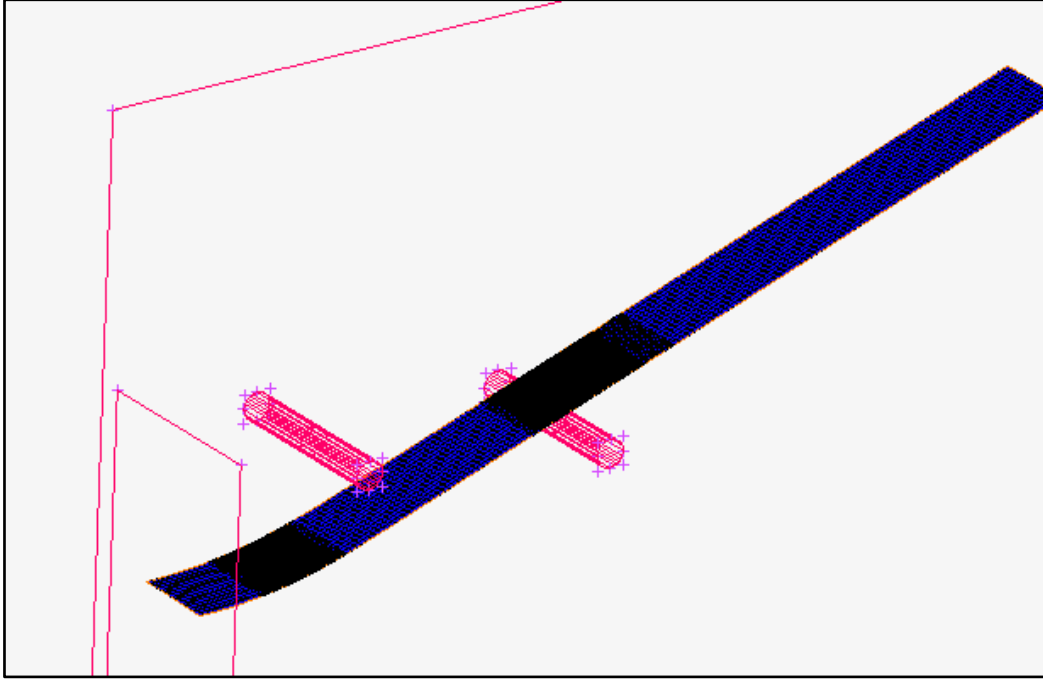


Şekil 3.9. Malzeme 8 HBT Gerilme-Gerinim Grafiği

Şekil 3.8. ve 3.9.'da da görülebileceği gibi, hidrolik yağ basıncı ile elde edilen kuvvet verisi hidrolik yağın düşük basınçlardaki kararsız kuvvet rejimi yüzünden dalgalıdır. Ancak yüksek basınçlarda kuvvet verisi ve dolayısıyla gerilme verisi kararlı hale gelmiştir. Bu haliyle bu verinin malzeme verisi olarak kullanılmadan önce, çekme testi verileri ile kalibre edilerek yüksek gerinimlerdeki malzeme davranışının saptanması planlanmıştır.

3.1.4. Elastiklik Modülü Belirleme için Tekrarlı Çekme Testleri

Elastiklik modülünün belirlenmesi için üç nokta bükme testleri yapılması durumunda yerel gerilme yoğunlaşması olacağı düşünülmüş bu sebeple dört nokta bükme testleri yaparak ters sonlu elemanlar yöntemi ile kıyaslanması ile elastiklik modülünün bulunması planlanmıştır. Ancak model oluşturulması sırasında görülen node yapışması sorunu çözülmediği için sonlu elemanları yöntemi kullanmaktan vazgeçilmiştir. Şekil 3.10.'da bu yöntem için hazırlanmış model görülebilir. Sorunun çözümü olarak MSC Marc® programı yerine Abaqus® programının kullanılması gerektiği görülmüşse de şekillendirme adımı simülasyonlarının MSC Marc® tabanlı Simufact® programında yapılması planlandığı için Abaqus programına geçilmemiştir. Elastik bölgede tekrarlı çekme testleri ile elastiklik modülünün saptanmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.10. Dört Nokta Bükme Testi Sonlu Elemanlar Modeli

Hadde yönüne göre 0° derece ve 90° dereceden çıkarılmış numuneler elastik bölgede ekstansometre kullanılarak yük altında belirli bir gerilme değerine kadar yüklenip ardından bırakılmış, sonra yeniden yüklenmiştir. Tekrarlı çekme testleri sonucunda çıkılan gerilme değerlerine bağlı olarak farklı elastik modüller bulunmuş bu değerlerin ortalaması alınarak simülasyonda kullanılmıştır.

3.1.5. Sürtünme Katsayısı Tespiti

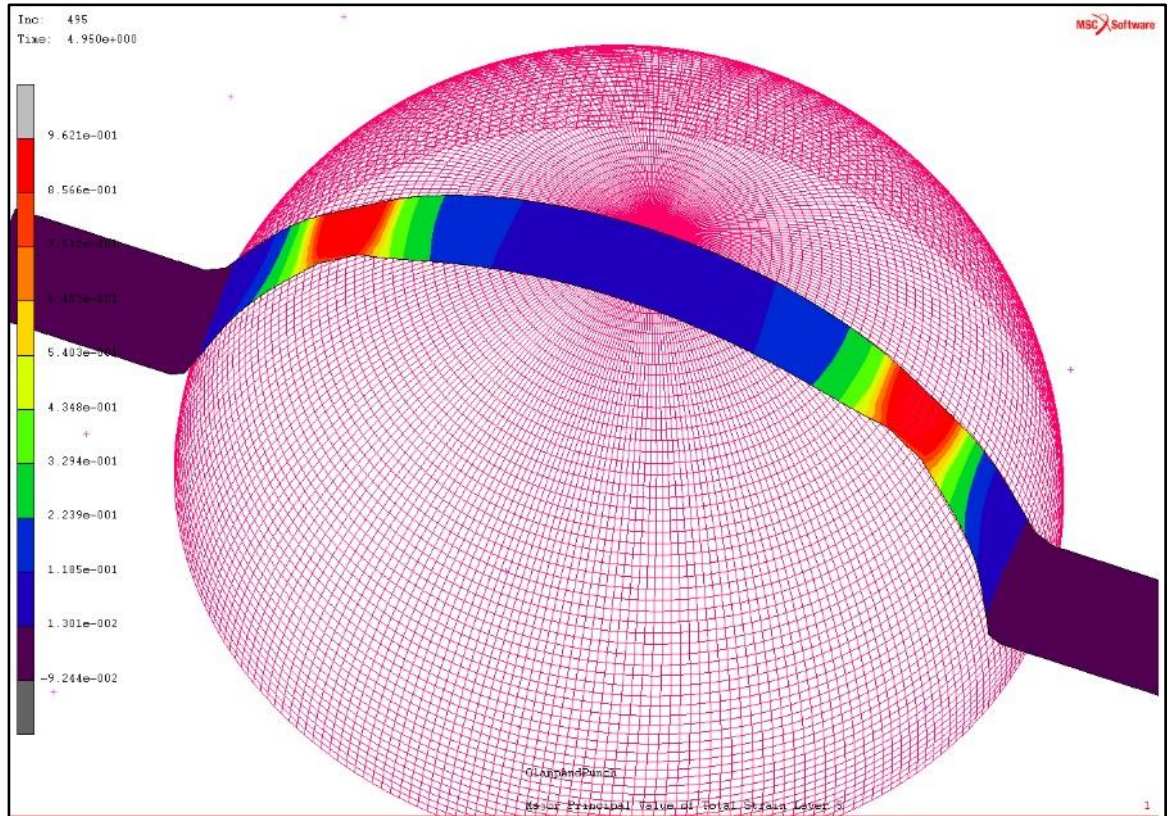
Sürtünme katsayısı Coulomb ve Shear modellerine göre günümüzde bir çok simülasyon programlarına doğrudan eklenebilir, söz konusu modellerin yanında daha karmaşık olan Wanheim-Bay ve Levanov modelleri de ek yazılımlar ile simülasyon programlarına entegre edilebilir [28]. Bu çalışmada ORS’de kullanılan seri üretim kalıpları ile aynı imalat aşamalarından geçmiş yarı küresel bir kalıp (Şekil 3.11.) kullanılmış olup, kalıbın pürüzlülük değerleri seri üretim kalıpları ile kıyaslanmıştır. Üretimde yağlayıcı kullanılmaması sebebiyle test sırasında da herhangi bir yağlayıcı kullanılmamıştır. Yarı küresel kalıp üzerinde bir çekme numunesi HBP600 BUP HBT tezgâhı ile şekillendirilmiştir, gerinimler GOM-ARAMIS-4M optik gerinim ölçüm sistemi ile çıkarılmıştır.

MSC Marc Mentat[®] programında sürtünme katsayısını bulmak için test sistemi modellenmiş, farklı sürtünme katsayılarında şekillendirme gerçekleştirilmiştir. Modelleme sırasında kabuk elemanlar kullanılmış, testte kullanılan çekme testi numunelerinin yarısı

modellenmiştir. Sürtünme testinden elde edilen gerilme-gerinim grafikleri, simülasyon programında Şekil 3.12.'de görüldüğü gibi modellenen test düzeneğinin farklı sürtünme değerleri altında verdiği gerilme-gerinim grafikleri ile kıyaslanmıştır.



Şekil 3.11. Sürtünme Kalıpları

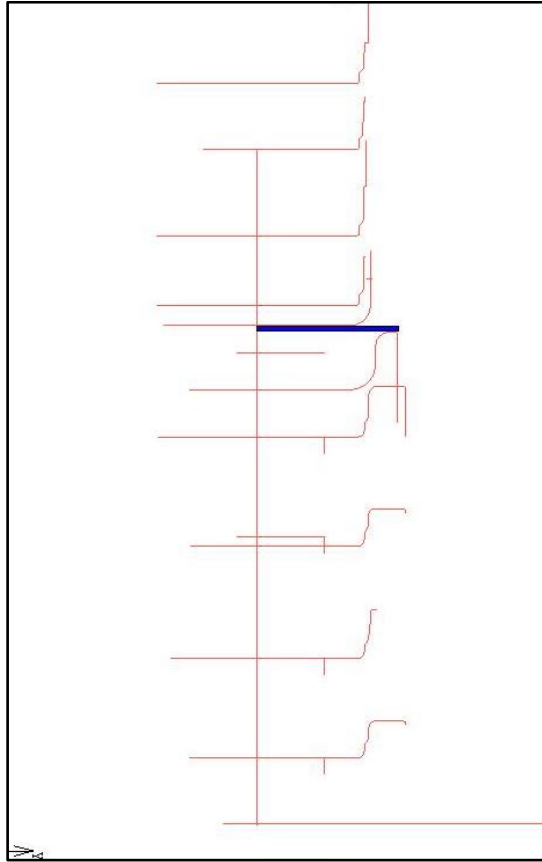


Şekil 3.12. Sürtünme Testi Simülasyon Modeli

3.2. Simülasyon Modeli Oluşturma

Sac bilezikli rulman simülasyon modeli oluşturulmasında özellikle Simufact[®] programının kullanılmasına gayret edilmiştir. Bunun sebebi proje sahibi Ortadoğu Rulman Sanayi A.Ş. bünyesinde Simufact[®] programının bulunmasıdır. Bunun yanında malzemenin belli bölgelerinin sac-kütle şekillendirme koşulunda deformasyona uğradığı düşünüldüğünden, statik implicit doğrusal olmayan bir çözücüyü ihtiyaç olmasıdır. Simufact[®] programı MSC Marc Mentat[®] programının imalat analizleri konusunda özelleştirilmiş halidir ve istenilen koşulları sağlamaktadır.

Simülasyon sırasında rulman bileziklerinin eksenel simetrik olması avantajı kullanılarak eksenel simetrik model kullanılmış, Element Tip 10; iki boyutlu, dört node'lu (quad), isoparametrik, dört integrasyonlu elemanlar kalınlık boyunca yerleştirilmiştir [29]. Kalınlıkta en az dokuz eleman olması durumunda, kalınlığa gelen deformasyonun hesaplanmasından oluşabilecek hataların optimum seviyede kalacağı yapılan simülasyon modeli denemeleriyle belirlenmiştir. Modelin genel görünüşü Şekil 3.13.'de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.13. Sac Bilezik Simülasyon Modeli

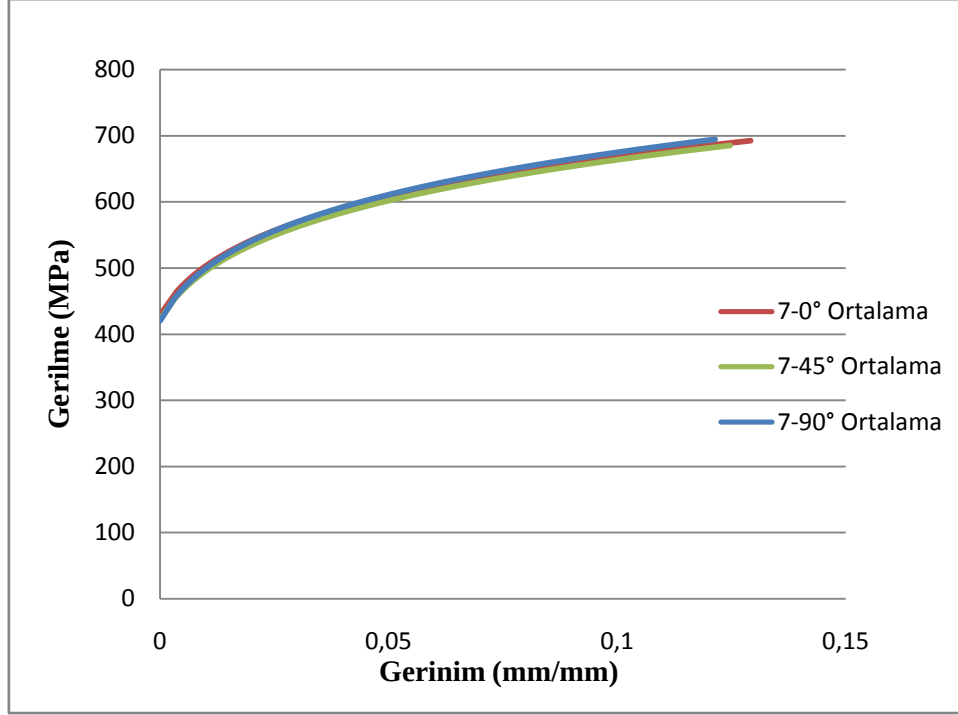
Model hazırlanmasında kalıp formları rijit olarak modellenen çizgilerdir, Şekil 3.13.'de görülen modelde üst üste altı dişi ve erkek kalıp kullanılmıştır. Her erkek kalıp için bir basma istasyonu tanımlanmış ve basma sabit dişi kalıp içerisine doğru gerçekleştirilmiştir. Kalıplar gerçekte krank preslere bağlı olarak çalışmaktadırlar, krank presin parametreleri değil sadece kalıp hareket hızı modellenmiştir. Krank dönüş hızına göre pres tabla hareket hızı 300 mm'lik şekillendirme mesafesini 2 saniyelik sürede alacak şekilde hesaplanmıştır, bu dakikada 30-35 parçalık üretim hızına denktir. Her kalıbın hareket mesafesi krank preslerde aynıdır, şekillendirme mesafesini ayarlamak için yükseltme plakaları kullanılır. Simülasyonda ise her kalıbın hareket mesafesi hassas olarak belirlenebildiğinden şekillendirme mesafelerine göre hareket mesafeleri ayarlanmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

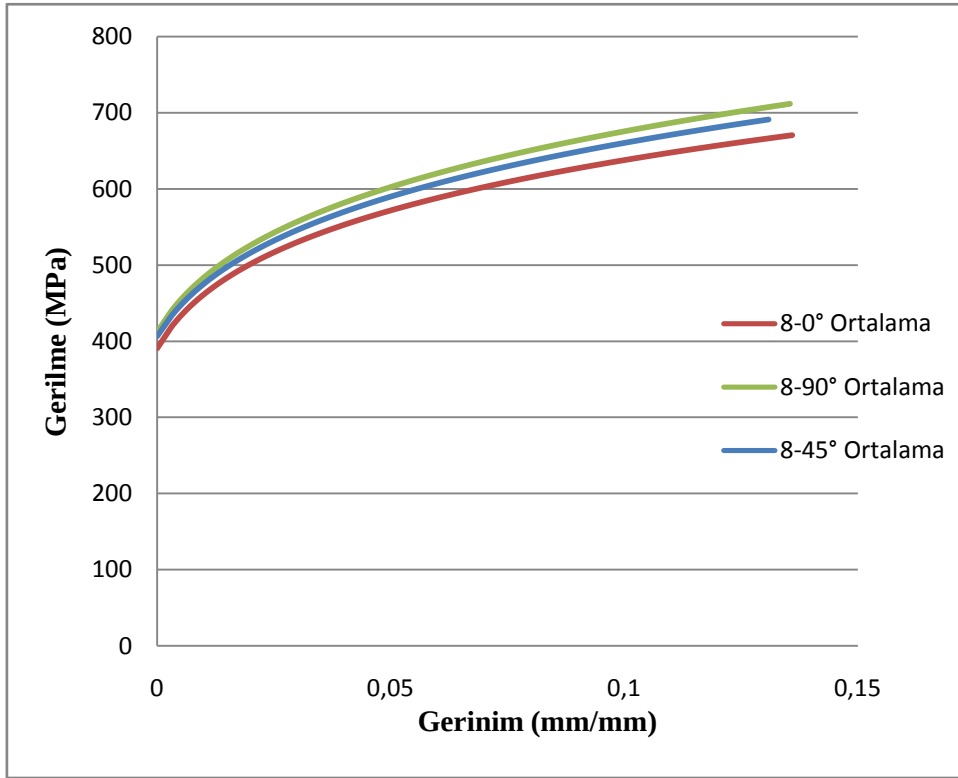
4.1. Çekme Testi Sonuçları Analizi

Çekme testi sonuçları üzerinde, malzemenin plastik eğrisini Ludwik bağıntısı ile tanımlamak için plastik eğri verisi üzerinden Excel programı optimizasyon programı kullanılmıştır. İlk simülasyonlar söz konusu Ludwik bağıntısı ile başlatılmıştır. Malzemelerin plastik bölge verileri her test için analiz edilmiş ve Ludwik bağıntısına göre ortalama plastik şekillendirme parametreleri çıkarılmıştır, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de malzemelerin plastik eğrileri görülebilir.

Bu bağıntıda malzemenin plastik eğrisi anizotropi etkisi olmaksızın modellenmeye çalışılmış olup, denklem (10), (11) ve (12)’de açıklanan K , ϵ , n parametreleri Microsoft Excell programında, gerçek gerilme-gerinim grafiğinin her bir verisi ile oluşturduğu hatanın karesini en aza indirgeyecek şekilde çözücü eklentisi kullanılarak çıkarılmıştır.



Şekil 4.1. Malzeme 7 Çekme Testi Ortalama Plastik Eğriler



Şekil 4.2. Malzeme 8 Çekme Testi Ortalama Plastik Eğriler

Malzeme 7 ve 8 için çıkarılan Ludwick-Swift bağıntısı parametreleri, Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.'de görülebilir. Burada ϵ_0 değeri ilk başlangıç gerinimini ifade eder, ϵ değeri testten elde edilen gerçek gerinimler olarak ϵ_0 değerine eklenir. Çizelge 4.1.'de görülebilen

bir diğ er parametre r 'dir. R parametresi anizotropi ifadesi olarak denklem (6)'da açıklandığı şekilde her bir çekme testi için çıkarılmıştır.

Çizelge 4.1. Malzeme 7 için Ludwick Hollomon Bağ ınt ı Parametreleri

$\sigma = K \times (\epsilon_0 + \epsilon)^n$	K	ϵ_0	n	r
Malzeme 7_0 ort.	920,9710	0,004930	0,147295	0,838074
Malzeme 7_45 ort.	944,7822	0,005643	0,154863	1,063125
Malzeme 7_90 ort.	959,8962	0,004956	0,155401	1,217875
Malzeme 7 ortalama	941,8831	0,005177	0,152520	

Çizelge 4.2. Malzeme 8 için Ludwick-Hollomon Bağ ınt ı Parametreleri

$\sigma = K \times (\epsilon_0 + \epsilon)^n$	K	ϵ_0	n	r
Malzeme 8_0 ort.	917,1706	0,003197	0,160203	0,822594
Malzeme 8_45 ort.	963,1242	0,003734	0,166623	1,073968
Malzeme 8_90 ort.	991,5996	0,003912	0,169761	1,146184
Malzeme 8 ortalama	957,2981	0,003614	0,165529	

Malzemenin anisotropisi genişlik ekstansometresi ile alınan veri üzerinden hesaplanmış ve 0-45-90 derecedeki çekme numunelerine göre düzenlenmiştir.

Malzemelerin r değerleri hesaplandığında;

Malzeme 7 için Düzlemsel Anisotropi Denklem (4)'e göre $\Delta r = -0,0351505$

Malzeme 7 için Normal Anisotropi, denklem (5)'e göre $r_n = 1,04555$

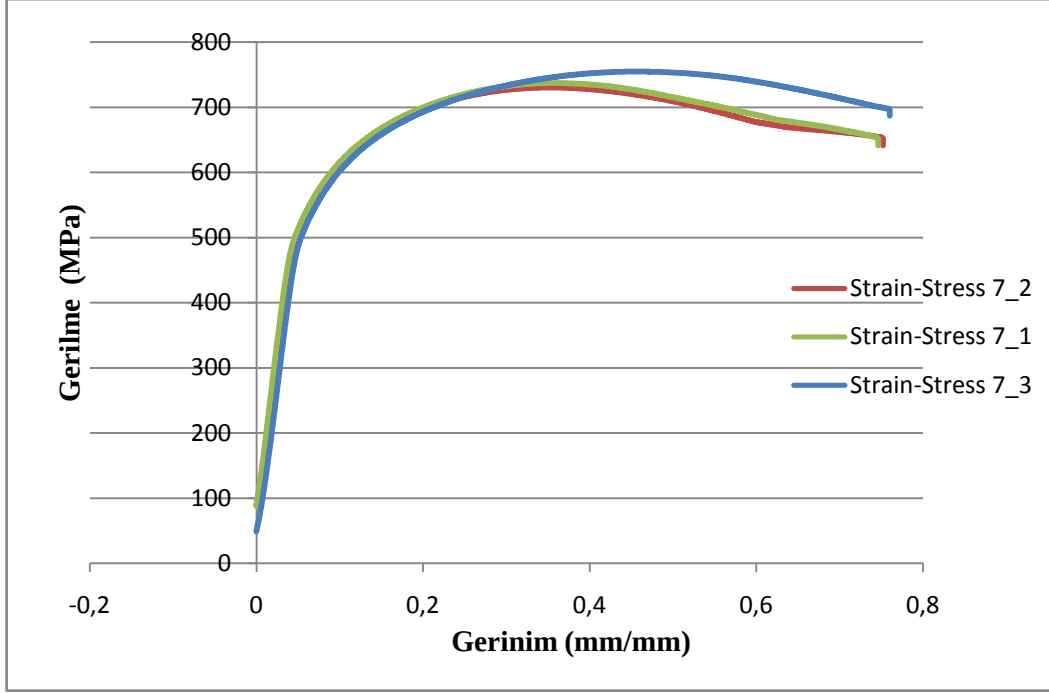
Malzeme 8 için Düzlemsel Anisotropi denklem (4)'e göre $\Delta r = -0,08958$

Malzeme 8 için Normal Anisotropi denklem (5)'e göre $r_n = 1,029179$

Rulman üretiminde eksenel simetrik parça üretimi söz konusu olduğundan, malzemenin kulaklanma ve kırışık hataları oluşturmamasını yanı sıra farklı eksenlerde farklı dayanım göstermesinin rulman çalışmasını etkileyeceği bilindiğinden, üretici firmadan $r_n = 1$ olacak şekilde malzeme talep edilmiştir. Malzeme testlerinden elde edilen yukarıdaki sonuçlar malzemelerin isotropik olarak modellenmesinin uygun olduğunu göstermektedir.

4.2. Pul Basma Testi Sonuçları Analizi

Pul basma testlerinden alınan kuvvet-deplasman grafikleri gerçek gerilme-gerinim grafiklerine dönüştürülmüştür. Şekil 4.3.'de pul basma testi gerilme-gerinim grafikleri görülebilir.

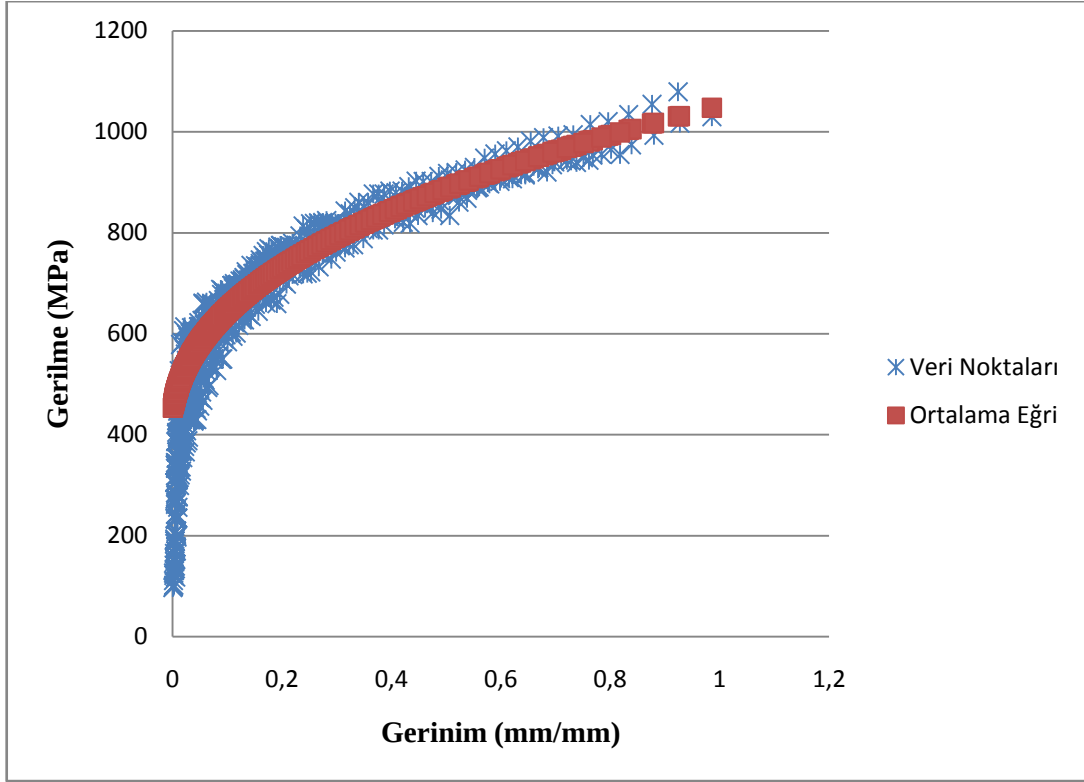


Şekil 4.3. Malzeme 7 Pul Basma Gerçek Gerilme-Gerinim Grafikleri

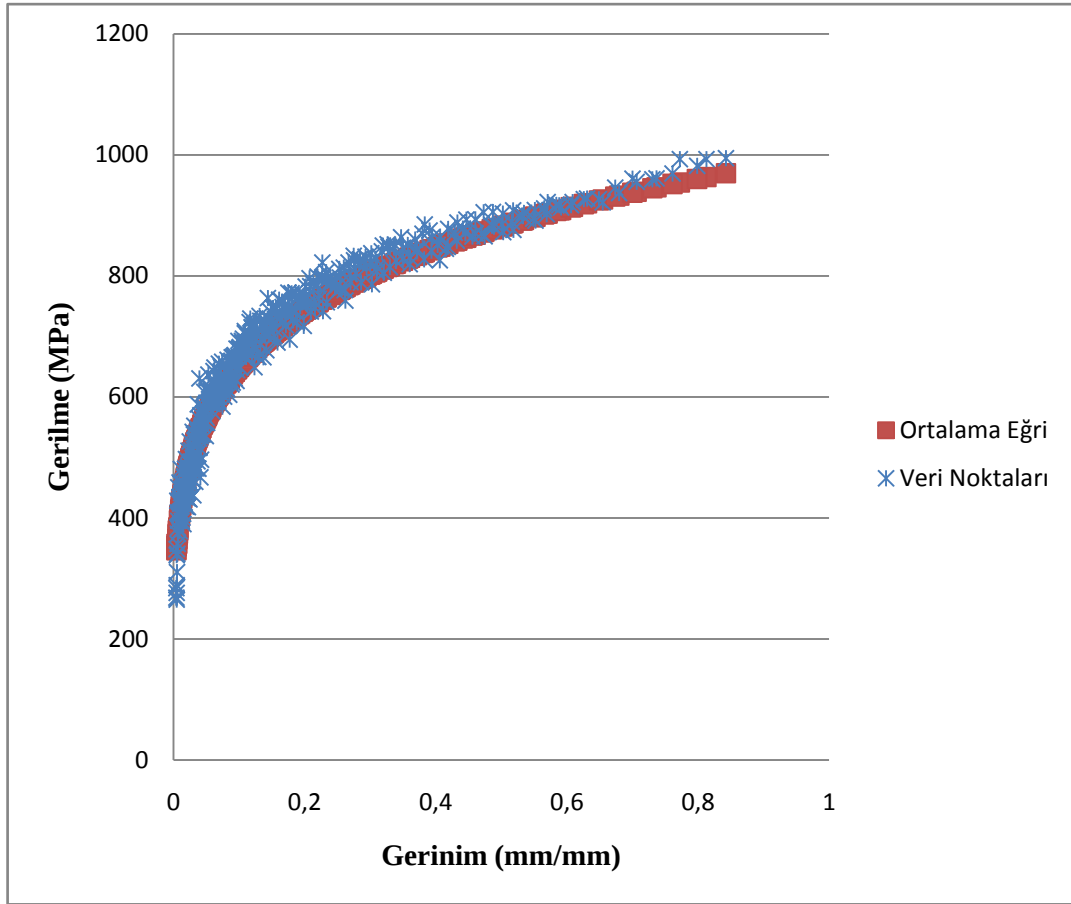
Malzeme 7'ye ait Pul Basma Testi sonuçları incelendiğinde, malzemenin kaydığı görülmektedir, yapılan üç testten ikisinde pullar aynı kuvvet değerinde kayarak birbirlerinden ayrılmışlar veya yalnız ortadaki pullar şekillenmiş ancak kalıba temas eden pullar şekillenmemiştir [11]. Yine her üç gerçek gerilme-gerinim grafiğinde görüldüğü üzere grafik aşağı yönlü sona ermektedir, gerçek gerilme gerinim grafiklerinde bu durum gözlenmez [9].

4.3. Hidrolik Şişirme Testi Sonuçlarının Analizi

Hidrolik şişirme testinde optik yöntemlerle gerinim analizi yapılan test numunelerinden elde edilen gerçek gerilme-gerinim grafikleri çekme testinden elde edilen gerçek gerilme gerinim grafikleri ile Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Daha sonra söz konusu ortalama eğri doğrudan çekme testi ortalama eğrileri ile karşılaştırılarak malzeme modelinin oluşturulması için kullanılacaktır.



Şekil 4.4. Hidrolik Şişirme Testi Verilerine Göre Ortalama Plastik Eğri



Şekil 4.5. Malzeme 8 için Hidrolik Şişirme Testi Verilerine Göre Ortalama Plastik Eğri

4.4. Elastiklik Modülünün Bulunması

Elastik bölgede tekrarlı çekme testleri yapılarak elastik modülün bulunması sağlanmıştır. Elastik Modül bilgileri Çizelge 4.3 ve 4.4’de görülebilir.

Çizelge 4.3. Malzeme 8 için Elastiklik Modülü

Malzeme 8 Hadde Yönüne Göre 0° Derece		Malzeme 8 Hadde Yönüne Göre 90° Derece	
Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastik Modül (Gpa)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastik Modül (GPa)
168,7	162,2	168,65	190,90
168,36	192,5	169,69	206,70
169,69	193,0	168,65	205,60

169,71	193,4	168,68	208,70
168,78	193,5	168,72	208,00
303,55	191,3	235,99	196,80
303,67	193,2	236,07	209,20
303,69	193,4	236,18	208,90
Ortalama E	192,9	Ortalama E	206,63

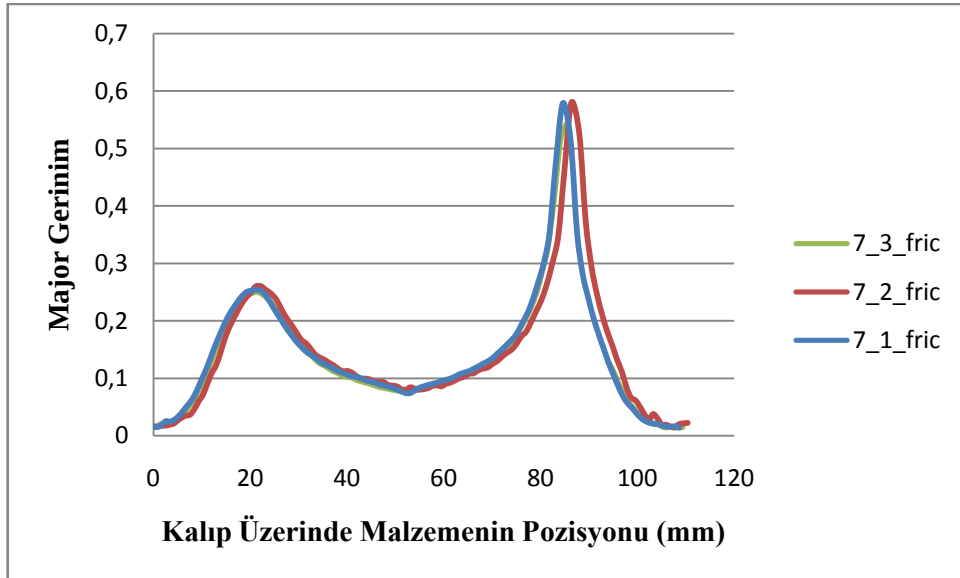
Çizelge 4.4. Malzeme7 için Elastiklik Modülü

Malzeme 7 Hadde Yönüne Göre 0 ° Derece		Malzeme 7 Hadde Yönüne Göre 90 ° Derece	
Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastik Modül (Gpa)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastik Modül (GPa)
163,3	156,9	164,13	201,8
163,37	188,1	164,15	201,9
163,37	188,2	164,11	208,3
163,44	187,3	164,21	209,7
163,44	187,5	164,18	209
163,43	160,5	164,19	206,8
261,45	185,1	262,66	186,4
261,39	185,4	262,59	205,4
Ortalama E	183,83	Ortalama E	203,75

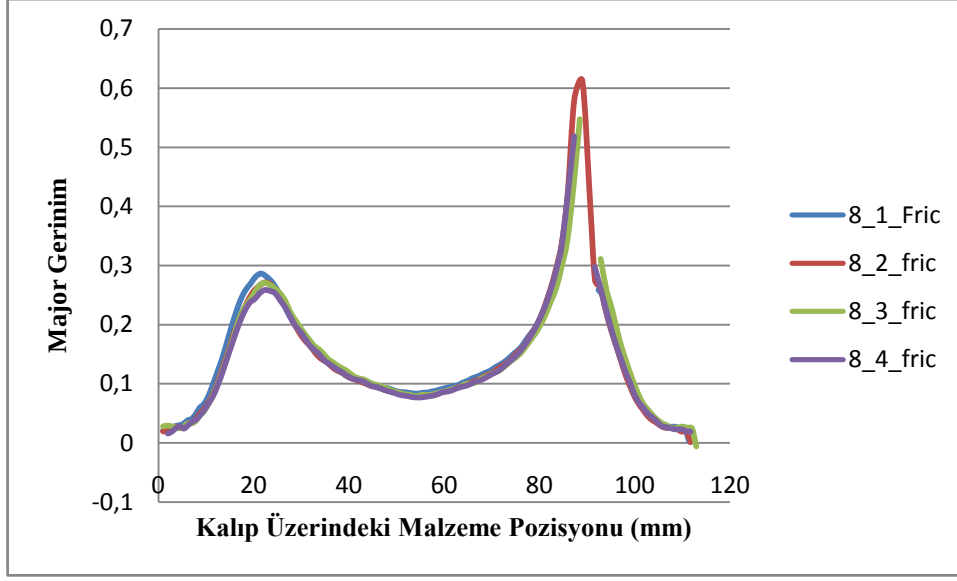
Bu testlerin sonuçlarına göre Malzeme 7 için elastiklik modülü 195 GPa, Malzeme 8 için elastiklik modülü 200 GPa olarak alınmıştır.

4.5. Sürtünme Testi

Sürtünme deneyinde malzeme yarı küresel kalıp üzerinde şekillendirilmiş, sürtünmenin kırıl noktasına etkisi bilindiğinden, gerinimler Aramis dijital görüntü işleme programı ile tespit edilmiştir. Simülasyon programında kabuk elemanlar ile modellenen test düzeneğinde 0,01 Coulomb sürtünme katsayısından başlayarak yapılan analizlerde elde edilen gerinim-pozisyon eğrilerinin kıyaslanması ile sürtünme katsayısı yakınsanmıştır. Testlerden elde edilen veriler Şekil 4.6. ve 4.7.'de görülebilir.

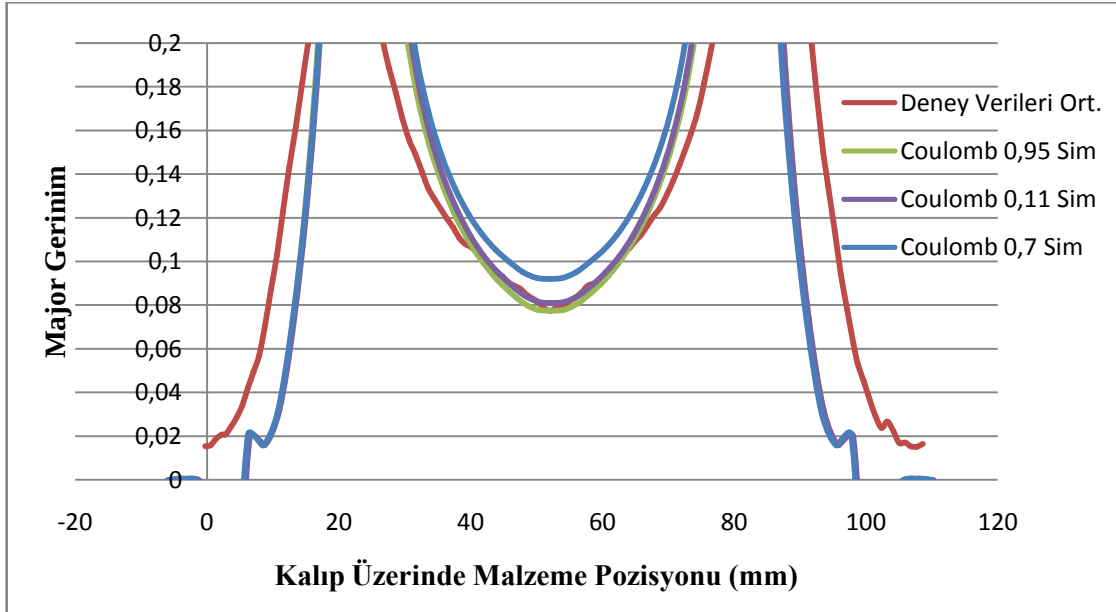


Şekil 4.6. Malzeme 7 İçin Sürtünme Testi Gerinim Pozisyonu Verileri

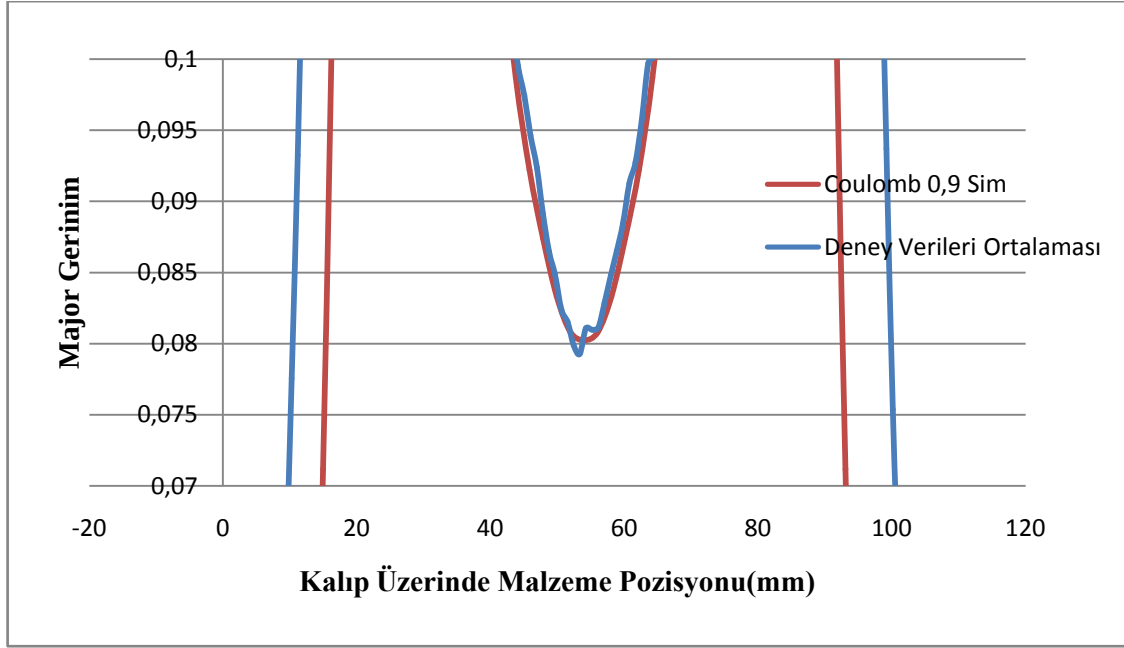


Şekil 4.7. Malzeme 8 için Sürtünme Testi Pozisyonu Verileri

Deneyden elde edilen gerinim-poziyon eğrilerinin ortalamaları alınarak simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır. Buna göre malzeme 7 ve 8 için çakışma grafikleri Şekil 4.8 ve 4.9’da görülebilir.



Şekil 4.8. Malzeme 7 için Coulomb 0,11 ile yapılan simülasyonun testler ile karşılaştırılması



Şekil 4.9. Malzeme 8 için Coulomb 0,9 ile yapılan simülasyonun testler ile karşılaştırılması

Bu sayede simülasyon programının üretim kalıplarında da benzer yakınsama ile çalışabileceği sürtünme değeri olan malzeme 7 için 0,11, malzeme 8 için 0,9 Coulomb sürtünme katsayısı bulunmuştur.

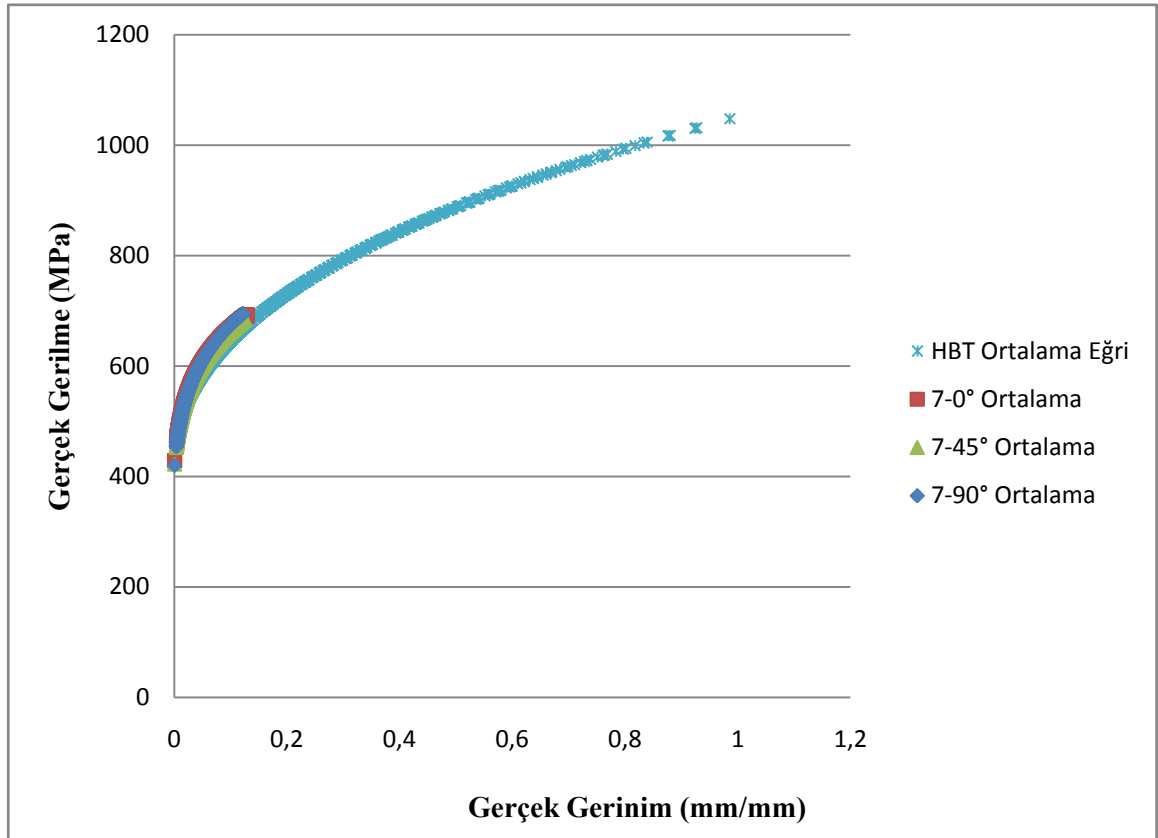
Malzeme 7'nin daha yüksek sürtünme göstermesi ilk deney testlerinin malzeme 7 ile yapılması dolayısıyla kalıp yüzeyi pürüzlülüğünün testler sırasında azalması olabileceği gibi, malzeme 7'nin kendi pürüzlülüğü malzeme 8'e göre fazla da olabilir. Bu noktadan sonra yüksek sürtünme gösteren malzeme 7 ile devam edilmiş olup, simülasyonlar malzeme 7 verileri ile yapılmıştır.

5. MALZEME MODELİNİN OLUŞTURULMASI VE SİMÜLASYONA EKLENMESİ

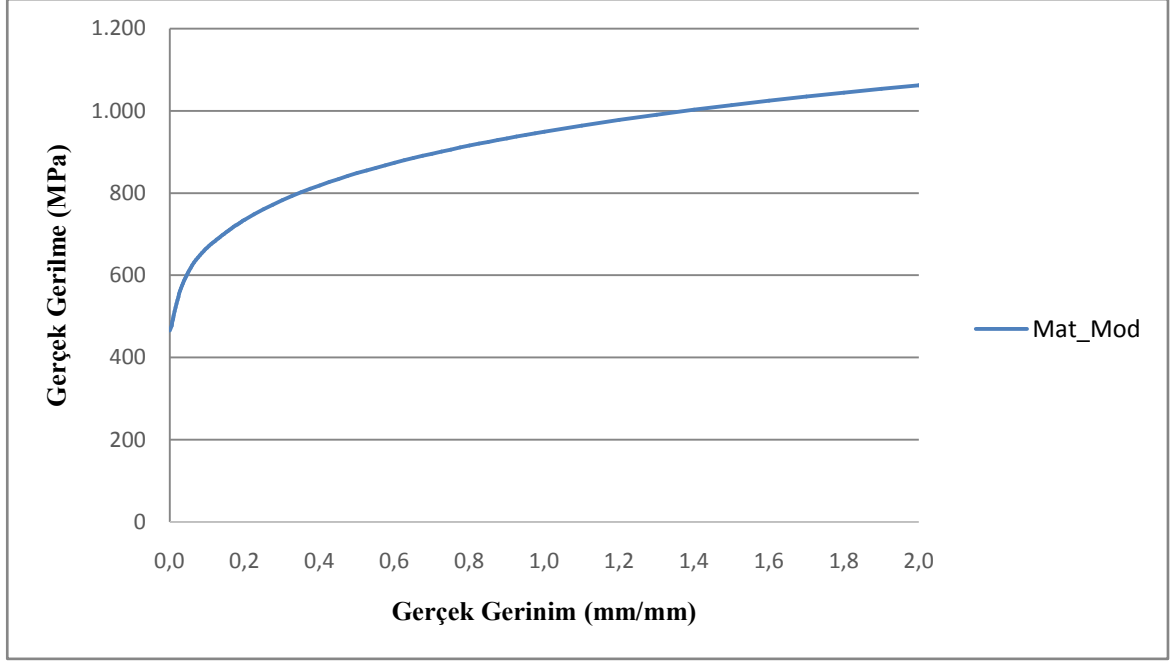
5.1. Malzeme Modelinin Oluşturulması

Testler ile bulunan malzeme verilerinden elastik malzeme davranışı doğrudan elastik modülü girilerek tanımlanmış, akma davranışı ise malzemenin tam izotropik kabul edilebilmesi sebebiyle Von Misses akma kriteri olarak seçilmiştir.

Malzemenin plastik davranışı doğrudan malzeme testlerinden alınmıştır. Simufact programı malzeme verisinin doğrudan atanmasına izin vermektedir. Burada kullanılan yapı, çekme testlerinden elde edilen plastik eğri üzerinde Şekil 5.1.'deki gibi çakıştırılan HBT plastik eğrisinin bir kılavuz olarak kullanılması ile elde edilmiştir. Buna göre 0,8-1 gerinim değerlerine kadar belirlenen plastik eğri daha sonra Şekil 5.2.'de görüleceği gibi 2 gerinim değerine kadar extrapolasyon ile uzatılmıştır.



Şekil 5.1. Plastik Ortalama Eğrilerin Çakıştırılması

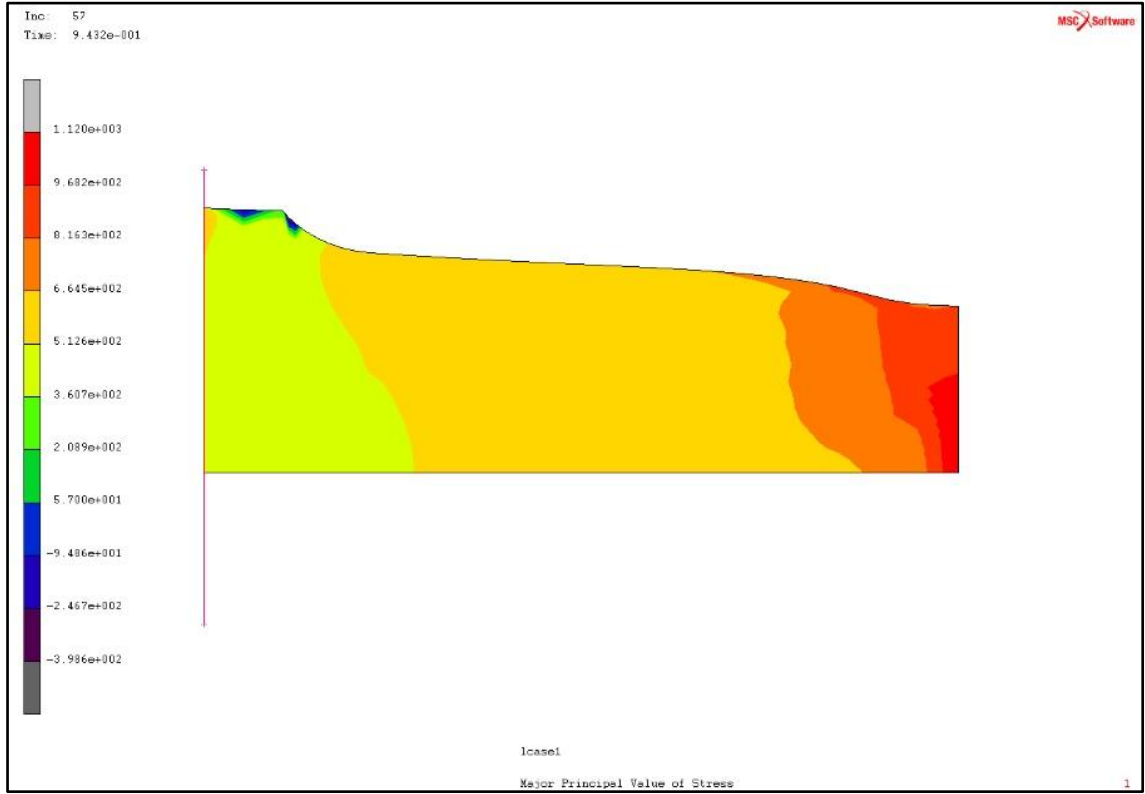


Şekil 5.2. Birleştirilmiş Ortalama Eğrilerin 2 Gerinim’e Kadar Uzatılması

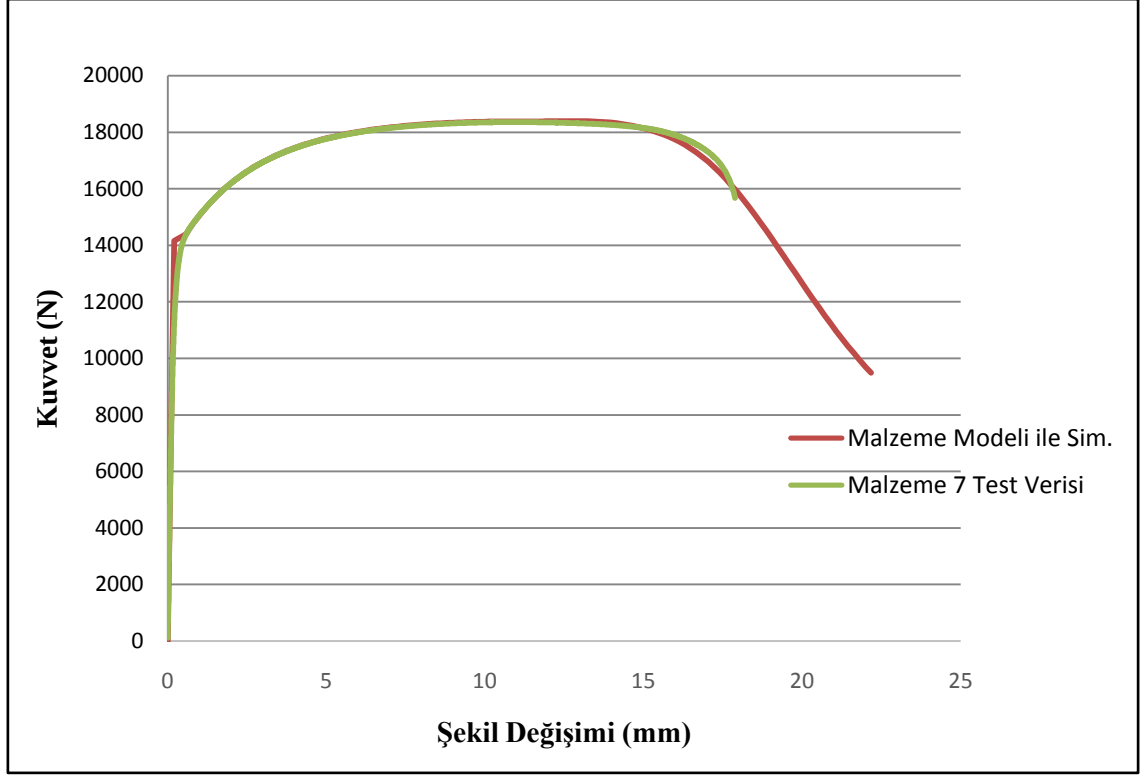
Gerinim değerleri 2’ye kadar (%200) uzatılmış olan malzemenin gerçek malzeme ile aynı davranışı gösterip göstermediğini anlamak ve simülasyon programındaki hasar parametreleri ile tekrarlı simülasyonlar yaparak uygun hasar modelini bulmak için geniş çekme testleri yapılmıştır. Geniş çekme numuneleri ile çekme testi yapılmış, sonlu elemanlar yöntemi ile malzeme modelinin uygunluğu test edilmiştir. Geniş çekme numuneleri Şekil 5.3.’de ve simülasyon modeli Şekil 5.4’de, simülasyon ile çekme testi sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.5.’de görülebilir.



Şekil 5.3. Geniş Çekme Testi Numuneleri

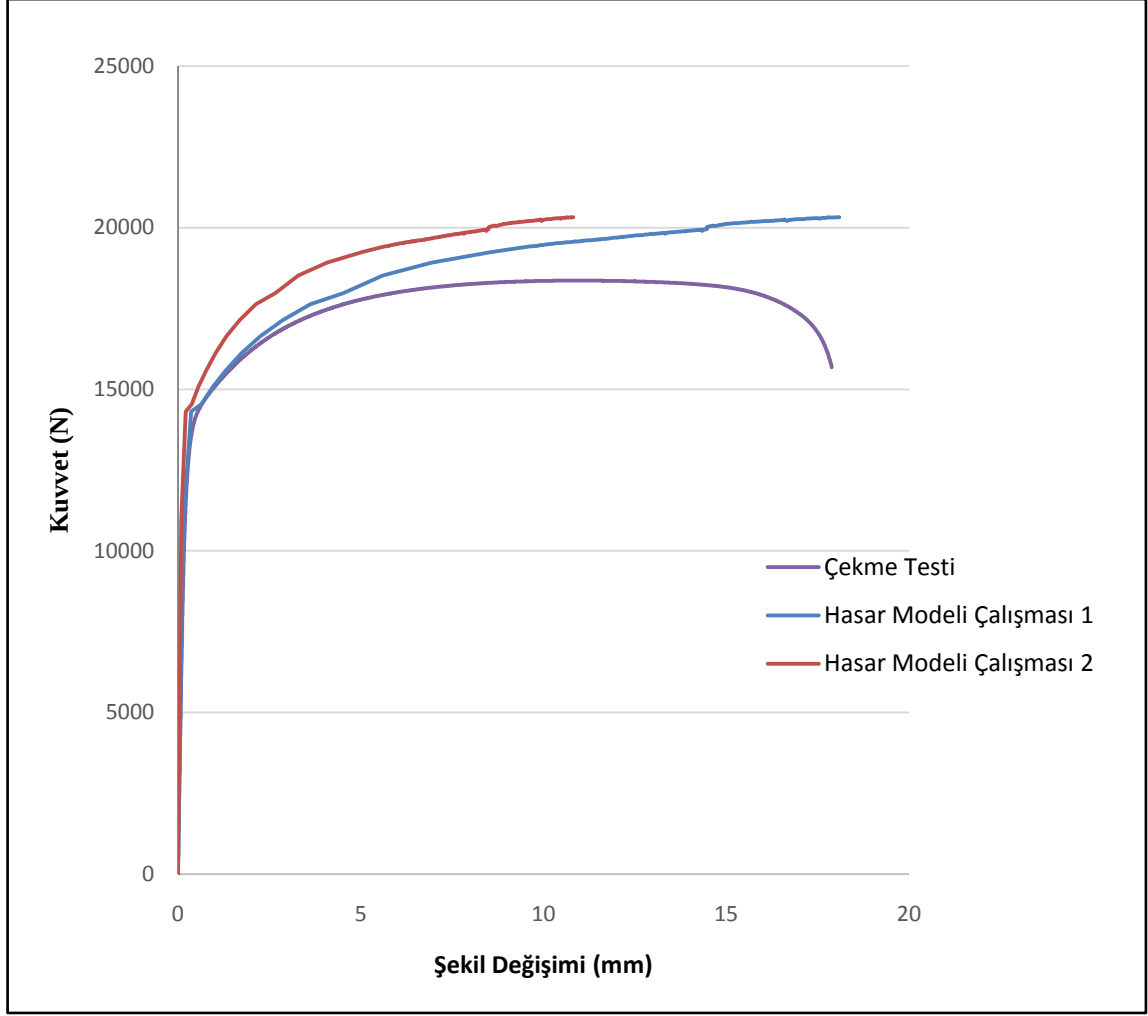


Şekil 5.4. Geniş Çekme Simülasyon Modeli



Şekil 5.5. Malzeme 7 için Geniş Çekme Testleri ve Simülasyon Kuvvet-Şekil Değişimi Karşılaştırması

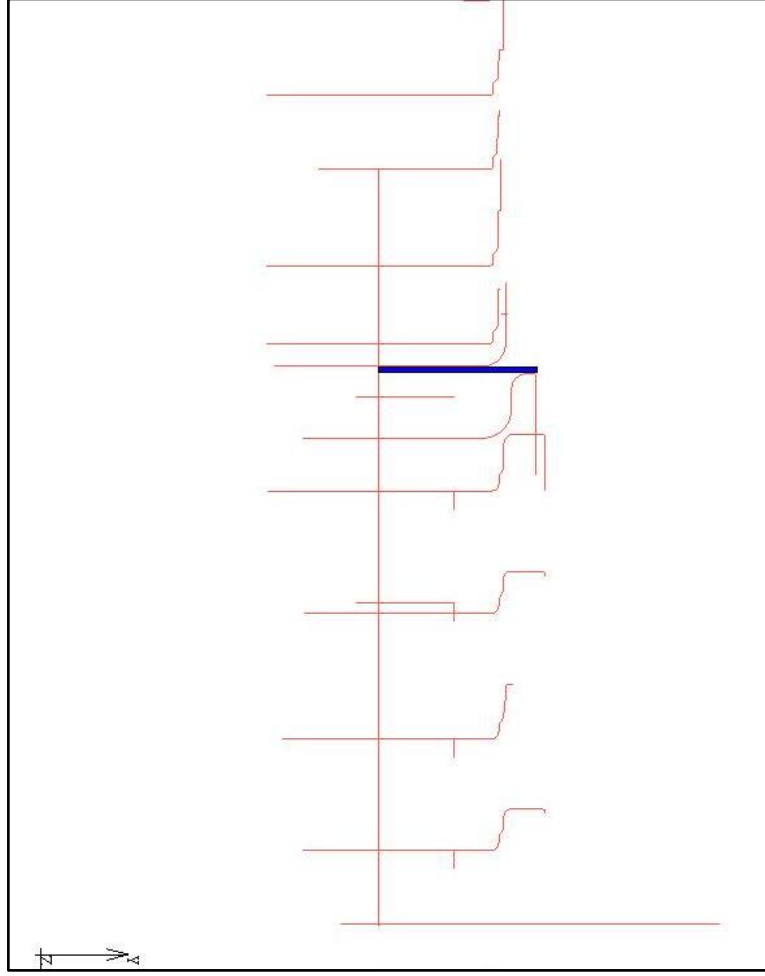
Malzeme modeline farklı hasar katsayıları eklendiğinde Şekil 5.6.'da görülebileceği gibi simülasyonun kuvvet deplasman eğrileri çekme testinden elde edilen eğrilerden sapmaktadır. Bu sebeple hasar modelleri kullanılmamış, malzeme modeli kullanılarak gerilme-gerinim kıyaslaması yapılmıştır.



Şekil 5.6. Hasar Parametreleri ile Yapılan Simülasyonların Çekme Testleri ile Karşılaştırılması

5.2. Simülasyon Modeline Malzeme Modelinin Eklenmesi

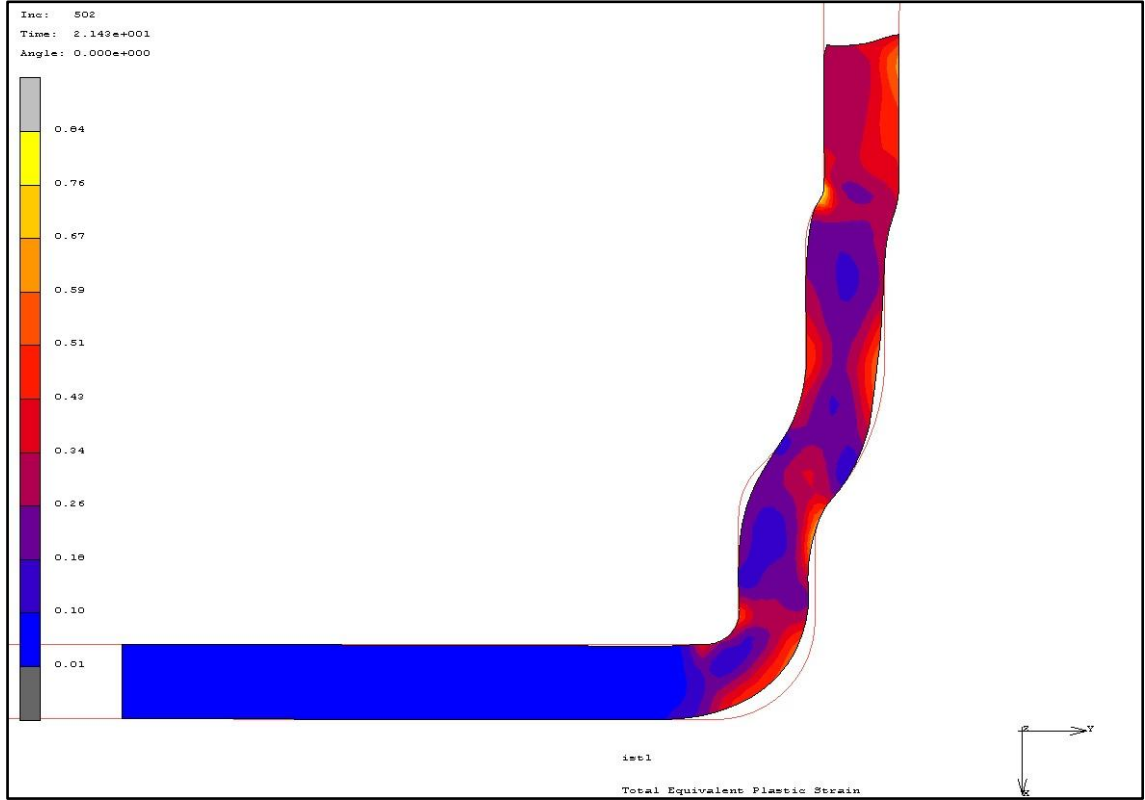
Rulman bileziklerinin özellikle dar toleranslara ulaşabilmesi için malzemenin kalınlık ekseninde de ezilmesi gerektiği görülmüştür. Rulman bilezikleri aksel simetrik olmaları ve malzemenin izotropik olarak modellenebileceğinin malzeme testlerinden anlaşılması üzerinde ticari Simufact[®] programı üzerinde Şekil 5.7.'de görülen aksel simetrik model oluşturulmuştur. Şekil 5.7.'de dik çizgi simülasyon eksenidir.



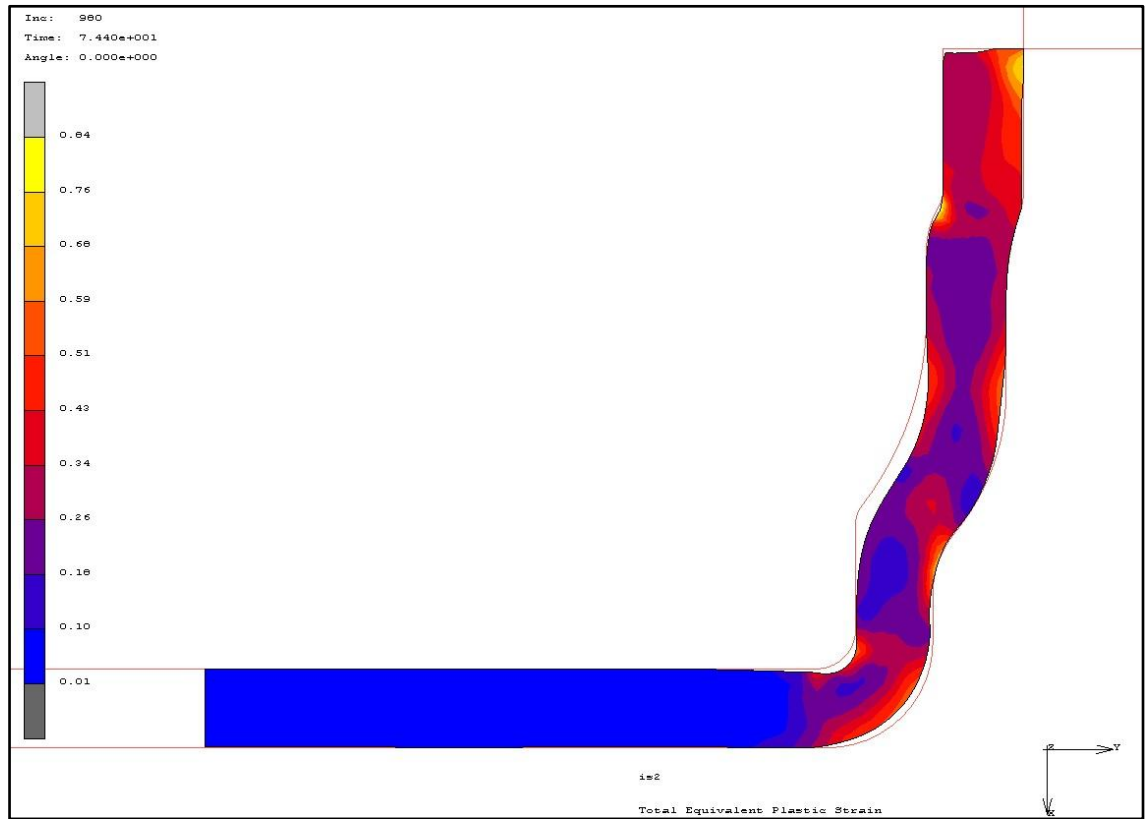
Şekil 5.7. Yeni Kalıp 1 Modelin Oluşturulması

6. SİMÜLASYONLAR

Eski kalıba ait imalat süreci iki şekillendirme adımı içermektedir. Bu süreç geçmişte Simufact programı ile modellenmiş olduğundan malzeme modeli bu simülasyon modeline girilmiştir. Bu sayede eski kalıptaki Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.'de görülen adımların incelenmesi ve sonuçta oluşan hasara yol açabilecek şekillendirme problemlerinin saptanması planlanmıştır.

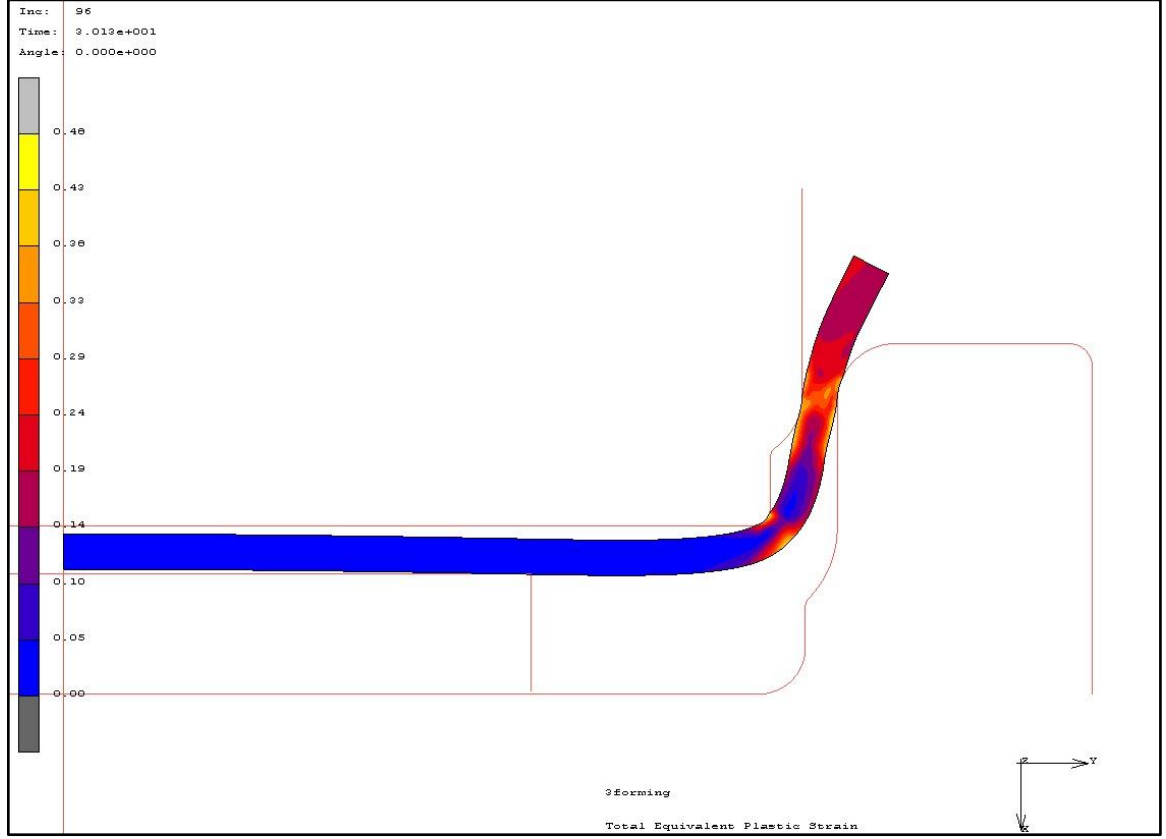


Şekil 6.1. Eski Kalıp İlk Şekillendirme Adımı

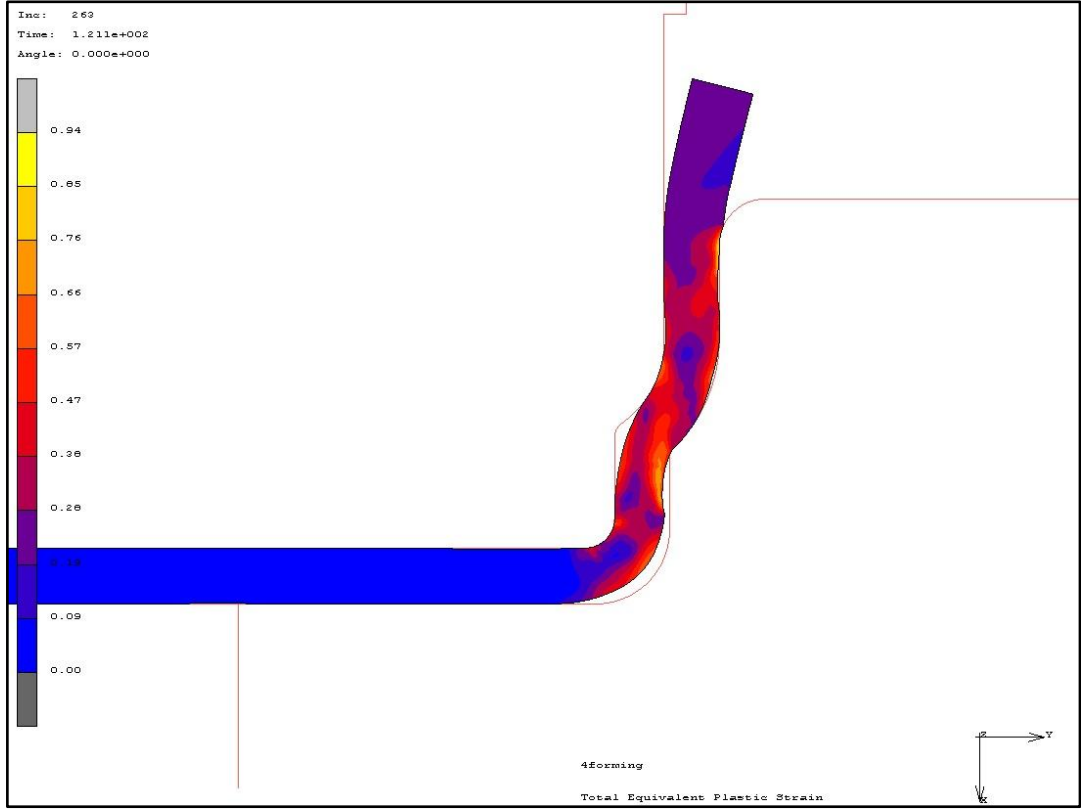


Şekil 6.2. Eski Kalıp Son Şekillendirme Adımı

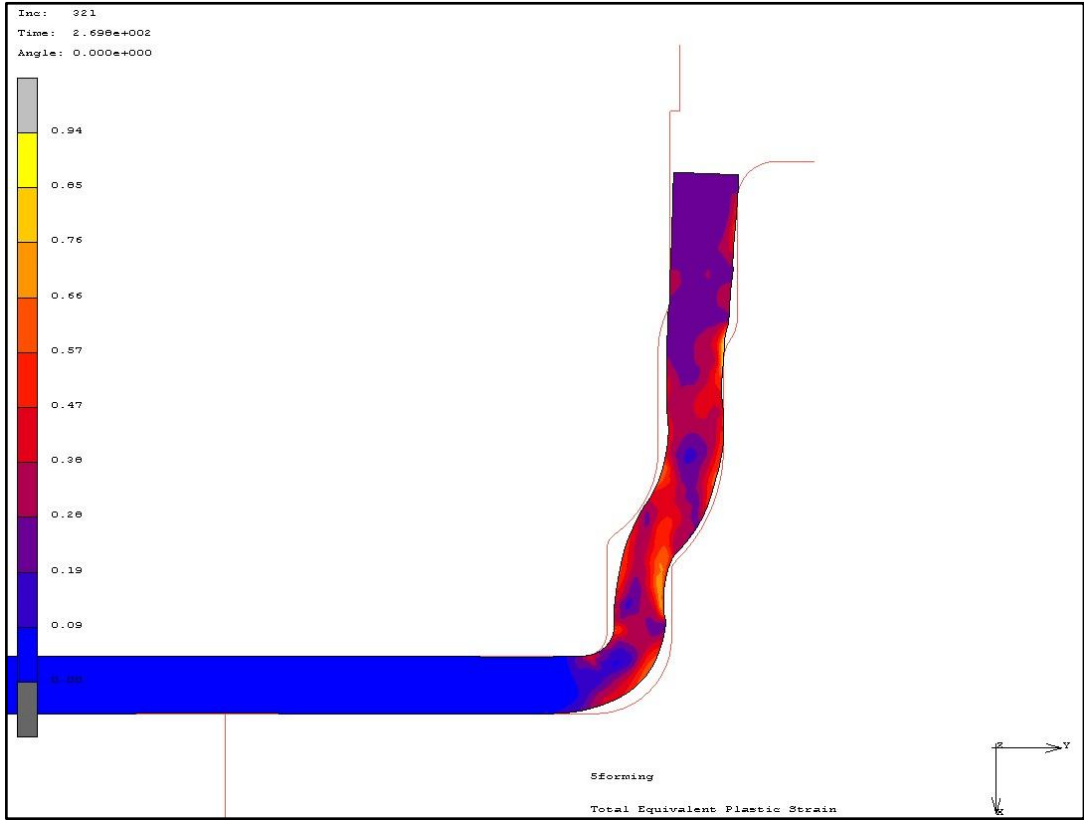
Yeni kalıplar tasarlanırken iki farklı yol ile iki yeni kalıp tasarımı planlanmıştır. Bunlardan birincisi Ortadoğu Rulman Sanayi A.Ş. kalıp tasarımcılarının da yardımı ile ortaya çıkarılan Yeni Kalıp 1 formudur. Bu formda esas amaç malzemenin her adımda tek bir tür gerilmeye maruz kalmasını sağlamaktır. Yeni Kalıp 1 şekillendirme adımları Şekil 6.3., Şekil 6.4., Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.'da görülebilir.



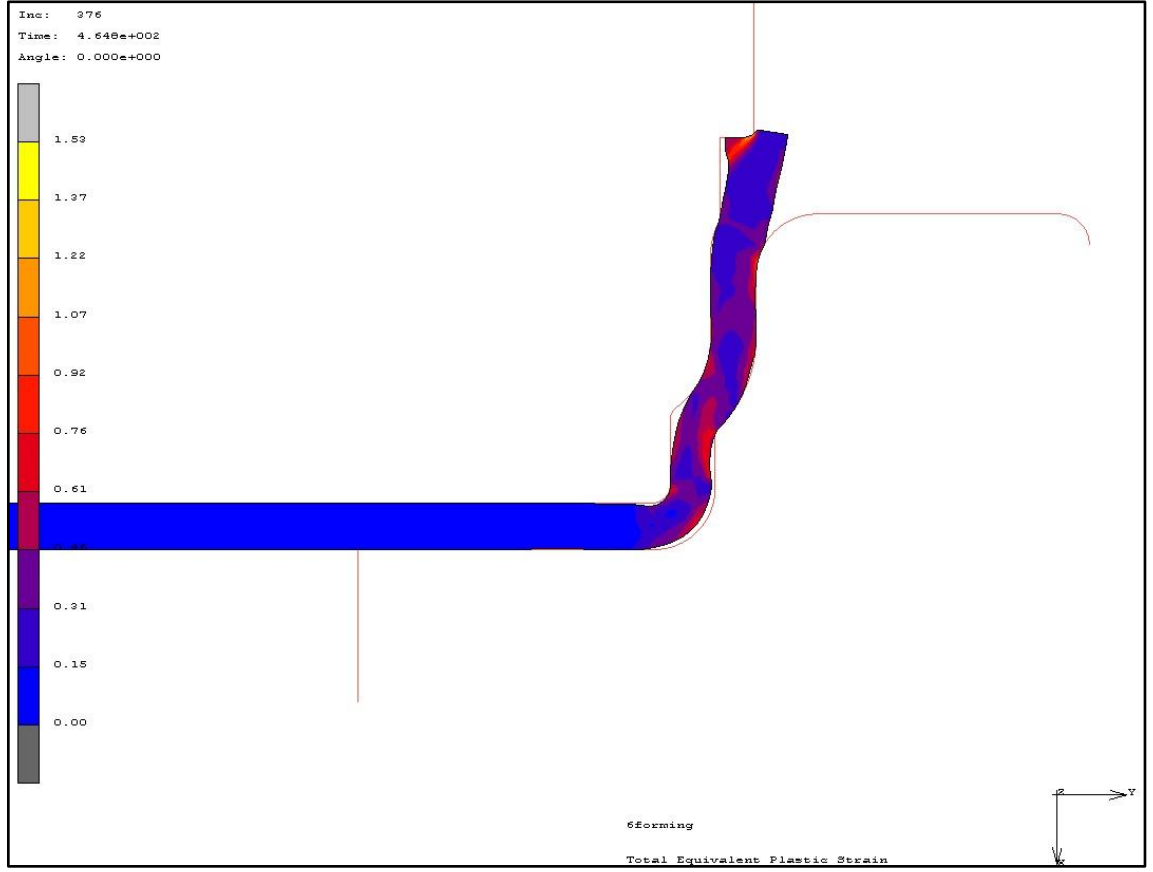
Şekil 6.3. Yeni Kalıp 1 Şekillendirme Adımları 1. Adım



Şekil 6.4. Yeni Kalıp 1 Şekillendirme Adımları 2. Adım

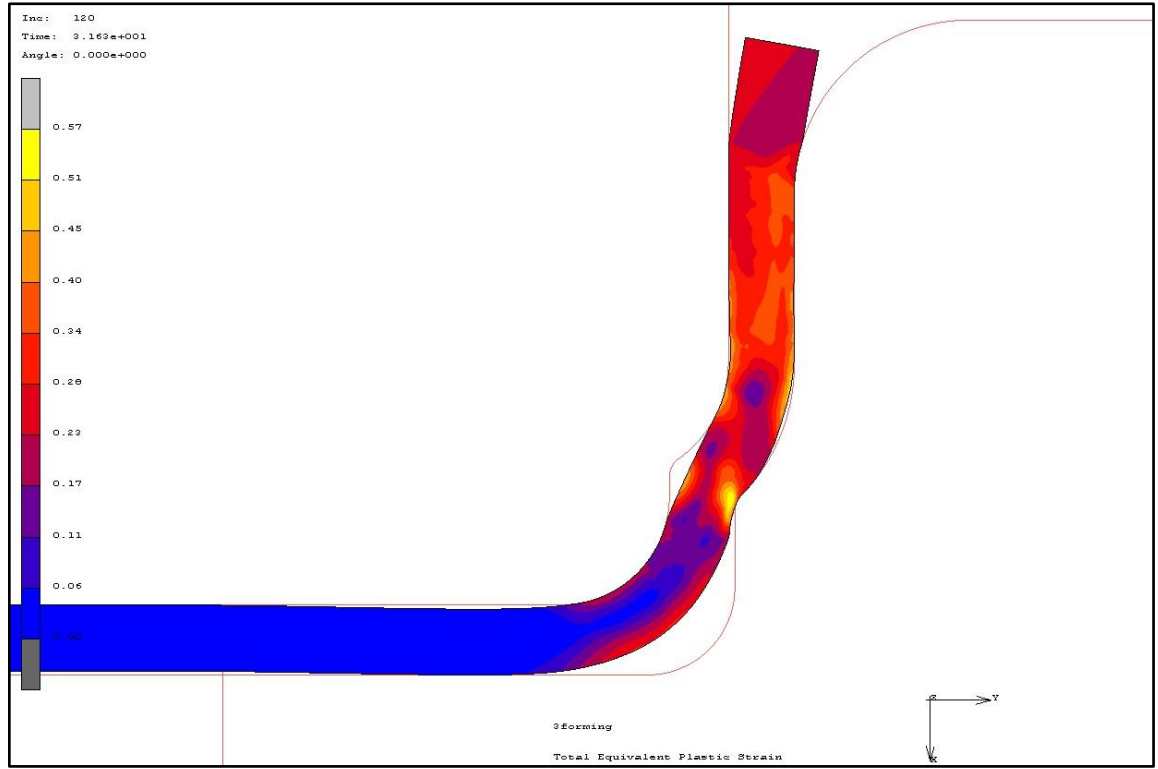


Şekil 6.5. Yeni Kalıp 1 Şekillendirme Adımları 3. Adım



Şekil 6.6. Yeni Kalıp 1 Şekillendirme Adımları 4. Adım

İkinci kalıp tasarımı ise Yeni Kalıp 2 adıyla denenmiş olup, malzemenin şekillendirilmesine büyük büküm yarıçapları ile başlanmış ve giderek her adımda toleranslar daraltılarak son form elde edilmiştir. Yeni Kalıp 2 için üçüncü istasyonda gerilmeleri düşürmek adına eğimli bir form denenmiştir. Bu form gerçek kalıp üretiminde konik bir kalıp imalatı anlamına geldiği için oldukça zor olsa da simülasyonda bu şekildeki değişimlerin etkisinin olup olmadığı incelenmiştir. Her ne kadar kalıp eğimi değiştirilmiş olsa da sonrasında malzeme yeniden 90 derecelik eğime şekillendirildiği için büyük bir değişiklik görülmemiştir. Yeni Kalıp 2'nin şekillendirme adımları Şekil 6.7., Şekil 6.8. ve Şekil 6.9.'da görülebilir.



Şekil 6.7. Yeni Kalıp 2 Şekillendirme Adımları 1. Adım



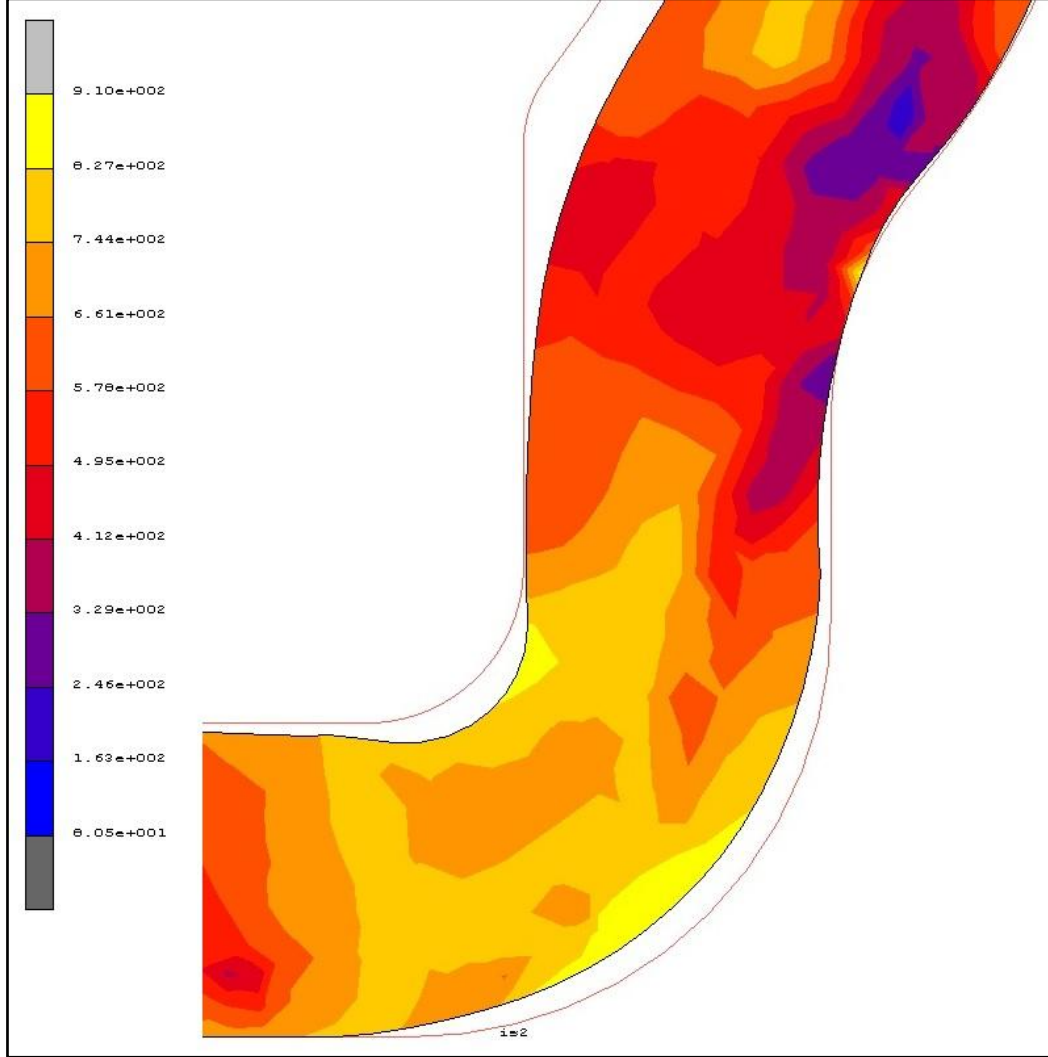
Şekil 6.8. Yeni Kalıp 2 Şekillendirme Adımları 2. Adım



Şekil 6.9. Yeni Kalıp 2 Şekillendirme Adımları 3. Adım

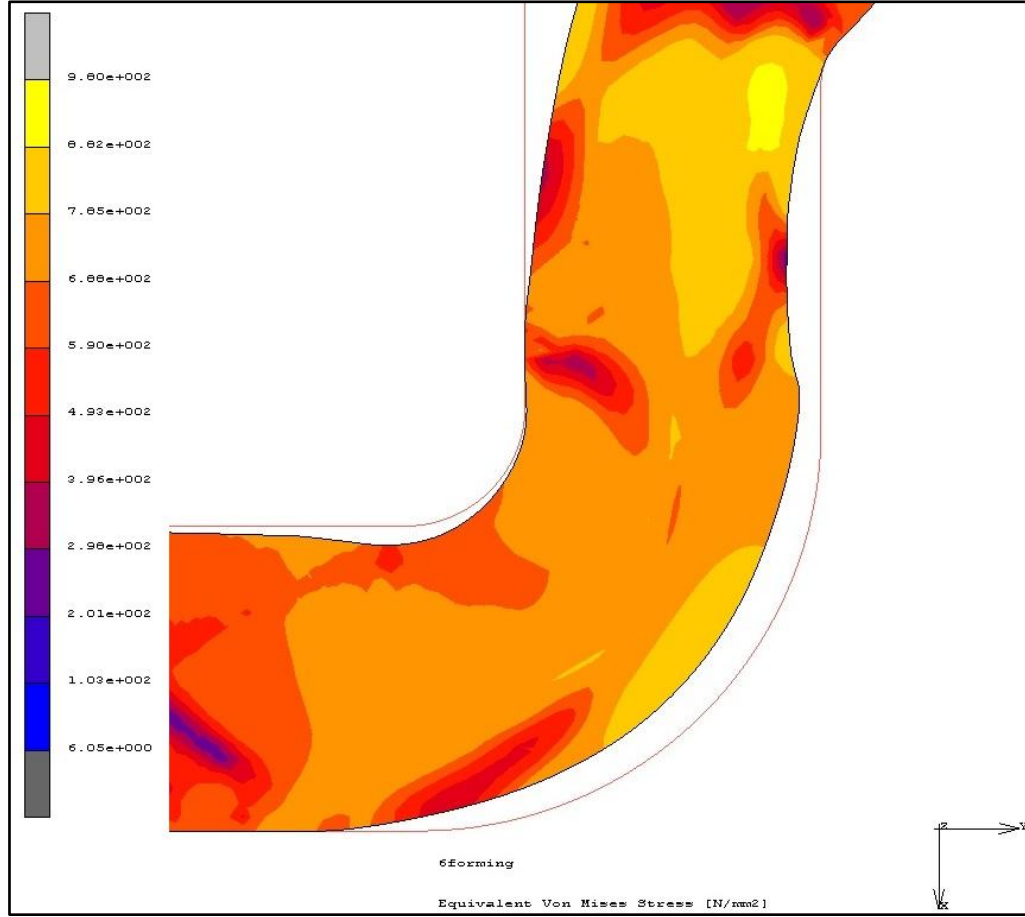
7. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Eski Kalıp'a ait simülasyon sonuçları incelendiğinde son şekillendirme adımı sonunda kalıplar ayrılmadan önce gerilmelerin özellikle büküm merkezinde yoğunlaştığı ve bunun problem tanımında belirtilen çatlak bölgesiyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu bölgede gerilme Şekil 7.1.'de görüleceği gibi 820 ile 910 MPa arasında bulunmuştur.



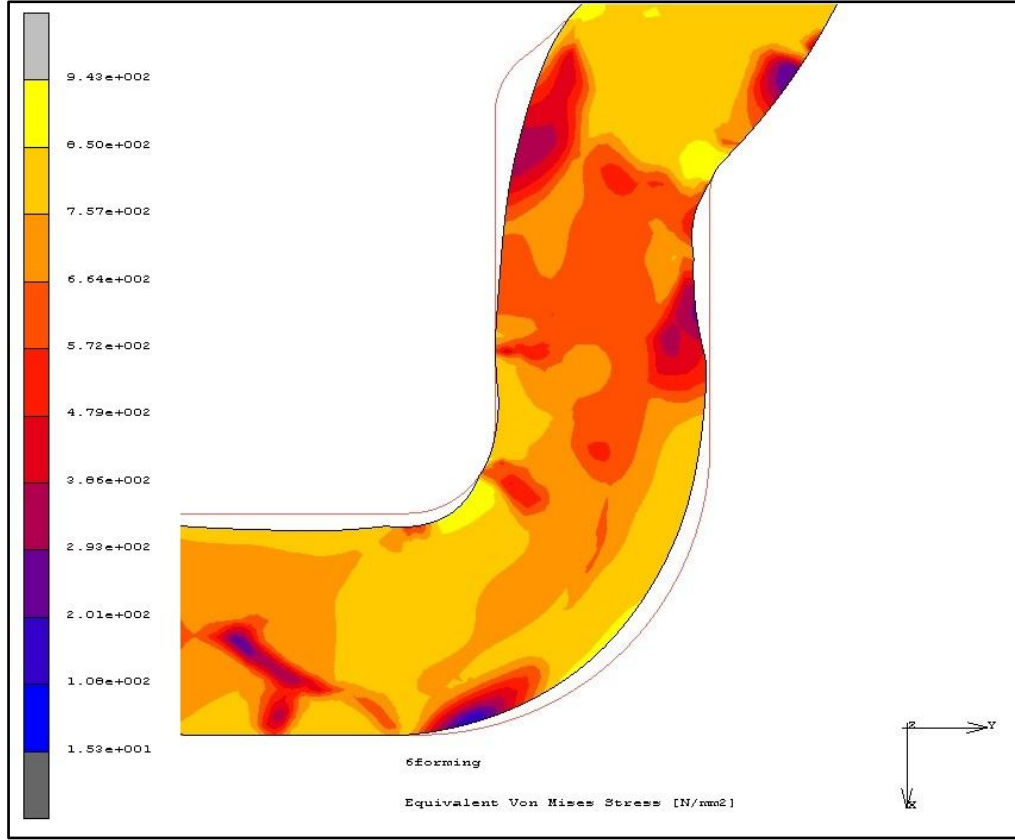
Şekil 7.1. Eski Kalıp Simülasyonlarında Son Adımdaki Gerilme Dağılımları

Yeni Kalıp 1 son şekillendirme adımı için aynı bölgede gerilme Eski Kalıp'a göre daha düşüktür, bu bölgede simülasyonlar Şekil 7.2.'de görüldüğü gibi 765-862 MPa aralığında gerilme olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.2. Yeni Kalıp 1 için Gerilme Dağılımları

Yeni Kalıp 2’de ise gerilmeler bu kez Eski Kalıp’a göre bile daha yüksek durumdadır. Şekil 7.3.’de görülebileceği gibi çok küçük bir alanda bile olsa büküm bölgesinde yerel olarak 850 MPa- 950 MPa aralığında gerilme görülmüştür. Bunun yanında her kalıpta görülmesine rağmen Yeni Kalıp 2’de özellikle ortaya çıkan bir durum gerilmelerin bükü yüzeyindeki değişimidir. Bükümün başlangıcında düşük olan gerilmeler belli bir bölgede yoğunlaşmaktadır. Bu durumun hasara sebep verdiği düşünülebilir.

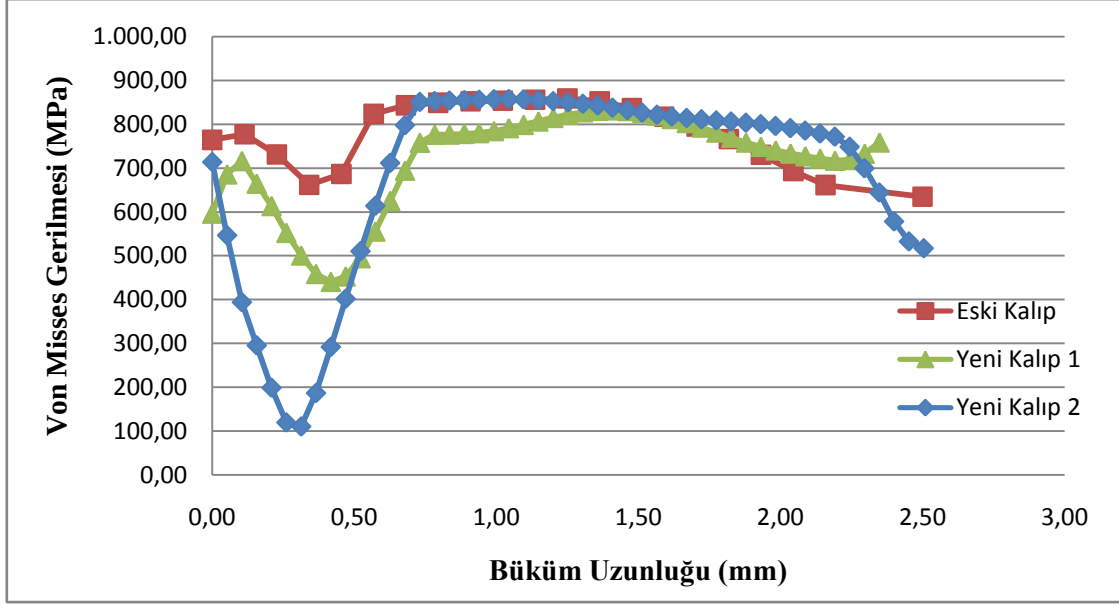


Şekil 7.3. Yeni Kalıp 2 için Gerilme Dağılımları

Şekil 7.3’da gözlenen gerilme değişimi Şekil 7.4’deki grafikte görülebilir. Von Misses gerilmelerinin kıyaslandığı bu şekilde büküm boyunca en dış eleman noktalarından Von Misses Gerilmeleri toplanmış ve büküm uzunluğu boyunca değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre Eski Kalıp simülasyonları en düşük gerilme değişimini göstermiş olmasına rağmen 800 MPa üzerinde gerilmelere ulaşmıştır. Öte yandan düşük gerilme gösteren kısım oldukça dar bir alanda olmasına rağmen bükümün devamında geniş bir yüksek çekme gerilmesi alanı oluşmuştur.

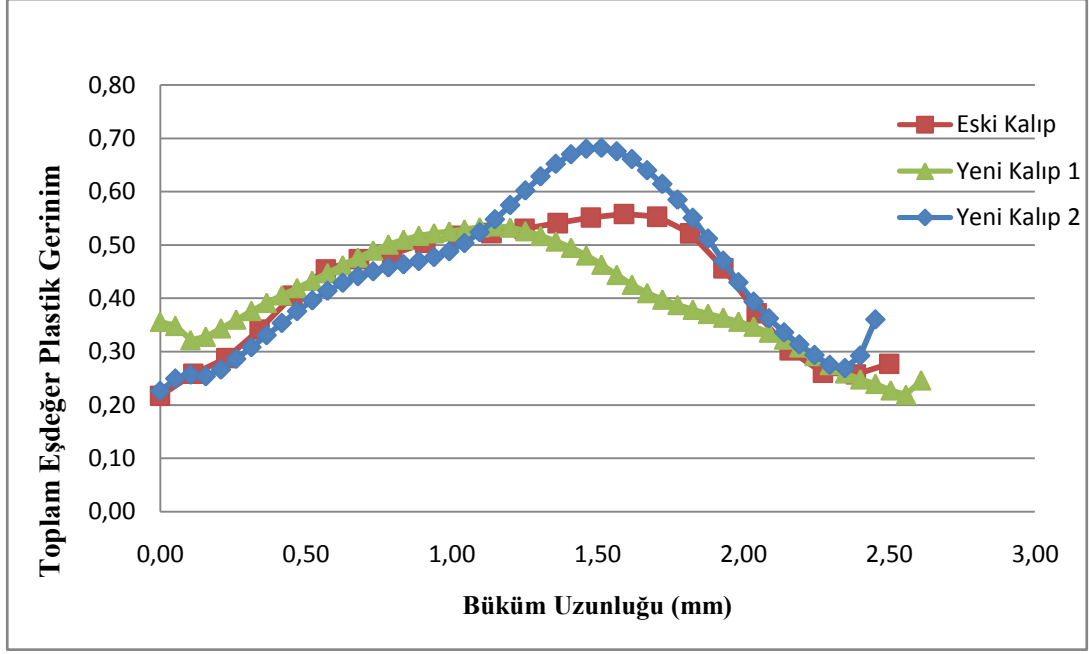
Yeni Kalıp 2 ise en yüksek basma – çekme gerilme değişimini göstermiştir sonrasında ise en yüksek gerilme bölgesinde Eski Kalıp ile aynı seviyede 800 MPa üzerinde çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu durum da deformasyonun çok yüksek olması beklenebilir.

Yeni Kalıp 1 ise bu grafikte Eski Kalıp’a göre daha yüksek gerilme değişimi göstermesine rağmen oldukça bu bükümün genelinde Von Misses Gerilmesi 800 MPa değerinin altındadır. Yalnızca 0,2 mm’lik bir bölgede 800 MPa değerini aşmıştır. Gerilmeler yerel değil bükümün geneline düzgün şekilde dağılmış görülmektedir.



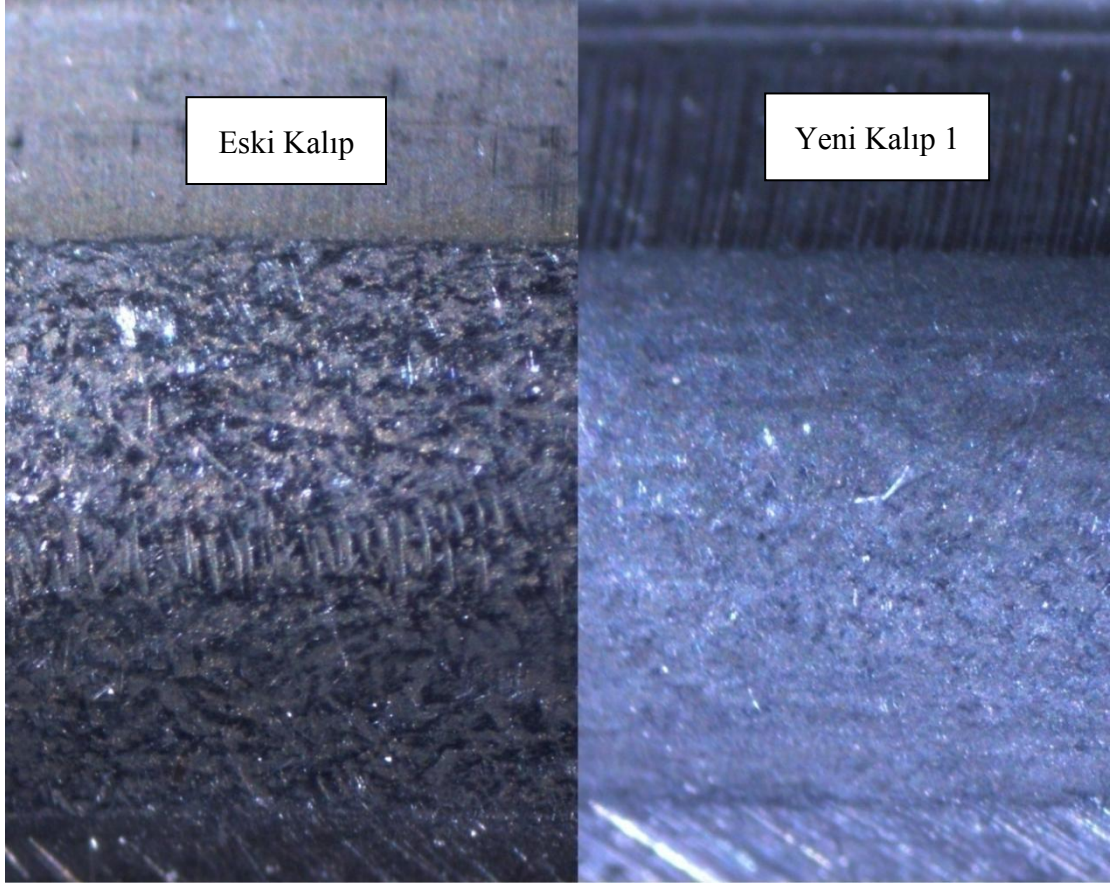
Şekil 7.4. Şekillendirme Adımı Tasarımları için Büküm Formunda Von-Misses Gerilmelerinin Karşılaştırılması

Şekil 7.5.'de her üç simülasyon modelinin büküm bölgesindeki eşdeğer plastik gerinimlerin karşılaştırılmasını bulabilirsiniz. Buna göre en yüksek gerinim %70 ile Yeni Kalıp 2'ye aittir. Eski Kalıp simülasyon sonucunun en yüksek gerinimi en yüksek gerilme bölgesinin hemen ilerisinde olmuştur ve %55 gerinim seviyesindedir. Yeni Kalıp 1 simülasyonu sonuçları en düşük gerinim dağılımını vermiş, gerinim en yüksek noktada %52 seviyesindedir. Eski Kalıp simülasyonunda büküm genelinde %50 üzerinde bir gerinim görülürken Yeni Kalıp 1 ve Yeni Kalıp 2 Simülasyonlarında gerinimler yerleşmiştir.



Şekil 7.5. Şekillendirme Adımları için Gerinim Kıyaslamaları

Bu bilgiler ile Yeni Kalıp 1 şekillendirme adımları imal edilerek üretim testleri yapılmıştır. Büküm bölgesi hasarlarının azaldığı belirtilmiştir. Büküm bölgesindeki değişim Şekil 7.6.'da görülebilir.



Şekil 7.6. Eski Kalıp ve Yeni Kalıp 1 Büküm Bölgesi – Sertleştirme Isıl İşlemi Sonrası

8. TARTIŞMA

Malzeme modeli geniş çekme numunelerinin kuvvet-şekil değişimi test verileri ile kıyaslandığında uyumlu görünmekle beraber sonrasında hasar modeli oluşturulması esnasında modelin gerçek eğriden saptığı bulunmuştur. Simufact® programında doğrudan kullanılabilen Cockroft-Latham gibi birçok hasar modeli için çeşitli parametre denemeleri yapılmış olsa da tüm sonuçlar başarısız olduğu için söz konusu bilgiler eklenmemiştir.

Sonuç kısmındaki tüm değerlendirmeler Von Misses Gerilmesine göre yapılmıştır. Von Misses gerilmesi denklem (9)'da ifade edildiği gibi üç farklı eksenindeki gerilmelerin bir birleşimidir.

Problem tanımında belirtilen çatlaklar ise yalnız bir yöndeki gerilmelerin etkisinde kırılmış olarak görülmektedirler. Bu sebeple MSC Marc® programında kırılma yönünde gerilmeler olan σ_{22} değerleri büküm boyunca çizdirilerek kıyaslanmıştır. Ancak Von Misses Gerilmelerinin gösterdiği ölçüde anlamlı bir farklılık bulunamamıştır.

Eski Kalıp ile yapılan imalatlarda malzemenin her zaman kırılmaması, yüzeyin portakal kabuğu görüntüsüne sahip olmasına rağmen çatlakların ortaya çıkış sürekliliğinin hammaddeden bağımsız olarak tüm üretimin %0,5'i seviyesinde olması, bazı döküm numaralı hammaddelerde bu seviyenin artması not edilmelidir. Yeni Kalıp 1 şekillendirme adımları ile büküm bölgesindeki aşırı deformasyonun azaltılmasının ve büküm yüzeyinin iyileştirilmesinin hasar oluşumunu %0,5'in altına düşürdüğü görülmüştür. Fakat hasar oluşumuna neden olan etkenler içerisinde sac malzemenin döküm, dilimleme ve taşıma sırasında üzerinde oluşan hataların varlığı belirtilmelidir. Bu sebeple Yeni Kalıp 1 formu da tamamen hatasız ürün üretememiştir. Hammadde tedarikçisi ile görüşülmüş ve farklı bir sac üreticisinden daha dar toleranslarda hammadde siparişi yapılmıştır. Hata oranı çok daha düşük olmasına rağmen halen üretimde görülmektedir. Bu çalışma sırasında kullanılan malzemeler ilk üreticinin hammadde gruplarından seçilen iki döküme aittir. Testler sırasında numuneler arasında belirgin hatalara veya test sonuçlarında farklılıklara rastlanmamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] O. Music, “Analysis of Cold Ring Rolling Process,” Middle East Technical University, 2005.
- [2] A. T. Harris and M. N. Kotzalas, *Essential Concepts of Bearing Technology*, 5th ed. Taylor & Francis, 2007.
- [3] V. Güley, “Experimental Investigation of Residual Stresses and Their Effect on The Fatigue Life of Ball Bearings,” 2004.
- [4] H. K. D. H. Bhadeshia, “Steels for bearings,” *Progress in Materials Science*, vol. 57, no. 2, pp. 268–435, Feb. 2012.
- [5] D. Scott, J. Blackwell, and E. Kilbride, “The assessment of ball bearing steels of modified chemical composition*,” *Wear*, vol. 46, pp. 273–279, 1978.
- [6] D. Banabic, H.-J. Bunge, K. Pöhlndt, and A. E. Tekkaya, *Formability of Metallic Materials*. Springer, 2000.
- [7] ASTM International, “Standard test methods for tensile testing of metallic materials.,” *Annual book of ASTM standards*, vol. E M - 03. 2004.
- [8] J. R. Davis, *Tensile Testing*. 2004.
- [9] Z. Marciniak, J. L. Duncan, and S. J. Hu, *Mechanics of sheet metal forming*, 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 2002.
- [10] S. Bruschi, T. Altan, D. Banabic, P. F. Bariani, a. Brosius, J. Cao, a. Ghiotti, M. Khraisheh, M. Merklein, and a. E. Tekkaya, “Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 63, no. 2, pp. 727–749, Jul. 2014.
- [11] S. Coppieters, P. Lava, H. Sol, a. Van Bael, P. Van Houtte, and D. Debruyne, “Determination of the flow stress and contact friction of sheet metal in a multi-layered upsetting test,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 10, pp. 1290–1296, 2010.
- [12] J. Y. Yoon, “Evaluation of Formability and Determination of Flow Stress Curve of Sheet Materials with Dome Test,” The Ohio State University, 2012.
- [13] a. Nasser, a. Yadav, P. Pathak, and T. Altan, “Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the uniaxial tensile and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 429–436, 2010.
- [14] C. W. Koh, “Design of a Hydraulic Bulge Test Apparatus,” University of Tokyo, 2008.

- [15] T. Hallfeldt, W. Hotz, C. Leppin, S. Keller, H. Friebe, E. T. Till, R. Müller, M. Vučetić, and H. Vegter, "Sheet Bulge Testing," in *Comprehensive Materials Processing*, vol. 1, 2014, pp. 85–93.
- [16] S. K. Panthi, N. Ramakrishnan, K. K. Pathak, and J. S. Chouhan, "An analysis of springback in sheet metal bending using finite element method (FEM)," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, no. 1–3, pp. 120–124, May 2007.
- [17] M. Bakhshi-Jooybari, B. Rahmani, V. Daezadeh, and a. Gorji, "The study of spring-back of CK67 steel sheet in V-die and U-die bending processes," *Materials and Design*, vol. 30, no. 7, pp. 2410–2419, 2009.
- [18] M. J. Worswick, *Chapter 8 Numerical Simulation of Sheet Metal Forming*. Woodhead Publishing Limited, 2002.
- [19] A. K. Ghosh, "A Method For Determining The Coefficient of Friction in Punch Stretching of Sheet Metals," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 19, pp. 457–470, 1977.
- [20] A. Groseclose, H. Son, J. Dykeman, and T. Altan, "Determination of biaxial flow stress using frictionless dome test," *Procedia Engineering*, vol. 00, no. October, pp. 1–5, 2014.
- [21] D. R. Hayhurst and M. W. Chan, "Determination of friction models for metallic die-workpiece interfaces," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 47, pp. 1–25, 2005.
- [22] W. F. Hosford and R. M. Caddell, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, 3rd ed. Cambridge University Press, 2007.
- [23] E. Coruk, "Advanced Identification of Flow Curve Parameters in Tension Test," Atılım University, 2011.
- [24] A. E. Tekkaya, "State-of-the-art of simulation of sheet metal forming," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, no. 1, pp. 14–22, Jun. 2000.
- [25] P. Sieczkarek, K. Isik, N. Ben Khalifa, P. a F. Martins, and a. E. Tekkaya, "Mechanics of sheet-bulk indentation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 11, pp. 2387–2394, 2014.
- [26] M. Merklein, J. M. Allwood, B. a. Behrens, a. Brosius, H. Hagenah, K. Kuzman, K. Mori, a. E. Tekkaya, and a. Weckenmann, "Bulk forming of sheet metal," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, no. 2, pp. 725–745, 2012.
- [27] A. Hannon and P. Tiernan, "A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, no. 1–3, pp. 1–13, Mar. 2008.
- [28] Ö. N. Cora, "Friction Analysis in Cold Forging," Middle East Technical University, 2004.

- [29] MSC Software Corporation, “MSC Marc 2010 Document Volume B : Element Library.” 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Halil Onat Tuğrul
Doğum Yeri : Aksaray
Medeni Hali : Bekar
E-Posta : halilonattugrul@gmail.com
Adresi : Yaşamkent mh. 3267 cd. Basın Klüp 2 sit. C/7 Çayyolu, Çankaya, Ankara

Eğitim

Lise : Denizli Er-Bakır Fen Lisesi (2000-2003)
Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü İmalat Mühendisliği Programı (2003 - 2009)
Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü (2011 - 2015)

Yabancı Dil Düzeyi

İngilizce: İleri Seviye, Toefl IBT: 103/120 (22/11/2014)

İş Deneyimi

Hacettepe Teknoloji Transfer Merkezi, Proje Asistanı (2014 - Halen)

Ortadoğu Rulman Sanayi ve Tic. A.Ş.

Ar-Ge Şefi (01/07/2011 - 30/06/2014)

Ar-Ge Mühendisi (21/12/2009 – 01/07/2011)

Alba Kalıp ve Otomasyon Sanayi ve Tic. Ltd. Şti., Stajyer Mühendis (01/08/2008 – 30/10/2008)

Deneyim Alanları

Sac Şekillendirilebilirlik Testleri

Metal Şekillendirme Simülasyonları

Tübitak Sanayi Ar-Ge Projeleri Yazımı ve Uygulaması

5647 Sayılı Kanuna göre Ar-Ge Merkezi Projeleri Uygulamaları ve Ar-Ge Merkezi Koordinasyonu

Boşluklu Nikel-Titanyum Malzeme Tasarımı ve Psüdo-Elastisite Testleri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

TÜBİTAK TEYDEB 1501 Sanayi Ar-Ge Projeleri, Proje No:3110407 “Sac Malzemeden Rulman Bileziği Dizaynı ve Prototip Üretimi için İmalat Adımlarının FEA Programları ile Belirlenmesi, Kalıp Optimizasyonu, Kalıp ve Prototip Üretimi ve Uygulama Testleri”

Bütçe: 248,302.00 TL

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

16. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Konferansı – UMTIK 2014, İzmir