

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

6082 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ ŞEKİLLENDİRME SINIR
DİYAGRAMININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ

[HALİT İLHAN SÜRÜCÜ]

TEMMUZ 2017

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

6082 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ ŞEKİLLENDİRME SINIR
DİYAGRAMININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ

HALİT İLHAN SÜRÜCÜ

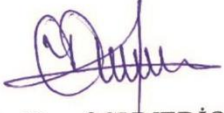
Yüksek Lisans Tezi


Danışman

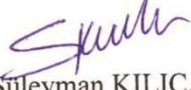
Yrd. Doç. Dr. Serkan TOROS

Temmuz 2017

Halit İlhan SÜRÜCÜ tarafından **Yrd.Doç.Dr. Serkan TOROS** danışmanlığında hazırlanan “**6082 Alüminyum Alaşımının Şekillendirme Sınır Diyagramının Deneysel ve Nümerik İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makina Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :  Doç.Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye :  Yrd.Doç.Dr. Serkan TOROS, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye :  Yrd.Doç.Dr. Süleyman KILIÇ, Ahi Evran Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../20... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun .../.../20... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR V.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Halit İlhan SÜRÜCÜ

ÖZET

6082 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ

SÜRÜCÜ, Halit İlhan

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman

:Yrd. Doç. Dr. Serkan TOROS

Temmuz 2017, 82 sayfa

Günlük hayatta gerek ulaşım sektöründe gerek yüksek mukavemet gerektiren alanlarda kullanılan malzemelerin ağır olması yakıt sarfiyatına ve gereksiz ağırlık artışına neden olmaktadır. Son yıllarda sac malzemelerin şekillendirilebilirlik sınırlarının belirlendiği yeni çalışmalar arasında “ Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)” (Forming Limit Diyagram, FLD) tekniği dikkat çekmektedir. (Uysal ve Öztürk, 2010, Anket vd., 2011). Bu çalışmada Al6082T6 alaşımının mekanik özellikleri deneysel ve numerik olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Deneylerde 1 mm ve 1,5 mm olmak üzere iki çeşit deney numunesi kullanılmıştır. Mekanik testler 25 mm/dak ve 900 mm/dak’da olmak üzere iki farklı deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında çekme, anizotropi ve ŞSD deneyleri yapılmıştır. Tez kapsamında yapılan mekanik testlerle elde edilen deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında, 1,5 mm kalınlığındaki numunenin daha iyi şekillendirilebilme kabiliyetine sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: , Çekme deneyi, Anizotropik akma kriterleri, Akma yüzeyi modellemesi, Şekillendirme sınır diyagramı modellemesi, Al6082T6 alaşımı

SUMMARY

INVESTIGATION OF FORMING LIMIT DIAGRAM OF 6082 ALUMINUM ALLOY BY EXPERIMENTAL AND NUMERIC METHODS.

SÜRÜCÜ, Halit İlhan

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Serkan TOROS

July 2017, 82 pages

The heavy use of materials used in the transportation sector and in areas requiring high strength in daily life lead to fuel consumption and unnecessary weight increase. Among the recent studies that have defined the formability limits of sheet materials in recent years are the "Forming Limit Diagram (FLD)" technique. (Uysal ve Ozturk, 2010, Survey et al., 2011). In this study, the mechanical properties of the Al6082T6 alloy were extensively and numerically investigated. Two types of test specimens were used, 1 mm and 1.5 mm. The mechanical tests were carried out at two different deformation rates, 25 mm / min and 900 mm / min. Within the scope of this thesis study, tensile, anisotropy and SHD experiments were carried out. Comparing the experimental and numerical results obtained with the mechanical tests made in the thesis, it is seen that the 1.5 mm thick sample has better shaping ability.

Key Words: Tensile test, Anisotropic flow criterion, Flow surface modeling, Forming limit diagram modeling, Al6082T6 alloy.

ÖN SÖZ

Bu tez kapsamında Al6082T6 alaşımının şekillendirme sınır diyagramları deneysel ve nümerik olarak elde edilmiştir. Ulaşılan sonuçlar grafiklerle detaylandırılmış ve tablolar halinde gösterilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışman hocam, Sayın Yrd. Doç.Dr. Serkan TOROS'a ve tez süresince bana her konuda destek olan kıymetli meslektaşım Öğr. Gör. Serdar KAPLAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı hazırlarken geçirdiğim süreçte benden yardımlarını esirgemeyen babam Ahmet SÜRÜCÜ'ye, annem Gülnur SÜRÜCÜ'ye ve kıymetli eşim Elifnur SÜRÜCÜ'ye en derin teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ	xii
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II LİTERATÜR TARAMASI.....	2
2.1 Alüminyumun Özellikleri.....	5
2.2 Alüminyum 6082T6 Alaşımı (AlMgSi)	8
2.3 Anizotropi.....	8
2.4 Akma Yüzeyi	11
2.5 Malzemelerde Şekillendirme Sınır Diyagramları.....	12
2.6 Mekanik Özelliklerin Modellenmesi	13
2.7 Akma Yüzeylerinin Modellenmesi.....	14
2.7.1 Hill-48 kuadratik akma kriteri	15
2.7.2 Barlat89 akma kriteri	17
2.7.3 Düzlem gerilme akma fonksiyonu YLD2000-2d	18
2.7.4 Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi.....	19
2.8 Nümerik Olarak Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Belirlenmesi	20
2.8.1 Swift model.....	20
2.8.2 Hill model	23
2.8.3 M-K ve H-N modelleri	25
2.8.4 Keeler ve goodwin model.....	26
2.8.5 NADDRG model	28
BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29

3.1 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	29
3.2 Çekme Deneyinde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması	30
3.3 Çekme Deney Düzenegi	30
3.4 Anizotropi Deney Numunelerinin Hazırlanması	32
3.5 ŞSD Numunelerinin Hazırlanması.....	34
3.6 Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Belirlenmesi	35
3.7 Akma Yüzeylerinin ve ŞSD'larının Nümerik Olarak Belirlenmesi	38
BÖLÜM IV DENEYSEL SONUÇLAR.....	39
4.1 Çekme Deneyi Sonuçları	39
4.2 Anizotropi Deney Sonuçları	50
4.3 Akma Yüzeyi Sonuçlarının Al6082T6 Alaşımına Uyarlanması	50
4.4 Nümerik Olarak Şekillendirme Sınır Diyagramının Belirlenmesi	56
BÖLÜM V SONUÇ VE ÖNERİLER	61
Özgeçmiş	63
KAYNAKLAR	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Al6082T6 alaşımında bulunan malzemelerin ağırlıkça oranları	29
Çizelge 4.1. 1mm Al6082T6 alaşımının mekanik özellikleri.....	39
Çizelge 4.2. 1,5 mm Al6082T6 alaşımının mekanik özellikleri.....	40
Çizelge 4.3. Akma yüzeyi fonksiyonları için anizotropi parametre değerleri (1mm).....	55
Çizelge 4.4. Akma yüzeyi fonksiyonları için anizotropi parametre değerleri (1,5mm)...	55



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Şekillendirme sınır diyagramı	3
Şekil 2.2. DC04 deney numunesi için kırılma ve boğumlanma eğrileri.....	4
Şekil 2.3. Çekme numunelerinin haddeleme yönü ile belirli açı yaparak gösterilmesi.....	9
Şekil 2.4. Şekillendirme sınır diyagramı	13
Şekil 2.5. Akma yüzeyinin deneysel elde edilişi	14
Şekil 2.6. Deneysel olarak belirlenmiş örnek bir akma yüzeyi	15
Şekil 2.7. İki eksenli gerdirme durumu	21
Şekil 2.8. M-K ve H-N modellerinde kullanılan geometrik ilişkiler.....	25
Şekil 2.9. Keeler'in oluşturduğu ŞSD	27
Şekil 2.10. Keeler ve Goodwin'in tanımlamış olduğu ŞSD	27
Şekil 3.1. Çekme deneyinde kullanılan numunelerin ölçüleri.....	29
Şekil 3.2. ŞSD deneyinde kullanılan numunelerin ölçüleri.....	30
Şekil 3.3. Deformasyonu ölçme sistemi	31
Şekil 3.4. Şekillendirme sınır diyagramı test cihazının şematik gösterimi	35
Şekil 4.1. 1 mm kalınlıktaki numunenin 25 mm/dak hızındaki gerçek gerilmesi	421
Şekil 4.2. 1 mm kalınlıktaki numunenin 900 mm/dak hızındaki gerçek gerilmesi.....	41
Şekil 4.3. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin 25 mm/dak hızındaki gerçek gerilmesi	42
Şekil 4.4. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin 900 mm/dak hızındaki gerçek gerilmesi.....	42
Şekil 4.5. 1 mm kalınlıktaki numunenin 25 mm/dak hızdaki mühendislik gerilmesi	43
Şekil 4.6. 1 mm kalınlıktaki numunenin 900 mm/dak hızdaki mühendislik gerilmesi ...	43
Şekil 4.7. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin 25 mm/dak hızındaki mühendislik gerilmesi	44
Şekil 4.8. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin 900 mm/dak hızındaki mühendislik gerilmesi	44
Şekil 4.9. 1 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki akma dayanımı	45
Şekil 4.10. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki akma dayanımı	45
Şekil 4.11. 1 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki çekme dayanımı.....	46
Şekil 4.12. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki çekme dayanımı.....	46
Şekil 4.13. 1 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki pekleşme üsteli	47
Şekil 4.14. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki pekleşme üsteli	47
Şekil 4.15. 1 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki mukavemet katsayısı	48

Şekil 4.16. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki mukavemet katsayısı	48
Şekil 4.17. Farklı kalınlıklardaki malzemelerin anizotropi değerleri	50
Şekil 4.18. 1 mm kalınlığındaki numunenin Barlat89 kriterine göre akma yüzeyi.....	51
Şekil 4.19. 1,5 mm kalınlığındaki numunenin Barlat89 kriterine göre akma yüzeyi.....	51
Şekil 4.20. 1 mm kalınlığındaki numunenin Hill48 kriterine göre akma yüzeyi	52
Şekil 4.21. 1,5 mm kalınlığındaki numunenin Hill48 kriterine göre akma yüzeyi	52
Şekil 4.22. 1 mm kalınlığındaki numunenin YLD2000-2d kriterine göre akma yüzeyi .	53
Şekil 4.23. 1,5 mm kalınlığında numunenin YLD2000-2d kriterine göre akma yüzeyi .	53
Şekil 4.24. 1 mm kalınlığında elde edilen akma yüzeylerinin karşılaştırılması	54
Şekil 4.25. 1,5 mm kalınlığında elde edilen akma yüzeylerinin karşılaştırılması	54
Şekil 4.26. 1 mm kalınlık 25 mm/dak hızla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği....	56
Şekil 4.27. 1 mm kalınlık 900 mm/dak hızla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği..	57
Şekil 4.28. 1,5 mm kalınlık 25 mm/dak hızla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği.	57
Şekil 4.29. 1,5mm kalınlık 900 mm/dak hızla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği	58
Şekil 4.30. Farklı malzeme kalınlığı ve hızlardaki ŞSD grafiklerin karşılaştırılması	58
Şekil 4.31. ŞSD tahminlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması	59

FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Çekme deney düzeneği	31
Fotoğraf 3.2. Anizotropi deney numunelerinin hazırlanması.....	32
Fotoğraf 3.3. Anizotropi deney numuneleri	33
Fotoğraf 3.4. Anizotropilerin belirlenmesinde kullanılan yöntem	33
Fotoğraf 3.5. ŞSD deneyinde kullanılan numuneler.....	34
Fotoğraf 3.6. Şekillendirme sınır diyagramı deney düzeneği.....	35
Fotoğraf 3.7. Şekillendirilmiş deney numuneleri	36
Fotoğraf 3.8. Referans küpü ve deney numunelerindeki gridleri okuma sistemi.....	37
Fotoğraf 3.9. ASAME programı ara yüzü	38

BÖLÜM I

GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde hafif metallerden birisi olan alüminyum alaşımları kolay dökülebilmeleri, özgül ağırlık ve ısı genleşmelerinin düşük olması ve ısı iletkenliklerinin iyi olması gibi özellikler sayesinde son zamanların en popüler alaşımlarından bir tanesi olmuştur (Baypınar, 2005). Alüminyum alaşımlar; hafif olmasına rağmen yüksek mukavemete sahip olmaları, kolay şekillenebilir olmaları ve korozyona karşı dayanımlı olmalarından dolayı yaygın kullanım alanlarına sahiptir. Özellikle 6000 serisi alüminyum alaşımları ağırlığına oranla çok yüksek mukavemete sahip olmaları nedeniyle, hava araçları ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar. Bu yüzden bu alaşımların mekanik özelliklerine ait araştırmalar önem kazanmaktadır (Karalı vd., 2011).

Yapılan araştırmalar sonucunda, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için kullanılan çekme işlemi neticesinde oluşan proses tasarımı ve işlem değişikliği tanımlanmasında yetersizliklerin ortaya çıktığı görülmüştür. Son yıllarda şekillendirme sınır diyagramları sac malzemenin yırtılma sınırlarının ve proses değişikliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu diyagram sayesinde kritik bölgeler analiz edilebilir ve malzeme davranışı belirlenebilir (Kaçar vd., 2011).

Bu çalışmada, Al6082T6 alaşımı, mekanik özelliklerinin önemli ölçüde iyileştirilebilen sınırlı sayıda alaşımlardan biri olmasından dolayı deney malzemesi olarak seçilmiştir. Al6082T6 alaşımlı malzemeye, farklı kalınlıklar ve farklı deformasyon hızlarında mekanik testler yapılarak akma yüzeyleri ve şekillendirme sınır diyagramları deneysel ve nümerik olarak belirlenmiştir

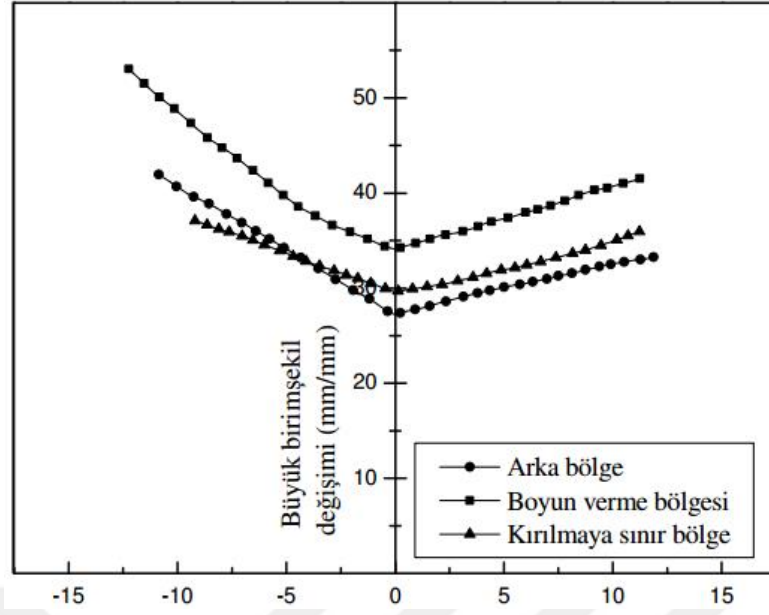
BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

Sac malzemeler havacılık ve otomotiv alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Burada kullanılacak malzemenin yoğunluğu düşük, mukavemeti yüksek ve yüksek korozyon direncine sahip olması istenir. Dolayısıyla sac malzemelere ve bu malzemelere ait şekillendirme verileri olan kırılma ve kırılma değerleri ile şekillendirme sınır diyagramlarına olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Kırılma, boğumlanma ve kırılma, sac malzemelerin şekillendirilmesinde en sık karşılaşılan problem tipleridir. Araştırmacılar ve imalatçılar sac malzemelerin şekillendirilmesi esnasında bu tür problemlerden kaçınmayı amaçlamaktadırlar (Anket vd., 2011).

Sac metal malzemelerin şekillendirilmesi sonucunda güvenli bir bölgenin, kritik noktaların ve hata oluşan kısımların gösterildiği bir diyagram kullanılır. Bu diyagrama Şekillendirme Sınır Diyagram'ı (ŞSD) denir. (Şanay ve Kaftanoğlu, 2011). Şekillendirilebilirlik ve ŞSD birçok faktöre ve malzeme özelliğine bağlı olduğu için sac malzemelerin şekillendirilebilirliği geniş ölçüde araştırılmış ve farklı zamanlarda değişik kişiler tarafından farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Uysal ve Öztürk (2010), HSLA 300 çelik alaşımını inceliyerek bir şekillendirme sınır diyagramı oluşturmuşlardır. Daha sonra ise elde edilen bu diyagramın nasıl ortaya çıktığına dair elde edilme yöntemleri hakkında çalışma yapmışlardır. Kullandıkları deney numunelerinin farklı noktalarını ölçmek suretiyle şekillendirme sınır diyagramı oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu diyagram Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Yapılan deney sonucunda grafiğin sol tarafında oluşan birim şekil değiştirme değerinin boyun verme bölgesinde olduğunu tayin etmişlerdir. Kırılmaya karşı meyilin ise grafiğin sol tarafında farklı olduğu gözlemlenmiştir.

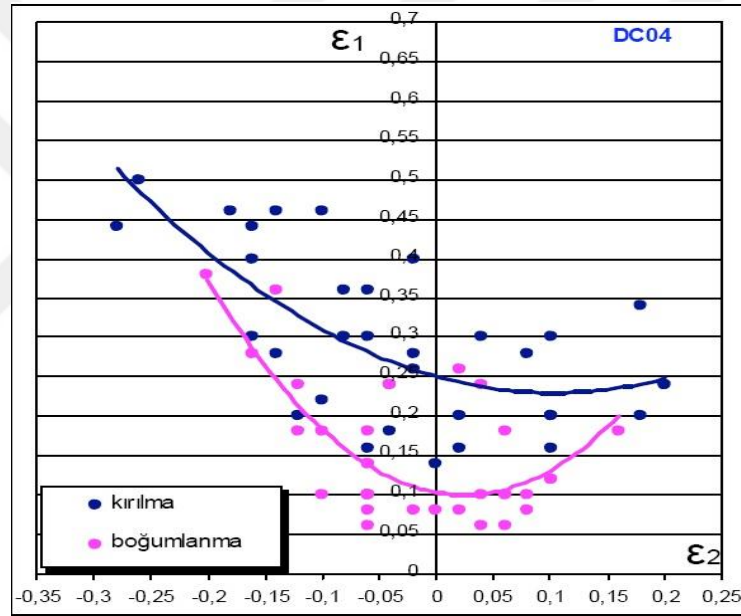


Şekil 2.1. Şekillendirme sınır diyagramı (Uysal ve Öztürk, 2010)

Anket (2011) yapmış olduğu çalışmada, sac şekillendirme prosesleri içinde yer alan ve son yıllarda dikkatleri üzerine çeken hidromekanik derin çekme yönteminin deneysel ve nümerik incelemesi yapmıştır. Deneysel çalışmada, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan DC04 sac malzeme kullanmıştır. Öncelikle sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınırlarını ortaya koymak amacıyla çekme ve şekillendirilebilirlik sınır diyagramı testleri yapmıştır. Deneysel çalışmalar, sac malzeme şekillendirme süreçlerinde yaygın hata tipi olarak gözlenen kırışıklık ve kırılma açısından değerlendirilmiştir. Şekillendirilmiş parçadaki kalınlık değişimlerinde deney değişkenlerinin etkileri ortaya konulmuştur. Deneysel çalışmalar neticesinde, hidromekanik derin çekme şartlarında şekil değiştirme hızının çok önemli bir etken olduğu gözlenmiş, düşük şekil değiştirme hızlarının şekillendirme sürecini olumlu etkilediği görülmüştür. Hazne basıncının en önemli şekillendirme etkeni olduğu ve sac malzeme için en uygun bir basınç değeri olduğu tespit edilmiştir.

Son 50 yılda yapılan çalışmalar incelendiğinde ŞSD'nı elde etmek için kullanılacak değerlerin belirlenmesi ile ilgili olarak birçok araştırma ve deney yapılmıştır. Yapılan araştırma sonuçlarında ŞSD'nın malzeme şekillendirme tahmininde önemli bir araç olduğu ortaya konulmuştur. Şekillendirilebilirlik verileri, sac malzemelerin şekillendirilmesi esnasında ortaya çıkan problemleri çözmek için hem imalatçılar hem de

kullanıcılar açısından önemlidir. Sac malzeme seçme işlemi ile uğraşan üretim mühendislerinin, üretimde doğru malzemeyi tercih edebilmelerinde malzemelerin şekillendirilebilirlik ve plastik şekil değiştirme özellikleri yol gösterici olmaktadır. Anket vd. (2011) çalışmalarında, ŞSD'nın teorisi, çizimi, okunması ve yorumlanmasını incelemişler ve bir ŞSD elde etmişlerdir (Şekil 2.2). Sac malzemelerin plastik şekil değiştirme özelliklerinin bilinmesi, doğru malzemenin seçiminde yol gösterici olacağını ve doğru malzemenin seçilmesi, atık malzemenin en az olmasını, en az deneme işlemini ve en kısa zamanda üretim yapabilmeyi olanaklı hale getireceğini savunmuşlardır. Sac malzemenin doğru tanımlanması ve doğru malzeme seçimi, firmaların maliyetlerini azaltmalarına yardımcı olacağını ve rekabet güçlerini artıracığını öngörmüşlerdir.



Şekil 2.2. DC04 deney numunesi için kırılma ve boğumlanma eğrileri (Anket vd., 2011)

ŞSD ile aynı diyagram üzerinde malzemenin farklı uzama şartlarını değerlendirmek ve özel bir uzama kombinasyonu için kırılma sınırlarını kararlaştırabilmek mümkündür. Simülasyonlar kullanılarak malzemelerin şekillendirilebilirlik sınırlarını belirlemek, zaman ve maliyeti önemli ölçüde azaltmıştır. Şanay (2010) yaptığı bir çalışmada, şekillendirme sınır diyagramlarını Pam-Stamp 2G yazılımı ile Nakazima testi yaparak tahmin etmeye çalışmıştır. Birbirinden farklı olan iki tip malzemeyi (AA2024-O ve SAE 1006), yaptığı deney çalışması süresince ŞSD'larının yorumlanmasında kullanmış ve 7 farklı numune geometrisini iki malzeme içinde kullanmıştır. Yapılan bu çalışmanın

ardından ŞSD elde edilmiş ve deney sonuçları ile kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlardan elde edilen ŞSD'nin gerilim yayılması ile uyum halinde olduğu görülmüştür. Şanay (2010) yapmış olduğu çalışma sonucunda, deney çalışmalarının devam ettiği sürece ve yanılma süreçlerinde meydana gelebilecek bütün zaman ve maliyetle ilgili birimleri düşürebileceği öngörülmüştür.

Şekillendirme sınır diyagramlarının güvenilir sonuçlar verebilmesi ve hızlı bir şekilde analiz yapılabilmesi için yapılan çalışmaların sayısında çok miktarda artış gözlenmiştir. Bu yüzden resim işleme teknolojisi ön plana çıkmaktadır ve desenlerin uzama miktarlarının ölçülebilmesi için otomatik olarak çalışan ölçüm sistemleri geliştirilmiştir. Bu diyagramların belirlenebilmesi aşamasında kişi kaynaklı hataların sonuçları etkilemesi ve diyagram oluşturma süresinin uzaması araştırmacıları bilgisayar yardımıyla analiz yapmaya ve diyagramları belirlemeye doğru sürüklemiştir.

2.1 Alüminyumun Özellikleri

Tabiatta sıklıkla rastlanan elemanlardan birisi olan alüminyum, mühendislik yapılarında da sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanım alanının geniş olması ve doğada fazlaca bulunuyor olması, ayrıca mukavemet değerlerinin yüksek olması, alüminyumu çelikten sonra en çok kullanılan metal haline getirmiştir (Mısırlı, 2011). Bundan dolayı alüminyum, demir-çelik malzemelerden sonra, çağımızın en çok kullanılan ikinci metali olmuştur (Başer, 2012). Alüminyumun;

- 1- Ağırlığının düşük olması,
- 2- Korozyona karşı dayanımının yüksek olması,
- 3- Alüminyum alaşımlarının sağlam ve şekillendirilebilirlik bakımından iyi olması,
- 4- Kimyasal maddelere karşı dayanımının iyi olması,
- 5- Üzerine uygulanan enerjiyi depolama yeteneğinin olması,
- 6- Geri dönüşüm özelliğinin olması,
- 7- Elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliğinin iyi olması,
- 8- Alev alma noktasının düşük olması,
- 9- Magnetik nötrallite olması,
- 10- Biçimlendirilebilme ve işlenebilmesinin kolay olması,

11- Yüzey işleme yapabilmek için farklı yöntemlerin olması,

gibi özellikler sayesinde bu metalin kullanımını artmaya başlamıştır ve alüminyum yirmibirinci yüzyılın en önemli metallere birisi olmuştur (Başer, 2012).

Alüminyum metali yoğunluk olarak çeliğin üçte biri kadardır. Elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliği bakır metaline göre daha düşüktür. Elektrik hatlarında genelde alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Burada alüminyumun birim fiyatının bakırdan daha düşük olması da alüminyumun daha kullanılabilir bir metal olmasını sağlamaktadır. Alüminyum korozyon ortamlarda kullanılmak istediğimiz zaman ise alaşımın yüzeyi bir oksit tabakası ile kaplanır. Böylece bu alaşım korozyona karşı daha dayanıklı bir hale gelir. Alüminyumun saf halde kullanılması pek yaygın değildir. Çünkü bu alaşımın saf halde dayanım düşüklüğü nedeniyle kullanılamaz (Yeşiotalı, 2001; Mısırlı, 2011).

Alüminyum profiller karışık geometrik yapıya sahiptir. Ancak sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kabiliyeti iyi olduğu için ekstrüzyon yöntemiyle üretilmektedir. Paketleme işlemlerinde kullanılmak üzere, kalınlığı bir kaç mikrona ulaşabilen folyolar üretilir. Aynı zamanda alüminyumun gıda endüstrisinde kullanım alanı vardır. Saf alüminyum gıda paketleme işlemlerinde kullanılmaktadır. Alüminyum metali elektrolit işleme ile oksitlendirilir ve değişik renklerde üretilir. Bu işleme eloksasyon denmektedir. Yapılan bu işlemler ile değişik renklerde profiller üretilir ve aynı zamanda korozyona dayanıklı profiller üretilmiş olur. Üretilen bu profiller mimaride çeşitli yerlerde kullanılmaktadır. Pencere ve kapı yapımı gibi yerlerde kullanım alanı vardır (Mısırlı, 2011).

Alüminyum alaşımlarının, alaşım elementlerine ve mikro yapısına göre mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmektedir. Alüminyum alaşımını oluştururken genel olarak kullanılan bazı alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki gruba incelenir ve her iki grup içinde bulunan alaşım elementleri, ısıl işlem uygulanabilen alaşımlar ve uygulanamayan alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılabilir. Dövme alaşımları plastik deformasyonla oluşturulmuştur ve döküm alaşımlarına göre daha farklı

mikroyapıya ve kimyasal bileşime sahiptir. Bu alaşımların, kolayca şekillendirilebilme nedeni ise plastik deformasyon kabiliyetinin iyi olmasıdır (Mısırlı, 2011; Başer, 2012).

Dört haneli bir sayı ile sınıflandırılması yapılabilen dövme alüminyumun hanelerindeki rakamlar, ilave edilen metale göre değişmektedir. Bu dört hanedeki ilk rakam alüminyuma ilave edilen metali göstermektedir.

1XXX şeklinde yazılan dört haneli rakam dizisi alüminyumun saf olduğunu gösterir. Alüminyum alaşımları sınıflandırmasında kullanılan rakamlar 2XXX'den 8XXX'e kadardır. Kullanılan ilk rakam alaşımın türünü belirtir ve ikinci rakam ise kullanılan modifikasyonu belirtir. Son iki hanenin özel bir anlamı olmayıp alaşım serisindeki diğer alaşımlardan ayırt eden sıra numarası gibi kullanılmaktadır (Uludağ, 2011). Bu sınıflandırma aşağıdaki gibi gösterilebilir:

- **1XXX:** Alüminyumun saf halidir. Elektrikle ilgili alanlarda ve kimya endüstrisinde kullanılır.
- **2XXX:** Al-Cu alaşımları. Bu alaşım türünün asıl alaşım elementi olarak bakır kullanılır ve magnezyum gibi başka alaşım elementleride kullanılmaktadır. Bu alaşımın mukavemeti yüksek olduğu için havacılıkta kullanımı artmaktadır.
- **3XXX:** Al-Mn alaşımları. Ana alaşım elementi mangandır ve kendisine boru imalatı, sıvı tanker imalatı ve inşaat yapılarında kullanım alanı bulur.
- **4XXX:** Al-Si alaşımlarının ana alaşım elementi silisyum olup ısıl genleşme katsayısı düşüktür. Aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksektir. Kaynak gerektiren yerlerde, otomobil üretiminde ve levha gibi parçaların üretiminde kullanılır.
- **5XXX:** Al-Mg alaşımları. Ana alaşım elementi magnezyum olan bu alaşımda alüminyuma katılan magnezyum miktarı artırılınca alaşımın mukavemeti ve sertliği artmaktadır fakat sünekliği azalmaktadır. Suyu karşı korozyon direnci

yüksek olduğu için sürekli suyla temas halinde kalacak parçaların üretiminde kullanılır.

- **6XXX:** Al-Mg-Si alaşımları. Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilen parça imalatında kendisine kullanım alanı bulur.
- **7XXX:** Al-Zn alaşımları. Çinko elementi asıl alaşım elementi olarak kullanılır ve magnezyum, krom ve zirkonyum eklenebilir. Elde edilen bu serideki alaşımlarla yüksek mukavemet değerleri elde edilebildiği için havacılık sektöründe ve yüksek mukavemet istenilen yerlerde kullanım alanı vardır.
- **8XXX:** Al-Li alaşımlarının temel alaşım maddesi lityumdur. Ayrıca bu serideki alaşıma kalayda eklenebilmektedir. Alaşımın yorulma direnci ve tokluk değerleri yüksektir. Uçak yapımında, havacılık sektöründe ve uzay mekiği gibi araçlarda kullanımı artmaya başlamıştır. Lakin diğer alaşımlarla karşılaştırıldığı zaman maliyetinin yüksek olduğu açık bir şekilde görülmektedir (Mısırlı, 2011).

2.2 Alüminyum 6082T6 Alaşımı (AlMgSi)

Belirli oranlarda magnezyum ve silisyum içeren alüminyum 6XXX alaşımlar Mg_2Si elementi şeklinde bir çökeltisi oluşturmaktadırlar. 6082 alaşımları otomotiv sektöründe, süspansiyon sistemlerinde ve ekstrüzyon yoluyla üretilen ürünlerde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. 6XXX serisi alüminyum alaşımları içerisinde T6 ısıtılma işlemi uygun ve dövme işlemi için olumlu sonuçlar veren alaşım malzemesi 6082'dir. EN AW 6082, 6 serisi alaşımlar içerisindeki yüksek dayanıma ve korozyon direncine sahip olan bir alaşım elementidir. Ayrıca kaynak işlemlerinde olumlu sonuçlar vermesi, şekillendirme esnasında çok fazla problemle karşılaşılması ve alaşım elementini işleme konusundaki mükemmelliği ön plana çıkmaktadır (İlgaz, 2014).

2.3 Anizotropi

Malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyetlerini belirleyen önemli parametrelerden bir tanesi anizotropik özellikleridir. Bir malzemenin haddeleme yönüne bağlı olarak mukavemet değeri gibi mekanik özelliklerinin değişmesi durumuna anizotropi

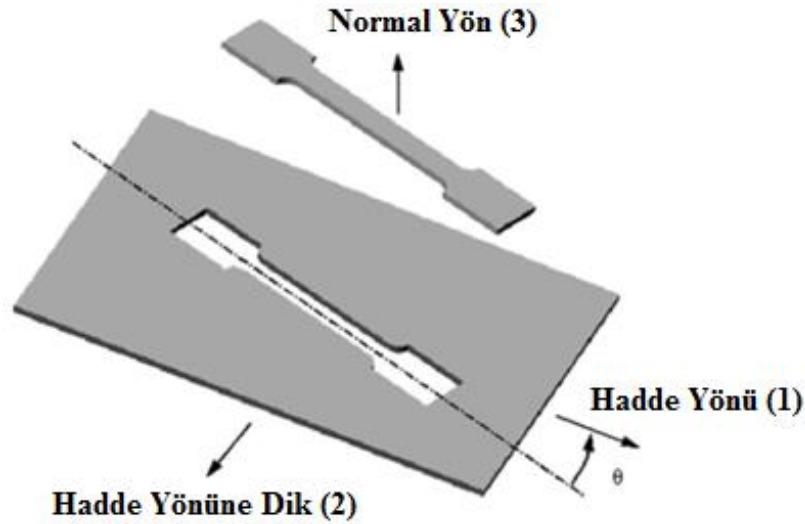
denmektedir. Anizotropi R harfi ile gösterilmektedir. Malzemenin eninde meydana gelen birim şekil değişimi, şekillendirme esnasında meydana gelmektedir ve $\epsilon_w = \ln(w/w_0)$ formülüyle bulunur. Diğer taraftan malzemenin kalınlığındaki birim şekil değiştirme ise $\epsilon_t = \ln(t/t_0)$ formülü ile bulunmaktadır ve bu orana anizotropi denilmektedir. w_0 olarak bulunan değer ilk genişliktir ve deformasyon sonrasında ölçülen genişlik değeri ise w ile gösterilmektedir. t değeri deformasyon sonrasında ölçülen kalınlık değeridir ve t_0 değeri ise ilk kalınlık değerini göstermektedir. Yapılan ölçümler neticesinde malzemenin genişliğinde ve boyundaki değişimler belirlenebilir. Malzemenin kalınlığında meydana gelen değişimler ise hacmin korunumuna göre Eşitlik (2.1) veya (2.2)'den hesaplanır.

$$wtl = w_0 t_0 l_0 \quad (2.1)$$

$$t/t_0 = (w_0 l_0)/(wl) \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.3) kullanılarak malzemenin anizotropi değeri bulunur.

$$R = \ln(w/w_0) / \ln(w_0 l_0 / wl) \quad (2.3)$$



Şekil 2.3. Çekme numunelerinin haddeleme yönü ile belirli açı yaparak gösterilmesi

Özellikle sac malzemelerin haddeleme işlemi ile üretilmesi sırasında içyapısında tanelerin farklı yönlenmeleri sonucunda anizotropi özelliği gösterdiği görülür. Hadde yönüne göre içyapıda başlangıçtaki dislokasyonların haddeleme yönüne göre değişmesi

ve malzemelerin içyapısında bulunan tanelerin hadde yönünde deforme edilmesi, malzemenin mekanik özelliklerinin farklı olmasına neden olmaktadır. Bir malzemenin anizotropik özelliklerini belirleyebilmek için genel olarak Şekil 2.3'te gösterilen sac malzemenin farklı açılarda (Literatürde bu özelliklerin saptanması için geliştirilen modeller hadde yönü 0°, diyagonal yön 45° ve hadde yönüne dik 90° doğrultularında olmak üzere hazırlanan üç adet deneyde kullanılan malzemelerden elde edilen doneler kullanılmaktadır) hazırlanan çekme numuneleri kullanılmaktadır. Bu açılarda hazırlanan numunelere çekme deneyi yapılarak numunelerin mukavemetleri, akma gerilmeleri, birim şekil değiştirme oranları ile anizotropi katsayıları tespit edilmektedir. Deformasyonlar sac şekillendirme işlemlerinde malzemenin tek bir doğrultusunda oluşmayabilir.

Anizotropi değerleri yöne bağlı olarak değişen ve genelde R_0 , R_{45} ve R_{90} olarak gösterilen değerlerdir. Bu değerlerde hadde yönünü, hadde yönüne 45° açı yapmış yönü ve hadde yönüne 90° dik olarak hazırlanan deney numunelerinin anizotropi değerlerini belirtmektedir. Sac bir malzemenin deneyleri yapıldığında eğer elde edilen bu sonuçlar birbirlerinden farklı çıktığı takdirde planar (düzlemsel) anizotropi olarak isimlendirilir. Derin çekme işleminde ortaya çıkan bir hata olan kulak oluşumu gibi sorunların meydana gelmesine neden olmaktadır. Eşitlik (2.4)'de bu ifade gösterilmektedir.

$$\Delta R = (R_0 + R_{90} - 2R_{45})/2 \quad (2.4)$$

Sac bir malzemenin deneyleri yapıldığında elde edilen anizotropi sonuçları tüm yönlerde birden farklı çıkarsa ve diğer tüm yönlerde aynı olursa normal anizotropi olarak isimlendirilir ve eşitlik (2.5) ile ifade edilir.

$$R = (R_0 + R_{90} + 2R_{45})/4 \quad (2.5)$$

Planar (düzlemsel) anizotropi pozitif yönde veya negatif yönde normal değerden daha büyük olduğu takdirde şekillendirilen malzemedeki çeşitli hatalar meydana gelebilir. Bunlar başlıca asimetriklik ve kulaklanma hatalarıdır. Normal anizotropi değeri daha büyük değerde olursa çekme deneylerinde malzemenin genişliğinde meydana gelen deformasyonun kalınlıktaki deformasyondan büyük olduğu gözlemlenir. Bu gözlem

neticesinde ise malzemenin kalınlık yönünde büyük mukavemet gösterdiğine ulaşılabılır. Normal anizotropi değerinin büyük olması nedeniyle bir malzemeye derin çekme işlemi uygulanırsa malzemenin incelmeye karşı mukavemeti artar ve bu özellik sayesinde derin parçaların elde edilmesine imkan sağlanmış olur. Ayrıca normal anizotropi değerinin büyük olması malzemelerde oluşabilecek hataların meydana gelmesini en aza indirger. Bu hatalar malzeme yüzeyinde oluşan kırışıklıklar ve dalgalanmalardır.

Haddeleme yöntemiyle mekanik özelliklerin değişmesine etki eden konulardan bir tanesi de malzemenin üretim yönüdür. Eğer üretilen malzemenin hadde yönüne göre bazı özellikleri değişiyorsa bu malzeme anizotropiktir denir. Sac metal şekillendirme işlemlerinde kullanılan simülasyonlarda kullanılmakta olan modellerin, malzemenin anizotropik olduğunu belirleyebilmesi için simülasyon programlarından elde edilen sonuçların doğruluğunun yüksek olması ve bu özelliğin tam bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Bir malzemenin anizotropik özellikler taşıdığını anlayabilmek için en az hadde yönünde, 45° ve hadde yönüne dik olmak üzere 3 adet numune kullanılmalıdır. Bir malzemenin anizotropi değerini belirleyebilmek için farklı anizotropi yönlerinde hazırlanan çekme numuneleri (Haddeleme yönüne 0°, 45°, 90° veya daha dar olan 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° aralıklarda deney numuneleri) kullanılmaktadır (Toros, 2013).

2.4 Akma Yüzeyi

Akma yüzeyi malzeme üzerine uygulanan gerilim neticesinde akmanın başlayacağı gerilim değerini tahmin etmemizi sağlar. Eğer asal gerilmeler çizilen akma yüzeyindeki çizgide veya dışında yer alıyorsa, bu gerilim değerinin malzemedeki akma, yani kalıcı (plastik) şekil değişimine neden olacağı anlaşılmaktadır. Haddeden geçirilmiş sac malzemelerin akma yüzeylerinin modellerle teorik bir şekilde veya deney yöntemiyle belirlenmesi gerekir. Çünkü akma yüzeyinin belirlenmesi malzemenin plastik şekillendirme kabiliyetinin belirlenebilmesi için gerekli olan bir sınır diyagramıdır. Malzemeler için kalıp üretiminden önce bu malzemelerin simülasyon çalışmalarında deformasyon oranlarının değişmesi ve oluşan deformasyonun tiplerinin bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca şekillendirme sonrasında üzerine yük uygulanmış malzemeye etki eden yük kaldırılır ve oluşan geri esneme miktarı ölçülür. Bir malzemenin akma

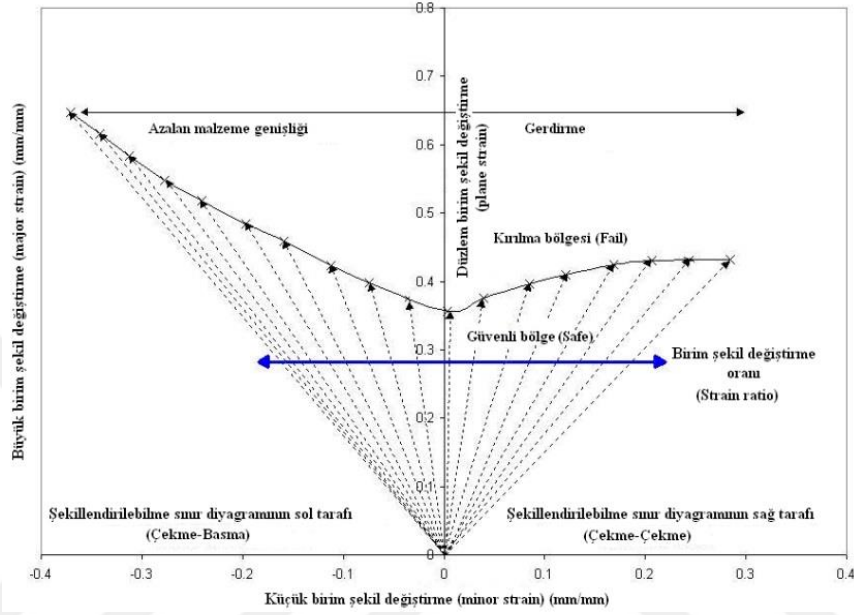
yüzeyinin belirlenebilmesi için tek eksenli çekme deneyi uygulanır. Çekme deneyi ve hidrolik şişirme deneyleri için haddeleme yönünde ve haddeleme yönüne dik çekme deney numuneleri kullanılmaktadır.

2.5 Malzemelerde Şekillendirme Sınır Diyagramları

Sac malzemelerin farklı şekillendirme sınırlarının göstermiş olduğu davranışları gösteren diyagramlara denir. Bu diyagramlar major ve minor birim şekil değiştirme şeklinde ifade edilmektedir. Malzemeye etki eden kuvvetleri birim şekil değiştirme cinsinden ifade eder. Şekillendirme sınır diyagramı; basit çekme deneyini, düzlem birim şekil değiştirmeyi ve iki eksenli gerdirme hallerini içermektedir. Genellikle malzemelerin şekillendirilebilirliği boyun vermenin başladığı noktaya göre tayin edilmektedir. Bu noktadan sonra malzeme kırılmasa da, malzemenin nasıl bir davranış içinde bulunacağı tam olarak belirlenemediğinden dolayı boyun verme noktası genelde sınır değer olarak belirlenmektedir. Şekillendirme sınır diyagramı şekil verme esnasında ortaya çıkabilecek problemlerin analizinde ve çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca en önemli kullanım alanı metallerin şekillendirilebilirliğinin değerlendirilmesidir. Herhangi bir malzemenin şekillendirme sınır diyagramı belirlenmek istenirse sac malzemelerden farklı şekillerde kesilmiş deney numunelerinin üzerine gridler uygulanır ve şekil değiştirme işlemi tamamlandıktan sonra bu gridlerin şekil değişimi ölçülerek ilk durumları ile karşılaştırılır. Bu sayede diyagramlar belirlenmiş olur. Bütün geometrilerin şekil değişimi incelenerek şekillendirme sınır diyagramı deneysel olarak elde edilmiş olur. Deney süreci oldukça zaman alıcıdır ve özel ölçüm sistemleri gerekmektedir. Keeler ve Backofen ile Goodwin şekillendirme sınır diyagramları hakkında ilk çalışmalarını yapmışlardır. Keeler ve Backofen bu diyagramın sağ kısmını yani major ve minor birim şekil değiştirme oranlarının pozitif olduğu kısmı ele alarak gelişmesinde katkı sağlamışlardır. Major ve minor birim şekil değişiminin negatif olduğu, yani şekillendirme sınır diyagramının sol kısmını ise Goodwin araştırıp geliştirmiştir.

Bir şekillendirme sınır diyagramının oluşturulabilmesi için kullanılan sac malzemenin boyun verdiği andaki birim şekil değiştirme oranlarının bilinmesi gerekmektedir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi herhangi bir şekillendirme sınır diyagramının oluşturulabilmesi için deneyler yapmak gereklidir. Bu yüzden defarklı şekillerde ve ebatlardaki numuneler

oluşturulur ve deneye tabi tutulur. Kullanılan geometri sayısının fazla olması diyagramın daha net bir şekilde elde edilmesine yardımcı olur. Bu diyagramların elde edilebilmesi için kullanılan deney numuneleri için farklı şekillerde geometrik yapılarında kullanılabilen bir durumudur. En önemli konulardan bir tanesi ise ŞSD'leri oluşturabilecek kadar birim şekil değiştirme oranlarının oluşturulabilmesidir (Uysal ve Öztürk, 2010).



Şekil 2.4. Şekillendirme sınır diyagramı (Uysal ve Öztürk, 2010)

2.6 Mekanik Özelliklerin Modellenmesi

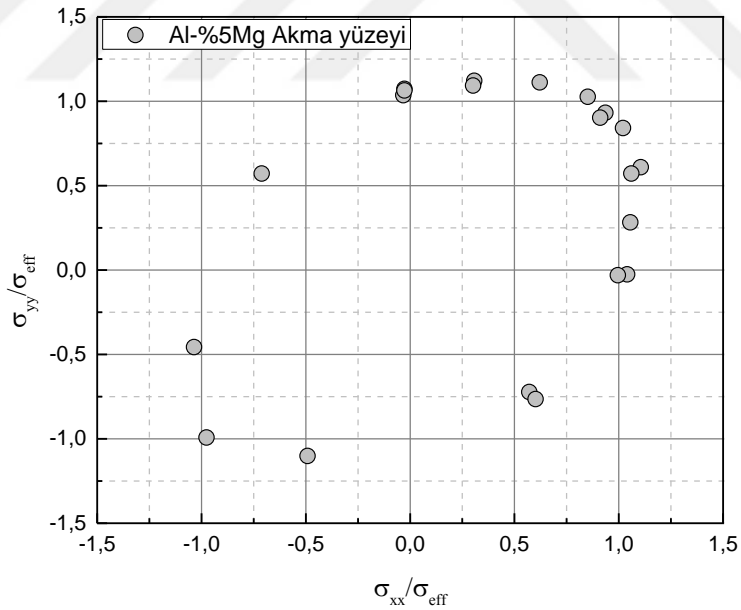
Son zamanlarda sonlu elemanlar yazılımlarının sac metal şekillendirme işlemlerinde kullanım alanları giderek artmaktadır. Sac metal malzemenin şekillendirilmesi esnasında karşılaşılabilecek problemlerin fazlaca bir kısmı simülasyon programları ile önceden tahmin edilebilmektedir. Ayrıca kalıp imatları için hazırlanan tasarımlarda bu simülasyonlardan çıkan sonuçlara göre uygulanmaktadır. Simülasyonla ilgili çalışmalarının doğru bir şekilde yapılabilmesi için simülasyonda kullanılan malzeme modellerinin mümkün oldukça doğru seçilmesi gerekmektedir. Malzemelerin belirli bir yük altında nasıl davranacağını en iyi biçimde ortaya koyan modellerin kullanılması büyük önem arz etmektedir. Bir malzemenin çeşitli yükler veya kuvvetler altında nasıl

davranacağını en iyi şekilde ifade eden matematiksel denklemlere malzemenin modeli denmektedir (Toros, 2013).

2.7 Akma Yüzeyinin Modellenmesi

Bir malzemenin üzerine uygulanan yük neticesinde malzemede oluşacak elastik ve plastik şekil değişiminin nerede bulunacağını göstermek için hazırlanan diyagramlara akma yüzeyi denmektedir. Bir malzemenin plastik şekil değişimine başlama noktası, gerilme deformasyon eğrisinden yola çıkarak kolaylıkla bulunabilir. Çok eksenli gerilme durumlarında plastik deformasyonun başlangıç noktasının tayin edilebildiği bir gerilme birim deformasyon eğrisi yer almamaktadır (Şekil 2.5).

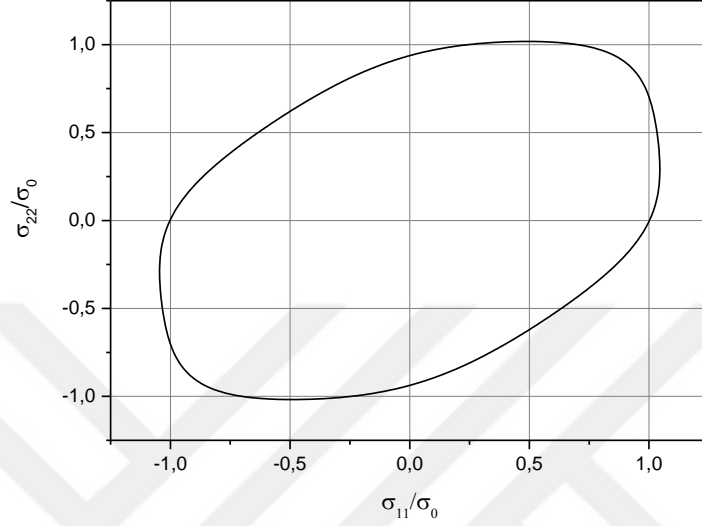
Şekil 2.5’de alüminyum alaşımına ait bir akma yüzeyi eğrisi yer almaktadır. Elde edilen akma yüzeyinde tek eksenli çekme gerilmesi, iki eksenli çekme gerilmesi, basma gerilmesi ve kayma gerilmesi durumlarının hepsini içermektedir (Toros, 2013).



Şekil 2.5. Akma yüzeyinin deneysel elde edilişi (Kim vd., 2007)

Şekil 2.6’da deneysel olarak belirlenmiş örnek bir akma yüzeyi gösterilmiştir. Bu grafikte sac malzemelerde kalınlık yönünde meydana gelen gerilmeler sıfır kabul edildiğinden düzlem gerilme durumu gözükmemektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi belirtilen özelliklerin elde edilen akma yüzeyinde var olduğu görülmektedir. Meydana gelen

eğrinin iç tarafı malzemede henüz plastik şekil değiştirmenin meydana gelmediğini, eğrinin dışında kalan bölge ise plastik şekil değiştirmenin meydana geldiğini ifade etmektedir.



Şekil 2.6. Deneysel olarak belirlenmiş örnek bir akma yüzeyi

Literatürde yaygın olarak çalışılan konuların arasında akma yüzeylerinden elde edilen sonuçlara göre bazı parametrelerin kullanılabilmesi ve önceden tahmin edilebilmesine yönelik bazı çalışmaların olduğu bilinmektedir. Malzemenin plastik şekil değişiminin tanınmasında akma yüzeylerinin modellenmesi oldukça önemlidir. Özellikle son yıllarda kullanılan akma kriterleri sayesinde malzemelerin fiziksel olarak nasıl davranacağı belirlenebilmektedir. Akma fonksiyonlarının sonlu elemanlar analizinde kullanılması malzemenin deformasyona uğraması sonrasında meydana gelen iç gerilmelerin hesaplanması ve tahmin edilmesinde kullanılmaktadır.

2.7.1 Hill-48 Kuadratik Akma Kriteri

Haddelemenin etkisi ile malzemelerin iç yapılarında taneler farklı yönlerde ve farklı oranlarda uzarlar. Bu durum sac malzemelerde anizotropik özellik görülmesine neden olmaktadır. Bu anlamda kullanılan simülasyon programlarında anizotropik özelliklerin kullanıldığı modelleri seçmek, ortaya çıkan sonuçların doğruluğunu artırmaya neden olacaktır.

Simülasyon programlarında da kullanılan anizotropik akma kriterlerinden en yaygın olanlardan bir tanesi Hill48 (Hill, 1948) akma kriteridir. Hill48 akma kriteri basit ortotropikanizotropi durumunu tanımlamaktadır. Buna göre her noktada karşılıklı dik olan üç simetri düzlemi vardır ve bu düzlemlerin kesişimi, anizotropinin asal eksenleri olarak bilinmektedir. Bu asal eksenler kartezyen koordinatlarda referans eksenler olarak seçilebilir. Bauschinger etkisi ihmal edilip plastik potansiyeli ifade etmek için homojen küp şeklinde sonlu büyüklükteki bir eleman seçilebilir. Bu eleman üzerindeki hidrostatik kuvvetlerin akma üzerinde bir etkisi yoktur. Hidrostatik kuvvetler hacim değişimine neden olmaktadır. Yapılan kabuller ışığında Hill48 akma kriteri aşağıdaki formu alır (2.6).

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.6)$$

Bu formülde ifade edilen F , G , H , L , M , ve N anizotropi sabitleridir. Bu katsayılar deney sonucunda elde edilebilmektedir. Sac metal şekillendirme işlemlerinin çoğunda düzlem gerilme durumunun kabulünün yapıldığı daha önce de belirtilmişti. Yani düzlem gerilme durumu, malzemenin bir tarafında ortaya çıkan gerilme değerlerinin diğer tarafta ortaya çıkan gerilme değerlerine göre fazla küçük olmasından ihmal edilmesidir. Bu nedenle genelde sac malzemelerde kalınlıkta oluşan gerilme değerleri ihmal edilir ve bu durum hesaplamala yaparken bize kolaylık sağlamaktadır. Hill-48 akma fonksiyonu Eşitlik (2.7)'deki gibidir;

$$2f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.8)'teki F , G , H , ve N parametreleri, sac malzemelerden deneysel olarak elde edilmiş olup r_0 , r_{45} , r_{90} anizotropi değerleri cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_{90})}, \quad G = \frac{1}{(1+r_0)}, \quad H = \frac{r_0}{(1+r_0)}, \quad N = \frac{(r_0 + r_{90})(1+2r_{45})}{2r_{90}(1+r_0)} \quad (2.8)$$

Bununla beraber bu kriter normal gerilme ve kayma gerilmeleri cinsinden Eşitlik (2.9)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_{11}^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_{11} \sigma_{22} + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{22}^2 + \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)} (2r_{45}+1) \sigma_{12}^2 = \sigma_0^2 \quad (2.9)$$

Hill48 akma kriteri asal gerilmeler cinsinden yazılmak istenirse, $\sigma_{12}=0$ olmaktadır ve Eşitlik (2.10)' teki gibi yazılabilmektedir.

$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_1 \sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_2^2 = \sigma_0^2 \quad (2.10)$$

2.7.2 Barlat89 Akma Kriteri

Barlat ve Lian'nın (1989) geliştirdikleri akma kriterinin başlangıç noktası Hosford'un izotropik malzemeler için oluşturduğu akma kriteridir (2.6). Düzlemsel gerilme durumu için Hosford akma kriteri Kartezyen koordinatlarda aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\phi = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m = 2\sigma_y^m \quad (2.11)$$

Akma gerilmesinin tek eksenli çekme deneyi sonucuna göre değeri σ_y dir. K_1 ve K_2 değerleri ise şu şekilde yazılabilir.

$$K_1 = \frac{\sigma_x + h\sigma_y}{2}, \quad K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + h\sigma_y}{2}\right)^2 + p^2 \tau_{xy}^2} \quad (2.12)$$

$$a = 2 - c = 2 - 2\sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \frac{r_{90}}{1+r_{90}}}, \quad h = \sqrt{\frac{r_0}{1+r_0} \frac{1+r_{90}}{r_{90}}} \quad (2.13)$$

A, c, ve h anizotropik malzeme sabitleridir. Bu değerleri anizotropi değerleri cinsinden (r_0 , r_{45} ve r_{90}) Eşitlik (2.13)'deki gibi ifade edebilmek mümkündür. Tek eksenli çekme deneyi uygulamasında kayma gerilmesi değeri mevcut olmadığından p değeri önemini yitirmektedir (Toros, 2013).

2.7.3 Düzlem Gerilme Akma Fonksiyonu Yld2000-2d

Barlat vd. (2003) tarafından hadde işlemini görmüş sac malzemelerin davranışlarını anizotropiklik yönünden belirtmek üzere diğer bir akma fonksiyonu düzenlenmiştir ve oluşturulan fonksiyona Yld2000-2d ismi verilmiştir. Barlat89 akma kriteri ile kıyaslandığında elde edilecek malzemenin anizotropik özelliklerinin belirlenebilmesi için 8 adet parametre bulunmaktadır. Bu parametreler deneysel olarak belirlenir ve farklı yönlerdeki akma gerilmeleri ($\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}, \sigma_b$) ve anizotropi (r_0, r_{45}, r_{90}, r_b) değerleri kullanılarak belirlenir. Burada σ_b ve r_b değerleri dengelenmiş iki eksenli gerilme ($\sigma_{11} = \sigma_{22}$) durumunda elde edilmektedir. İki eksenli gerilme değerlerinin belirlenebilmesi için teorik yöntemler uygulanmıştır. Hill48 akma kriteri için $\sigma_b = \sigma_{11} = \sigma_{22}$ olarak yazılır. Belirlenen parametrelerde iki eksenli gerilme değeri bu şekilde çözdürülebilmektedir. Bu değerlerin kabulü neticesinde haddeleme yönünde oluşan akma gerilmesi değeri ile normalize edilen iki eksenli gerilme değeri $\sigma_b = 1,018$ olarak tespit edilmiştir.

Yld2000-2d akma fonksiyonu denkleminin genel hali şu şekildedir;

$$f^{\frac{1}{M}} = \left\{ \frac{\phi}{2} \right\}^{\frac{1}{M}} = \bar{\sigma} \quad (2.14)$$

Burada $\bar{\sigma}$ efektif gerilmeyi gösterir. M değeri malzemelerin kristalografik yapısına göre belirlenir. Hosford (1972) yaptığı çalışmada HMK yapılı malzemelere ait ϕ ifadesi;

$$\phi = |\tilde{S}'_I - \tilde{S}'_{II}|^M + |\tilde{S}''_I + 2\tilde{S}''_{II}|^M + |2\tilde{S}''_I + \tilde{S}''_{II}|^M \quad (2.15)$$

Burada \tilde{S}'_k ve \tilde{S}''_k ($k=1,2$) deviatorik gerilme tensörü \tilde{s} 'in asal değeridir. İki lineer dönüşüm uygulayarak elde edilen denklem;

$$\tilde{s}' = C' \cdot s = C' \cdot T \cdot \sigma = L' \cdot \sigma \quad (2.16)$$

$$\tilde{s}'' = C'' \cdot s = C'' \cdot T \cdot \sigma = L'' \cdot \sigma \quad (2.17)$$

Burada C' ve C'' anizotropik sabitlerini içerir ve T, Cauchy gerilme tensörü olan σ 'yı deviatörü olan s tensörüne dönüştürmektedir. Bu dönüşüm için kullanılan lineer dönüşüm matrisleri Eşitlik (2.18) ve (2.19)'de şu şekilde verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_{11} \\ \dot{L}_{12} \\ \dot{L}_{21} \\ \dot{L}_{22} \\ \dot{L}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 & 0 \\ -1/3 & 0 & 0 \\ 0 & -1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_7 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{L}_{11} \\ \ddot{L}_{12} \\ \ddot{L}_{21} \\ \ddot{L}_{22} \\ \ddot{L}_{66} \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} -2 & 2 & 8 & -2 & 0 \\ 1 & -4 & -4 & 4 & 0 \\ 4 & -4 & -4 & 1 & 0 \\ -2 & 8 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_8 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Burada yer alan α_1 - α_8 değerleri anizotropik katsayıları vermektedir (Toros, 2013).

2.7.4 Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi

F , G , H , L , M ve N parametreleri malzemenin akma gerilme değerlerine göre bulunmakta olup r_0 , r_{45} , r_{90} değerleri kullanılarak ta belirlenebilmektedir. Bununla birlikte bu parametreler kullanılarak akma yüzeyi bulunur. Bu duruma ek olarak F , G , H ve N parametrelerinin belirlenebilmesi için hata fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu hata fonksiyonu minimize edilerek parametrelerin belirlenebilmesi sağlanır. Bu çalışmanın temel amacı, akma yüzey fonksiyonlarını kullanarak katsayıların belirlenebilmesidir. Parametrelerin belirlenebilmesi için tanımlanan hata fonksiyonu aşağıdaki şekilde verilmiştir;

$$\varepsilon(\text{parametre}) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{Y_{\varphi_i} - \sigma_{\varphi_i}^{den}}{\sigma_{\varphi_i}^{den}} \right)^2 + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\bar{r}_{\varphi_i} - r_{\varphi_i}^{den}}{r_{\varphi_i}^{den}} \right)^2 = \text{Min} \quad (2.20)$$

Burada φ_i malzeme açısını gösterir. Fonksiyonda ki Y_{φ_i} değeri farklı yönler için hesaplanan akma gerilmelerini ve \bar{r}_{φ_i} ifadesi ise farklı anizotropi değerlerini göstermektedir ve eşitlik (2.21) ve (2.22) kullanılarak belirlenmiştir.

$$Y_{\varphi} = \frac{\bar{\sigma}}{F_{\varphi}} \quad (2.21)$$

$$\bar{r}_{\varphi} = \frac{\bar{\sigma}}{Y_{\varphi} \left(\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{11}} + \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma_{22}} \right)} - 1 \quad (2.22)$$

Bu değerlerin hesaplanmadan önce efektif gerilme fonksiyonunda tanımlanan gerilme değerleri haddeleme açısının bir fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilmelidir.

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= Y_{\varphi} \cos^2(\varphi) \\ \sigma_{22} &= Y_{\varphi} \sin^2(\varphi) \\ \sigma_{12} &= Y_{\varphi} \sin(\varphi) \cos(\varphi) \end{aligned} \quad (2.23)$$

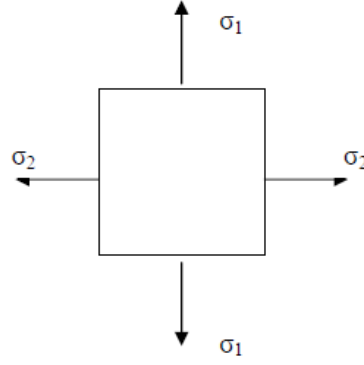
Eşitlik (2.23) efektif gerilme ifadesinde yerine yazıldıktan sonra Y_{φ} çekilmektedir. Burada belirtilmiş olan minimizasyon yöntemi ile Barlat89 akma kriterinin katsayılarının belirlenmesi için de kullanılabilir.

2.8 Sınır Diyagramlarının Nümerik Olarak Belirlenmesi

Malzemelerin şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenme aşamasında yapılan deneylerin altyapı gereksiniminin olması ve bu deneylerin oldukça zaman almasından dolayı şekillendirme sınır diyagramları analitik modeller ile ifade edilmeye çalışılmıştır.

2.8.1 Swift Model

Swift (1952) hazırladığı tezde, deformasyon hızlarının artış gösterdiği bölgede bir kararsızlık noktası belirlemek istemiştir. Yaptığı bu çalışmada plastik kararsızlık bölgesini boyun vermenin başlamasıyla şekillendiğini kabul etmiştir. Boyun verme olayının başladığı noktadan sonra malzemenin kesit alanı düşmektedir ve buna ek olarak uygulanan kuvvette bir azalma söz konusu olacaktır.



Şekil 2.7. İki eksenli gerdirme durumu

Uygulanan kuvvetin en yüksek değere ulaştığı anda boyun vermenin başlangıç noktası başlamış olur. Bu durumu şu şekilde matematiksel olarak ifade edebiliriz. Bu ifade eşitlik (2.24) 'da gösterilmiştir.

$$dF = 0 \quad (2.24)$$

Swift boyun verme başlangıç durumu aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir.

$$\frac{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)^2}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_e} \left(\sigma_1 \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \sigma_2 \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)} = \frac{d\sigma_e}{\sigma_e d\varepsilon_e} \quad (2.25)$$

Eşitlik (2.25) aşağıdaki gibi de yazılabilmektedir.

$$\frac{d\sigma_e}{\sigma_e} = \frac{d\varepsilon_e}{Z_d} \quad (2.26)$$

Z_d değeri için ise şu ifade yazılabilmektedir.

$$\frac{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)^2}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_e} \left(\sigma_1 \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \sigma_2 \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)} = \frac{1}{Z_d} \quad (2.27)$$

Pekleşme kanununun Ludwik-Hollomon denklemiyle birlikte değerlendirilmesi durumunda,

$$\sigma_e = K \varepsilon_e^n \quad (2.28)$$

Eşitlik (2.28) aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\frac{d\sigma_e}{\sigma_e} = \frac{Kn\varepsilon_e^{n-1} d\varepsilon_e}{K\varepsilon_e^n} = \frac{d\varepsilon_e}{Z_d} \quad (2.29)$$

Eşdeğer limit birim deformasyon için Eşitlik (2.30) elde edilmektedir.

$$\varepsilon_e^* = nZ_d \quad (2.30)$$

başka bir ifade ile;

$$\varepsilon_e^* = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_e} \left(\sigma_1 \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \sigma_2 \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)}{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)^2} n \quad (2.31)$$

Levy-Mises eşitlik bağıntısı kullanılarak asal eksenlerdeki birim deformasyonlar şu şekilde gösterilir.

$$\frac{\varepsilon_1}{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \right)} = \frac{\varepsilon_2}{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)} = \frac{\varepsilon_3}{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_3} \right)} \quad (2.32)$$

Considere'in (1885) hazırladığı kritere göre, malzemelerde boyun verme, pekleşme değerinin malzemedeki birim deformasyona eşit olduğu durumda başlamaktadır. Bu kriterin kullanılması Ludwik- Hollomon kuralına uyan malzemelerde geçerlidir. Swift ise iki yönden birden gerdirilmeye çalışılan bir elemanı incelemiştir ve yönlerin her biri için Considere kriterini uygulayarak iki yön için de limit birim deformasyon değerlerini şu şekilde hesaplamıştır.

$$\varepsilon_1^* = \frac{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \right)}{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)^2} n \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_2^* = \frac{\sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)^2 + \sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)}{\sigma_1 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} \right)^2 + \sigma_2 \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right)^2} n \quad (2.34)$$

Burada f akma fonksiyonudur.

2.8.2 Hill Model

Hill (1952) ince sac malzemelerde gerilme ve birim deformasyonun süreksiz olması ve kalıcı boyun verme durumunu incelemiştir. Bu durum altında kendine ait bir kriter geliştirmiştir. Teorisinde düzlem gerilme durumunu esas alarak, kalıcı boyun vermenin artan birim deformasyon oranının negatif olduğu esnada oluştuğunu belirtmiştir. Bu kriter ise şekillendirme sınır diyagramının sol kısmını tahmin edebilmemizi sağlamaktadır. Bu şekildeki kararsızlık noktaları malzemeye ve yükleme tipine bağlı olarak, malzemeye uygulanan en yüksek yükten önce yada sonra oluşabilmektedir. Boyun verme durumunun kalıcı olması durumunda ise malzemenin kesit alanında oluşan azalma ihmal edilebilir.

Tek eksenli deney esnasında kalıcı boyun verme olayı yükleme boyunca oluşmaktadır. Hill, uzamanın olmadığı yönde boyun vermenin olduğunu varsaymıştır ve bu yüzden bu

bölgede meydana gelen deformasyon miktarının incelmeye olarak kabul edildiğini belirtmiştir.

Hill'in kalıcı boyun verme kriterinin genelleştirilmiş hali şu şekilde gösterilebilir.

$$\frac{\left[\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right]}{\frac{\partial f}{\partial \sigma_e}} = \frac{d\sigma_e}{\sigma_e d\varepsilon_e} \quad (2.35)$$

Limit birim deformasyonların bulunabilmesi için Swift'in uyguladığı metot kullanılır. Eşdeğer sınır birim deformasyon ifadesini gösterecek olursak;

$$\varepsilon_e^* = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_e}}{\left[\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right]} n \quad (2.36)$$

Yönleri farklı olan sınır birim deformasyonları şu şekilde ifade edilebilmektedir.

$$\varepsilon_1^* = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_1}}{\left[\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right]} n \quad (2.37)$$

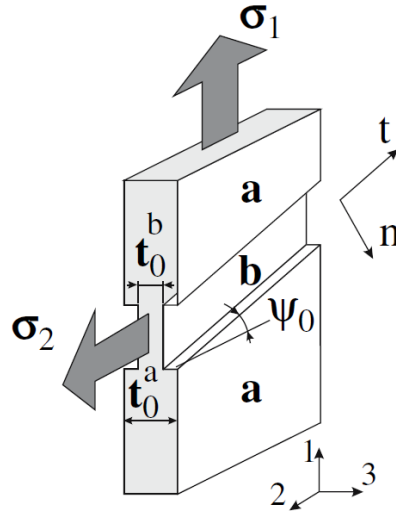
$$\varepsilon_2^* = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_2}}{\left[\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} + \frac{\partial f}{\partial \sigma_2} \right]} n \quad (2.38)$$

Farklı iki yöndeki birim deformasyon miktarlarının toplanması durumunda ifadenin malzemenin pekleşme üsteli değerine eşit olduğu burada açıkça görülebilmektedir.

$$\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^* = n \quad (2.39)$$

2.8.3 M-K ve H-N Modelleri

Marciniak ve Kuczynski (1967), ŞSD'leri belirleyebilmek için malzemelerin iç yapılarında ve geometrilerinde bir homojensizlik tanımlamışlardır. Homojensizlik malzeme üzerinde açılan bir oyuk şeklinde hazırlanmıştır. Malzeme burada kalınlık bandı olan b bölgesi ve kalınlık bandının dışı olan a bölgesi olarak iki kısımda gösterilmiştir. Kalınlık bandında olan kısımdaki deformasyon ϵ_1^b , kalınlık bandının dışında olan kısımdaki deformasyon ise ϵ_1^a olarak belirtilmiştir. Şekillendirme sırasında $\epsilon_1^a / \epsilon_1^b$ oranı büyük olduğunda buradaki deformasyon malzemenin sınır değeri olarak kabul edilir. Oluşturulan ilk modelde malzemelerin iki eksenli gerilme durumları için ŞSD meydana getirilmiştir. Fakat sonraki zamanlarda Hutchinson ve Neale (1978) ŞSD'nin sol tarafını önceden belirleyebilir duruma getirmiştir. Oluşturulan yeni modelin diğerlerinden farkı malzeme kalınlık farkının yükleme tarafına göre farklı açılarda tanımlamasıdır ($\psi \neq 0$). Şekil 2.8'de M-K model $\psi = 0$ olması durumunu gösterirken, $\psi \neq 0$ olması durumu ise H-N modelini gösterir.



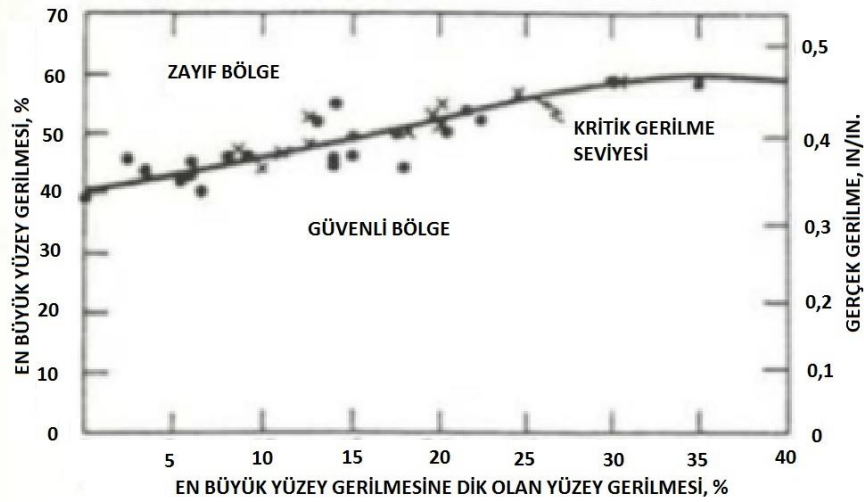
Şekil 2.8. M-K ve H-N modellerinde kullanılan geometrik ilişkiler

Yapılan bu çalışmada homojenlik açısı belirlenmiş ve oluşturulan ŞSD'nin şekil değişiminin negatif olduğu birim deformasyonu açıklayan bir açı tanımlanmıştır. Azrin ve Backofen ise 1970 yılında malzemeler için düzlem içerisinde meydana gelen gerdirme şeklinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir ve bunun sonucunda kalınlıkta meydana gelen homojensizlik oranı $t_0^a / t_0^b = 0,97$ ya da bu değerden daha düşük olması halinde M-K analizi ile deney sonuçlarının uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. M-K modelin

anlaşılabilirliği ve uygulanabilirliği kolaydır ama homojensizlik oranlarının daha farklı oranları değerlendirildiğinde deney sonuçları ile örtüşmediği ortaya çıkmaktadır. Bunun gibi sonuçlar Sowerby ve Duncan'ın 1971 yılında ve Marciniak vd.'nin 1973 yılında yapmış oldukları çalışmalarda da karşımıza çıkmaktadır. Sowerby ve Duncan 1971 yılında yaptıkları çalışmada bunun dışında birim deformasyon değerini değiştirebilen niteliklerden bir tanesinin de malzemenin anizotropik özelliği olduğunu öne sürmüştür.

2.8.4 Keeler ve Goodwin Model

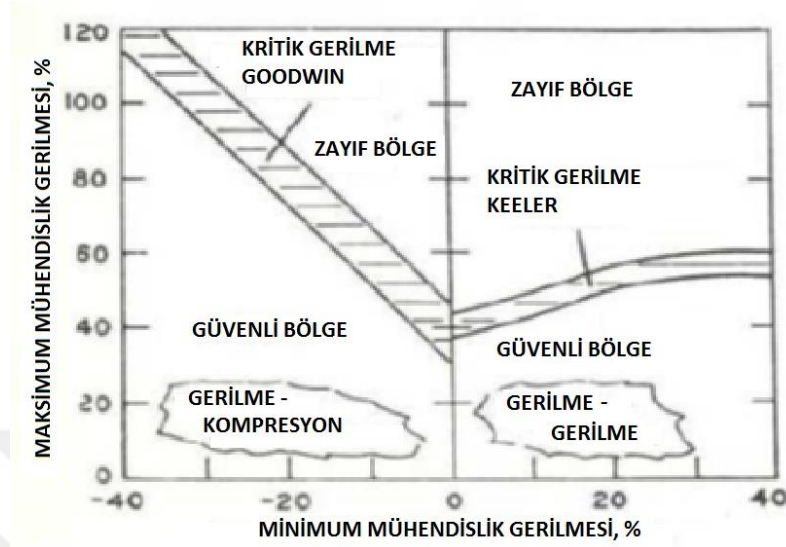
Keeler 1975 yılında bir çalışma yürüterek çalışmalarında Gensamer 'ın 1946 yılında yaptığı araştırmaları baz almıştır. Yapılan bu çalışmada bölgesel deformasyonları global indisler yerine kullanılması hakkında bir fikir yürütmüştür. Malzemeye deformasyon işlemine tabi tutmadan önce yuvarlak gridler yerleştirilmiştir. Bu daire şeklindeki gridler uygulanan deformasyon sonrasında elips şeklinde olmaktadır. Sonraki yıllarda Keeler şekillendirmeyi iki eksenli ($\epsilon_1 > 0$; $\epsilon_2 > 0$) belirlemiştir ve maksimum birim deformasyonları, minimum asal deformasyonlara denk gelecek durumda çizilmesini sağlamıştır. Keeler bu çalışmada malzeme üzerinde kırılma bölgesinde bulunan gridleri kullanmıştır ve bu durum karşılığında şekillendirme sınır diyagramı oluşturmuştur (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Keeler'in oluşturduğu ŞSD (Toros, 2013).

1968 yılında Goodwin şekil değişiminin negatif olduğu ($\epsilon_1 > 0$; $\epsilon_2 < 0$) bölgede bir takım testler yapmıştır. Bu durumda hedeflenen amaç tek eksenli birim deformasyon elde edebilmektir. Bu iki diyagram birlikte oluşturulursa elde edilen diyagram ϵ_1 ve ϵ_2 için

kırılma anındaki birim deformasyonları verir. Şu anda kullanılan ŞSD diyagramlarının temeli olan bu diyagram şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Keeler ve Goodwin'in tanımladığı ŞSD (Toros, 2013).

Daha sonra Keeler ve Brazier (1975) sonuçlarını aldıkları deneysel verileri kullanarak şu ifadeyi ortaya çıkarmışlardır.

$$\varepsilon_{10} (\%) = (23.3 + 14.13 t) \frac{n}{0.21} \quad (2.40)$$

Burada t malzeme kalınlığıdır ve mm cinsinden ifade edilir. ε_{10} ise mühendislik birim deformasyonudur. n değeri ise malzemenin pekleşme üstelini göstermektedir.

Elde edilen değerler ışığında ŞSD, ε_{10} (Düzlem birim deformasyon $\varepsilon_2=0$) belirtilen noktadan geçen iki doğru şeklinde anlatılmak istenmiştir. ŞSD' grafiğinin sol kısmındaki alan için doğruların eğimi 45° , sağ kısmındaki alan için ise yaklaşık 20° olarak belirlenmiştir.

2.8.5 NADDRG Model

Kuzey Amerika Derin Şekillendirme Grubu (NADDRG), şekillendirme sınır diyagramlarının şekillendirme sırasında kolay kullanıma sahip olabilecek bir bağıntı hazırlamışlardır. Bu bağıntı Keeler ve Goodwin modeline benzemektedir.

$$\varepsilon_{10}(\%) = (23.3 + 360 t) \frac{n}{0.21} \quad (2.41)$$

Burada ki t değeri $t \leq 0.125$ inc kullanılacak olan sac metalin kalınlık değerini göstermektedir. Bu model ele alındığında birim deformasyon bölgesinden iki çizginin çekilmesi gerekmektedir. Çizilen bu doğruların eğim derecesi ŞSD'nin sol tarafı için 45° , sağ tarafı için 20° olarak belirlenmektedir.

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

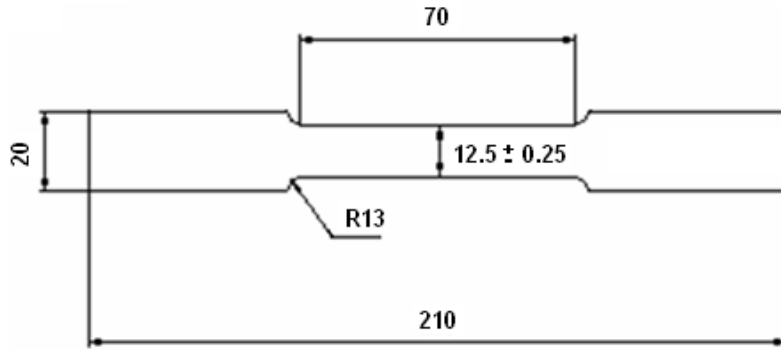
3.1 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Bu çalışmada deney malzemesi olarak Al6082T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyum olan Al6082T6 alüminyum alaşımını oluşturan kimyasal kompozisyon Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Al 6082T6 alaşımında bulunan malzemelerin ağırlıkça oranları

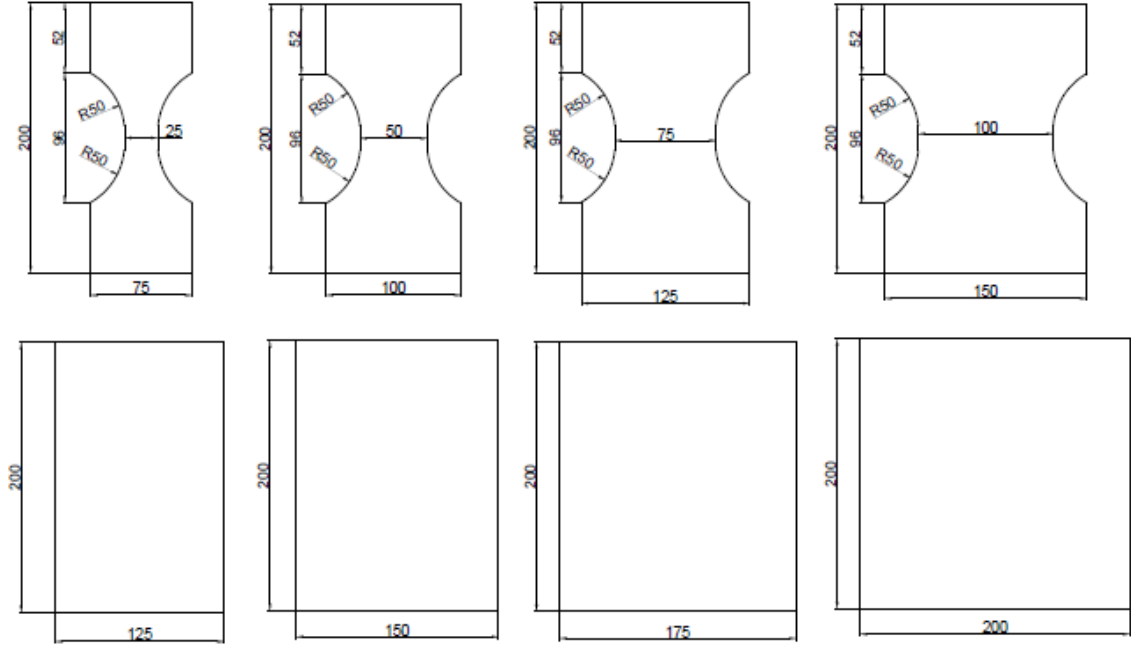
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Diğer	Al
0,5	0,7-1,3	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,2	0,15	0,15	Kalan

Bu çalışmada kullanılan çekme numuneleri 210 mm boyunda ve 20 mm eninde olarak sac Al6082T6 alüminyum alaşımından elde edilmiştir (Şekil 3.1). Bütün numuneler standartlara göre hazırlanmıştır. Malzeme yüzeyinde oluşabilecek çentik etkilerini minimuma indirebilmek amacıyla malzemeler lazer yöntemi ile kestirilmiştir. Kullanılan numunelerin kalınlıkları 1 mm ve 1,5 mm’dir.



Şekil 3.1. Çekme deneyinde kullanılan numunelerin ölçüleri (mm)

ŞSD deneylerinde kullanılan numuneler de malzeme yüzeyindeki çentik etkilerini minimuma indirmek amacıyla lazer yöntemiyle kesilmiş olup numunelerin geometrik özellikleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. ŞSD deneyinde kullanılan numunelerin ölçüleri (mm)

3.2 Çekme Deneyinde Kullanılan Numunelerin Hazırlanması

Çekme deneyleri yapılmadan önce lazer yöntemiyle kesilen deney numuneleri deney esnasındaki oluşabilecek hataları azaltmak amacıyla zımparalama yöntemiyle numunelerin üzerindeki çentikler giderilmiş ve çekme deneyi uygulanacak numunelerin yüzeylerine iki çizgi arası 50 mm olacak şekilde mihengir yardımı ile çizgiler çizilip deney için hazır hale getirilmiştir.

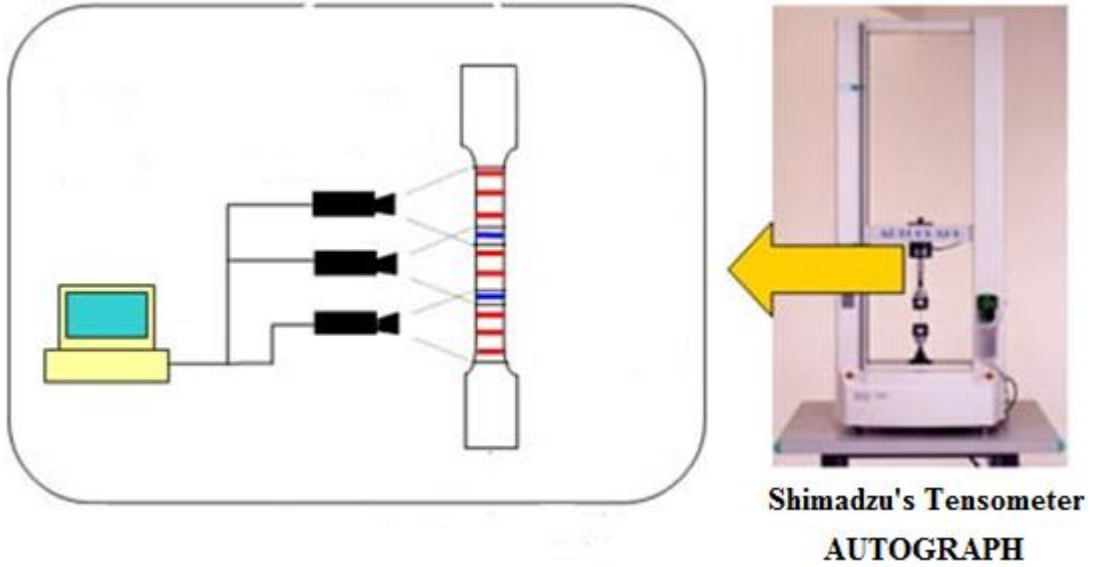
3.3 Çekme Deney Düzeneği

Çekme deneylerinde Shimadzu Autograph marka 100 kN değerinde çekme cihazı kullanılmıştır. Deneyler yapılırken malzemelerde oluşabilecek deformasyon miktarlarının ölçülebilmesi açısından mekanik temaslı deformasyon ölçerlere göre daha hassas sonuçlar elde edilebilen çekme deneyi uygulanacak numunelerin yüzeylerine çizilen çizgilerin yükleme sonucunda binde bir hassasiyetle yer değiştirme miktarını belirleyen kameralar ve yazılımdan oluşan video tip deformasyon ölçer kullanılmıştır. Fotoğraf 3.1’de deney düzeneği ve Şekil 3.3’de deformasyon ölçüm sisteminin şematik görünümü yer almaktadır.

Bu kapsamda kullanılan Al6082T6 alüminyum alaşımının şekillendirilebilme kabiliyetleri ve içyapıdaki değişimler farklı hızlarda (25 mm/dak ve 900 mm/dak) ve farklı kalınlıklarda (1 mm ve 1,5 mm) tek eksenli çekme deneyi uygulayarak belirlenmeye çalışılmıştır.



Fotoğraf 3.1. Çekme deney düzeneği



Şekil 3.3. Deformasyonu ölçme sistemi

3.4 Anizotropi Deney Numunelerinin Hazırlanması

Malzemelerin haddeleme yönüne bağlı olarak mekanik özelliklerinin değişmesine anizotropi denir. Yapılan bu çalışmada Al6082T6 alüminyum alaşımından hadde yönüne göre 0, 15, 30, 45, 60, 75 ve 90 derecelik 7 farklı numune kullanılmıştır. Deney numuneleri üzerine iki çizgi arası 10'ar mm olmak üzere 5 çizgi çizilmiştir (Fotoğraf 3.2).



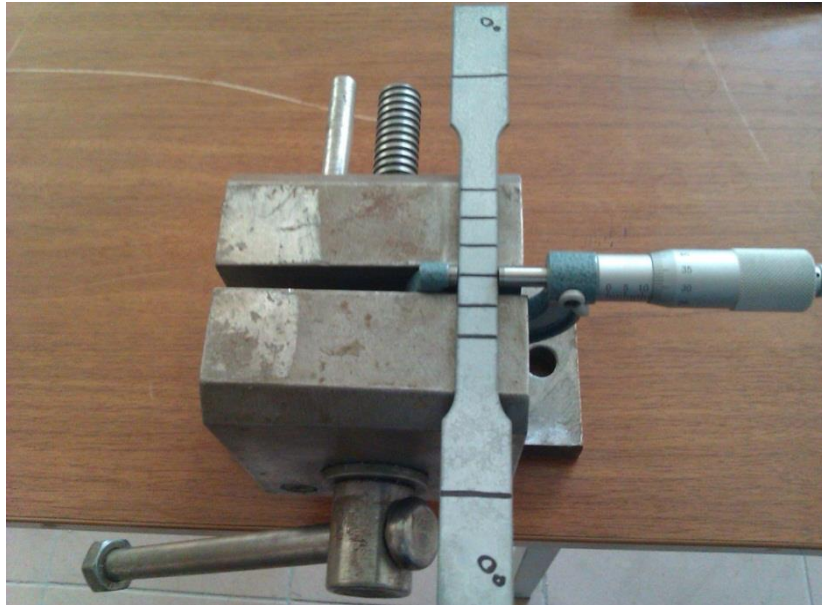
Fotoğraf 3.2. Anizotropi deney numunelerinin hazırlanması

Deney çalışmalarına başlamadan önce belirlenen Al6082T6 alüminyum alaşımından elde edilen deney numuneleri çekme işlemindeki performansını kontrol etmek ve çekme parametrelerini belirlemek için bir takım ön deneyler yapılmış ve en uygun çekme şartları belirlenmiştir. İlk olarak 0 derece (hadde yönü) deney numunesi kullanılarak çekme işlemi yapılmış ve aynı parametrelerle sırasıyla 6 numune üzerinde çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her deney parametresi için yeni numune kullanılarak 14 adet deney yapılmıştır. Bu deneylerde 7'si 1 mm 7'si 1,5 mm olmak üzere 14 adet deney numunesi kullanılmıştır (Fotoğraf 3.3).



Fotoğraf 3.3. Anizotropi deney numuneleri

Anizotropi deneylerinde çekme deneyindeki gibi deney numunesinin uzunluğunda meydana gelen değişim belirlenmeye çalışılmıştır. Bunu tespit edebilmek için video tip deformasyon ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin eninde meydana gelen daralma ise malzemenin ölçü boyu içerisinde 10'ar mm aralıklarla çizilmiş çizgilerin mikrometre vasıtası ile ölçülmesi neticesinde belirlenmiştir Fotoğraf 3.4'te deney numunesinin çenelerden alınarak mikrometre ile ölçümü gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.4. Anizotropilerin belirlenmesinde kullanılan yöntem

3.5 ŞSD Numunelerinin Hazırlanması

ŞSD numunelerinin limit birim deformasyon miktarlarının belirlenebilmesi için 1 mm ve 1,5 mm kalınlıklarda farklı geometrilerde ve farklı hızlarda uygulanmak üzere toplam 32 adet deney numunesi kullanılmıştır. Deney numunelerinin boyu 200 mm'dir. İç taraftaki oval kısmın sırası ile genişlikleri 25, 50, 75 ve 100 mm olacak biçimde düzenlenmiştir. Dikdörtgen şeklinde olan deney numunelerinin boyları ise 200 mm'dir. Genişlikleri ise sırasıyla 125, 150, 175 ve 200 mm'dir. Al6082T6 alaşımı için yapılan ŞSD deneyleri 25 mm/dak ve 900 mm/dak olmak üzere 2 ayrı şekillendirme hızında gerçekleştirilmiştir.

Numuneler şekillendirme işlemi yapılmadan önce, yüzeylerinde meydana gelecek şekil değişimlerinin ölçülebilmesi amacıyla birtakım geometrik desenlerde elektrokimyasal yöntemlerle veya serigrafi (ipek baskı) yöntemi ile yüzeylerinde motifler çizilmektedir. Hazırlanan bu tezde malzemelerin yüzeyine 2x2 mm'lik kare motifler serigrafi yöntemi ile oluşturulmuştur (Fotograf 3.5).



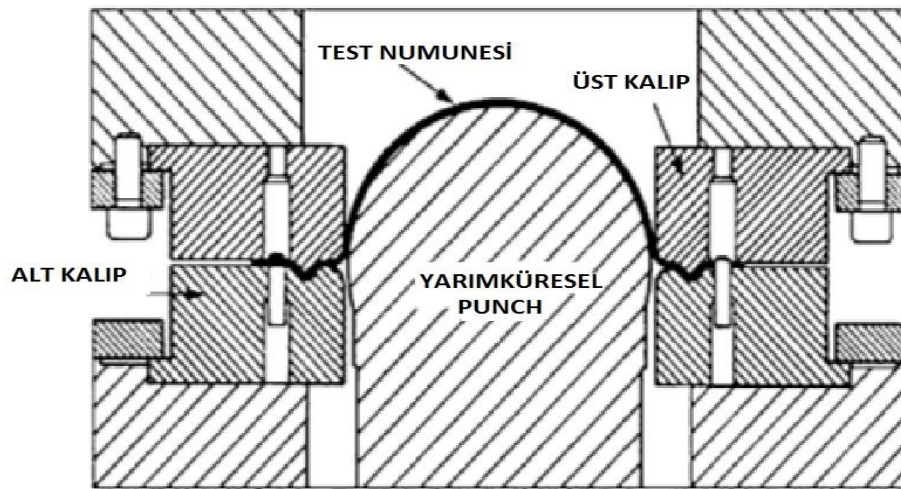
Fotograf 3.5. ŞSD deneyinde kullanılan numuneler

3.6 Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Belirlenmesi

Deneyde kullanılan numuneler küresel bir zimba yardımı ile şekillendirilerek oluşturulan motiflerde deformasyona uğratarak belirlenmiştir. Fotoğraf 3.6’da bu işlem için kullanılan MTS marka şekillendirme deney düzeneği gösterilmiş ve Şekil 3.4’te ise şekillendirme sınır diyagramı test cihazının şematik gösterimine yer verilmiştir.



Fotoğraf 3.6. Şekillendirme sınır diyagramı deney düzeneği



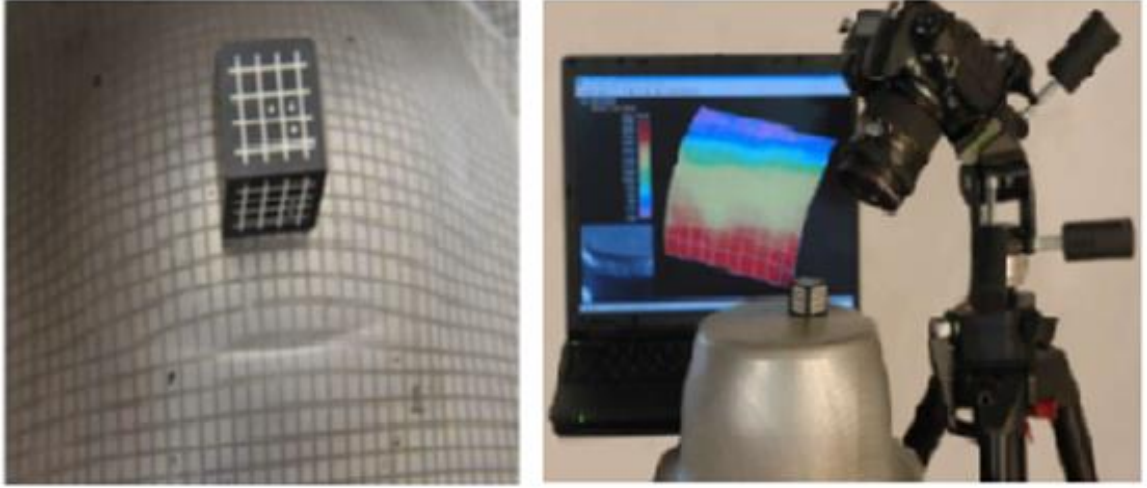
Şekil 3.4. Şekillendirme sınır diyagramı test cihazının şematik gösterimi (Ozturk ve Lee, 2005)

İlk olarak tam bir gerilme halini elde edebilmek için şekillendirme kalıplarında süzdürme çubukları kullanılmıştır. Fakat malzemenin kalıpla temas eden kısımlarında yırtılmalar meydana geldiği için sistem değiştirilmiş ve süzdürme çubukarı yerine düz kalıplar kullanılmıştır. Yapılan bu şekillendirme işlemi tüm deney numuneleri için gerçekleştirilmiştir (Fotograf 3.7).



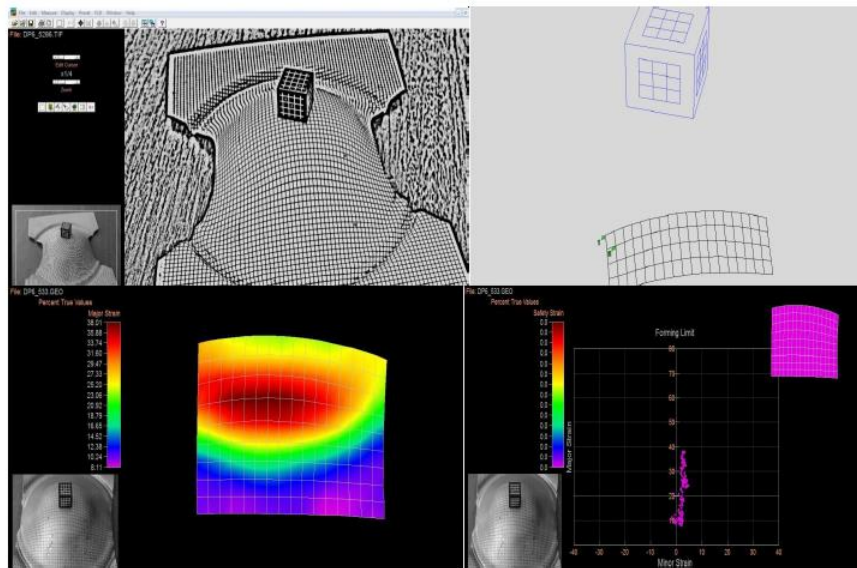
Fotograf 3.7. Şekillendirilmiş deney numuneleri.

Şekillendirme sonrası deformasyona uğramış deney numuneleri üzerindeki kare motiflerin ölçülmesine yardımcı olan referans küpü ile birlikte yüksek çözünürlüklü canon marka fotoğraf makinasından oluşan bir sistem kullanmıştır (Fotograf 3.8). Bu modelde kullanılan küpün belirli bazı özellikleri vardır. Küp üzerindeki karelerin boyutları birbirine eşittir. Bu karelerin bazılarının ortasında içi dolu beyaz daireler bulunmaktadır. Şekillendirilen malzeme numunelerine ait şekil değişimleri, üzerinde bulunan gridler sayesinde ölçülmektedir. Grid boyutları 2,5x2,5 mm ve çizilen bu çizgilerin kalınlıkları ise 0,5 mm olarak malzeme üzerine uygulanmıştır. Gridlerin başlangıç ölçüleri ile çizilen çizgilerin kalınlıkları bilindiği için, şekillendirme işlemi sonrasında ilk işlem olarak fotoğrafları çekilmiştir. Bilgisayara aktarılan ve ölçüleri alınan gridlerin üzerinde meydana gelen boyut değişimleri tespit edilir ve elde edilen deformasyonun miktarı ölçülür.



Fotoğraf 3.8. Referans küpü ve deney numunelerindeki gridleri okuma sistemi

Deney numunelerindeki gridlerin fotoğrafları çekildikten sonra referans küpü esas alınarak grid üzerindeki deformasyonun ölçümü ASAME (Automated Strain Analysis and Measurement Environment) programından yararlanılarak ve bu programda Target Modeli kullanılarak yapılmıştır (Fotoğraf 3.9). Asame yazılımı referans küpünü baz almakta ve boyutsal değişimlerin ölçümünü yapmaktadır. Referans küpü üç yüzeyi ekrana sığacak şekilde ve ölçüm yapacağımız alana yakın bir yere konulur ve fotoğrafı çekilir. Çekilen bu fotoğraf bilgisayara aktarıldıktan sonra elde edilen ölçüler programa girilir. Daha sonra programda grid kalınlıkları bir piksele kadar indirilir ve çizim dışında yer alan kısımlar silinir. Program iki farklı fotoğraftaki gridleri ve küpün boyutlarını karşılaştırır. Böylece ortaya bir deformasyon eğrisi çıkar.



Fotoğraf 3.9. ASAME programı ara yüzü

3.7 Akma Yüzeylerinin ve Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Nümerik Olarak Belirlenmesi

Akma yüzeylerinin ve şekillendirme sınır diyagramlarının nümerik olarak belirlenmesi sırasında; Hill48, Barlat89 ve YLD2000-2d gibi akma kriterleri kullanılmıştır. Bu akma kriterleri sonlu elemanlar yazılım programlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Böylelikle kullanılan malzeme için akma yüzeyi ve şekillendirme sınır diyagramları belirlenmeye çalışılmıştır. Hesaplama ve modelleme kısmında MATLAB'a ait sembolik hesaplama yöntemleri uygulanmış ve bu şekilde belirlenmeye çalışılmıştır.



BÖLÜM IV

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Al6082T6 alaşımına farklı hızlarda ve farklı kalınlıklarda çekme testi uygulanmıştır. Deneyde 1 mm ve 1,5 mm kalınlığındaki malzemeler kullanılmış olup, çekme hızı 25 mm/dak ve 900 mm/dak olarak belirlenmiştir. Bu çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik özelliklere ait deneysel veriler Çizelge 4.1 ve 4.2’de gösterilmektedir.

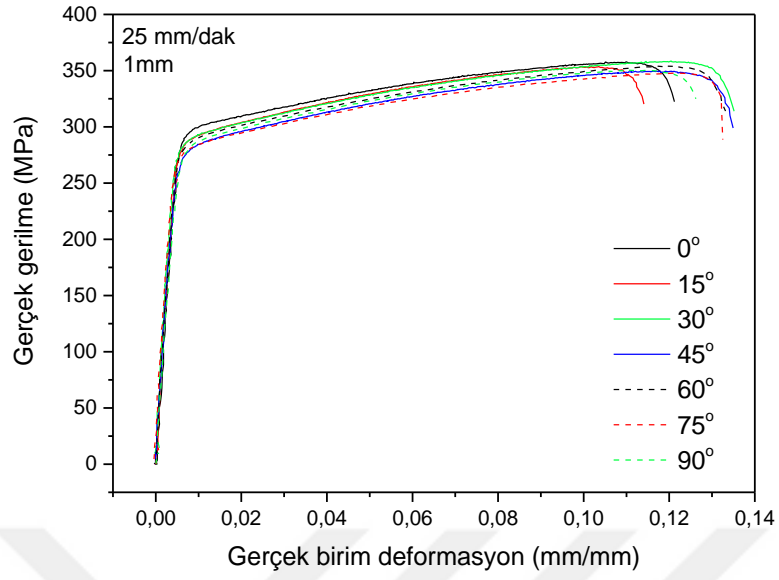
Çizelge 4.1. 1mm Al6082T6 alaşımının mekanik özellikleri

Mekanik özellikler	Birim Şekil Değişirme Hızı (mm/dak)	Haddelenme Yönüyle Yapmış Olduğu Aç						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Akma Dayanımı (MPa)	25	299,50	270,82	288,08	277,16	284,08	277,74	280,45
	900	289,40	288,28	297,88	283,66	286,91	286,65	288,14
Çekme Dayanımı (MPa)	25	355,64	322,95	358,56	349,88	354,38	348,06	350,58
	900	358,51	343,98	355,62	336,05	340,71	336,833	341,29
Üniform Müh. Birim Şekil Değişirme(%)	25	0,099	0,072	0,128	0,125	0,126	0,129	0,117
	900	0,118	0,099	0,095	0,092	0,098	0,074	0,098
Toplam Müh. Birim Şekil Değişirme(%)	25	0,109	0,078	0,145	0,144	0,142	0,142	0,135
	900	0,123	0,108	0,106	0,101	0,111	0,088	0,089
Pekleşme Üsteli (n)	25	0,075	0,081	0,089	0,091	0,086	0,087	0,098
	900	0,051	0,070	0,064	0,067	0,062	0,062	0,066
Mukavemet Katsayısı (K)	25	422,48	398,41	431,64	424,13	423,54	416,57	424,82
	900	361,22	401,46	410,48	390,74	390,36	391,76	397,61
Anizotropi (r)	25	0,424	0,531	0,632	0,666	0,729	0,643	0,521
Düzlemsel Anizotropi (ΔR)		-0,1938						
Normal Anizotropi		0,5692						

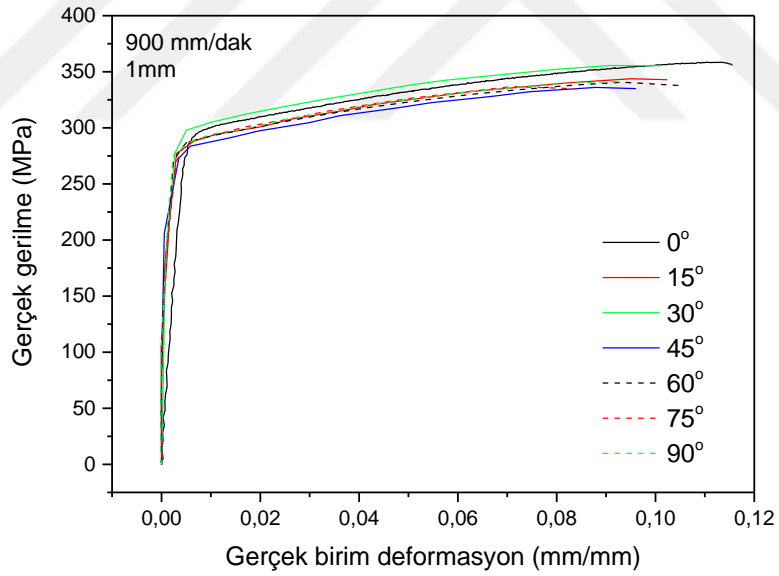
Çizelge 4.2. 1,5 mm Al6082T6 alaşımının mekanik özellikleri

Mekanik özellikler	Birim Şekil Değişirme Hızı (mm/dak)	Haddeleme Yönüyle Yapmış Olduğu Açı						
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Akma Dayanımı (MPa)	25	279,75	276,53	272,11	269,80	269,54	275,14	279,56
	900	295,50	293,49	287,75	290,26	282,98	288,02	297,64
Çekme Dayanımı (MPa)	25	364,85	358,09	360,74	347,50	349,94	353,62	361,27
	900	362,29	364,07	350,95	349,30	350,17	352,92	355,61
Üniform Müh. Birim Şekil Değişirme(%)	25	0,155	0,139	0,169	0,124	0,146	0,128	0,142
	900	0,126	0,138	0,095	0,101	0,105	0,101	0,100
Toplam Müh. Birim Şekil Değişirme(%)	25	0,172	0,150	0,184	0,143	0,164	0,140	0,161
	900	0,126	0,148	0,103	0,111	0,114	0,113	0,114
Pekleşme Üsteli (n)	25	0,1	0,099	0,101	0,096	0,098	0,097	0,096
	900	0,074	0,078	0,073	0,073	0,070	0,069	0,074
Mukavemet Katsayısı (K)	25	441,84	436,54	435,35	425	425,11	432,67	437,05
	900	421,68	423,07	412,56	409,99	405,87	410,03	419,86
Anizotropi (r)	25	0,510	0,524	0,599	0,591	0,627	0,635	0,764
Düzlemsel Anizotropi (ΔR)		0,0458						
Normal Anizotropi		0,6143						

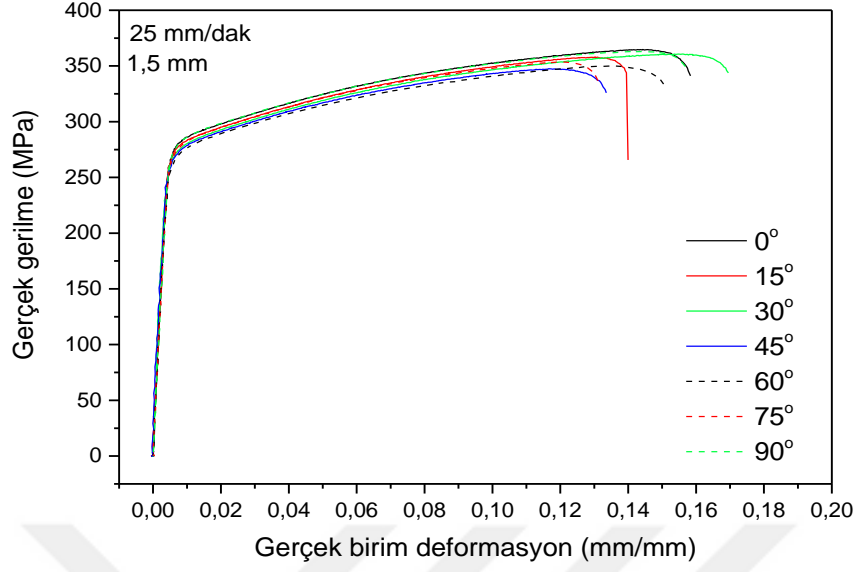
Yapılan çekme deneyleri sonucunda gerçek gerilme ve gerçek birim deformasyon eğrisi oluşturulmuştur. Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6'da yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre oluşturulan grafikler gösterilmektedir.



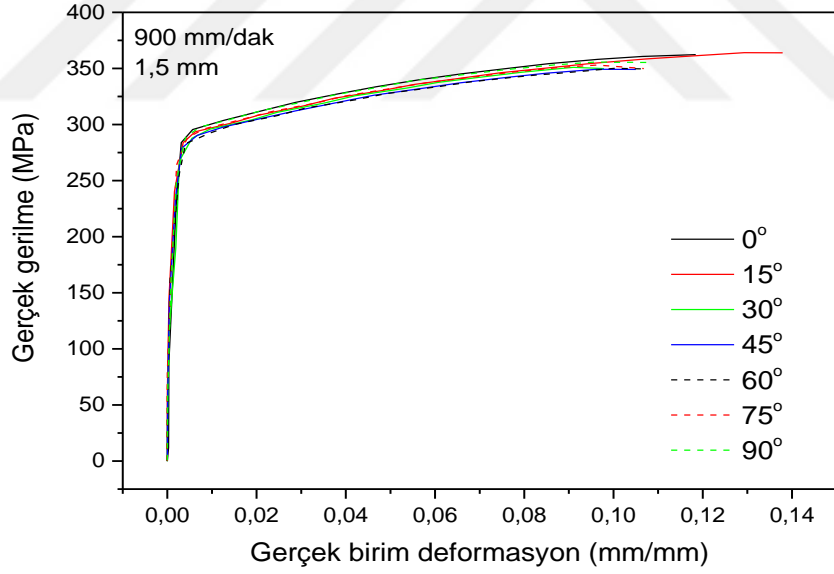
Şekil 4.1. 1 mm kalınlıktaki numunenin 25 mm/dak hızındaki gerçek gerilmesi



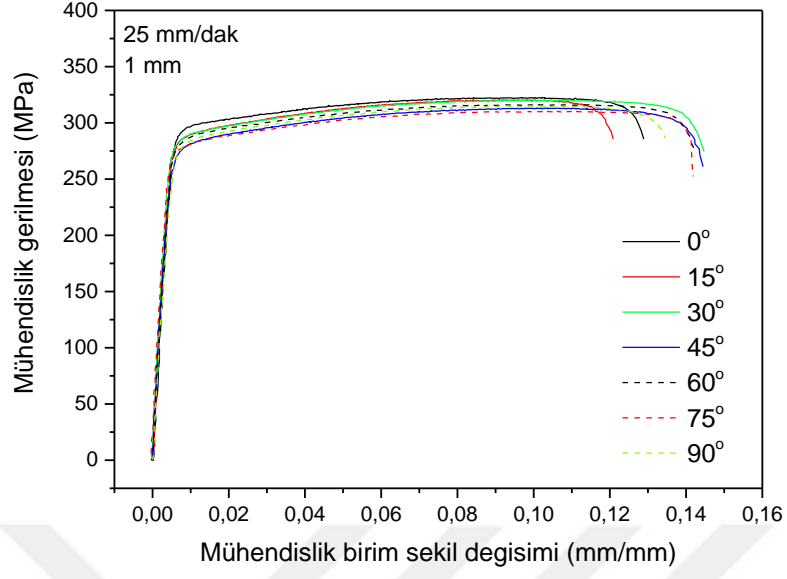
Şekil 4.2. 1 mm kalınlıktaki numunenin 900 mm/dak hızındaki gerçek gerilmesi



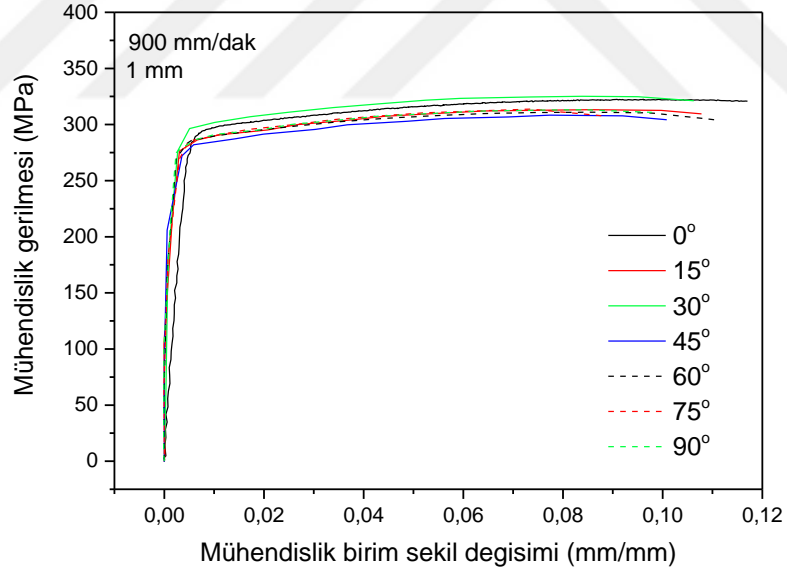
Şekil 4.3. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin 25 mm/dak hızındaki gerçek gerilmesi



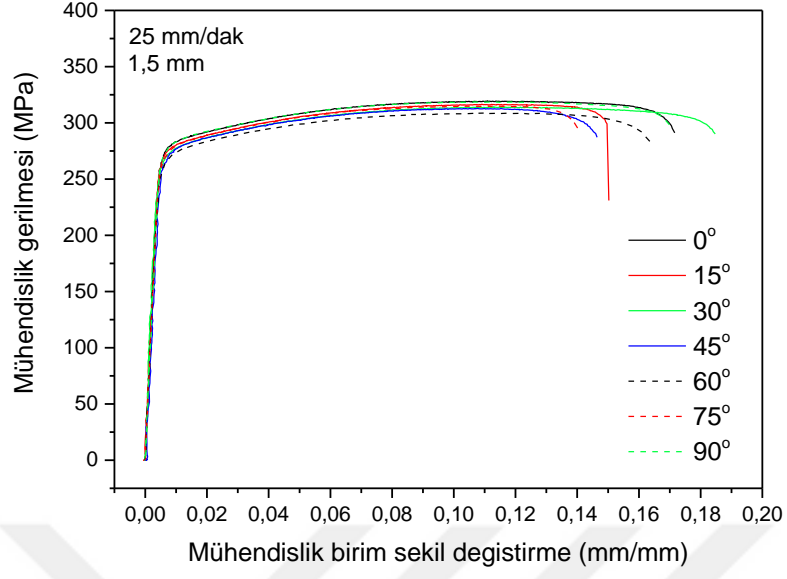
Şekil 4.4. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin 900 mm/dak hızındaki gerçek gerilmesi



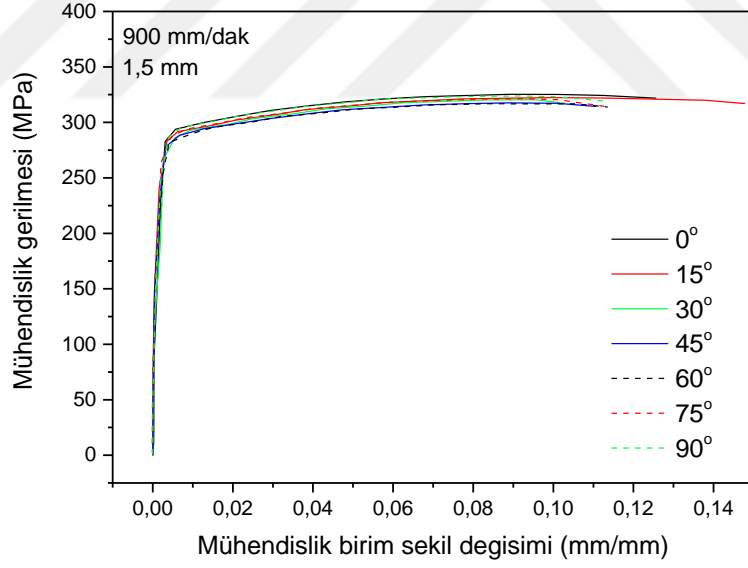
Şekil 4.5. 1 mm kalınlıktaki numunenin 25 mm/dak hızındaki mühendislik gerilmesi



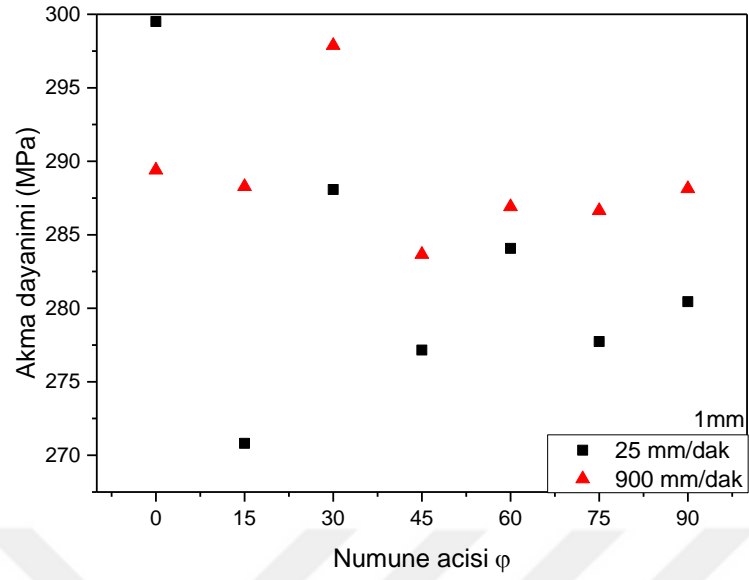
Şekil 4.6. 1 mm kalınlıktaki numunenin 900 mm/dak hızındaki mühendislik gerilmesi



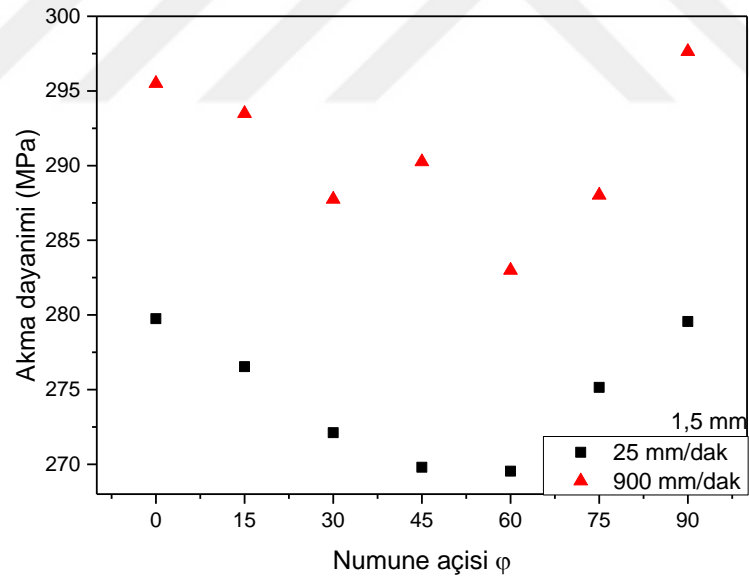
Şekil 4.7. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin 25 mm/dak hızındaki mühendislik gerilmesi



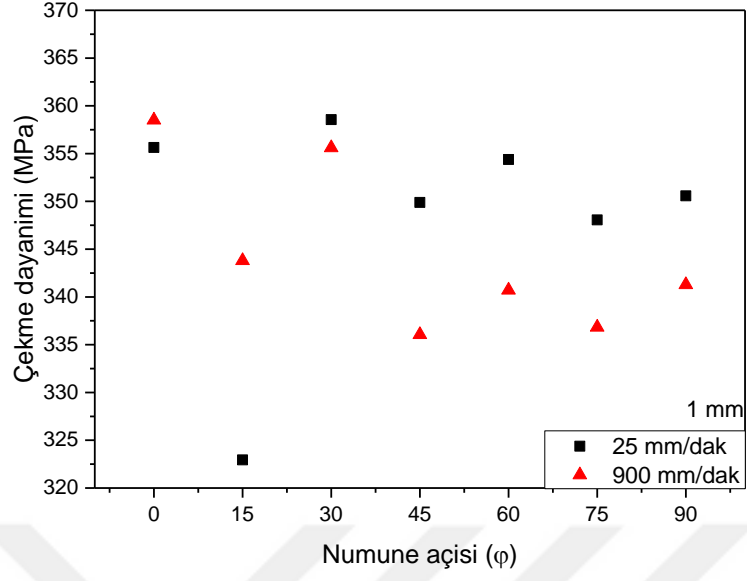
Şekil 4.8. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin 900 mm/dak hızındaki mühendislik gerilmesi



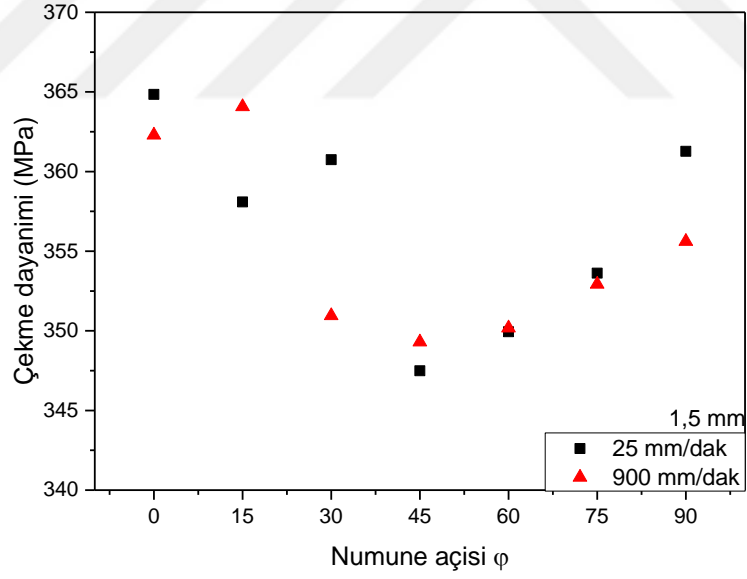
Şekil 4.9. 1 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki akma dayanımı



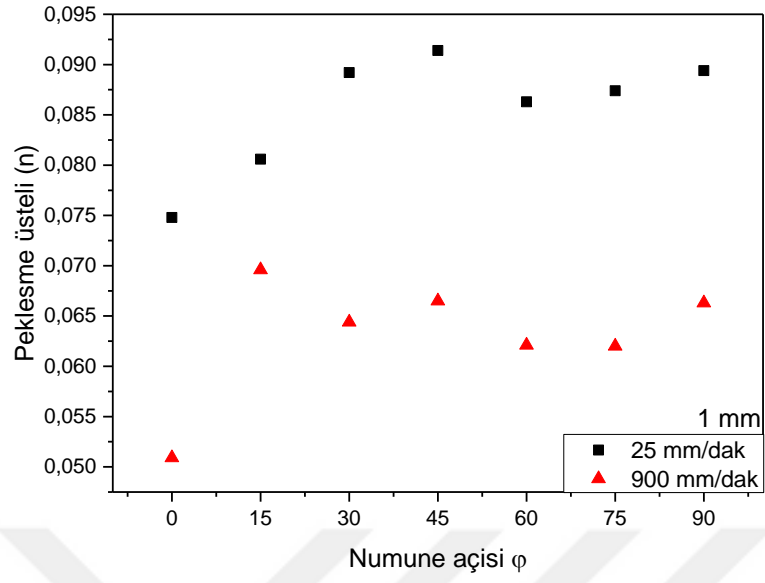
Şekil 4.10. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki akma dayanımı



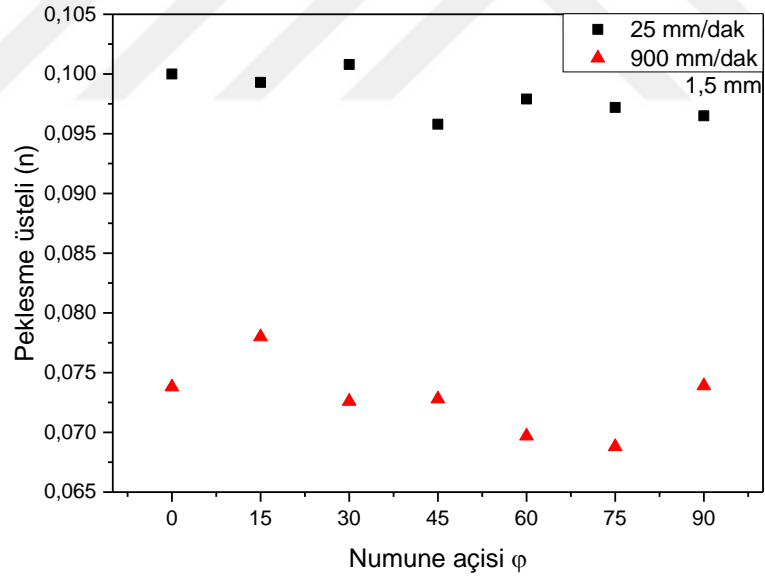
Şekil 4.11. 1 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki çekme dayanımı



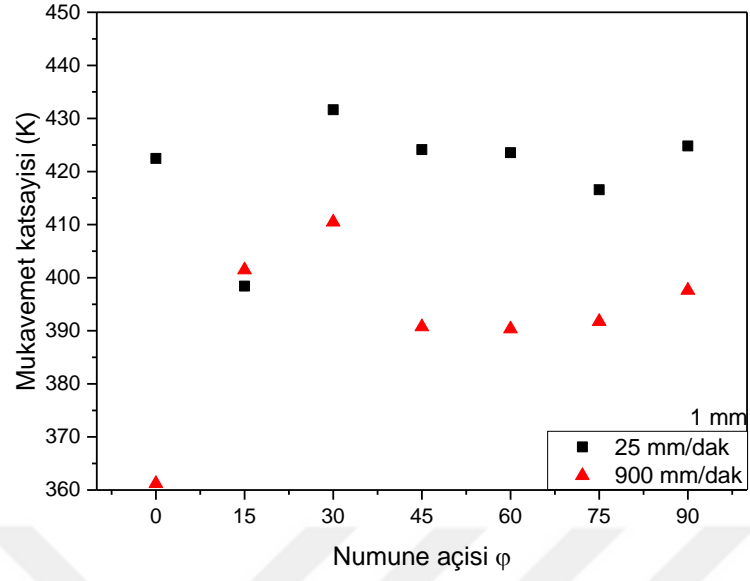
Şekil 4.12. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki çekme dayanımı



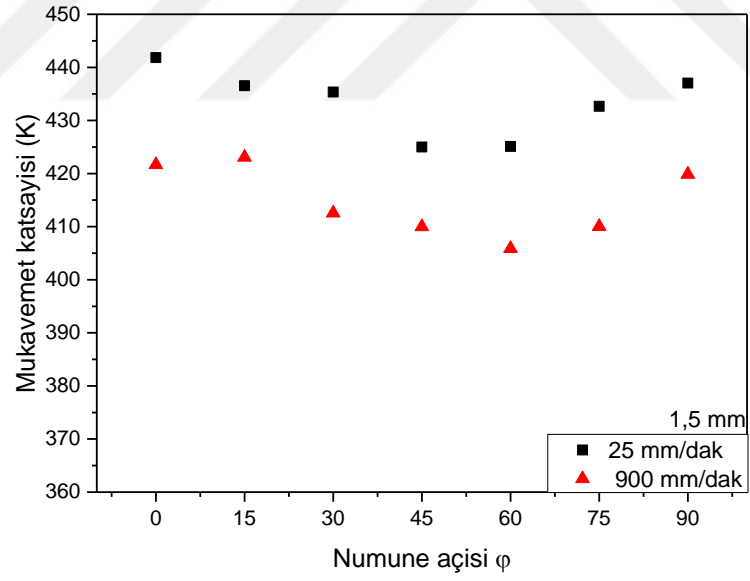
Şekil 4.13. 1 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki pekleşme üsteli



Şekil 4.14. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki pekleşme üsteli



Şekil 4.15. 1 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki mukavemet katsayısı



Şekil 4.16. 1,5 mm kalınlıktaki numunenin farklı hızlardaki mukavemet katsayısı

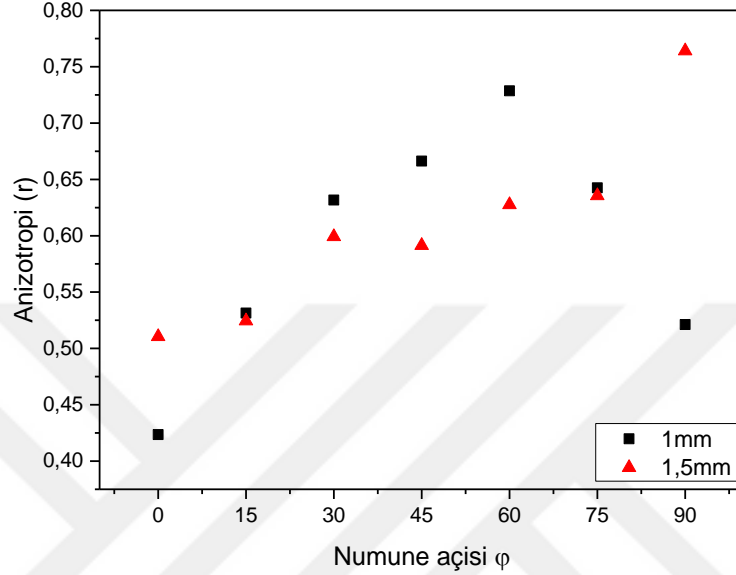
Genellikle yassı metalik haddelenmiş ya da dövülmüş malzemelerden hazırlanan numunelerle yapılan çekme deneyi sonuçları malzemenin alındığı yöne göre değişir (Esener ve Mindivan, 2012). Şekil 4.1 ve şekil 4.2'deki grafikler incelendiğinde, 1 mm ve 1,5 mm kalınlığa sahip numunelerde yapılan çekme testlerinde, çekme numunelerinin haddeleme yönüne göre farklı mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum literatürle uyum içersindedir (Toros, 2013). Deneyler sonucunda en düşük çekme mukavemeti değeri 322,95 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değere 1mm kalınlığında ve 25 mm/dak çekme hızında haddeleme yönü 15° olan numune ile yapılan çekme işleminde ulaşılmıştır. En yüksek çekme mukavemeti değeri ise 364,85 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değere ise, 1,5 mm kalınlığında ve 25 mm/dak çekme hızında haddeleme yönü 0° olan numune ile yapılan çekme işleminde ulaşılmıştır.

Genellikle deformasyon hızı arttıkça malzemenin mukavemeti artar ve diğer bir ifade ile çekme eğrisi yukarı doğru kayar ve kopma uzaması değerleri ise düşmektedir. Çekme hızının akma gerilmesine etkisi çekme mukavemetine etkisinden daha fazladır (Esener ve Mindivan, 2012). Çekme dayanımı ile çekme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1 incelendiğinde, 1 mm kalınlığındaki numunelerde yapılan çekme işleminde 0° ve 15° haddeleme yönündeki numunelerde, çekme hızı arttıkça çekme mukavemeti değerleri artarken diğer haddeleme yönündeki numunelerde azaldığı gözlemlenmiştir. 1,5 mm kalınlığındaki numunelerle yapılan çekme işleminde ise, 15°, 45° ve 60° haddeleme yönündeki numunelerde çekme hızı artarken çekme mukavemeti değerlerinin arttığı diğer haddeleme yönündeki numunelerde ise azaldığı görülmektedir. Bu durum 1 mm kalınlığındaki 0° ve 15° numunelerin ve 1,5 mm kalınlığındaki 15°, 45° ve 60° numunelerin pozitif deformasyon oranı hassasiyetine sahip olduğu, diğer numunelerin ise, deformasyon oranı hassasiyetinin negatif olduğu ile açıklanabilir (Uysal, 2012).

Numune kalınlıklarına göre çekme mukavemet değerleri karşılaştırıldığında 1,5 mm kalınlığa sahip olan numunelerin 1 mm kalınlığa sahip olan numunelere göre çekme mukavemet değerlerinin daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.

4.2 Anizotropi Deney Sonuçları

Şekil 4.17’de bir ön gerilme altındaki malzeme için elde edilen anizotropi değerlerinin değişiminin verildiği görülmektedir.

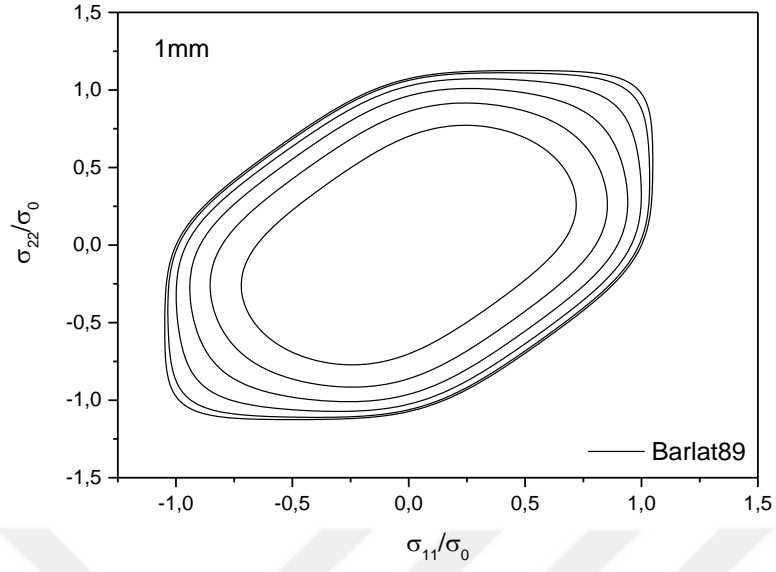


Şekil 4.17. Farklı kalınlıklardaki malzemelerin anizotropi değerleri

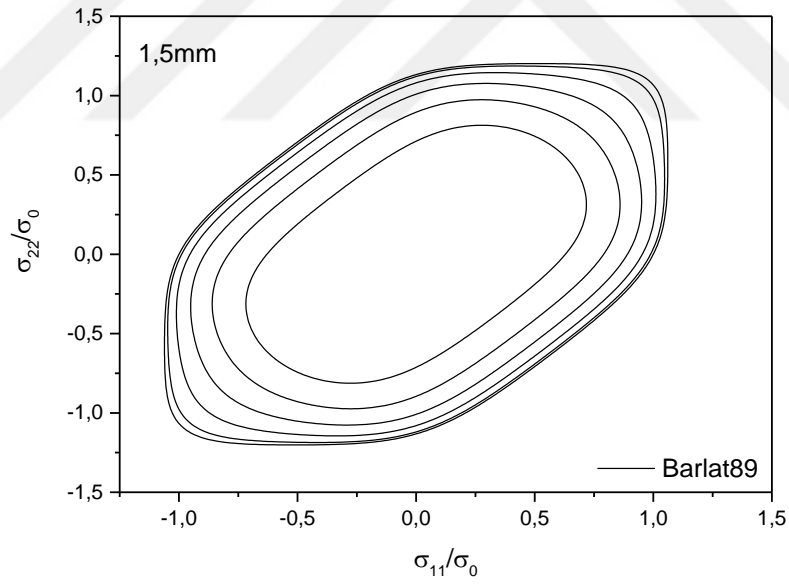
Al6082T6 alaşımının 1 mm ve 1,5 mm malzeme kalınlığına göre, yöne bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ve anizotropi değerleri ile uygulanan birim deformasyon ölçülerinin değişkenlik gösterdiği görülmektedir.

4.3 Akma Yüzeyi Fonksiyonlarının Al6082T6 Alaşımına Uyarlanması

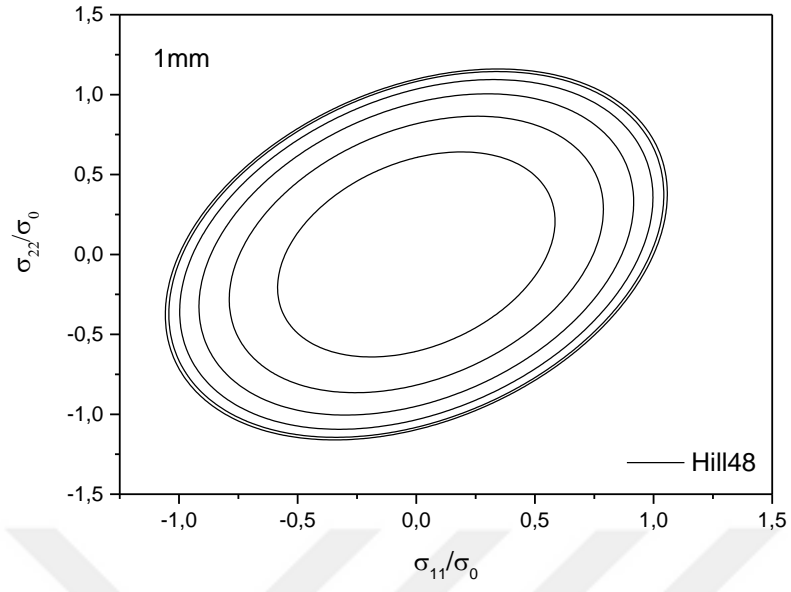
Al6082T6 alaşımında 1 mm ve 1,5 mm kalınlığındaki numuneler için çalışılan akma yüzeyi modelleri için Hill48, Barlat89 ve YLD2000-2d gibi akma kriterleri vasıtasıyla malzemenin şekillendirme sınır diyagramları ve akma yüzeyi belirlenmiştir. Hill48, Barlat89 ve YLD2000-2 matematiksel modelleri iki eksenli bir grafik üzerinde çizildiğinde elips şeklinde bir yörünge oluşmaktadır. Malzeme kalınlığına ve modellere göre ortaya çıkan akma yüzeyleri grafikleri Şekil 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23’te verilmiştir.



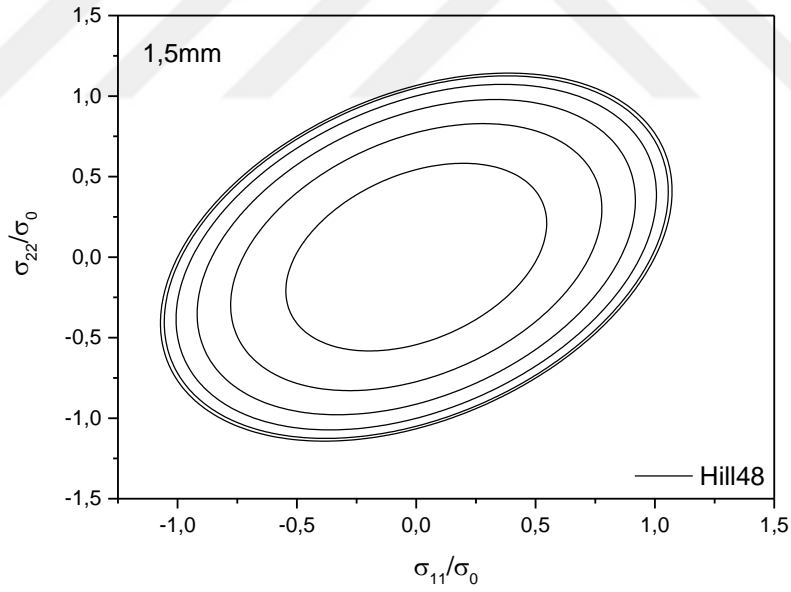
Şekil 4.18. 1 mm kalınlığındaki numunenin Barlat89 kriterine göre akma yüzeyi



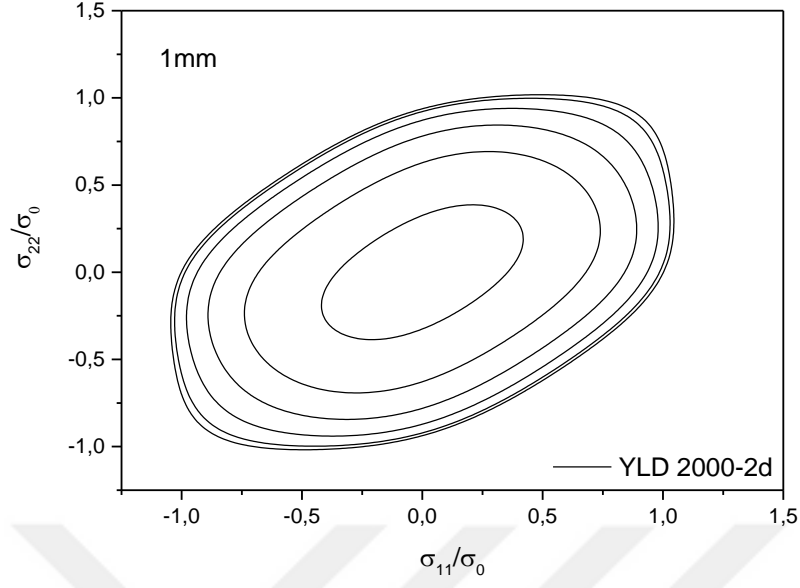
Şekil 4.19. 1,5 mm kalınlığındaki numunenin Barlat89 kriterine göre akma yüzeyi



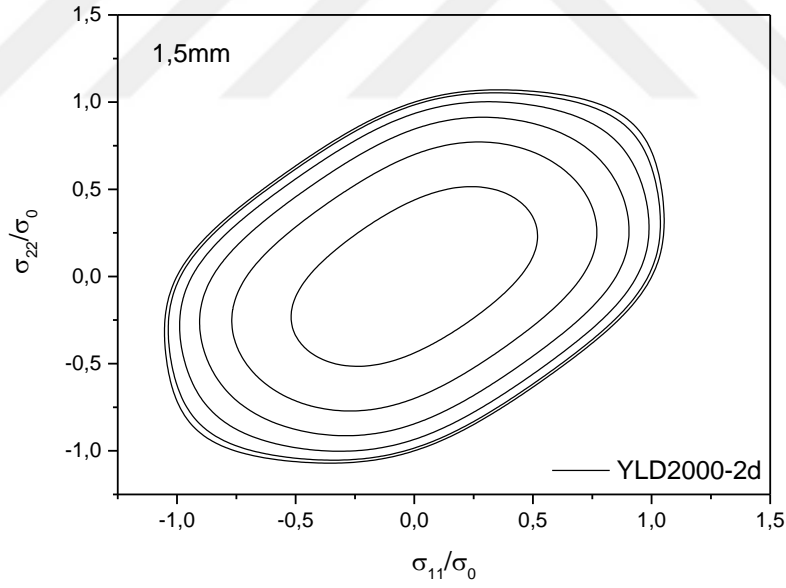
Şekil 4.20. 1 mm kalınlığındaki numunenin Hill48 kriterine göre akma yüzeyi



Şekil 4.21. 1,5 mm kalınlığındaki numunenin Hill48 kriterine göre akma yüzeyi



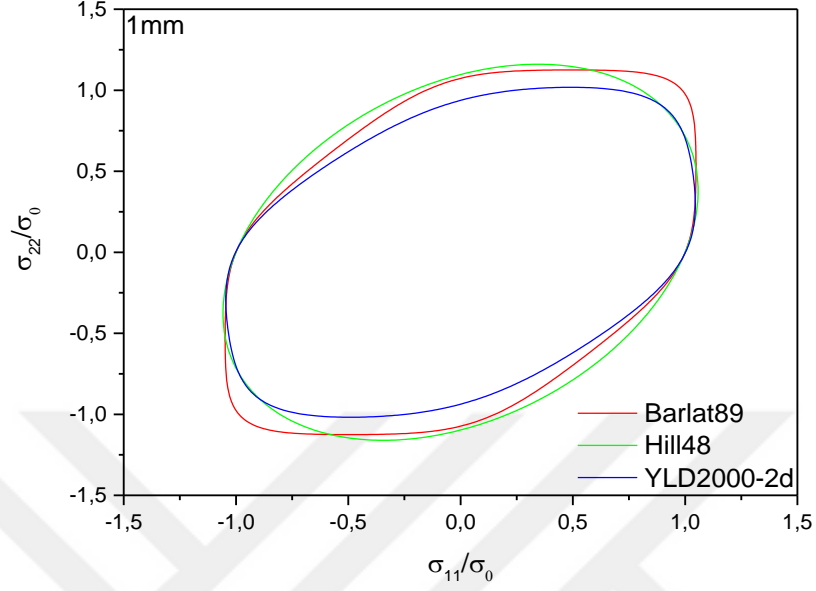
Şekil 4.22. 1 mm kalınlığındaki numunenin YLD2000-2d kriterine göre akma yüzeyi



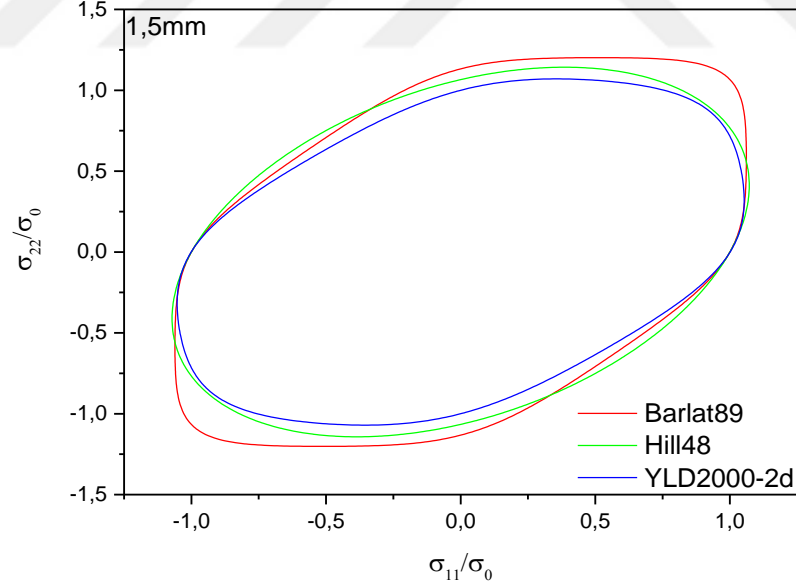
Şekil 4.23. 1 mm kalınlığındaki numunenin YLD2000-2d kriterine göre akma yüzeyi

Düzlemsel gerilim durumunda malzemenin akmaya başlayacağı gerilim kombinasyonunu veren grafikler incelendiğinde, akma yüzeyinde meydana gelen kayma gerilmesi değerinin artması neticesinde dış kısımdan iç kısma doğru, Hill48, Barlat89 ve YLD2000-2d modelleri için bu grafikler küçülmektedir. Böylesi bir durumda plastik

deformasyonun daha erken olması söz konusudur ve literatürle uyum içersindedir (Toros, 2013).



Şekil 4.24. 1 mm kalınlığında elde edilen akma yüzeylerinin karşılaştırılması



Şekil 4.25. 1,5 mm kalınlığında elde edilen akma yüzeylerinin karşılaştırılması

Şekil 4.24’de 1 mm ve şekil 4.25’de 1,5 mm kalınlıklara sahip numunelerle hesaplanan anizotropi parametrelerinin Hill48, Barlat89 ve YLD2000-2d kriterlerine göre sağladığı akma tahminleri karşılaştırılmaktadır. Modeller için elde edilen akma gerilmeleri iki

eksenli bir grafik üzerinde çizildiğinde, 1 mm kalınlığındaki numunede en büyük asal gerilme x ekseninde 1,057 y ekseninde ise, 1.160 olarak Hill48 modelinde elde edilmiştir. 1,5 mm kalınlığındaki numunede ise, en büyük asal gerilme x ekseninde 1,071 y ekseninde ise, 1.142 olarak Hill48 modelinde elde edilmiştir. Hill48, Barlat89 ve YLD2000-2d akma yüzeyi fonksiyonları için hesaplanan anizotropi parametrelerine ait değerler Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Akma yüzeyi fonksiyonları için anizotropi parametre değerleri (1 mm)

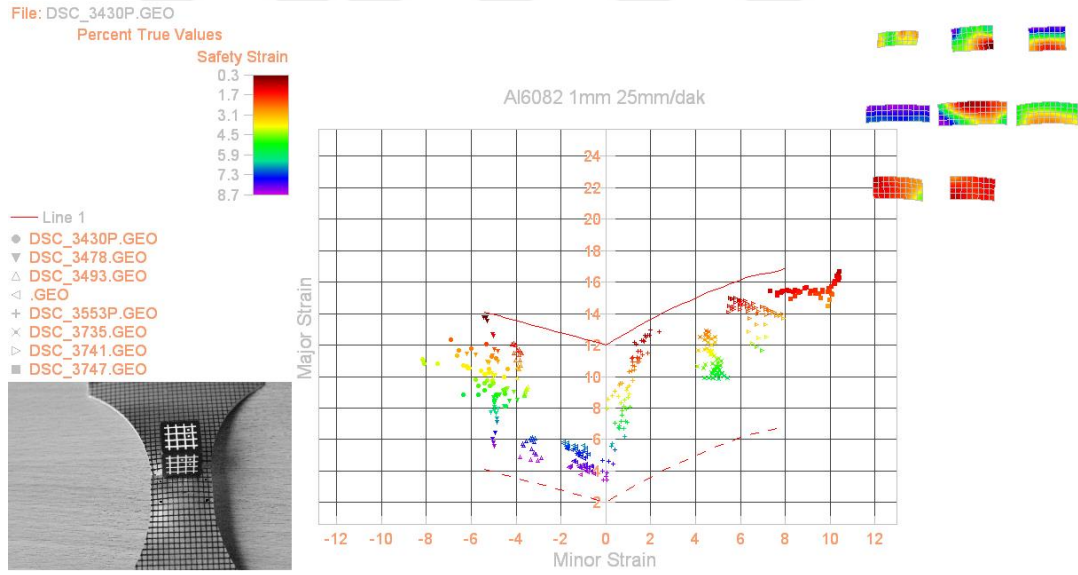
Hill48					
	F	G	H	N	
	0,2073	0,7024	0,2975	1,4849	
Barlat89					
	A	C	h	p	
	1,3615	0,6385	0,9318	0,9 (Kabul)	
YLD2000-2d					
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
0,9307	1,0359	1,2102	1,0519	1,0725	1,2070
α_7	α_8				
1,0085	1,0112				

Çizelge 4.4. Akma yüzeyi fonksiyonları için anizotropi parametre değerleri (1,5 mm)

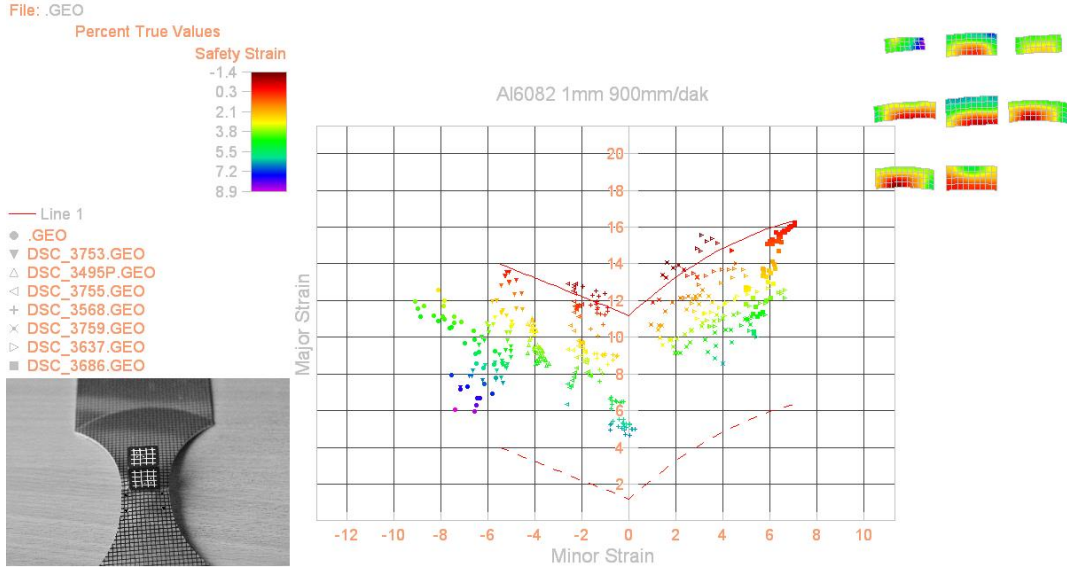
Hill48					
	F	G	H	N	
	0,3787	0,6620	0,3379	1,2053	
Barlat89					
	A	C	h	p	
	1,2348	0,7651	0,8833	0,9 (Kabul)	
YLD2000-2d					
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6
0,9430	0,9801	1,1833	1,0610	1,0769	1,2060
α_7	α_8				
0,9938	0,9281				

4.4 Nümerik Olarak Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Belirlenmesi

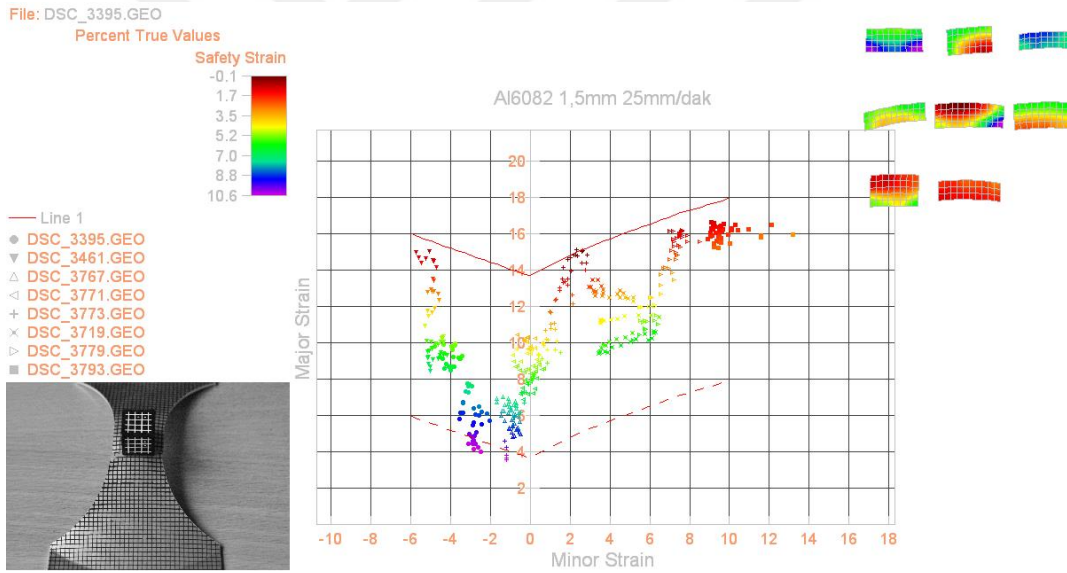
1 mm ve 1,5 mm kalınlığındaki Al6082T6 alaşımı için, 25 mm/dak ve 900 mm/dak olmak üzere 2 ayrı şekillendirme hızında yapılan ŞSD deneyleri sonucunda ASAME arayüz programı ile elde edilen görüntüler Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir. Elde edilen grafiklerde birim şekil değiştirme miktarları, boyun verme ve hata bölgeleri göstermektedir. Grafikler güvenlik katsayısı hesaba katılarak oluşturulmuştur. Bunun neticesinde değerler bir miktar aşağıya çekilmiştir. Elde edilen grafikteki eğrilerden üst kısımda yer alan kırılma ve/veya boyun verme bölgelerini göstermektedir. Alt kısımda bulunan eğri ise güvenlik katsayısı hesaba katılarak oluşturulan eğriyi temsil etmektedir. Bu oran Al6082T6 alaşımı için %10 mertebesinde alınmıştır.



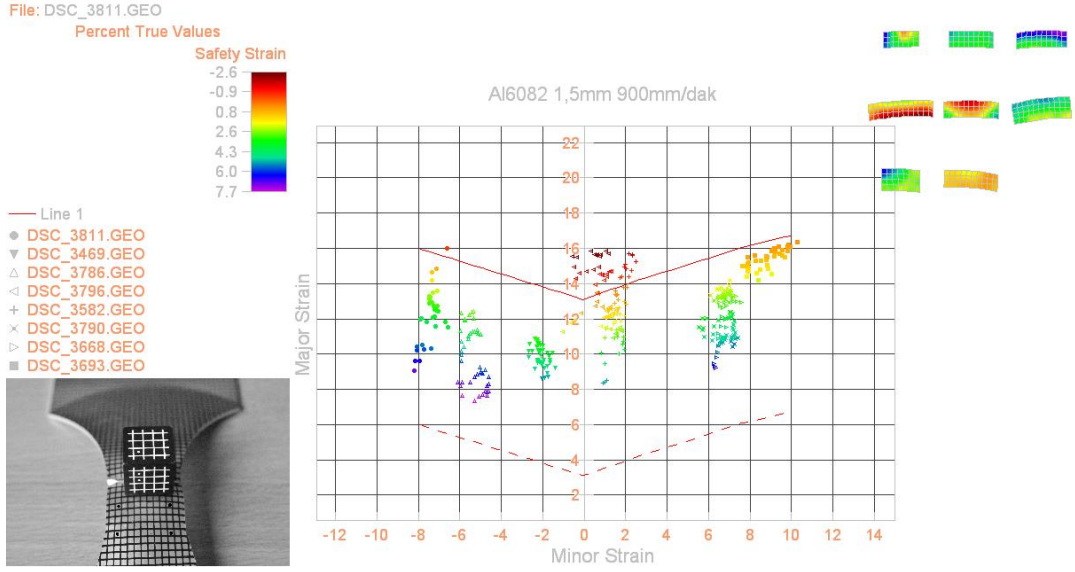
Şekil 4.26. 1 mm kalınlık 25 mm/dak hızla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği



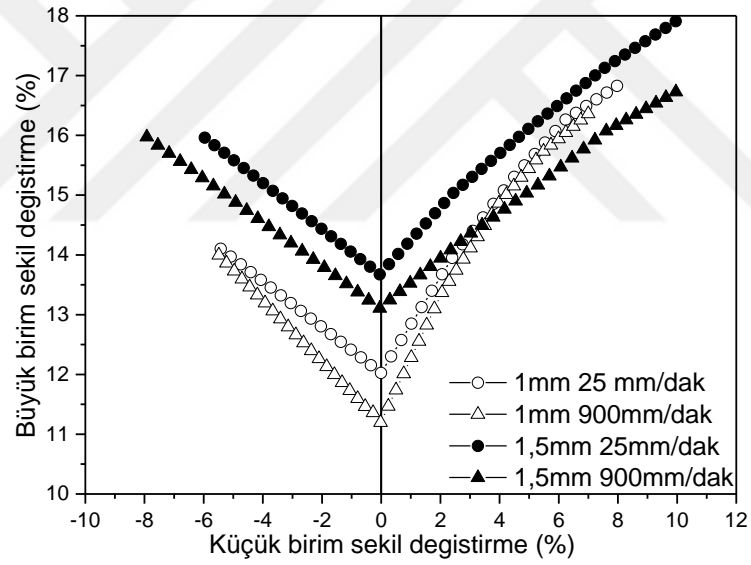
Şekil 4.27. 1 mm kalınlık 25 mm/dak hızla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği



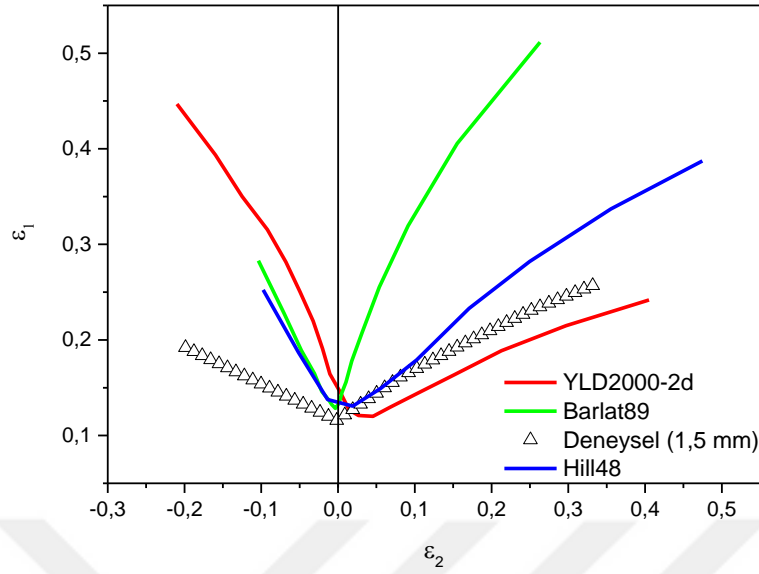
Şekil 4.28. 1,5 mm kalınlık 25 mm/dak hızla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği



Şekil 4.29. 1,5 mm kalınlık 900 mm/dak hızla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği



Şekil 4.30. Farklı malzeme kalınlığı ve hızlardaki ŞSD grafiklerin karşılaştırılması



Şekil 4.31. ŞSD tahminlerinin deneysel verilerle karşılaştırılması

Şekil 4.30'da 1 mm ve 1,5 mm kalınlığındaki Al6082T6 alaşımı için, 25 mm/dak ve 900 mm/dak şekillendirme hızında elde edilen ŞSD grafiklerin karşılaştırılması verilmiştir. Deneyler sonucunda en yüksek majör şekil değıştirme 1,5 mm kalınlığında 25 mm/dak deformasyon hızında %17,908 olarak tespit edilirken, en düşük majör şekil değitirme ise 1 mm kalınlığında 900 mm/dak deformasyon hızında %11,196 olarak elde edilmiştir. Grafiklerden ortaya çıkan sonuçlara göre en yüksek minör şekil değıştirme ise, 1,5 mm kalınlığında 900 mm/dak deformasyon hızında %9,960 olarak tepit edilirken, en düşük minör şekil değıştirme ise 1 mm kalınlığında 25 mm/dak deformasyon hızında %5,423 olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.30'da, ilk görülen husus, malzemenin şekillendirilme kabiliyetinin artan deformasyon hızı ile azaldığıdır (Uysal, 2011; Toros, 2013). 1 mm kalınlığındaki numuneye ait şekil değıştirme eğrileri incelendiğinde, 25 mm/dak deformasyon hızında iki eksenli birim şekil değıştirmeye geçiş noktasında, majör birim şekil değıştirme değeri %12,025 iken 900 mm/dak deformasyon hızında %11,196'tür. 1,5 mm kalındığındaki numuneye ait şekil değıştirme eğrileri incelendiğinde, 25 mm/dak deformasyon hızında iki eksenli birim şekil değıştirmeye geçiş noktasında, majör birim şekil değıştirme değeri %13,674 iken, 900 mm/dak deformasyon hızında %13,106'dır. Sunuçlar incelendiğinde,

deformasyon hızı arttıkça malzemenin şekillendirme kabiliyetinin azaldığı görülmektedir.

25 mm/dak deformasyon hızında yapılan deneyler sonucunda elde edilen şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, 1 mm kalınlığındaki numunenin iki eksenli birim şekil değiştirmeye geçiş noktasındaki majör birim şekil değiştirme değeri %12,025 iken 1,5 mm kalınlığındaki numunede %13,674'tür. 900 mm/dak deformasyon hızında yapılan deneyler sonucunda elde edilen şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, 1 mm kalınlığındaki numunenin iki eksenli birim şekil değiştirmeye geçiş noktasındaki majör birim şekil değiştirme değeri %11,196 iken, 1,5 mm kalınlığındaki numunede %13,106'dır. Sunular incelendiğinde, kalınlık arttıkça malzemenin şekillendirme kabiliyetinin arttığı görülmektedir (Anket vd., 2011; Uysal, 2011).

Şekil 4.31'de tez kapsamında incelenen numenelerle hesaplanan ŞSD parametrelerinin Hill48, Barlat89 ve YLD2000-2d kriterlerine göre sağladığı ŞSD tahminleri karşılaştırılmaktadır. Modeller için elde edilen ŞSD verileri iki eksenli bir grafik üzerinde çizildiğinde, elde edilen ŞSD grafiğinde en büyük asal gerilme x ekseninde 0,4746 ile Hill 48 modelinde, y ekseninde ise 0,5115 ile Barlat 89 modelinde elde edilmiştir.

BÖLÜM V

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında Al6082T6 alaşımının mekanik özellikleri deneysel ve numerik olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Deneysel 1 mm ve 1,5 mm olmak üzere iki çeşit deney numunesi kullanılmıştır. Mekanik testler 25 mm/dak ve 900 mm/dak'da farklı deformasyon hızlarında gerçekleştirilmiştir. Farklı kalınlıklar ve farklı deformasyon hızlarında yapılan mekanik testler kapsamında çekme deneyi ve anizotropi deneyi yapılarak, akma yüzeyleri ve şekillendirme sınır diyagramları belirlenmiştir. Ayrıca bunlara ek olarak yapılan deneyler sonucunda ulaşılan sonuçların kullanılması neticesinde malzemenin şekillendirme sınır diyagramı ve akma yüzeyi gibi mekanik özelliklerini en iyi şekilde temsil eden modelin tayini de gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiş bulunmaktadır.

- 1mm ve 1,5 mm kalınlığındaki numunelerde çekme deneyi esnasında deformasyon hızı arttıkça mukavemet değerinin arttığı, kopma mukavemeti değerinin ise azaldığı gözlemlenmiştir.
- Numune kalınlıklarına göre çekme mukavemet değerleri karşılaştırıldığında 1,5 mm kalınlığa sahip olan numunelerin 1 mm kalınlığa sahip olan numunelere göre çekme mukavemet değerlerinin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.
- Düzlemsel gerilim durumunda malzemenin akmaya başlayacağı gerilim kombinasyonunu veren grafikler incelendiğinde, akma yüzeyi kayma gerilmesi değerinin büyümesi ile dışarıdan içeri doğru, Hill48, Barlat89 ve YLD2000-2d modelleri için bu değer azalmaktadır. Bunun neticesinde plastik deformasyon başlangıcının daha erken olacağı görülmektedir.
- Elde edilen Şekillendirme Sınır Diyagramlarına göre malzeme kalınlığının artması, şekillendirilebilme kabiliyetinin arttığını göstermektedir.

- Ayrıca yine elde edilen Şekillendirme Sınır Diyagramlarına göre deformasyon hızının azalması, malzemenin şekillendirme kabiliyetinin arttığını gösterir. Fakat deformasyon hızı bu şekillendirme kabiliyetini çok fazla değiştirmemektedir.



ÖZGEÇMİŞ

Halit İlhan SÜRÜCÜ 11.08.1983 tarihinde Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2001 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2006 Haziran ayında mezun oldu. 2008-2011 yılları arasında Özalp Holdingde, Kiğı Barajı yapımında Makine Mühendisi çalıştı. 2012 tarihinden itibaren Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bor Meslek Yüksekokulu'nda Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümünde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

KAYNAKLAR

Anket, O., DC04 otomotiv sacının hidromekanik yöntem ile şekillendirilebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemi ile deneysel olarak incelenmesi, Doktora Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir, s.1-3, 2011.

Anket, O. Koruvatan, T. ve Ay, İ., “Sac malzemelerin şekillendirilmesinde şekillendirme sınır diyagramlarının kullanımı”, **Politeknik Dergisi** 14, 39-47, 2011.

Azrin, M. and Backofen, W.A., “The deformation and failure of a biaxially stretched sheet”, **Metallurgical Transactions** 1, 2857-2865, 1970.

Barlat F, Brem J.C., Yoon J.W., Chung K., Dick R.E., Choi S.H., Pourboghrat F., Chu E. and Lege D.J., “Plane stress yield function for aluminium alloy sheets – Part 1: Theory”, **Int. J. Plasticity** 19, 297-319, 2003.

Başer, T. A., “Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanılır”, **Mühendis ve Makine Dergisi** 53, 51-58, 2012.

Baypınar, F., Alüminyum döküm alaşımlarına Al5Ti1B ile tane inceltme işlemi uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, s. 18-19, 2005.

Considered, A., “Use of the Iron and Steel in Buildings (in French)”, **Ann.des Ponts as Chaussees** 9, 574-575, 1885.

Esener, E. ve Mindivan, H., Metalik malzemelerin çekme deneyi, **Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bilecik, 2012.

Gensamer, M., “Strength and Ductility”, **Trans. ASM** 36, 30-60, 1946.

Goodwin, G.M., “Application of strain analysis to sheet metal forming in the press shop”. **SAE paper 680093**, 1968.

Hill, R., “A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals”, **Proc. Roy. Soc. London A** 193, 281-297, 1948.

Hill, R., “On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets” **J. Mech. Phys. Solids** 1, 19-30, 1952.

Hosford, F.W., “A generalized isotropic yield criterion”, **J. Appl. Mech.** 39, 607–609, 1972.

Hutchinson, J.W. and Neale, K.W., Sheet Necking-III. Strain- Rate Effects, in Mechanics of Sheet Metal Forming, eds. D.P. Koistinen and N.M. Wang, **Plenum**, New York, s. 269-283, 1978.

Ilgaz, O., Döküm, ekstrüzyon ve dövme işlemlerinin 6082 Al alaşımlı dövme süspansiyon parçalarında mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, s. 10-11, 2014.

Kaçar, R. ve Güler yüz, K., “Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi”, **6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)**, Fırat Üniversitesi, Elazığ, s. 147-152, 16-18 Mayıs, 2011.

Karalı, M., Şahin, S., Hayat, F. ve Çevik, E., “AL 6061 alaşımı sacların yaşlandırılmasının derin çekmeye etkilerinin incelenmesi”, **International Iron & Steel Symposium**, s.1307-1314, 2011.

Keeler, S.P. and Brazier, W. G., “Relationship Between Laboratory Material Characterization and Press-Shop Formability”, **Micro Alloying** 21-32, 1975.

Kim, D., Barlat, F., Bouvier, S., Rabahallah, M., Balan, T. and Chung, K., “Non-quadratic anisotropic potentials based on linear transformation of plastic strain rate”, **Int. J. Plasticity** 23, 1380-1399, 2007.

Marciniak, Z. and Kuczynski, K., “Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal”. **Int. J. of Mech. Sci.** 9, 609-620, 1967.

Marciniak, Z., Kuczynski, K. and Pokra, T.,”Influence of The Plastic Properties of A Material On The Forming Limit Diagram For Sheet Metal In Tension”, **Int. J. Mech. Sci.** 15, 789-805, 1973.

Mısırlı, C., 5083 kalite alüminyum alaşımının homojenize edilerek sertlik değerlerinin ve mikroyapılarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Edirne, s. 15-16, 2011.

Ozturk, F. and Lee, D., “Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test”, **J. Mater. Process Technol.** 170, 247-253, 2005.

Sowerby R. and Duncan, D.L., “Failure in Sheet Metal in Biaxial Tension”, **Int. J. Mech. Sci.**13, 217-229, 1971.

Swift, H.W., “Plastic Instability Under Plane Stress”, **J. Mech. Phys. Solids** 1, 1-18, 1952.

Şanay, B., Sac metal şekillendirmesinde plastik kararsızlık ve şekillendirme limitlerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, s. 1-2, 2010.

Şanay, B. ve Kaftanoğlu, B., “Sac metal şekillendirmesinde plastik kararsızlık ve şekillendirme limitlerinin belirlenmesi”, **Makine Tasarım ve İmalat Dergisi** 1, 1-10, 2011.

Toros, S., Trip800 çeliğinin farklı şekillendirme hızlarında şekillendirme kabiliyetinin incelenmesi ve akma yüzeylerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Niğde, s. 91-120, 2013.

Uludağ, M., Farklı şartlarda dökülmüş modifiyeli Al-12Si alaşımlarında yapı ve özellikler, Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, s. 6-7, 2011.

Uysal, E. ve Öztürk, F., “Örnek bir uygulama ile yüksek mukavemetli çeliklerde şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesi”, **2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, s.387-395, 11-12 Kasım, 2010.

Uysal, E., DP600 çeliklerin şekillendirme hızı ve sac kalınlığına bağlı olarak şekillendirme sınır diyagramlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Niğde, s. 5-15, 2012.

Yeşilotalı, N., AA 3003 alüminyum alaşımlarında TAV parametrelerinin derin çekilebilirliğe etkileri, Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 2001.

