



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

2024-T4 ALÜMİNYUM SACLARIN ŞEKİLLENDİRME SINIR EĞRİLERİNİN KALINLIĞA GÖRE DEĞİŞİMİ

Murat DİLMEÇ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak–2012
KONYA

Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Murat DİLMEÇ

Tarih: 30/01/2012

ÖZET

DOKTORA TEZİ

2024-T4 ALÜMİNYUM SACLARIN ŞEKİLLENDİRME SINIR EĞRİLERİNİN KALINLIĞA GÖRE DEĞİŞİMİ

Murat DİLMEÇ

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI
2. Danışman: Doç.Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

2012, 157 Sayfa

Jüri
Prof.Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI
Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof.Dr. Osman YİĞİT
Doç.Dr. Haydar LİVATYALI
Doç.Dr. Behcet DAĞHAN

Bu doktora tez çalışmasında havacılık ve uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan Al 2024-T4 alaşımının oda sıcaklığındaki Şekillendirme Sınır Eğrisinin (ŞSE) sac kalınlığına göre değişimi deneysel olarak incelenmiştir. ŞSE'lerin oluşturulmasında kullanılan ASTM E 2218-02 (Ağustos 2002) ve ISO 12004-2 (Ekim 2008) standartları karşılaştırılarak, ISO standardının daha güvenilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. ISO standardının karmaşık hesaplamalarına girmeden ve pahalı olan gerçek zamanlı ölçme sistemlerine gerek duymadan sınır BŞD'leri basitçe ve güvenilir olarak belirleyebilmek amacıyla, bilgisayarlı grid analiz sistemi kullanılarak "hasarsız gridden hasarlıya ekstrapolasyon" olarak adlandırılan yeni bir yöntem önerilmiştir. Al 2024-T4'ün yanı sıra, farklı karakteristiğe sahip malzemeler için de, ŞSE'ler hem ISO hem de önerilen yönteme göre değerlendirme ile elde edilerek yöntemin geçerliliği ve uygunluğu doğrulanmıştır. *y* ekseni üzerinde (düzlem birim şekil değiştirme durumu) olması beklenen en düşük ŞSE noktası sağa ötelenmiş olarak elde edilmiş ve bunun sebepleri araştırılmıştır. Ayrıca standart genişlikteki numunelerin yanı sıra, eğrinin en düşük majör bölgesini oluşturacak ilave genişlikler için de deneyler yapılarak bu bölge literatürdeki değerlerden farklı ve daha güvenilir elde edilmiştir. 0.8, 1, 1.2, 1.6 ve 2 mm sac kalınlıkları için önerilen yönteme göre ŞSE'ler elde edilmiş ve sac kalınlığının artışıyla ŞSE seviyesi artarken, haddeleme doğrultusuna göre önemli değişimin olmadığı sonucuna varılmıştır. Hasar mekanizmaları incelendiğinde, ISO ve ASTM numunelerinde farklı davranışlar gözlenirken, çeşitli kalınlıklar için benzer davranışlar görülmüştür. Son olarak klasik derin çekme, gerdirmeli çekme ve hidrolik şişirme prosesleri için deneysel ve sayısal durum çalışmaları yapılarak, daha hassas tahminler yapabilmek amacıyla farklı kalınlıklar için farklı ŞSE'lerin kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al 2024-T4, ASTM E 2218-02, haddeleme doğrultusunun etkisi, ISO 12004-2, Nakajima deneyi, sac kalınlığının etkisi, şekillendirilebilirlik, Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE)

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

EFFECT OF SHEET THICKNESS ON FORMING LIMIT CURVE OF 2024-T4 ALUMINUM

Murat DİLMEÇ

The Graduate School of Natural and Applied Science of Selçuk University
The Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering

Advisor: Prof.Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI
Co-Advisor: Assoc.Prof.Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

2012, 157 Pages

Jury
Prof.Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI
Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof.Dr. Osman YİĞİT
Assoc.Prof.Dr. Haydar LİVATYALI
Assoc.Prof.Dr. Behcet DAĞHAN

In this Ph.D. thesis study, effects of sheet thicknesses and rolling directions on Forming Limit Curve (FLC) of AA2024-T4 alloy which is commonly used in the aerospace and aircraft industries was experimentally investigated under room temperature condition. The FLC Standards; ASTM E 2218-02 (August 2002) and ISO 12004-2 (October 2008) which are used to construct the FLC were both applied and compared. It was found that ISO 12004-2 yields most reliable results. A new measurement method which is basically interpolation techniques from non-fail grids to failed grids is also proposed using the computer grid analysis system in order to determine limit strain values easily and reliably without needing sophisticated calculation of the ISO standard and costly real time measurement systems. Validity and reliability of the proposed method was tested and compared with the ISO standard for AA2024-T4. Results reveal that the new method is accurate and also applicable for materials which have different characteristics. Although the minimum FLC point that is supposed to be at the *y* axis (plane strain condition), it was determined at the right side of the FLC. The reasons of these were investigated. In addition to the regular test specimens, different widths were added in order to improve the accuracy of the FLC for plane strain condition. Additional widths provide more accurate and reliable results than the current data. The FLCs were constructed using proposed method for various sheet thicknesses namely 0.8, 1, 1.2, 1.6 ve 2 mm. It was concluded that as sheet thickness increases the FLC level increases and there is no significant change in different directions testing. Failure mechanisms were tested for further investigation. The ASTM and ISO standards displayed different failure mechanism. However, the different thicknesses did not show different failure mechanism. Finally, experimental and numerical case studies were carried out for conventional deep drawing, stretch drawing, and hydraulic bulge processes. It was concluded that the different FLCs are necessary for different thicknesses for accurate predictions.

Keywords: AA2024-T4, ASTM E 2218-02, effect of rolling direction, effect of sheet thickness, formability, Forming Limit Curve (FLC), ISO 12004-2, Nakajima test

ÖNSÖZ

Geçmiş yıllarda sac metal kalıp imalatı deneme yanılma yöntemi ile yapılırken, teknolojinin gelişmesiyle birlikte günümüzde daha şekillendirme işlemi gerçekleştirilmeden prosesin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar ortamında modellenmesi ve simülasyonu yapılabilmektedir. Bunun sonucunda ortaya çıkabilecek kusurlar önceden tahmin edilerek önlemler alınabilmektedir. Kalıp tasarımının bilimsel temellere dayandırılması sonucu deneme yanılma sayısı azaltılarak zaman, iş gücü ve maliyet açısından tasarruf sağlanmaktadır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) analizlerinin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi için yazılımlardaki malzeme ve proses parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi çok önemlidir. Bu parametrelerin en önemlilerinden birisi, sac malzemelerin hangi sınırlara kadar şekil değiştirebileceği bilgisini veren en güvenilir araçlardan biri olan Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE) verileridir.

Ülkemizde henüz sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak kalıp tasarımı yeterli seviyede yapılmamaktadır. Özellikle ŞSE'ler yurtdışından temin edilmekte veya literatürden alınmaktadır. Ülkemizde ŞSE'lerin ticari olarak elde edilmesine yönelik çalışmalar henüz yenidir. Şekillendirilebilirliği artırmak için, şekillendirilebilirliği daha yüksek bir malzeme kullanmak yerine genellikle sac kalınlığını artırmak daha yaygın olarak kullanılan bir çözümdür. Ancak uygulamalarda genellikle tüm kalınlıklar için 1 mm kalınlığa sahip sacın ŞSE'si kullanılmaktadır. Hâlbuki gerçek şekillendirme işlemlerinde sac malzemelerin şekillendirilebilme özellikleri genellikle sac kalınlığının artmasıyla artış göstermektedir. Dolayısıyla tüm kalınlıklar için tek bir ŞSE'nin kullanılması, daha kalın sacların şekillendirilebilirliğinden tam olarak faydalanılamaması anlamına gelmektedir. Bu nedenle sac malzemelerin ŞSE'lerinin kalınlık dikkate alınarak hassas olarak tanımlanması gerekmektedir. Buna ek olarak endüstride kullanılan sac metallerin çoğu haddelemeden dolayı farklı doğrultularda farklı özellikler gösterebilmektedir. Dolayısıyla şekillendirme işlemlerinde sac metalin kalıba göre yerleşimi bazen önemli olabilmekte ve farklı doğrultular için de farklı ŞSE'lerin kullanılması daha uygun olabilmektedir. Bu nedenle özellikle emniyet ve güvenilirliğin çok önemli olduğu havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan malzemeler için farklı ŞSE'lerin kullanılmasının ne derece önemli olduğunun araştırılması gerekir.

Bu çalışmada havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan 2024 alaşımlı alüminyum sac malzemenin şekillendirme sınır eğrisinin kalınlığa ve haddeleme doğrultusuna göre değişimi incelenmiştir. Elde edilen ŞSE'lerin özellikle TAI (Turkey Aviation Industry) gibi kuruluşlarda kullanılması sonucunda ülkemizin uluslararası düzeyde rekabet gücünün artmasına katkıda bulunulması hedeflenmiştir. Ayrıca elde edilen ŞSE'ler, TÜBİTAK destekli MAG 108M516 numaralı sacların hidrolik şekillendirilmesine yönelik bir araştırma projesinde yapılan analizlerde de kullanılmıştır.

Çalışmada bilimsel katkılarıyla beni yönlendiren başta danışmanım Prof.Dr. Hüseyin Selçuk HALKACI olmak üzere, ikinci danışmanım Doç.Dr. Fahrettin ÖZTÜRK'e, Prof.Dr. Osman YİĞİT'e ve Doç.Dr. Haydar LİVATYALI'ya, ayrıca bu çalışmada destekleri olan Arş.Grv. Mevlüt TÜRKÖZ'e ve Öğr.Grv. Mehmet HALKACI'ya teşekkürlerimi sunarım. 09101005 numaralı tez projesi desteğinden dolayı Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne, çalışmanın bir kısmını içeren 108M516 numaralı projesi kapsamında aldığım burs desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim. ŞSE deneylerinin bir kısmının gerçekleştirildiği Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Metal Şekillendirme Laboratuvarı ve Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi idarecilerine teşekkür ederim.

Gösterdikleri sabır, anlayış ve destekle her zaman yanımda olan başta eşim Gülenay'a, kızım Nisa Duru ve oğlum Eren'e teşekkür ederim.

Murat DİLMEÇ

KONYA–2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **viii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **xi**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **6**

2.1. Alaşımlı Alüminyumlar 6
2.1.1. Alaşımlı alüminyumların ısıl işlemle sertleştirilmesi 6
2.1.2. Alaşımlı alüminyumların havacılıktaki önemi 9
2.2. Sac Metallerin Şekillendirilebilirliği 10
2.2.1. Şekillendirilebilirliği belirlemede kullanılan deneyler 12
2.2.2. Şekillendirme sınır eğrisi 12
2.3. Şekillendirme Sınır Eğrilerini Belirlemede Kullanılan Teorik Modeller 16
2.3.1. Hill bölgesel boyunlaşma modeli 16
2.3.2. Swift yayılmış boyunlaşma modeli 18
2.3.3. Marciniak ve Kuczynski modeli 18
2.3.4. Malzemedeki boşluğa dayalı modeller 20
2.3.5. Stören-Rice modeli 21
2.3.6. Sünek kırılma kriteri 21
2.3.7. Gotoh modeli 22
2.4. Teorik Modellerin Değerlendirilmesi 22
2.5. Şekillendirme Sınır Eğrilerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi 23
2.5.1. Gridleme 23
2.5.2. Şekillendirme 24
2.5.2.1. Düzlem dışı şekillendirme deneyleri 25
2.5.2.2. Düzlem şekillendirme deneyleri 26
2.5.3. Gridlerin ölçülmesi 27
2.6. Şekillendirme Sınır Eğrisine Etki Eden Faktörler 28
2.6.1. Sac kalınlığı 29
2.6.2. Haddeleme doğrultusu 33
2.6.3. Diğer faktörler 33
2.7. Literatür Analizi 34

3. MATERYAL VE METOT **36**

3.1. Isıl İşlem 36
3.2. Mikroyapıların ve Kimyasal Bileşimlerin İncelenmesi 38
3.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi 38
3.4. Düzlemsel Anizotropi Değerlerinin Belirlenmesi 41

3.5. ŞSE Oluşturmada Kullanılacak Standardın Belirlenmesi....44
3.6. Nakajima Deneylerinin Yapılması ve BŞD lerin Ölçülmesi....48
3.6.1. Grid analiziyle ölçme yöntemi....48
3.6.1.1. Deneylerin yapılışı....49
3.6.1.2. BŞD lerin ölçülmesi....52
3.6.2. Gerçek zamanlı sistemle ölçme yöntemi....56
3.6.2.1. Deneylerin yapılışı....56
3.6.2.2. Sınır BŞD lerin ISO 12004-2 standardına göre belirlenmesi....58
3.7. Şekillendirme Sınır Eğrilerinin Oluşturulması....60
3.7.1. Sınır BŞD nin belirlenmesi için önerilen yeni bir yöntem....60
3.7.2. Çeşitli kalınlıklar için ŞSE lerin çizilmesi....64
3.8. Hasar Mekanizmalarının İncelenmesi....66
3.9. $ŞSE_0$ Değerinin İncelenmesi....68
3.10. Durum Çalışması....69

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA....73

4.1. Mikroyapı ve Kimyasal Analiz....73
4.2. Mekanik Özellikler....75
4.2.1. Çekme deneyi....75
4.2.2. Anizotropi ölçümü....77
4.2.3. Şekillendirilebilirliğin mekanik özelliklerle değerlendirilmesi....79
4.3. Standartların Karşılaştırılması....80
4.3.1. Nakajima deneyleri ve tekrarlanabilirliği....80
4.3.2. Şekillendirme sınır eğrileri....84
4.3.3. Numune geometrisinin etkisi....85
4.3.4. Yağlayıcının etkisi....86
4.3.5. Hasar mekanizmaları....87
4.4. Deney Tekrar Sayısı ve Tekrarlanabilirlik....89
4.5. Sınır BŞD yi Belirlemek İçin Önerilen Yöntem....91
4.5.1. Tekrarlanabilirliği....91
4.5.2. Güvenilirliği....92
4.5.3. Diğer malzemeler için geçerliliği....95
4.6. $ŞSE_0$ Değerinin İncelenmesi....97
4.6.1. İlave numune genişlikleri için deneylerin etkisi....97
4.6.2. Isıl işlem ve süzdürme çubuğunun etkisi....100
4.6.3. Eğilmenin etkisi....103
4.7. Sac Kalınlığı ve Haddeleme Doğrultusunun Etkisi....106
4.8. Hasar Mekanizmalarının İncelenmesi....111
4.8.1. Kalınlık dağılımı....111
4.8.1.1. Ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması ve tekrarlanabilirlik....111
4.8.1.2. Sac kalınlığı ve haddeleme doğrultusuna göre dağılım....113
4.8.2. Boyunlaşma davranışları....115
4.9. Durum Çalışmaları....116
4.9.1. Deneysel durum çalışmaları....116
4.9.1.1. ISO 12004-2 standardına göre elde edilen ŞSE lerin güvenilirliği....117
4.9.1.2. Çeşitli kalınlıklar için durum çalışmaları....120
4.9.2. Sayısal durum çalışmaları....125

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....129

5.1. Sonuçlar 129
5.2. Öneriler 132

6. KAYNAKLAR.....133

EKLER 141

ÖZGEÇMİŞ.....156

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	:	mm^2	Kesit alanı
A_0	:	mm^2	İlk kesit alanı
C	:	-	Malzeme sabiti
d	:	mm	Stampa çapı
d_0	:	mm	Tane boyutu
dA	:	-	Alan değişimi
dF	:	-	Kuvvet değişimi
dl	:	-	Boydaki değişim
$d\sigma$	:	-	Gerilme değişimi
e	:	-	Mühendislik birim şekil değişimi
f	:	-	Homojensizlik kusur faktörü
F	:	N	Kuvvet
K	:	MPa	Mukavemet katsayısı
l_0	:	mm	İlk boy
l	:	mm	Son boy
m	:	-	Şekil değiştirme duyarlılığı üssü
n	:	-	Pekleşme üssü
r	:	-	Normal anizotropi
r_0	:	-	0° doğrultusundaki normal anizotropi
r_{45}	:	-	45° doğrultusundaki normal anizotropi
r_{90}	:	-	90° doğrultusundaki normal anizotropi
r_s	:	mm	Stampa yarıçapı
t	:	mm	Sac kalınlığı
t_0^a	:	mm	Oyuğun dış kısmından ölçülen sac kalınlığı
t_0^b	:	mm	Oyuğun iç kısmından ölçülen sac kalınlığı
Y	:	N/mm^2	Akma mukavemeti
w	:	mm	Son genişlik
w_0	:	mm	İlk genişlik
Δr	:	-	Düzlemsel anizotropi
$\Delta\varepsilon_{a1}$	:	-	*a* bölgesindeki *1* doğrultusundaki BŞD artışı
$\Delta\varepsilon_{a2}$	:	-	*a* bölgesindeki *2* doğrultusundaki BŞD artışı
$\Delta\varepsilon_{b1}$	:	-	*b* bölgesindeki *1* doğrultusundaki BŞD artışı
$\Delta\varepsilon_{b2}$	:	-	*b* bölgesindeki *2* doğrultusundaki BŞD artışı
ε	:	-	Gerçek birim şekil değişimi
ε^*	:	-	Eşdeğer gerçek birim şekil değişimi
ε_1	:	-	Gerçek majör birim şekil değişimi
ε_2	:	-	Gerçek minör birim şekil değişimi
ε_3	:	-	Gerçek kalınlık birim şekil değişimi
ε_l	:	-	Boyda meydana gelen gerçek birim şekil değişimi
ε_w	:	-	Genişlikte meydana gelen gerçek birim şekil değişimi
ε_t	:	-	Kalınlıkta meydana gelen gerçek birim şekil değişimi
σ	:	N/m^2	Gerilme
$\overline{\sigma}$	:	N/m^2	Eşdeğer gerilme

$\sigma_{gerçek}$	:	N/m^2	Gerçek gerilme
$\sigma_{müh}$	:	N/m^2	Mühendislik gerilmesi
β	:	-	Birim şekil değiştirme oranı
θ	:	°	Çekme ekseniyle yapılan açı

Kısaltmalar

BŞD	:	Birim şekil değişimi
SEY	:	Sonlu Elemanlar Yöntemi
g	:	Genişlik
M-K	:	Marciniak Kuczynski modeli
ŞSD	:	Şekillendirme sınır diyagramı
ŞSE	:	Şekillendirme sınır eğrisi
$ŞSE_0$	:	Şekillendirme sınır eğrisinde minör birim şekil değişiminin sıfır olduğu değer
T	:	Temper

1. GİRİŞ

Güvenlik gereksinimlerinin, müşteri beklentilerinin ve rekabetin artmasından dolayı, teknolojinin gelişmesiyle birlikte kullanım amacına ve yerine göre hafif fakat yüksek mekanik özelliklere sahip malzemeler geliştirilmiştir (Engl ve Schneider, 1998). Bunlardan en çok kullanılanı demir dışı bir metal olan alüminyum ve alaşımlı alüminyumlardır. Alüminyum ve alaşımları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek fiziksel ve mekanik özellikleri, kolay şekillendirilebilmesi, iyi korozyon direnci, hafif ve ucuz olması, ısıl işlemler sonucu mekanik özelliklerinin iyileştirilerek daha yüksek dayanımlar elde edilebilmesi gibi özelliklere sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı, günümüzde otomotiv, havacılık ve uzay gibi endüstrilerde alaşımlı alüminyumlara talep gittikçe artmaktadır. Ancak bu alaşımlar sac metal şekillendirme için geleneksel olarak kullanılan malzemelerden daha az şekillendirilebilme özelliğine sahiptirler. Havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan malzemelerden birisi olan Al 2024 uçak gövdesi ve kanatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Anonymous, 1966).

Son on yılda otomotiv ve havacılık endüstrilerindeki gelişmeler sürekli olarak sac metal şekillendirme teknolojilerine olan gereksinimi artırmaktadır. Sac metal şekillendirme işlemi, düz bir sac metali yırtılma, buruşma veya aşırı incelme olmaksızın istenilen bir şekle dönüştürme işlemidir. Sac metallerin "*şekillendirilebilme kabiliyeti*" veya "*şekillendirilebilirliği*", sacın şekillendirilmesi sırasında yırtılma, bölgesel boyunlaşma ve buruşma gibi bir hasara uğramadan istenilen şekli alma kabiliyetidir (Taylor, 1988; Marciniak ve ark., 2002). Her bir malzemenin uygun şekillendirme yöntemi ve şartları belirlenerek başarılı olarak şekillendirilebilmesi için, sac metal şekillendirme prosesindeki hasar başlangıcının doğru olarak belirlenmesi gereklidir (Takuda ve ark., 1999). Sac malzemelerin hasar başlangıcı, sac malzemenin hangi sınırlara kadar uzayabileceği bilgisini veren *Şekillendirme Sınır Eğrisi* (ŞSE) ile tanımlanmaktadır.

Sac metal şekillendirme işlemi gerçekleştirilmeden önce Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) yazılımlarının kullanılması ile şekillendirme prosesini modelleyerek ve analiz yaparak proses sırasında meydana gelebilecek yırtılma, buruşma ve geri yaylanma gibi problemleri tahmin etmek ve önlemler almak mümkündür. Böylece parça üretiminde deneme yanılma sayısı azaltılarak maliyet ve zaman tasarrufu sağlanabilmektedir. Prosesi modelleyebilmek için çekme deneyi ile elde edilen akma

eğrisinin SEY programına tanıtılması gerekmektedir. Bu bilgilerle analiz yapılarak parça üzerindeki tüm noktaların şekil değiştirme değerleri bulunabilmektedir. Ancak iş parçasının hasara uğrayıp uğramadığını belirlemek için çekme deneyi yeterli değildir. Buna ek olarak SEY programına ŞSE verilerinin de mutlaka tanıtılması gereklidir. ŞSE verilerinin SEY ile karşılaştırılması sonucunda parçada hasar oluşuyorsa, kalıp tasarımı, çalışma şartları (baskı plakası, yağlama), malzeme kalitesi veya kalınlığı değiştirilerek hasarsız bir üretim sağlanmaya çalışılır. Genellikle şekillendirilebilirliği daha yüksek malzeme kullanmak yerine, sac kalınlığını artırmak yaygın olarak kullanılan bir çözümdür (Banabic ve ark., 2000). ŞSE, sac metal şekillendirme endüstrisinde farklı sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek veya sınır birim şekil değişimlerini (BŞD) belirlemek için, çoğunlukla kabul edilen bir kriterdir (Situ, 2008).

SEY analizlerinin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi için yazılımlardaki malzeme ve proses parametrelerinin doğru olarak belirlenmesi son derece önemlidir. ŞSE'lerin deneysel olarak elde edilmesi uzun ve zahmetli bir iş olduğu için araştırmacılar ŞSE'leri teorik olarak elde etme yoluna gitmişlerdir. Ancak ŞSE'ler ortaya atılan teorilerdeki akma kriterlerine göre oldukça farklılık gösterebilmektedir (Nakajima ve ark. 1971; Paraianu ve ark., 2005). Hatta boyun verme davranışının elde edilmesi oldukça zor olan düşük sünekliğe sahip alüminyumlar için birçok teori uygulanamamaktadır. Bunun sonucunda ŞSE'lere etki eden parametrelerin etkileri de doğru bir şekilde ortaya koyulamamaktadır. Bu nedenle ŞSE'leri deneylerden elde etmek en sağlıklı yöntemdir ve bu deneyler standartlaştırılmıştır (Hursman, 1978; Graf ve Hosford, 1990; Casari ve ark., 2006; Hosford ve Caddell, 2007). ŞSE'ler, *Nakajima* (gerdirme) veya *Marciniak* (derin çekme) deneylerinden elde edilebilmektedir (Lewison, 1999). Nakajima deneyinde gerçek şekillendirme proseslerinde oluşan eğilme gerilmeleri de meydana gelmektedir. Gerçek şekillendirme proseslerine yakın olmasından ve geniş bir aralıkta BŞD yolu elde edilebilmesinden dolayı, Nakajima deneyi daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Raghavan, 1995).

Önceleri ŞSE'ler ASTM E 2218-02 (Ağustos 2002) standardına göre elde ediliyordu. Ancak bu standartta Nakajima deneyinin uygulanışı ile ilgili birçok ayrıntı ve sınır BŞD değerlerinin nasıl belirleneceği belirtilmemiştir. Çalışmalarda farklı numune geometrileri, yağlayıcılar ve takımlar kullanıldığından, hasar başlangıcı için kesin bir değer belirlemek olanaksızdır ve birçok araştırmacı farklı kabuller yapmaktadır (Jahromi ve ark., 2006). 2008 yılında yayımlanan ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardı bu belirsizlikleri ortadan kaldırmış ve farklı kişilerin yaptığı

değerlendirmelerde yakın (reproducibility; yeniden üretilebilirlik) ve güvenilir ŞSE'lerin elde edilmesini sağlamıştır (Situ, 2008). Bu standarda göre, numunenin hasar bölgesine dik çizilen birkaç ortogonal kesitteki majör ve minör BŞD'lerin 1. ve 2. türevleri alınarak elde edilen noktalardan çizilen parabolün tepe noktası sınır BŞD değeri olarak alınmaktadır. Ancak bu değerlendirme işleminin el ile yapılması oldukça zahmetli ve uzun sürmektedir. Bu işlemi hızlı ve hassas olarak yapabilen gerçek zamanlı ölçme sistemi yazılımları ve ekipmanları geliştirilmiştir. Ayrıca bu sistemle ölçmede numunelerin yüzeyine uygulanan rastgele benekli yapılar sayesinde hasar bölgesine oldukça yakın bölgelerdeki BŞD'ler belirlenebilmektedir. Ancak bu sistemler oldukça pahalıdır.

Grid analiz sistemleriyle ölçmelerde tam gridler kullanıldığından dolayı, hasarın grid çizgisinden uzakta olması durumunda gerçeğe göre daha küçük bir sınır BŞD değeri elde edilebilmektedir. Pahalı olan gerçek zamanlı ölçme sistemlerine bağlı kalmadan ve ISO 12004-2 standardında belirtilen karmaşık hesaplamalara girmeden, grid analiziyle ölçmedeki bu problemin üstesinden gelerek daha doğru bir sınır BŞD değerini kolayca belirlemek amacıyla, yazar tarafından grid analiz ölçme sistemi kullanılarak "*hasarsız gridden hasarlıya ekstrapolasyon"* yöntemi önerilmiştir. Elde edilen ŞSE'ler ISO 12004-2 standardına göre elde edilenlerle oldukça uyumlu olduğundan önerilen yöntemin güvenilirliği açıkça ortaya konulmuştur.

Sac metallerin mekanik özellikleri, şekillendirilebilirliği etkileyen en önemli faktörlerdir. Malzemenin kimyasal bileşimi, üretim yöntemleri ve üretimde uygulanan işlemler, sac metallerin mekanik özelliklerini farklılaştıran başlıca faktörlerdir (Dieter, 1988). Buna bağlı olarak ŞSE, sac kalınlığı t, normal anizotropi (plastik anizotropi) r, pekleşme üssü n, şekil değiştirme duyarlılığı üssü m gibi faktörler ile değişiklik gösterebilmektedir (Nakajima ve ark., 1971; Rees, 2001; Svensson, 2004).

Pratik uygulamalar için alaşımlı alüminyumlar geleneksel olarak kullanılan malzemelerden daha az şekillendirilebilirliğe sahiptir (Boogaard, 2002). Düşük sünekliğe sahip olan Al 2024'ün şekillendirilebilirliği çok kötü olmamasına rağmen, şekillendirilmesi zordur ve şekillendirilmiş ürünleri sınırlıdır. Literatürde çelik için kalınlık etkisinin büyük (Narayanasamy ve Narayanan, 2007) ve alaşımlı alüminyumlarda çeliğe göre daha küçük olsa da bu etkinin şekillendirme işlemlerinde önemli olabileceği belirtilmektedir (Keeler ve Brazier, 1977). Al 2024 malzemenin çatlak yorulması üzerine pek çok çalışma olmasına rağmen, şekillendirme sınırını belirleme ve sac kalınlığının ve haddeleme doğrultusunun ŞSE'ye etkisi üzerine pek az

çalışmaya rastlanmıştır (Takuda ve Hatta, 1998). Yüksek sünekliğe sahip alaşımlı alüminyumlarda kalınlığın ŞSE üzerine etkisinin az olduğu deneysel olarak ortaya koyulmuştur. Ancak yüksek sünekliğe sahip malzemelerde kararsızlık baskın iken, nispeten düşük sünekliğe sahip 2XXX ve 7XXX serilerinin hasar mekanizmalarının hasarı geciktirme eğiliminde olduğundan ve sıklıkla boyunlaşma olayı olmadan yırtılma meydana geldiğinden bahsedilmektedir. Bu sebeple bu serilerde kalınlık etkisinin oldukça farklı olabileceğine vurgu yapılmaktadır. Ayrıca bu çalışmalar da ŞSE'ler ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardına uygun olarak yapılmadığı için kalınlık ve haddeleme doğrultusunun etkisi tam olarak ortaya koyulmamıştır. Kalınlık ve haddeleme doğrultusunun ŞSE'ye etkisinin güvenilir olarak elde edilebilmesi için ŞSE'lerin doğru olarak belirlenmesi son derece önemlidir. Özellikle havacılık endüstrisinde kullanılan Al 2024'ün kalınlık ve haddeleme doğrultusunun şekillendirilebilirliğe etkisinin belirlenmesi emniyet ve güvenilirlik açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmanın amacı, Al 2024-T4 sacların oda sıcaklığında ŞSE'lerinin sac kalınlığına göre değişimini incelemek ve analizlerde çeşitli kalınlıklar için farklı ŞSE'lerin kullanılmasının gerekliliğini araştırmaktır. Ancak kalınlığın ŞSE'ye etkisini doğru olarak ortaya koyabilmek için ŞSE'lerin hassas ve güvenilir olarak elde edilmesi gerekir.

Tezin 2. Bölümünde, alaşımlı alüminyumlar ve şekillendirme sınır eğrisi hakkında genel bilgiler verildikten sonra, şekillendirme sınır eğrilerini oluşturmada kullanılan teorik modeller anlatılmıştır. Sonra ŞSE'lerin deneysel olarak nasıl oluşturulduğu ve ŞSE'lere etki eden faktörler izah edilmiştir ve son olarak bu çalışmanın özgün değeri verilmiştir.

Tezin 3. Bölümünde ilk olarak, malzemelere uygulanan ısıl işlem, mikroyapıların nasıl incelendiği, mekanik özelliklerin ve düzlemsel anizotropi değerlerinin nasıl belirlendiği anlatıldıktan sonra, ŞSE'lerin oluşturulmasında kullanılan ASTM E 2218-02 (Ağustos 2002) ve ISO 12004-2 (Ekim 2008) standartlarının nasıl karşılaştırıldığı izah edilmiştir. Sonra bu çalışmada önerilen yönteme ve ISO standardına göre Nakajima deneylerinin yapılışı, ŞSE'lerin oluşturulması ve numunelerin hasar mekanizmalarının incelenme yöntemleri izah edilmiştir. Daha sonra, en düşük majör değerinin y ekseninden ötelenmiş olarak elde edilmesinin sebeplerini incelemek amacıyla yapılan deneylerin detayları verilmiş ve son olarak da ŞSE'lerin

geçerliliğini test etmek amacıyla yapılan deneysel ve sayısal durum çalışmalarının yöntemi anlatılmıştır.

Tezin 4. Bölümünde, malzemelerin mikroyapıları, deneysel olarak elde edilen mekanik özellikleri ve düzlemsel anizotropi değerleri verildikten sonra, ŞSE'lerin oluşturulmasında kullanılan ASTM E 2218-02 (Ağustos 2002) ve ISO 12004-2 (Ekim 2008) standartları detaylı olarak karşılaştırılarak, ŞSE'lerin ISO standardına göre oluşturulmasının daha güvenilir sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Sonra bu çalışmada ŞSE'lerin oluşturulmasında kullanılan ve yazar tarafından önerilen *hasarsız gridden hasarlıya ekstrapolasyon* yöntemi detaylı olarak izah edilmiştir. ŞSE'ler ISO 12004-2 standardına göre de elde edilerek Al 2024-T4'ün yanı sıra farklı karakteristiğe sahip malzemeler için de önerilen yöntemin güvenilirliği açıkça ortaya konulmuştur. Ayrıca ŞSE'lerin oluşturulmasında kullanılan standart genişlikli numunelere ek olarak, en düşük majör BŞD değerini oluşturacak sık adımlı ilave genişlikler için de deneyler yapılarak, en düşük majör BŞD değerinin standart genişlikler için elde edilene göre daha sağa ötelenerek literatürdeki çalışmalardan farklı elde edilmesi anlatılmıştır. Buna ilaveten elde edilen ŞSE'lerdeki en düşük majör BŞD değerinin minör BŞD'nin sıfır olduğu y ekseni üzerinde olması yerine eksenden ötelenmiş olarak elde edilmesinin sebeplerinin araştırılmasında elde edilen sonuçlar verilmiştir. ŞSE'lerin güvenilir olarak elde edildiği ortaya koyduktan sonra, bu çalışmanın esas konusu olan önerilen yöntem kullanılarak Al 2024-T4 sacların oda sıcaklığındaki ŞSE'lerinin kalınlığa göre değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Sonra ŞSE'lerdeki farklılıkları daha iyi açıklayabilmek için Nakajima numunelerindeki hasar mekanizmaları verilmiştir. Son olarak ŞSE'lerin geçerliliğini test etmek amacıyla yapılan klasik derin çekme, gerdirmeli çekme ve hidrolik şişirme prosesleri için deneysel ve sayısal durum çalışmalarının sonuçları verilerek çeşitli kalınlıklar için farklı ŞSE'lerin kullanılmasının gerekliliği tartışılmıştır.

Tezin 5. Bölümünde ise tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve yapılması önerilen çalışmalar verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde ilk olarak alaşımlı alüminyumlar ve çalışmada kullanılan Al 2024 hakkında bilgi verildikten sonra, sac metallerin şekillendirilebilirliğini belirlemek için kullanılan deneysel ve teorik modeller üzerinde durulmuştur. ŞSE'ye dolayısıyla şekillendirilebilirliğe etki eden parametreler araştırıldıktan sonra, çalışmanın temel konusu olan sac kalınlığının ve haddeleme doğrultusunun ŞSE üzerine etkisi detaylı olarak izah edilmiştir.

2.1. Alaşımlı Alüminyumlar

Alüminyum sahip olduğu özellikler bakımından çok kullanılan bir mühendislik malzemesidir. Saf alüminyumun farklı alanlarda kullanılabilmesi için mukavemeti artırılmalıdır. Alüminyuma soğuk şekillendirme ile mukavemet kazandırılabildiği gibi, alaşım elementi ilavesi ile daha fazla, hatta ısıl işlem ile daha da fazla mukavemet kazandırılmaktadır. Bu sayede alüminyumun çekme mukavemeti 450 MPa civarına, yani yaklaşık yapı çeliği mukavemetine kadar yükseltilebilmektedir (Anonymous, 2002).

Alaşımlı alüminyum saclar alaşımın metalürjik durumuna göre isimlendirilirler. 3XXX, 4XXX ve 5XXX serileri şekil değişimi ile sertleşebilirken, 2XXX, 4XXX (bazıları), 6XXX, 7XXX serileri ısıl işlem ile sertlik kazanabilirler. Her bir seri mukavemet ve şekillendirilebilirlik açısından avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı gerektiren uygulamalar için ısıl işlem ile sertleşebilen alaşımlara ihtiyaç duyulur (Story ve ark., 1993).

2.1.1. Alaşımlı alüminyumların ısıl işlemle sertleştirilmesi

Isıl işlem ile sertleşen alaşımlar, çökelme sertleşmesi ile mukavemet kazanabilmektedir. Çökelme sertleşmesinin amacı, atomların tane sınırlarına yığıldığı ve homojen olmadığı istenmeyen bir mikroyapıyı, ana faz içerisinde yoğun ve ince çökelmiş parçacıklar dağılımı elde ederek homojen bir mikroyapıya dönüştürmektir. Doymuş katı çözeltilerin çökelmesi devam ettikçe mukavemet artmakta ve nihayet maksimum bir değere ulaşmaktadır. Çökeltiler dislokasyon hareketlerini zorlaştırarak

ısıl işlem görmüş alaşımın dayanımını artırmakta ve uzama kabiliyetini azaltmaktadır. Bir alaşımının çökelme ile sertleşebilmesi için belirli şartların sağlanması gereklidir. Alaşım içerisindeki element veya bileşikler, yüksek sıcaklıklarda oldukça çok, düşük sıcaklıklarda ise pek az çözünebilirliğe sahip olmalıdır (Anonymous, 2002).

Çökelme sertleşmesi süreci; solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma işlemlerinden oluşmaktadır.

Solüsyona alma: Malzeme solvüs sıcaklığının biraz altına kadar ısıtılarak tane sınırlarında çökelen 2.fazlar çözündürülüp, homojen tek biçimli α katı solüsyonu elde edilinceye kadar bu sıcaklıkta yeterince bekletilir.

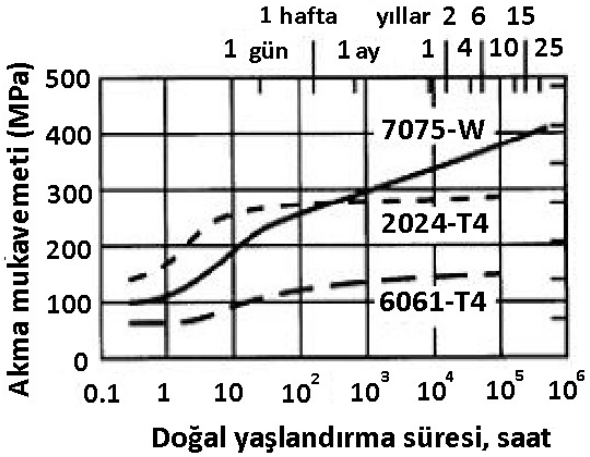
Su verme: Solüsyon işleminden sonra atomların potansiyel çekirdeklenme yerlerine difüz etmesi için yeterli zamanı bulmasını engelleyerek istenmeyen 2.fazın oluşmasını önlemek ve solüsyonu aşırı doymuş katı solüsyon haline getirmek için, malzeme fırından çıkarıldıktan sonra çok geçmeden hızla daha düşük bir sıcaklığa soğutulur. Bu sayede yapıda fazlaca 2.faz içeren aşırı doymuş ve dengeli olmayan α katı solüsyonu oluşturulur. Malzemeyi su vermeden soğumaya terk etmek, katı eriyiklerin tane sınırlarında ve kayma düzlemlerinde çökelmesine ve dolayısıyla şekil değiştirme kabiliyetinin azalmasına sebep olur. α fazı, fazla bakır içeren aşırı doymuş katı eriyiktir ve dengeli bir yapıda değildir (Anonymous, 2002).

Yaşlandırma: Son olarak aşırı doymuş α içerisindeki dengeli yapıda olmayan 2. fazların çökelmesini sağlayarak homojen ve kararlı bir mikroyapı elde etmek için, malzemenin yaşlandırma işlemine tabi tutulması gerekir. Yaşlandırma işlemi doğal (oda sıcaklığında yaşlandırma) ve yapay olabilmektedir.

Doğal yaşlandırma işlemi, solüsyona alma ve su vermeden sonra malzemenin oda sıcaklığında belirli bir süre bekletilerek, katı solüsyon içerisindeki alaşım elementlerinin katı solüsyondan ayrılıp çökelmesiyle malzemenin sertliğinin artması ve özelliklerinin stabil hale gelmesidir (Hatipoğlu, 2007). Solüsyona alma ve su verme işleminden sonra malzeme doğal yaşlanırsa T4, su verme işleminden hemen sonra mekanik özellikleri iyileştirmek için malzeme yeteri derecede soğuk şekillendirilir ve doğal yaşlandırılırsa T3 temperi işaretini alır. T3 ve T4 temperleri ile yüksek çekme/akma mukavemeti oranı, yüksek kırılma tokluğu ve yorulma direnci elde edilir (Smith, 1997; Totten ve MacKenzie, 2003).

Bazı alaşımlarda oda sıcaklığında birkaç gün bekletme ile yeterince çökelme sağlanarak, çoğu uygulama için yeterli özelliklere sahip kararlı ürünler elde edilebilirken, bazı alaşımlar oda sıcaklığında doğal olarak yaşlandırıldıkları zaman ciddi

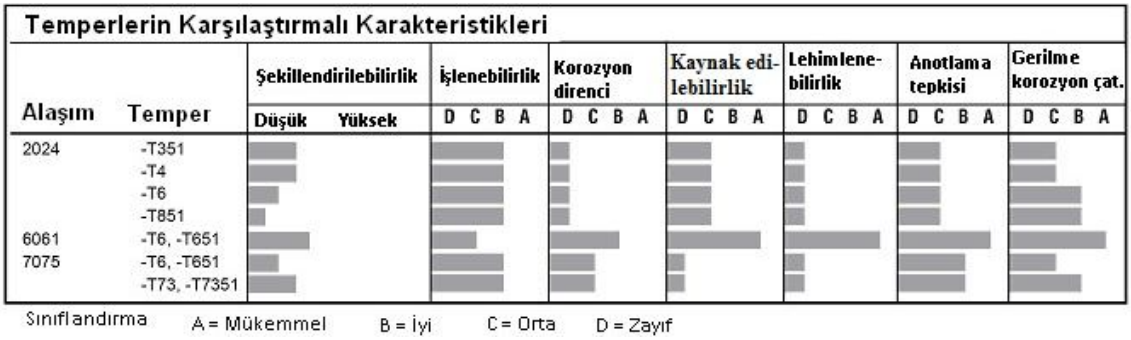
derecede az kararlı olmaktadırlar. Oda sıcaklığında kararlı olabilen alaşımların bazıları için, özellikle 2XXX serisi, doğal yaşlandırma sonucu T3 ve T4 kullanışlı temperleri elde edilebilmektedir (Ortiz ve ark., 2007). Al 2024 dört beş gün doğal yaşlandırma ile mekanik özellikleri % 95, yedi gün sonunda ise tamamen stabil hale gelecek ve yıllar sonra bile değişiklik göstermeyecektir (Şekil 2.1.) (Elwin, 1990; Vargel, 2004).



Şekil 2.1. Farklı alaşımlar için yaşlandırma süresiyle akma mukavemetinin değişimi (Elwin, 1990)

Oda sıcaklığında düşük çökelme reaksiyonuna sahip ve stabil olmayan alaşımlar (6XXX serisinin tamamı ve 7XXX serisinin büyük kısmı) doğal yaşlandırıldıklarında mekanik özelliklerinde gün geçtikçe ve yıllar sonra bile önemli değişimler meydana gelecektir. Çökelme işleminin hızlandırılarak kısa sürede kararlı bir yapı, daha yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direnci elde edilmesi amacıyla, numunenin yapay yaşlandırılması gerekir. Yapay yaşlandırılan alaşımlara T6 veya T8 temper işareti verilir (Elwin, 1990; Brooks, 1991).

Bazı önemli alaşımlı alüminyumlar için temper özellikleri Şekil 2.2.'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. T6'nın mukavemeti T4'den yüksektir, ancak şekillendirilebilirlik dolayısıyla süneklik şekilden de görüldüğü gibi daha düşüktür. Bu nedenle alaşımlı alüminyumlar genellikle doğal yaşlandırılmış (T4) veya tavlanmış durumda (O) şekillendirilirken, yapay yaşlandırılmış durumunda çok nadiren şekillendirilirler (Ortiz ve ark., 2007). Ancak O temperi durumunda şekillendirilen parçalara mukavemeti artırmak için ısıl işlem uygulanması durumunda, parçada çarpılmalar meydana gelecektir (Dorward, 1994). Malzemenin solüsyona alma işlemi ve su verme işlemi uygulandıktan hemen sonraki durumu olan W formunda



Şekil 2.2. Al 2024 için T4 temperinin diğer temperlerle karşılaştırılması (www.alcoa.com)

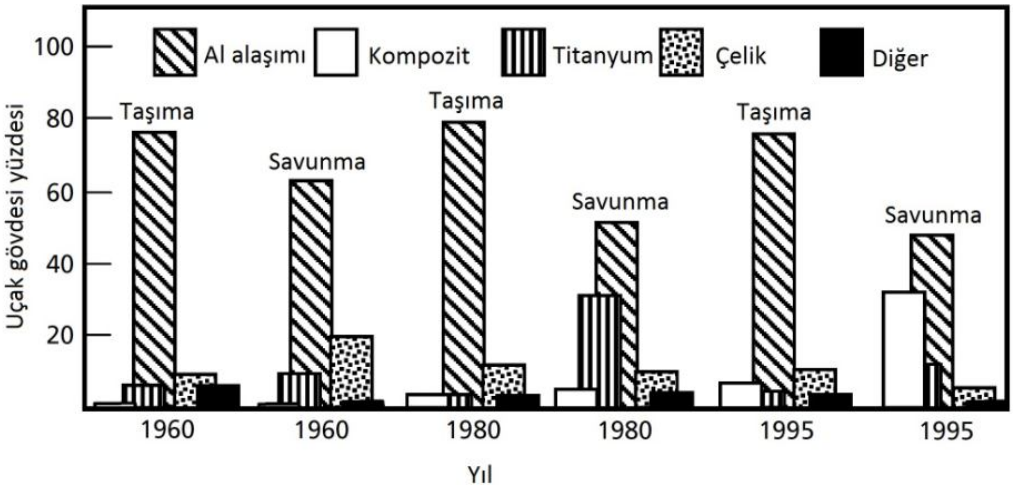
şekillendirme yapılarak, 0, T3, T4 gibi temperlere göre daha yüksek uzama değerleri elde edilebilir. Ancak malzemeler W durumunda kararlı bir yapıya sahip değildir ve özellikleri gün geçtikçe değişecektir (Vallellano ve ark., 2008).

Al 2024 için, T4 temperinin mukavemeti O temperinin yaklaşık üç ila dört katı iken, % uzama değerleri arasında önemli bir fark yoktur. T6 ve T8 temperleri genellikle 2XXX serisi malzemelere uygulanmaktadır. T3 veya T4 temperlerindeki malzemeler genellikle sadece eğme, çekme veya orta dereceli gerdirme gibi şekillendirme işlemleri için uygundur (Elwin, 1990). Bu nedenle bu çalışmada T4 temperi tercih edilmiştir.

2.1.2. Alaşımlı alüminyumların havacılıktaki önemi

Havacılık endüstrisinde tasarımcılar, sürekli bir performans artışı elde etmek için devamlı olarak hafif ve güçlü malzemeler üzerine araştırmalar yapmaktadırlar. Performans artışını sağlamanın ve uçak gövde ağırlığını azaltmanın en verimli yolu malzeme yoğunluğunun azaltılmasıdır. 1920'den beri uçak gövdeleri alaşımlı alüminyumlarından imal edilmektedir. Yüksek mukavemetli 2XXX ve 7XXX serisi alaşımların havacılık ve otomobil endüstrisindeki kullanımı son yıllarda gittikçe artmaktadır (Cantor, 2001).

Alaşımlı alüminyumların uçak gövdesi olarak kullanılmasındaki üstünlüğü Şekil 2.3'te görülmektedir. Gelecekte uçaklarda alüminyumun rolü kompozit malzemelerin kullanımının artması ile azalacak gibi görünse de, yüksek mukavemetli alaşımlar, sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı, önemli bir uçak gövdesi malzemesi olarak kalmaya devam edecektir (Campbell, 2006).



Şekil 2.3. Uçak gövdesindeki malzeme oranlarının yıllara göre değişimi (Campbell, 2006)

2XXX serisinin en önemli alaşımlardan birisi olan, % 4.5 Cu, % 1.5 Mg ve % 0.6 Mn içeren Al 2024 günümüzde modern havacılık endüstrisinde sac, plaka ve dövme olarak kullanılmaktadır. Bu alaşım özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranı gerektiren parçalar ve uygulamalar için oldukça uygundur. Özellikle ticari uçakların gövdesi ve alt kanat kaplaması gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca iyi işlenebilirlik, iyi hasar toleransı, yüksek kırılma tokluğu, kötü korozyon dayanımı, profil çekilebilirliği ve kaynak edilebilirliği diğer özellikleridir (Elwin, 1990).

2.2. Sac Metallerin Şekillendirilebilirliği

Sac metal şekillendirme işlemi basit bir bükme işlemi olabildiği gibi, bükme, gerdirme ve derin çekme işlemlerinin kombinasyonu olan çok karmaşık bir şekillendirme işlemi de olabilmektedir. Bükme en genel şekil değiştirme tipidir ve çoğu şekillendirme işlemlerinde meydana gelmektedir. Derin çekme işleminde, sacın kalıp içerisine akışı baskı plakası ile kontrol edilerek erkek kalıp yardımıyla şekillendirilmektedir. Gerdirme işleminde ise sacın dişi kalıp boşluğuna doğru hareketi baskı plakası ile engellenmektedir (Marciniak ve ark., 2002).

Sac metal şekillendirme işlemlerinde yırtılma, boyunlaşma, buruşma ve geri yaylanma gibi problemler meydana gelebilmektedir (Şekil 2.4.). Bunlardan herhangi birinin veya bileşiminin meydana gelmesi sac metali kullanışsız hale getirmektedir ve bu hatalar şekil değiştirme sınırını tanımlayan faktörlerdir. Gerdirme işleminde sac,



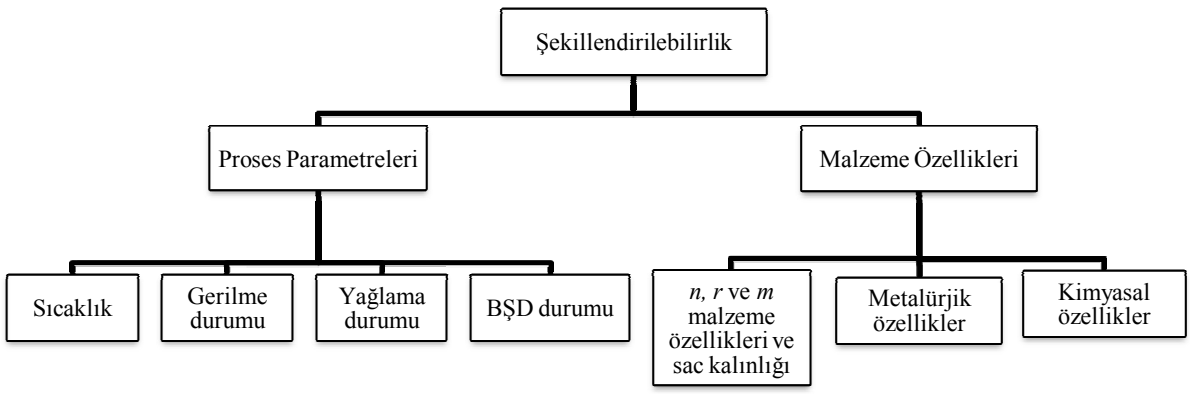
a) b) c)

Şekil 2.4. Sac metal şekillendirmede meydana gelebilecek problemler a) buruşma, b) yırtılma, c) bölgesel boyunlaşma (Altan, 1998)

önce üniform, sonra bölgesel şekilde incelir ve sacda boyunlaşma olarak bilinen bölgesel incelme bandı oluşur (Banabic ve ark., 2000).

Başarılı bir şekillendirme için, şekil değiştirmeler üniform olmalı, hasar oluşmaksızın yüksek şekil değiştirme seviyesine ulaşılmalı, parçanın şekli kalıptan çıkarıldığı zaman aynı kalmalı ve yüzeyi pürüzsüz olmalıdır (Taylor, 1988). Sac metallerin "*şekillendirilebilirliği*" ise; sacın şekillendirilmesi sırasında yırtılma, bölgesel boyunlaşma ve buruşma gibi bir hasara uğramadan istenen şekli alma kabiliyetidir (Marciniak ve ark., 2002). Malzemenin özellikleri ve proses parametreleri metallerin şekillendirilebilirliğini belirleyen başlıca faktörlerdir (Dieter, 1988). Şekil 2.5.'te sac metallerin şekillendirilebilirliğine etki eden parametreler özetlenmiştir.

Sac metallerin şekillendirilebilirliğini belirlemek için araştırmacılar tarafından birçok deney geliştirilmiştir. Bu deneylerin önemli olanları aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.5. Sac metallerin şekillendirilebilirliğine etki eden parametreler (Önder, 2005)

2.2.1. Şekillendirilebilirliği belirlemede kullanılan deneyler

Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini belirlemek için benzetim deneyleri (Olsen, Erichsen, Swift Cup, Hecker, Fukui vb.), sınır kubbe yüksekliği deneyi (Limiting Dome Height), mekanik deneyler ve şekillendirme sınır eğrisinin (ŞSE) oluşturulduğu deneyler kullanılmaktadır.

Benzetim deneylerinde,

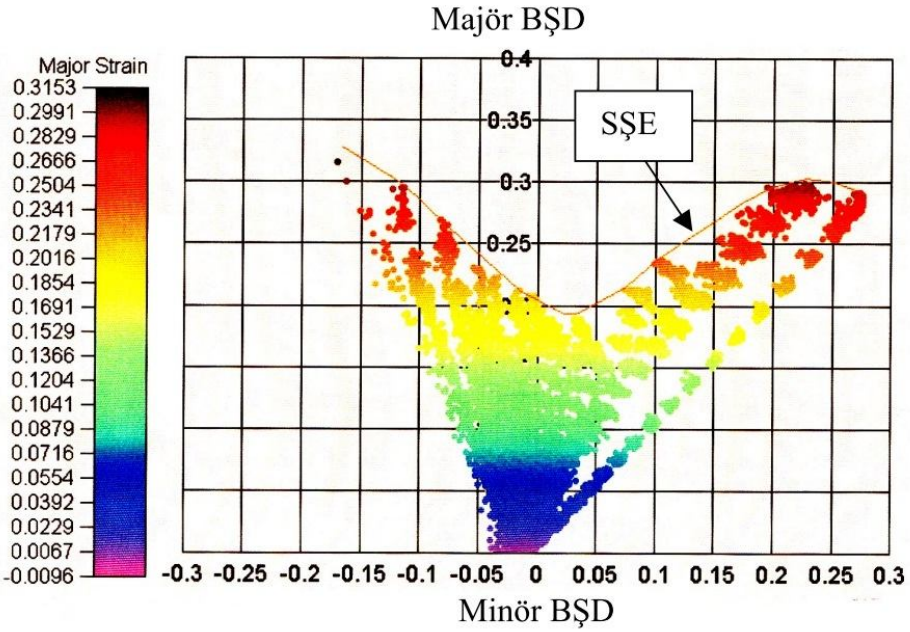
- prosesler tam olarak modellenememekte ve dolayısıyla gerçek şekillendirme işlemlerinde şekillendirilebilirlik hakkında yeterli bir bilgi sağlanamamaktadır.
- malzeme kalitesinin yanı sıra malzemenin boyutu, yağlama şartları, deney ekipmanının standardı da elde edilen sonuçları çok fazla etkilemektedir.
- elde edilen sınır çekme yüksekliği gibi bir özellik sadece belirli bir şekillendirme işlemine uygulanabilir ve bu özellik kalıpla şekillendirme hakkında bilgi vermemektedir.

Bu deneyler şekillendirilebilirlik için sayısal bir değer elde etme yerine, malzemelerin şekillendirilebilirliğini karşılaştırmak amacıyla kullanılmaktadır. Öte yandan çekme deneyi gibi deneylerden elde edilen mekanik özellikler malzemenin şekillendirme davranışını ortaya koyarken, şekillendirilebilirlik hakkında bilgi vermezler. ŞSE ise malzemenin hangi sınırlara kadar şekil değiştirebileceği bilgisini veren etkili bir araçtır (Theis, 1999) ve aşağıda daha detaylıca incelenecektir.

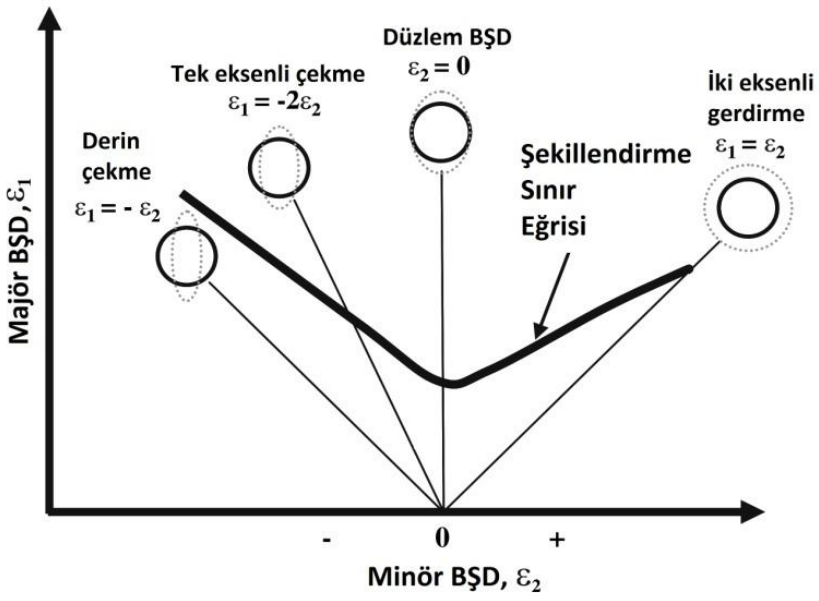
2.2.2. Şekillendirme sınır eğrisi

Sac metaller hasar oluşmadan ancak belirli sınırlara kadar şekillendirilebilirler. Şekillendirme operasyonlarında malzeme davranışını tahmin etmek için akma modelleri geliştirilmiştir. Ancak bu modellerin gerçekçi sonuçlar verebilmesi için deneysel verilere ihtiyaç vardır. Bu amaçla çekme deneyi ile elde edilen akma eğrisinin SEY programına tanıtılması gerekmektedir. Bu bilgilerle analiz yapılarak parçadaki her bir noktanın şekil değiştirme durumu hesaplanabilmektedir. Ancak sac şekillendirme işlemleri karmaşık olduğundan, çekme deneyinden elde edilen basit mekanik özellikler iş parçasının hasara uğrayıp uğramadığını belirlemek için yetersiz kalmaktadır. Buna ek olarak, SEY programına, malzemenin hangi sınırlara kadar şekil değiştirebileceği bilgisini veren en önemli araçlardan biri olan, ŞSE verilerinin de tanıtılması mutlaka gereklidir (Dieter, 1988; Lamberts, 2005).

Yüzeyi daire veya kare gridlerle kaplı sac numune, standart deneylerle boyunlaşma veya yırtılma başlangıcına kadar şekillendirilerek, bu bölgedeki elips veya yamuk şekline dönüşen gridlerdeki minör (küçük, ε_2) ve majör (büyük, ε_1) asal birim şekil değiştirme (BŞD) kombinasyonlarının ölçülerek Şekil 2.6a.'da görüldüğü gibi bir diyagram üzerine aktarılmasıyla şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) oluşmaktadır



a)



b)

Şekil 2.6. a) Farklı BŞD durumları oluşturarak ŞSE'nin elde edilmesi, b) tipik bir ŞSE (Lamberts, 2005)

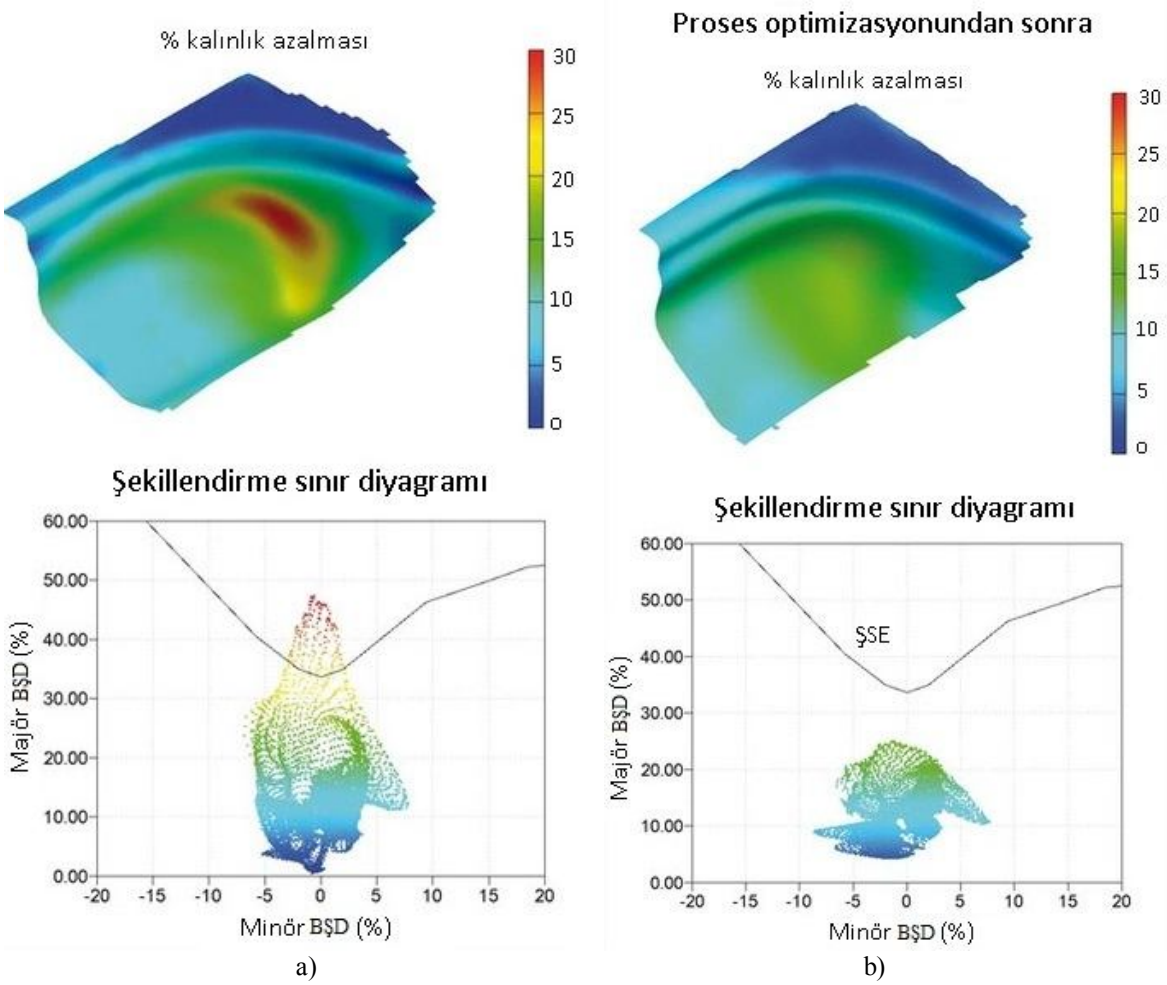
(ASTM E 2218-02). Bu diyagram basit bir kırılma kriteri değildir ve iş parçasının karşılaşabileceği olası tüm şekillendirme durumlarındaki BŞD'ler kullanılarak elde edilir. Bu şekillendirme durumları, Şekil 2.6b.'de görüldüğü gibi, derin çekme, tek eksenli çekme, düzlem BŞD ve iki eksenli gerdirmedir. Bu durumlar farklı genişlikteki numunelerin şekillendirilmesiyle elde edilir (Raghavan, 1995). Bu sayede tek eksenli çekmeden, eşit iki eksenli gerdirmeye (equi-biaxial stress) kadar geniş aralıkta elde edilen BŞD kombinasyonlarının üst sınır noktaları kullanılarak Şekil 2.6b.'de tipik bir örneği görülen ŞSE elde edilir.

$\varepsilon_2 = 0$ durumuna düzlem BŞD ($ŞSE_0$) adı verilir ve bu durumda zıt doğrultudaki şekil değişimi komşu atomlar tarafından engellenir. Sac şekillendirme işlemlerinde çoğu hasar, diğer şekillendirme durumlarından daha düşük olan $ŞSE_0$'da meydana gelmektedir (Marciniak ve ark., 2002). İki yönde de çekme gerilmesi oluştuğunda, bu durum iki eksenli gerilme olarak adlandırılır. Dik gerilmeler eşit olduğu zaman ise, eşit iki eksenli gerilme durumu meydana gelir (Taylor, 1993; Quaak, 2008).

Bu alandaki ilk çalışmalar Keeler (1961) tarafından yapılmıştır. Araştırmacı, değişik yağlama şartları ve stampa şekli için maksimum asal BŞD kombinasyonlarını diyagramın sağ tarafı için ($\varepsilon_1 > 0,\ \varepsilon_2 > 0$) elde etmiştir. Keeler'dan sonra, Goodwin (1968) yaptığı çalışmada, çeşitli deneyler yardımıyla çekme/basma bölgesi ($\varepsilon_1 > 0,\ \varepsilon_2 < 0$) için bir eğri elde etmiştir. Keeler ve Goodwin'in elde ettiği grafikler ŞSE olarak adlandırılmıştır.

Tipik ŞSE'lerin birçoğu yırtılma, boyunlaşma ve güvenli veri noktalarından oluşmaktadır (Smith ve Lee, 1997). Daha emniyetli tarafta kalmak için bazı çalışmalarda ŞSE'nin % 10 altında güvenli ŞSE adı verilen bir eğri daha çizilir (Öztürk ve Lee, 2005). ŞSE'lerin güvenilir şekilde elde edilmesi için deneyin sacın boyunlaşma başlangıcında durdurulması gerekir. Boyunlaşma başlangıcı, şekil değişiminin bölgeselleştiği yerde meydana gelen ve malzemenin hasar mekanizmasına göre bazen gözle görülebilen, bazen elle hissedilebilen bazen de elle bile hissedilemeyen bir fenomendir. Ancak kararsızlık başlangıcının belirlenmesi oldukça zordur ve deneyler çoğunlukla boyunlaşma veya yırtılma oluştuğu anda durdurulabilmektedir. Bu durum özellikle hızlı bölgesel şekil değişimi eğiliminde olan alaşımlı alüminyumlar için oldukça zordur. Hatta gevrek yapıya sahip alaşımlarda ancak yırtılma durumunda deney durdurulabilmektedir (Smith, 1998).

ŞSE, malzemelerin şekillendirilebilirliği hakkında bilgi vermesinin yanı sıra endüstride parça üretiminde başarısız tasarımlardan kaçınmak için kullanılan kendini ispatlamış kullanışlı bir araçtır (Stoughton ve Zhu, 2004). Şekillendirme sonucu parçadaki BŞD'lerin güvenli bölgede kalıp kalmadığı ve uygun proses parametreleri (baskı plakası kuvveti, yağlama vs.) belirlenebilir. Kalıp imalatından önce SEY ile analizler yapılarak tahmini BŞD'ler hesaplanıp, SEY programına tanıtılan ŞSE ile karşılaştırılır. Böylece şekillendirme sırasında yırtılma oluşup oluşmayacağı veya oluşacak muhtemel hasar bölgeleri Şekil 2.7a.'daki gibi tahmin edilebilir. Parçada hasar oluşuyorsa, kalıp tasarımı, proses parametreleri, malzeme veya kalınlığı değiştirilerek, Şekil 2.7b.'deki gibi, hasarsız bir üretim sağlanmaya çalışılır. SEY programına ŞSE'nin yanında buruşma sınır eğrileri de tanıtılarak buruşma bölgeleri de tahmin edilebilmektedir.



Şekil 2.7. a) Hasarlı ve b) hasarsız örnek SEY analizi (http:// www.gom.com)

ŞSE'ler BŞD yollarına duyarlıdır ve BŞD yolu doğrusal olduğu durumlarda geçerlidir. Ön BŞD uygulanmış ve BŞD yolu ($\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$) doğrusal olmayan durumlarda BŞD sınırı doğru bir şekilde tahmin edilememektedir. Bu durumda BŞD yoluna duyarlı olmayan Şekillendirme Sınır Gerilme Diyagramı (Forming Limit Stress Diagram) kullanılmaktadır. Ancak gerilme direkt ölçülemeyen büyüklük olduğundan, SEY programlarında hesaplama yaparak bu diyagramın elde edilebilmesi için ŞSE verilerine ihtiyaç vardır (Stoughton, 2000).

2.3. Şekillendirme Sınır Eğrilerini Belirlemede Kullanılan Teorik Modeller

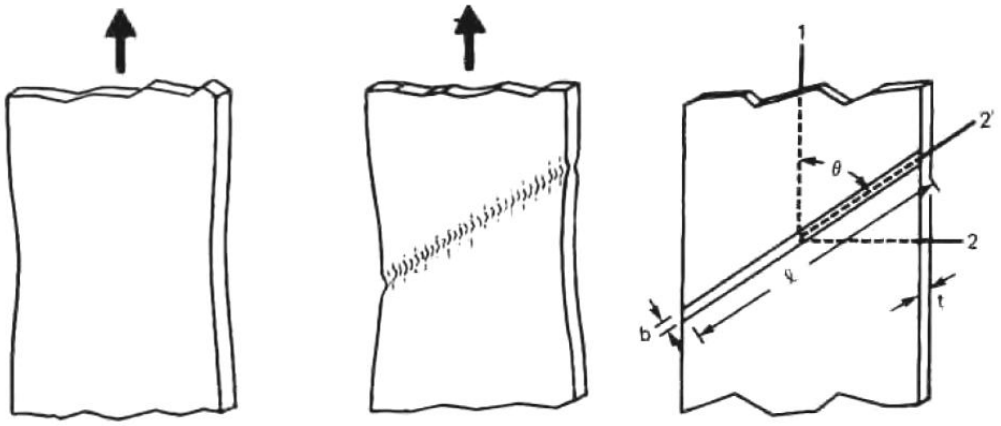
ŞSE'lerin deneysel olarak elde edilmesi uzun ve zahmetli olduğu için teorik olarak elde edilmesi üzerine çeşitli araştırmalar yapılarak, hatanın tanımlanmasına bağlı değişen, modeller geliştirilmiştir.

İlk teorik ŞSE modelleri, boyunlaşma teorisine dayanan Hill bölgesel boyunlaşma ve Swift yayılmış boyunlaşma modelleridir. Bu teorik modellerde sac homojen kabul edilir. Daha sonra Marciniak ve Kuczynski (1967) tarafından sac malzemelerin hem geometrik hem de yapısal açıdan homojen olmadığını dikkate alan teorik bir model önerilmiştir. Stören-Rice iki eksenli gerdirme altında bölgesel boyunlaşmayı modellemek için çatallanma teorisine dayanan bir verteks teorisi önermişlerdir (Jie, 2003; Paraianu ve ark., 2005; Banabic ve ark., 2007). ŞSE'nin belirlenmesindeki diğer bir teori, sac metalin yırtılıncaya kadar depoladığı enerjinin hesap edilmesini esas alan sünek kırılma kriteridir.

2.3.1. Hill bölgesel boyunlaşma modeli

Basit bir çekme numunesinde yük maksimuma ulaştığı zaman yayılmış boyunlaşma (Şekil 2.8a.), şekil değişimi ilerledikçe bölgesel boyunlaşma (Şekil 2.8b.) ve sonunda da yırtılma meydana gelir. Geniş bir numunede ise boyunlaşma hızlıca bölgeselleşemez.

Hill, düzlem gerilme şartları altında ince saclarda bölgesel boyunlaşma için genel bir model geliştirmiştir. Bu model, bölgesel boyunlaşmanın sıfır uzamanın olduğu bir doğrultu boyunca meydana geldiği varsayımına dayanmaktadır ve bu varsayım iki eksenli şartlar altında düzgün akma yüzeyine sahip malzemelerin bölgesel



Şekil 2.8. a) Yayılmış b) bölgesel boyunlaşma c) analizde kullanılan koordinat sistemi (Hosford ve Caddell, 2007)

boyunlaşmasına izin vermez. Bu nedenle Hill'in teorisi ŞSE'nin sol tarafı ile sınırlıdır (Öztürk ve Lee, 2004; Hosford ve Caddell, 2007).

Bölgesel boyunlaşma sadece zorlama altında yük düşüşü olduğu zaman oluşabilir. Bu durumda $F = \sigma_1 . A$ eşitliği kullanılarak

$$dF = 0 = \sigma_1 \, dA + A \, d\sigma_1 \tag{2.1}$$

veya

$$\frac{d\sigma_1}{\sigma_1} = -\frac{dA}{A} = -d\varepsilon_3 \tag{2.2}$$

yazılabilir. Bu teoride, Şekil 2.8c.'de görülen numunede genişlik doğrultusundaki BŞD kolayca bölgeselleşemez. Bu şart çekme ekseniyle herhangi bir θ açısında meydana gelir. Varsayıma göre 2' doğrultusundaki bölgesel boyunlaşma hattında $d\varepsilon_2' = 0$ olmak zorundadır. $d\varepsilon_2'$, BŞD dönüşümü ile $d\varepsilon_1$ ve $d\varepsilon_2$ ile direkt olarak ilişkilendirilir.

$$d\varepsilon_2' = d\varepsilon_1 \cos^2\theta + d\varepsilon_2 \sin^2\theta = 0 \tag{2.3}$$

Yüklemenin orantılı olduğu varsayılarak Eşitlik (2.3)'de $d\varepsilon_2 = \beta \, d\varepsilon_1$ yazılırsa

$$d\varepsilon_2' = d\varepsilon_1 \cos^2\theta + \beta d\varepsilon_1 \sin^2\theta = 0 \tag{2.4}$$

ifadesi elde edilir. Buradan tan $\theta = 1 / \sqrt{-\beta}$ bulunur. Burada θ açısı, sadece β negatif olursa gerçek bir değere sahiptir. Bu da ε_2'nin negatif olması ve dolayısıyla bu modelin diyagramın sol tarafı için geçerli olduğu anlamına gelir. Hacim sabitliğinden

$$d\varepsilon_3 = -(1+\beta)d\varepsilon \tag{2.5}$$

yazılır. Eşitlik (2.5), Eşitlik (2.2)'de yerine yazılarak $d\sigma_1 / \sigma_1 = (1+\beta)\, d\varepsilon_1$ elde edilir. $\sigma_1 = K\varepsilon_1^n$ pekleşme kuralı kullanılarak ŞSE'nin sol tarafı için

$$\varepsilon_1 = \frac{n}{1+\beta} \tag{2.6}$$

bölgesel boyunlaşma şartı geçerlidir (Öztürk, 2002; Hosford ve Caddell, 2007).

2.3.2. Swift yayılmış boyunlaşma modeli

Yayılmış boyunlaşma için ortaya atılan ilk model Swift'in maksimum kuvvet modelidir. Bu modele göre yayılmış boyunlaşma, sacın daha fazla gerdirilmesine rağmen kuvvetin artmadığı anda meydana gelir. BŞD'nin kararlı bir şekilde devam etmesi için $d\sigma_1 / d\varepsilon_1 > \sigma_1$ şartı sağlanmalıdır (Boogaard, 2002). ŞSE'nin sağ tarafı için Swift'in geliştirdiği teoriye göre yayılmış boyunlaşma

$$\varepsilon_1^* = \frac{2n(1+\beta+\beta^2)}{(\beta+1)(2\beta^2-\beta+2)} \tag{2.7}$$

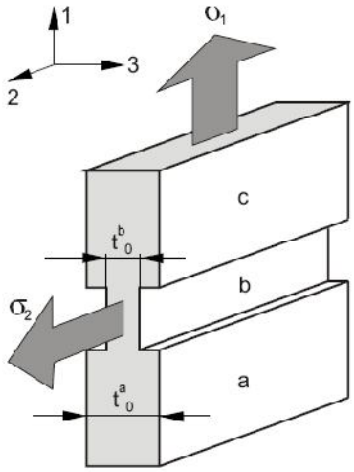
olduğu zaman meydana gelir (Öztürk, 2002; Hosford ve Caddell, 2007).

2.3.3. Marciniak ve Kuczynski modeli

İki eksenli gerdirme bölgesinde sacda bölgesel boyunlaşma meydana gelmesi imkânsızdır. Ancak homojensizliklerden dolayı şekil değişimi düzlem BŞD durumuna dönüşebilir. Bu durumda bölgesel boyunlaşma daha kolaylaşmaktadır. İki eksenli gerdirme şartları altında kararsızlığa dayanan ŞSE'leri oluşturmak için ilk ve en çok

kullanılan teorik model Marciniak ve Kuczynski (M-K) modelidir (Marciniak ve Kuczynski, 1967).

Marciniak ve Kuczynski, iki eksenli gerilme sırasında bölgesel boyunlaşmanın çok küçük kusurların büyümesi ile oluştuğunu belirtmişlerdir (Hosford ve Duncan, 1999). Bu kusurlar, kalınlıktaki değişimlerden ve/veya malzeme mukavemetindeki farklılıklardan dolayı olabilmektedir (Issa, 2004). Bu teoride, Şekil 2.9.'da görüldüğü gibi, sac metalde majör eksene dik olan düşük kalınlıkta bir oyuğun önceden var olduğu varsayılır ve kararsızlık bu oluğa dik majör asal gerilmenin ilerlemesiyle oluşur (Boogaard, 2002; Hosford ve Caddell, 2007). Oyuk içerisindeki BŞD artışının sacın diğer kısımlarımdaki artışa oranı kritik bir değere ulaştığı zaman hasarın meydana geldiği varsayılır (Issa, 2004).



Şekil 2.9. M-K Modeli (Hosford ve Duncan, 1999)

Sac metalin homojensizliği kusur faktörü $f = t_0^b / t_0^a$ ile tanımlanır. Burada t_0^a ve t_0^b sırasıyla oyuğun dış ve iç kısmından ölçülen sac kalınlıklarıdır. Sınır BŞD, *a* bölgesinde lineer bir yol boyunca $(\beta = \Delta\varepsilon_{a2} / \Delta\varepsilon_{a1})$ artımlı olarak belirlenir. Düzlem gerilme varsayımından, boyun içerisindeki gerilmeler ve BŞD artışı, $\Delta\varepsilon_{b1}$, $\Delta\varepsilon_{b2} = \Delta\varepsilon_{a2}$ geometrik sınırlaması altında, *1* doğrultusundaki kuvvet dengesi yazılarak, boyun dışındaki BŞD artışları cinsinden belirlenir (Zhu, 1999). Kararsızlık anında oluk içerisindeki BŞD artışı oluk dışındakinden çok daha fazladır ve $\Delta\varepsilon_{b1} > 10\Delta\varepsilon_{a1}$ olduğu zaman, *a* bölgesindeki ε_{a1} ve ε_{a2} değerleri sınır olarak alınır (Hosford ve Duncan, 1999).

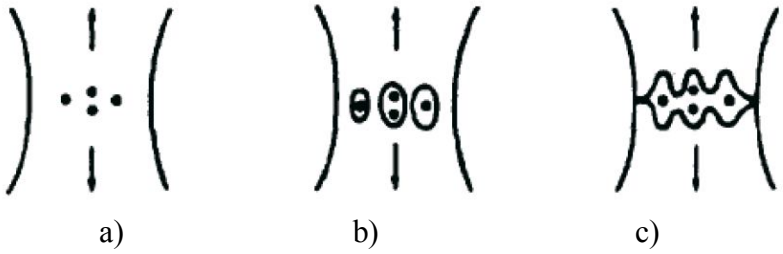
M-K teorisi ilk olarak ŞSE'nin sağ tarafı için geliştirilmiştir. Bu teori Hutchinson ve Neale (1978) tarafından ŞSE'nin sol tarafını hesaplayacak şekilde geliştirilmiştir. Araştırmacılar kusur hattının 2 doğrultusuna göre belirli bir θ açısında olduğunu varsayarak, daha önce tanımlanan β BŞD yolları için en düşük sınır BŞD'yi oluşturacak θ değerlerini belirlemişlerdir.

n, m, t, f, boşluk ve şekil değiştirme geçmişinin etkilerini belirlemek amacıyla, farklı pekleşme kriterleri kullanılarak, M-K homojensizlik teorisi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır (Öztürk, 2002). Marciniak ve ark. (1973), m ve r nin ŞSE üzerindeki etkisini incelemişlerdir ve m nin ŞSE seviyesine etki ettiği sonucuna varmışlardır. Yamaguchi ve Mellor (1976), iki eksenli gerdirme durumunda, izotropik sac metallerde kalınlık-tane boyutu bağlılığını inceleyerek bu çalışmayı genişletmişlerdir. Sac kalınlığı artışı ile ŞSE seviyesinin artığını deneylerle oldukça uyumlu olacak şekilde tahmin etmişlerdir. Fukui ve Nakanishi (1988) de benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

2.3.4. Malzemedeki boşluğa dayalı modeller

Gerçekte kullanılan malzemelerin tamamı, parçacıklar, inklüzyonlar ve çeşitli boyutlarda mikroçatlak ve boşluklar içermektedir. Şekil değişimi sırasında parçacıklar matris etrafından sıyrılarak boşluk oluşumuna neden olabilir. Şekil 2.10.'da görüldüğü gibi plastik şekil değişimiyle bu boşluklar büyümektedir.

Needleman ve Triantafyllidis (1978) ve Chu ve Needleman (1980) tarafından mikroyapının ŞSE üzerine etkisini inceleyen çalışmalar yapılarak boşluk ve hasara dayalı modeller önerilmiştir.



Şekil 2.10. a) Boşluk başlangıcı, b) boşluk büyümesi ve c) boşluk birleşmesi (Öztürk, 2002)

Boşluğa dayalı modellerdeki ana problem hacmin, gerilme ve BŞD sabitlerinin rastgele seçimidir. Bu değerlerin ölçümü oldukça zordur ve bu ölçümler için iyi bilinen bir yöntem henüz yoktur.

2.3.5. Stören-Rice modeli

Stören ve Rice (1975) malzemenin boyunlaşmış ve boyunlaşmamış bölgesi arasındaki kuvvet dengesini uygulayarak, akma yüzeyi üzerinde bir noktadan meydana gelen ŞSE davranışını tanımlamak için, bir çatallanma analizini kullanmaktadırlar.

von-Mises akma fonksiyonunu ve gerilme-şekil değiştirme bağıntısını kullanarak kararsızlık anındaki en büyük BŞD için aşağıdaki bağıntıyı türetmişlerdir.

$$\varepsilon_{1kritik} = \frac{3\beta^2 + n(2+\beta)^2}{2(2+\beta)(1+\beta+\beta^2)} \qquad (\beta \geq 0 \text{ için})$$
$$\varepsilon_{1kritik} = \frac{2n}{(1-n)(1+\beta) + \sqrt{\{(1+n)(1+\beta)\}^2 - 4n\beta}} \qquad (\beta < 0 \text{ için}) \tag{2.8}$$

Bu teori ile ŞSE'nin tamamı belirlenebilmektedir. Ancak yalnızca lineer yükleme durumunda geçerlidir ve ayrıca akma yüzeyindeki tek bir nokta, analizlerde ihtiyaç duyulan akma fonksiyonunun farklı olmasına neden olur (Jie, 2003; Situ, 2008).

2.3.6. Sünek kırılma kriteri

Sünek kırılma kriteri şekillendirme sınırını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kriterde sünek kırılmanın oluşumu şekillendirme sırasında oluşan makroskobik gerilme ve BŞD aracılığıyla tahmin edilir. Sac metallerin şekillendirme sınırı büyük ölçüde şekil değiştirme geçmişine bağlı olduğundan, bu kriterde gerilme ve BŞD geçmişleri göz önüne alınmalıdır (Takuda ve ark., 1999).

Sünek kırılma kriteri kullanılarak ŞSE'lerin tahmin edilmesi üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu kriterler sünek kırılmanın, plastik şekil değişimi sırasında, kümülatif hasar prosesinin bir sonucu olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu kümülatif proses genellikle şekil değiştirme yolu boyunca belirli bir hasar fonksiyonunun integre edilmesi olarak ifade edilir. Bu integral plastik iş kriteri olarak adlandırılır ve en genel haliyle

$$\int_0^{\varepsilon_f} \bar{\sigma}\, d\bar{\varepsilon} = C \tag{2.9}$$

şeklindedir. Burada ε_f hasarın oluştuğu eşdeğer BŞD, $\bar{\sigma}$ eşdeğer gerilme, $d\bar{\varepsilon}$ eşdeğer BŞD ve C malzeme sabitidir. Bu integral kritik bir değere ulaştığı zaman, hasarın olduğu varsayılır (Öztürk, 2002; Vallellano ve ark., 2008). Araştırmacılar tarafından bu kriter için çeşitli eşitlikler önerilmiştir. Öztürk (2002) bu eşitlikleri kullanarak ŞSE'ler oluşturmuş ve bu ŞSE'leri deneylerle karşılaştırmıştır. ŞSE'nin sol tarafı için kırılma tahminlerinin oldukça başarılı olduğu ancak ŞSE'nin sağ tarafı için aynı başarının elde edilemediği sonucuna varmıştır. Bölgesel boyunlaşmalar ise bu kriterler kullanılarak tahmin edilememiştir.

2.3.7. Gotoh modeli

Gotoh tarafından önerilen teori, şekillendirme sınırının kalınlığa bağlılığını açıklamak için kullanılan teorilerden biridir. Bu teoride bölgesel boyunlaşma başlangıcının, Stören-Rice teorisindeki gibi, üniform şekil değişimi durumundaki çatallanmadan kaynaklandığını varsaymaktadır. Bu teorinin avantajlarından birisi keskin tepe noktası açısının n değerine bağlı olmamasıdır. Ancak bu teoride kalınlık bağlılığı için henüz kesin açıklamalar yapılmamıştır (Fukui ve Nakanishi, 1988).

2.4. Teorik Modellerin Değerlendirilmesi

ŞSE'lerin tahmin edilmesine yönelik birçok teorik model geliştirilmesine rağmen, tüm malzemeler için uygulanabilen genel bir model yoktur. Ayrıca ŞSE'nin tahmini kapsamlı bir matematik ve mekanik bilgisi ile çok karmaşık hesaplamalar gerektirmektedir (Slota ve Spisak, 2005). Ayrıca birçok model ile çoğunlukla ŞSE'nin tüm bölgesi doğru bir şekilde tahmin edilememektedir.

M-K modeli ŞSE'yi ve malzeme özelliklerinin etkisini belirlemek için yeni bir yöntem sağlamaktadır (Hosford ve Duncan, 1999) ve ŞSE'yi tahmin etmek için günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Homojensizlik büyümesi ile ilgili olan M-K teorisi, kalınlık bağlılığının direkt olarak dikkate alınabileceği teorilerden birisidir. Modifiye edilmiş M-K teorisi sabit bir BŞD oranında şekillendirme sınırının sadece tek eksenli çekme deneyi sonuçları kullanılarak tahmin edilebilme avantajına sahiptir

(Fukui ve Nakanishi, 1988) ve deneysel ve teori arasında iyi sonuçlar vermektedir. Ayrıca kalınlıktaki azalmanın ŞSE seviyesini azaltacağını da doğru şekilde tahmin etmektedir. Buna rağmen, teorideki her bir faktörün etkisini değerlendirmek için deneyler yaparak ŞSE'nin kalınlık bağlılığı doğrulanmalıdır. M-K teorisinin en büyük dezavantajı ise, ŞSE'nin büyük ölçüde *f* kusur faktörüne bağlı olması nedeniyle gerçek şekillendirme işlemlerine uygulanışının çok zor olmasıdır (Zhu, 1999).

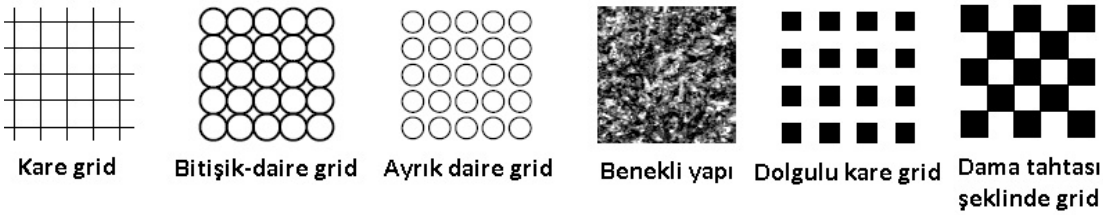
ŞSE'ler akma kriteri, pekleşme kuralı, malzeme homojensizliği, anizotropi, tane boyutu gibi pek çok faktörlerden etkilendiğinden, teorik modellerle elde edilen ŞSE'ler farklılık göstermektedir. Dolayısıyla ŞSE'leri tahmin etmede kullanılan modeller daha az güvenilir ve yetersiz kalmaktadır (Zhu, 1999; Situ, 2008). Bundan dolayı teorik modellerden elde edilen ŞSE'lerin deneysel verilerle doğrulanması gerekir.

2.5. Şekillendirme Sınır Eğrilerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Yukarıda elde edilen sonuç doğrultusunda, bu çalışmada ŞSE'lerin deneysel olarak elde edilmeye karar verilmiştir. ŞSE'ler deneysel olarak gridleme, şekillendirme ve ölçme aşamalarından oluşur. Bu aşamalar aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

2.5.1. Gridleme

BŞD'lerin ölçülebilmesi için şekillendirme işlemi gerçekleştirilmeden önce, farklı genişlikteki numuneler üzerine daire, kare vb. şekilde küçük gridler oluşturulur. Grid analiziyle ölçme ilk olarak Keeler tarafından 1965 yılında önerilmiştir (Keeler, 1968). Sac yüzeyine Şekil 2.11.'de görülen ve grid boyutları 1.25 ~ 6 mm aralığında değişen çeşitli şekiller oluşturulabilir. Çok küçük boyutta gridler kullanıldığı zaman, boyunlaşmış bölge içerisinde ölçme yapılabilmektedir. Ancak ölçmelerde



Şekil 2.11. Grid analizi için yaygın olarak kullanılan grid şablonları (ASAME Reference Manual)

yapılacak küçük bir hata, BŞD değerinde daha da büyük hataya neden olacaktır. Büyük gridler kullanılması durumunda ise yeterli doğruluk elde edilememekte ve belirli bir eğrilik yarıçapında daha büyük hata yapılmaktadır (Smith ve Lee, 1997). ASTM E 2218-02 standardında, eğrilik yarıçapı 50 mm olduğu zaman, 2.5 mm ye kadar gridlerde, eğriliğin neden olacağı hatanın kabul edilebilir olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle genellikle 2.5 mm gridler kullanılmaktadır.

Sac yüzeyine grid yapıları oluşturmanın birkaç yolu vardır. Bu yöntemlerden bazıları serigrafi (ipek baskı), fotokimyasal gridleme, elektrokimyasal dağlama ve lazer ile oymadır. Her yöntemin kendine göre avantaj ve dezavantajı vardır (Siegert ve Wagner, 1994). Yazarın da aralarında bulunduğu Öztürk ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada bu yöntemleri detaylıca anlatarak yöntemlerin doğruluk ve hassasiyetlerini belirlemişlerdir.

En uygun yöntem seçilirken, gridlerin şekil değişiminden etkilenmemesine, sürtünme ve yağlama gibi proses şartlarına direnç göstermesine ve dağlama veya oyma ile oluşturulan gridlerin çentik etkisi oluşturarak şekillendirme işlemine etki etmemesine dikkat edilmelidir. Ayrıca gridlerin yüksek doğrulukta ve çözünürlükte elde edilmesi ve yöntemin uygun maliyetli olması da önemlidir (Kim ve Lee, 1996).

Fotokimyasal yöntemle oluşturulan gridlerin ovalanarak bile çıkması, lazer ile oyma işleminin pahalı olması, elektrokimyasal dağlama yönteminde iyi toleranslar elde edilebilmesine rağmen özel ekipmana ve kimyasallara ihtiyaç duyulması ve çentik etkisi yapma ihtimalinden dolayı, bu çalışmada bu yöntemlerin kullanılması uygun bulunmamıştır. Bunun yerine, oluşturulan gridlerin şekil değişiminden etkilenmemesi, çentik etkisi oluşturmaması ve yöntemin uygulanışının basit oluşu nedeniyle (Kari ve ark., 2008) gridleme için en uygun yöntem olarak Serigrafi yöntemi belirlenmiştir (Öztürk ve ark., 2009).

2.5.2. Şekillendirme

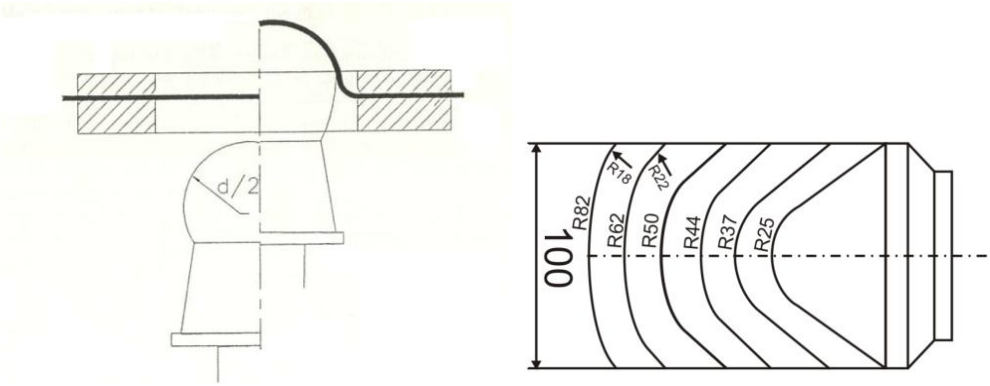
ŞSE'lerin oluşturulması için araştırmacılar farklı şekillendirme yöntemleri ve çeşitli deney numuneleri kullanmışlardır (Lewison, 1999). Bir kısım araştırmacılar ŞSE'nin sağ tarafında farklı BŞD durumları elde etmek için farklı oranlı elips kalıplarla sürtünmenin çok az olduğu hidrolik şişirme deneyini kullanırken, Holmberg ve ark. (2004) diyagramın sol tarafı için çeşitli genişliklerde çekme numuneleri kullanmışlardır. Günümüzde ŞSE'nin tamamını elde etmek için, farklı stampa geometrileri, numune

genişlikleri ve yağlayıcılar kullanılarak yapılan, düzlem dışı ve düzlem şekillendirme deneyleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Lewison ve Lee, 1999; ASTM E 2218-02).

2.5.2.1. Düzlem dışı şekillendirme deneyleri

Bu tip deneylerde sac malzeme küresel veya yarıküresel bir stampa ile şekillendirilir. Bu deneylerde sürtünme ve eğrilikten dolayı, sac kalınlığı ve eğrilik yarıçapına bağlı olarak oluşan ilave eğilme BŞD'leri ile daha büyük BŞD'ler oluşur. Bundan dolayı, elde edilen şekillendirme sınırı, stampa radyüsü gibi takım geometrilerine bağlılık göstermektedir. (Raghavan, 1995).

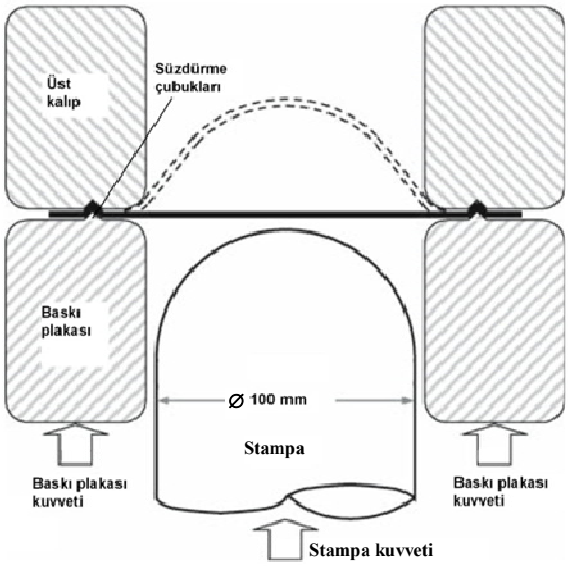
İlk olarak Keeler ve Backofen (1963) tarafından önerilen düzlem dışı deneyde, sac numune baskı plakası ve kalıp arasında kilitlenerek, sacın kalıp içerisine akışı engellenmekte ve numune küresel bir stampa ile hasar oluşuncaya kadar gerdirilerek şekillendirilmektedir (Şekil 2.12a.). Araştırmacılar farklı BŞD durumları elde edebilmek için farklı stampa şekilleri ve yağlayıcılar kullanmışlardır (Şekil 2.12b.). Ancak bu deneyde sadece ŞSE'nin sağ tarafı elde edilebilmekte ve stampa çapı ŞSE'nin şeklini ve seviyesini değiştirmektedir.



a) b)

Şekil 2.12. Keeler'ın önerdiği a) deney takımı, b) stampa çapları (Keeler ve Backofen, 1963)

Nakajima ve ark. (1971) tarafından önerilen deneyde, farklı genişlikteki dikdörtgen numuneler süzdürme çubukları ile kilitlenerek, 100 mm yarıküresel bir stampa ile hasar başlangıcına kadar şekillendirilmektedir (Şekil 2.13.). Çeşitli numune genişlikleri ve yağlayıcılar kullanılarak ŞSE'nin tamamı elde edilebilmektedir. Stampa



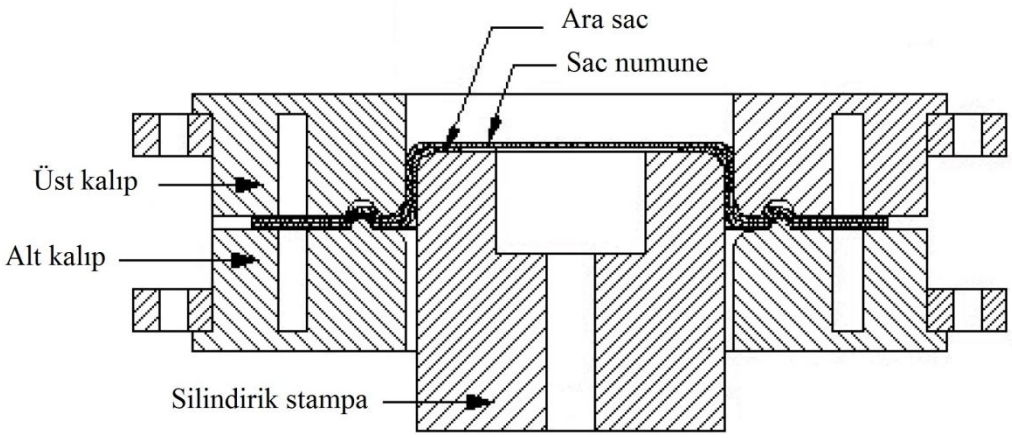
Şekil 2.13. Nakajima deney takımı (Emilie ve ark., 2008)

yarıçapının sac kalınlığına oranı (r_s/t), numunedeki eğilme gerilmelerinin etkisini azaltmak için 15'ten büyüktür (Hosford ve Duncan, 1999).

2.5.2.2. Düzlem şekillendirme deneyleri

Düzlem şekillendirme deneylerinden en çok kullanılanı Marciniak ve Kuczynski (1967) tarafından önerilen Marciniak deneyidir. Bu deneyde numuneler baskı plakası ile kilitlenerek tabanı düz ve ortası boşluklu silindirik bir stampa ile hasar başlangıcına kadar şekillendirilir (Şekil 2.14.). Alt yüzeyde sürtünmesiz bölge oluşturarak yırtılmayı bu bölgeye zorlamak için, numune ve stampa arasında ortasında dairesel delik olan ara saclar kullanılmıştır. Böylece şekil değişimi, numunede herhangi bir eğilme ve sürtünme etkisi olmaksızın, sacın düzleminde üniform ve orantılı olarak meydana gelmektedir (Tadros ve Mellor, 1978).

Ölçülen bölge düz olduğundan, eğrilikten dolayı oluşacak ölçme hataları ortadan kalkmaktadır. Ayrıca eğilme BŞD'lerinin olmamasından Nakajima deneyine göre küçük BŞD'ler oluşmaktadır. Moshksar ve Mansorzadeh (2003) yaptıkları çalışmada Nakajima deneyinden elde edilen ŞSE'nin Marciniak deneyinden elde edilene göre daha yüksek seviyede olduğunu ortaya koymuşlardır. Düzlem şekillendirme yöntemlerinin çoğunda sınırlı sayıda BŞD yolu elde edilebilmektedir (Ghosh ve Hecker, 1974). Tadros



Şekil 2.14. Marciniak düzlem şekillendirme deneyi (Öztürk, 2002)

ve Mellor (1978), Gronostajski ve Dolny (1980) ve Raghavan (1995) bu dezavantajın üstesinden gelmek için, farklı geometri ve genişlikte deney numuneleri ve ara sac kullanarak geniş bir aralıkta bir ŞSE elde etmek için Marciniak deneyini modifiye etmişlerdir. Holmberg ve ark. (2004), ŞSE'nin çekme deneyi cihazında hızlı ve basit bir şekilde oluşturulduğu başka bir düzlemsel deney geliştirmişlerdir. Ancak bu deneyde ŞSE'nin sadece sol tarafı elde edilebilmektedir.

Marciniak deneyi çeşitli avantajlara sahip olmasına rağmen, ŞSE'lerin belirlenmesinde, gerçek şekillendirme işlemlerinde meydana gelen eğilme gerilmelerini içeren ve ISO 12004-2 standardına göre yapılan Nakajima deneyi yaygın olarak kullanılmaktadır (Hecker, 1975; ISO 12004-2). Bu nedenle bu çalışmada ŞSE'leri belirlemek için Nakajima deneyi kullanılmıştır.

2.5.3. Gridlerin ölçülmesi

ŞSE'lerin oluşturulması için şekillendirme işleminden sonra hasar bölgesindeki gridlerdeki BŞD'lerin doğru olarak ölçülmesi gereklidir. Sınır BŞD değerlerinin belirlenmesi için genellikle yırtılma veya boyunlaşma bölgesinden veya bu bölgeye çevresel olarak zıt bölgeden ölçme yapılmaktadır. Hasar bölgesinden elde edilen BŞD'ler yırtık veya boyunlaşma olarak, zıt bölgeden elde edilenler ise boyunlaşma başlangıcı veya güvenli olarak adlandırılır (Smith, 1998).

Gridlerin ölçülmesinde manüel ve otomatik olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Manüel olarak skalalı mikroskop, ölçekli büyüteç veya Mylar şeridi kullanılarak ölçme yapılırken, fotoğraf üzerinden görüntü işleme yöntemini kullanan otomatik grid ölçme sistemleri ile de ölçme yapılabilmektedir. Manüel yöntemlerin doğruluklarının az oluşu, çok fazla uğraş ve nitelikli personel gerektirmeleri nedeniyle çoğunlukla otomatik sistemler kullanılmaktadır (Carasusan ve Canal, 2003). Grid ölçme yöntemleri, özellikleri ve doğrulukları Öztürk ve ark. (2009) yaptığı çalışmada detaylı olarak verilmiştir.

2.6. Şekillendirme Sınır Eğrisine Etki Eden Faktörler

Sac metallerin özellikleri malzemeye, alaşım elementine, prosese, ısıl işleme ve soğuk şekillendirme derecesine göre değişiklik gösterebilmektedir (Taylor, 1993). Malzeme kusurları veya kalınlık değişimi, porozite, pürüzlülük gibi homojensizlikler ve plastik özelliklerdeki değişimler sınır BŞD'leri etkilemektedir (Bressan, 2008). Şekil değiştirme dağılımını etkileyen malzeme özellikleri, pekleşme katsayısı n, normal anizotropi r ve şekil değiştirme hızı duyarlılığı m dir. Daha yüksek şekil değiştirme seviyelerine ulaşılması, malzeme tipi ve kalınlığı t, alaşım elementi, sıcaklık, tane boyutu ve şekli, mikrobileşenler ve üniform olma gibi pek çok faktöre bağlıdır (Taylor, 1988). Dolayısıyla t, r, n, m, BŞD yolu, yağlama durumu ve homojensizlik gibi faktörler ŞSE seviyesine etki edebilmektedir (Djavanroodi ve Derogar, 2010).

Ayrıca ŞSE'lerin değişkenliği, yağlama durumu, grid boyutu, gridleme ve ölçme yöntemi, şekillendirme ekipmanı, operatör değişikliği, hata tanımlaması ve eğrinin çizilmesinde kullanılan yöntem gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır (Situ, 2008). Bunlardan meydana gelen hatalar, ŞSE'nin belirlenmesinde belirsizlikler oluşturmakta ve özellikle aynı alaşım ve kalınlık için bile karşılaştırma yapılmasını zorlaştırabilmektedir (Smith ve Lee, 1997). Bu çalışmada sac kalınlığının ve haddeleme doğrultusunun ŞSE üzerindeki etkisi incelendiğinden bu faktörler detaylı olarak anlatılmıştır.

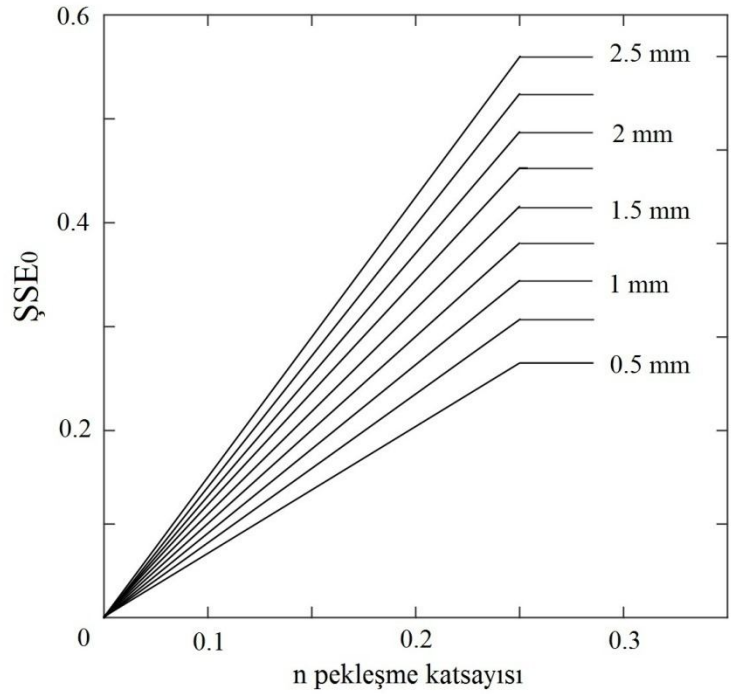
2.6.1. Sac kalınlığı

Endüstride belirli bir malzeme için genellikle tek bir ŞSE kullanılmaktadır. Sac kalınlığının ŞSE'ye etki ettiği malzemeler için tek bir ŞSE'nin kullanılması, kalınlıkla şekillendirilebilirliğin arttığı düşünüldüğünde, daha kalın sacların şekillendirilebilirliğinden tam olarak faydalanılamaması anlamına gelmektedir. Ayrıca daha ince saclar için yanlış bir sınır belirlenmiş olacaktır (Kleemola ve Kumpulainen, 2003). Genellikle sac kalınlığının şekillendirilebilirlik üzerinde güçlü bir etkiye ve daha kalın sacların daha büyük şekillendirme sınırına sahip olduğuna inanılır (Keeler, 1974; Lee ve Hiam, 1978; Hosford ve Caddell, 2007).

Literatürde çeliklerde sac kalınlığının ŞSE seviyesine etkisi üzerine pek çok deneysel (Charpentier, 1974; Raghavan, 1995; Kumar, 2002; Svensson, 2004; Narayanasamy ve Narayanan, 2007) ve teorik çalışma (Rees 2001; Kim ve ark., 2003) olmasına rağmen, alaşımlı alüminyumlar için birkaç alaşım dışında yeteri sayıda deneysel çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmalarda çelikte kalınlık etkisinin büyük olduğu, alüminyum ve alaşımlarında ise bu etkinin çeliğe göre az olduğu belirtilmektedir (Keeler ve Brazier, 1977). Yüksek BŞD duyarlılığına sahip malzemelerde boyunlaşma daha sürekliyken, düşük m değerine sahip alaşımlı alüminyumlar için boyun bölgesi çeliğe göre daha keskindir. Bu nedenle kalınlık etkisinin alüminyum gibi daha keskin boyunlaşmaya sahip malzemelerde çeliğe göre daha az olduğu (Nakajima ve ark. 1971; Smith ve Lee, 1997; Hosford ve Duncan, 1999), ancak bu etkinin şekillendirme işlemlerinde önemli olabileceği belirtilmektedir (Jalinier ve Schmitt, 1982; Raghavan, 1995; Smith ve Lee, 1997; Zadpoor ve ark., 2009).

Keeler ve Brazier (1977) tarafından, çelik için $ŞSE_0$ değerinin n ve t nin fonksiyonu olarak değişimini ifade eden ve Şekil 2.15.'te görülen grafik deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki bağıntıları ortaya çıkarmışlardır.

$$ŞSE_0 = n\,(1 + 0.72t)\ (n \leq 0.2 \text{ için}) \qquad (2.10)$$
$$ŞSE_0 = 0.2\,(1 + 0.72t)$$

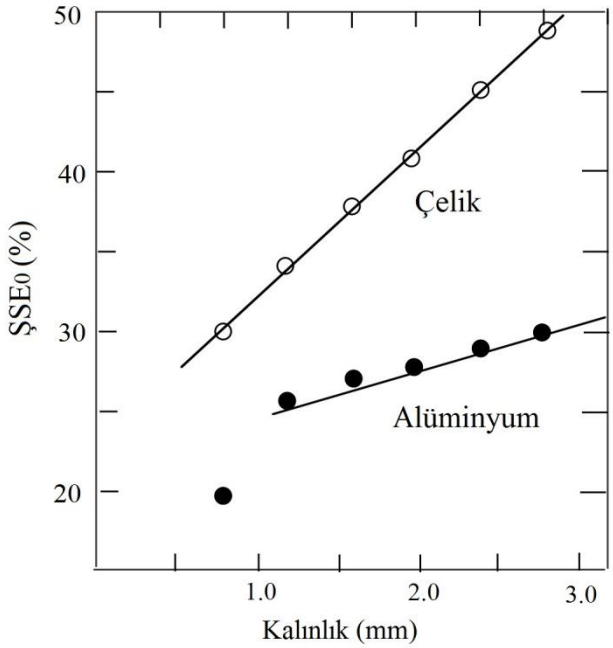


Şekil 2.15. Çelik için $ŞSE_0$'ın *n* ve kalınlığın fonksiyonu olarak değişimi (Keeler ve Brazier, 1977)

Ancak bu bağıntı 0.21'den büyük *n* değerine sahip malzemeler, yeni tip çelikler ve alüminyum alaşımları için uygun sonuçlar vermemektedir. Hosford ve Caddell (1993), $n = \varepsilon_l$ olduğu zaman düzlem BŞD bölgesinde boyunlaşmanın başlayacağını ancak boyunlaşma başlangıcının hassas olarak elde edilememesi nedeniyle, deneysel olarak elde edilen $ŞSE_0$ seviyelerinin daima daha yüksek olduğunu belirtmektedir.

Banabic ve ark. (2000), Şekil 2.15.'tekine benzer olarak, *t* nin artışıyla $ŞSE_0$'ın lineer olarak artacağını ve kritik bir *n* değerinin üzerinde sabit kalacağını belirtmiştir. Smith ve Lee (1997) bazı alüminyum ve çelikler için genel anlamda *t* nin $ŞSE_0$'a etkisini Şekil 2.16.'daki gibi ortaya koymuşlardır.

Fukui ve Nakanishi (1988), sünek bir yapıya sahip olan Al 1100 alüminyum sac kalınlığının $ŞSE_0$ üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir ve kalınlık artışı ile ŞSE seviyesinin arttığını ortaya koymuşlardır. 3XXX (Jalinier ve Schmitt, 1982), 5XXX ve 6XXX (Hosford ve Duncan, 1999) serisi alaşımlar için kalınlığın ŞSE üzerindeki etkisinin az olduğu deneysel olarak doğrulanmıştır. Smith ve Lee (1997) ve Situ (2008) yaptıkları çalışmada, Al 6111-T4 için sac kalınlığının sadece $ŞSE_0$ üzerindeki etkisini incelemişler ve $ŞSE_0$'ın şekillendirme işlemlerinde önemli olabilecek seviyede arttığını göstermişlerdir.



Şekil 2.16. Alüminyum ve çelikler için genel olarak sac kalınlığının $ŞSE_0$'a etkisi (Hosford ve Caddell, 2007)

Hursman (1978), Al 2024-T3 için birbirine yakın olan 0.8 ve 1.2 mm kalınlıkların ŞSE'ye etkisini incelemiştir ve etkinin fazla olmadığı sonucuna varmıştır. 2024-T3 için kalınlığın etkisinin çekme deneyi ile elde edildiği çalışmalar da vardır (Hatipoğlu, 2007). Zadpoor ve ark. (2009), Al 2024-T3 için çeşitli kalınlıklarda yaptıkları çekme deneyi sonucunda, sac kalınlığı artışı ile maksimum uzama miktarının 1 mm'den 2 mm kalınlığa kadar artış gösterdiğini ve 2 mm'den sonra aynı kaldığını veya çok az bir azalma gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Alaşımlı alüminyumlar için *t* nin ŞSE'ye etkisi üzerine teorik çalışmalar da vardır. Kim ve ark. (2003), Al 6111-T4 için *t* nin ŞSE üzerindeki etkisini diyagramın sağ tarafı için teorik olarak elde etmişlerdir ve *t* artışı ile şekillendirme sınırının orantılı olarak arttığı sonucuna varmışlardır. Schleich ve ark. (2009), iki farklı kalınlığa sahip Al 6016 için *t* nin ŞSE üzerindeki artış etkisini tahmin yoluyla elde etmişlerdir.

Araştırmacılar sac kalınlığının şekillendirme sınırına bağlılığı ile ilgili farklı açıklamalar getirmişlerdir. Hosford ve Caddell (1993) ve Raghavan (1995), ince ve kalın saclardaki boyunlaşmanın geometrik olarak benzer olduğunu ve kalın saclarda bölgesel boyunlaşmanın ince saclardakine göre daha geniş olduğunu iddia etmişlerdir. Kalınlık göz önüne alınmaksızın şekillendirme sınırını belirlemede aynı grid boyutu kullanıldığı zaman, daha geniş boyunlaşma bölgesinin, kalın saclarda daha büyük BŞD'ye yol açacağını belirtmektedirler. Marciniak ve Kuczynski (1967), şekillendirme

sırasında oluşan hatalara bölgesel kalınlık kusurlarının neden olduğunu belirtmektedirler. Saclar haddeleme prosesi ile üretildiği için farklı kalınlığa sahip sac malzemelerin yüzeyinde oluşan kusurlar yaklaşık aynı büyüklükte olacaktır. Bunun sonucunda M-K teorisine göre kalın saclarda hata daha geç meydana gelecektir (Hosford ve Caddell, 2007). Jalinier ve Schmitt (1982), şekillendirme sırasında ince saclarda oluşan boşluk büyümesinin kalın saclardakinden daha hızlı olduğunu ve bunun sonucunda ince sacların daha düşük BŞD seviyelerinde bölgesel boyunlaşma gösterdiğini belirtmişlerdir. Hutchinson ve Neale (1978), kalınlık ile şekillendirme sınırındaki artışın, kalınlık ile bölgesel boyunlaşmadaki üç eksenli gerilmelerin artmasından ve bu gerilmelerin boyunlaşma başlangıcını geciktirmesinden dolayı olduğunu belirtmişlerdir. Rao ve Chaturvedi (1984), üç eksenli gerilmeleri hesap etmek için M-K teorisinde bir analiz kullanarak şekillendirme sınırının sac kalınlığı ile arttığını göstermişlerdir. Gotoh ve ark. (1986), bir akma fonksiyonu kullanarak, eşit iki eksenli gerilme altında şekillendirme sınırını belirlemek için çatallanma analizi gerçekleştirmişler ve sınır BŞD'lerin sac kalınlığı ile artış gösterdiğini tahmin etmişlerdir.

Düzlem dışı deneylerde sac üzerinde meydana gelen eğilme gerilmeleri kalınlık ile artış göstermektedir ve bu gerilmelerdeki değişim kalınlık etkisinde göz önüne alınmalıdır. Triantafyllidis ve Samanta (1986), eğilme etkilerini tam olarak göz önüne alan nonlineer sonlu elemanlar yöntemi kullanarak, sac kalınlığının ve eğriliğin etkilerini incelemişlerdir. Bu araştırmacılar, sayısal ve deneysel çalışmalara dayanarak, hata kriteri olarak boyunlaşma başlangıcı alındığı zaman, ince ve kalın saclardaki bölgesel boyunlaşmadaki büyümelerin farklı da olsa kalınlık etkisinin pek az olduğunu ortaya koymuşlardır. İnce saclar için boyunlaşma başlangıcı ve yırtılmadaki BŞD arasında önemli bir fark yokken, kalın saclarda boyunlaşma başlangıcından sonra BŞD'lerin hızlıca ilerlemediğini tahmin etmişlerdir. Bu nedenle araştırmacılar, boyunlaşma başlangıcından ziyade yırtılma veya yırtılmaya daha yakın BŞD sınırını belirlemenin, sac kalınlığının ŞSE'de artış sağlayacağını iddia etmişlerdir.

ŞSE'lerin sadece sac kalınlığına göre değişimini incelemek için malzemeler benzer mikroyapıya sahip olmalıdır (Fukui ve Nakanishi, 1988). Rees (2001), kalınlığın artması sonucu şekillendirme sınırındaki artışın, tane boyutunun akma mukavemetine etkisi (Hall-Petch ilişkisi) ile ilişkili olabileceğini belirtmektedir. Wilson ve ark. (1983), sınır BŞD'nin kalınlığın tane boyutuna oranı (t/d_0) ile yakından ilişkili olduğunu iddia etmişlerdir. Ogórek ve Stachowicz (2005), aynı kalınlığa ve farklı tane boyutuna sahip

Al 1050 için, ince taneli malzemenin daha yüksek ŞSE seviyesine sahip olduğunu deneysel olarak ve M-K teorisine göre elde etmişlerdir.

2.6.2. Haddeleme doğrultusu

Normal anizotropi *r*, malzemenin incelmeye karşı direncinin göstergesidir ve çekme deneyinde üniform uzama bölgesinde, enine gerçek BŞD'nin, kalınlıktaki gerçek BŞD'ye oranı olarak tanımlanır. *r* değeri 1'e eşitse malzeme izotrop ve 1'den farklı ise malzeme anizotroptur. Bunun yanı sıra özellikleri doğrultuya bağlı olarak değişmeyen malzemelere düzlemsel izotrop ve değişenlere ise düzlemsel anizotrop malzemeler denir. Düzlemsel anizotropi, *r* değerinin doğrultuya göre değişiminin göstergesidir. Endüstride kullanılan sac metallerin bir çoğu haddelemeden dolayı, farklı doğrultularda değişik özellikler göstermektedir (Marciniak ve ark., 2002; Kohara, 2005). Bu nedenle şekillendirme işlemlerinde sac metalin kalıba göre yerleşimi bazen önemli olabilmektedir (Rees, 2001).

Hospers (1977) ve Banabic ve ark., (2000) *r* ve *n* katsayılarının şekillendirilebilirlikle, dolayısıyla ŞSE ile, ciddi derecede ilişkili olduğunu belirtmektedirler. Raghavan (1995), genelde yüksek *r* değerinin çekilebilirliği artırmasına rağmen, gerdirme işlemlerindeki bu etkinin açık olmadığını belirtmektedir. Story ve ark. (1993), Al 2008-T4 alaşımlı alüminyum için haddeleme doğrultusunun ŞSE üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Al 2024-T3 için haddeleme doğrultusunun etkisinin çekme deneyi ile elde edildiği çalışmalar da vardır (Hatipoğlu, 2007).

2.6.3. Diğer faktörler

n ve *m* değerlerinin artması ile ŞSE seviyesi artmaktadır. Ön gerdirme işlemi de ŞSE üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yapılan ön gerdirmenin doğrultusuna göre ŞSE seviyesi artabilmekte veya azalabilmektedir. İki eksenli ön BŞD uygulanması durumunda ŞSE seviyesi azalma eğilimi gösterirken, tek eksenli ön BŞD uygulanması durumunda artabilmektedir (Graf ve Hosford, 1993; Hosford ve Caddell, 2007; Situ, 2008). Laukonis ve Ghosh (1978) yaptıkları çalışmada, iki eksenli ön BŞD durumunda çelikler için $SŞE_0$ seviyesinin önemli ölçüde değişirken, alaşımlı alüminyumlar için yaklaşık olarak aynı kaldığını belirlemişlerdir.

Homojensizlik ve kusurlar, kalınlıkta, bileşimde ve tane boyutunda bölgesel değişimlere neden olduğu için, ŞSE'nin şekli ve seviyesi üzerinde büyük etkiye sahiptirler (Marciniak ve ark., 2002; Hosford ve Caddell, 2007). Grid boyutu da ŞSE üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Boyunlaşma bölgesi grid boyutundan küçük olduğu zaman daha düşük BŞD elde edilecektir.

Sürtünme katsayısı da ŞSE üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İdeal sürtünmesiz durumda daha üniform bir BŞD dağılımı elde edilir. Ancak sürtünmeli duruma göre majör BŞD'ler daha küçük, minör BŞD'ler daha büyük olmaktadır (Casari ve ark., 2006).

2.7. Literatür Analizi

Al 2024 malzemenin çatlak yorulması üzerine pek çok çalışma olmasına rağmen, şekillendirme sınırını belirleme üzerine pek az çalışmaya rastlanmıştır (Takuda ve Hatta 1998). Literatürde yüksek sünekliğe sahip alaşımlı alüminyumlarda kalınlığın ŞSE üzerine etkisinin az olduğu deneysel olarak ortaya koyulmuştur. Ancak yüksek sünekliğe sahip alaşımlı alüminyumlarda malzeme kararsızlığı baskın iken, nispeten düşük sünekliğe sahip 2XXX ve 7XXX serilerinin hasar mekanizmalarının hasarı geciktirme eğiliminde olduğu ve sıklıkla boyunlaşma olayı olmadan yırtılma meydana geldiğinden bahsedilmektedir. Bu sebeple bu serilerde kalınlık etkisinin oldukça farklı olabileceğine vurgu yapılmaktadır (Zadpoor ve ark., 2009).

Literatürde alaşımlı alüminyumlar için sac kalınlığının ŞSE üzerine etkisini deneysel olarak inceleyen çok az çalışmaya rastlanmıştır ve bu çalışmaların da ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardına uygun olarak yapılmadığı görülmüştür. Havacılıkta sıkça kullanılan Al 2024 için, 1978 yılında yayımlanan, sadece birbirine çok yakın iki kalınlığın incelendiği ve ISO 12004-2 standardına da uymayan bir laboratuar raporu dışında (Hursman, 1978), kalınlığın ŞSE'ye etkisini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Standarda uygun olarak yapılmadığı ve yakın kalınlıklar incelendiği için, kalınlık etkisinin bu çalışmada tam olarak ortaya incelenemediği düşünülmektedir. Ayrıca haddeleme doğrultusunun ŞSE'ye etkisi üzerine deneysel olarak yapılan çalışmalar da yeterli düzeyde değildir ve bu çalışmalar ISO standardına uygun olarak yapılmadığı için haddeleme doğrultusunun etkisi tam olarak belirlenememiştir. Kalınlık ve haddeleme doğrultusunun ŞSE'ye etkisinin güvenilir olarak elde edilebilmesi için ŞSE'lerin doğru olarak belirlenmesi son derece önemlidir.

Literatürde birçok çalışmada teorik modeller geliştirilerek malzemeler anizotropik olarak tanımlanıp ŞSE'leri elde edilmiştir (Friedman ve Pan, 2000; Brunet ve Morestin, 2001; Kim ve ark., 2003; Aretz, 2007). Çelikler için haddeleme doğrultusunun etkisi üzerine çeşitli çalışmalar vardır (Rees, 2001; Jahromi ve ark., 2006), ancak alaşımlı alüminyumlar için haddeleme doğrultusunun etkisini inceleyen deneysel çalışma sayısı azdır (Hursman, 1978; Lee ve ark., 1997). Bu çalışmalar yine 2008 yılından önceki çalışmalar olup ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardına uymamaktadır. Dolayısıyla haddeleme doğrultusunun etkisi deneysel olarak yeterli düzeyde incelenmemiştir.

Özellikle havacılık endüstrisinde kullanılan Al 2024'ün kalınlık ve haddeleme doğrultusunun şekillendirilebilirliğe etkisinin belirlenmesi emniyet ve güvenilirlik açısından oldukça önemlidir.

3. MATERYAL VE METOT

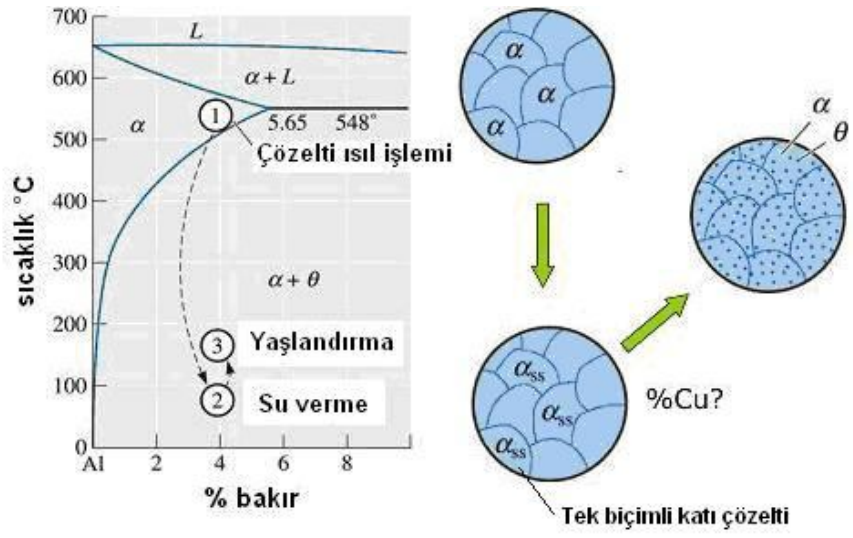
Bu çalışmada 2024 alaşımlı alüminyum sac malzemelerin oda sıcaklığında ŞSE'lerinin kalınlığa ve haddeleme doğrultusuna göre değişimi incelenmiştir. Kalınlık olarak 0.8, 1, 1.2, 1.6 ve 2 mm değerleri seçilmiştir. Bu bölümde, numunelere uygulanan ısıl işlem, mekanik özellikleri belirleme, ŞSE'leri çizme ve kalınlığa bağlı özelliklerini inceleme yöntemleri anlatılmıştır. Ayrıca analiz ve durum çalışmalarında takip edilen metotlar tanımlanmıştır.

Bu çalışmadaki tüm deneyler en az üç başarılı tekrar olacak şekilde yapılmış ve sonuçlar 3σ (standart sapma) ile hesaplanarak % 99 güvenilirlikle verilmiştir.

3.1. Isıl İşlem

Malzemelere çökelme sertleşmesi ısıl işlemi uygulanarak T4 temperine dönüştürülmüştür. Bu ısıl işlem solüsyona alma, su verme ve doğal yaşlandırma aşamalarından oluşmaktadır.

Solüsyona alma işleminde yaklaşık % 4 Cu içeren numuneler kül fırınında Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi solvüs sıcaklığının (502°C) biraz altına (1 numaralı bölgeye), yani 493±3 °C solüsyon sıcaklığına kadar ısıtılarak, tane sınırlarındaki $CuAl_2Mg$ (θ fazı) çökeltisi çözündürülüp homojen tek biçimli α katı solüsyonu elde



Şekil 3.1. Al-Cu alaşımının çökelme sertleşmesi basamakları (http://www.keytometals.com)

edilinceye kadar bu sıcaklıkta 30~35 dakika bekletilmiştir. Solüsyona alma süresi bir katı solüsyon dengesi oluşturmak için yeterince uzun olmalıdır. Literatürde bu alaşım için solüsyonda bekletme süreleri, 1 mm için 30 dakika olduğu ve sac kalınlığı arttıkça bu sürenin 35 dakikaya kadar artabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle numuneler 0.8 ve 1 mm için 30, 1.2 mm için 33 ve 1.6 ve 2 mm için 35 dakika fırında bekletilmiştir. Yapılan tüm ısıl işlemler fırın soğukken başlatılmıştır. Çok yüksek ısınma hızları özellikle Al 2024 alaşımında istenmeyen bir durum olduğundan, ısınma hızı 600 ˚C/saat olarak ayarlanmış ve bekletme süreleri sıcaklık 493 ˚C'ye ulaştığı anda başlatılmıştır.

2XXX serisindeki alaşımlarda solvüs sıcaklığı tavsiye edilen maksimum solüsyona alma sıcaklığının sadece birkaç derece üzerindedir. Al 2024 alaşımı için solüsyon sıcaklığı solvüs sıcaklığına oldukça yakın olduğu için, sıcaklık kontrolü çok önemlidir. Solüsyon sıcaklığının üzerine çıkılırsa tane sınırı ergimesi ile malzeme bozulurken, düşük sıcaklıklarda solüsyona alma tamamlanamaz ve alaşımın mukavemeti beklendiğinden düşük olur. Literatürde çökelme sertleşmesi ısıl işleminin hassasiyet ve doğruluğu sırasıyla en az ± 2 C° ve ± 5 C° olan fırınlarda yapılması gerektiği belirtilmiştir (Totten ve MacKenzie, 2003). Isıl işlemler Selçuk Üniversitesi Malzeme laboratuarında bulunan Protherm marka kül fırınında yapılmıştır. TSE Konya Sojuztest Metroloji ve Kalibrasyon Merkezine yaptırılan kalibrasyon sonucu, fırının doğruluğu ± 0.5 C° olarak belirlenmiştir. Hassasiyet en fazla doğruluk kadar olacağından, fırın ısıl işlem için güvenle kullanılmıştır.

Solüsyon işleminden sonra istenmeyen $CuAl_2Mg$ fazının oluşmasını önlemek ve solüsyonu aşırı doymuş katı solüsyon haline getirmek için, malzeme fırından çıkarıldıktan sonra 5 sn geçmeden hızla daha düşük bir sıcaklığa suda soğutulmuştur. Literatürde bu süre 1 mm kalınlık için 10 sn olarak verilmekte ve kalınlık arttıkça bu sürenin biraz daha uzayabileceği belirtilmektedir.

Son olarak homojen ve kararlı bir mikroyapı elde etmek için, doğal yaşlandırma işlemi ile fazlaca bakır içeren, aşırı doymuş ve dengeli bir yapıda olmayan α fazı içerisinde ince ve homojen bir şekilde $CuAl_2Mg$ fazı çökeltilerek kararlı bir yapı elde edilmiştir. Numunelerin tamamına bu işlemler uygulanarak T4 temperine dönüştürülmüştür.

3.2. Mikroyapıların ve Kimyasal Bileşimlerin İncelenmesi

ŞSE'lerin sadece sac kalınlığına göre değişiminin incelenmesi için farklı kalınlıklı malzemelerin eştaneli yapıya ve benzer bir kimyasal bileşime sahip olmaları gerekmektedir. Bu amaçla farklı kalınlığa sahip Al 2024 malzemelerin mikroyapısı ve kimyasal bileşimleri incelenmiştir.

Farklı kalınlığa sahip malzemelerin kimyasal bileşimlerini belirlemek için analizler Konya Sanayisindeki Altun Döküm A.Ş.'de yaptırılmıştır. Numunelerin eştaneli bir içyapıya sahip olup olmadığını incelemek için, çeşitli kalınlıktaki numuneler bakalite alınıp, yüzeyleri sırasıyla 200, 400, 800 ve 1000 numara zımparalar ile 600 d/dk hızda ve son olarak da Al_2O_3 pasta kullanılarak keçe ile 300 d/dk hızda 2'şer dakika parlatılmıştır. Numuneler, 1 ml HF, 1.5 ml HCl, 2.5 ml HNO_3 ve 95 ml saf su bileşiminden oluşan Keller ayıracı ile kalınlığa göre 2-4 dakika dağlanarak tane sınırları ortaya çıkartılmış ve optik mikroskopla 500X büyütme oranında görüntüleri alınmıştır.

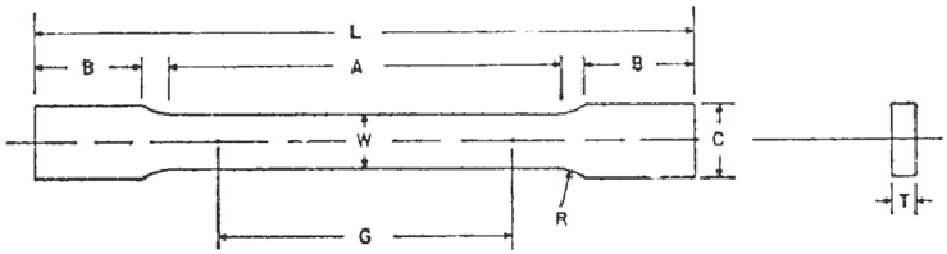
Mikroyapılarının karşılaştırılmasında *alan analiz yöntemi* kullanılmıştır. Bu yöntemde her bir numune üzerinde üç farklı yerden fotoğraf çekilerek, fotoğraflar 9 cm^2'lik 6 adet kare bölgeye ayrılmıştır. Kareler içerisindeki tam ve yarım taneler sayılarak, 54 cm^2'lik bir alana düşen ortalama tane sayıları belirlenmiştir.

3.3. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Al 2024-T4'ün özelliklerinin dört beş gün doğal yaşlandırma ile mekanik özellikleri % 95, yedi gün sonunda ise tamamen stabil hale geldiğini göstermek için, 1 mm kalınlığındaki beş numuneye doğal yaşlanmanın 0., 4., 5., 10. ve 30. günlerinde çekme deneyi yapılmıştır.

Çeşitli kalınlığa sahip Al 2024 çekme deneyi numuneleri, standarda uygun olacak şekilde, T4 ısıl işleminden önce, özel bir freze tezgâhında kestirilmiştir. Çentik etkisini ortadan kaldırmak amacıyla numunelerin kenarları zımparalandıktan sonra numunelere T4 ısıl işlemi uygulanmıştır.

Malzeme katsayılarının belirlenmesi amacıyla tüm kalınlıklar ve 0°, 45° ve 90° doğrultuları için ASTM E 8M-04'e göre çekme deneyleri yapılarak akma eğrileri elde edilmiştir. Numuneler Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi standarda uygun olacak şekilde freze tezgâhında kestirilmiştir. Çentik etkisini ortadan kaldırmak amacıyla numunelerin kenarları zımparalandıktan sonra ısıl işlem uygulanmıştır.



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

Şekil 3.2. Sac çekme deneyi numunesi (ASTM E 8M-04)

Çekme deneyinden önce, numunelerin üzerine 50 mm'lik bir ilk ölçü boyu işaretlenmiş ve tutma kısımlarından çekme cihazının çenelerine bağlanarak kopuncaya kadar 25 mm/dk hızda çekilmiştir. Çekme sırasında ölçü boyunda meydana gelen değişim video ekstansiyometre ile ± 0.003 mm doğrulukla ölçülürken, yük değeri de yük hücresi yardımıyla ölçülerek veriler bilgisayara aktarılmıştır. Çekme deneyleri, Niğde Üniversitesi Laboratuarı'nda bulunan 100 kN kapasiteli Shimadzu AG-IS marka çekme cihazında üç başarılı tekrar olacak şekilde yapılarak gerçek gerilme-BŞD diyagramları elde edilmiştir.

Malzemelerde elastik şekil değişiminin sonunda kalıcı şekil değişiminin başladığı noktaya akma noktası ve bu andaki gerilme değerine ise malzemenin akma mukavemeti (Y) denir. Al 2024-T4 alaşımı gevrek bir yapıya sahip olduğundan, akma noktası uzaması açık olarak görülemediği için, 0.002 BŞD değerinden akma eğrisinin elastik kısmına çizilen paralelin akma eğrisini kestiği noktadaki gerilme değeri akma mukavemeti olarak alınmıştır.

Gerçek gerilme numuneye herhangi bir anda uygulanan F kuvvetinin, anlık kesit alanına (A) bölünmesiyle elde edilir ve

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

şeklinde tanımlanır. Gerçek gerilme, üniform deformasyon bölgesinde hacim sabitliği ilkesi;

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

ifadesi kullanılarak

$$\sigma_{gerçek} = \frac{F}{A_0}\frac{l}{l_0} \tag{3.3}$$

şeklinde hesaplanmıştır. Mühendislik BŞD'si *e*

$$e = (l - l_0)/l_0 \tag{3.4}$$

olduğundan Eşitlik (3.3.) kullanılarak $\sigma_{müh}$ ve $\sigma_{gerçek}$ arasında

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

şeklinde bir ilişkisi yazılabilir. Gerçek ölçü boyundaki küçük bir artışın (*dl*), anlık ölçü boyuna (*l*) oranının integre edilmesiyle, yani

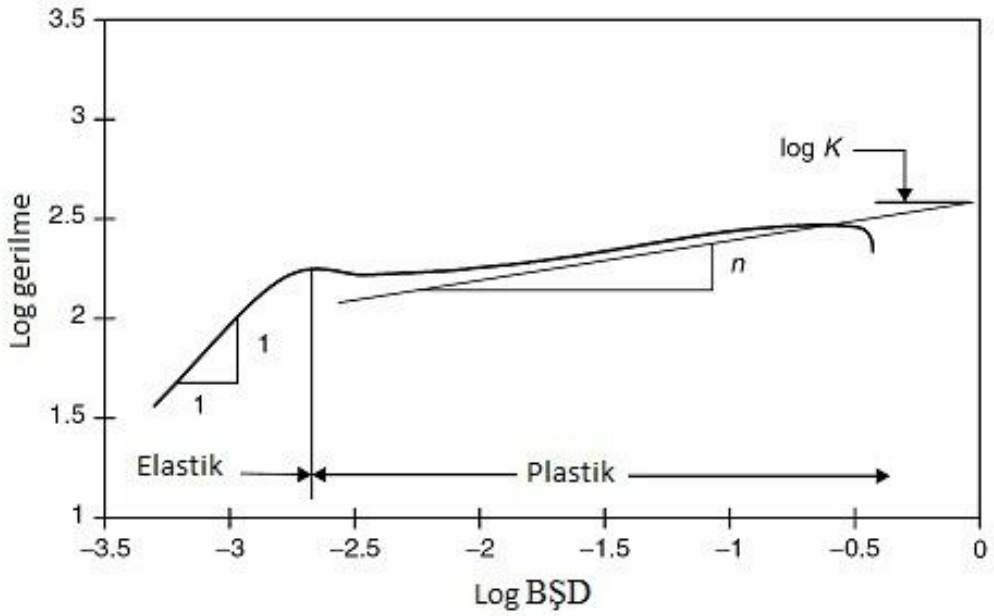
$$\varepsilon = \int d\varepsilon = \int_{l_0}^{l} \frac{dl}{l} = \ln\frac{l}{l_0} \tag{3.6}$$

kullanılarak gerçek BŞD değerleri elde edilmiştir. Çok küçük BŞD'ler için ($l = l_0$ olduğu) BŞD artışı mühendislik BŞD değerine çok yakındır. Fakat büyük BŞD'ler için oldukça önemli bir fark meydana gelmektedir. Bu nedenle büyük BŞD değerlerinde gerçek gerilme ve BŞD değerleri kullanılarak hesaplama yapmak daha doğru olacaktır. *e* ile ε arasında

$$\varepsilon = \ln(1+e) \tag{3.7}$$

şeklinde bir ilişki vardır (Dieter, 1988) ve (Marciniak ve ark., 2002). Bu eşitlikler kullanılarak malzemelere ait gerçek gerilme-BŞD diyagramları çizilmiştir.

n ve *K* değerlerini hesaplamak için, gerçek gerilme-BŞD diyagramı Şekil 3.3.'te görüldüğü gibi logaritmik olarak çizilebilir. Çoğu metallerin üniform plastik deformasyon bölgesindeki eğriye Holloman denklemi ya da pekleşme kuralı olarak adlandırılan;



Şekil 3.3. Logaritmik gerilme-BŞD diyagramı (Marciniak ve ark. 2002)

$$\sigma = K\varepsilon^{n}$$
veya (3.8)
$$\log\sigma = \log K + n\log\varepsilon$$

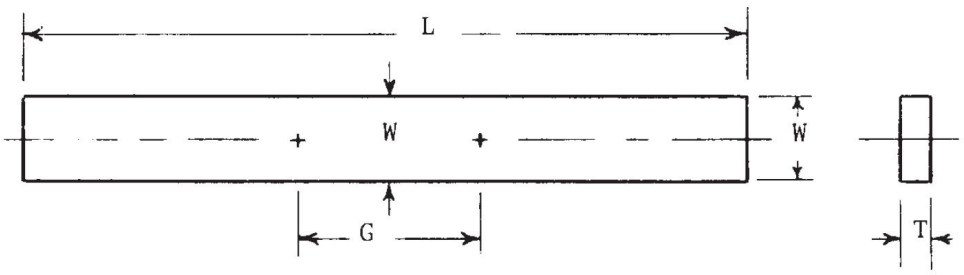
denklemi uydurulabilir. Burada n pekleşme katsayısı ve K mukavemet katsayısıdır. Uydurulan eğrinin eğimi n dir ve bu eğrinin $\log\varepsilon = 0$ veya $\varepsilon = 1$ olduğu noktayla kesişimi $\log K$ değerini vermektedir (Dieter, 1988) ve (Marciniak ve ark., 2002). Gerçek gerilme-BŞD diyagramlarının plastik bölgesi kullanılarak yukarıdaki eşitlikler yardımıyla malzemelerin n ve K değerleri hesaplanmıştır.

3.4. Düzlemsel Anizotropi Değerlerinin Belirlenmesi

Endüstride kullanılan sac metallerin birçoğunun özellikleri, kristalografi ve haddelemeden dolayı, sacın haddeleme doğrultusu ile diğer doğrultularda farklılık gösterebilmektedir. Başka bir ifadeyle malzeme farklı doğrultularda farklı plastik davranış gösterebilmektedir. Bu değişim düzlemsel anizotropi Δr olarak bilinir. Özellikleri doğrultuya göre değişiklik gösteren malzemelere düzlemsel anizotrop, değişiklik göstermeyenlere ise düzlemsel izotrop denir. Buna ilaveten sac düzlemindeki ortalama özelliklerle kalınlık doğrultusundaki özellikler arasında da fark olabilmektedir.

Bu malzemeler ise normal anizotrop malzeme denir. Düzlemsel anizotropi değeri büyük olan malzemelerin şekillendirilebilirlikleri sacın haddeleme doğrultusuna göre değişebilir. Bu durumda deneylerin tüm doğrultular için yapılması gerekecektir.

Malzemelerin 0.8, 1 ve 2 mm sac kalınlıkları için normal ve düzlemsel anizotropi değerleri ASTM E-517 standardına göre belirlenmiştir. Haddeleme doğrultusu ile 0°, 45° ve 90° açılarda kesilen Şekil 3.4.'te görülen numune dikdörtgen numunelere ısıl işlem uygulandıktan sonra, numunelerin orta kısmında 50 mm'lik boy ve tüm genişlik boyunca serigrafi yöntemiyle, 0.2 mm çizgi kalınlığına sahip 2.5×2.5 mm kare şeklinde gridler oluşturulmuştur. Daha sonra numuneler Shimadzu AG-IS marka çekme cihazında 25 mm/dk hızda % 10 BŞD değerine kadar çekilmiştir. Deneyler üç başarılı tekrar ile yapılmıştır.

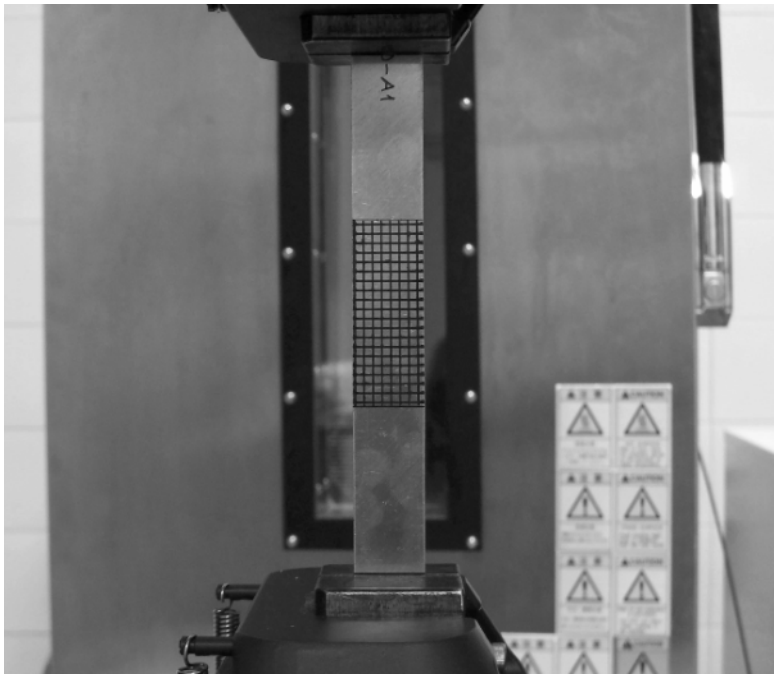


L : Boy = 200 mm
W : Genişlik = 20 ± 0.13 mm
G : Ölçü boyu = 50 ± 0.25 mm
T : Malzemenin kalınlığı

Şekil 3.4. Anizotropi deney numunesi (ASTM E-517)

Anizotropi katsayılarını belirlemek için grid analiziyle ölçme yapan ASAME 2D 4.1 görüntü işleme yazılımı ve profil projektörüyle ölçme olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır.

Grid analiziyle ölçmede, her bir numune yüzeyindeki grid yapısının referans almak için çekme işleminden önce ve çekme sırasında belirli uzama değerlerinde, 12 MP çözünürlükteki Canon 450D marka profesyonel bir SLR kamera ile fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 3.5.). Bir çok malzeme için maksimum çekme noktasına kadar normal anizotropi değeri genellikle sabit kalmaktadır. Bu nedenle genellikle % 10 uzamadaki *r* değeri alınmaktadır. Farklı uzama değerlerinde farklı anizotropi değerleri veren malzemeler için, *r* değeri ile birlikte hangi uzama değeri için elde edildiği de



Şekil 3.5. Anizotropi değerinin belirlenmesi için çekilen örnek bir fotoğraf

belirtilmelidir. Deneylerde kullanılan malzemelerde böyle bir değişim olup olmadığını incelemek için, referans için numunenin şekil değiştirmemiş halde ve çekme cihazında çekilirken, % 5, % 6, % 7, % 9 ve % 10 uzama değerlerinde fotoğrafları çekilmiştir. Sonra grid analizi yapan görüntü işleme yazılımıyla fotoğraflar üzerinden ölçme alanı belirlenerek bu bölgedeki gridlerde meydana gelen ε_l *ve* ε_w BŞD değerleri belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler kullanılarak $\varepsilon_l + \varepsilon_w + \varepsilon_t = 0$ hacim sabitliği kuralından, her bir grid için kalınlık doğrultusundaki BŞD miktarları hesaplanarak anizotropi katsayıları

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \tag{3.9}$$

eşitliğinden elde edilmiştir. Daha sonra r değerlerinin ortalaması alınarak her bir % uzama değeri için anizotropi katsayıları hesaplanmıştır. Malzemenin anizotropi değeri ise, bu % uzama değerlerindeki anizotropi katsayılarının ortalamasından belirlenmiştir.

İkinci yöntem olarak Konya Supar A.Ş.'de bulunan profil projektörle numune üzerinde belirlenen ölçme alanındaki gridler 0.001 mm hassasiyetle ölçülerek anizotropi katsayıları hesaplanmıştır. Bu yöntemde ilk olarak, gridler 2.5x2.5 mm boyutunda ve

yeterince hassas olmasına rağmen, daha hassas ölçme yapabilmek amacıyla, numune boyunda ilk ölçü boyu l_0 ve numune genişliğinde ilk ölçü boyu w_0 uzunlukları alınmıştır. Daha sonra çekme cihazında % 10 BŞD değerine kadar şekillendirilen numunelerdeki son ölçü boyları l ve genişlikleri w tekrar profil projektörle aynı şekilde ölçülerek BŞD değerleri

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0}$$
$$\varepsilon_w = \frac{w - w_0}{w_0} \tag{3.10}$$

eşitliklerinden hesaplanmıştır. Hassasiyeti artırmak için bu ölçmeler üçer farklı bölgede yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Bunun sonucunda hacim sabitliği yardımıyla kalınlık boyunca meydana gelen BŞD'ler belirlenerek Eşitlik (3.9)'dan anizotropi katsayıları hesaplanmıştır.

Böylece her iki yöntem kullanılarak da sac düzleminde haddeleme doğrultusu ile 0°, 45° ve 90° açı yapan doğrultulardaki r değerleri belirlenmiştir. Bu değerlerin ortalaması normal anizotropi r olarak adlandırılır ve

$$r = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \tag{3.11}$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Normal anizotropinin haddeleme doğrultusuyla yapılan açıya göre değişimini veren düzlemsel anizotropi değeri de

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \tag{3.12}$$

eşitliğiyle elde edilmiştir (Dieter, 2000; Marciniak ve ark., 2002).

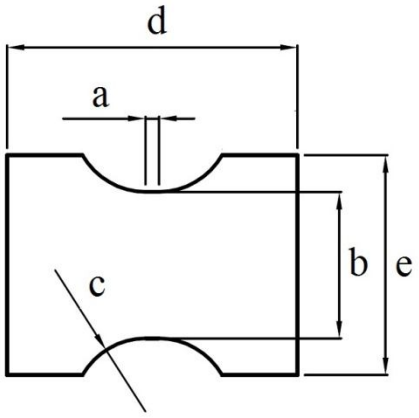
3.5. ŞSE Oluşturmada Kullanılacak Standardın Belirlenmesi

Önceleri ŞSE'ler ASTM 2218-02 (Ağustos 2002) standardına göre elde ediliyordu. Ancak bu standartta Nakajima deneyinin uygulanışı ile ilgili birçok ayrıntı ve sınır BŞD değerlerinin belirlenmesi için herhangi bir değerlendirme yöntemi belirtilmemiştir. Birçok araştırmacı çeşitli numune geometrileri, yağlayıcılar ve takımlar

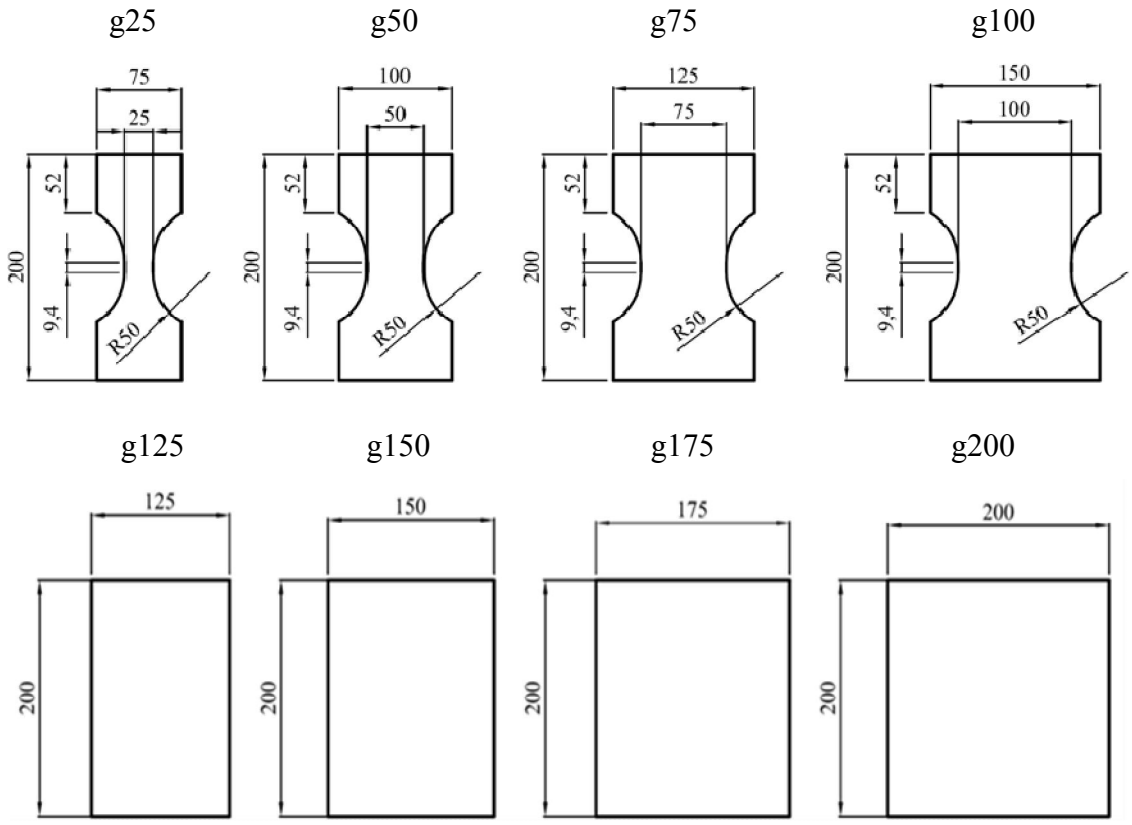
kullanmakta ve hasar başlangıcını belirlemek için farklı kabuller ve yöntemler uygulamaktaydı. Bunun sonucunda hasar başlangıcı için kesin bir değer belirlemek olanaksızdı (Jahromi ve ark., 2006). 2008 yılında yayımlanan ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardı bu belirsizlikleri ortadan kaldırarak ŞSE'lerin tekrarlanabilirliğini ve yeniden üretilebilirliğini (reproducibility) artırmıştır ve güvenilir ŞSE'ler elde edilmesini sağlamıştır (Situ, 2008).

Bu çalışmadaki ŞSE'leri oluştururken Nakajima deney yönteminin hangi standarda göre uygulanması gerektiğine karar vermek amacıyla, 1 mm kalınlık ve 0° doğrultusu için her iki standarda göre de Nakajima deneyleri yapılarak ŞSE'ler elde edilmiştir. Burada sınır BŞD'ler ileride bahsedilecek olan önerilen yönteme göre elde edilmiştir. ŞSE'ler gerçek sınır BŞD değerleri kullanılarak oluşturulmuştur.

ASTM standardında belirtilen numunelerin gösterimi Şekil 3.6.'da ve bu standarda ait Nakajima deneyleri için numune takımı Şekil 3.7.'de verilmiştir. Numunelerin her biri 200 mm uzunluğa ve 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 ve 200 mm "b" genişliklerine sahiptir. Belirtilen genişlikler numunelerin orta kısımlarının genişlikleridir. Şekil değişiminin daha çok kesiti azaltılmış bölgede yoğunlaşmasını sağlamak ve kalıp radyüsü etrafında boyunlaşma ve yırtılmanın meydana gelmesini engellemek amacıyla, 25, 50, 75 ve 100 mm genişliğindeki numunelerin kesitleri kum saati şeklinde yapılmıştır. ASTM standardında göre deneylerde, standartta belirtildiği gibi, sadece g200 numunelerinde stampa ile sac arasında polietilen film yağlayıcısı kullanılmıştır. Diğer numuneler kuru şartta şekillendirilmiştir.

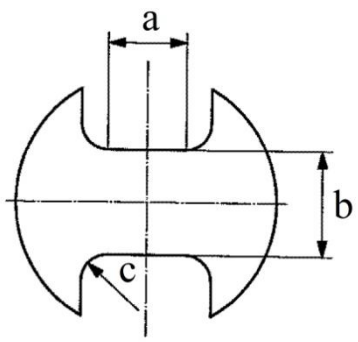


Şekil 3.6. ASTM standardında kullanılan tipik Nakajima numune geometrisi

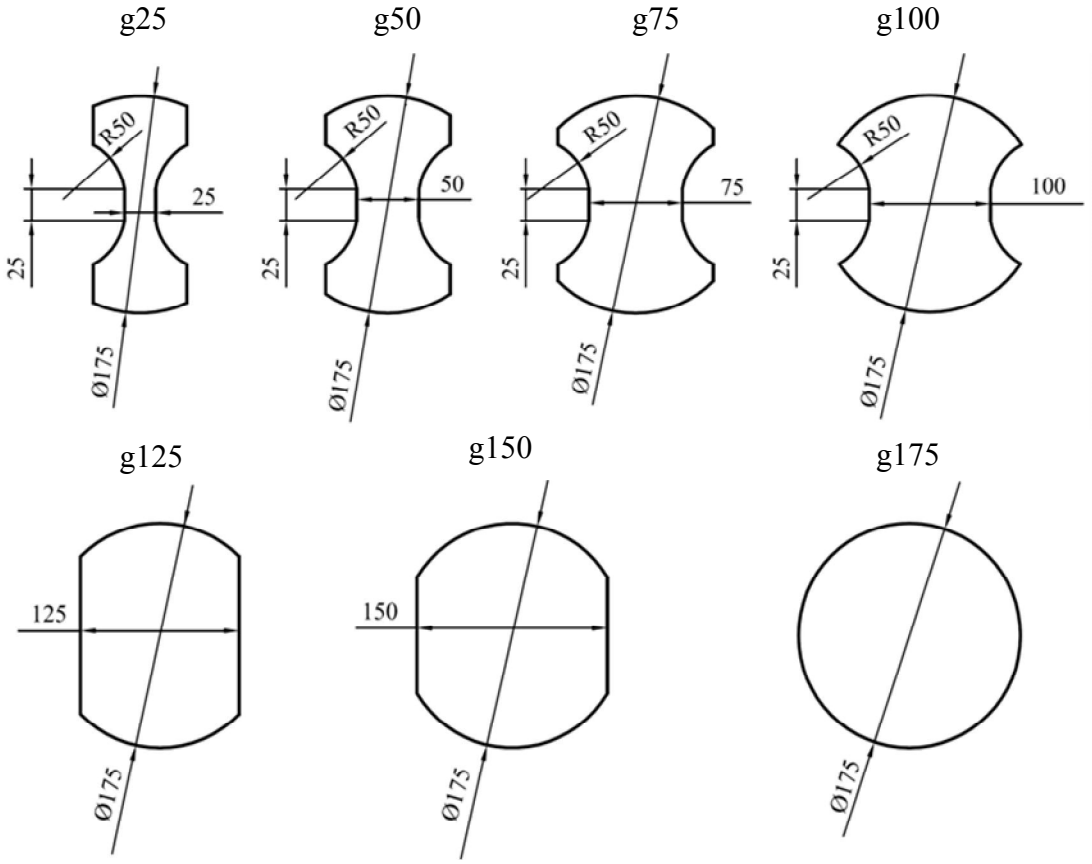


Şekil 3.7. ASTM E 2218-02 standardında kullanılan Nakajima deney numunesi takımı

ISO standardında belirtilen numunelerin gösterimi Şekil 3.8.'de ve Nakajima numune takımı Şekil 3.9.'da verilmiştir. Numunelerin her biri 175 mm çapa ve 25, 50, 75, 100, 125, 150 ve 175 mm "b" genişliklerine sahiptir. Bu numunelerin "a" ölçüsü standarda uygun olacak şekilde 25 mm olarak alınmıştır. ISO standardında ŞSE'nin hassas olarak belirlenebilmesi için şekillendirmenin hemen hemen sürtünmesiz olması ve tüm genişlikler için tek bir yağlayıcı kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Bu nedenle deneylerde yağlayıcı olarak 0.05 gibi oldukça düşük sürtünme katsayısına sahip parafin kullanılmıştır. Yırtığın kubbe tepe noktasından uzaklığı stampa çapının % 15'inden daha fazla olmaması gerekir ve bu şartın sağlanmadığı durumda test geçerli değildir. Bu durum BŞD'lerin belirlenmesini kolaylaştırmaktadır.



Şekil 3.8. ISO 12004-2 standardında kullanılan tipik Nakajima numune geometrisi



Şekil 3.9. ISO 12004-2 standardında kullanılan Nakajima deney numunesi takımı

Standartların tüm özellikleriyle karşılaştırılması yanında, sadece numune geometrisinin ve sadece yağlamanın etkisini ortaya koymak amacıyla farklı deneyler yapılmıştır. Ayrıca tekrarlanabilirliğin etkisini ve gerekli deney tekrar sayısını belirlemek için de fazlaca tekrarlı deneyler yapılmıştır.

ASTM standardına göre yapılan deneyler kuru şartta gerçekleştiğinden, kubbe tepe noktasından oldukça uzakta simetrik boyunlaşma oluşmakta ve bunun sonucunda sınır BŞD değerinin belirlenmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca Şekil 3.8.'de görülen ISO

numune geometrisinde hasarın oluşmasının istendiği "a" boyutunun ASTM geometrisindekine göre daha büyük olması ve numune dış tarafının dairesel olması BŞD'lerin bir bölgeye yoğunlaşmasını önleyerek daha üniform ve daha az saçınık olmasını sağlamıştır.

ISO'ya göre yapılan deneylerdeki BŞD dağılımlarının ASTM'ye göre daha üniform olduğu, sınır BŞD'nin daha net elde edildiği ve deneylerin tekrarlanabilirliklerinin daha iyi olduğu gözlenmiş ve Nakajima deneylerinin ISO 12004-2 standardına göre yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca ISO 12004-2 standardına göre elde edilen eğrinin daha güvenilir olduğu durum çalışmasıyla da doğrulanmıştır. Bu ilerideki "4.9. Durum Çalışmaları" bölümünde anlatılacaktır.

3.6. Nakajima Deneylerinin Yapılması ve BŞD lerin Ölçülmesi

ŞSE'ler oluşturulurken Nakajima deneyleri ISO 12004-2 standardında belirtildiği gibi yapılmıştır. Nakajima deneylerinin yapılışı; numunelerin kesilerek ısıl işlem uygulanması, numunelerin yüzeyine grid veya benekli yapıların oluşturulması ve şekillendirme işlemlerinden oluşmaktadır.

Al 2024-T4 sacın ŞSE'sinin kalınlığa ve haddeleme doğrultusuna göre değişimini incelemek amacıyla, 0.8, 1, 1.2, 1.6 ve 2 mm kalınlıklar için 0° doğrultusunda ve 0.8, 1 ve 2 mm kalınlıklar için 45° ve 90° doğrultularında Nakajima deneyleri yapılmıştır. Karışıklıkları önlemek amacıyla numuneleri adlandırmada aşağıdaki kısaltmalar kullanılmıştır. 2024 malzeme türünü yazdıktan sonra, kalınlık ölçüsünün önüne "t", genişlik ölçüsünün önüne "g" harfi eklenmiştir. Haddeleme doğrultusunu takiben kaçıncı tekrar deney olduğu yazılmıştır. Örneğin 1 mm kalınlığa, 25 mm genişliğe sahip, haddeleme doğrultusuyla 0° açı yapan ve 1. tekrar deneyi temsil eden numunenin adı 2024_t1_g25_0°_1 şeklinde olacaktır.

ŞSE'ler grid analiz ve gerçek zamanlı ölçme sistemi olmak üzere iki farklı yönteme göre elde edildiğinden, her iki yönteme göre de Nakajima deneylerinin yapılışı ve BŞD'lerin ölçülmesi ayrı ayrı anlatılmıştır.

3.6.1. Grid analiziyle ölçme yöntemi

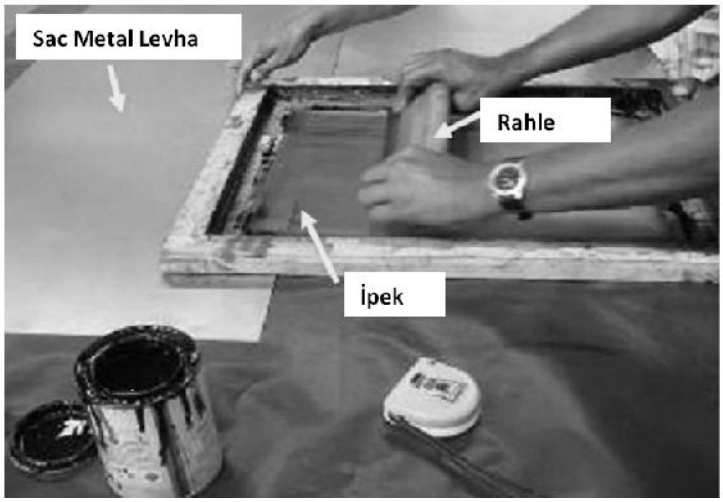
Grid analiz yöntemi BŞD dağılımlarını ölçmek için uzun zamandır kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle ölçmeler manüel veya bilgisayarlı olarak yapılabilmektedir. Bu

çalışmada numune üzerindeki BŞD dağılımları bilgisayarlı grid analizi yöntemiyle elde edilmiştir.

3.6.1.1. Deneylerin yapılışı

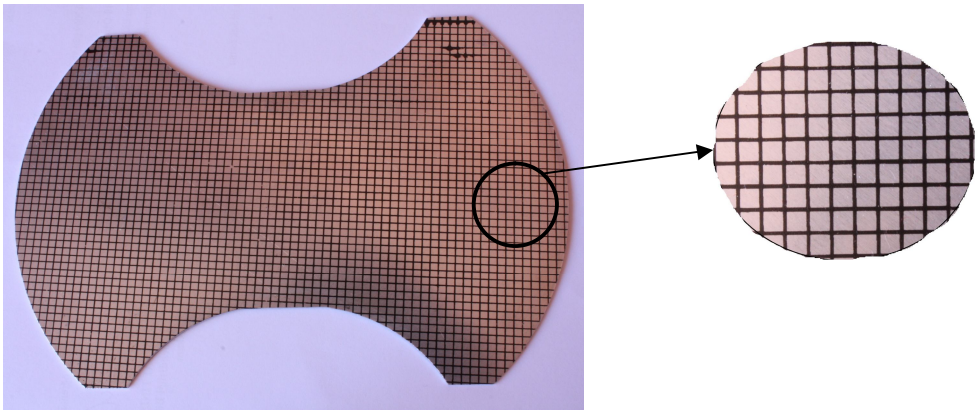
Tüm kalınlıklar için Şekil 3.9.'daki Nakajima deney numuneleri takımı freze tezgahında kesildikten sonra T4 temperine dönüştürülmüştür. Çentik etkisini ortadan kaldırmak amacıyla numunelerin kenarları zımparalanmıştır. Şekillendirme işleminden önce, numunelerin bir yüzeyine serigrafi yöntemiyle 2.5×2.5 mm boyutunda kare gridler oluşturulmuştur.

Serigrafi yöntemi, gridleme işlemi için en uygun ve uygulanması en kolay yöntemlerden biridir. Bu yöntemde ilk olarak bir metal veya ahşap çerçeve üzerine ipek gerilir. İpeğin üzerine ışıktan etkilenen bir foto emisyonu sürüldükten sonra, malzemenin üzerine geçmesini istediğimiz aydınger üzerine basılan şablon ipeğin üzerine yerleştirilir. Sonra emülsiyon ultraviyole ışığa maruz bırakılarak, ipek üzerinde grid çizgilerinin olduğu kısım dökülüp diğer kısımlar kalır. Ortaya çıkan serigrafi kalıbı çerçevelerinden, vakum yapılan baskı masasına monte edilir. Vakumla hava emilmesinin amacı, malzemeyi masaya sabitleştirmek ve kaymasını engellemektir. Son olarak gridlenecek numuneler üzerine yerleştirilen ipeğe kalıcı bir iz bırakan özel bir mürekkep dökülerek Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi rahle ile düzgün şekilde yayılır. Böylece ipek üzerindeki açık kısımlardan geçen mürekkep numune üzerine gridleri



Şekil 3.10. Serigrafi yöntemi ile numunelere gridlerin oluşturulması (Hariharan ve Balaji, 2009)

oluşturur. Numuneler daha sonra fırında veya oda sıcaklığında kurutularak gridler şekil değişimine ve çevre etkilerine dirençli hale getirilir. Şekil 3.11.'de serigrafi yöntemi ile gridlenmiş örnek bir numune görülmektedir. Serigrafi yöntemi ile elde edilen gridlerin şekil değiştirme sonunda ve özel asitlerle ovalayarak bile ortadan kalkmadığı görülmüştür.



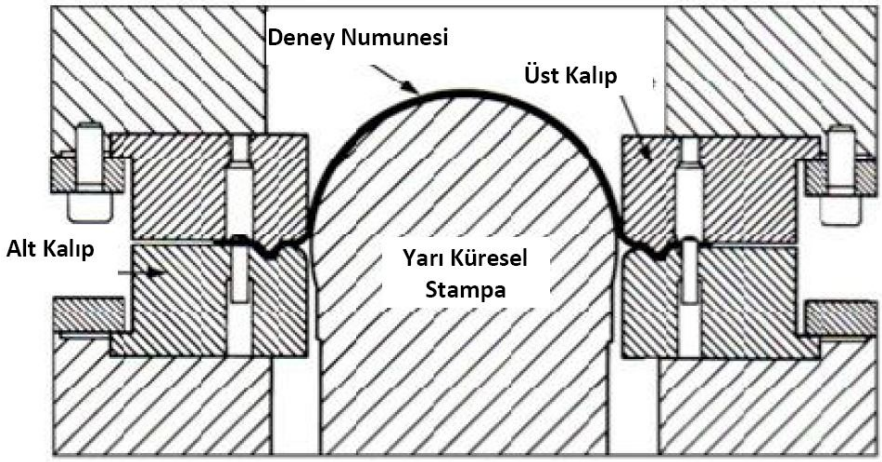
Şekil 3.11. Gridlenen örnek bir Nakajima numunesi

Numunelerin gridsiz yüzeyi ve stampa yüzeyi oldukça düşük sürtünme katsayısına sahip parafinle yağlandıktan sonra, Şekil 3.12.'de görülen çift etkili bir preste, Şekil 3.13.'te görülen 100 mm çaplı yarı küresel bir stampaya ve süzdürme çubuğuna sahip kalıp seti kullanılarak boyunlaşma veya yırtılma başlangıcına kadar şekillendirilmiştir. Deneyler standartta verilen en düşük hız değeri olan 60 mm/dk hızda



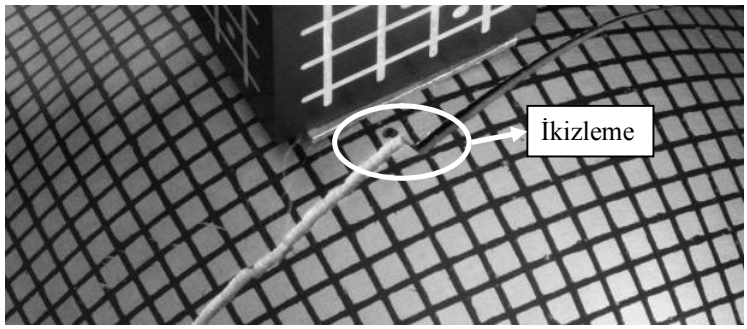
Şekil 3.12. Nakajima deneylerinin yapıldığı deney ünitesi

ve numunenin kalıp içerisine akışını önlemek amacıyla ~150 kN baskı plakası kuvveti ile yapılmıştır. Presin baskı plakası kuvveti, stampa hızı ve konumu hassas olarak kontrol edilebilmektedir. Ayrıca stampada belirli bir kuvvet düşüşü olduğu zaman, stampayı geri çekerek şekillendirme işlemini sonlandıracak bir program yazılmıştır. Şekillendirme işlemi 0.5 kg lık bir kuvvet düşüşünde, yani hasar oluşur oluşmaz, sonlandırılabilmiştir. Al 2024-T4 gevrek bir yapıya sahip olduğundan tüm numunelerde boyunlaşma başlangıcı elde edilememiş ve tüm numuneler yırtılmıştır.



Şekil 3.13. Nakajima deneyi kalıp seti (Öztürk ve Lee, 2005)

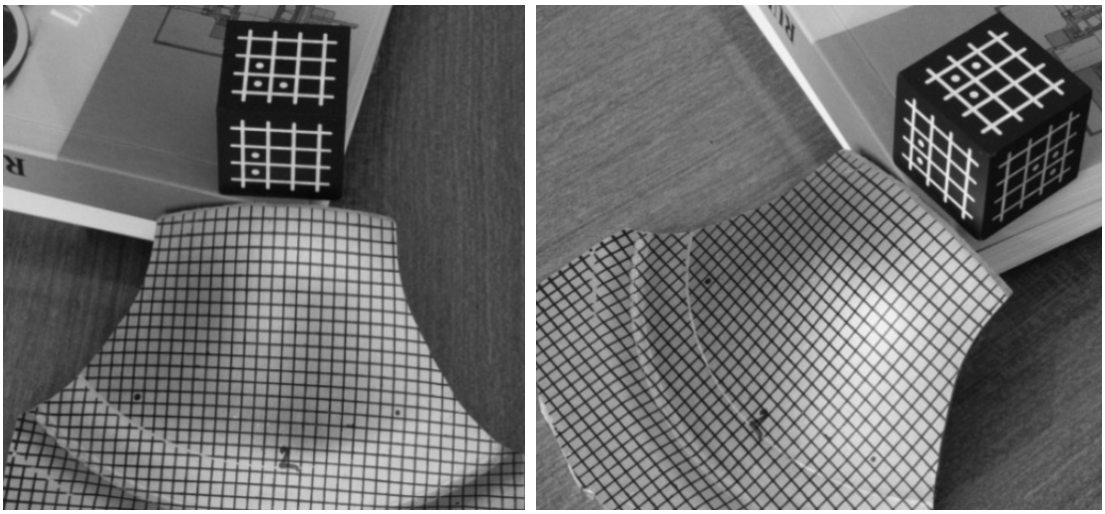
Yırtığın kubbe tepe noktasından uzaklığının ISO standardında belirtilen sınır değerden fazla olduğu ve yırtığın tek bir doğrultuda değil de Şekil 3.14.'te görüldüğü gibi ikizleme şeklinde meydana geldiği numuneler değerlendirmeye alınmamıştır.



Şekil 3.14. Yırtık bölgesinde ikizleme meydana gelen örnek bir numune

3.6.1.2. BŞD lerin ölçülmesi

Numune üzerindeki BŞD dağılımları, bilgisayarlı grid analiziyle ölçme yapan ASAME 4.1. yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Ölçme işlemi için ilk olarak şekil değiştirmiş numuneler üzerinde en az 10×10 grid alanı kapsayacak şekilde ölçme yapılacak bölge işaretlenmiştir. İşaretlenen bölgenin yakınına referans küpü yerleştirilerek, ölçme alanı ve referans küpünü kapsayacak şekilde en az iki farklı açıdan fotoğraf çekilmiştir (Şekil 3.15.).



Şekil 3.15. Ölçme alanının iki farklı açıdan çekildiği örnek fotoğraflar

Türköz (2009) ve yazarın da aralarında bulunduğu Türköz ve ark. (2010) çalışmalarında, fotoğrafları çekerken kullanılan kameranın ve fotoğrafların çekildiği ortamın grid analiz yöntemi ile ölçmedeki tekrarlanabilirliğe önemli ölçüde etki ettiği belirtmektedir. Bu çalışmalarda, floresan ışığında çekilen fotoğraflardan BŞD'lerin tekrarlanabilirliği 0.0224 BŞD olarak belirlerken, gün ışığının homojen şekilde yayıldığı bir ortamda 0.0062 BŞD olarak elde edilmiştir. Bu nedenle fotoğraflar gün ışığının yumuşak geldiği, titreşimlerden uzak bir ortamda ve aynı şartlarda çekilmiştir.

Ölçmelerin doğru ve hassas yapılabilmesi için fotoğraf çekerken aşağıda hususlara da dikkat edilmiştir.

- Fotoğraflar, ölçme alanı ile birlikte referans küpünün en az iki yüzeyini kapsayacak ve fotoğraflarda referans küpünün en az bir yüzeyi ortak olacak şekilde çekilmiştir.

- Fotoğraflar profesyonel dijital bir SLR fotoğraf makinesi ile tripot kullanılarak, referans küpü ve numune hareket ettirilmeden çekilmiştir.
- Ölçme alanı ve referans küpünün fotoğrafı mümkün olduğunca kaplamasına dikkat edilmiştir.

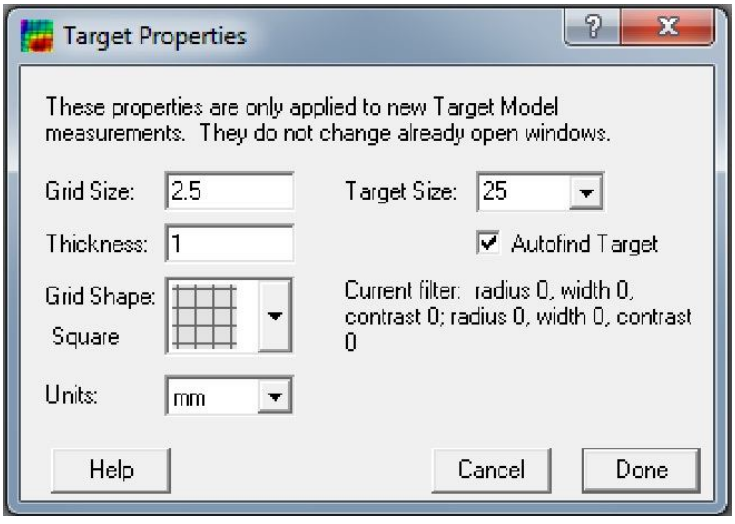
8, 15 ve 25 mm boyutlarında referans küpleri vardır. Ölçme alanının ve gridlerin ölçüsüne göre 25 mm'lik referans küpü kullanılmıştır. Grid analizi için kullanılan ASAME 4.1. programının ölçme doğruluğu, Öztürk ve ark. (2009) yaptığı çalışmada belirlenmiştir.

Fotoğraflar ASAME 4.1. programı ile işlenerek gridlerin kesişim noktaları belirlenir. Farklı açılardan çekilmiş fotoğrafların kullanılmasıyla da iki boyutlu koordinatlardan üç boyutlu koordinatlar elde edilerek majör ve minör BŞD'ler yazılım tarafından hesaplanır ve BŞD dağılımı elde edilir.

Fotoğrafların işlenmesi için aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

1. Ayarlamaların yapılması

- ASAME'de "*Referans Küpü Özellikleri*" (*Target properties*) diyalog kutusunda referans küpünün ve gridin boyutu, gridin şekli ve sac kalınlığı bilgileri girilir (Şekil 3.16.).



Şekil 3.16. Referans küpünün özellikleri "target properties" diyalog kutusundan girilmesi

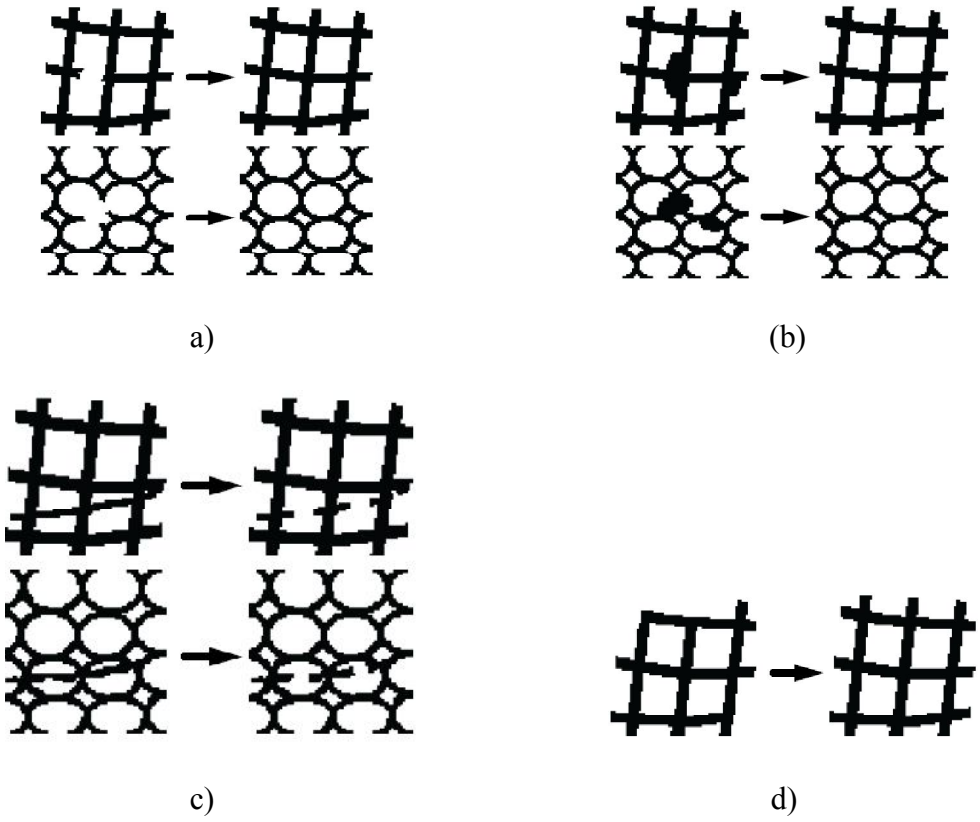
- Ölçülecek parçanın fotoğrafları açılır. Sonra *Select* komutu ile referans küpünü içerecek şekilde seçim yapılır ve "*Measure*" menüsündeki "*Autofind*" komutu ile referans küpü tanımlanır.

2. Ölçme alanının seçilmesi

Select komutu ile daha önce numune üzerinde işaretlenen alan işaretlenir ve *Trim* komutu ile sadece ilgilenilen bu alanın kalması sağlanır.

3. Grid çizgilerinin düzenlenmesi

- Bir ızgara yapısının oluşabilmesi için grid çizgilerinin kesintisiz olması gerekir. Varsa grid yapısındaki kesikli kısımlar tamamlanır (Şekil 3.17a.), normal grid çizgisinden kalın kısımlar varsa temizlenir (Şekil 3.17b.). Grid çizgisi haricindeki kapalı çizgiler kırılır (Şekil 3.17c.) ve grid yapısının dış kısımlarında kesişim noktalarında uzantı olmayan grid çizgileri uzatılır (Şekil 3.17d.).



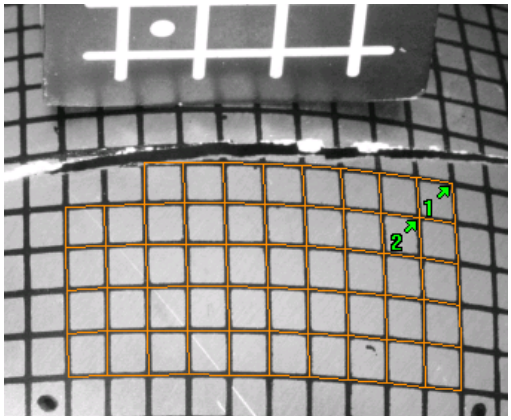
Şekil 3.17. Grid çizgilerinin düzenlenmesi (a) kesikli çizgilerin birleştirilmesi, (b) kalın bölgelerin temizlenmesi, (c) kapalı çizgilerin kırılması, (d) grid çizgilerinin uzatılması

- *Clean* komutu ile grid çizgilerinin haricindeki çizgiler ve fazlalıklar temizlenir.

- *Thin* komutu ile grid çizgilerinin kalınlıkları inceltilerek bir piksele düşürülür. Halen fazlalıklar veya eksikler varsa giderilmelidir.

4. Izgaralama İşlemi

- "*Map Grid*" komutu ile düzenlenmiş gridlerden Şekil 3.18.'de görüldüğü gibi bir ızgara yapısı oluşturulur. Bu işlem kare gridlerde kesişim noktalarının, daire gridlerde ise daire merkezlerinin birleştirilmesiyle oluşturulur.

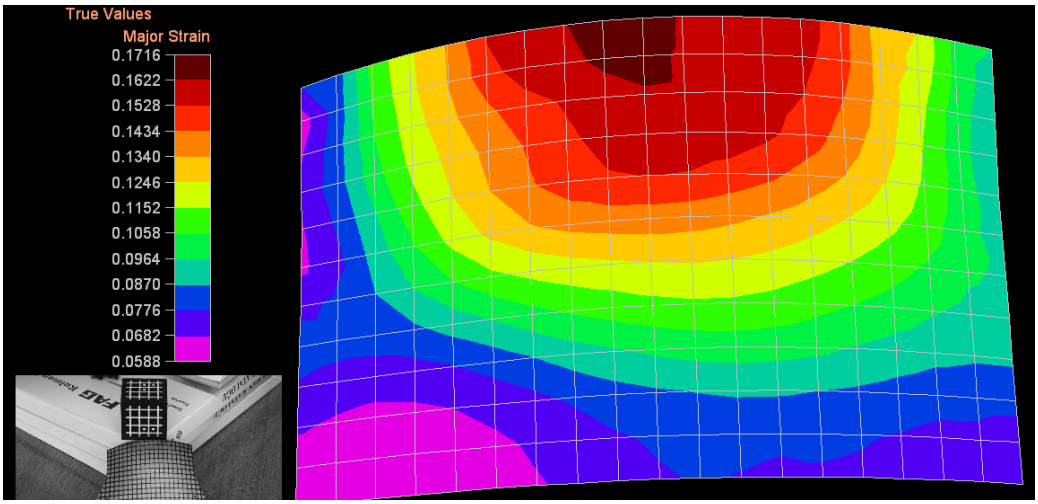


Şekil 3.18. Grid analiz programında oluşturulan tipik bir ızgara yapısı

5. Ölçmenin tamamlanması

- En az iki fotoğraf işlendikten sonra, son olarak *Measure* komutu seçilerek her bir fotoğrafta ölçme alanının aynı noktası seçilir. Böylece iki boyutlu koordinatlardan üç boyutlu koordinatlar hesaplanır ve böylece ölçme alanındaki BŞD dağılımı belirlenir (Şekil 3.19.).

Numunelerdeki BŞD dağılımları belirlendikten sonra, ŞSE'lerin oluşturulabilmesi için hangi BŞD kombinasyonunun sınır değer olarak alınacağının belirlenmesi gereklidir.



Şekil 3.19. Bilgisayarlı grid analiziyle belirlenen tipik BŞD dağılımı

3.6.2. Gerçek zamanlı sistemle ölçme yöntemi

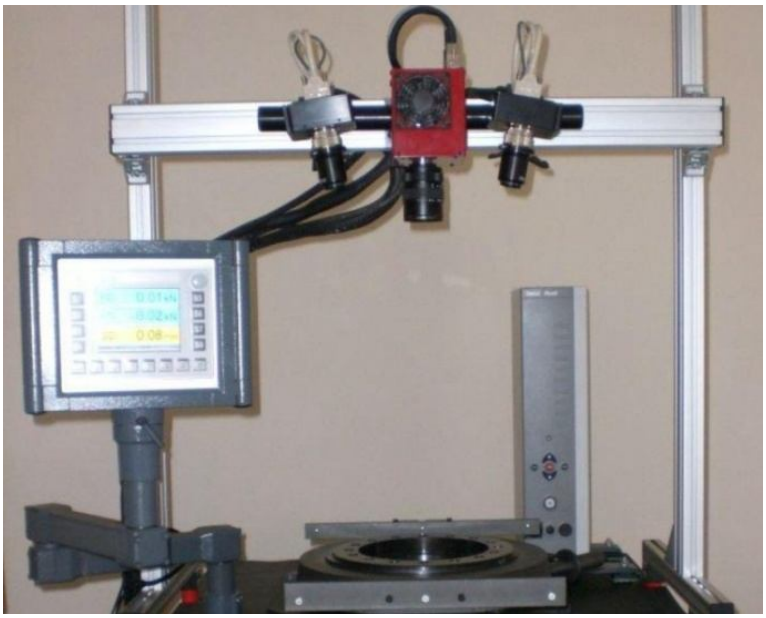
ŞSE'ler ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardına göre değerlendirme yapılarak güvenilir olarak belirlenebilmektedir. Bu standarda göre değerlendirmede numunenin boyunlaşma veya yırtık bölgesine dik çizilen birkaç ortogonal kesitteki majör ve minör BŞD'lerin 1. ve 2. türevleri alınarak elde edilen noktalardan çizilen parabolün tepe noktası sınır BŞD değeri olarak alınmaktadır. Ancak bu değerlendirme işleminin el ile yapılması oldukça zahmetli ve uzun sürmektedir. Bu işlemi hızlı ve hassas olarak otomatik yapabilen ARAMIS adında gerçek zamanlı ölçme sistemi yazılımı ve ekipmanı bile geliştirilmiştir. Bu sistem piyasadan satın alınabilmektedir.

Bu çalışmada grid analizi kullanılarak sınır BŞD değerini belirlemek amacıyla yeni bir yöntem önerilmiştir ve yöntem detaylı olarak ileride anlatılacaktır. Önerilen yöntemin geçerli olabilmesi için elde edilen sınır BŞD'lerin ISO 12004-2 standardına göre belirlenenlerle uyum içinde olması gerekir. Bu amaçla 1 ve 2 mm kalınlık ve 0° haddeleme doğrultusu için hem önerilen yönteme hem de ISO 12004-2 standardına göre değerlendirme yapılarak da sınır BŞD'ler elde edilmiştir. ISO 12004-2 standardına göre değerlendirme gerçek zamanlı ölçme sistemiyle yapılmıştır.

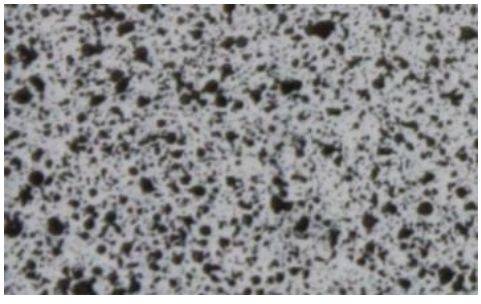
3.6.2.1. Deneylerin yapılışı

Gerçek zamanlı ölçme deneyleri Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde bulunan ve Şekil 3.20.'de görülen ARAMIS ekipmanı ve

yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin bir yüzeyi önce beyaz bir boya püskürtülerek boyanmış, sonra Şekil 3.21.'de görüldüğü gibi siyah boya ile rastgele benekli bir yapı oluşturulmuştur. Şekillendirme sırasında yüksek çözünürlüğe sahip CCD dijital kameralar kullanılarak numune üzerine oluşturulan bu benekli yapıların görüntü işleme yöntemleriyle takip edilmesi ile BŞD'ler otomatik olarak belirlenebilmektedir. Burada, numunenin şekillendirme işlemi boyunca fotoğrafları çekildiğinden, numunelerde meydana gelecek boyunlaşma veya yırtılma başlangıcının yakalanmasına gerek duyulmamaktadır. Deneyler, diğer yöntemde olduğu gibi, 60 mm/dk hız ve 150 kN baskı plakası kuvvetinde, numune ve stampa yüzeyleri parafin ile yağlanarak ve saniyede 5 fotoğraf çekilerek gerçekleştirilmiştir.



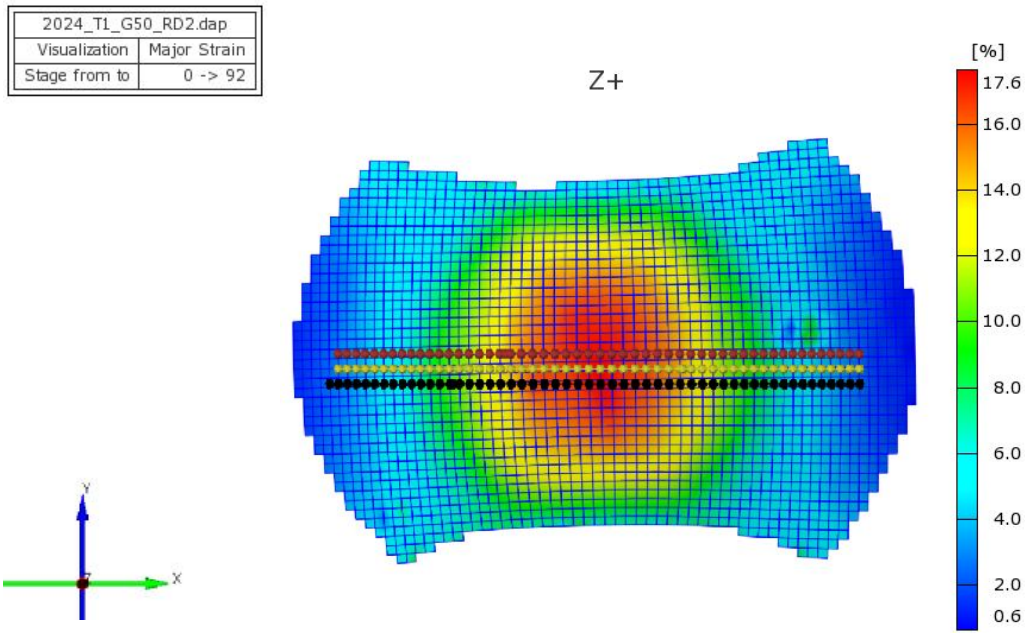
Şekil 3.20. Yüksek çözünürlüğe sahip CCD kameralara sahip ARAMIS ekipmanı



Şekil 3.21. Numune yüzeyine oluşturulan benekli yapı

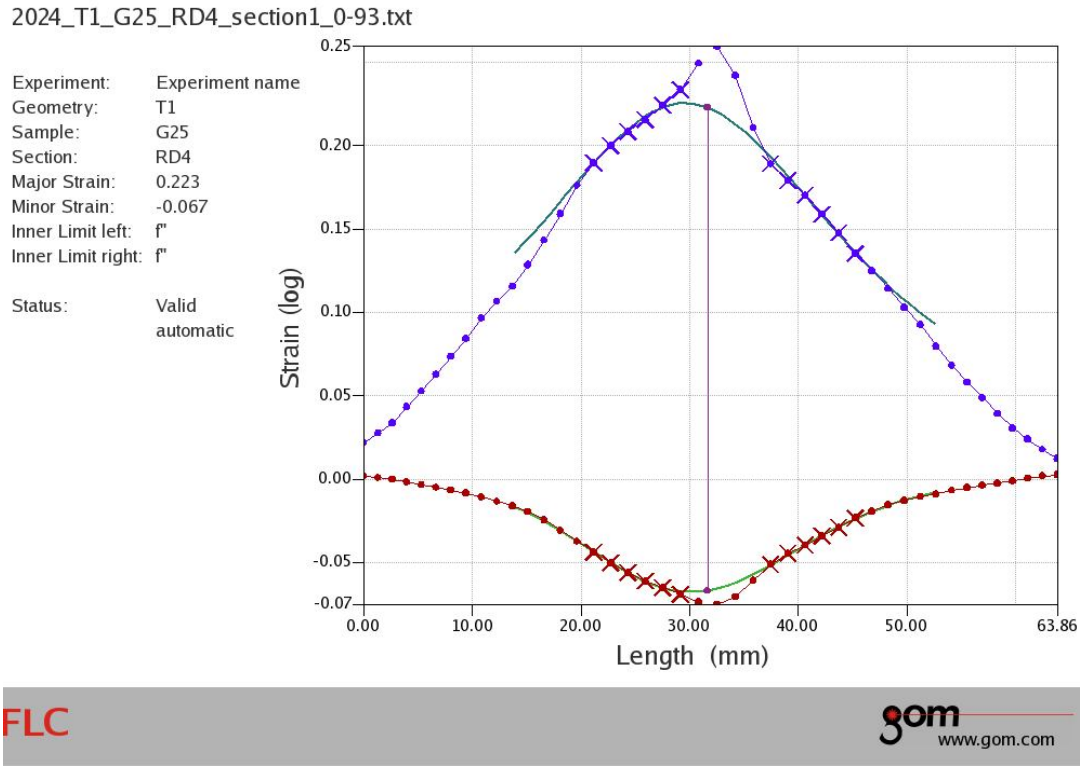
3.6.2.2. Sınır BŞD lerin ISO 12004-2 standardına göre belirlenmesi

Gerçek zamanlı ölçme sistemi ilk ve yırtıktan bir önceki fotoğraf arasındaki kayma, dönme ve çarpılmaları kullanarak parça üzerindeki BŞD dağılımını hesaplamaktadır. Yırtıktan bir önceki fotoğraftaki sınır BŞD değerini belirlemek için, ISO standardında belirtildiği gibi, dar numunelerde kenara paralel ve geniş numunelerde yırtığa dik olacak şekilde en az 20 mm uzunluğunda üç kesit çizilmiştir (Şekil 3.22.). Sınır BŞD'ler, bu kesitler boyunca majör ve minör BŞD'lerin 1. ve 2. türevleri alınarak elde edilen noktalardan çizilen parabolün tepe noktası olarak yazılım tarafından otomatik olarak Şekil 3.23.'teki gibi belirlenir.



Şekil 3.22. Numune üzerinde yırtığa dik çizilen ortogonal kesitler

Önerilen yönteme göre elde edilen sınır BŞD'lerin ISO 12004-2 standardına göre belirlenenlerle karşılaştırılarak güvenilirliğinin belirlenmesi için sınır BŞD'ler hem önerilen yönteme hem de gerçek zamanlı ölçme sistemi kullanılarak ISO 12004-2 standardına göre değerlendirmeyle elde edilmiştir. Deney tekrarlarında oluşacak hataları ortadan kaldırarak sadece değerlendirme yönteminin etkisi incelemek amacıyla, sınır BŞD'ler her iki yönteme göre de aynı numune üzerinden belirlenmiştir. Her iki yönteme göre de aynı numuneden ölçme yapabilmek için, gerçek zamanlı ölçme işleminden önce numunelerin yüzeyi serigrafi yöntemiyle gridlenmiştir. Sonra gridlerin üzerine rastgele



Şekil 3.23. Majör ve minör BŞD'lerin 1. ve 2. türevleri alınarak sınır BŞD'lerin elde edilmesi

benekli yapılar oluşturularak gerçek zamanlı ölçme işlemi yapılmıştır. Numuneler şekillendirildikten sonra, üzerindeki benekli yapılar aseton ile kaldırılarak gridler ortaya çıkarılarak aynı numuneler bilgisayarlı grid analiziyle de ölçülerek önerilen yönteme göre sınır BŞD'ler belirlenmiştir. Bu sayede önerilen yöntemin güvenilirliği, aynı tekrarlar üzerinden ISO 12004-2 standardına göre elde edilen sınır BŞD'lerle kıyaslanarak belirlenmiş olacaktır.

Gerçek zamanlı ölçme sistemlerine bağlı kalmadan ISO standardına göre değerlendirme yaparak sınır BŞD'leri belirlemek için, Microsoft Excell yazılımında yazar tarafından bir program geliştirilmiştir. Geliştirilen programın algoritması Ek-1.'de verilmiştir. Gerçek zamanlı ölçme sisteminden sınır BŞD'ler elde edildikten sonra numune üzerindeki benekli yapı kaldırılarak aynı numunelerin bilgisayarlı grid analiziyle BŞD dağılımı belirlenmiştir. Grid analiz programında BŞD dağılımı belirlenen numuneler üzerinde standartta belirtildiği gibi çizilen kesitler boyunca elde edilen majör ve minör BŞD değerleri geliştirilen programda ISO 12004-2 standardına göre değerlendirilerek sınır BŞD'ler belirlenmiş ve gerçek zamanlı ölçme sisteminden elde edilenlerle karşılaştırılarak geliştirilen programın güvenilirliği incelenmiştir.

3.7. Şekillendirme Sınır Eğrilerinin Oluşturulması

Bu çalışmada ŞSE'lerin oluşturulmasında Nakajima deneyleri iki farklı standarda göre yapılmış ve sınır BŞD'ler iki farklı yöntemle değerlendirilerek belirlenmiştir. Karışıklıkları önlemek amacıyla kullanılan yöntemler, DENEY YÖNTEMİ-DEĞERLENDİRME YÖNTEMİ olacak şekilde aşağıdaki gibi adlandırılmıştır.

- ISO-ÖNERİLEN; Bu yöntemde Nakajima deneyleri ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardına göre yapılırken, sınır BŞD'nin belirlenmesi bilgisayarlı grid analiziyle ölçme kullanılarak ve yazar tarafından önerilen *"hasarsız gridden hasarlıya ekstrapolasyon"* yöntemi ile yapılmıştır.

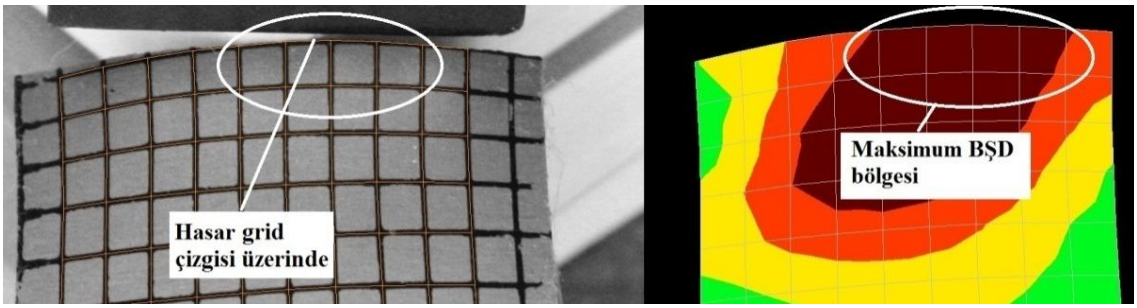
- ISO-ISO; Bu yöntemde hem Nakajima deneyleri hem de sınır BŞD'lerin belirlenme yöntemi ISO 12004-2 standardına göre yapılmış ve sınır BŞD'ler gerçek zamanlı ölçme sistemi kullanılarak elde edilmiştir.

- ASTM-ÖNERİLEN; Bu yöntemde Nakajima deneyleri ASTM E 2218-02 (Ağustos 2002) standardına göre yapılırken, sınır BŞD'lerin belirlenmesi yine grid analizi kullanılarak önerilen yöntem ile yapılmıştır.

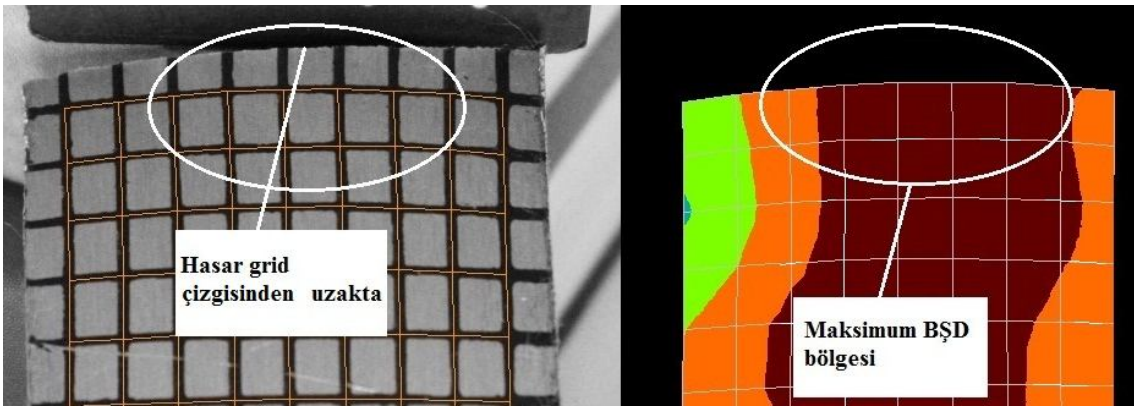
3.7.1. Sınır BŞD nin belirlenmesi için önerilen yeni bir yöntem

ŞSE'ler ISO 12004-2 (ISO-ISO) standardına göre değerlendirilerek güvenilir olarak belirlenebilir. Ancak bunun için gerçek zamanlı ölçme sistemleri kullanılmalıdır. Bu sistemler kullanılarak numunelerin üzerine uygulanan rastgele benekli yapılardaki değişimler gerçek zamanlı ölçülerek numunedeki BŞD dağılımı belirlenebilmekte ve hasar bölgesinde çizilen birkaç ortogonal kesit değerleri yardımıyla sınır BŞD'ler otomatik olarak belirlenmektedir. Ayrıca numunelerin üzerine uygulanan rastgele benekli yapılar sayesinde hasar bölgesine oldukça yakın bölgelerdeki BŞD'ler ölçülebilmektedir. Ancak gerçek zamanlı ölçme sistemleri oldukça pahalıdır.

Buna alternatif bir yöntem olan ve uzun zamandır kullanılan grid analiz sistemleriyle de numune üzerindeki BŞD dağılımı belirlenebilirken, sınır BŞD değerinin belirlenmesi için tüm malzemeler için geçerli olan bir yöntem mevcut değildir. Bilgisayarlı grid analizi sistemleri tam grid çizgilerini kullanarak ölçme yapılabilmektedir. Bazı numunelerde yırtık Şekil 3.24a.'da görüldüğü gibi grid çizgisinin hemen üzerinde oluşurken, bazılarında Şekil 3.24b.'de görüldüğü gibi grid çizgisinden uzakta meydana gelmektedir. Yırtığın grid çizgisinden uzakta meydana geldiği numunelerde yırtıktan uzaktaki BŞD'ler ölçülebilmekte ve bunun sonucunda gerçek değerden daha küçük bir sınır BŞD değeri elde edilmektedir. Bu durum ŞSE'nin elde edilmesindeki hassasiyeti azaltmaktadır. 2.5 mm'den daha küçük grid boyutu kullanılarak bu durumun üstesinden gelinebilir. Ancak bu durumda ölçmelerde yapılacak en küçük hatalar bile sınır BŞD değerinde büyük farklılıklara sebep olacaktır.



a)



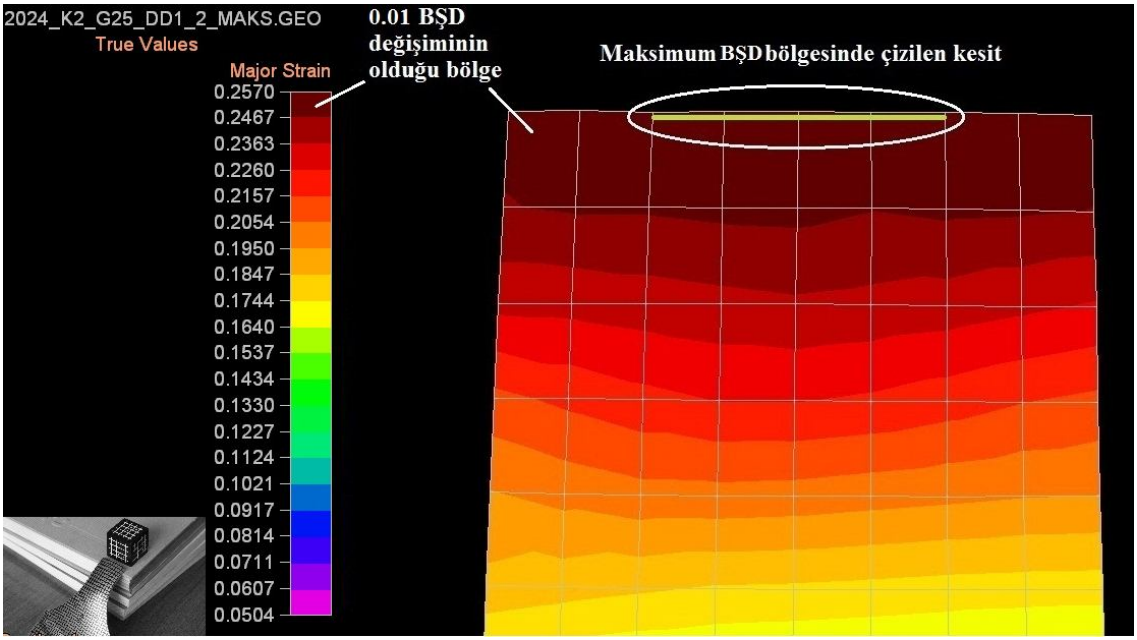
b)

Şekil 3.24. Hasarın a) grid çizgisinin hemen üzerinde b) grid çizgisinden uzakta olması durumu

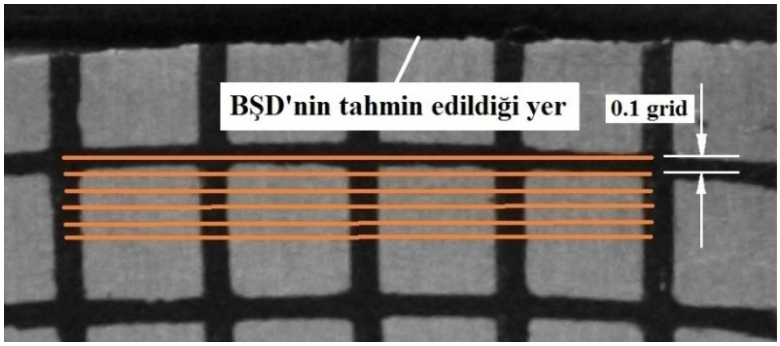
Grid analiziyle ölçmelerdeki bu problemin üstesinden gelerek, pahalı olan gerçek zamanlı ölçme sistemlerine bağlı kalmadan ve ISO 12004-2 standardında belirtilen karmaşık hesaplamalarla uğraşmadan, daha doğru bir sınır BŞD değerini

kolayca ve güvenilir olarak belirlemek amacıyla, yazar tarafından grid analiz ölçme sistemi kullanılarak *hasarsız gridden hasarlıya ekstrapolasyon* olarak adlandırılan yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem ISO-ÖNERİLEN olarak adlandırılan yöntemdir.

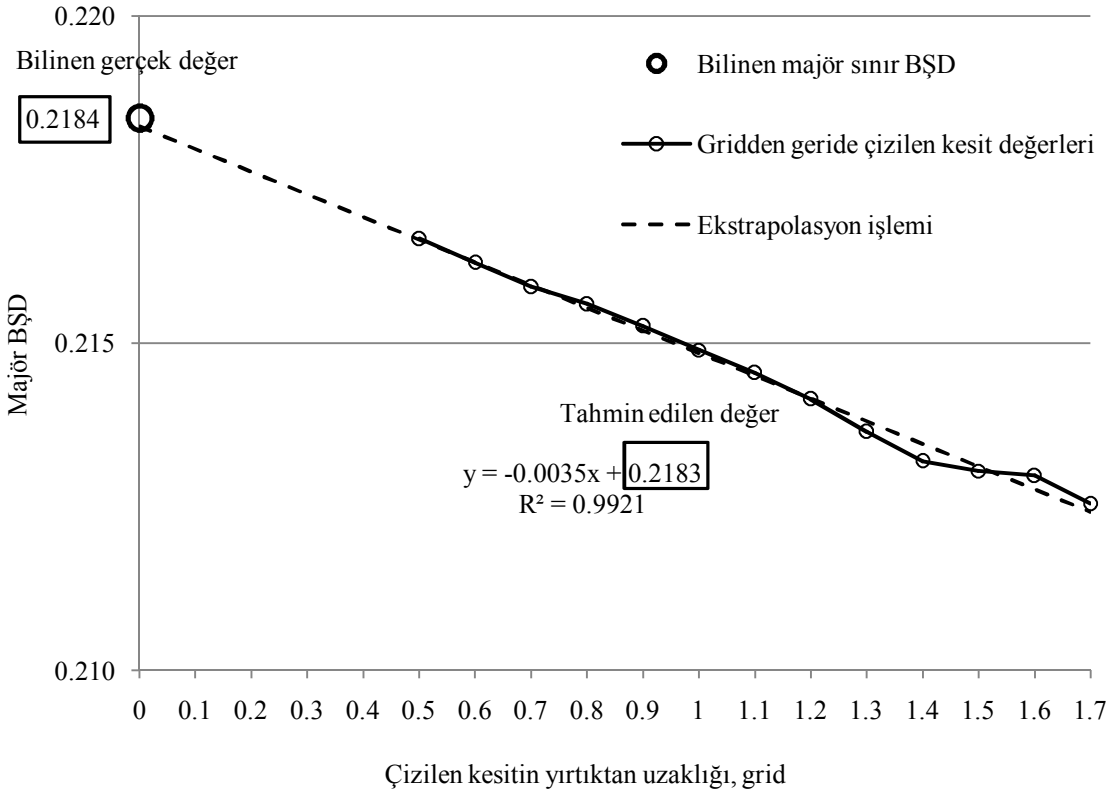
ISO 12004-2 standardına göre yapılan Nakajima deneylerinde oldukça üniform BŞD dağılımları elde edildiğinden, majör BŞD'ye göre 0.01 renklendirme (color step) yapıldığı zaman çoğu numunede maksimum BŞD bölgesinin en az dört gridi kapsadığı görülmüştür. Önerilen yöntemde sınır BŞD değeri, Şekil 3.25.'te görüldüğü gibi, maksimum BŞD bölgesinde en az dört grid boyunca yırtığa komşu ve paralel çizilen kesitin ortalaması olarak alınmıştır. Yırtığın grid çizgisinden oluştuğu numunelerde belirlenen değer sınır BŞD değeri olarak alınmıştır. Ancak yırtığın grid çizgisinden uzakta meydana geldiği numuneler için, Şekil 3.26.'da görüldüğü gibi, maksimum BŞD bölgesinde en az dört grid boyunca 0.1 grid aralıklarla yırtığa paralel 5~10 kesit çizilmiştir ve bu kesitlerin her biri için elde edilen ortalama değerlerin, kesitin yırtıktan uzaklığına göre değişimi incelenmiştir. İncelemeler sonucunda tüm numunelerde bu değişimin yaklaşık doğrusal olduğu görülmüştür (Şekil 3.27.). Elde edilen bu değerlere doğru uydurularak ekstrapolasyonla yırtığın hemen yanındaki sınır BŞD değerleri tahmin edilmiştir.



Şekil 3.25. Maksimum BŞD bölgesinde çizilen kesit

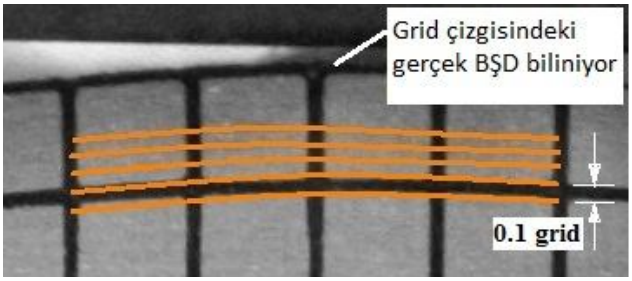


Şekil 3.26. Hasar yerindeki BŞD ekstrapolasyonla tahmin edilir



Şekil 3.27. Kesit değerlerinin ortalamaları yırtıktan uzaklığa göre yaklaşık doğrusal değişiyor

Yapılan işlemin güvenilirliğini ortaya koymak amacıyla, bu işlem grid çizgisinden yırtılan numunelere uygulanmıştır (Şekil 3.28.). Grid çizgisinden geride çizilen kesit değerleri kullanılarak hasar bölgesindeki sınır BŞD tahmin edilmiştir ve Şekil 3.27.'deki gibi bilinen gerçek değerle karşılaştırılmıştır.



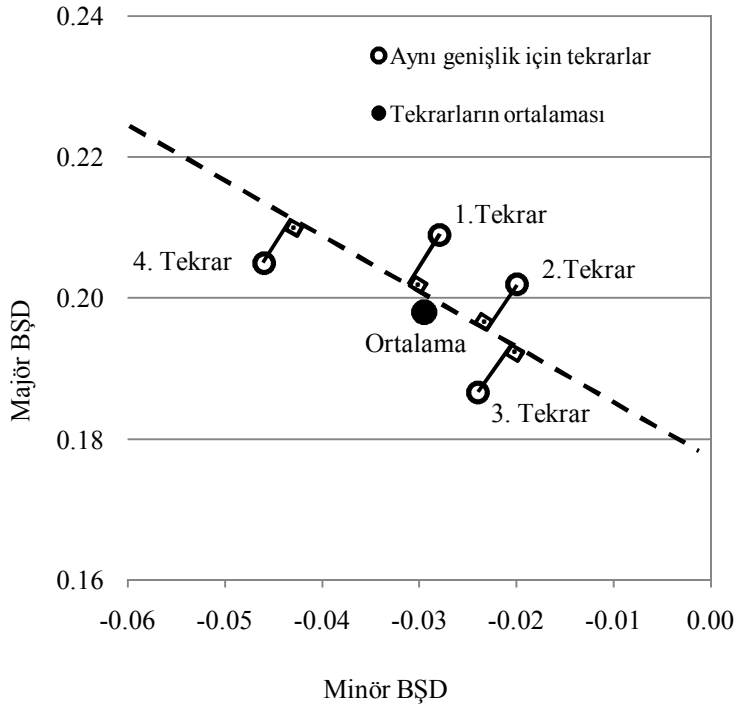
Şekil 3.28. Ekstrapolasyonla elde edilen BŞD değerinin bilinen değerle karşılaştırılması yöntemi

Önerilen yöntemin diğer malzemeler için de geçerli olup olmadığını belirlemek amacıyla, gevrek yapıya sahip Al 7075, sünek yapıya sahip Al 5754-O ve nispeten sünek yapıya sahip Al 2024-O için; hem ISO-ISO hem de ISO-ÖNERİLEN yöntemlerine göre ŞSE'ler elde edilerek karşılaştırılmıştır.

3.7.2. Çeşitli kalınlıklar için ŞSE lerin çizilmesi

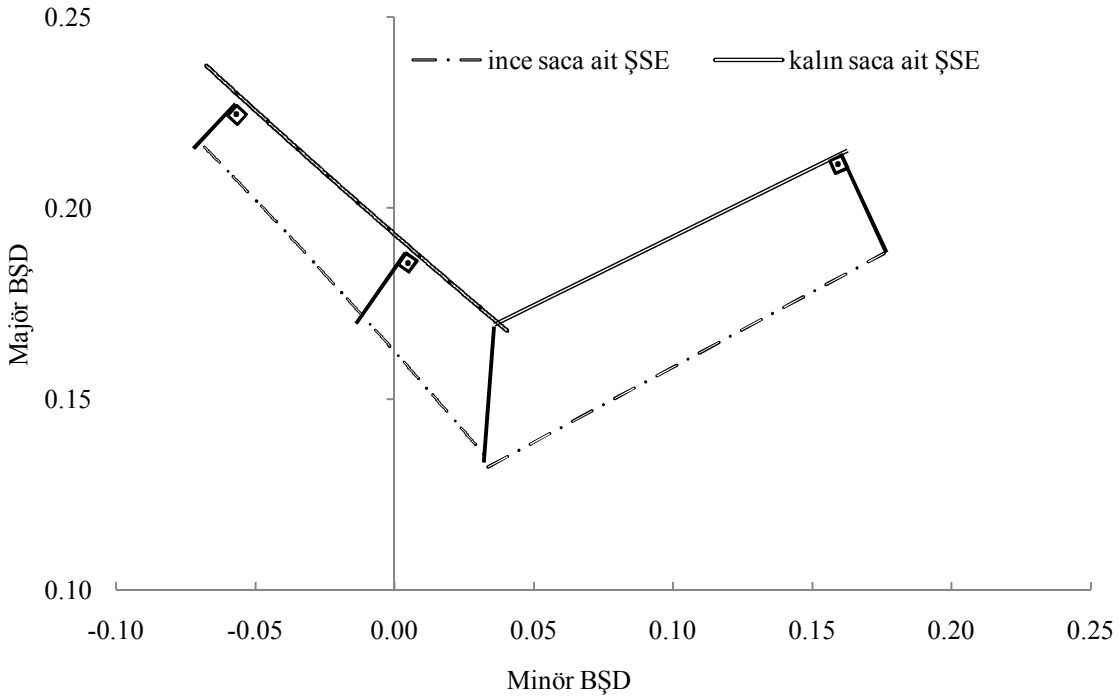
ŞSE'lerin oluşturulmasında tekrarlardan elde edilen sınır BŞD değerlerinin ortalamasının alınması uygun olmamaktadır. Çünkü her ne kadar deneyler aynı şartlarda yapılsa da her bir deneyde farklı BŞD yolu oluşabilmektedir. Örneğin Şekil 3.29.'daki 4.tekrardan elde edilen değer ortalamaya uzakta olmasına rağmen ŞSE'ye yakındır. Bu nedenle ŞSE, birçok araştırmacının yaptığı gibi, tüm genişlikler için tekrarlardan elde edilen sınır BŞD değerlerinin tamamına eğri uydurularak çizilmiştir. Tekrarlanabilirlik tüm genişlikler için elde edilen sınır BŞD değerlerinin, şekilde görüldüğü gibi, uydurulan eğriye dik uzaklıklarının karelerinin karekökü kullanılarak hesaplanmıştır.

Al 2024-T4 sacın ŞSE'sinin kalınlığa ve haddeleme doğrultusuna göre değişimini incelemek amacıyla, 0.8, 1, 1.2, 1.6 ve 2 mm kalınlıklar için 0° doğrultusunda ve 0.8, 1.2 ve 2 mm kalınlıklar için 45° ve 90° doğrultularında ISO-ÖNERİLEN yönteme göre SŞE'ler oluşturulmuştur. Tüm ŞSE'ler gerçek sınır BŞD değerleri kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 3.29. ŞSE oluşturulurken tüm verilere eğri uydurulması

Kalınlığa göre değişiklik göstermesi beklenen ŞSE'ler arasındaki farklılığı belirlemek için, farklı seviyedeki ŞSE'lerin karakteristik bölgelerinde eğriler arasında çizilen normaller doğrultusundaki uzaklık kullanılacaktır (Şekil 3.30.). Bu uzaklıklar ŞSE'lerin oluşturulmasındaki belirsizlik değerinden ne kadar büyükse, kalınlığın etkisi hakkında varılacak yargı o kadar güvenilir olacaktır. Kalınlığa göre farklı ŞSE'lerin kullanılması gerektiğine % 99 güvenilirlikle karar vermek için eğriler arasındaki dik uzaklığın en az 3σ olması gerektiği düşünülmektedir. Sonuç olarak bu sınır içerisinde kalacak farklılıklar için tek bir ŞSE kullanılması yeterli olurken, daha büyük farklar için farklı ŞSE'lerin kullanılması gerekecektir.



Şekil 3.30. Çeşitli kalınlıklar için ŞSE'ler arasındaki farkın belirlenmesi

3.8. Hasar Mekanizmalarının İncelenmesi

Kalınlığa, haddeleme doğrultusuna ve standartlara göre ŞSE'lerdeki farklılıkları daha iyi açıklayabilmek için, Nakajima numunelerindeki hasar mekanizmaları incelenmiştir. Bu amaçla ŞSE'nin farklı bölgelerini oluşturan bazı numunelerin

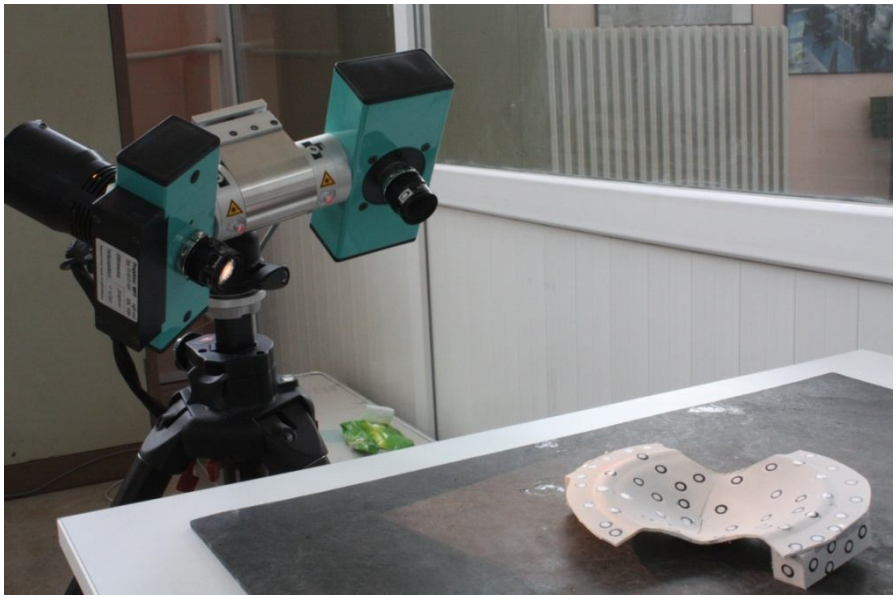
- kalınlık dağılımları
  - profil projektörü ile
  - 3B optik tarama ile
  - SEM (Scanning Electron Microscope) cihazı ile ölçülmüş,
- boyunlaşma davranışları SEM'de incelenmiştir.

Şekillendirilen g25 (tek eksenli çekme durumu), g100 (düzlem BŞD durumu) ve g175 (eşit iki eksenli gerdirme durumu) numuneleri, kubbe tepe noktasından süzdürme çubuğuna kadar, en kritik olan yırtığa dik kesitten, formunu bozmayacak tarzda kıl testere ile kesilmiş ve kalınlık dağılımı profil projektörü ile 20X büyütme oranında, 1 mm aralıklarla ve 0.002 mm hassasiyetle ölçülmüştür.

Profil projektörüyle yapılan ölçmelerin doğruluğunu test etmek için, 0.8 ve 2 mm kalınlığındaki g100 numunelerinin kalınlık dağılımı SEM cihazı ile 70X büyütme

oranında, 1 mm aralıklarla ve 0.001 mm hassasiyetle ölçülmüştür. SEM cihazı kullanılarak boyunlaşma davranışları da incelenmiştir.

Numunenin tamamı için kalınlık dağılımını daha kolay ve kısa sürede ölçmek için, 3B Optik tarama yöntemi ile elde edilen nokta bulutları kullanılmıştır. 2 mm kalınlığındaki g100 numuneleri Şekil 3.31.'de görülen optoTop-HE 3B optik tarama cihazında taranmıştır. Tarama yaparken referans noktaları oluşturmak için, parçanın iç ve dış yüzeylerine indeks etiketleri yapıştırılmıştır.

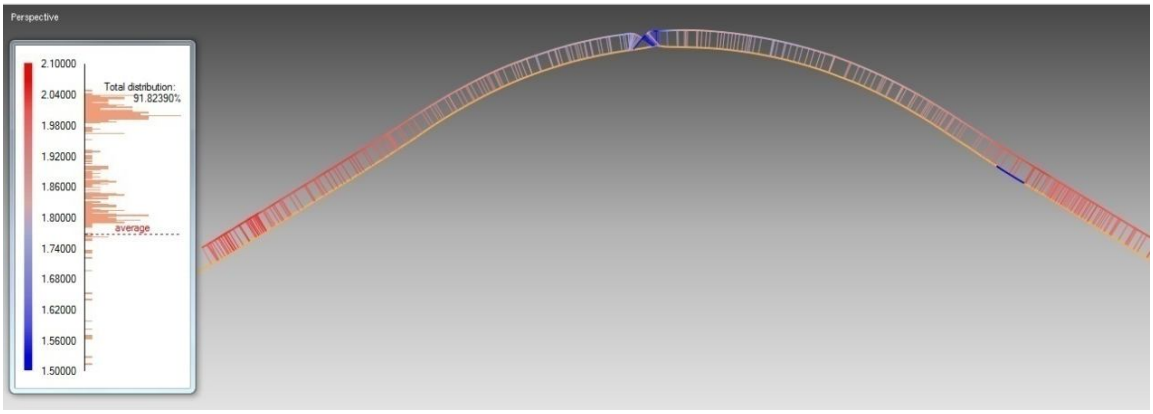


Şekil 3.31. Nakajima numunelerinin optik tarama cihazı ile taranması

Numunelerin ön ve arka yüzeyleri ayrı ayrı tarandığı zaman, yüzeylerin çakıştırılmasında problem ortaya çıkmaktadır. Bütün olarak taramada ise, iç yüzeyden dış yüzeye geçerken ortak indeks etiketlerinin olacağı bir açının yakalanması mümkün olmamaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için numunelerin flanş bölgelerine, Şekil 3.32.'de görüldüğü gibi, farklı açılardan rahatça görülebilecek dikdörtgenler prizması şeklindeki referans parçaları yapıştırılmıştır. Böylece numuneler bir bütün halinde taranmıştır. Nokta bulutları oluşturulduktan sonra Rapidform XOR yazılımında kubbe tepe noktasından geçen ve yırtığa dik bir düzlem geçirilerek Şekil 3.33.'te görüldüğü gibi kalınlık profili ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 3.32. Flanş bölgesine dikdörtgenler prizması şeklinde parçalar yapıştırılmış örnek bir numune



Şekil 3.33. Optik tarama cihazı ile ölçülen örnek bir kalınlık profili

3.9. $ŞSE_0$ Değerinin İncelenmesi

Teorik olarak bir ŞSE'de, en düşük majör BŞD seviyesi minör BŞD değerinin sıfır olduğu *y* ekseni üzerinde olmalıdır ve bu nokta $ŞSE_0$ olarak adlandırılır. Ancak ilk oluşturulan ŞSE'lerde en düşük majör BŞD değeri *y* ekseninden yaklaşık olarak 0.025 BŞD sağa doğru ötelenmiş durumda elde edilmiştir. En düşük majör BŞD seviyesinin konumunu kesin olarak belirleyebilmek için standart genişlikteki numunelere (g25, g50, …., g175) ek olarak, g125 ile g143 genişlikleri arasında 2'şer mm artımlı standart dışı ilave genişlikler için de deneyler yapılarak en düşük majör BŞD değerinin ötelenme miktarı 0.04 BŞD olarak bulunmuştur. Bu ötelenmenin nedenlerini araştırmak için sırasıyla yapılan incelemeler Çizelge 3.1.'de verilmiştir. Buradaki sınır BŞD'ler ISO-ÖNERİLEN yönteme göre elde edilmiştir.

Çizelge 3.1. $ŞSE_0$ değerinin incelenmesinde izlenen yol

Ötelenme sebebi	**Yapılan işlem**
$ŞSE_0$ daki ötelenme, T4 temperine dönüştürme sırasında oluşabilir.	T3 temperindeki malzemenin ŞSE'si oluşturulmuştur.
$ŞSE_0$ daki ötelenme, numuneyi suya daldırma doğrultusundan etkilenebilir.	Numuneler yan ve dik doğrultularda suya daldırılarak sınır BŞD'ler belirlenmiştir.
Süzdürme çubuğu ile uygulanan ön gerilme ötelenmeyi etkileyebilir.	Sadece süzdürme çubuğu ile bastırılan ve başkaca şekillendirilmeyen numunelerdeki BŞD ölçülmüştür.
	T4 temperi için, düz baskı plakası kullanılarak ŞSE elde edilmiştir.
Isıl işlem ve süzdürme çubuğunun birleşik etkisi	T3 temperi için düz baskı plakası kullanılarak ŞSE elde edilmiştir.
T3 ve T4 temperlerinin etkisi	O temperi için ŞSE elde edilmiştir.
Eğilme gerilmelerinin etkisi	En düşük ve en büyük sac kalınlıkları için her iki yüzeyi de gridlenerek şekillendirilmiş numunelerin iç ve dış yüzeylerindeki sınır BŞD'ler belirlenmiştir.

3.10. Durum Çalışması

Bu bölümde elde edilen ŞSE'lerin geçerliliğini ortaya koymak için yapılan çeşitli durum çalışmalarının yöntemi anlatılmıştır. Bu durum çalışmaları Çizelge 3.2.'deki gibi gruplandırılabilir.

Çizelge 3.2. Yapılan durum çalışmalarının gruplandırılması

Durum çalışması grubu	**Yapılan durum çalışması**	**Deneysel / Sayısal**
ISO 12004-2 ve ASTM E 2218 standartlarına göre elde edilen ŞSE'lerin hangisinin güvenilir olduğunu belirlemek için yapılan durum çalışmaları	klasik derin çekme	deneysel
	hidrolik şişirme	
Al 2024-T4 için ilave genişlikler kullanılarak ve önerilen yönteme göre değerlendirme yapılarak elde edilen ŞSE'nin, literatürdeki eğrilerle karşılaştırılması için yapılan durum çalışmaları	klasik derin çekme	
	gerdirmeli çekme	
Sac kalınlığının etkisi ile ilgili yapılan durum çalışmaları	klasik derin çekme	deneysel ve sayısal
	gerdirmeli çekme	
	hidrolik şişirme	

ISO 12004-2 ve ASTM E 2218 standartlarına göre elde edilen ŞSE'lerin hangisinin güvenilir olduğunu belirlemek amacıyla, 1 mm sac kalınlığına sahip malzemeler için klasik derin çekme, hidrolik şişirme prosesleri kullanılarak deneysel durum çalışmaları yapılmıştır. Klasik derin çekme prosesinde 85 mm ilkel çapa sahip sac numune, 60 mm çapa sahip silindirik stampayla yırtık olacak şekilde şekillendirilmiştir. Gerdirmeli çekme prosesinde ise 100 mm çaplı stampayla yırtık oluşuncaya kadar şekillendirilmiştir. Üretilen parçalardaki BŞD dağılımları ŞSD üzerine aktarılmıştır.

Bu çalışmanın hipotezi "çeşitli kalınlıklardaki sacların şekillendirilebilirliği hakkında karar vermek için farklı ŞSE kullanmak gerekir" olarak ifade edilebilir. Çeşitli kalınlıklar için çizilen ŞSE'lerin sayısal değerlerle karşılaştırılması yeterli değildir. Birçok şekillendirme prosesinde hipotezin doğruluğunu kanıtlamak gerekir. Kalınlığın etkisinin olduğu durumda, ince numunelerin hasara uğradığı şartlarda, kalın numunelerin hasara uğramaması beklenir. Bunun kanıtlanması durumunda, analizler de kullanılarak genelleştirmeler yapılabilir.

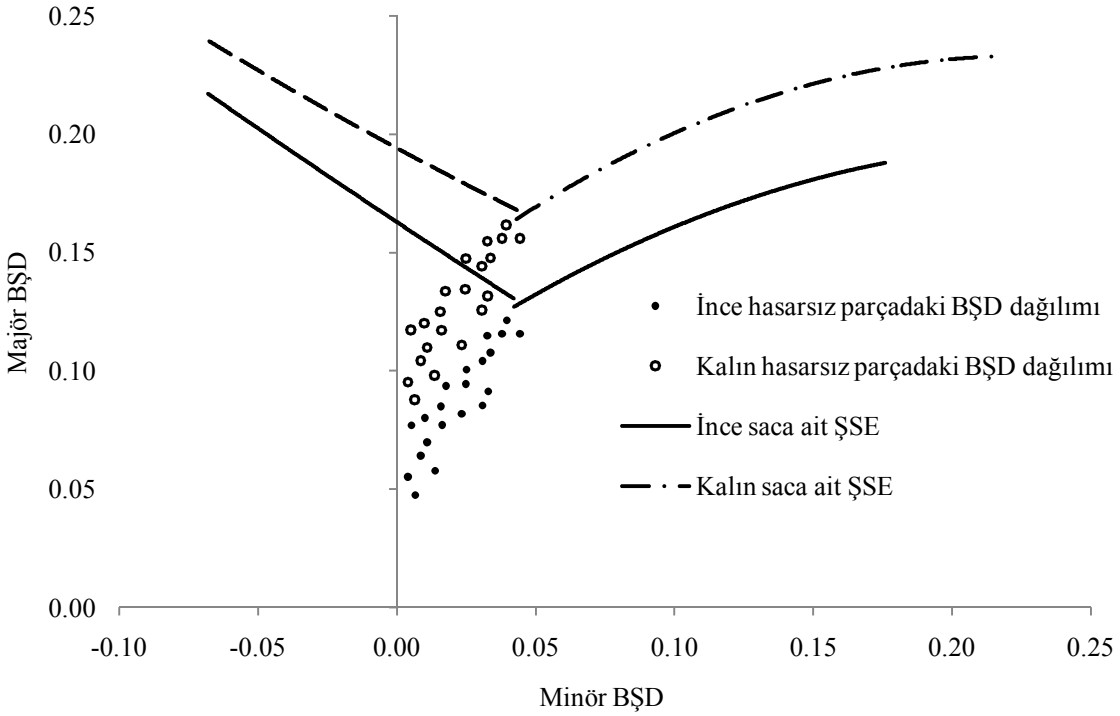
Çeşitli kalınlıklar için elde edilen eğrilerin geçerliliğini test etmeden önce, Al 2024-T4 için ilave genişlikler kullanılarak ve önerilen yönteme göre değerlendirme yapılarak elde edilen ŞSE'nin literatürde verilen eğrilerle karşılaştırmalı olarak geçerliliğini durum çalışmasıyla belirlemek gerekir. Bu amaçla 0.8 mm sac kalınlığına sahip Al 2024-T4 malzemeler için klasik derin çekme, gerdirmeli çekme prosesleri için deneysel durum çalışmaları yapılmıştır.

Çeşitli kalınlıklar için elde edilen eğrilerin geçerliliğini test etmek amacıyla, 0.8, 1.6 ve 2 mm sac kalınlıkları için ŞSE'nin birçok bölgesini kapsayacak tarzda klasik derin çekme, gerdirmeli çekme ve hidrolik şişirme prosesleri ile deneysel ve sayısal durum çalışmaları (case studies) yapılmıştır. Klasik derin çekme ve gerdirmeli çekme prosesleri kuru sürtünmeli olarak gerçekleştirilmiştir.

Klasik derin çekmede kabın hasara uğrayabilmesi için, başarıyla çekilen ilkel çaptan birkaç mm daha büyük numuneler, 2 ton baskı plakası kuvveti uygulanarak 60 mm çapında silindirik stampayla, gerdirmeli çekme prosesinde 100 mm çaplı stampayla ve hidrolik şişirme prosesi için ise 65 mm çapında kalıp kullanılarak şekillendirilmiştir.

Tüm prosesler için ilk olarak, çeşitli kalınlıktaki yüzeyi gridli sac numuneler hasara uğrayıncaya kadar şekillendirilerek sınırlar belirlenmiştir. Daha sonra aynı numuneler hasar öncesine kadar şekillendirilerek BŞD dağılımları grid analiz

yöntemiyle ölçülerek diyagram üzerine aktarılmıştır. Şekil 3.34.'te görüldüğü gibi kalın malzemeye ait BŞD değerlerinin bir kısmı ince malzemenin ŞSE'sinin yukarısında kalabiliyorsa kalınlığın etkisinden söz edilir.



Şekil 3.34. Sac kalınlığının etkisi için yapılacak durum çalışması

Çeşitli kalınlıklardaki malzemeler için farklı ŞSE'lerin kullanılmasının gerekliliğini genelleştirmek amacıyla, lisanslı Abaqus v6.9.1. yazılımı kullanılarak analizler yapılmıştır. Sac malzeme elastoplastik olarak modellenmiş ve elastikiyet modülü 70 GPa, poisson oranı 0.33 olarak alınmıştır. Plastik bölge ise, Al 2024'ün akma eğrisinin yazılıma girilmesiyle modellenmiştir. Kalıplar analitik rijit olarak, sac ise şekil değiştirebilir elemanlar kullanılarak modellenmiş ve tüm analizler eksplisit modda gerçekleştirilmiştir. Daha uygun ve kolay modelleme yapabilmek amacıyla, hidrolik şişirme ve gerdirme analizlerinde üç boyutlu sekiz düğüm noktalı katı elemanlar kullanılırken, derin çekme analizlerinde ise dört düğüm noktalı eksenel simetrik elemanlar seçilmiştir. Sürtünme katsayıları, sac-stampa yüzey çifti için 0.36, sac-baskı plakası yüzey çifti için 0.05 alınırken, hidrolik şişirme prosesi sürtünmesiz olarak modellenmiştir.

Hidrolik şişirme analizlerinde numunelere deneysel prosesten elde edilen sınır basınç değerleri uygulanıp parçadaki BŞD değerleri ŞSE'lerle karşılaştırılmıştır. Klasik derin çekme analizlerinde deneylerdeki baskı plakası kuvvetleri kullanılmış ve kalınlığa göre değişen farklı ilkel çaplardaki numuneler, deneylerdeki kap yüksekliklerine kadar şekillendirilmiştir. Gerdirme prosesinin analizinde ise, parçalar deneylerdeki yüksekliklere kadar şekillendirilmiş ve parçalarda meydana gelen BŞD değerleri ŞSE üzerine taşınarak deneysel verilerle kıyaslanmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde ilk olarak çeşitli kalınlığa sahip Al 2024-T4 sacların kimyasal bileşimleri, ısıl işlem sonucu elde edilen mikroyapıları, mekanik özellikleri ve anizotropi katsayıları verilmiştir. Sonra ŞSE'lerin elde edilmesinde hangi standardın uygulanacağına karar vermek amacıyla standartların detaylı karşılaştırması verilmiştir. Deneylerin ISO standardına göre yapılması gerektiğine karar verildikten sonra, çeşitli kalınlıklar ve doğrultular için ISO-ÖNERİLEN ve ISO-ISO yöntemlerine göre elde edilen ŞSE'ler ve hasar mekanizmaları verilmiştir. Ayrıca ŞSE'lerin en düşük majör BŞD değerinin y ekseninden ötelenmiş olmasının sebeplerini araştırmak için yapılan deneylerin sonuçları tartışmalı olarak verilmiştir. Son olarak ŞSE'lerin geçerliliğini test etmek amacıyla yapılan deneysel ve sayısal durum çalışmalarının sonuçları tartışılmıştır.

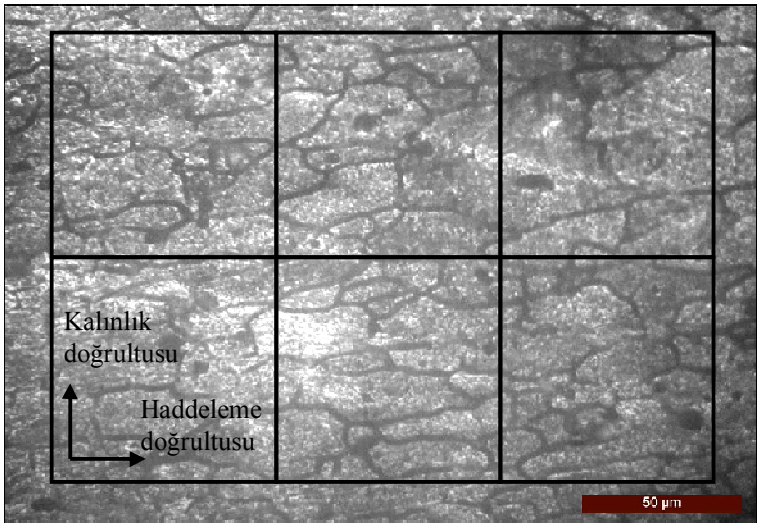
4.1. Mikroyapı ve Kimyasal Analiz

Farklı kalınlıklı saclar için yaptırılan kimyasal analiz sonucu elde edilen bileşimler Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Görüldüğü gibi kimyasal yapı kalınlığa göre değişiklik göstermemektedir ve elde edilen veriler literatürdeki (Takuda ve Hatta, 1998; Bron ve ark., 2004; Ortiz ve ark., 2007; Steglich ve ark., 2008) değerlerle de uyumludur.

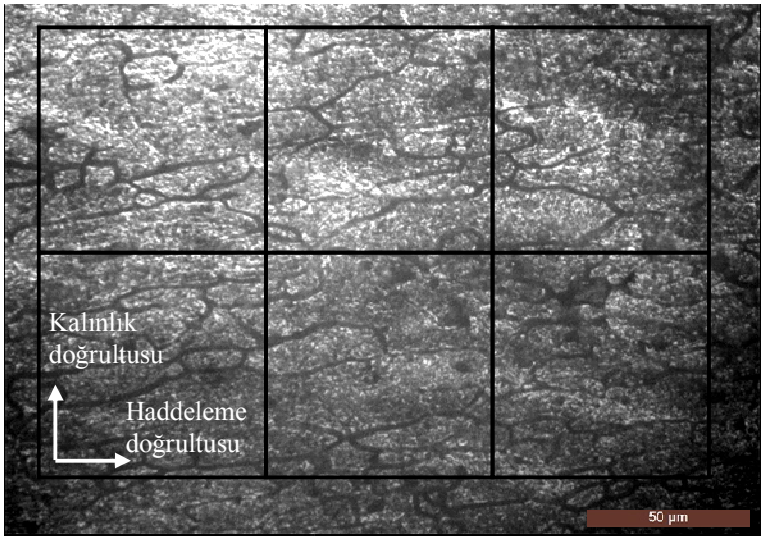
Malzemelerin şekillendirme öncesindeki mikroyapılarını incelemek için çekilen fotoğraflar Şekil 4.1.'de verilmiştir. 0.8, 1.6 ve 2 mm kalınlıkları için 54 cm^2 lik bir alandaki tane sayıları ortalama olarak sırasıyla 47, 52 ve 50 gibi yakın değerler olduğu için malzemelerin benzer bir mikroyapıda olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.1. Çeşitli kalınlıktaki Al 2024-T4 sacların kimyasal bileşimleri (%)

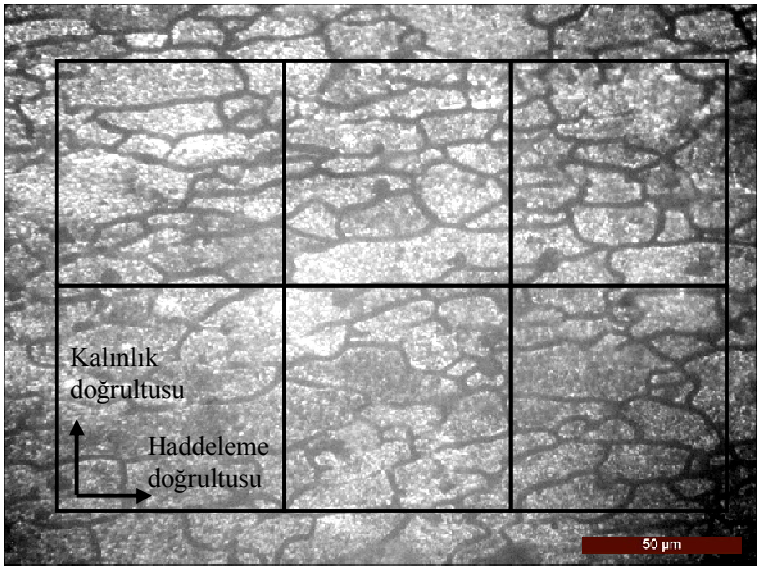
Kalınlık (mm)	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Diğer	Al
0.8~2	4.34-4.44	1.23-1.34	0.62-0.63	0.12-0.17	0.058-0.068	0.077-0.092	0.024-0.029	0.035-0.070	93.29-93.39
ASTM B 209M-07	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5	0.5	0.25	0.15	0.15	90.85-93



a)



b)



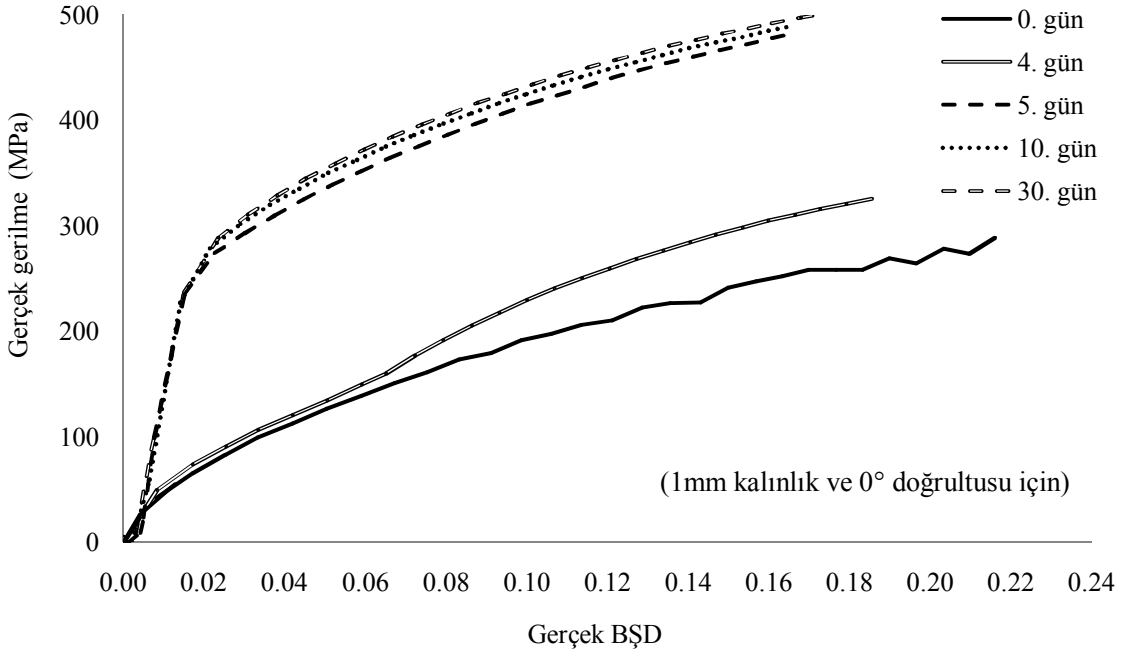
c)

Şekil 4.1. Al 2024-T4 sac malzemelerin şekillendirme öncesindeki mikroyapıları a) 0.8 mm, b) 1.6 ve b) 2 mm sac kalınlığı için

4.2. Mekanik Özellikler

4.2.1. Çekme deneyi

Al 2024 için doğal yaşlandırmanın farklı günlerinde elde edilen akma eğrileri Şekil 4.2.'de verilmiştir. Görüldüğü gibi 5. günden sonra mekanik özellikler tamamen stabil hale gelmektedir. Bu nedenle deneyler numuneler en az yedi gün doğal yaşlandırıldıktan sonra yapılmıştır.

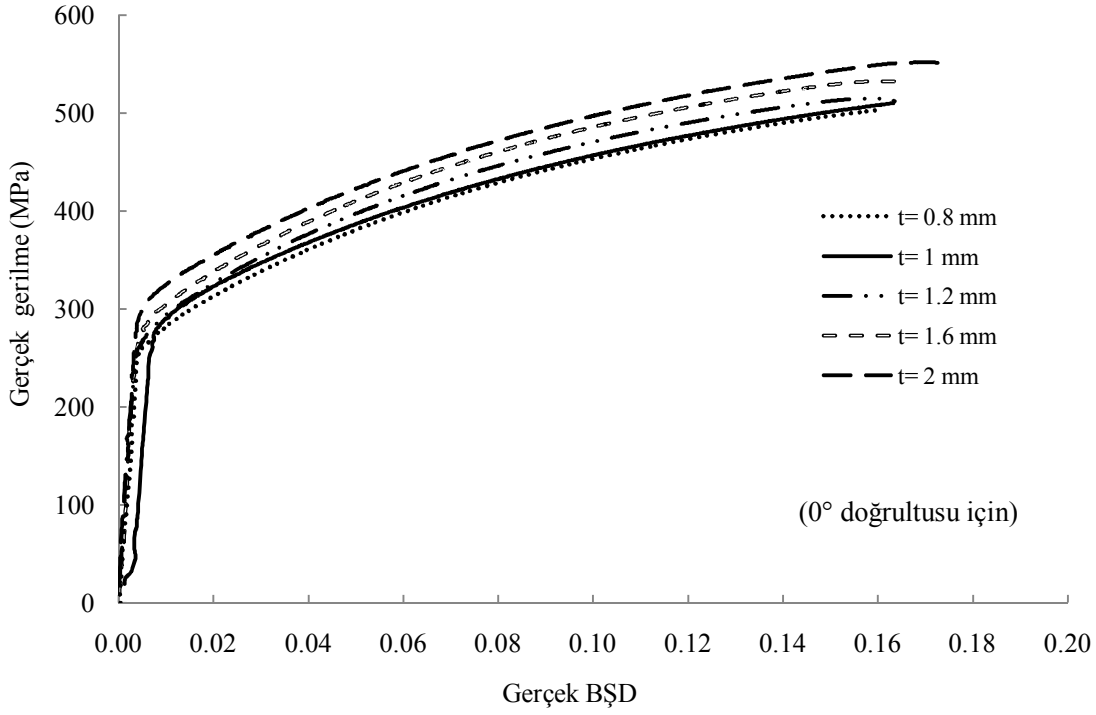


Şekil 4.2. Al 2024 alaşımının doğal yaşlandırma ile mekanik özelliklerinin stabil hale gelmesi

Çeşitli kalınlığa sahip malzemeler için elde edilen mekanik özellikler Çizelge 4.2.'de ve 0° doğrultusu için akma eğrileri Şekil 4.3.'te, 45° ve 90° doğrultuları için ise Ek-2.'de verilmiştir. Elde edilen mekanik özellikler literatürde verilen değerlerle uyumludur (Hursman, 1978; Gedney, 2002; Hatipoğlu, 2007; Hussain ve ark., 2008).

Çizelge 4.2. Çeşitli kalınlıktaki Al 2024-T4 sacların mekanik özellikleri

Kalınlık (mm)	Haddeleme doğrultusu ile yapılan açı	Gerçek akma mukavemeti σ_a (MPa)	Gerçek çekme mukavemeti σ_u (MPa)	Toplam gerçek uzama ε_g	Pekleşme katsayısı n	Mukavemet katsayısı K (MPa)
0.8	0°	263 ± 5	497 ± 4	0.1685 ± 0.007	0.20 ± 0.004	762 ± 3
	45°	249 ± 4	473 ± 5	0.1815 ± 0.027	0.20 ± 0.004	738 ± 2
	90°	264 ± 3	502 ± 6	0.1713 ± 0.02	0.21 ± 0.004	719 ± 3
1	0°	271 ± 4	499 ± 4	0.1640 ±0.008	0.21 ± 0.006	724 ± 6
	45°	263 ± 5	500 ± 8	0.1797 ± 0.027	0.22 ± 0.012	686 ± 6
	90°	270 ± 2	495 ± 5	0.1745 ± 0.007	0.21 ± 0.004	714 ± 10
1.2	0°	270 ± 1	512 ± 4	0.1773 ± 0.015	0.22 ± 0.003	764 ± 3
	45°	266 ± 1	536 ± 2	0.1741 ± 0.017	0.21 ± 0.005	749 ± 5
	90°	263 ± 2	518 ± 3	0.1721 ± 0.006	0.22 ± 0.004	751 ± 7
1.6	0°	273 ± 3	527 ± 4	0.1745 ± 0.005	0.23 ± 0.001	765 ± 2
	45°	263 ± 8	523 ± 16	0.1765 ± 0.025	0.22 ± 0.005	742 ± 8
	90°	266 ± 1	502 ± 8	0.1751 ± 0.007	0.22 ± 0.001	722 ± 8
2	0°	308 ± 3	546 ± 10	0.1796 ± 0.007	0.22 ± 0.027	753 ± 7
	45°	262 ± 4	537 ± 5	0.1823 ± 0.019	0.23 ± 0.001	718 ± 5
	90°	271 ± 5	499 ± 6	0.1803 ± 0.006	0.23 ± 0.010	730 ± 8
ASTM B 209M-07 (0.5-1.6 mm)	-	Min. 245	Min. 400	0.15	0.17~0.22	676~690

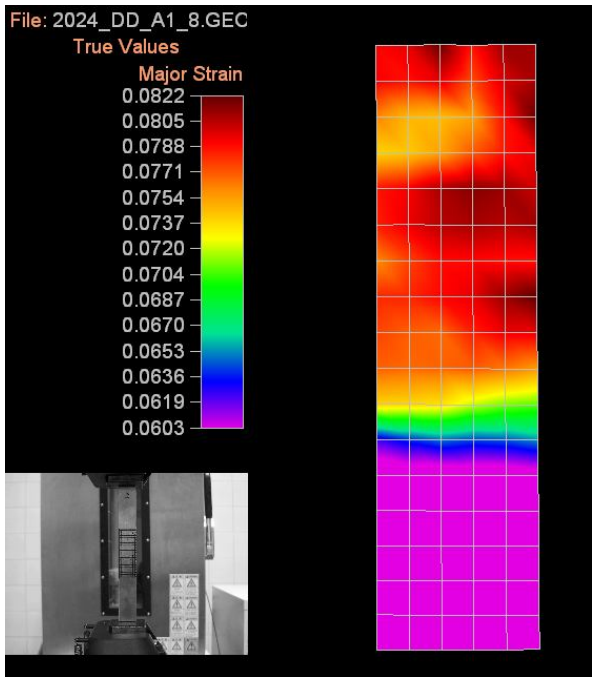


Şekil 4.3. Çeşitli kalınlıktaki Al 2024-T4 sacların gerçek gerilme-BŞD diyagramları

4.2.2. Anizotropi ölçümü

Anizotropi katsayılarını belirlemek için grid analizi ve profil projektörü kullanılarak, Şekil 3.4.'te görülen anizotropi numunesinin orta kısmındaki 50 mm'lik ölçü boyunca % 10 uzama sonucunda gridlerde meydana gelen ε_l *ve* ε_w gerçek BŞD'leri belirlenmiştir. Hacim sabitliği ilkesi ile ε_t değerleri hesaplanarak $r = \varepsilon_w / \varepsilon_t$ ifadesinden anizotropi katsayıları belirlenmiştir.

Grid analizi kullanılarak uzatılmış bir numuneden elde edilen örnek bir BŞD dağılımı Şekil 4.4.'te görülmektedir. Yapılan tüm deneylerde, şekilde görüldüğü gibi üniform bir BŞD dağılımı elde edilmiştir. Çeşitli % uzamalardaki anizotropi değerleri Çizelge 4.3.'te verilmiştir. Görüldüğü gibi farklı uzama değerlerinde anizotropi katsayılarının yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Tipik bir anizotropi numunesindeki üniform BŞD dağılımı

Grid analizi ve profil projektörüyle 1 mm sac kalınlığı için elde edilen anizotropi değerleri Çizelge 4.4.'te verilmiştir. Her iki yöntemle yapılan ölçümler birbirine oldukça yakın olduğundan, diğer kalınlıklar için anizotropi değerleri grid analizi yöntemiyle belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Çeşitli % uzamalardaki anizotropi değerleri (1 mm kalınlık için) $r = \varepsilon_w / \varepsilon_t$

Doğrultu	Tekrar	% 5	% 6	% 7	% 8	% 9	% 10	Ortalama
0°	1.	0.73	0.75	0.75	0.74	0.70	0.74	0.74
	2.	0.62	0.66	0.63	0.65	0.63	0.69	0.67
	3.	0.71	0.70	0.74	0.78	0.77	0.77	0.76
45°	1.	0.92	0.93	0.96	0.91	0.92	0.91	0.92
	2.	0.88	0.96	0.93	0.95	0.98	0.95	0.94
	3.	0.95	0.93	0.95	0.97	0.98	0.97	0.96
90°	1.	0.85	0.87	0.84	0.86	0.81	0.80	0.84
	2.	0.84	0.86	0.83	0.81	0.81	0.81	0.83
	3.	0.72	0.75	0.77	0.77	0.81	0.82	0.78

Çizelge 4.4. Profil projektörü ve grid analiziyle elde edilen anizotropi değerleri (% 10 uzama için)

		Profil projektörü				Grid analizi			
Doğrultu	Tekrar	r		r_{ort}	Δr	r		r_{ort}	Δr
0°	1.	0.74	0.71	0.90	-0.18	0.76	0.71	0.91	-0.22
	2.	0.67				0.68			
	3.	0.76				0.71			
45°	1.	0.92	0.94			0.98	0.99		
	2.	0.94				1.02			
	3.	0.96				0.97			
90°	1.	0.84	0.82			0.79	0.82		
	2.	0.83				0.82			
	3.	0.78				0.85			

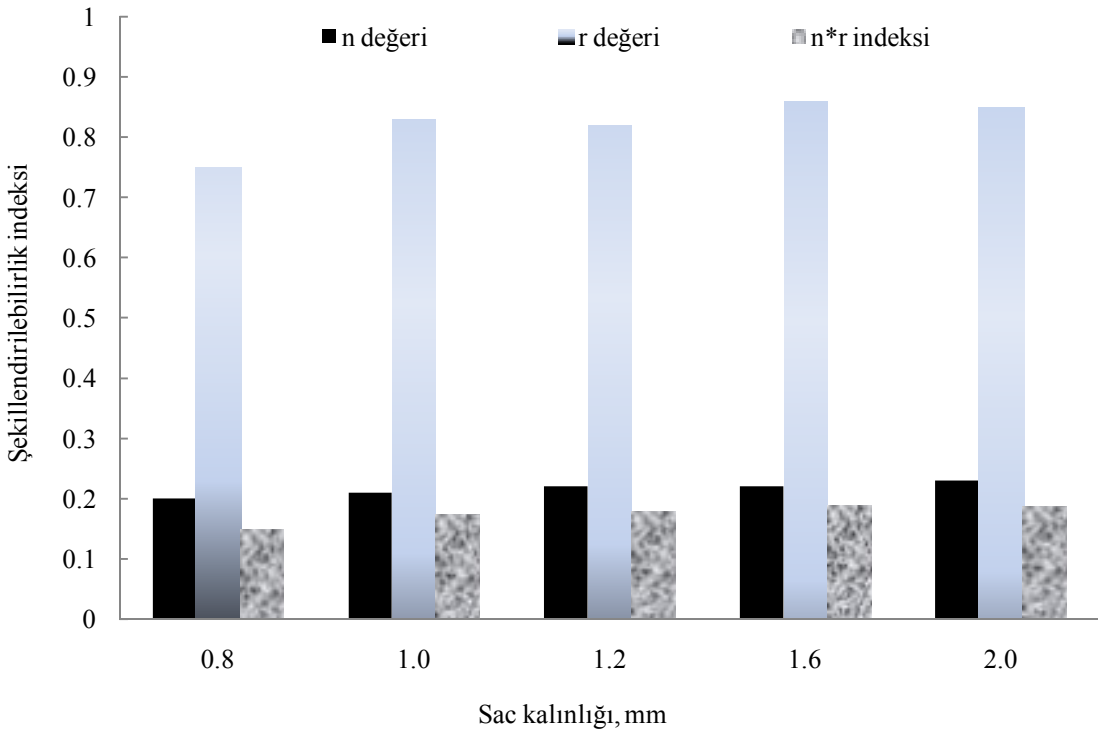
0.8, 1 ve 2 mm sac kalınlıkları için elde edilen normal ve düzlemsel anizotropi değerleri Çizelge 4.5.'te verilmiştir. Hursman (1978) yaptığı çalışmada Al 2024 için Δr değerini 0.8 ve 1.27 mm sac kalınlıkları için sırasıyla -0.08 ve -0.11 olarak elde etmiştir. Bu nedenle elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğu söylenebilir. 1 mm için Δr değeri diğerlerinden biraz uzak olsa da, tüm değerler dikkate alındığında, Δr değeri kulaklanma etkisi oluşturmayacak düzeyde kabul edilebilir. Yazarın da aralarında bulunduğu Türköz ve ark. (2011) çalışmasında, Al 2024-T4 malzemesinin kulaklanma davranışını incelemek için derin çekme prosesi ile üretilen kaplarda önemli olabilecek bir kulaklanma etkisine rastlanmamıştır. Ayrıca bu çalışmada yapılan derin çekme durum çalışmasında da belirgin bir kulaklanma etkisi görülmemiştir. Dolayısıyla malzemeler düzlemsel izotropik kabul edilebilir. Ancak çeşitli kalınlığa sahip malzemelerin hasar mekanizmalarının farklı olabileceği düşünülerek, üç doğrultuda da Nakajima deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 4.5. Çeşitli kalınlıklar için anizotropi değerleri $r = \varepsilon_w / \varepsilon_t$

Sac kalınlığı	Doğrultu	Tekrar	*r*		r_{ort}	Δr
0.8 mm	0°	1.	0.72	0.79	0.75	-0.14
		2.	0.81			
		3.	0.85			
	45°	1.	0.84	0.82		
		2.	0.79			
		3.	0.82			
	90°	1.	0.51	0.57		
		2.	0.56			
		3.	0.62			
1 mm	0°	1.	0.76	0.71	0.91	-0.22
		2.	0.68			
		3.	0.71			
	45°	1.	0.98	0.99		
		2.	1.02			
		3.	0.97			
	90°	1.	0.79	0.82		
		2.	0.82			
		3.	0.85			
2 mm	0°	1.	0.75	0.75	0.83	-0.15
		2.	0.76			
		3.	0.75			
	45°	1.	0.79	0.90		
		2.	0.96			
		3.	0.95			
	90°	1.	0.71	0.75		
		2.	0.72			
		3.	0.83			
Hursman (1978) 0.8 mm için						-0.11

4.2.3. Şekillendirilebilirliğin mekanik özelliklerle değerlendirilmesi

Stachowicz (1986) alaşımlı alüminyumların şekillendirilebilirliğini kabaca tahmin etmek için *n*r* indeksini önermiştir. Malzemenin *n*r* indeksi ne kadar büyük olursa şekillendirilebilirliği de o kadar iyidir. Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi sac kalınlığı arttıkça *n*r* indeksi dolayısıyla şekillendirilebilirlik de artmaktadır. Ayrıca teorik olarak *n* değerinin $ŞSE_0$'daki değere eşit olması gerekir (Hosford ve Caddell, 1993). Şekilden de görüldüğü gibi sac kalınlığının artışıyla *n* değeri az da olsa artış gösterdiği için teorik olarak sac kalınlığı arttıkça ŞSE seviyesinin de artacağı söylenebilir.

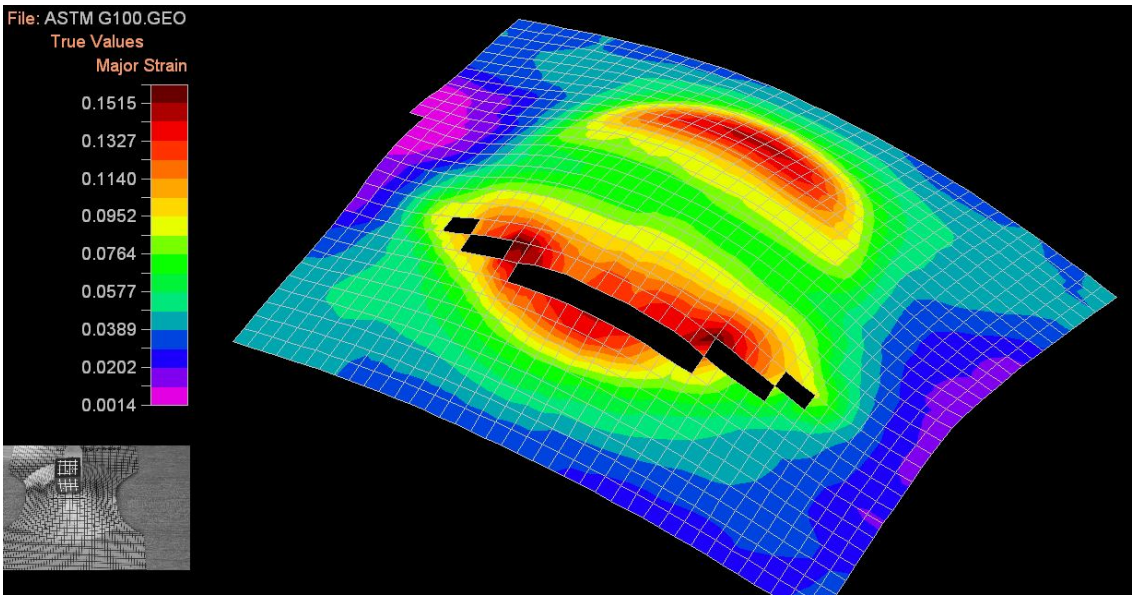


Şekil 4.5. Çeşitli kalınlıktaki Al 2024-T4 saclar için şekillendirilebilirlik indeksi

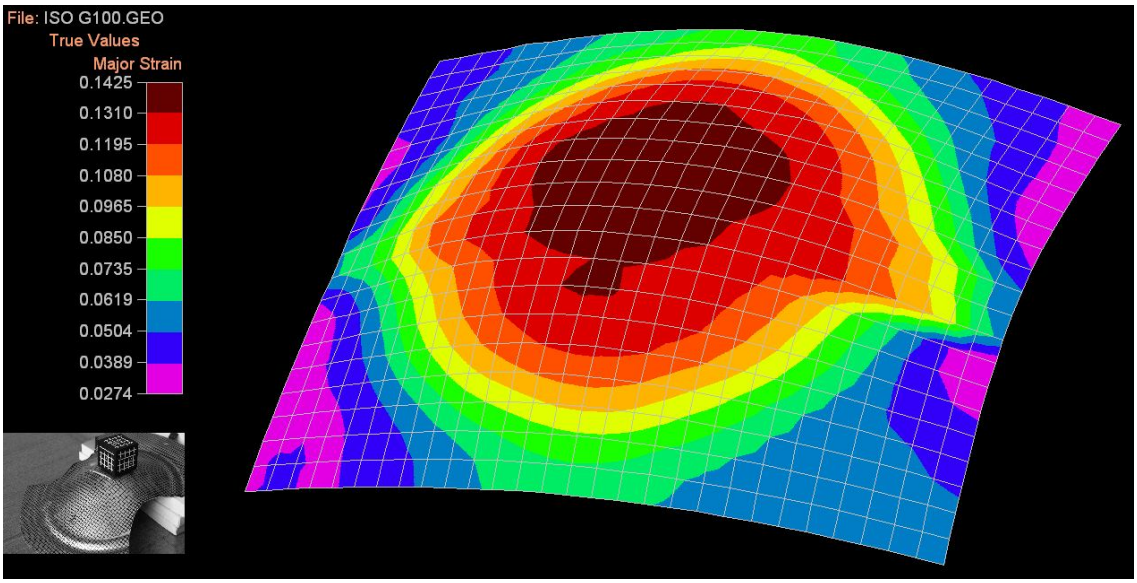
4.3. Standartların Karşılaştırılması

4.3.1. Nakajima deneyleri ve tekrarlanabilirliği

ASTM standardına göre deneyler kuru şartta yapıldığı için, stampa ile sacın temasta olduğu bölgede sürtünmeden dolayı yırtık hasarı gecikmiş ve temasın olmadığı sürtünmesiz bölgede meydana gelmiştir. Dolayısıyla yırtık kubbe tepe noktasından oldukça uzakta oluşarak ciddi derecede simetrik boyunlaşma meydana gelmiş ve BŞD'ler üniform olmayıp bölgeselleşme eğilimi göstermiştir (Şekil 4.6a.). Bu numunelerin yırtık ve tepeye göre yırtığa simetrik bölgesinden elde edilen gerçek sınır BŞD'ler Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Yırtık ve boyunlaşma bölgelerindeki sınır BŞD'ler arasında majör ve minör BŞD'ler için sırasıyla 0.015 ve 0.0062 gibi önemli olabilecek farklar vardır. Bu nedenle ASTM standardıyla kesin bir sınır BŞD değerinin belirlenmesi oldukça zordur.



a)



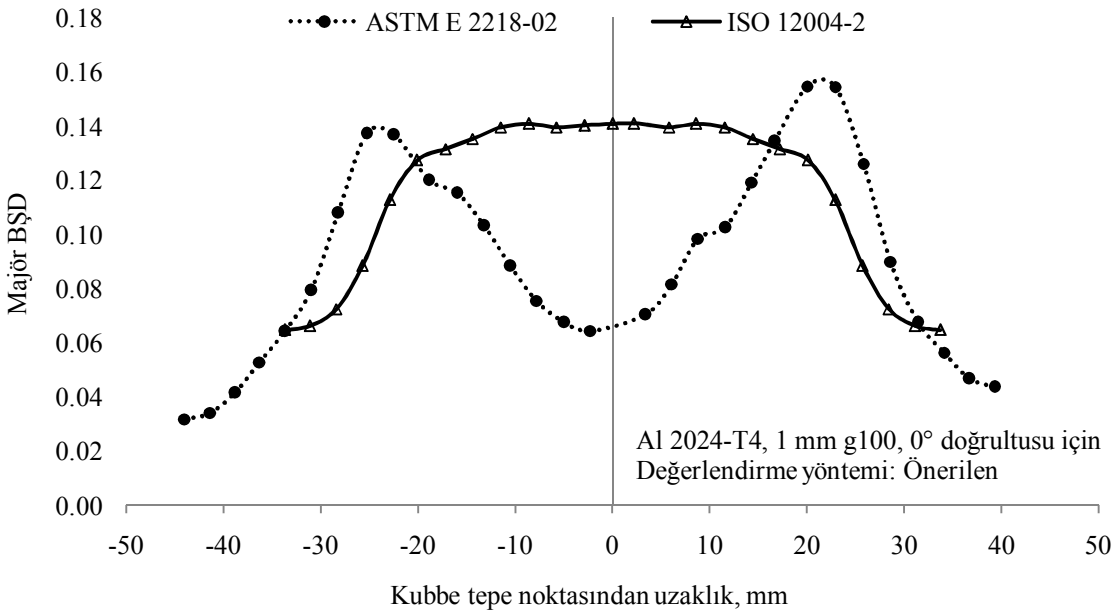
b)

Şekil 4.6. a) ASTM E 2218-02 ve b) ISO 12004-2 standartlarından elde edilen tipik BŞD dağılımı

Çizelge 4.6. Yırtık ve kubbe tepesine göre simetrik bölgeden elde edilen gerçek sınır BŞD'ler

Numune	Yırtık bölgesi		Simetrik boyunlaşma bölgesi		Fark	
	Sınır majör BŞD	Sınır minör BŞD	Sınır majör BŞD	Sınır minör BŞD	Sınır majör BŞD	Sınır minör BŞD
2024_t1_g100_0°_1	0.1691	0.0093	0.1521	0.0017	0.0170	0.0076
2024_t1_g100_0°_2	0.1658	0.0075	0.1524	0.0024	0.0135	0.0051
2024_t1_g100_0°_3	0.1732	0.0062	0.1589	0.0002	0.0143	0.0060
Ortalama	0.1694	0.0077	0.1545	0.0015	**0.0150**	**0.0062**

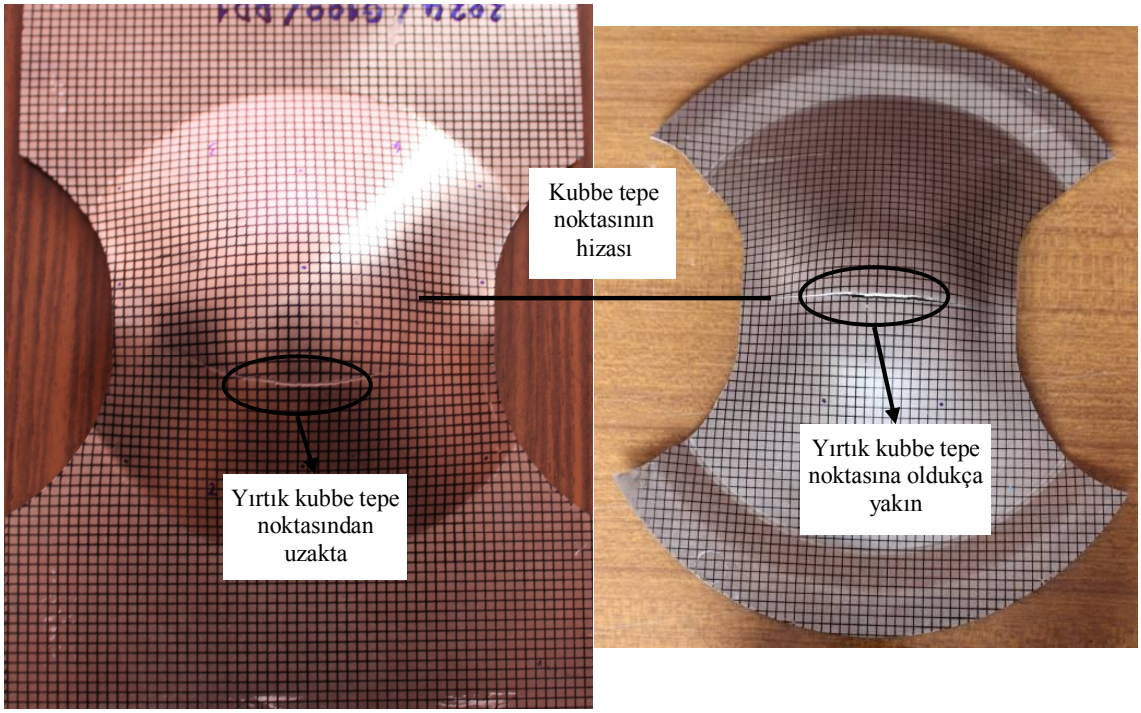
ISO standardına göre yapılan deneylerde ise yağlayıcı olarak oldukça düşük sürtünme katsayısına sahip parafin kullanıldığından, kubbe tepe noktasına göre simetrik boyunlaşma ciddi derecede azalmıştır ve BŞD'ler daha üniform olmuştur (Şekil 4.6b.). Tipik bir numunenin kubbe tepe noktasından geçen ve yırtığa dik olan kritik orta kesiti boyunca Şekil 4.7.'de görülen BŞD dağılımından da açıkça görüldüğü gibi, sınır BŞD için kesin bir değer belirlemek oldukça kolaylaşmıştır.



Şekil 4.7. ASTM E 2218-02 ve ISO 12004-2 standartlarından elde edilen majör BŞD dağılımları

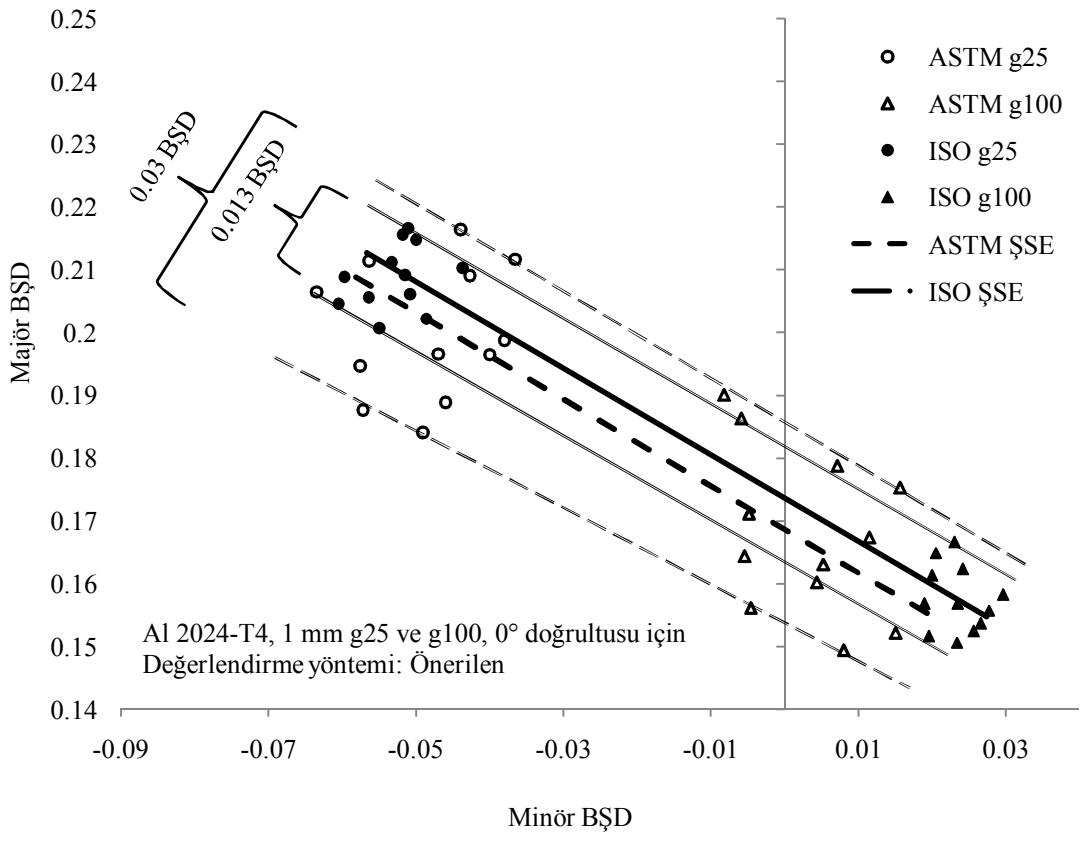
Şekil 4.8a.'da görüldüğü gibi, ASTM standardına göre yapılan deneylerin birçoğunda yırtığın kubbe tepe noktasına uzaklığının 20~25 mm olduğu görülmüştür. ISO standardına göre bu değerler kabul edilemez. ISO standardına göre şekillendirilen tüm numunelerde, yırtığın kubbe tepe noktasına göre konumu, Şekil 4.8b.'de görüldüğü gibi, standartta belirtilen sınır değer olan stampa çapının % 15'ini (yani 15 mm'yi), hatta birçok numunede 4~5 mm değerini geçmemiştir.

Standartları tekrarlanabilirlik açısından değerlendirmek amacıyla g25 ve g100 numuneleri için çok tekrarlı deneyler yapılmış ve sonuçları Şekil 4.9.'da verilmiştir. g25 numunesi için ASTM standardına göre elde edilen veriler 0.03 BŞD aralığında değişip standart sapması 0.0095 BŞD olurken, bu değerler ISO standardında 0.013 BŞD ve 0.0065 BŞD olarak elde edilmiştir. g100 numunesi için ise bu değerler 0.023, 0.0085, 0.012 ve 0.006 BŞD olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak ISO standardının tekrarlanabilirliğinin çok daha iyi olduğu görülmüştür.



a) b)

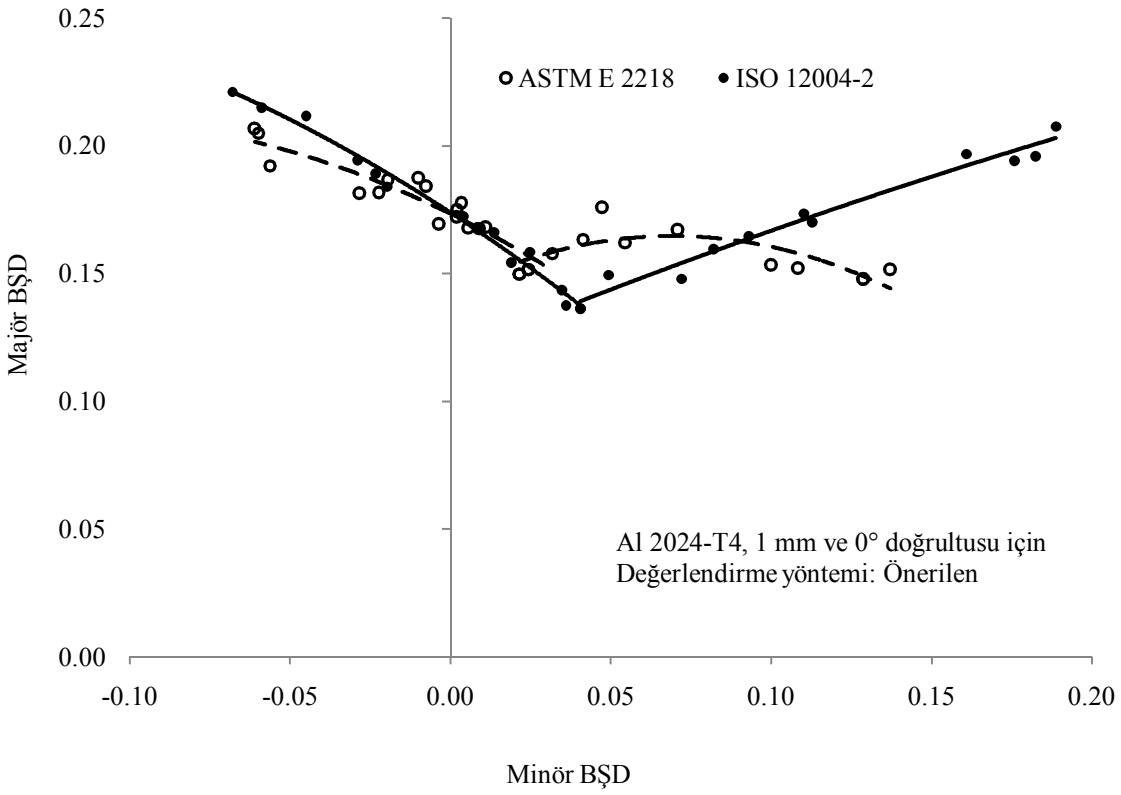
Şekil 4.8. a) ASTM E 2218-02 ve b) ISO 12004-2 standartlarına göre şekillendirilen Nakajima numunelerinde yırtığın konumu (Al 2024-T4 g100 için)



Şekil 4.9. ASTM E 2218-02 ve ISO 12004-2'ye göre tekrarlanabilirliğin karşılaştırılması

4.3.2. Şekillendirme sınır eğrileri

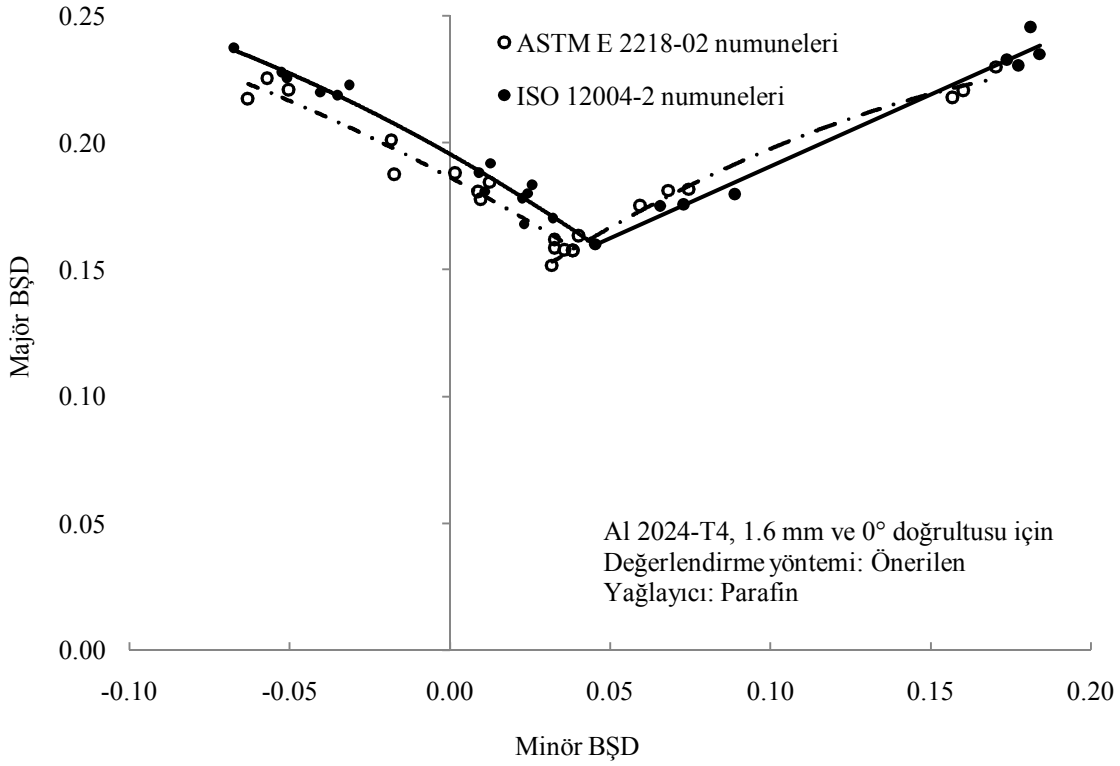
ASTM-ÖNERİLEN ve ISO-ÖNERİLEN yöntemleri kullanılarak elde edilen ŞSE'ler Şekil 4.10.'da verilmiştir. Tek eksenli çekme ve eşit iki eksenli gerdirme bölgeleri için ISO standardına göre elde edilen ŞSE seviyesi, ASTM'ye göre elde edilenden daha yüksektir. Eğrilerin en düşük seviyelerinde ise ASTM'ye göre elde edilen majör BŞD'ler daha büyük olmasına rağmen, sürtünme etkisiyle minör BŞD'ler düşük olmaktadır. Böylece iki eksenli gerilme durumunun mümkün olabilecek tüm kombinasyonları elde edilememektedir. Yani elde edilen eğri tüm şekillendirme işlemlerini temsil etmeyecektir. Buna karşın ISO standardında tüm bu olumsuzluklar giderilmiştir.



Şekil 4.10. ASTM E 2218-02 ve ISO 12004-2 standartlarına göre elde edilen ŞSE'ler

4.3.3. Numune geometrisinin etkisi

Standartların kendilerine has tüm özellikleriyle karşılaştırılmasından sonra, sadece numune geometrisinin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 1.6 mm sac kalınlığı için standartlarda belirtilen numunelerin parafin yağlayıcı kullanılarak şekillendirilmesiyle elde edilen ŞSE'ler Şekil 4.11.'de verilmiştir. Eğrinin sağ tarafında önemli bir fark gözlenmezken, sol tarafında ASTM geometrisi kullanılarak elde edilen eğri ISO'ya göre 0.01 BŞD gibi önemli olabilecek kadar düşük seviyededir. ISO'da belirtilen "a" ölçüsünün (Şekil 3.8.) ASTM'dekine göre daha büyük olması ve numune dış tarafının dairesel olması, BŞD'lerin daha üniform olmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla ISO standardına göre yapılan deneylerde daha yüksek ve daha az saçınık sınır BŞD'ler elde edilmiştir. Bu nedenle numune geometrisinin ISO standardında belirtildiği gibi kullanılmasının doğru olacağı sonucuna varılmıştır.

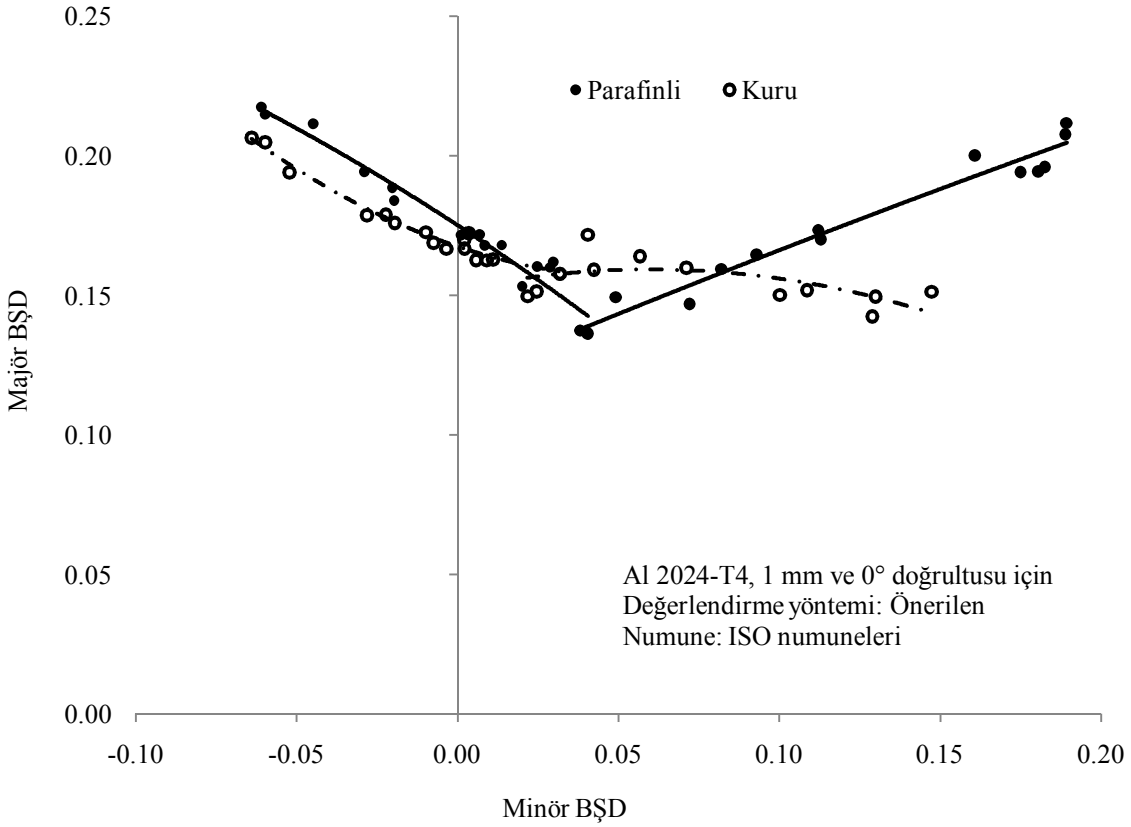


Şekil 4.11. ASTM E 2218-02 ve ISO 12004-2 standartlarındaki numune geometrilerinin etkisi

4.3.4. Yağlayıcının etkisi

Sadece yağlama durumunun etkisini incelemek amacıyla, 1 mm sac kalınlığı için ISO standardında belirtilen geometriye sahip numunelerin kuru ve parafinli olarak şekillendirilmesi sonucunda elde edilen ŞSE'ler karşılaştırmalı olarak Şekil 4.12.'de verilmiştir. Burada iki standardın direkt olarak karşılaştırılması durumuyla oldukça benzer bir durum ortaya çıkmıştır. Şekil 4.10. ile Şekil 4.12.'deki kesikli çizgi ile verilen grafikler arasındaki fark, numune geometrisinin etkisi kadar olacaktır. Sonuç olarak yağlama durumunun ŞSE üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Tüm bu karşılaştırmalardan sonra, Nakajima deneylerinin ISO standardında belirtildiği gibi yapılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.



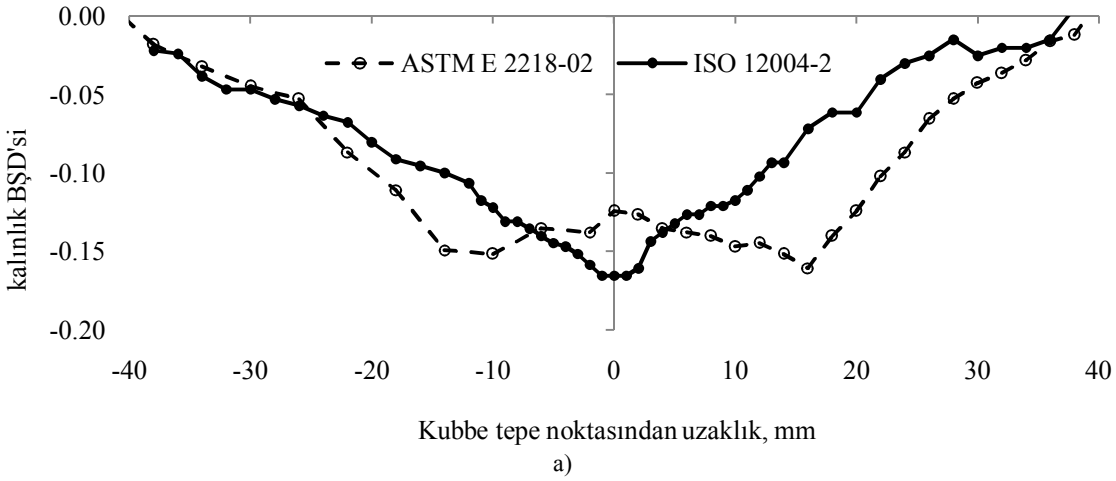
Şekil 4.12. Yağlama durumunun ŞSE üzerindeki etkisi

4.3.5. Hasar mekanizmaları

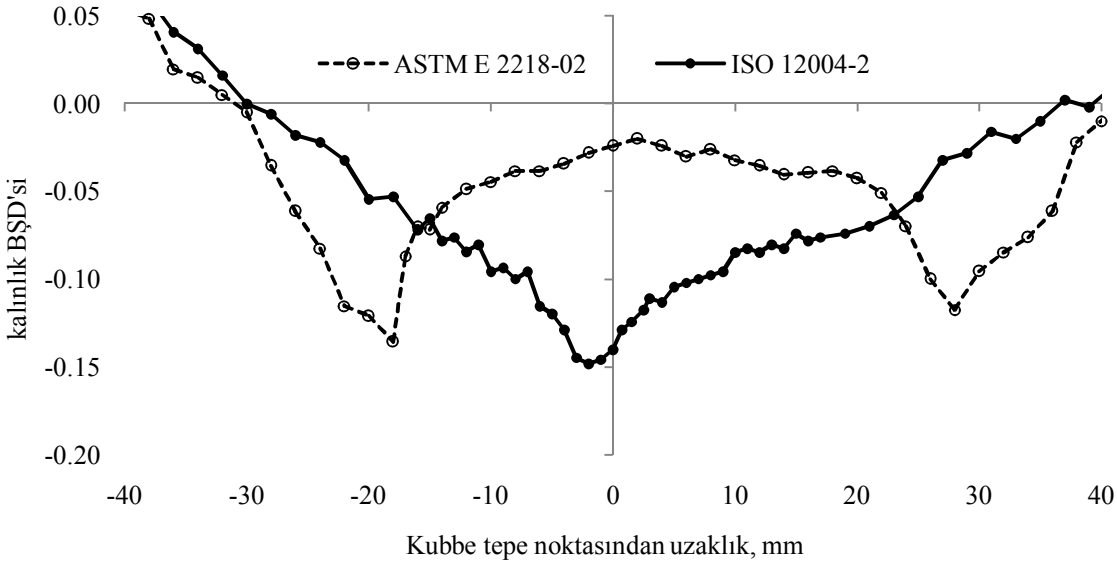
Her iki standarda göre şekillendirilen g25, g100 ve g175 numunelerinin kubbe tepe noktasından geçen ve yırtığa dik olan kritik orta kesiti boyunca profil projektörüyle belirlenen gerçek kalınlık BŞD dağılımı Şekil 4.13.'te verilmiştir. ISO standartlarına göre şekillendirilen numunelerden elde edilen kalınlık BŞD'si ASTM 'ye göre daha üniformdur. ASTM standardına göre şekillendirilen numunelerde kubbe tepe noktasına göre simetrik boyunlaşma açık bir şekilde görülmektedir. ASTM g100 numunesi için minör BŞD'nin artması sürtünmenin etkisiyle engellenerek daha büyük majör BŞD elde edilirken, ISO'da minör BŞD'deki artış majör BŞD'deki azalmayla dengelenmektedir. ISO'ya göre şekillendirilen g25 ve g175 numunelerinde ise hem minör hem de majör BŞD, ASTM'den elde edilene göre artış göstermektedir. Dolayısıyla ISO'da bu bölgelerde daha büyük kalınlık BŞD değerleri elde edilmektedir.

Gerçek kalınlık BŞD değerleri, hacim sabitliği ilkesiyle, sınır BŞD kombinasyonlarından da hesaplanabilir. Hesaplanan değerlerle ölçülen değerlerin uyumluluğu araştırıldığında 0.01~0.03 BŞD arasında farkların olduğu görülmüştür. Örneğin, ISO tek eksenli çekme bölgesinde bu değerler sırasıyla 0.1725 ve 0.1550 BŞD iken, düzlem BŞD bölgesinde 0.145 ve 0.135 BŞD olarak bulunmuştur.

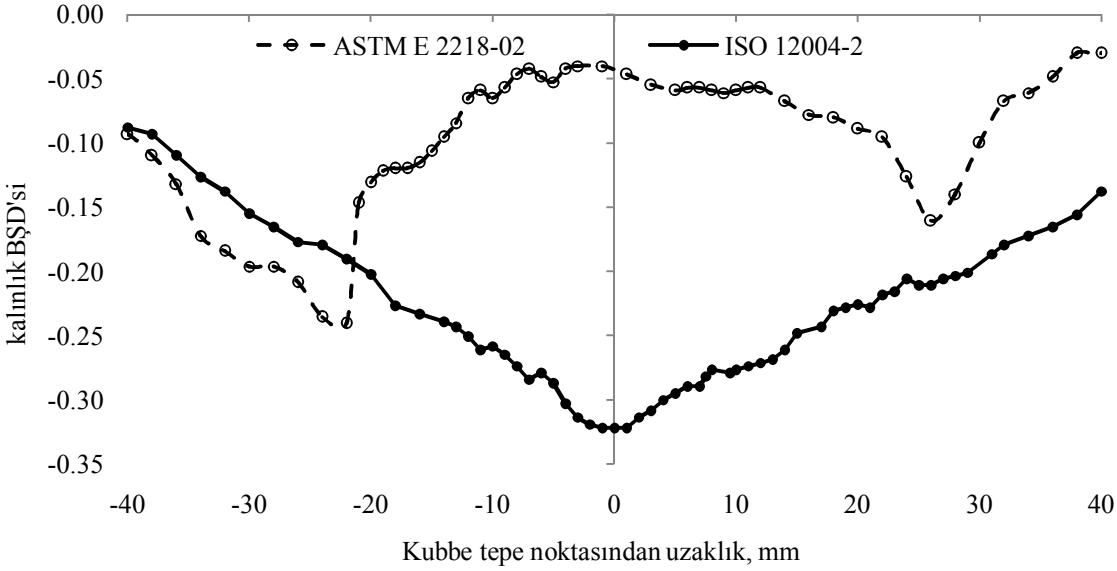
Boyunlaşma davranışlarını görsel olarak inceleyebilmek için numunelerin orta kesitinden alınan SEM görüntüleri Şekil 4.14.'te verilmiştir. Her iki standarda göre de tüm numunelerde yırtılmalar kayma gerilmelerinin etkisiyle kalınlık doğrultusu ile açı yaparak çapraz şekilde meydana gelmiştir. ASTM standardına göre şekillendirilen özellikle g25 ve g175 numunelerinde belirgin bölgesel boyunlaşma gözlenirken, ISO standardına göre şekillendirilen tüm numunelerde yayılmış boyunlaşma gözlenmiştir.



a)

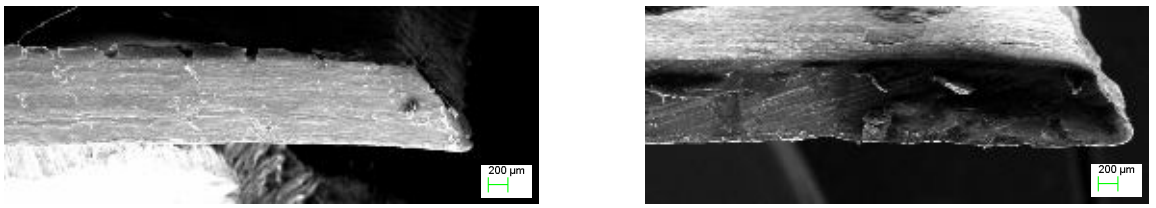


b)

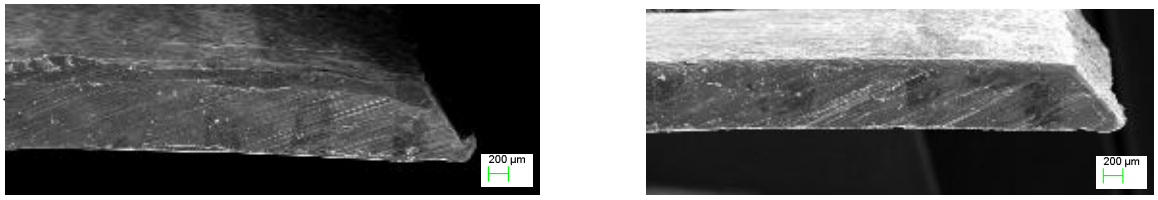


c)

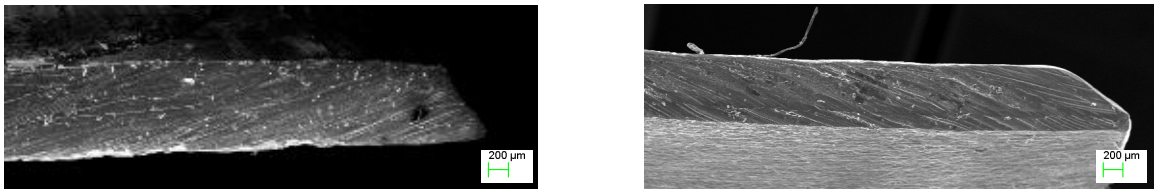
Şekil 4.13. ASTM ve ISO standartlarına göre şekillendirilen Al 2024-T4 1 mm a) g25, b) g100 ve c) g175 numuneleri için gerçek kalınlık BŞD dağılımları



a) ASTM g25 b) ISO g25



c) ASTM g100 d) ISO g100



e) ASTM g175 f) ISO g175

Şekil 4.14. ASTM ve ISO standartlarına göre şekillendirilen Al 2024-T4 malzemelerin boyunlaşma davranışları (1 mm ve 0° doğrultusu için)

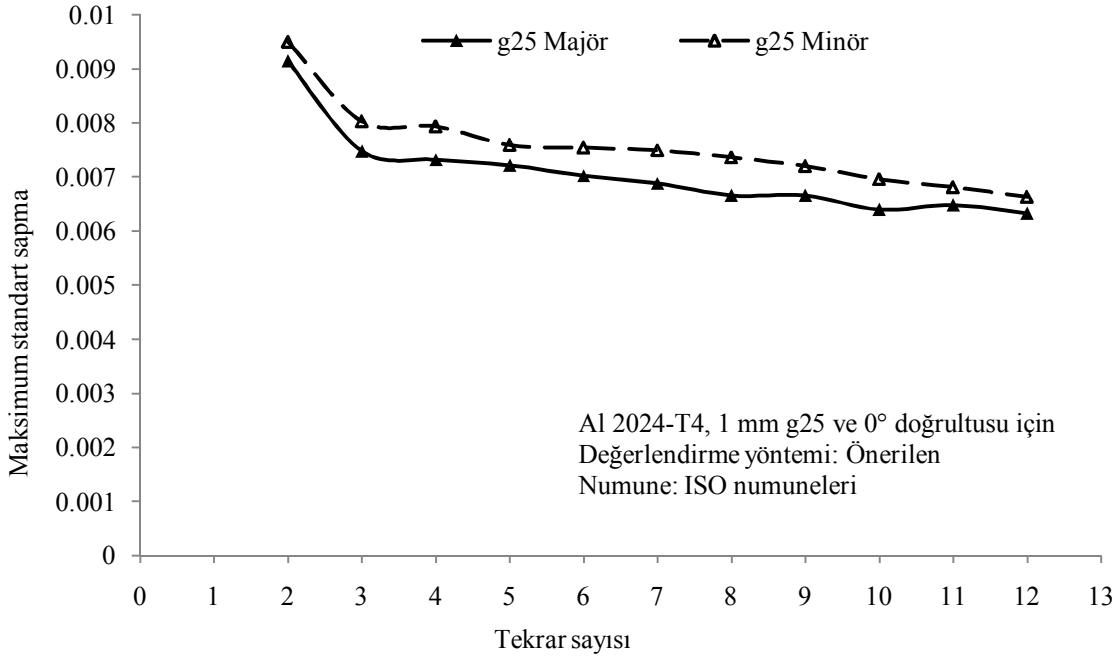
4.4. Deney Tekrar Sayısı ve Tekrarlanabilirlik

Al 2024-T4'ün gevrek yapısından dolayı ISO standardına göre şekillendirilen tüm Nakajima numunelerinde, Şekil 4.15.'te görüldüğü gibi, boyunlaşma başlangıcı yakalanamamış ve kubbe tepe noktasına oldukça yakın bir yerde yırtık oluşmuştur.

Sac kalınlığının ŞSE'ye etkisinin incelenmesi için yeterli hassasiyeti sağlayabilecek gerekli minimum deney tekrar sayısını belirlemek amacıyla, 1 mm kalınlığındaki g25 numuneleri için çok tekrarlı deneylerden elde edilen gerçek sınır BŞD değerlerinin 2, 3,……, 12'şerli tekrar grupları için elde edilen maksimum standart sapma değerleri Şekil 4.16.'da verilmiştir. Standart sapma olarak, örneğin 3'erli gruplar için mümkün olan 220 kombinasyondan elde edilen en büyük sapma değeri alınmıştır. Görüldüğü gibi özellikle 3. tekrardan sonra elde edilen maksimum standart sapma değerleri oldukça az değişiklik gösterdiğinden, deneyler minimum üç tekrarlı yapılmıştır.



Şekil 4.15. Al 2024-T4 Nakajima numunelerinde yırtık kubbe tepe noktasına oldukça yakın oluşuyor



Şekil 4.16. Majör ve minör BŞD değerleri için tekrar sayısına göre elde edilen maksimum standart sapma değerleri

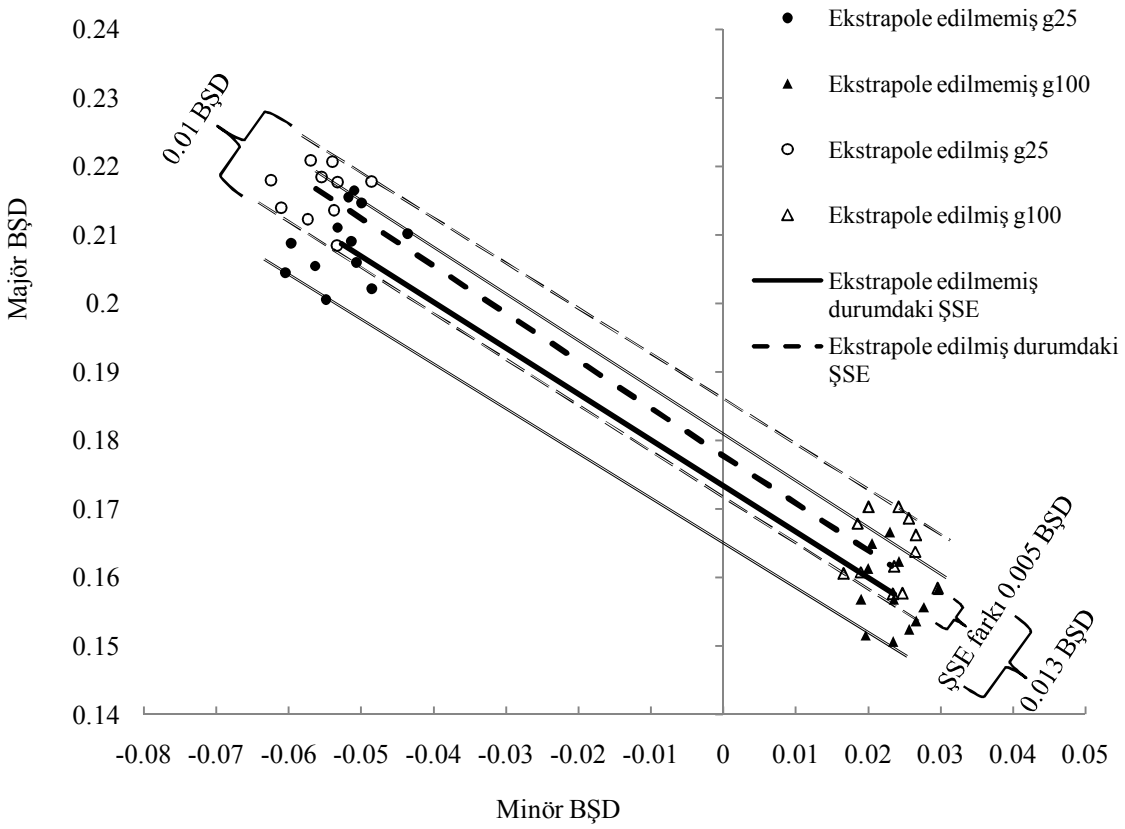
ISO 12004-2 ve ASTM E 2218-02 standartlarında, ŞSE'lerin oluşturulmasında toplam hassasiyetin 0.02, doğruluğun da ± 0.025 BŞD olması gerektiği belirtilmektedir. Güvenilir ŞSE elde edebilmek için gridleme işlemi ve ASAME ile ölçmenin güvenilirliğinin bilinmesi önemlidir. ASAME yazılımının doğruluğu firma tarafından 0.015 BŞD olarak verildiği için, üst üste hataların toplanması kuralına göre, şekil değiştirmemiş gridlerin tekrarlanabilirliği 0.02 mm'den az olmalıdır. Yazarın da aralarında bulunduğu Öztürk ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada, serigrafi yöntemiyle elde edilen gridlerin, % 95 güvenilirlikle, doğruluğu 0.01 mm, tekrarlanabilirliği de 0.006 mm olarak elde edilmiştir. ASAME yazılımının ölçme doğruluğu, boyutu bilinen şekil değiştirmemiş grid kalibrasyon şablonu ölçülerek majör için ortalama 0.0010 ± 0.0016 BŞD, minör için ise 0.0038 ± 0.0013 BŞD olarak elde edilmiştir. Böylece gridleme ve ASAME ile ölçme işlemlerinin toplam doğruluğu 0.011 BŞD ve hassasiyeti 0.0062 BŞD olarak bulunmuştur. Sonuç olarak ölçme işleminin yeterli olduğu söylenebilir.

4.5. Sınır BŞD yi Belirlemek İçin Önerilen Yöntem

Bu bölümde ISO-ÖNERİLEN (*hasarsız gridden hasarlıya ekstrapolasyon*) yönteminin tekrarlanabilirliği ve güvenilirliği verildikten sonra, yöntemin diğer malzemeler için geçerliliği ile ilgili sonuçlar verilmiştir.

4.5.1. Tekrarlanabilirliği

Sınır BŞD değerinin belirlenmesi için önerilen yöntemin tekrarlanabilirliğe etkisini görmek amacıyla, 1 mm kalınlıklı g25 ve g100 numuneleri için, çok tekrarlı deney numunelerine ekstrapolasyon işlemi uygulanmış ve uygulanmamış durumlarda elde edilen gerçek sınır BŞD'ler Şekil 4.17.'de verilmiştir. Ekstrapole edilmemiş durumda elde edilen veriler 0.013 BŞD aralığında değişip standart sapması 0.0065 BŞD olurken, ekstrapolasyon işlemi sonucunda bu değerler sırasıyla 0.010 ve 0.0040 BŞD değerlerine düşmüştür. Ayrıca ekstrapole edilmiş durumda elde edilen ŞSE, ekstrapole edilmemiş durumdakinden yaklaşık 0.005 BŞD daha yüksek seviyededir. Diğer genişlikler için de aynı durumun geçerli olduğu görülmüştür. Böylece sınır BŞD değerleri daha kesin ve doğru olarak elde edilmiştir.



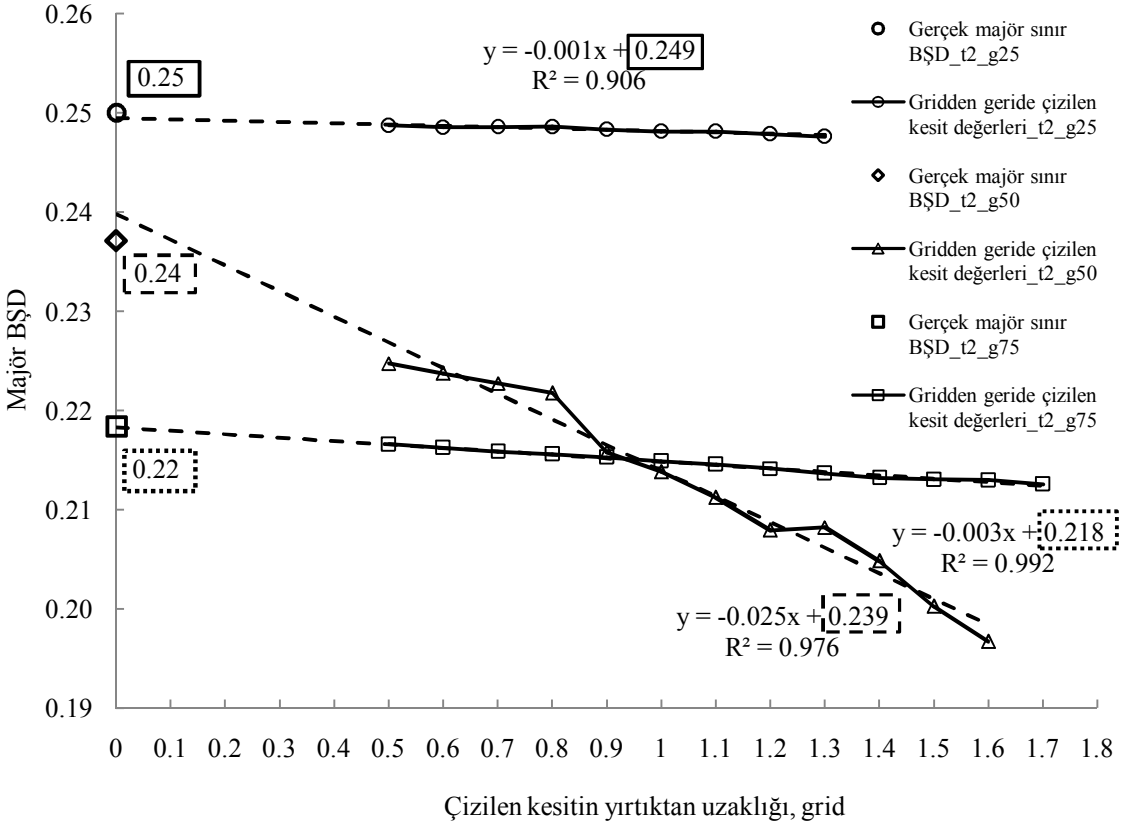
Şekil 4.17. Hasarsız gridden hasarlıya ekstrapolasyon işleminin tekrarlanabilirliğe etkisi

4.5.2. Güvenilirliği

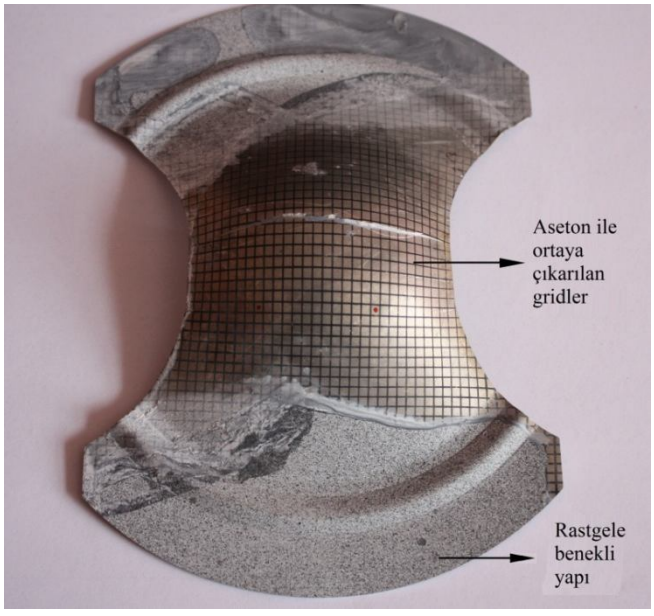
Ekstrapolasyon işleminin güvenilirliğini ortaya koymak amacıyla, grid çizgisinden yırtılan bazı numuneler için tahmin edilen sınır BŞD değerlerinin grid çizgisindeki ölçülen gerçek değerlerle karşılaştırılması Şekil 4.18.'de verilmiştir. Tahmin edilen değerlerle gerçek değerler birbirine oldukça yakındır. Çok tekrarlı deneyler sonucunda, gerçek BŞD değerleri maksimum % 3 hata ile tahmin edilmiştir.

Önerilen yöntemin güvenilir olabilmesi için elde edilen sınır BŞD'lerin ISO 12004-2 standardına göre belirlenenlerle (ISO-ISO) uyum içinde olması gerekir. Bu amaçla sınır BŞD'ler her iki yönteme göre de elde edilirken aynı numune kullanılmıştır. Böylece deney tekrarlarında oluşacak hatalar ortadan kaldırılarak sadece değerlendirme yönteminin etkisi incelenmiştir. Bunun için numunelerin yüzeyi ilk olarak serigrafi yöntemiyle gridlenmiş, sonra rastgele benekli yapılar oluşturularak gerçek zamanlı ölçme işlemi yapılmıştır. Numuneler gerçek zamanlı ölçme sistemiyle şekillendirilerek sınır BŞD'ler belirlendikten sonra, numune üzerindeki benekli yapılar

aseton ile kaldırılarak grid yapısı Şekil 4.19.'da görüldüğü gibi bozunmadan ortaya çıkarılmıştır. Böylece aynı numuneler bilgisayarlı grid analiziyle de ölçülerek önerilen yönteme göre de sınır BŞD değerleri elde edilmiştir.



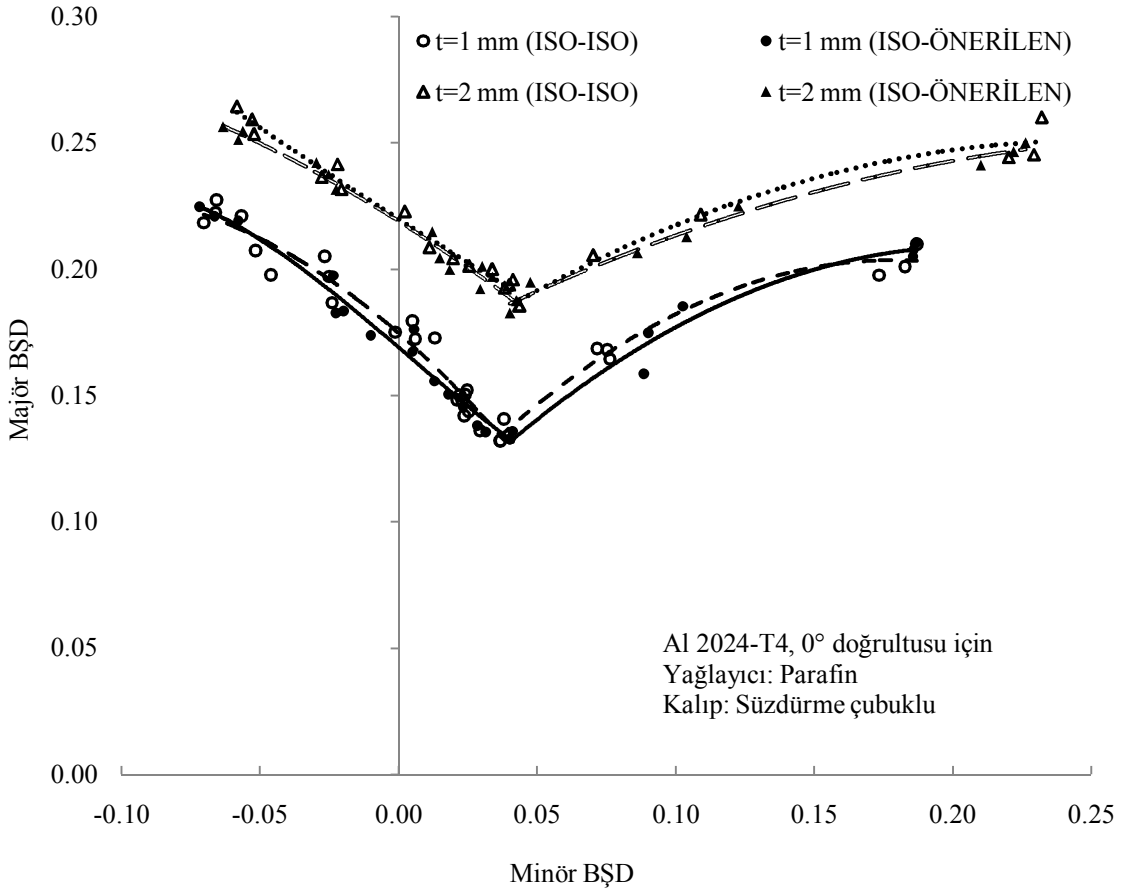
Şekil 4.18. Bazı numuneler için ekstrapolasyon işlemi (Al 2024-T4, t=2 mm için)



Şekil 4.19. Aseton ile rastgele benekli yapının grid yapısı bozunmadan çıkarıldığı tipik bir numune

ISO-ISO ve ISO-ÖNERİLEN yöntemleri kullanılarak 1 ve 2 mm sac kalınlıkları için aynı numuneler üzerinden elde edilen ŞSE'ler Şekil 4.20.'de verilmiştir. Önerilen yönteme göre elde eğrilerin ISO 12004-2 standardına göre değerlendirmeyle elde edilenlerle oldukça uyumlu olması, önerilen yöntemin güvenilirliğini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

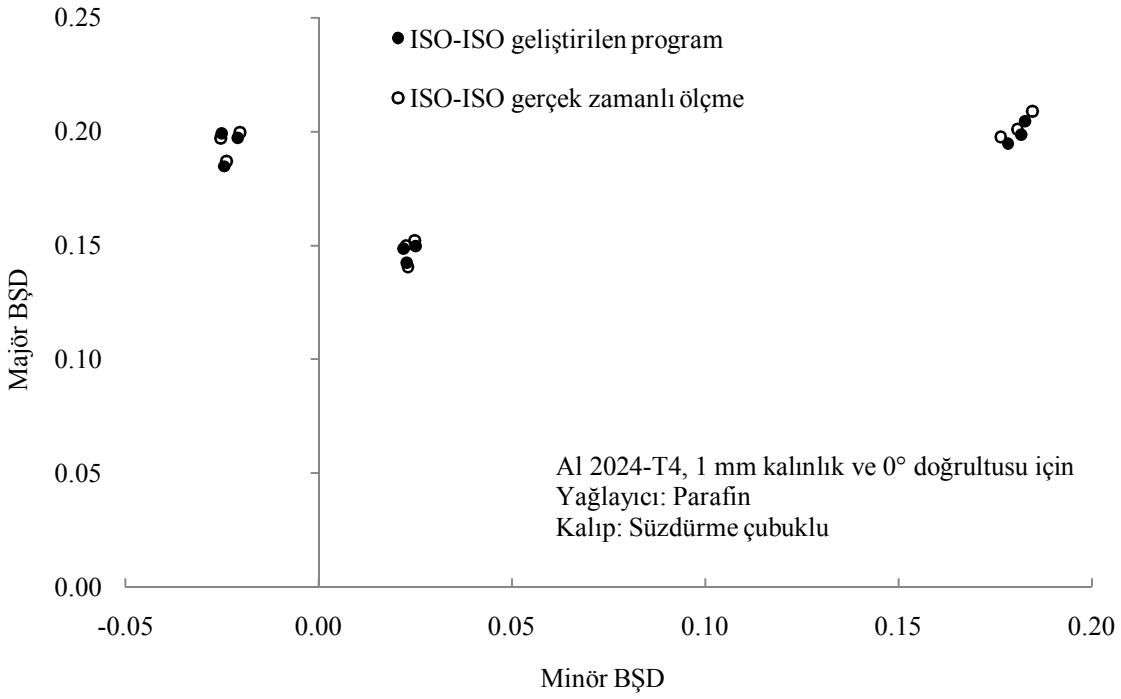
Her iki yöntem için ŞSE'lerin standart sapmaları sırasıyla $\sigma = 0.0042$ ve 0.0044 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar önerilen yöntemin sac kalınlığının ŞSE üzerindeki etkisini incelemek için doğruluk ve hassasiyet açısından yeterli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.20. Al 2024-T4 malzemelerin ISO-ISO ve ISO-ÖNERİLEN yöntemlerine göre elde edilen ŞSE'leri

4.5.3. Diğer malzemeler için geçerliliği

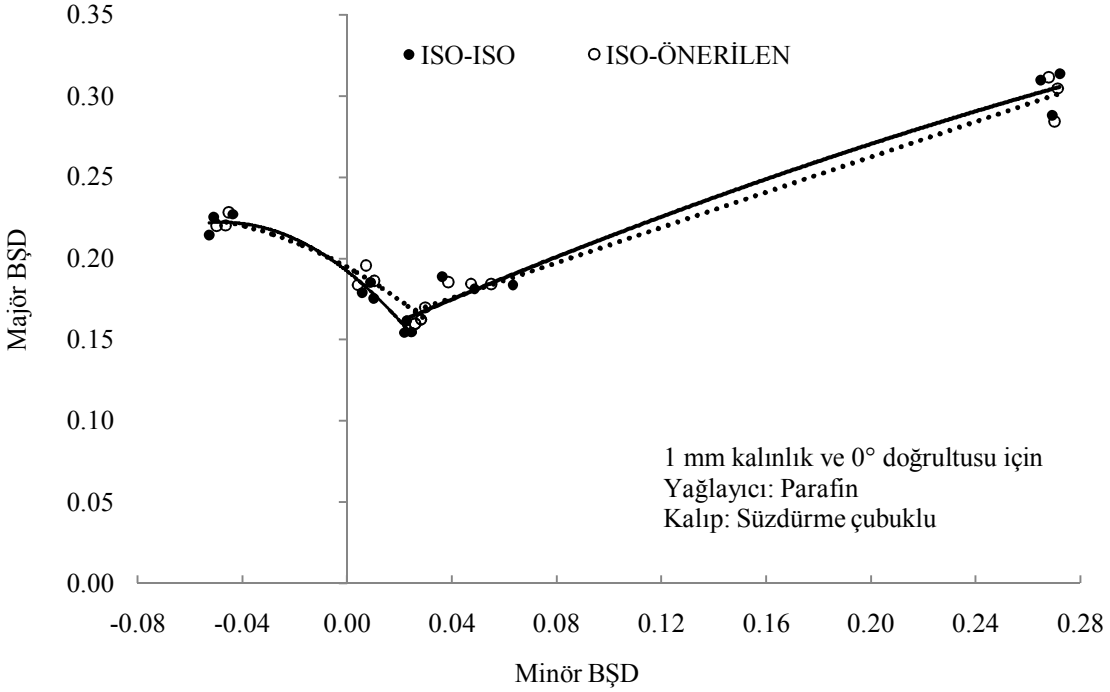
Önerilen yöntemin farklı karakteristiğe sahip malzemeler için de geçerliliğinin incelemesi amacıyla önerilen yönteme (ISO-ÖNERİLEN) göre çizilen ŞSE'ler ISO-ISO ile karşılaştırılmıştır. Burada ISO-ISO yöntemindeki sınır BŞD'ler, gerçek zamanlı ölçme sistemi yerine, grid analiz yöntemiyle belirlenmiştir. Sınır BŞD'ler, grid analiziyle belirlenen BŞD dağılımını üzerinden ISO standardında belirtildiği gibi geçirilen kesitlerdeki majör ve minör BŞD değerlerinin, ISO standardındaki hesaplama algoritmasını yapabilen yazar tarafından geliştirilen programda kullanılmasıyla belirlenmiştir. Programın güvenilirliğini ortaya koymak için, aynı numunelerden gerçek zamanlı ölçme sistemi ve geliştirilen programla sınır BŞD'ler elde edilmiştir. Şekil 4.21.'de görüldüğü gibi değerler birbirine oldukça yakın olup, maksimum % 2 hata ile elde edilmiştir.



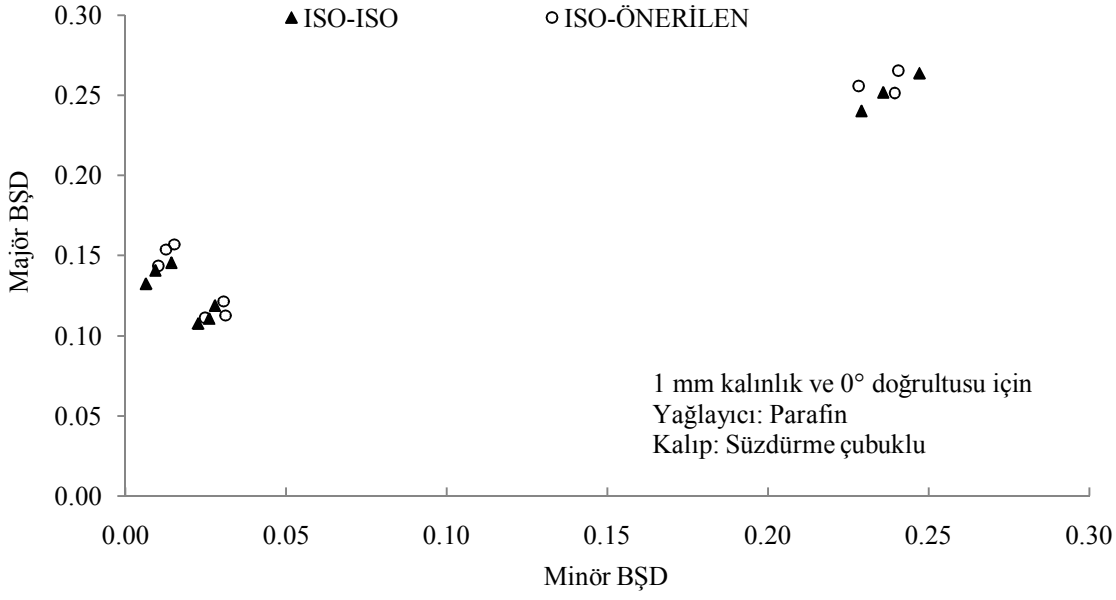
Şekil 4.21. Geliştirilen programın güvenilirliği

1 mm kalınlığındaki Al 5754-O, Al 7075 ve Al 2024-O malzemeleri için ISO-ÖNERİLEN ve ISO-ISO yöntemlerine göre elde edilen ŞSE'ler sırasıyla Şekil 4.22. ilaŞekil 4.24.'te verilmiştir.

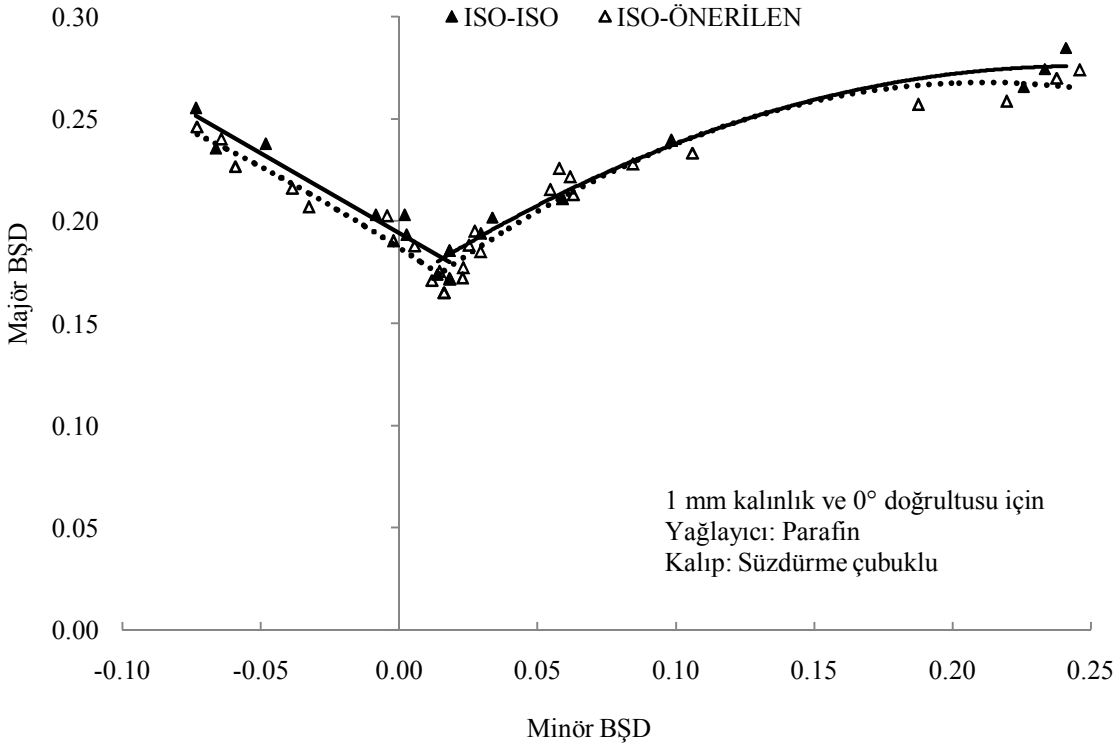
Her üç malzeme için de ISO-ÖNERİLEN yönteme göre elde edilen ŞSE'ler veya sınır BŞD'ler birbirleriyle oldukça uyumludur ve sonuç olarak önerilen yöntemin farklı karakteristiklere sahip malzemeler için de geçerliliği ve uygunluğu ortaya konulmuştur.



Şekil 4.22. Önerilen yöntemin Al 5754-O için geçerliliği



Şekil 4.23. Önerilen yöntemin Al 7075 için geçerliliği



Şekil 4.24. Önerilen yöntemin Al 2024-O için geçerliliği

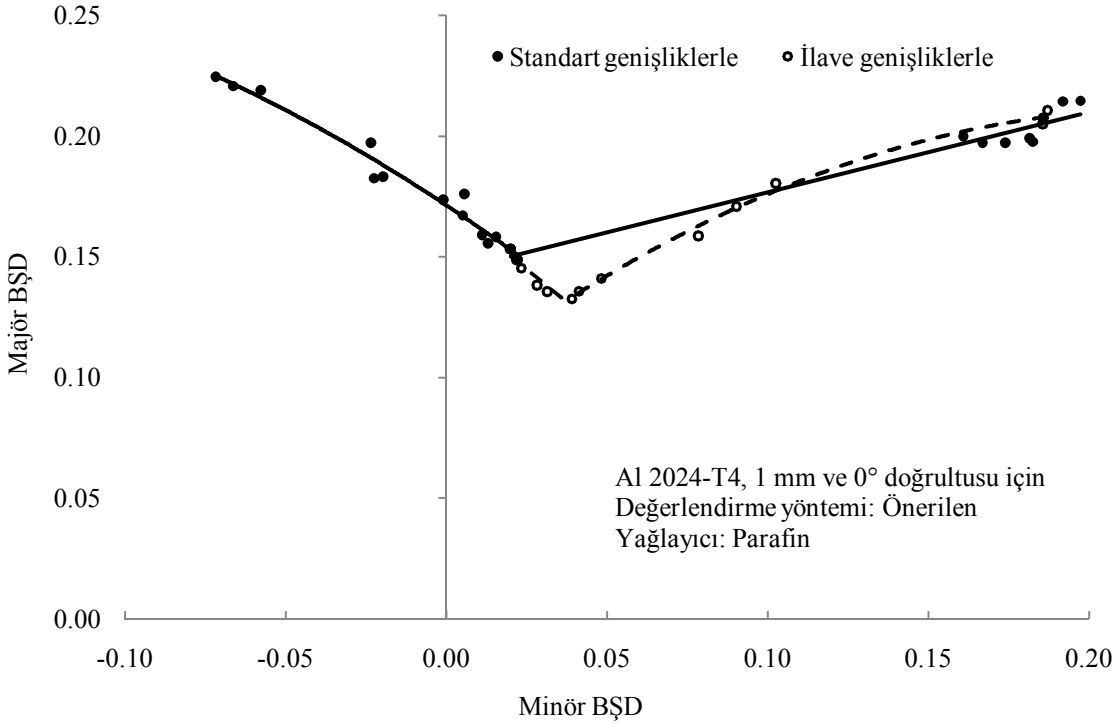
4.6. $ŞSE_0$ Değerinin İncelenmesi

4.6.1. İlave numune genişlikleri için deneylerin etkisi

Tipik bir ŞSE'de en düşük majör BŞD seviyesinin *y* ekseni üzerinde olması beklenirken, çizilen ŞSE'lerde sağa ötelendiği görülmüştür. Bu ötelenme yaklaşık 0.04 BŞD ile sadece Al 2024-T4'te değil, diğer malzemelerde de görülmüştür. Ötelenme, Al 5754-O, Al 7075 ve Al 2024-O malzemeleri için Şekil 4.22 ila Şekil 4.24.'te görüldüğü gibi 0.020~0.025 kadardır.

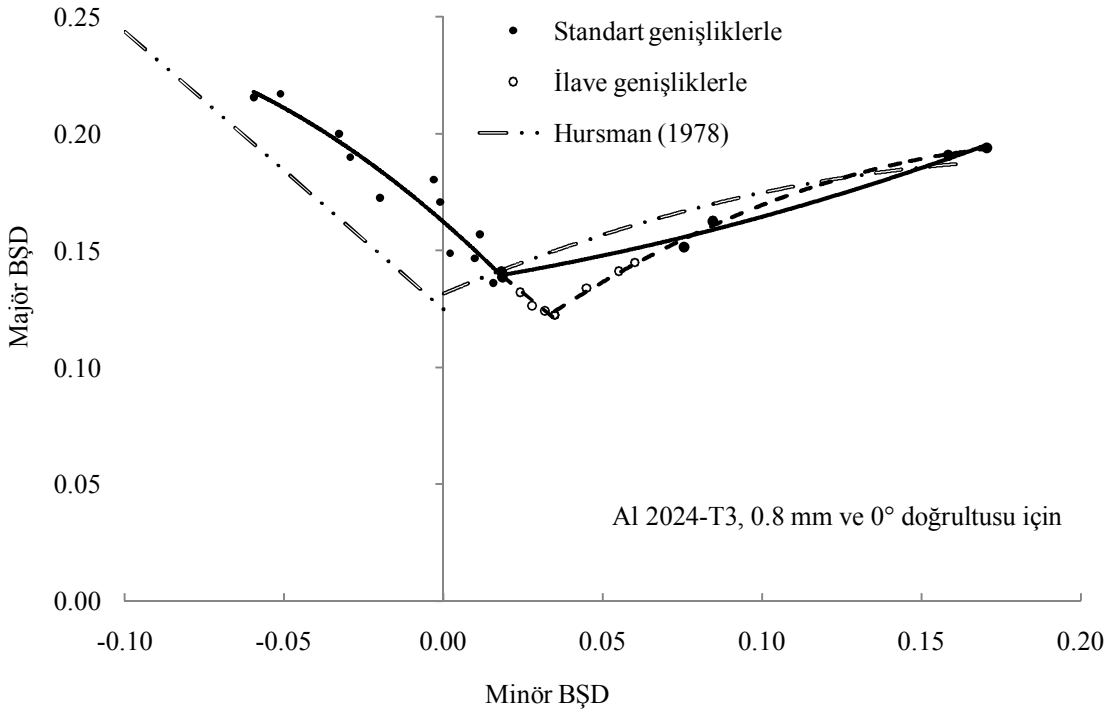
Al 2024-T4 için standart genişlikli numuneler kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen en düşük eğri seviyesi *y* ekseninden 0.02 BŞD ötelenmiş olarak elde edilmişti. Ancak en düşük eğri seviyesinin yerinin hassas olarak belirlenmesi amacıyla, ŞSE'lerin elde edilmesinde kullanılan 25 mm artımlı standart genişlikli numunelerin yanında bu bölgede g125 ile g143 genişlikleri arasında 2'şer mm artan genişliğe sahip standart dışı ilave genişlikler için de deneyler yapılmasında fayda olduğu düşünülmüştür. T4 temperindeki 1 mm sac kalınlığı için ilave genişlikler

kullanılarak elde edilen ŞSE, standart genişlikler için elde edilenle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.25.'te verilmiştir. Görüldüğü gibi en düşük majör BŞD seviyeleri arasında ciddi derecede fark vardır. İlave genişliklerle yapılan deneyler sonunda en düşük majör BŞD değeri daha sağa ötelenerek yaklaşık 0.02'den 0.04 BŞD'ye çıkmıştır.



Şekil 4.25. İlave genişliklerle yapılan deneylerin etkisi

Hursman (1978) tarafından elde edilen ŞSE, bu çalışmada standart ve ilave genişlikler için elde edilenlerle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.26.'da verilmiştir. Hursman (1978) tarafından elde edilen eğri T3 temperi ve 0.8 mm kalınlığı içindir. Al 2024 için T3ve T4 temperleri arasında çok önemli bir fark olmadığından dolayı, karşılaştırmada T3 veya T4 temperinin kullanılması çok önemli bir farka sebep olmayacaktır. Ancak daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla 0.8 mm kalınlık için T3 temperine göre de hem standart hem de ilave genişlikler için eğriler elde edilmiştir. ŞSE'ler parafin yağlayıcısı kullanılarak ve önerilen yönteme göre değerlendirmeyle elde edilmiştir. Hursman tarafından elde edilen eğrinin en düşük majör değeri *y* ekseni üzerindeyken, bu çalışmada ilave genişlikler kullanılarak elde edilen eğrinin en düşük majör değeri *y* ekseninden yaklaşık 0.036 BŞD gibi önemli oranda sağa ötelenmiş olarak elde edilmiştir. Hursman tarafından elde edilen eğri, bu



Şekil 4.26. İlave genişlikler kullanılarak elde edilen ŞSE'nin literatürle karşılaştırılması

çalışmada önerilen yönteme göre ilave genişlikler kullanılarak elde edilen eğrinin en düşük seviyesinin *y* ekseni üzerine ötelenmiş hali gibidir. Eşit iki eksenli gerdirme bölgesi hariç tüm bölgelerde eğriler arasında önemli ölçüde fark vardır.

Sol taraf ve en düşük majör bölgesi için Hursman tarafından elde edilen eğri önerilen yönteme göre emniyetli tarafta kalırken, eğrinin sağ tarafında tersi bir durum söz konusudur. Sol taraf ve en düşük majör bölgesinde önerilen yönteme göre elde edilen eğrinin daha güvenilir olması durumunda, Hursman tarafından elde edilen eğri kullanıldığında şekillendirilebilirlikten tam olarak faydalanılamayacaktır. Tersi durumda ise önerilen yönteme göre elde edilen eğri güvenilir sonuçlar vermeyecektir. Elde edilen eğrilerden hangisinin güvenilir olduğunu belirlemek amacıyla klasik derin çekme prosesi için durum çalışması yapılmıştır. T3 temperinde 0.8 mm kalınlığındaki numune 60 mm çapa sahip silindirik stampayla hasara uğrayıncaya kadar şekillendirilmiştir. Bu incelemenin sonuçları ileriki "4.9. Durum Çalışmaları" bölümünde verilecektir.

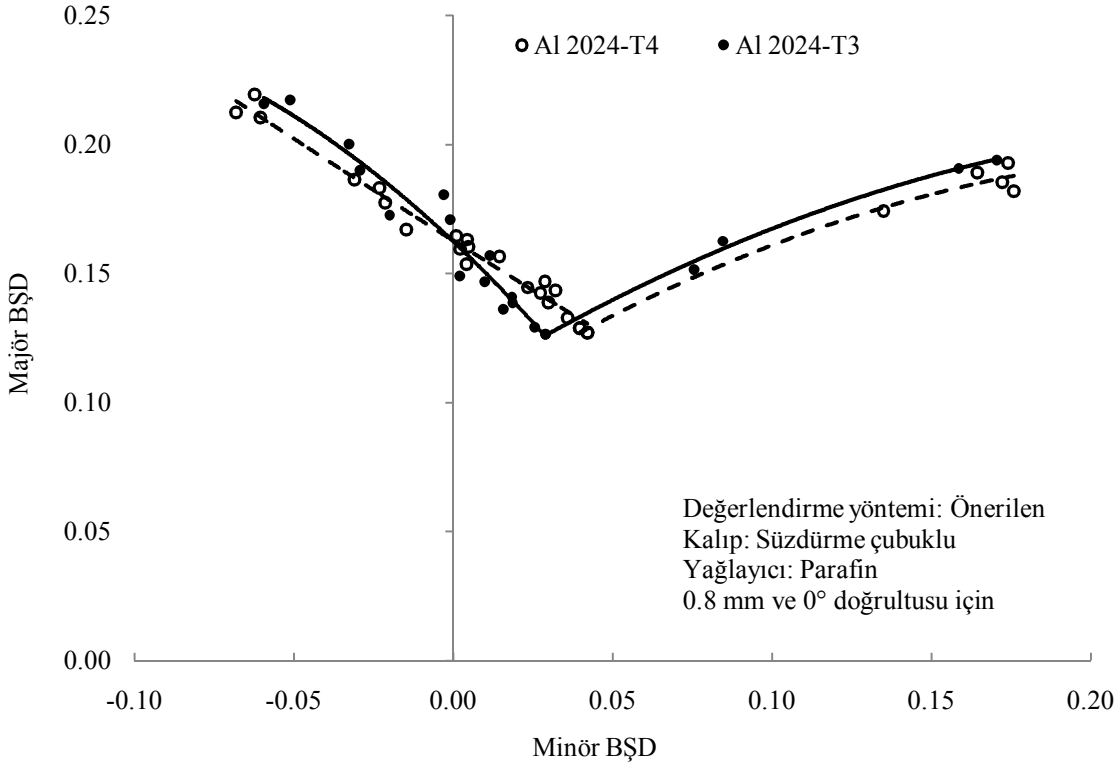
Süzdürme çubuğunun dış çapı 133 mm olduğundan, g133~g175 numuneleri arasında bir fark olmaması gerektiği düşünülebilir. Ancak süzdürme çubuğu numunelerin kalıp içerisine akışını tam olarak engelleyememektedir. Bu durum, daha önce Bölüm 4.3.3.'de açıklanan, dikdörtgen yerine daire numune kullanılmasıyla BŞD

dağılımının değişerek üniform hale gelmesiyle de izah edilebilir. Bu nedenle g133~g175 numuneleri arasında 2'şer mm aralıklarla yapılan deneylerle, eğrinin sağ tarafında ilave sınır BŞD'ler elde edilerek eğrinin belirsizliği ortadan kaldırılmıştır.

Çalışmada kullanılan Al 2024-T4 için en düşük majör BŞD değerinin sağa ötelenme sebepleri araştırılmış ve deneylerin sonuçları aşağıda verilmiştir. Buradaki ŞSE'ler ISO-ÖNERİLEN yönteme göre elde edilmiştir.

4.6.2. Isıl işlem ve süzdürme çubuğunun etkisi

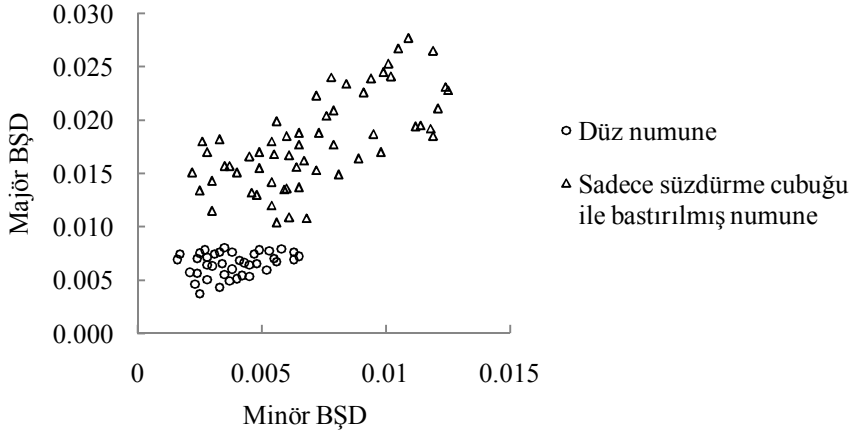
Al 2024-T3 malzemelerin T4 temperine dönüştürülmesi sonucunda en düşük eğri seviyesinin konumunda meydana gelebilecek değişikliği incelemek amacıyla T3 temperi için elde edilen ŞSE Şekil 4.27.'de verilmiştir.



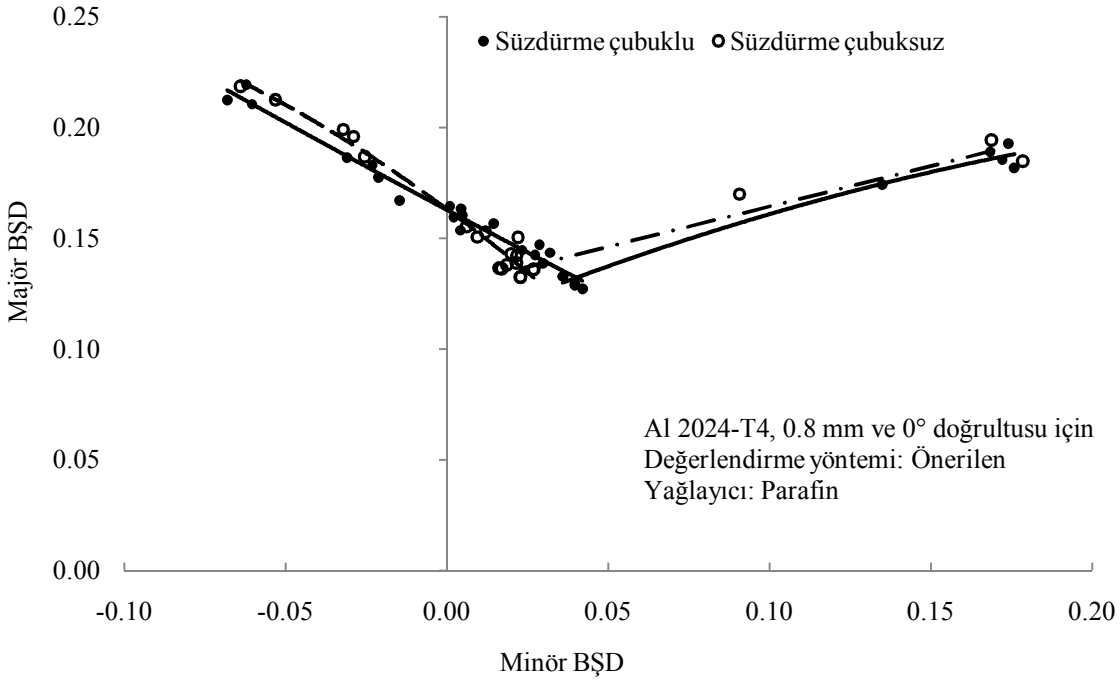
Şekil 4.27. T3 ve T4 temperlerinin karşılaştırılması

Görüldüğü gibi T3 durumunda gerçek minör BŞD T4 temperine göre yaklaşık olarak 0.01 minör BŞD sol tarafta elde edilmiştir. Bu farkın T4 ısıl işlemi sonucunda meydana gelen kalıntı gerilmelerden olduğu söylenebilir. Su verme sırasında suya daldırma doğrultusunun etkisi de incelenmiş ve etki etmediği kanaatine varılmıştır.

Süzdürme çubuğuyla malzemeye bir ön BŞD uygulanmaktadır. Bu etki incelendiğinde, Şekil 4.28.'de görüldüğü gibi sadece süzdürme çubuğu ile bastırılmış fakat ilave şekillendirme yapılmamış numunedeki BŞD dağılımı ortalama olarak majör ve minör BŞD'lerde sırasıyla 0.008 ve 0.0035 BŞD artış göstermiştir. Buradaki artışlar ŞSE'de aynı etkiyi yapmayabilir. Bu amaçla T4 temperi için süzdürme çubuklu ve düz baskı plakalı (süzdürme çubuksuz) kalıp kullanarak Şekil 4.29.'daki ŞSE'ler elde edilmiştir.



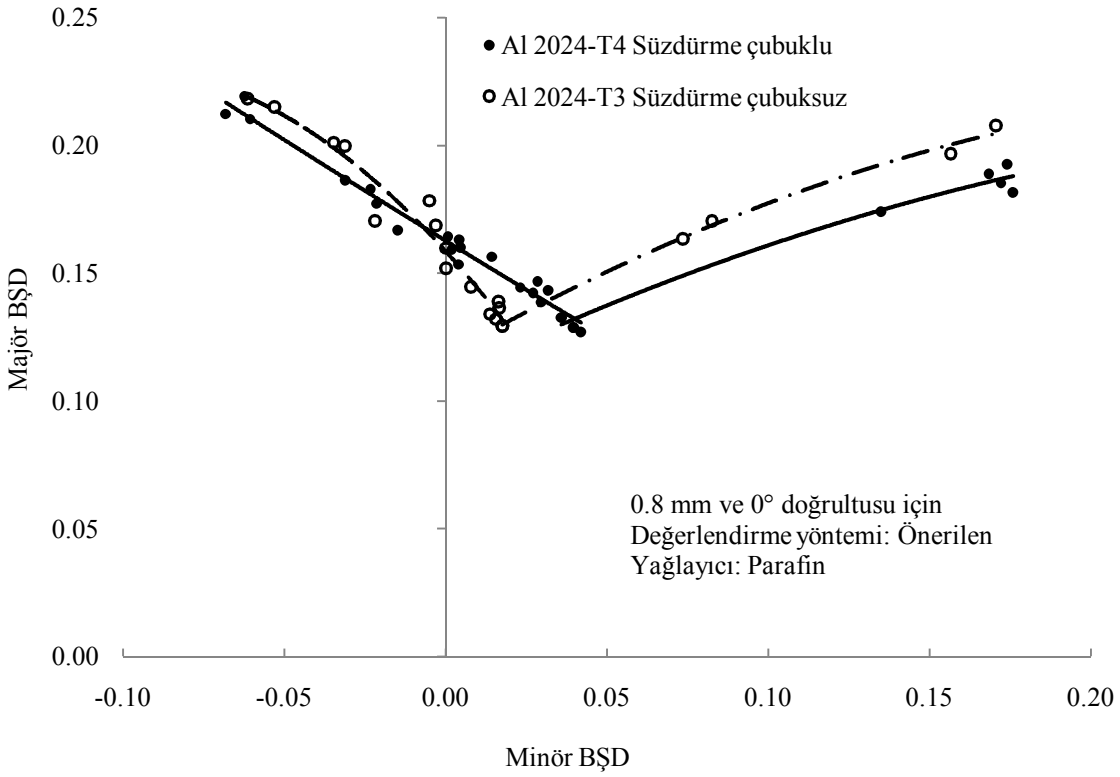
Şekil 4.28. Sadece süzdürme çubuğu ile bastırmanın etkisi



Şekil 4.29. T4 temperi için süzdürme çubuklu ve süzdürme çubuksuz elde edilen ŞSE'ler

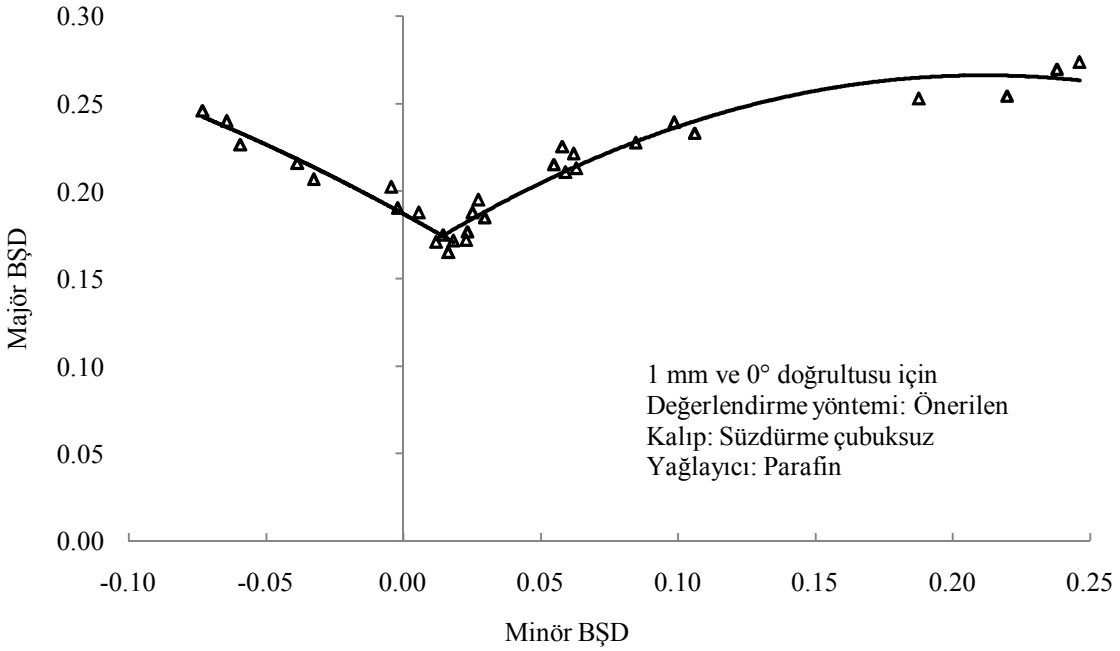
Süzdürme çubuğu ile bastırarak ön BŞD uygulanması sonucunda, literatürde belirtildiği gibi BŞD yolları, dolayısıyla ŞSE değişiklik göstermiştir. Süzdürme çubuksuz ŞSE'deki en düşük majör BŞD seviyesi hemen hemen değişmezken, minör BŞD değeri ~0.013 BŞD sola ötelenmiştir. Bu durum literatürle de uyumludur (Laukonis ve Ghosh, 1978).

Bu iki etkiyi beraberce görebilmek için elde edilen ŞSE'ler Şekil 4.30.'da verilmiştir. En düşük majörün minör BŞD değeri 0.022 BŞD sola ötelenmiştir. Bu değer her iki etkinin süperpozisyonu olan 0.023 BŞD değeriyle de uyumludur.



Şekil 4.30. T3 süzdürme çubuksuz ve T4 düz kalıpla elde edilen ŞSE'ler

T3 temperini elde etmek için yapılan haddeleme işlemi sırasında oluşacak ön gerilmelerin etkisini de ortadan kaldırmak için O temperi durumu incelenmiştir ve süzdürme çubuksuz kalıpla oluşturulan ŞSE'si Şekil 4.31.'de verilmiştir. O temperine dönüştürmeyle ön gerilme ve olası kalıntı gerilmelerin giderilmesi sonucunda en düşük majör BŞD seviyesinin *y* ekseni üzerinde çıkması beklenmekteydi. Ancak ötelenme miktarı yaklaşık 0.014 BŞD civarında elde edilmiştir. Bu durumda T3 temperine dönüştürme ile oluşan ön gerilmelerin ötelenme miktarı üzerinde 0.004 BŞD gibi pek az bir etkisi olduğu söylenebilir.

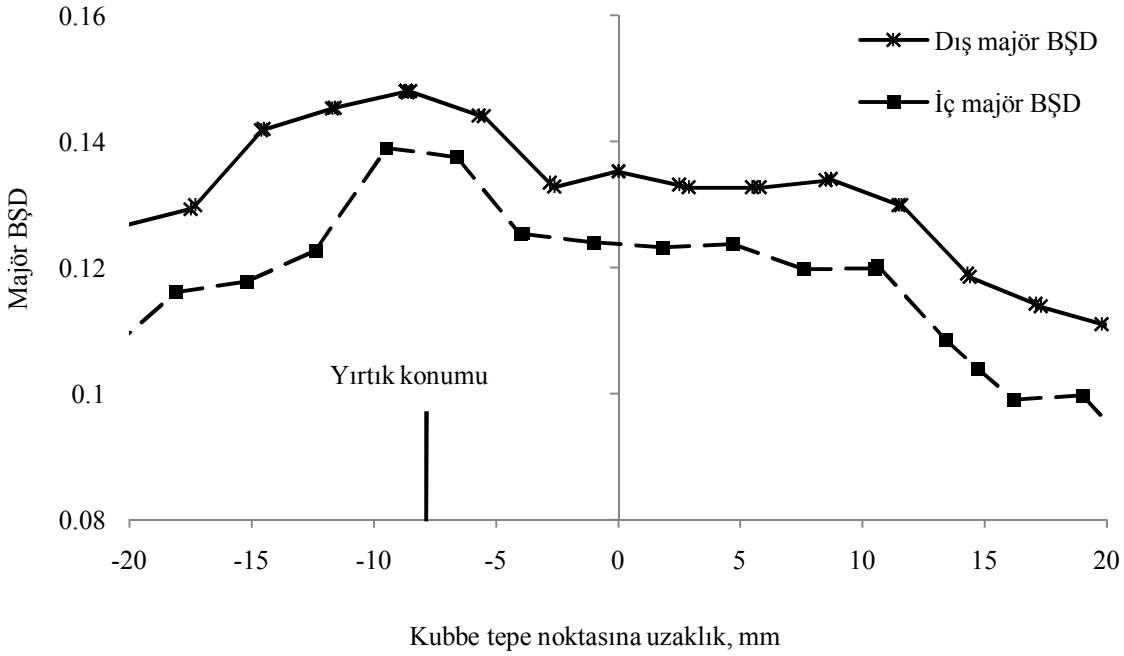


Şekil 4.31. Al 2024-O için ŞSE

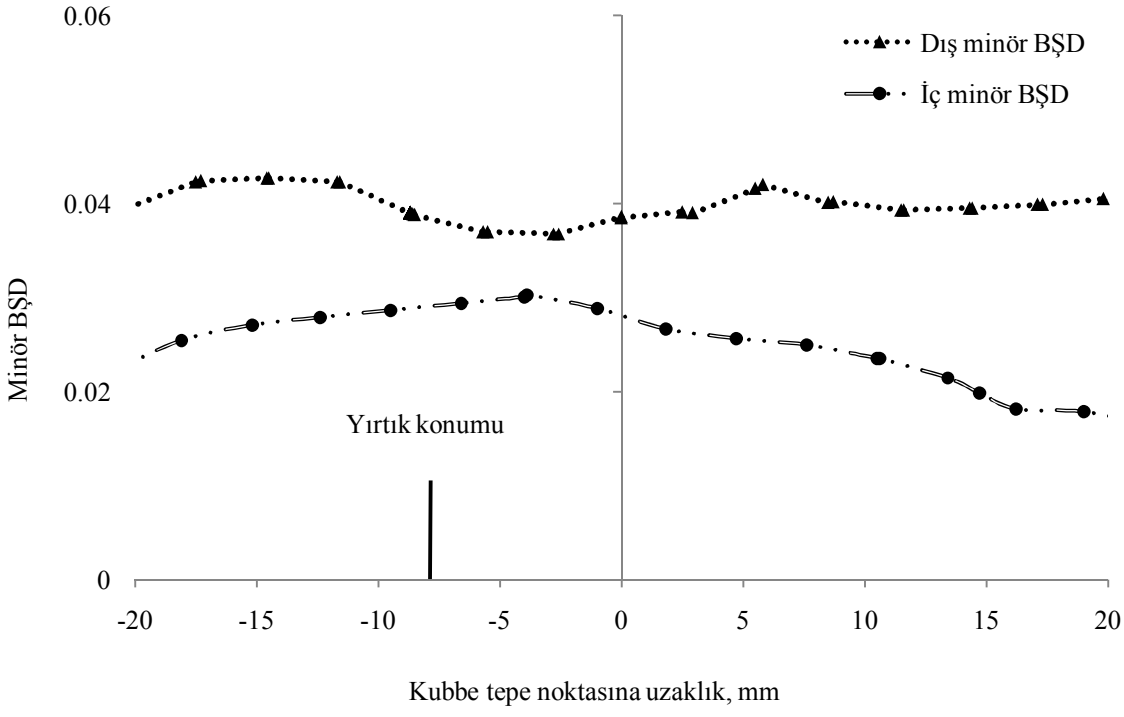
4.6.3. Eğilmenin etkisi

Minör BŞD değerinin ötelenmesinin bir nedeni de sacın stampanın şeklini alarak eğilmesi ile açıklanabilir. Düzlem BŞD sacın iç veya dış yüzeyinde, ya da orta düzleminde meydana gelebilir. Orta düzlemde meydana gelirse, iç yüzeyde basma, ölçmenin yapıldığı dış yüzeyde ise çekme BŞD'leri oluşur. İç ve dış yüzeylerdeki değerler sırasıyla, $\varepsilon = -\ln(1+t/r)$ ve $\varepsilon = +\ln(1+t/r)$ veya yaklaşık olarak $-t/r$ ve $+t/r$ olacaktır (Hosford ve Caddell, 1993). Ötelemenin en çok yapılması gerektiği, düzlem BŞD'nin sacın iç yüzeyinde meydana gelmesi durumunda, dıştan ölçülen BŞD t/d kadar fazla olacaktır. Bu durumda teorik olarak hem majör hem de minör BŞD değerleri 0.8 ve 2 mm kalınlıklar için sırasıyla 0.008 ila 0.02 BŞD azaltılması gerekir.

Eğriliğin etkisini deneysel olarak görmek amacıyla, 0.8 ve 2 mm'lik g100 ve g125 numunelerinin iç ve dış yüzeylerindeki BŞD dağılımları grid analiz sistemi ile elde edilmiştir. BŞD dağılımları kubbe tepe noktasından geçen ve hasara dik bir kesit boyunca 0.8 mm ve 2 mm g125 için sırasıyla Şekil 4.32. ve Şekil 4.33.'te verilmiştir. Stampa ile temasta olan 50 mm çapındaki bir bölgede iç yüzeydeki BŞD değerleri dış yüzeydekinden daha küçüktür. Yırtığın meydana geldiği bölgedeki iç ve dış yüzeylerdeki fark diğer bölgelere göre nispeten biraz daha azdır. Bu azalma eğiliminin geri yaylanmadan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

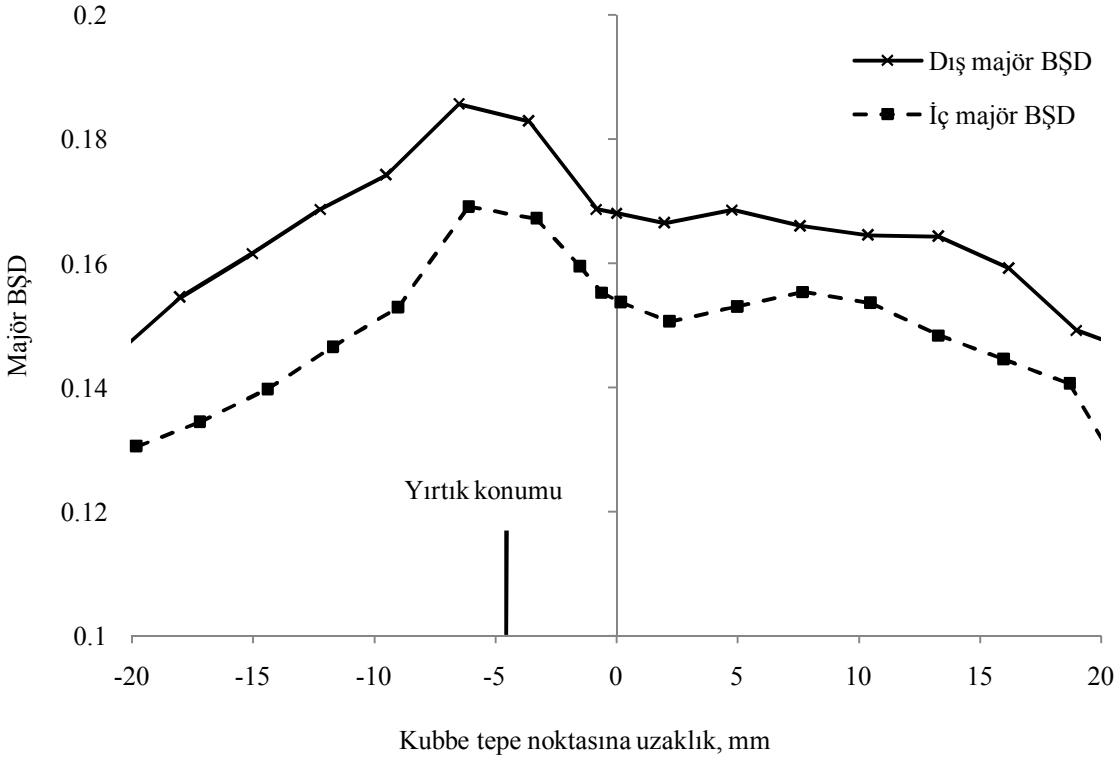


a)

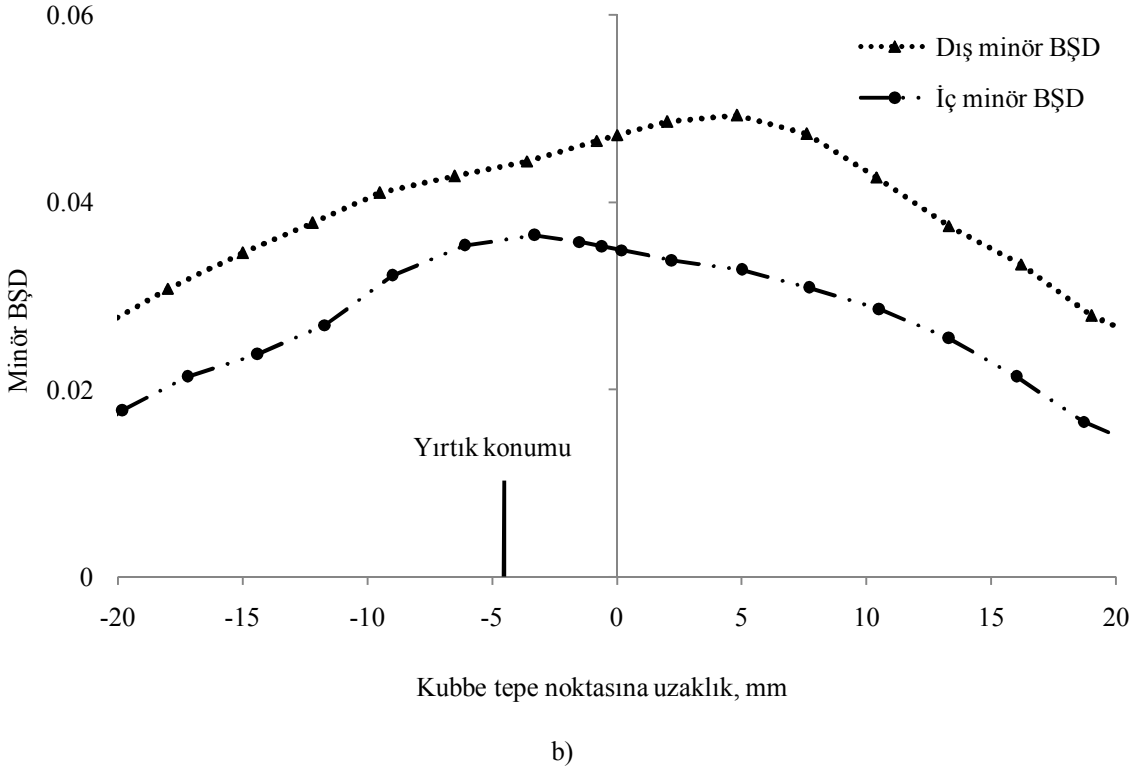


b)

Şekil 4.32. Al 2024-T4 0.8 mm g125 numunesinin iç ve dış yüzeylerinden belirlenen gerçek BŞD dağılımı, a) majör, b) minör BŞD



a)



b)

Şekil 4.33. Al 2024-T4 2 mm g125 numunesinin iç ve dış yüzeylerinden belirlenen gerçek BŞD dağılımı, a) majör, b) minör BŞD

Burada numune boyunca iç ve dış yüzeylerdeki farklardan ziyade yırtık bölgesinde iç ve dış yüzeylerden belirlenecek sınır BŞD değerleri arasındaki fark önemlidir. 0.8 ve 2 mm kalınlıkları için en düşük majör seviyesine yakın bir değeri oluşturan g125 numunesinin yırtık bölgesinde iç ve dış yüzeylerden ölçülen gerçek sınır BŞD'ler ve hasarın oluştuğu yüzeye göre olası ötelenme değerleri Çizelge 4.7.'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Eğrilikten kaynaklanan olası ötelenme değerleri

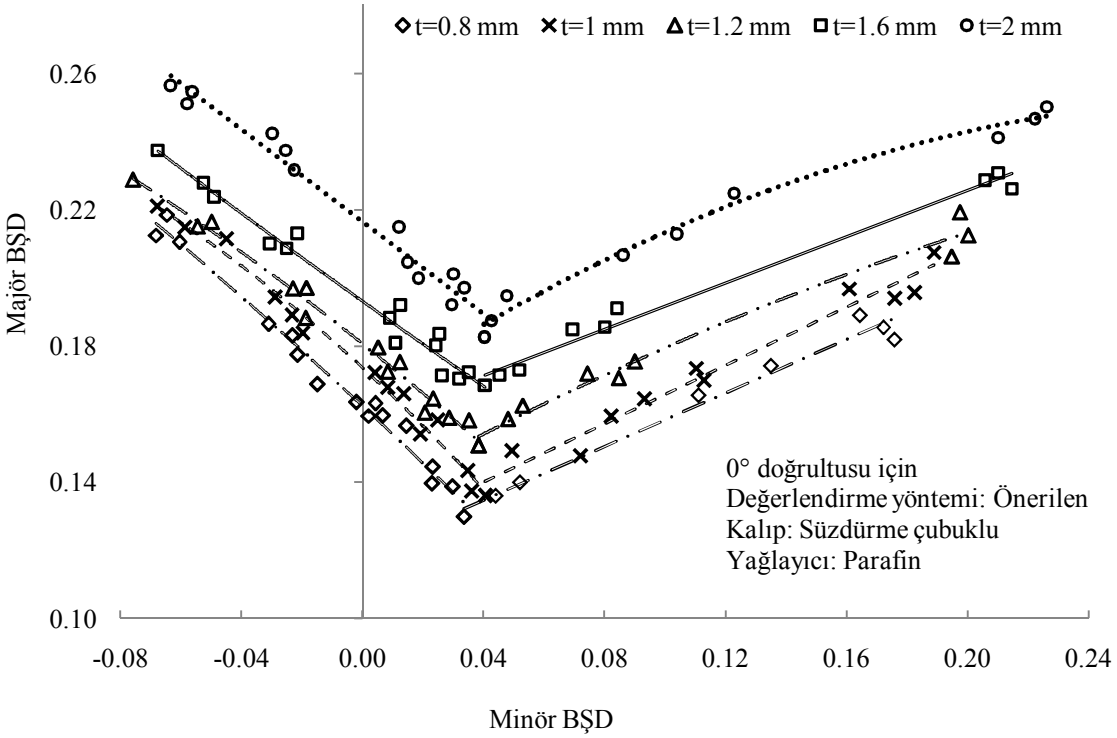
Kalınlık		İç yüzey	Dış yüzey	Ölçülen ötelenme	Teorik ötelenme
0.8 mm	Sınır majör BŞD	0.1390	0.1479	0 – 0.0089	0 – 0.008
	Sınır minör BŞD	0.0320	0.0390	0 – 0.0070	
2 mm	Sınır majör BŞD	0.1698	0.1850	0 – 0.0152	0 – 0.02
	Sınır minör BŞD	0.0330	0.0440	0 – 0.0110	

Tüm bu değerlendirmelerden sonra, Al 2024-T4'ün ŞSE'sinin en düşük majör BŞD konumunun; ısıl işlem ve süzdürme çubuğu ile 0.023 BŞD ve dış yüzeyden ölçme yapılması sebebiyle kalınlığa göre 0~0.02 BŞD sağa ötelendiği göz önüne alınırsa, toplam olarak yine kalınlığa göre 0.03~0.04 BŞD sağa ötelenmesinin normal olduğu sonucuna varılmıştır.

4.7. Sac Kalınlığı ve Haddeleme Doğrultusunun Etkisi

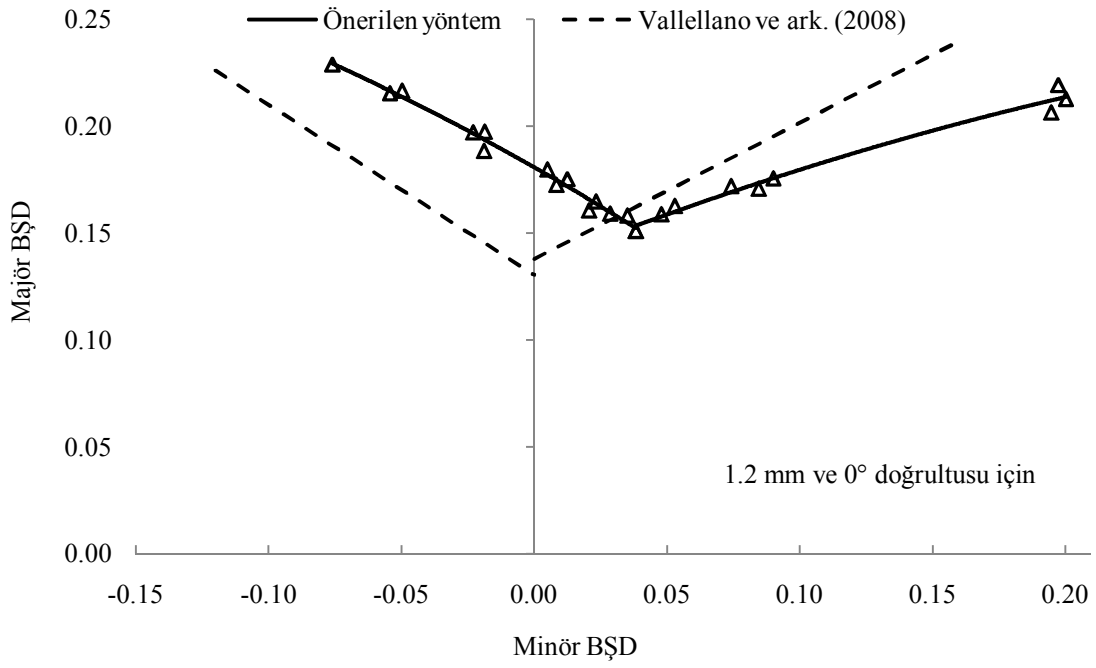
Bu bölümde çalışmanın temel konusu olan Al 2024-T4 sacın ŞSE'sinin sac kalınlığına ve haddeleme doğrultusuna göre değişimi verilmiştir. Kalınlığın etkisini incelemek amacıyla, ISO-ÖNERİLEN yöntem kullanılarak 0.8, 1, 1.2, 1.6 ve 2 mm sac kalınlıkları için ŞSE'ler Şekil 4.34.'teki gibi elde edilmiştir.

Önerilen yönteme göre elde edilen ŞSE'ler literatürde elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. 0.8 mm için Hursman (1978) ve 1.2 mm için Vallellano ve ark. (2008) tarafından elde edilen eğrilerle karşılaştırma sırasıyla Şekil 4.26. ve Şekil 4.35.'te verilmiştir. Literatürdeki her iki çalışmada da elde edilen ŞSE'ler T3 temperi içindir. Ancak Şekil 4.27.'de görüldüğü gibi aynı kalınlık için T3 ve T4 temperlerinde elde edilen eğriler arasında çok önemli farklar yoktur. Dolayısıyla karşılaştırmada T3 veya T4 temperinin kullanılması çok önemli farklara neden olmayacaktır. Yine de daha doğru karşılaştırma yapmak amacıyla, Hursman tarafından elde edilen eğriyle karşılaştırmada 0.8 mm kalınlık ve T3 temperi için elde edilen eğri



Şekil 4.34. Al 2024-T4 alaşımının ŞSE'sinin kalınlığa göre değişimi

kullanılmıştır. Ancak Vallellano (2008) tarafından T3 temperi için elde edilen eğri, T4 temperi ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.35. 1.2 mm için ŞSE'nin literatür ile karşılaştırılması

Her iki çalışmada elde edilen ŞSE'ler, özellikle en düşük majör BŞD bölgesi başta olmak üzere, bu çalışmada elde edilenlere göre önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Hursman tarafından elde edilen eğriyle karşılaştırmada, sol taraf ve en düşük majör bölgesi için önerilen yönteme göre elde edilen eğri oldukça yüksek seviyede iken, sağ tarafta tersi bir durum söz konusudur. Hangi eğrinin güvenilir olması durumuna göre, ya şekillendirilebilirlikten tam olarak faydalanılamayacak ya da güvenilir sonuçlar elde edilemeyecektir. Bu çalışmada elde edilen eğrilerle literatürde elde edilenler arasında oldukça önemli farkların oluşmasının sebebi olarak, her iki çalışmada da deneylerin ISO standardına göre yapılmaması ve ilave genişlikler için deneyler olmaması gösterilebilir. Vallellano ve ark. eğrinin sol tarafını çekme deneyi ile elde etmişlerdir ve bu bölgedeki farkın esas olarak bu sebepten kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen eğrilerden hangisinin güvenilir olduğu durum çalışması ile belirlenmiştir ve sonuçları "4.9. Durum Çalışmaları" bölümünde verilecektir.

Sac kalınlığına göre değişim incelendiğinde, çeşitli kalınlıklar için elde edilen sınır BŞD değerlerinin saçınıklığı az olmasından dolayı, birbirine yakın kalınlıklar için bile eğrilerin iç içe girmediği görülmektedir (Şekil 4.34.). Bu değerlendirmeyi daha somut hale getirmek için, ŞSE'yi karakterize eden tek eksenli çekme, düzlem BŞD, en düşük majör BŞD değeri ve eşit iki eksenli gerdirme noktalarındaki dik uzaklıklar Çizelge 4.8.'de verilmiştir.

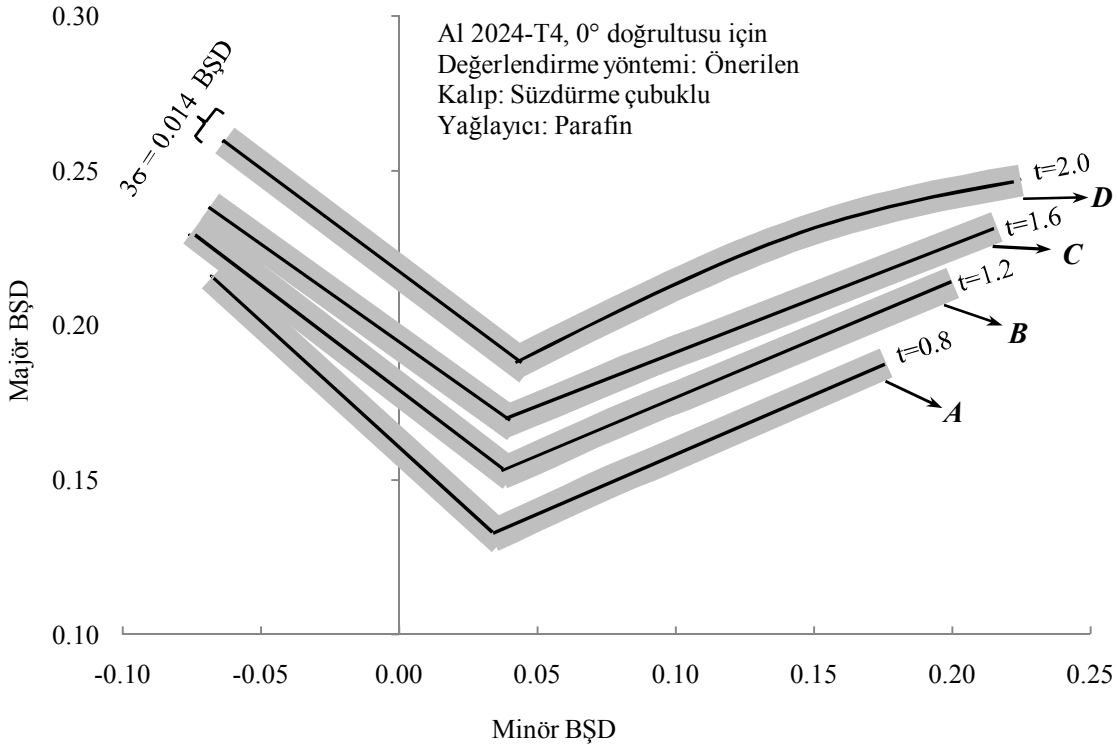
Kalınlığa göre farklı ŞSE'lerin kullanılması gerektiğine % 99 güvenilirlikle karar vermek için eğriler arasındaki dik uzaklıklar belirlenmiştir. Bu uzaklıklar ŞSE'nin elde edilmesindeki 3σ belirsizliğinden ne kadar büyükse kalınlığın etkisi hakkında varılacak yargı o kadar güvenilir olacaktır. ŞSE'lerin belirsizlikleri göz önüne alınarak, bu uzaklıklar $3\sigma \cong 0.014$ değerinden fazla olduğu zaman farklı ŞSE kullanılması uygun olacaktır.

Çizelge 4.8. Al 2024-T4 için çeşitli kalınlıklardaki ŞSE'lerdeki dik uzaklıklar

Kalınlık aralığı (mm)	Tek eksenli çekme	Düzlem BŞD	En düşük seviye	Eşit iki eksenli gerdirme
0.8 – 1.0	0.0048	0.0068	0.0065	0.0100
1.0 – 1.2	0.0030	0.0070	0.0125	0.0070
1.2 – 1.6	0.0100	0.0110	0.0210	0.0120
1.6 – 2.0	0.0210	0.0185	0.0220	0.0150

Çizelge 4.8.'deki veriler incelendiği zaman, tek eksenli çekme durumu için 0.8, 1 ve 1.2 mm arasında önemli bir fark yokken, 0.8 ile 1.6 ve 2 mm arasında önemli olabilecek farklar vardır. Düzlem BŞD durumunda 0.8 ile 1 mm arasındaki fark sapma aralığında iken, 0.8, 1.2, 1.6 ve 2 mm arasındaki farklar sınır sapma değerinden büyüktür. Benzer değerlendirmeler en düşük majör BŞD ve eşit iki eksenli gerdirme noktaları için de yapılabilir. Bu artışlar % olarak da ifade edilecek olursa, 0.8, 1.6 ve 2 mm kalınlıklar için örneğin düzlem BŞD noktasındaki gerçek sınır BŞD değerleri, sırasıyla 0.16, 0.19 ve 0.22 BŞD olmaktadır ve aradaki BŞD artışları sırasıyla % 18 ve % 37 dir. Eğrilerin en düşük majör BŞD ve eşit iki eksenli noktalarında bu kalınlıklar için daha fazla % artış vardır. Sonuç olarak 0.8, 1.2, 1.6 ve 2 mm kalınlıkları kullanılarak yapılan analizlerde farklı ŞSE'lerin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bu açıklamaları görsel olarak ifade etmek için, Şekil 4.36.'da görüldüğü gibi ŞSE'ler hata bantlarını da içerecek tarzda çizilirse, 0.8 ile 1.2 mm arasındaki kalınlıklar için *A*, 1.2 ile 1.6 mm arası için *B*, 1.6 ile 2 mm arası için *C*, 2 mm ve daha büyük kalınlıklar için ise *D* sınırı kullanılmalıdır.

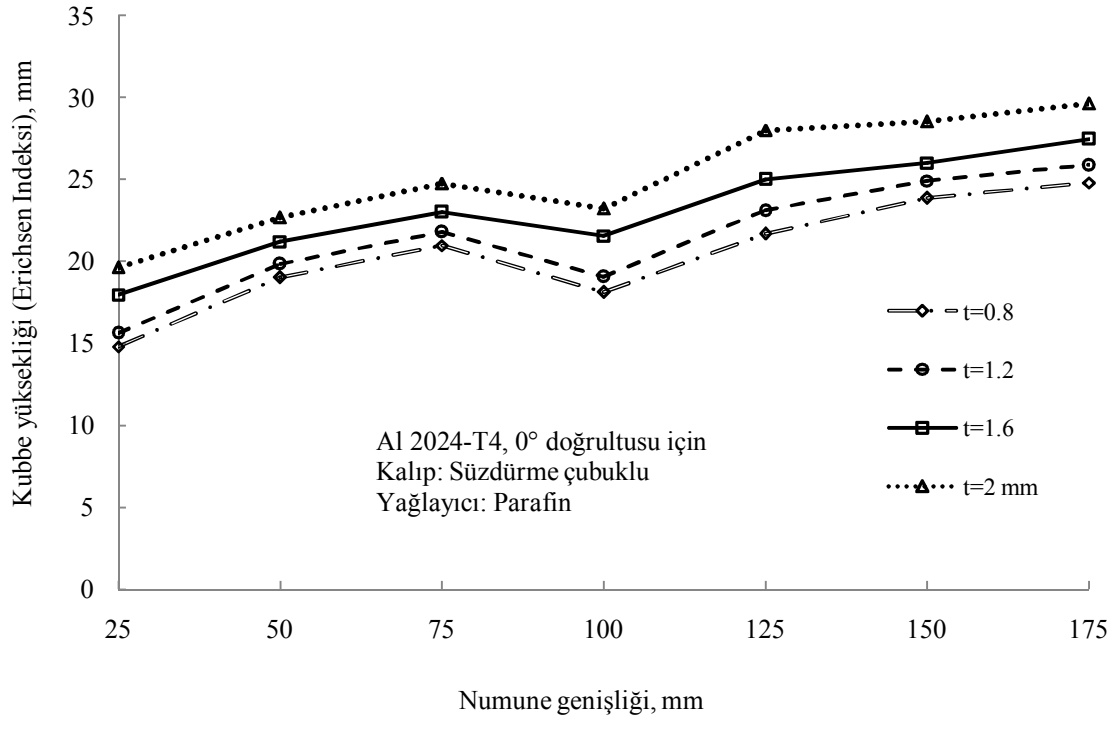


Şekil 4.36. Hata bantlarını içeren çeşitli kalınlıklı ŞSE'ler

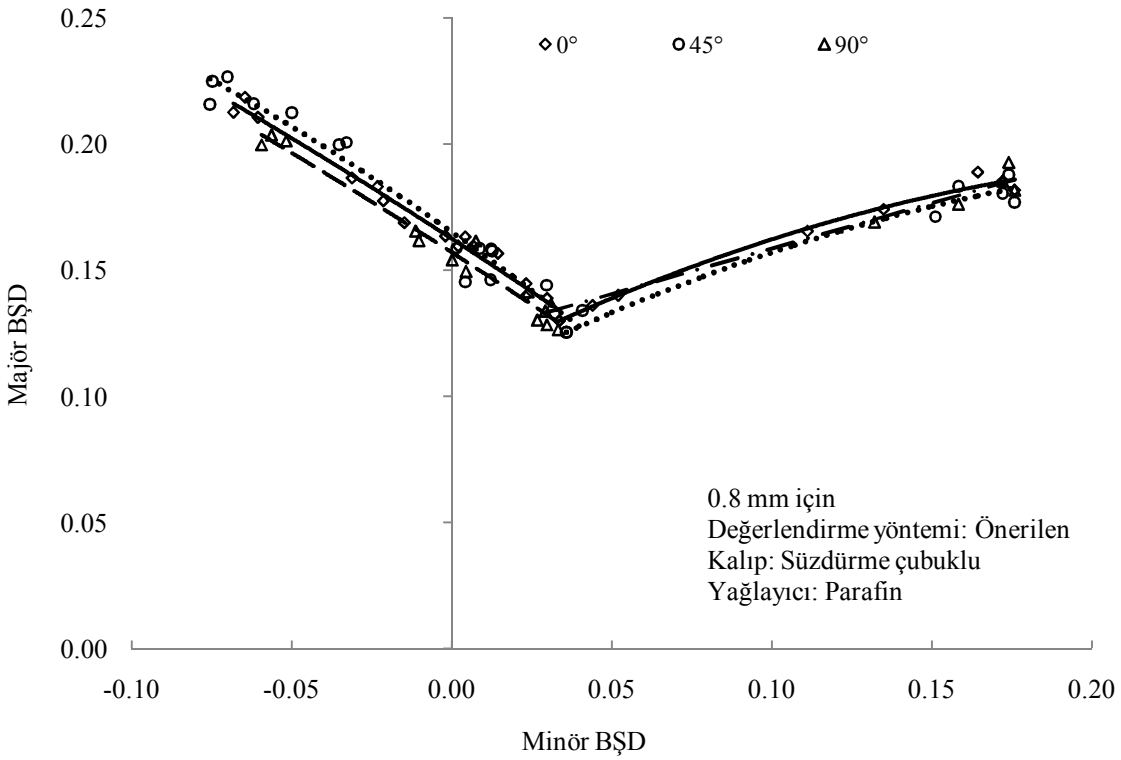
Teoride *n* pekleşme katsayısının $ŞSE_0$ değeri kadar olması gerekir (Hosford ve Caddell, 1993). Ancak sac kalınlıkları için elde edilen *n* değerleri sırasıyla 0.20, 0.21, 0.22, 0.22, 0.23 iken, $ŞSE_0$ değerleri 0.16, 0.175, 0.18, 0.194 ve 0.22 BŞD olarak elde edilmiştir. 2 mm sac kalınlığı için değerler uyumlu olsa da, diğer kalınlıklar için 0.04 BŞD'ye varan farklar olduğundan, teorinin bu malzeme için sorgulanması gerekir.

Şekillendirilebilirliğin diğer bir göstergesi olan sınır kubbe yüksekliğinin (Erichsen Indeksi) kalınlığa göre değişimi de üç tekrarlı deneylerin ortalaması olarak Şekil 4.37.'de verilmiştir. Sac kalınlığı arttıkça Erichsen Indeksi de artmaktadır.

Al 2024-T4 sacların 0.8, 1 ve 2 mm kalınlıkları için 0°, 45° ve 90° doğrultularda ISO-ÖNERİLEN yöntem kullanılarak elde edilen ŞSE'leri Şekil 4.38. ve Ek-3'te verilmiştir. Tüm kalınlıklar için en yüksek ve en düşük eğriler arasındaki sapmalar maksimum 0.01 BŞD olup belirsizlik değerinden küçük olduğundan, bütün haddeleme doğrultuları için aynı ŞSE kullanılabilir.



Şekil 4.37. Sınır kubbe yüksekliklerinin sac kalınlığına göre değişimi



Şekil 4.38. Al 2024-T4'ün ŞSE'sinin haddeleme doğrultusuna göre değişimi

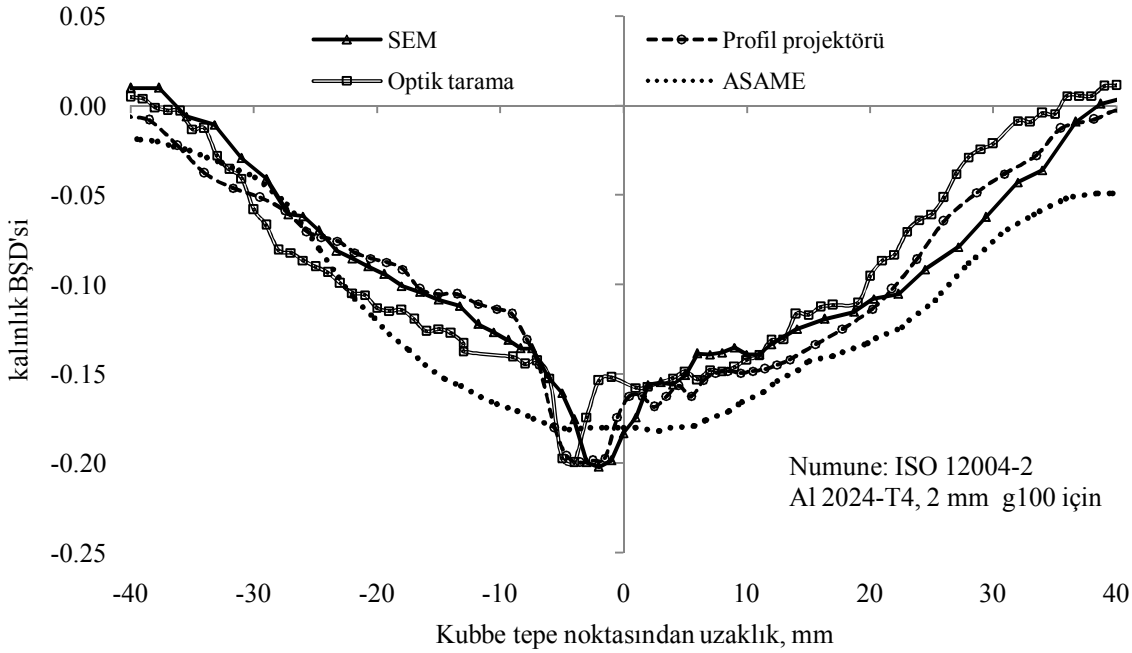
4.8. Hasar Mekanizmalarının İncelenmesi

Bu bölümde çeşitli kalınlıklar ve doğrultular için ŞSE'lerdeki farklılıkların sebebini daha iyi açıklayabilmek amacıyla, Nakajima numunelerindeki kalınlık dağılımları ve boyunlaşma davranışları verilmiştir.

4.8.1. Kalınlık dağılımı

4.8.1.1. Ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması ve tekrarlanabilirlik

Kalınlık dağılımlarını incelemeden önce, ölçümlerinin doğruluğunu belirlemek gerekir. Bu amaçla 2 mm g100 numuneleri için profil projektörü, 3B optik tarama, SEM cihazı ve ASAME yazılımı ile numunelerin tepe noktasından geçen hasara dik kesitinden ölçülen gerçek kalınlık BŞD'leri Şekil 4.39.'da verilmiştir.

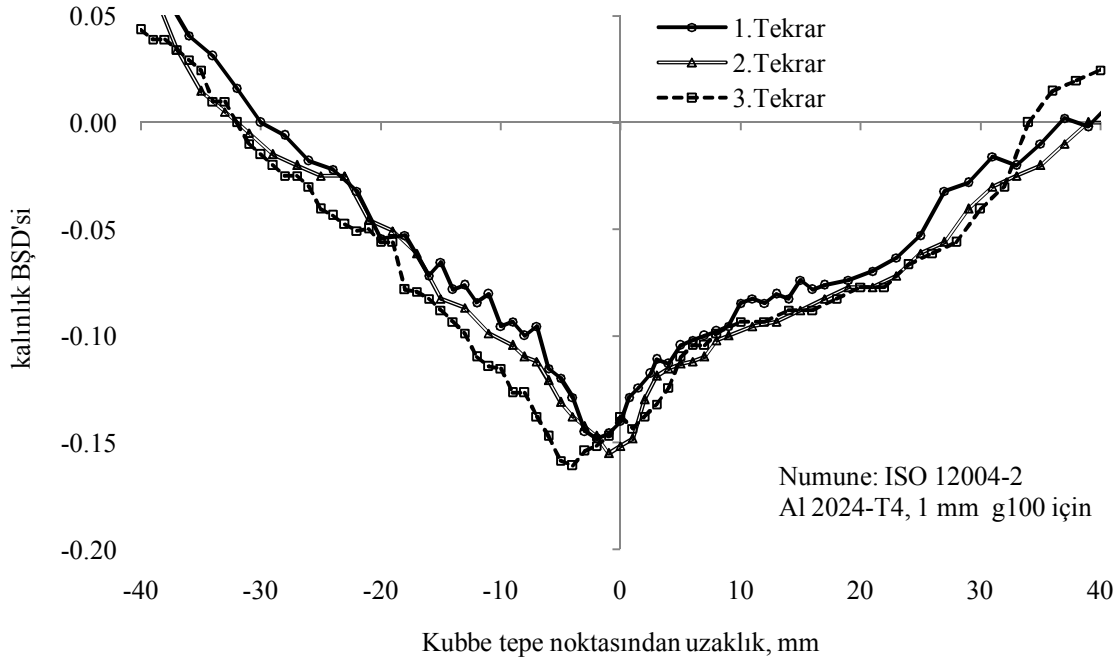


Şekil 4.39. Kalınlık dağılımı ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması

ASAME dışındaki ölçme yöntemleri birbirlerine oldukça yakın bir seyir takip etmektedir ve farklı numuneler için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. ASAME ile belirlenen kalınlık dağılımı özellikle hasar bölgesinde çok farklıdır. SEM ile ölçme oldukça uzun sürmekte ve maliyetli olmakta iken, profil projektörü ile ölçme de uzun sürmekte ve kişisel hatalara açık olmaktadır.

Sonuç olarak, kalınlık ölçümlerinin tüm numune boyunca rahatça ölçme yapılabilen 3B optik tarama cihazı veya profil projektörü ile yapılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

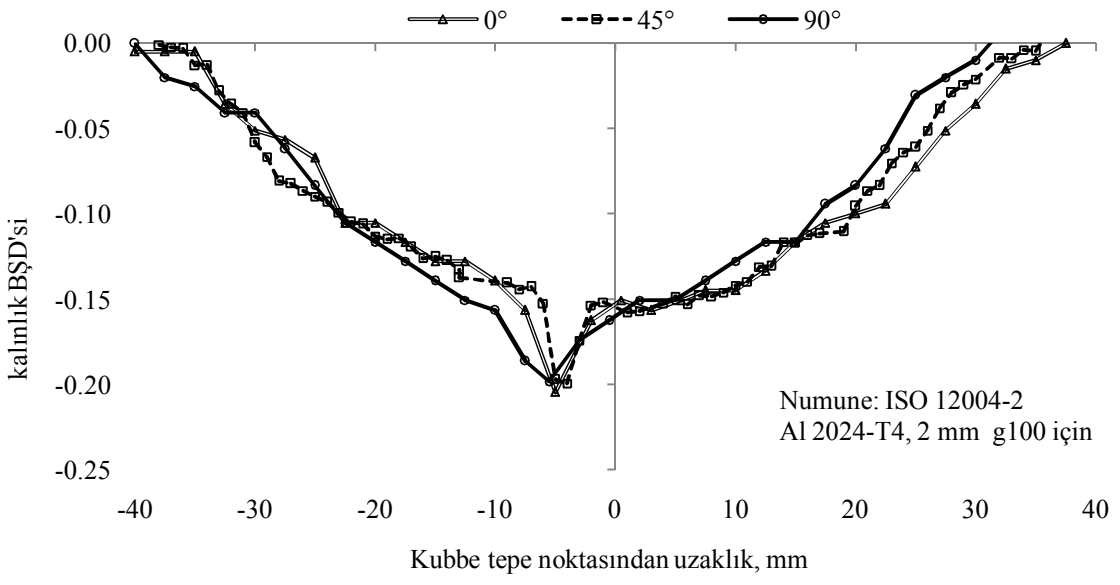
Kalınlık dağılımı ölçümlerinin tekrarlanabilirliğini belirlemek amacıyla 3B optik taramayla ölçülen Nakajima numunelerinin gerçek kalınlık BŞD dağılımları Şekil 4.40.'ta verilmiştir. 1. ve 2. tekrarlardan elde edilen dağılımlar maksimum 0.02 BŞD bir hata ile birbirine oldukça yakındır. 3. tekrar numunenin kubbe tepe noktasından diğerlerine göre uzak bir bölgede yırtılmış olması nedeniyle elde edilen dağılım farklı görünmektedir. Ancak bu eğri sağa doğru 3 mm kadar ötelenerek kalınlık dağılımının yırtık konumuna göre verilmesi ile dağılımın tekrarlanabilirliği çok daha küçük olurdu. Esasen önemli olan maksimum incelme miktarıdır ve bu değer 0.006 BŞD gibi kabul edilebilir bir tekrarlanabilirlikle elde edilmiştir.



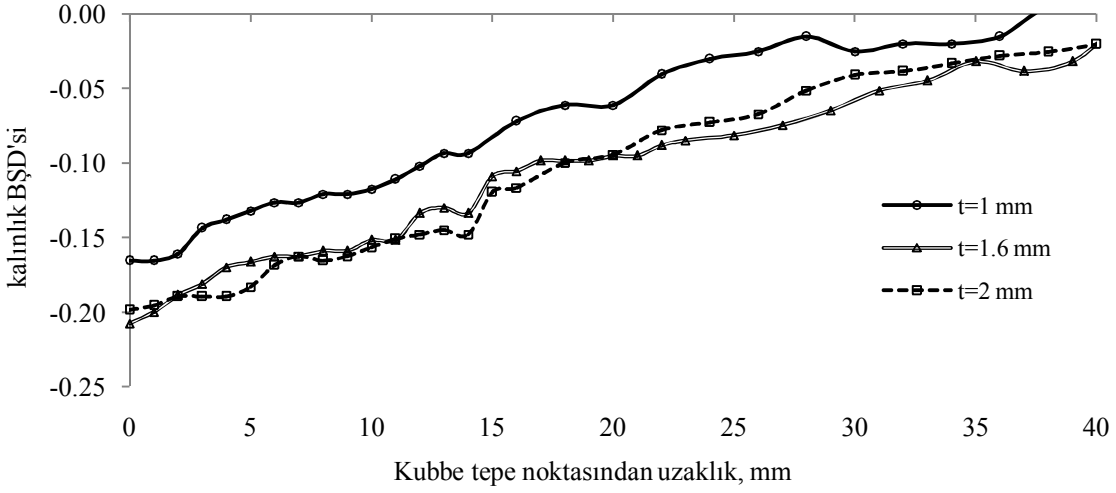
Şekil 4.40. Optik tarama ile kalınlık ölçümünün tekrarlanabilirliği

4.8.1.2. Sac kalınlığı ve haddeleme doğrultusuna göre dağılım

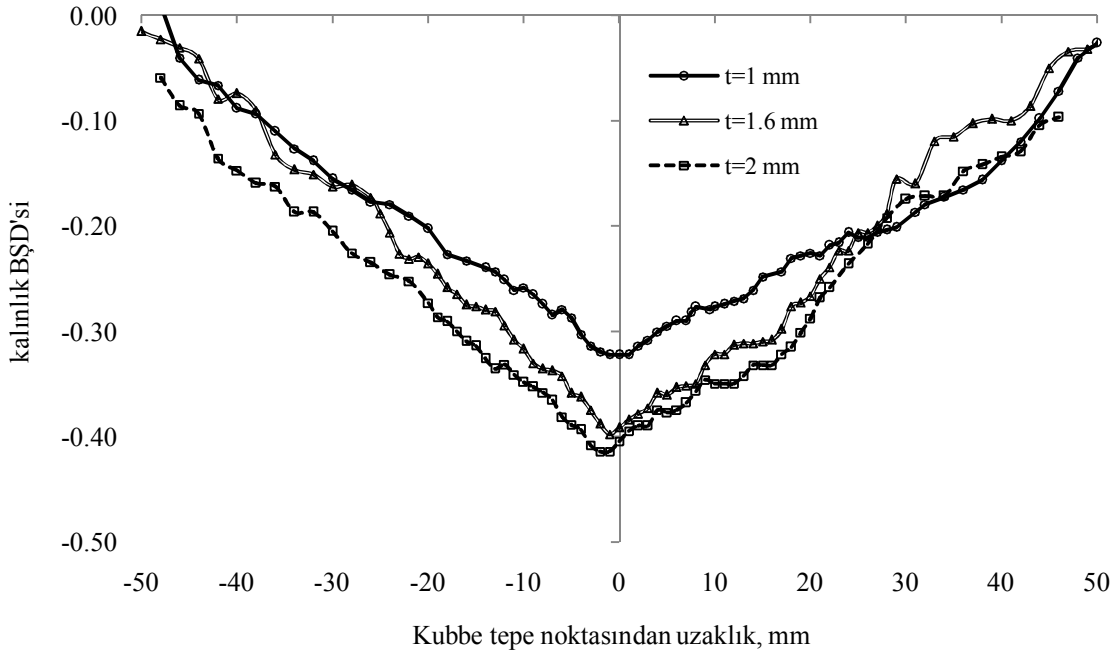
Gerçek kalınlık BŞD dağılımının haddeleme doğrultularına göre değişimi 2 mm g100 için Şekil 4.41.'de, sac kalınlığına göre değişimi ise g175 için Şekil 4.42.'de verilmiştir. Diğer numuneler için dağılımlar Ek-4.'te verilmiştir.



Şekil 4.41. Gerçek kalınlık BŞD dağılımının haddeleme doğrultusuna göre değişimi



a)



b)

Şekil 4.42. Al 2024-T4 malzeme için gerçek kalınlık BŞD dağılımının sac kalınlığına göre değişimi, a) g25 ve b) g175 için

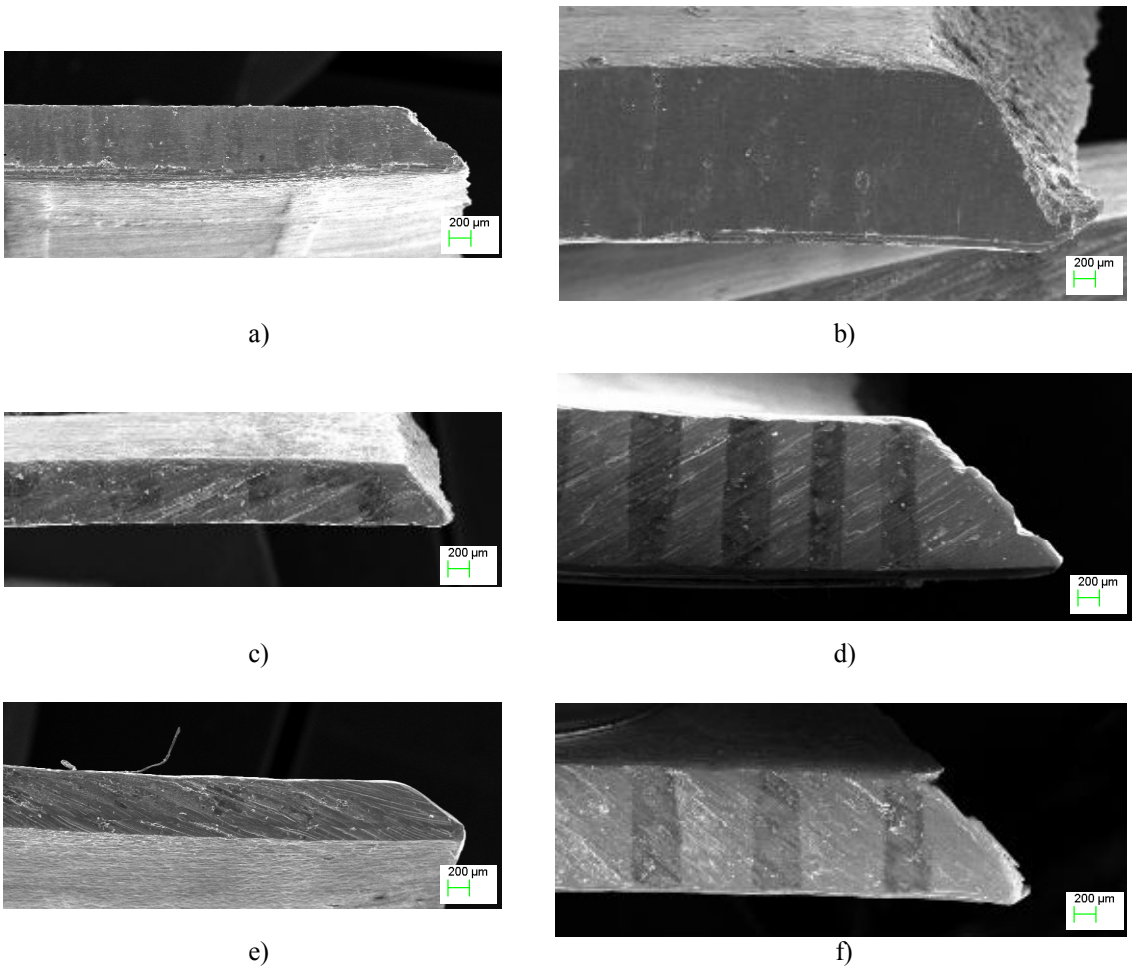
Tüm bölgeler için sac kalınlığının artışıyla maksimum gerçek kalınlık BŞD miktarları artmaktadır. Ancak tek eksenli çekme bölgesindeki artış diğer bölgelere göre nispeten düşüktür ve bu durum ŞSE'lerle de uyumludur. Maksimum kalınlık BŞD'sinin artışı şekillendirilebilirliğin artışı anlamına gelmektedir. Örneğin eşit iki eksenli gerdirme bölgesinde 0.8 mm kalınlığındaki sac malzeme maksimum 0.32 BŞD incelmeye müsaade ederken, 2 mm kalınlığındaki bir malzeme 0.41 BŞD'ye kadar inceltilebilmektedir. Ayrıca aynı kalınlık için farklı şekil değiştirme durumlarında da

meydana gelen maksimum kalınlık BŞD miktarları değişiklik göstermektedir. Bu nedenle analizlerde hasar kriteri olarak sac kalınlığındaki incelmenin kullanılmasının uygun sonuçlar vermeyeceği düşünülmektedir.

Haddeleme doğrultusuna göre maksimum kalınlık BŞD değerleri, elde edilen ŞSE'lerle de uyumlu olarak çok az değişiklik göstermektedir.

4.8.2. Boyunlaşma davranışları

Boyunlaşma davranışlarını görsel olarak inceleyebilmek için 0.8 ve 2 mm kalınlıklardaki Nakajima numunelerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 4.43.'te verilmiştir. Her iki kalınlık için yırtılmalar, daha önce de bahsedildiği gibi, kayma gerilmelerinin etkisiyle kalınlık doğrultusu ile açı yaparak çapraz şekilde meydana gelmiştir. Tüm numunelerde yayılmış boyunlaşma gözlenmiştir ve sonuç olarak hasar mekanizmalarında farklılık gözlenmemiştir.



Şekil 4.43. Al 2024-T4 malzemelerin çeşitli kalınlıklar için boyunlaşma davranışları, a) t1_g25, b) t2_g25, c) t1_g100, d) t2_g100, e) t1_g175 ve f) t2_g175 için

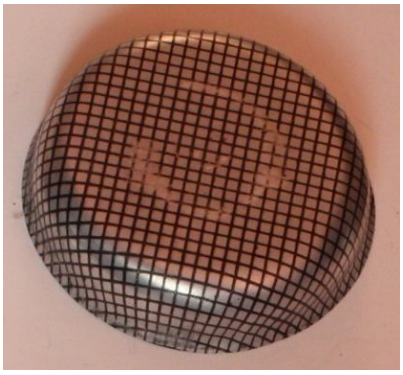
4.9. Durum Çalışmaları

Bu bölümde ŞSE'lerin geçerliliğini ve kalınlığa göre farklı ŞSE kullanılmasının gerekliliğini belirlemek için yapılan deneysel ve sayısal durum çalışmalarının sonuçları verilmiştir.

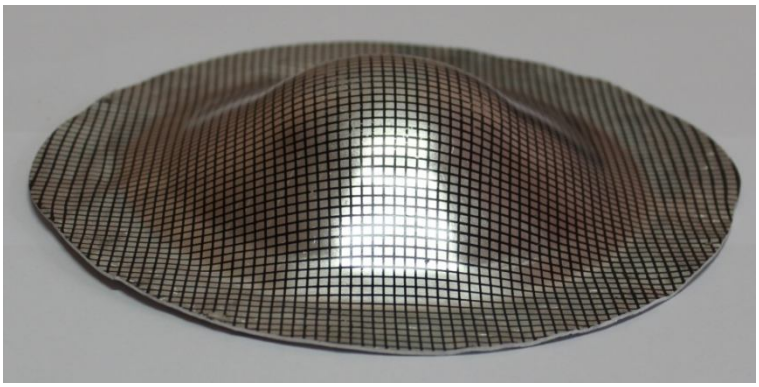
4.9.1. Deneysel durum çalışmaları

Bu bölümde ilk olarak ISO 12004-2 ve ASTM E 2218 standartlarına göre elde edilen ŞSE'lerin hangisinin güvenilir olduğunu belirlemek ve önerilen yönteme göre elde edilen ŞSE'nin literatürde elde edilenlerle karşılaştırmalı olarak geçerliliğini test etmek amacıyla yapılan deneysel durum çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Yapılan bu iki incelemede, ŞSE'lerin farklılık gösterdiği bölgeleri test etmek için klasik derin çekme ve hidrolik şişirme prosesleriyle durum çalışmaları yapılmıştır. Sonra çeşitli kalınlıklar için elde edilen eğrilerin geçerliliğini test etmek için ŞSE'nin birçok bölgesini kapsayacak tarzda klasik derin çekme, gerdirmeli çekme ve hidrolik şişirme prosesleri için yapılan deneysel ve sayısal durum çalışmalarının sonuçları verilmiştir.

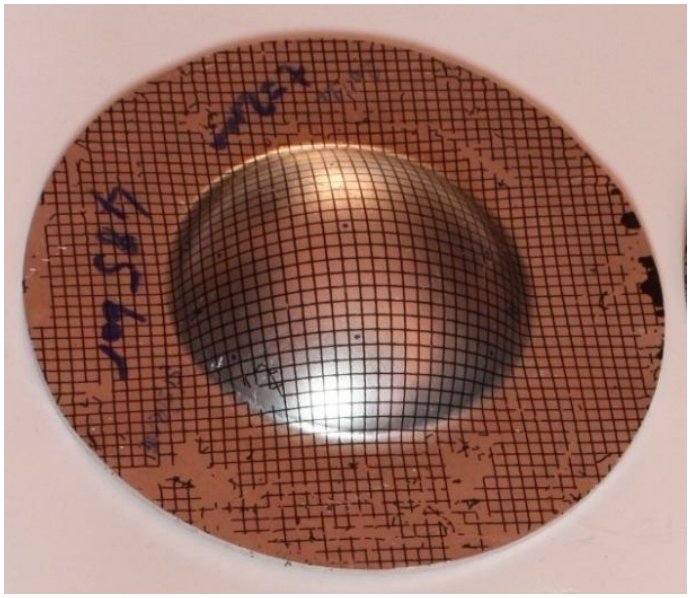
Tüm prosesler için, numuneler yırtılıncaya kadar şekillendirilerek sınırları belirlendikten sonra, aynı numuneler yırtık öncesine kadar şekillendirilmiştir. Durum çalışmalarında şekillendirilen parçalardan örnekler Şekil 4.44. ila Şekil 4.46.'da görülmektedir.



Şekil 4.44. Klasik derin çekmeyle şekillendirilen 60 mm çapında silindirik kap



Şekil 4.45. Gerdirmeli çekme prosesiyle şekillendirilen 100 mm çapında yarıküresel parça

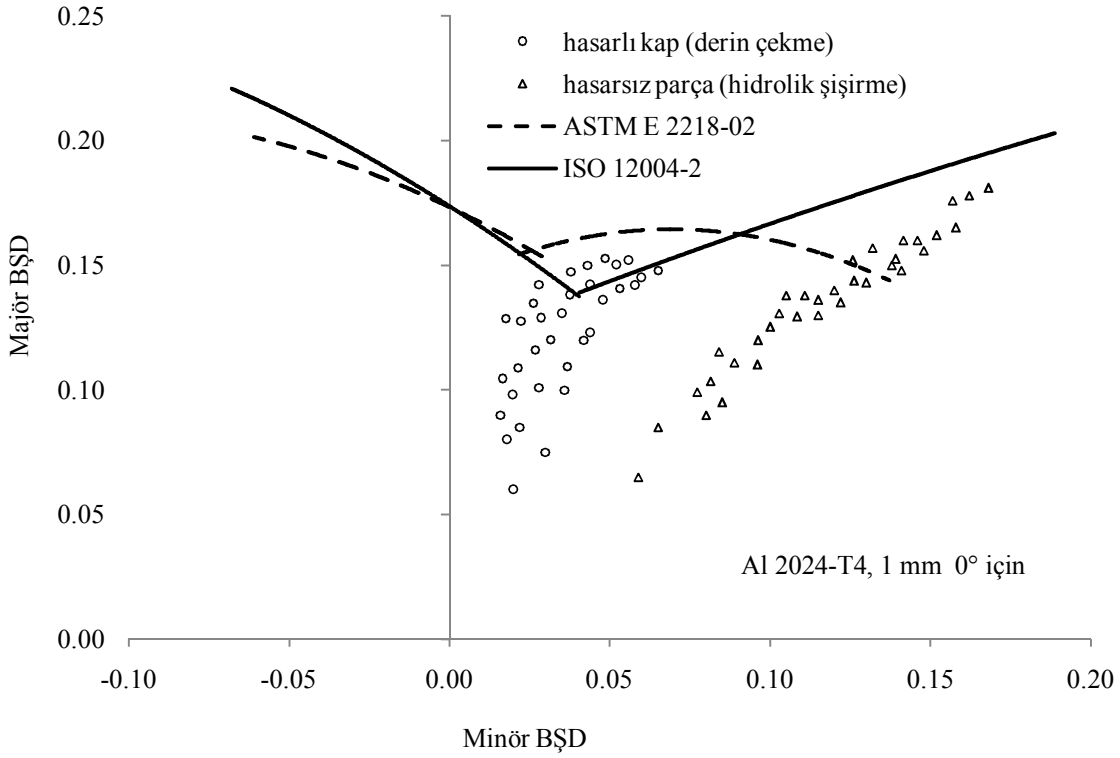


Şekil 4.46. Hidrolik şişirme prosesiyle şekillendirilen 65 mm çapında yarıküresel parça

4.9.1.1. ISO 12004-2 standardına göre elde edilen ŞSE lerin güvenilirliği

ISO 12004-2 ve ASTM E 2218 standartlarına göre elde edilen ŞSE'lerin hangisinin güvenilir olduğunu belirlemek amacıyla, 1 mm sac kalınlığına sahip malzemeler için klasik derin çekme ve hidrolik şişirme prosesleri kullanılarak yapılan deneysel durum çalışmalarının sonuçları verilmiştir.

Klasik derin çekme prosesinde 85 mm ilkel çapa sahip sac numune, 60 mm çapa sahip silindirik stampayla yırtılıncaya kadar şekillendirilmiştir (Şekil 4.44.). Hidrolik şişirme prosesinde ise sac numune 65 mm çaplı çapında kalıp kullanılarak yırtık



Şekil 4.47. ISO 12004-2 ve ASTM E 2218 standartlarına göre elde edilen ŞSE'lerin güvenilirliğinin durum çalışmasıyla incelenmesi

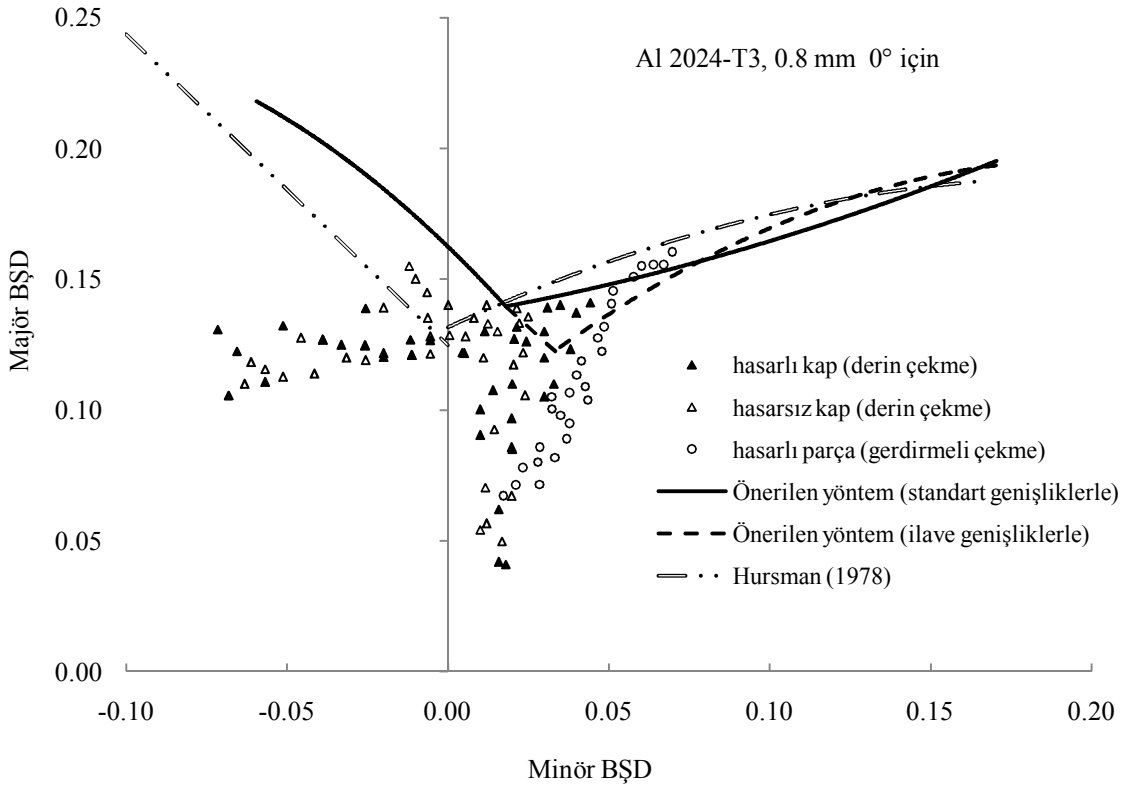
oluşuncaya kadar şekillendirilmiştir (Şekil 4.46.). Parçalar üzerinde ölçülen BŞD'ler ŞSD üzerine aktarılmıştır (Şekil 4.47.).

Şekil 4.47.'de görüldüğü üzere derin çekme prosesiyle elde edilen hasarlı kaptaki BŞD'ler, ASTM E 2218-02 standardına göre elde edilen eğrinin altında kalıp hasar yokmuş gibi yanlış bir bilgi verirken, ISO 12004-2 standardına göre elde edilen eğri parçanın hasarlı olduğunu doğrulamaktadır. Ayrıca hidrolik şişirme prosesiyle üretilen hasarsız bir iş parçasındaki BŞD'ler ASTM E 2218-02 standardına göre elde edilen eğrinin yukarısında kalmıştır. İş parçası hasarsız olmasına rağmen, ASTM'ye göre elde edilen eğri yanlış bir yargıyla parçada hasar oluştuğunu işaret etmektedir. Buna karşılık ISO 12004-2 standardına göre elde edilen eğri iş parçasında yırtık meydana gelmediğini göstermektedir.

ISO standardına göre elde edilen eğrinin güvenilirliği ispatlandıktan sonra, önerilen yönteme göre ve ilave genişlikler kullanılarak elde edilen eğrinin, literatürde elde edilenle karşılaştırmalı olarak, geçerliliğini test etmek amacıyla yapılan deneysel durum çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Hursman (1978) tarafından T3 temperi ve 0.8 mm kalınlık için elde edilen ŞSE ile bu çalışmada standart ve ilave genişlikler için

önerilen yönteme göre değerlendirme yapılarak elde edilen eğriler birbirinden oldukça farklıdır. Hangi ŞSE'nin güvenilir olduğunun belirlenmesi amacıyla, T3 temperindeki 0.8 mm sac kalınlığına sahip malzemeler için klasik derin çekme ve gerdirmeli çekme prosesleri kullanılarak durum çalışmaları yapılmıştır.

Klasik derin çekme prosesinde 82 mm ilkel çapa sahip sac numune, 60 mm çapa sahip silindirik stampayla yırtık başlangıcına kadar (Şekil 4.44.) ve 84 mm ilkel çapa sahip numune yırtık olacak şekilde şekillendirilmiştir. Gerdirmeli çekme prosesinde ise 100 mm çaplı stampayla yırtık oluşuncaya kadar şekillendirilmiştir (Şekil 4.45.). Elde edilen parçalardaki BŞD dağılımları her iki eğrinin olduğu diyagram üzerine aktarılmıştır (Şekil 4.48.).



Şekil 4.48. Önerilen yönteme göre elde edilen eğrinin durum çalışmasıyla güvenilirliğinin ortaya koyulması

Görüldüğü gibi yırtılmış hasarlı kaptaki BŞD dağılımı Hursman tarafından ve bu çalışmada standart genişlikler kullanılarak elde edilen ŞSE'lerin altında kalarak güvenli görünmekte iken, ilave genişlikler kullanılarak ve önerilen yönteme göre değerlendirme yapılarak elde edilen ŞSE, iş parçasında hasar meydana geldiğini doğrulamaktadır. Ayrıca hasarsız kaptaki BŞD'ler, Hursman (1978) tarafından elde edilen eğrinin

yukarısında kalarak hasar oluşmuş gibi gösterirken, önerilen yönteme göre elde edilen eğri parçada hasar oluşmadığını doğrulamaktadır. Gerdirmeli çekme prosesi ile şekillendirilen yırtık parçadaki BŞD'ler Hursman tarafından elde edilen ŞSE'nin altında kalıp güvenli görünerek yanlış bir bilgi verirken, önerilen yönteme göre elde edilen ŞSE parçada hasar oluştuğunu göstermektedir. Bu durumda SEY analizlerinde Hursman tarafından ve sadece standart genişlikler kullanılarak elde edilen eğriler güvenilir sonuçlar vermeyecektir.

Literatürde birçok çalışmada ŞSE'ler ISO standardına göre oluşturulmamış ve bunun sonucunda eğriler önemli ölçüde değişiklik göstermiştir. Ayrıca önceki çalışmalarda en düşük majör seviyesi hemen hemen *y* ekseni üzerinde elde edilmiştir. Durum çalışmalarıyla, deney yöntemi ISO standardına uygun yapılarak ve önerilen yönteme göre değerlendirmeyle elde edilen eğrilerin güvenilirliği açıkça ortaya konulmuştur. Ayrıca sac şekillendirme proseslerinde en kritik bölge olan bu bölgenin yerinin hassas olarak belirlenmesinin son derece önemli olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle ŞSE'nin elde edilmesi sırasında bu bölgede mutlaka ilave genişlikler kullanılarak deneyler yapılmasının daha güvenilir olacağı sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak analizlerde önerilen yöntemle elde edilen eğrinin kullanılması durumunda daha doğru tahminler yapılmış olacaktır.

Önerilen yönteme göre elde edilen eğrilerin güvenilirliği test edildikten sonra, bu çalışmanın esas konusu olan çeşitli kalınlıklar için elde edilen ŞSE'lerin geçerliliği güvenilir bir şekilde test edilebilir.

4.9.1.2. Çeşitli kalınlıklar için durum çalışmaları

Çeşitli kalınlıklar için ŞSE'lerdeki değişim önceki bölümlerde sayısal olarak incelenmiştir ve 0.8, 1.2, 1.6 ve 2 mm kalınlıkları için yapılan analizlerde farklı ŞSE'lerin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ancak çeşitli kalınlıklar için çizilen ŞSE'lerin sayısal değerlerle karşılaştırılması yeterli değildir ve bu farklılıkların birçok gerçek şekillendirme prosesleri için anlamlı olup olmadığının durum çalışmalarıyla gösterilmesi gerekir. Bu amaçla 0.8, 1.6 ve 2 mm sac kalınlığına sahip Al 2024-T4 malzemeler için ŞSE'nin birçok bölgesini kapsayacak tarzda klasik derin çekme, gerdirmeli çekme ve hidrolik şişirme prosesleri için yapılan deneysel ve sayısal durum çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Proseslerde ince numunelerin hasara uğradığı şartlarda kalın numuneler hasara uğramayıp daha fazla şekillendirilirse,

kalınlığın etkisinden kesin olarak söz edilecektir. Bunun kanıtlanması durumunda, her türlü sac şekillendirme prosesi için analizler kullanılarak genelleştirmeler yapılabilir.

Proseslerinin tümü için, hasar öncesine kadar şekillendirilmiş çeşitli kalınlıktaki parçalar için sınır değerler Çizelge 4.9.'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Çeşitli prosesler için deneysel durum çalışmasında belirlenen sınır değerler

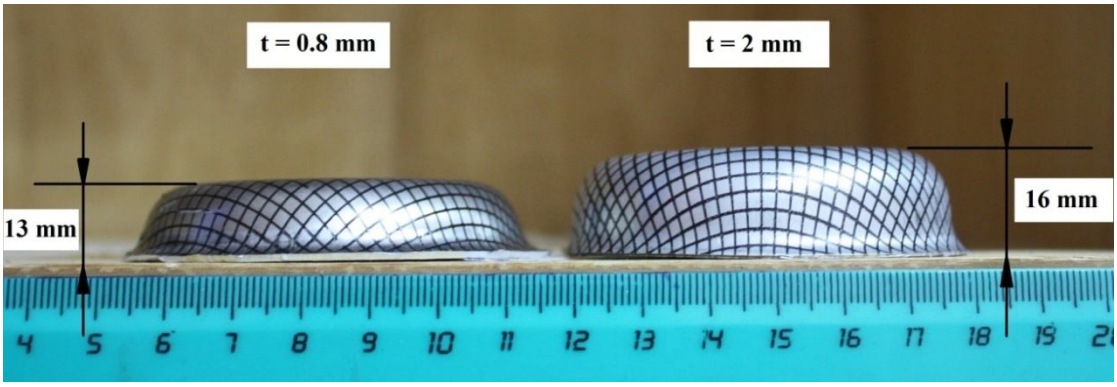
Proses	**Belirlenen sınır özellik**	**Sınır değerler**		
		t = 0.8 mm	**t = 1.6 mm**	**t = 2 mm**
Klasik derin çekme	Başarıyla çekilen ilkel çap, mm	82	-	86
Gerdirmeli çekme	Yırtılma yükseklikleri, mm	23	27	29
Hidrolik şişirme	Patlama basıncı, bar	140	410	495
	Sınır yükseklikler, mm	16	20	22

Tüm prosesler için sınır değerler belirlendikten sonra, aynı numuneler, gerdirmeli çekme prosesi için yırtılma yüksekliklerinden 2 mm ve hidrolik şişirme prosesi için patlama basınçlarından 5~10 bar daha küçük değerler kullanılarak yırtık öncesine kadar şekillendirilmiştir. Klasik derin çekme için başarıyla çekilen ilkel çap belirlendiği için parçalar zaten yırtık başlangıcına kadar şekillendirilmiştir.

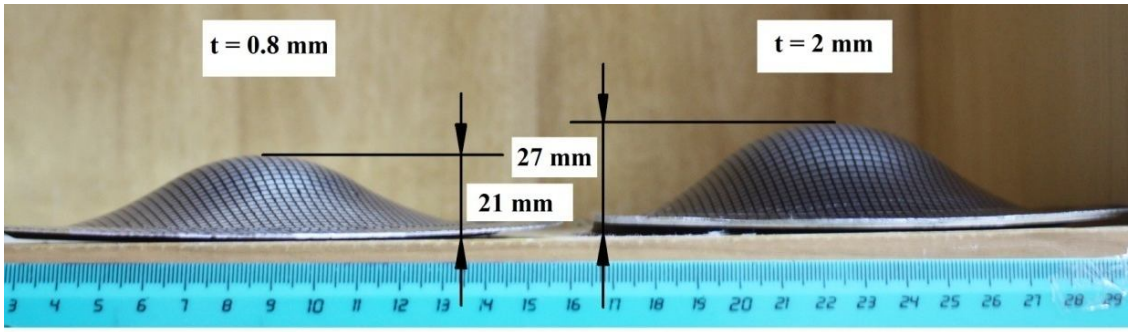
Yırtık öncesine kadar başarılı olarak şekillendirilen parçaların yükseklikleri Çizelge 4.10.'da, 0.8 ve 2 mm kalınlıkları için parça yükseklikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.49.'da ve parçaların üzerinden bilgisayarlı grid analiz yöntemiyle ölçülerek elde edilerek ŞSD'ler üzerine aktarılan gerçek BŞD dağılımları Şekil 4.50. ila Şekil 4.52.'de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Al 2024-T4 için deneysel durum çalışmalarında elde edilen parça sınır yükseklikleri

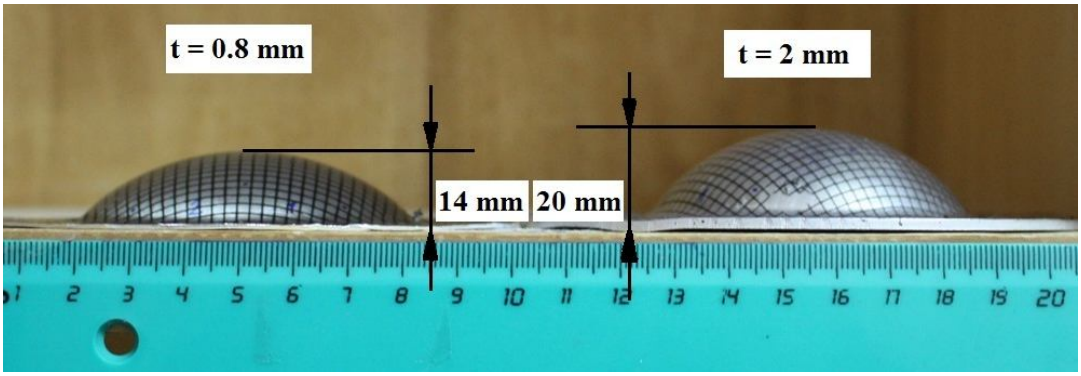
	Maksimum yükseklik, mm		
Proses	**t = 0.8 mm**	**t = 1.6 mm**	**t = 2 mm**
Klasik derin çekme	13	-	16
Gerdirmeli çekme	21	25	27
Hidrolik şişirme	14	18	20



a)

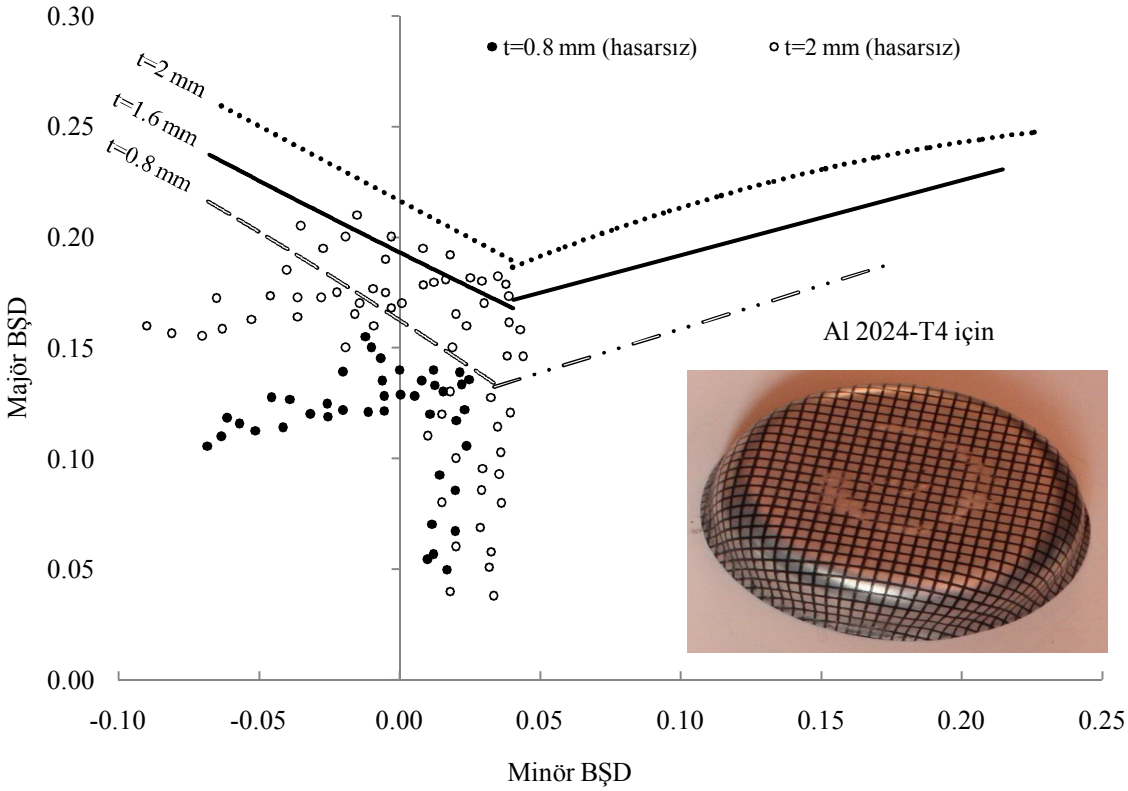


b)

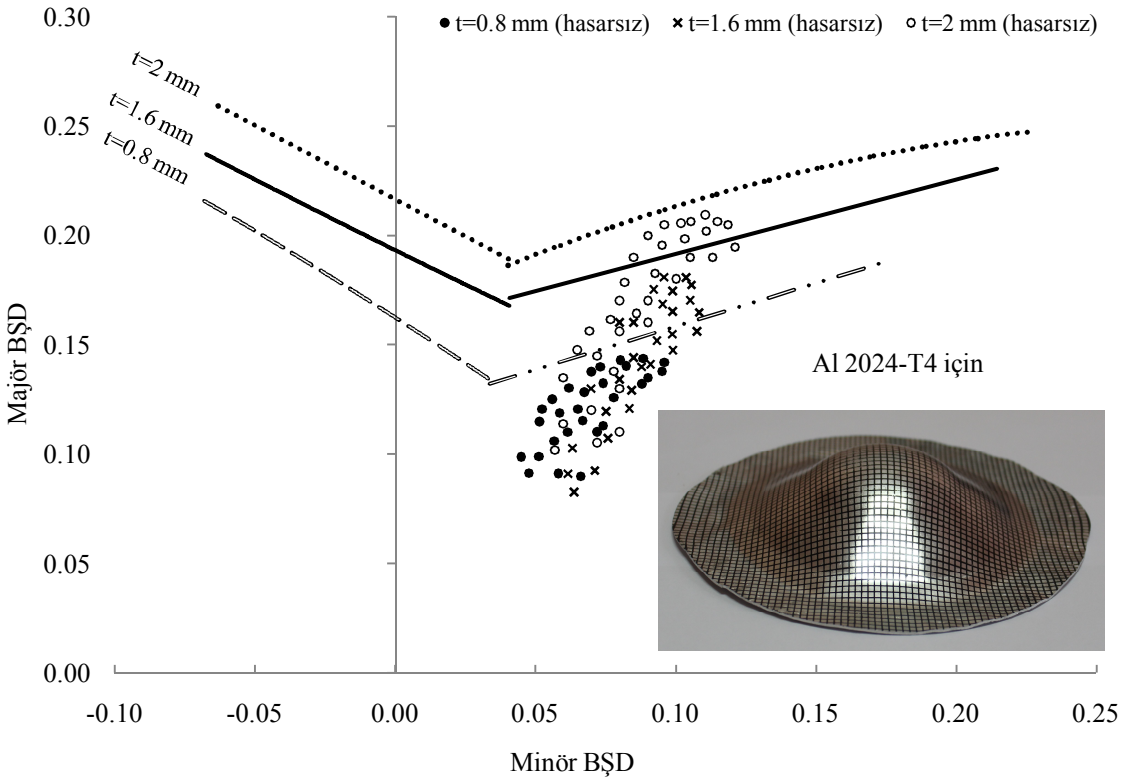


c)

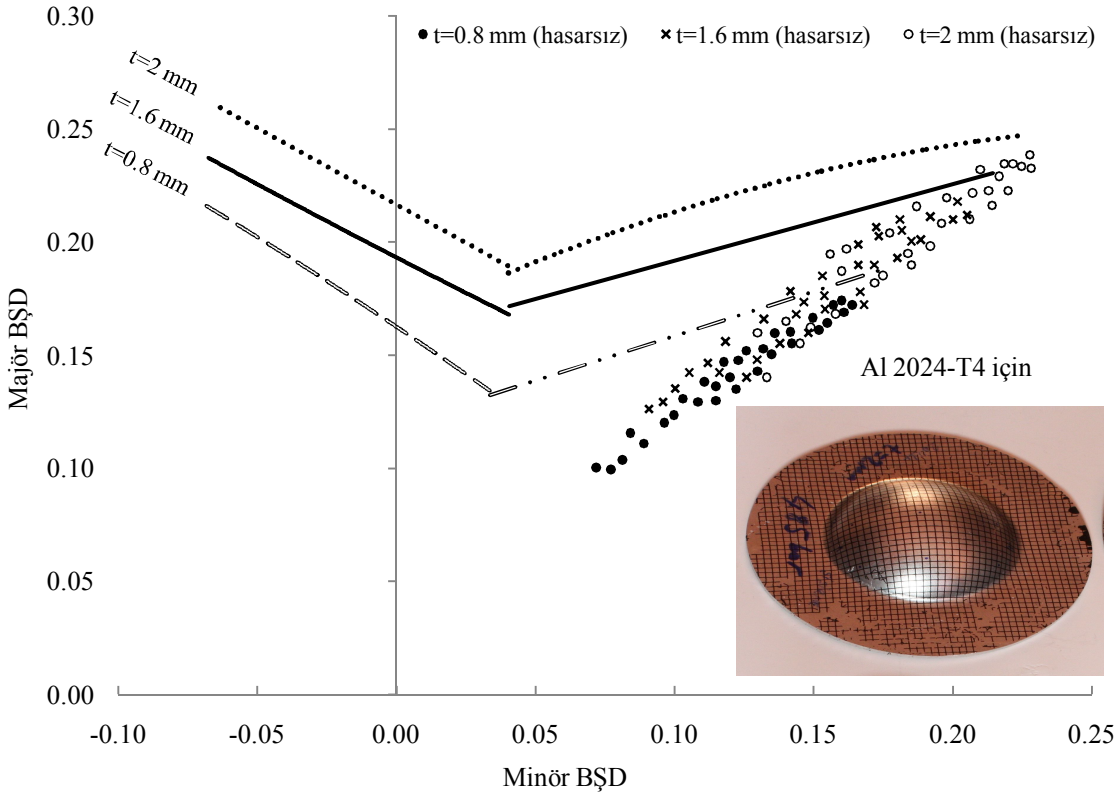
Şekil 4.49. Al 2024-T4 için deneysel durum çalışmalarında çeşitli kalınlıklar için elde edilen parçaların sınır yükseklikleri, a) klasik derin çekme, b) gerdirmeli çekme ve c) hidrolik şişirme prosesi



Şekil 4.50. Klasik derin çekme deneysel durum çalışması



Şekil 4.51. Gerdirmeli çekme deneysel durum çalışması

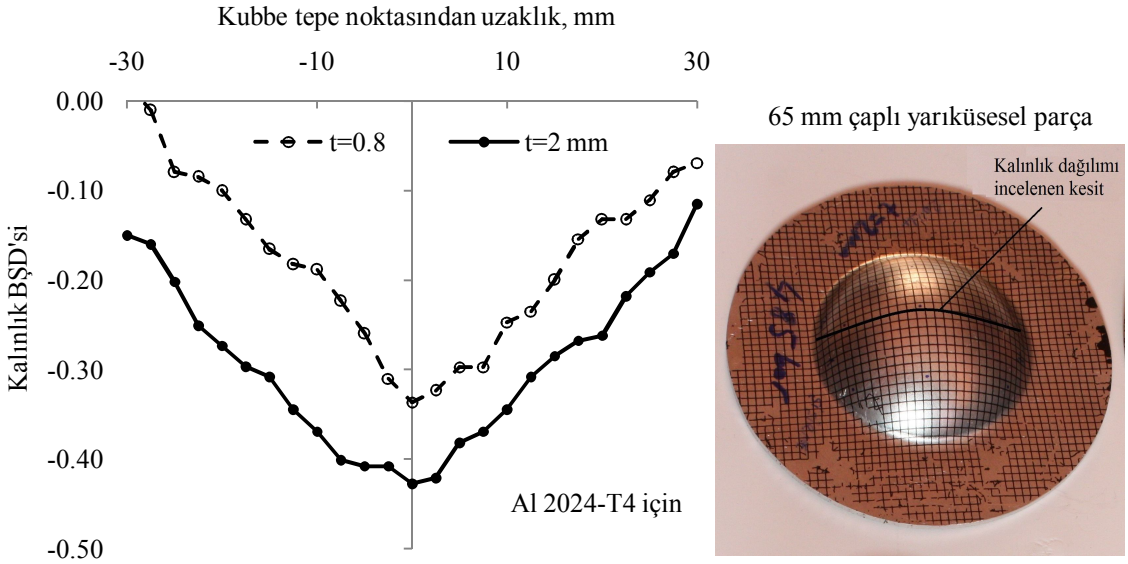


Şekil 4.52. Hidrolik şişirme deneysel durum çalışması

Yapılan durum çalışmalarıyla ŞSE'lerin büyük bir bölümü test edilmiştir. Görüldüğü gibi tüm prosesler için hasara uğramamış kalın parçalardan ölçülen BŞD'lerin büyük bir kısmı daha düşük kalınlıklara ait ŞSE'lerin yukarısında elde edilmiştir. Çeşitli kalınlıklar için yırtılmış parçalardan ölçme yapıldığında ise elde edilen BŞD'lerin bir kısmı ilgili ŞSE'nin yukarısında kalmıştır. Dolayısıyla ŞSE'lerin güvenilir bir şekilde elde edildiği açıkça görülmektedir. Ayrıca sac kalınlığı arttıkça şekillendirilen parça yükseklikleri önemli ölçüde artmıştır (Çizelge 4.10.). Böylece çeşitli kalınlıklar için farklı ŞSE'lerin kullanılmasının gerekliliği açık bir şekilde tespit edilmiştir.

Hidrolik şişirme prosesi ile şekillendirilen çeşitli kalınlıklara sahip parçalardaki kubbe tepe noktasından geçen orta kesit boyunca gerçek kalınlık BŞD dağılımı incelendiğinde, 2 mm için kalınlık BŞD'si hasarın oluştuğu orta bölgede - 0.42 BŞD iken, 0.8 mm için - 0.33 BŞD değerindedir (Şekil 4.53.). Bu değerler de ŞSE'lerle uyumludur. 0.8 mm kalınlığında hidrolik şişirme ile şekillendirilen bir parçanın analizinde hasar kriteri olarak 2 mm için elde edilen maksimum kalınlık BŞD değerinin

kullanılması durumunda yapılan tahmin yanlış olacaktır. Tersi durumda ise malzemelerin şekillendirilebilirliğinden tam olarak faydalanılamamış olacaktır.



Şekil 4.53. Hidrolik şişirme durum çalışmasında elde edilen parçaların kalınlık dağılımı

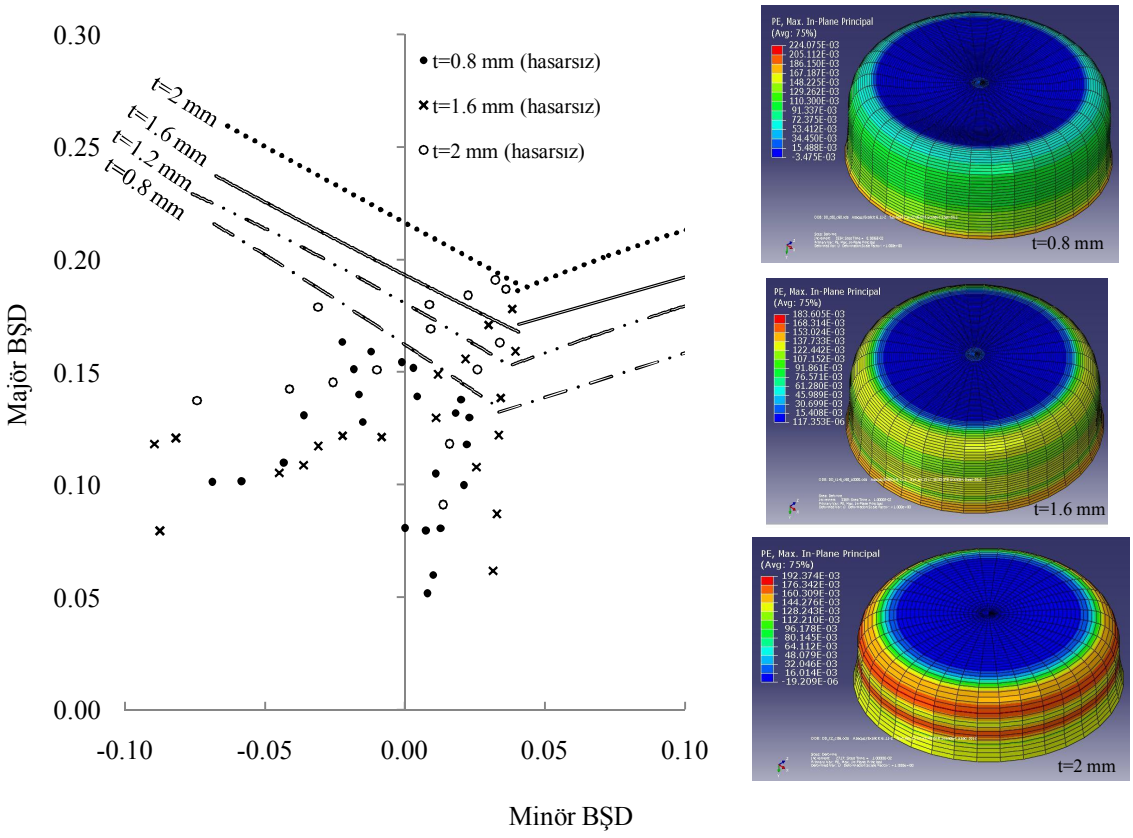
4.9.2. Sayısal durum çalışmaları

Bu bölümde yukarıda anlatılan çeşitli kalınlıklar için durum çalışmalarının lisanslı Abaqus v6.9.1. yazılımı kullanılarak yapılan analiz sonuçları verilmiştir. Analizler yapılırken proseslerden elde edilen bazı deneysel verilerinden faydalanılmıştır. Analizlerin yapılmasında kullanılan ve analiz sonucunda incelenen özellikler Çizelge 4.11.'de özet olarak verilmiştir.

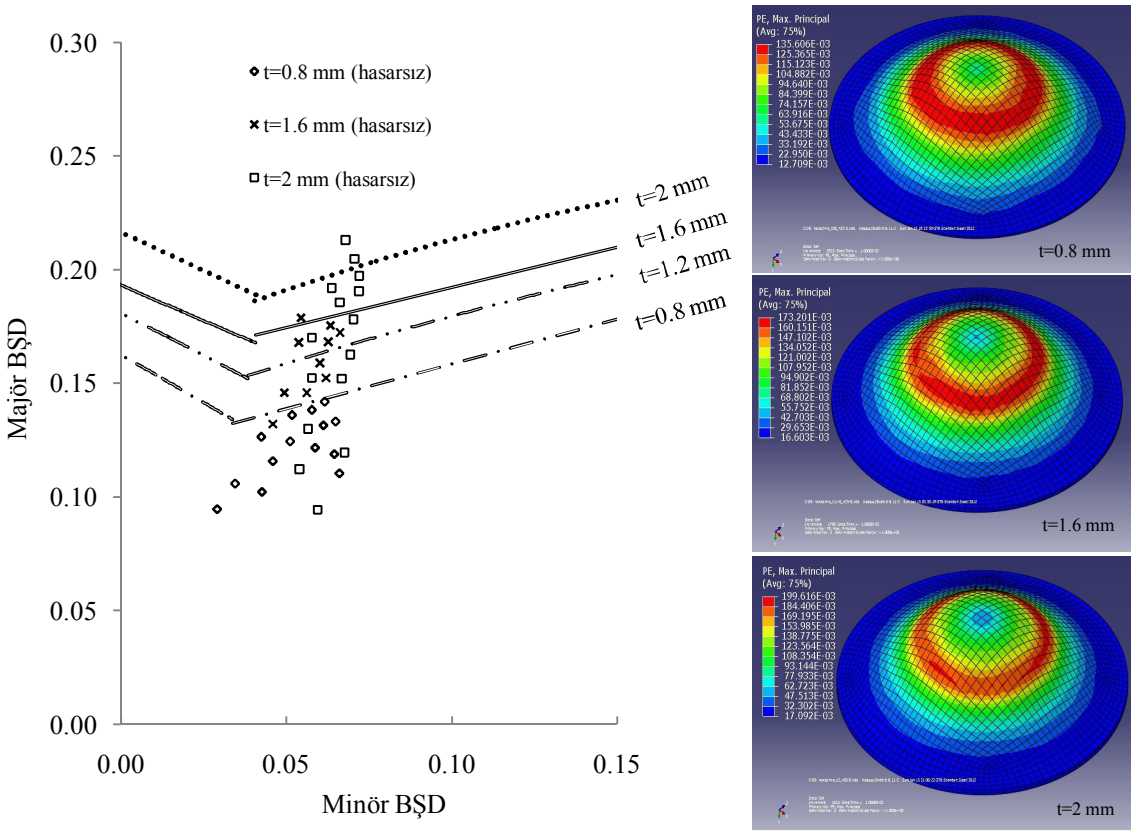
Klasik derin çekme, gerdirmeli çekme ve hidrolik şişirme prosesleri için analizlerden elde edilerek ŞSD'ler üzerine aktarılan gerçek BŞD'ler sırasıyla Şekil 4.54. ila Şekil 4.56.'da verilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen BŞD değerlerinin çok fazla olması karmaşıklığa neden olduğundan veriler sadeleştirilerek verilmiştir. Görüldüğü gibi analizlerden elde edilen BŞD dağılımları deneysel verilerle uyum içerisinde olduğundan, analizlerin başarıyla yapıldığı söylenebilir. Tüm prosesler için kalın parçalardan elde edilen BŞD'lerin büyük bir kısmı daha düşük kalınlıklara ait ŞSE'lerin yukarısında kalmıştır. Böylece çeşitli kalınlıklar için farklı ŞSE'lerin kullanılması gerektiği analizlerle de ortaya konulmuştur.

Çizelge 4.11. Analizlerde kullanılan değerler ve incelenen özellikler

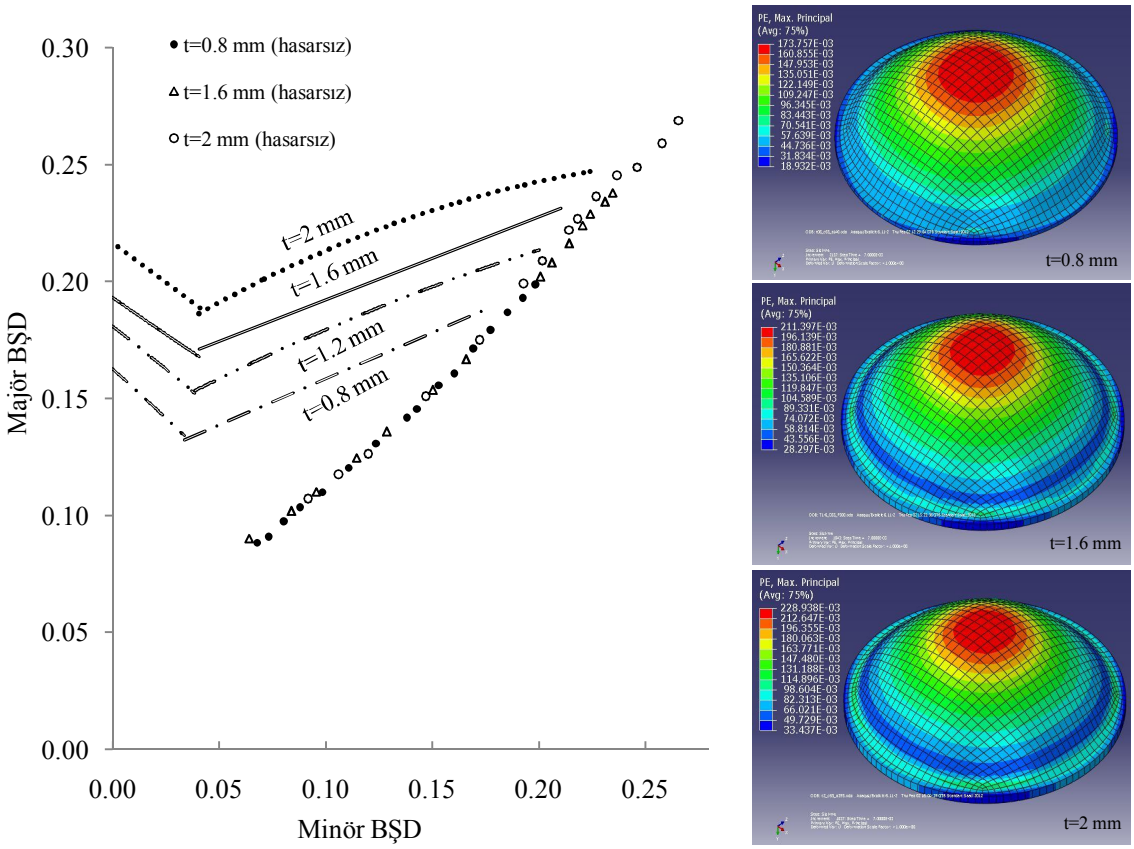
Proses	Sürtünme katsayısı	Analizlerde kullanılan deneysel veri/ler	İncelenen özellik/ler
klasik derin çekme	• sac-stampa yüzey çifti için 0.36 • sac-baskı plakası yüzey çifti için 0.05	• baskı plakası kuvveti (kalınlığa göre sabit) • maksimum ilkel çap (kalınlığa göre değişiyor) • kap yükseklikleri (kalınlığa göre değişiyor)	• kap üzerindeki BŞD dağılımı
gerdirmeli çekme		• baskı plakası kuvveti (kalınlığa göre sabit) • kap yükseklikleri (kalınlığa göre değişiyor)	• parça üzerindeki BŞD dağılımı
hidrolik şişirme	• sürtünmesiz	• sınır basınç değerleri (kalınlığa göre değişiyor)	• parça üzerindeki BŞD dağılımı • parça yüksekliği



Şekil 4.54. Klasik derin çekme sayısal durum çalışması



Şekil 4.55. Gerdirmeli çekme sayısal durum çalışması



Şekil 4.56. Hidrolik şişirme sayısal durum çalışması

Bazı analizlerde BŞD'ler ilgili ŞSE'nin biraz yukarısında kalmıştır. Bu durum analizlerdeki sürtünme katsayısının kabulünden kaynaklanabilir. Zaten analiz sonucunun ŞSE'nin biraz yukarısında olması emniyetli tarafta kalınmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak Al 2024-T4 için, sac kalınlığı artışı ile ŞSE seviyesinde şekillendirme işlemlerinde önemli olabilecek bir artış olduğu ve 0.8, 1.2, 1.6 ve 2 mm kalınlıklar için mutlaka farklı ŞSE'lerin kullanılması gerektiği deneysel ve sayısal olarak açıkça ortaya konulmuştur. Bu durumda Al 2024-T4 için çeşitli kalınlıklarda ve farklı proseslerde analizler güvenle yapılabilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu doktora tez çalışmasında Al 2024-T4 alaşımının oda sıcaklığındaki Şekillendirme Sınır Eğrisinin (ŞSE) sac kalınlığına göre değişimi deneysel olarak incelenmiştir. ŞSE'ler oluşturulmadan önce, ASTM E 2218-02 (Ağustos 2002) ve ISO 12004-2 (Ekim 2008) standartlarının hangisinin kullanılmasının uygun olacağı araştırılmış ve ISO standardına göre elde edilen eğrilerin daha güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmada sınır BŞD'leri belirleyebilmek amacıyla, bilgisayarlı grid analizi ölçme sistemi kullanılarak "hasarsız gridden hasarlıya ekstrapolasyon" olarak adlandırılan yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem kullanılarak, ISO standardının karmaşık hesaplamalarına girmeden ve Şekillendirme Sınır Eğrilerini ISO 12004-2 standardına uygun ve güvenilir olarak otomatik elde edebilen ancak pahalı olan gerçek zamanlı ölçme sistemlerine gerek duymadan sınır BŞD'ler basitçe ve güvenilir olarak belirlenebilmiştir. Elde edilen ŞSE'lerde en düşük ŞSE noktasının, y ekseni üzerinde (düzlem birim şekil değiştirme durumu) olması gerekirken sağa ötelenmiş olarak elde edilmesinin sebepleri araştırılmıştır. ŞSE'lerin en düşük noktasının konumunu hassas olarak belirlemek amacıyla standart genişlikteki numunelere ek olarak, eğrinin bu bölgesini oluşturacak ilave genişlikler için de deneyler yapılmıştır. Al 2024-T4 alaşımının 0.8, 1, 1.2, 1.6 ve 2 mm sac kalınlıkları için ŞSE'leri önerilen yönteme göre elde edilmiş ve ŞSE'lerdeki değişimlerin sebebini daha iyi açıklayabilmek amacıyla numunelerin hasar mekanizmaları incelenmiştir. Son olarak elde edilen ŞSE'lerin geçerliliğini test etmek amacıyla, klasik derin çekme, gerdirmeli çekme ve hidrolik şişirme prosesleri için deneysel ve sayısal durum çalışmaları yapılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ŞSE'lerin oluşturulmasında kullanılan ASTM E 2218-02 ve ISO 12004-2 standartları birbirleriyle karşılaştırıldığında, ISO standardına göre şekillendirilen numunelerde daha üniform bir BŞD dağılımı elde edilmesi sonucunda, sınır BŞD için daha net bir değer belirlenebilmiştir ve bu durum ŞSE'lerin daha iyi tekrarlanabilirlikle oluşturulmasını sağlamıştır. Ayrıca ASTM E 2218-02 standardına göre deneyler, en geniş numune hariç, kuru şartta yapıldığından, sürtünmenin etkisiyle küçük minör BŞD'ler elde

edilebilmekte ve bu nedenle mümkün olabilecek tüm BŞD kombinasyonları belirlenebilmektedir. Buna karşılık ISO 12004-2 standardına göre yapılan deneyler neredeyse sürtünmesiz şartta yapıldığından, mümkün olabilecek tüm kombinasyonlar elde edilebilmektedir. Böylece ISO standardına göre elde edilen eğri tüm şekillendirme işlemlerini temsil edecektir. Yapılan durum çalışması sonucunda ISO standardına göre elde edilen eğrinin ASTM'ye göre elde edilenden daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle ŞSE'ler ISO 12004-2 standardına göre oluşturulmalıdır.

- Gerçek zamanlı ölçme sistemleri kullanılarak ŞSE'ler, ISO 12004-2 standardına göre hızlı ve güvenilir olarak oluşturulabilmektedir. Ayrıca numunelerin üzerine uygulanan rastgele benekli yapılar sayesinde yırtık bölgesine oldukça yakın bölgelerdeki BŞD'ler ölçülebilmektedir. Ancak bu ölçme sistemleri oldukça pahalıdır. Bu sistemlere alternatif olan grid analiz sistemlerinde ise ŞSE'lerin oluşturulmasında tüm malzemeler için geliştirilmiş bir model kullanılmadığından dolayı birçok malzeme için sınır BŞD değeri belirlenememekte ve ayrıca bu sistemlerle sadece tam grid çizgileri kullanılarak ölçme yapılabilmektedir. Önerilen "hasarsız gridden hasarlıya ekstrapolasyon" yöntemi kullanılarak, pahalı olan gerçek zamanlı ölçme sistemlerine gerek duymadan ve ISO'da belirtilen karmaşık hesaplamalarla uğraşmadan, grid analiz yöntemindeki bu problemin üstesinden gelinmiş ve sınır BŞD'ler kolayca ve güvenilir olarak belirlenebilmiştir. Önerilen yönteme göre elde edilen sınır BŞD'ler, Al 2024-T4 alaşımının yanı sıra, farklı karakteristiğe sahip malzemeler için de, ISO 12004-2 standardına göre değerlendirmeyle elde edilenlerle oldukça uyumlu olmuştur. Böylece önerilen yöntemin geçerliliği ve uygunluğu açıkça ortaya konulmuştur.
- $ŞSE_0$ olarak da adlandırılan, en düşük majör değeri literatürde *y* ekseni üzerinde olup minör BŞD'si sıfır olmaktadır. Bu çalışmada standart genişliklerle elde edilen en düşük majör değeri *y* eksenine göre 0.02 minör BŞD sağa ötelenmiş olarak elde edilmiştir. En düşük majör BŞD değerinin konumunun güvenilir ve kesin olarak belirlenebilmesi için, bu bölgedeki standart genişlikli numunelere ek olarak 2'şer mm aralıklarla ilave genişlikler için de deneyler yapılarak ötelenme miktarının 0.04 BŞD'ye çıktığı görülmüştür. Yapılan durum çalışması sonucunda, yırtılarak hasara uğramış iş

parçasındaki BŞD dağılımı, standart genişlikler kullanılarak elde edilen ve literatürde verilen ŞSE'nin altında kalarak güvenli görünürken, ilave genişlikler kullanılarak elde edilen ŞSE iş parçasında hasar meydana geldiğini doğrulamıştır. Sonuç olarak tüm malzemeler için ŞSE'ler elde edilirken en düşük majör değerini oluşturacak ilave genişlikler için de deneyler yapılmalıdır.

- Ötelenmenin sebepleri araştırıldığında, 0.023 BŞD'lik kısmının ısıl işlem ve süzdürme çubuğuyla bastırma sebebiyle oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca BŞD'ler numunelerin iç ve dış yüzeylerinden ölçülerek eğilme etkisiyle, kalınlığa göre 0.007~0.011 minör BŞD aralığında ötelenmenin de olabileceği ortaya konulmuştur.
- Al 2024-T4 malzemenin 0.8, 1.2, 1.6 ve 2 mm kalınlıkları için elde edilen ŞSE'leri arasındaki fark, ŞSE'lerin elde edilmesindeki belirsizlik değerinden büyük olduğundan, bu kalınlıklar için farklı ŞSE'lerin kullanılması gerektiği ve aradaki kalınlıklar için bir alt seviyedeki ŞSE'nin kullanılmasının uygun olacağı durum çalışmalarıyla da doğrulanmıştır. Durum çalışmalarında tüm prosesler için hasara uğramamış kalın parçalardan ölçülen BŞD'lerin büyük bir kısmı daha düşük kalınlıklara ait ŞSE'lerin yukarısında ve BŞD'lerin tamamı kendi ŞSE'sinin aşağısında elde edilmiştir. Üretilen parça yükseklikleri incelendiğinde ise, kalın parçalar ince parçalardan daha fazla yüksekliklere kadar şekillendirilebilmiştir. Sonuç olarak Al 2024-T4 için, ŞSE'lerin güvenilir bir şekilde elde edildiği ve sac kalınlığı artışı ile ŞSE seviyesinde şekillendirme işlemlerinde önemli olabilecek bir artış olduğu ve 0.8, 1.2, 1.6 ve 2 mm kalınlıklar için mutlaka farklı ŞSE'lerin kullanılmasının gerekliliği açık bir şekilde gösterilmiştir. Bu sonucun geçerliliği analizlerle de doğrulandığından, çeşitli kalınlıklarda ve farklı proseslerde daha hassas analizler yapılması istenirse farklı kalınlıklar için farklı ŞSE'ler kullanılmalıdır.
- 0.8, 1 ve 2 mm kalınlıklarına sahip Al 2024-T4 malzemelerin 0°, 45° ve 90° doğrultuları için elde edilen ŞSE'lerden en yüksek ve en düşük olanı arasındaki farklar, tüm kalınlıklar için maksimum 0.01 BŞD dir. Bu değer ŞSE'lerin elde edilmesindeki belirsizlik değerinden küçük olduğundan, haddeleme doğrultusuna göre önemli olabilecek seviyede değişiklik olmadığı

sonucuna varılmıştır. Bu durumda bütün haddeleme doğrultuları için aynı ŞSE kullanılabilir.

5.2. Öneriler

- Al 2024-T4 gibi nispeten gevrek yapıya sahip alüminyum saclar için kalınlığının şekillendirme sınır eğrisine etkisi üzerine teorik bir model geliştirilebilir.
- Sünek karakteristiğe sahip alüminyumlar için de sac kalınlığının şekillendirme sınır eğrisine etkisi ISO 12004-2 (Ekim 2008) standardına göre incelenmelidir.
- ŞSE'ler BŞD yolunun doğrusal olduğu durumlar için geçerli olduğundan, ön BŞD uygulanmış ve şekillendirme sırasında BŞD yolu doğrusal olmayan karmaşık prosesler için ŞSE'ler kullanılarak şekillendirme sınırı doğru bir şekilde tahmin edilemeyebilir. Bu nedenle Al 2024 için kalınlığa göre şekillendirme sınırının değişiminin, önceki şekil değiştirmelerden ve BŞD yolundan bağımsız olan Şekillendirme Sınır Gerilme Eğrisi ile ortaya koyulmasında fayda vardır.

6. KAYNAKLAR

Altan, T., 1998, Metal Forming Handbook, Schuler, *Springer-Verlag*, Berlin Heidelberg.

Anonymous, 1966, Military Standardization Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, MIL-HDBK-694A (MR), Watertown.

Anonymous, 2002, Engineering Handbook Series for Aircraft Repair General Manual for Structural Repair, Second Edition; NAVWEPS 01-1A-1; T.O. 1-1A-1.

Aretz, H., 2007, Numerical Analysis of Diffuse and Localized Necking in Orthotropic Sheet Metals, *International Journal of Plasticity*, 23, 798–840.

ASTM International, Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves, Designation: E 2218-02, August 2002.

Banabic, D. et al., 2000, Formability of Metallic Materials, Springer-Verlag, Germany.

Banabic, D. et al., 2007, Anisotropy and Formability, *Advances in Material Forming*, 143-173.

Boogaard, T., 2002, Thermally Enhanced Forming of Aluminium Sheet Modeling and Experiments, Ph.D. Thesis, *Universiteit Twente*, Netherlands.

Bressan, J.D., 2008, Influence of Thickness Size in Sheet Metal Forming, *International Journal of Material Forming*, 1, 117-119.

Bron, F. et al., 2004, Ductile Rupture in Thin Sheets of Two Grades of 2024 Aluminum Alloy, *Material Science and Engineering A*, 380, 356-364.

Brooks, C.R., 1991, ASM Handbook Volume 4, Heat Treating, Principles of Heat Treating of Nonferrous Alloys, *ASM International*.

Brunet, M. and Morestin, F., 2001, Experimental and Analytical Necking Studies of Anisotropic Sheet Metals, *Journal of Material Processing Technology*, 112, 214-226.

Campbell, F.C., 2006, Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, First Edition, *Elsevier Ltd.*, Great Britain.

Cantor, B. et al., 2001, Aerospace Materials, *IOP Publishing Ltd*, U.K.

Carasusan, E. and Canal, F., 2003, An Automated Procedure for Non-Contact Strain Analysis of Sheet Metal Parts, *Emerging Technologies and Factory Automation*, 2 (16-19), 724 - 731.

Casari, F. et al., 2006, Effect of Punch Diameter, Grid Dimension and Lubrication on Forming Limit Diagram, *Journal of Testing and Evaluations*, 34(1), 24-30.

Charpentier, P.L., 1974, Influence of Punch Curvature on the Stretching Limits of Sheet Steel, *Metallurgical Transactions A*, 6A, 1665-1669.

Chu, C.C. and Needleman, A., 1980, Void Nucleation Effects in Biaxially Stretched Sheets, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 102, 249-256.

Dieter, G.E., 1988, Mechanical Metallurgy, McGraw Hill Book Company, London.

Dieter, G.E., 2000, Mechanical Behavior Under Tensile and Compressive Loads, *Mechanical Testing and Evaluation*, ASM Vol.8.

Djavanroodi, F. and Derogar, A., 2010, Experimental and Numerical Evaluation of Forming Limit Diagram for Ti6Al4V Titanium and Al6061-T6 Aluminum Alloys Sheets, *Materials and Design*, 31, 4866–4875.

Dorward, R.C., 1994, Forming Characteristics of Coarse and Fine-Grained 2024 Aluminum Alloy Sheet, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 3(1), 115-121.

Elwin, L.R., 1990, ASM Handbook Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys, *ASM International*, America.

Emilie, H. et al., 2008, Development of Forming Limit Diagrams of Aluminum and Magnesium Sheet Alloys at Elevated Temperatures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17 (3), 288-296.

Engl, B. and Schneider, C., 1998, ULSAB-The Ultra Light Steel Auto Body, *Proc. of the SheMet298*, Enschede/Holland, April 6-8, 3-11.

Friedman, P.A. and Pan, J., 2000, Effects of Plastic Anisotropy and Yield Criteria on Prediction of Forming Limit Curves, *International Journal of Mechanical Sciences*, 42, 29-48.

Fukui, Y. and Nakanishi, K., 1988, Effects of Sheet Thickness on the In-Plane Stretch Forming Limit in an Aluminum Sheet, *JSME International Journal*, Series I, 31 (4), 679-685.

Gedney, R., 2002, Sheet Metal Formability, *Advanced Materials & Processes*, 33-36.

Ghosh, A.K. and Hecker, S.S., 1974, Stretching Limits in Sheet Metals: In-Plane Versus Out-of-plane Deformation, Metallurgical Transactions, 5, 2161-2164.

Goodwin, G.M., 1968, Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, *Society of Automotive Engineers*, No:680093, 380-387.

Gotoh, M. et al., 1986, *J. Jpn. Soc. Plast*., 27, 268-272.

Graf, A. and Hosford, W.F., 1990, Calculations of Forming Limit Diagrams, *Metallurgical Transactions A*, 21A, 87-94.

Graf, A.F. and Hosford, W.F., 1993, Effect of Changing Strain Paths on Forming Limit Diagrams of Al 2008-T4, *Metallurgical and Materials Transactions*, 24A, 2497-2512.

Gronostajski, J. and Dolny, A., 1980, Les Mem. Sci. Rev. Metall., 77 (4), 570-578.

Hariharan, K., Balaji, C., 2009, Material optimization: A case study using sheet metal-forming analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 324–331.

Hatipoğlu, H.A., 2007, Experimental and Numerical Investigation of Sheet Metal Hydroforming (Flexforming) Process. Master Sci. Thesis, *Middle East Technical University*, Ankara.

Hecker, S.S., 1975, Simple Technique for Determining Forming Limit Curves, *Sheet Met. Ind.*, 52, 671-676.

Holmberg, S. et al., 2004, Evaluation of Sheet Metal Formability by Tensile Tests, *Journal of Materials Processing Technology*, 145, 72–83.

Hosford, W.F. and Caddell, R.M., 1993, Mechanics and Metallurgy, 2nd Edition, *Prentice Hall Inc.*, USA.

Hosford, W.F., Duncan, J.L., 1999, *JOM*, 51, 39.

Hosford, W.F. and Caddell, R.M., 2007, Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, Third Edition, *Cambridge University Press*, New York.

Hospers, F., 1977, Formability: Relation between Workhardening, Anisotropy and Forming Limit Diagram, Report LR-242A, Netherlands.

http:// www.gom.com [Ziyaret Tarihi: 12 Temmuz 2011]

http://www.keytometals.com [Ziyaret Tarihi: 6 Haziran 2011]

Hursman, T.L., 1978, Development of Forming Limit Curves for Aerospace Aluminum Alloys, Formability Topics-Metallic Materials, ASTM STP 647, B.A. Niemeler, A.K. Schmieder and J.R. Newby, Eds., *American Society for Testing and Materials*, 122-149.

Hussain et al., 2008, An Experimental Study on The Effect of Thinning Band on the Sheet Formability in Negative Incremental Forming, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 1170-1178.

Hutchinson, R.W. and Neale, K.W., 1978, Sheet Necking - II Time Independent Behavior, Mechanics of sheet metal forming, Editors: D.P Koistinen and N.M. Wang, *Plenum Press*, New York/London, 127-153.

International Standard, ISO 12004-2, October 2008, Metallic Materials-Sheet and strip-Determination of forming limit curves.

Issa, J., 2004, Forming Limit Diagrams, Master Thesis, *Michigan State University*, United States.

Jahromi, S.A.J., et al., 2006, Investigation of Formability of Low Carbon Steel Sheets by Forming Limit Diagrams, *Iranian Journal of Science&Technology*, Transaction B, Engineering, 30 (B3), 377-385.

Jalinier, J.M. and Schmitt, J.H., 1982, Damage in Sheet Metal Forming-II. Plastic Instability, *Acta Metall*., 30, 1799-1809.

Jie, M., 2003, Generalized Criteria for Localized Necking in Sheet Metal Forming, Doctoral thesis, *University of Michigan*.

Kari, M. et al., 2008, Grid Patterns by Laser for Forming Strain Analysis, *International Journal of Material Forming*, 1(1), 249-252.

Keeler, S.P., 1961, Plastic Instability and Fracture in Sheet Stretched Over Rigid Punches, Massachusetts Institute of Technology.

Keeler, S.P. and Backofen, W.A., 1963, Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched Over Rigid Punches, *Transactions of American Society for Metals*, 56, 25-48.

Keeler, S.P., 1968, Circular Grid System- A Valuable Aid for Evaluating Sheet-Metal Formability, *Sheet metal industries*.

Keeler, S.P., 1974, Advances in Deformation Processing, 21st Sagamore Conf., *Plenum Press*, New York, NY, 127-157.

Keeler, S.P. and Brazier, W.G., 1977, Relationship Between Laboratory Material Characterization and Press Shop Formability, *Microalloying 75 Proceedings*, 517-528, Union Carbide Corp., New York.

Kim, H. J. and Lee, D., 1996, Further Development of Experimental Methods to Verify Computer Simulations, *Proceedings of NUMISHEET*, Dearbom, Michigan, USA, 316-323.

Kim, Y. et al., 2003, Forming Limits for Anisotropic Sheet Metals, *JSME International Journal*, Series A, 46 (4), 627-634.

Kleemola, H.J., Kumpulainen, J.O., 2003, Factors Influencing the Forming Limit Diagram: Part II Influence of Sheet Thickness, *J. Mech. Working Technol.*, 3, 303-311.

Kohara, S., 2005, Influence of Strain Path on the Forming Limit Curve in Aluminum, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36A, 1033-1037.

Kumar, D.R., 2002, Formability Analysis of Extra-Deep Drawing Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, 31–41.

Lamberts, S., 2005, Effect of EDT on Formability of Aluminum Automotive Sheet, NGTC (Novelis Global Technology Centre) Report.

Laukonis, J.V. and Ghosh, A.K., 1978, Effects of Strain Path Changes on the Formability of Sheet Metals, *Metallurgical Transactions A*, 9A, 1849-1856.

Lee, A.P. and Hiam, J.R., 1978, *Sheet Met. Ind.*, 55, 631-641.

Lee, W.B. et al., 1997, Damage Evolution and Forming Limit Predictions of an 2024-T3 Aluminium Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 100-104.

Lewison, D.J., 1999, An Assessment of Different Experimental Methods for Determination of Forming Limits, Master's Thesis, *Rensselaer Polytechnic Institute*.

Lewison, D.J. and Lee D., 1999, Determination of Forming Limits by Digital Image Processing Methods.

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

Marciniak, Z. Kuczynski, K. and Pokora, T., 1973, Influence of a Material on the Forming Limit Diagram for Sheet Metal in Tension, *Int. J. Mech. Sci.*, 15, 789-805.

Marciniak, Z., Hu, S.J., Duncan, J.L., 2002, Mechanics of Sheet Metal Forming, *Butterworth-Heinemann*, London.

Moshksar, M.M. and Mansorzadeh, S., 2003, Determination of the Forming Limit Diagram for Al 3105 Sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 141, 138–142.

Nakajima, K. et al., 1971, Study on Formability of Steel Sheets, *Yawata Tech. Rep.*, 284, 678-680.

Narayanasamy, R., Narayanan, S.C., 2007, Experimental Analysis and Evaluation of Forming Limit Diagram for Interstitial Free Steels, *Materials and Design*, 28, 1490-1512.

Needleman, A. and Triantafyllidis, N., 1978, Void Growth and Local Necking in Biaxially Stretched Sheets, *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, 100, 164-169.

Ogórek, A. and Stachowicz, F., 2005, Determination of Forming Limits of Thin Aluminium Sheets, *Int. Multidisciplinary Conf. 6-th Edition*, Baia Mare, 551-556.

Ortiz, D. et al., 2007, Effect of Cold Work on the Tensile Properties of 6061, 2024 and, 7075 Al Alloys, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 16 (5), 515-520.

Öztürk, F., 2002, Analysis of Forming Limits Using Ductile Fracture Criteria, Ph.D. Thesis, *Rensselaer Polytechnic Institute*, Troy, New York.

Öztürk, F. and Lee, D., 2004, Analysis of Forming Limits Using Ductile Fracture Criteria, *Journal of Materials Processing Technology*, 147, 397–404.

Öztürk, F. and Lee, D., 2005, Experimental and Numerical Analysis of Out-of-plane Formability Test, *Journal of Materials Processing Technology*, 170, 247-253.

Öztürk, F. et al., 2009, Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability, *The 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds*, Turkey, June 18-21, 41-49.

Önder, İ.E., 2005, Assessment of Sheet Metal Forming Processes by Numerical Experiments, Master Thesis, *METU*, Ankara, Turkey.

Paraianu, L. et al., 2005, Modeling of the Forming Limit Diagrams Using the Finite Element Method, *The 8th International Conference of the European Scientific Association for Material Forming ESAFORM*.

Quaak, G., 2008, Biaxial Testing of Sheet Metal: An Experimental-Numerical Analysis, Master Thesis, *Eindhoven University of Technology*, Eindhoven.

Raghavan, K.S., 1995, A Simple Technique to Generate In-Plane Forming Limit Curves and Selected Applications, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26A, 2075-2084.

Rao, U.S. and Chaturvedi, R.C., 1984, *Proc. 13th Biennial Congr. of the IDDRG*, Melbourne, Australia, 85-91.

Rees, D.W.A., 2001, Factors Influencing the FLD of Automotive Sheet Metal, *Journal of Materials Processing Technology*, 118, 1–8.

Schleich, R. et al. 2009, Investigation on the Effect of Curvature and Sheet Thickness on Forming Limit Prediction for Aluminium Sheet Metal Alloys, *International Journal of Material Forming*, 2 (l), 411–414.

Siegert, K. and Wagner, S., 1994, Formability Characteristics of Aluminium Sheet, Training in Aluminium Application Technologies (TALAT).

Situ, Q., 2008, A New Approach to Obtain Forming Limits of Sheet Materials, Doctoral Thesis, *McMaster University*, Hamilton, Ontario.

Slota, J. and Spisak E., 2005, Comparison of Forming Limit Diagram (FLD) Models for Drawing Quality (DQ) Steel Sheets, *Metabk*, 44, 249-253.

Smith, W.F., 1997, Foundation of Material Science and Engineering, 3rd Edition, *McGraw Hill*.

Smith, P.E. and Lee, D., 1997, Determination of Forming Limit for Aluminum Alloys, *IBEC 98*, Detroit, SAE Publication-331, 2, 21-28.

Smith, P.E., 1998, Forming Limit Curve Variability of Aluminum Sheet.

Stachowicz, F., 1986, Formability of Aluminum Alloy Sheets, *J. Mechanical Working Technology*, 13, 229-235.

Standard Test Method for Plastic Strain Ratio *r* for Sheet Metal, ASTM International, Designation: E 517-98.

Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, Designation: E 8M–04, April 2004.

Steglich, D. et al., 2008, Anisotropic Ductile Fracture of 2024 Alloys, *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 3692–3706.

Story, J.M. et al., 1993, Issues and Trends in Automotive Aluminum Sheet Forming, *Sheet Metal and Stamping Symposium*, March 1-5, Detroit, Michigan.

Stoughton, T.B., 2000, A General Forming Limit Criteria for Sheet Metal Forming, *International Journal of Mechanical Sciences*, 42, 1-27.

Stoughton, T.B. and Zhu, X., 2004, Review of Theoretical Models of the Strain-Based FLD and Their Relevance to the Stress-Based FLD, *International Journal of Plasticity*, 20, 1463–1486.

Stören, S. and Rice, J.R., 1975, Localized Necking in Thin Sheets, *Journal of Mech. Phys. Solids*, 23, 421.

Svensson, C., 2004, The Influence of Sheet Thickness on the Forming Limit Curves for Austenitic Stainless Steel, Master Thesis, *Örebro University*, Sweden.

Tadros, A.K. and Mellor, P.B., 1978, An Experimental Study of the In-Plane Stretching of Sheet Metal, *Int. J. Mech. Sci.*, 20, 121-134.

Takuda, H. and Hatta, N., 1998, Numerical Analysis of the Formability of an Aluminum 2024 Alloy Sheet and its Laminates with Steel Sheets, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29A, 2829-2834.

Takuda, H. et al., 1999, The Application of Some Criteria for Ductile Fracture to the Prediction of the Forming Limit of Sheet Metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 95, 116-121.

Taylor, B., 1988, Metal Handbook, American Society of Metals.

Taylor, B., 1993, Formability Testing of Sheet Metals, ASM Handbook, *Forming and Forging*, 14, 1930-1985.

The Automated Strain Analysis and Measurement Environment (ASAME), January 2008, Reference Manual, Version 4.12.

Theis, H.E., 1999, Handbook of Metal Forming Processes, *Marcel Dekker*, New York.

Totten, G.E. and MacKenzie, D.S., 2003, Handbook of Aluminum Volume 7 Physical Metallurgy and Processes, *Marcel Dekker*, New York.

Triantafyllidis, N. and Samanta, S.K., 1986, Bending Effects on Flow Localization in Metallic Sheets, *Proc. R. Soc. London A*, 406, 205-226.

Türköz, M., 2009, Al 2024 ve Al 5754 Alaşımlı Alüminyum Sacların Şekillendirilebilme Kabiliyetinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi*, Konya, Türkiye.

Türköz, M., Yiğit, O., Dilmeç, M. and Halkaci, H.S., 2010, Construction of Forming Limit Diagrams for AA 5754 and AA 2024 Aluminium Alloys, *Proceedings of the 12th Int. Conf. on Aluminium Alloys*, pp. 516-521, September 5-9, Yokohama, Japan.

Türköz, M., Dilmeç, M. and Halkaci, H.S., 2011, Investigation on Earing Behavior of AA 2024-T4 and AA 5754-O Aluminum Alloys, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 264-265, 12-17.

Vallellano, C. et al., 2008, A Study to Predict Failure in Biaxially Stretched Sheets of Aluminum Alloy 2024-T3, *Materials and Manufacturing Processes*, 23, 303-310.

Vargel, C., 2004, Corrosion of Aluminum, *Elsevier Ltd*., U.K.

Wilson, D.V. et al., 1983, An Experimental Study of the Effect of Sheet Thickness and Grain Size on Limit-Strains in Biaxial Stretching, *Int. J. Mech. Sci.*, 25 (12), 859-870.

www.alcoa.com [Ziyaret Tarihi: 9 Nisan 2011]

Yamaguchi, K. and Mellor, P.B., 1976, Thickness and Grain Size Dependence of Limit Strain in Sheet Metal Stretching, *Int. J. Mech. Sci.*, 18, 85-90.

Zadpoor, A.A. et al., 2009, The Effects of Thickness on the Formability of 2000 and 7000 Series High Strength Aluminum Alloys, *Key Engineering Materials*, 410-411, 459-466.

Zhu, X., 1999, Theoretical Analysis of Sheet Metal Formability, Doctoral Thesis, *Michigan Technological University*, United States.

EKLER

EK-1 ISO 12004-2 standardına göre hesaplama yapabilen geliştirilen programın algoritması

```
Public veri_sayısı As Integer
Sub hesapla()
Application.Goto Reference:="geçiş_bölgesi"
   Selection.ClearContents
Application.Goto Reference:="değerlendirme_verileri"
   Selection.ClearContents
Range("başlangıç_yeri").Select
veri_sayısı = 7: eğri_uydur
'GoTo 20
Range("sol_iç_sınır_üçlü_numara").Value = ""
Range("sol_iç_sınır_üçlü").Value = ""
For i = 1 To 4
   veri_sayısı = 3
   sol_ÜÇLÜ_UYDUR (i)
Next
10
For i = 1 To 4
Range("sağ_iç_sınır_üçlü_numara").Value = ""
Range("sağ_iç_sınır_üçlü").Value = ""
   veri_sayısı = 3
   sağ_ÜÇLÜ_UYDUR (i - 8)
Next
Range("sol_iç_sınır_beşli_numara").Value = ""
Range("sol_iç_sınır_beşli").Value = ""
For i = 1 To 4
   veri_sayısı = 5: sol_beşli_UYDUR (i)
Next
Range("sağ_iç_sınır_beşli_numara").Value = ""
Range("sağ_iç_sınır_beşli").Value = ""
For i = 1 To 4
   veri_sayısı = 5: sağ_beşli_UYDUR (i - 8)
Next
20 Range("başlangıç_yeri").Select
i_inci = 0
For i = Range("sol_dış_sınır_numarası").Value To Range("sol_iç_sınır_numarası").Value
```

```
    ActiveCell.Offset(108 + i_inci, 0).Value = ActiveCell.Offset(Range("sol_dış_sınır_numarası").Value +
     i_inci, 0).Value
    ActiveCell.Offset(108 + i_inci, 1).Value = ActiveCell.Offset(Range("sol_dış_sınır_numarası").Value +
     i_inci, 1).Value
    ActiveCell.Offset(108 + i_inci, 2).Value = ActiveCell.Offset(Range("sol_dış_sınır_numarası").Value +
     i_inci, 2).Value
    ActiveCell.Offset(108 + i_inci, 3).Value = ActiveCell.Offset(Range("sol_dış_sınır_numarası").Value +
     i_inci, 3).Value
    i_inci = i_inci + 1
Next
j_inci = 0
For i = Range("sağ_iç_sınır_numarası").Value To Range("sağ_dış_sınır_numarası").Value
    ActiveCell.Offset(108 + i_inci, 0).Value = ActiveCell.Offset(Range("sağ_iç_sınır_numarası").Value +
     j_inci, 0).Value
    ActiveCell.Offset(108 + i_inci, 1).Value = ActiveCell.Offset(Range("sağ_iç_sınır_numarası").Value +
     j_inci, 1).Value
    ActiveCell.Offset(108 + i_inci, 2).Value = ActiveCell.Offset(Range("sağ_iç_sınır_numarası").Value +
     j_inci, 2).Value
    ActiveCell.Offset(108 + i_inci, 3).Value = ActiveCell.Offset(Range("sağ_iç_sınır_numarası").Value +
     j_inci, 3).Value
    i_inci = i_inci + 1
    j_inci = j_inci + 1
Next
Range("değerlendirme_veri_sayısı").Value = i_inci
veri_sayısı = Range("değerlendirme_veri_sayısı").Value
değ_eğri_uydur_major
değ_eğri_uydur_minor
End Sub
Sub değ_eğri_uydur_minor()
    Dim XV(), YV(), A(20, 20), S(20), X(20), TX(20), TXY(20)
    ReDim XV(veri_sayısı), YV(veri_sayısı)
    N = 2
    'maxnum = Range("maxın_numarası").Value - 4
    For i = 1 To veri_sayısı: XV(i) = ActiveCell.Offset(107 + i, 1): YV(i) = ActiveCell.Offset(107 + i,
     6).Value: Next
    For i = 1 To N * 2: TX(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TX(i) = TX(i) + XV(j) ^ i: Next j, i: TX(0) =
     veri_sayısı
    For i = 0 To N: TXY(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TXY(i) = TXY(i) + XV(j) ^ i * YV(j): Next j, i
    For i = 1 To N + 1: For j = i To N + 1: A(i, j) = TX(i + j - 2): Next j, i
    For i = 2 To N + 1: For j = 1 To i - 1: A(i, j) = A(j, i): Next j, i
```

```
    N = N + 1: For i = 1 To N: S(i) = TXY(i - 1): Next
    GoSub DENK
    cc = X(1): bb = X(2): aa = X(3):
kalınlık_limit_tersi = aa * (Range("yırtık_poz").Value) ^ 2 + bb * Range("yırtık_poz").Value + cc
    kalınlık_limit = 1 / kalınlık_limit_tersi
    Range("minor_limit_strain").Value = -Range("major_limit_strain").Value - kalınlık_limit
' y = -0.000410425x2 + 0.034508790x - 0.578097699
    Exit Sub
DENK:
    For i = 1 To N: A(i, N + 1) = S(i): Next: NC = N + 1: NE = N - 1
    For i = 1 To NE:  NA = i + 1: If A(i, i) <> 0 Then GoTo 35
    For L = NA To N: If A(L, i) <> 0 Then SN = L: GoTo 110
    Next L
3     MsgBox "Matris tekildir": Stop:
110      For T = i To NC: UZ = A(SN, T): A(SN, T) = A(i, T): A(i, T) = UZ: Next
35     For j = NA To N:  ORAN = A(j, i) / A(i, i)
    For K = NA To NC: A(j, K) = A(j, K) - ORAN * A(i, K): Next K, j, i
    If A(N, N) = 0 Or Abs(A(N, N)) < 0.0000000001 Then GoTo 3
    X(N) = A(N, N + 1) / A(N, N)
    For i = NE To 1 Step -1:  For j = 1 To i
    A(j, NC) = A(j, NC) - A(j, i + 1) * X(i + 1): Next
    X(i) = A(i, NC) / A(i, i): Next: Return
End Sub

Sub değ_eğri_uydur_major()
    Dim XV(), YV(), A(20, 20), S(20), X(20), TX(20), TXY(20)
    ReDim XV(veri_sayısı), YV(veri_sayısı)
    N = 2
    'maxnum = Range("maxın_numarası").Value - 4
    For i = 1 To veri_sayısı: XV(i) = ActiveCell.Offset(107 + i, 1): YV(i) = ActiveCell.Offset(107 + i,
     4).Value: Next
    For i = 1 To N * 2: TX(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TX(i) = TX(i) + XV(j) ^ i: Next j, i: TX(0) =
     veri_sayısı
    For i = 0 To N: TXY(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TXY(i) = TXY(i) + XV(j) ^ i * YV(j): Next j, i
    For i = 1 To N + 1: For j = i To N + 1: A(i, j) = TX(i + j - 2): Next j, i
    For i = 2 To N + 1: For j = 1 To i - 1: A(i, j) = A(j, i): Next j, i
    N = N + 1: For i = 1 To N: S(i) = TXY(i - 1): Next
    GoSub DENK
    cc = X(1): bb = X(2): aa = X(3):
    Range("baş").Value = aa
```

```
    Range("orta").Value = bb
    Range("son").Value = cc
    major_limit_tersi = aa * (Range("yırtık_poz").Value) ^ 2 + bb * Range("yırtık_poz").Value + cc
    major_limit = 1 / major_limit_tersi
    Range("major_limit_strain").Value = major_limit
' y = -0.000410425x2 + 0.034508790x - 0.578097699
    Exit Sub
DENK:
    For i = 1 To N: A(i, N + 1) = S(i): Next: NC = N + 1: NE = N - 1
    For i = 1 To NE:  NA = i + 1: If A(i, i) <> 0 Then GoTo 35
    For L = NA To N: If A(L, i) <> 0 Then SN = L: GoTo 110
    Next L
3     MsgBox "Matris tekildir": Stop:
110      For T = i To NC: UZ = A(SN, T): A(SN, T) = A(i, T): A(i, T) = UZ: Next
35     For j = NA To N:  ORAN = A(j, i) / A(i, i)
    For K = NA To NC: A(j, K) = A(j, K) - ORAN * A(i, K): Next K, j, i
    If A(N, N) = 0 Or Abs(A(N, N)) < 0.0000000001 Then GoTo 3
    X(N) = A(N, N + 1) / A(N, N)
    For i = NE To 1 Step -1:  For j = 1 To i
    A(j, NC) = A(j, NC) - A(j, i + 1) * X(i + 1): Next
    X(i) = A(i, NC) / A(i, i): Next: Return

End Sub

Sub sol_beşli_UYDUR(RÖLATİF As Integer)
    Dim XV(), YV(), A(20, 20), S(20), X(20), TX(20), TXY(20)
    ReDim XV(veri_sayısı), YV(veri_sayısı)
    N = 2
    BAŞLANGIÇ = Range("YIRTIK_NUMARASI").Value - RÖLATİF
    For i = 1 To veri_sayısı
        XV(i) = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - i + 2, 1)
        YV(i) = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - i + 2, 2).Value
        ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 11 + 5).Value = BAŞLANGIÇ - i + 4
    Next
    For i = 1 To N * 2: TX(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TX(i) = TX(i) + XV(j) ^ i: Next j, i: TX(0) =
     veri_sayısı
    For i = 0 To N: TXY(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TXY(i) = TXY(i) + XV(j) ^ i * YV(j): Next j, i
    For i = 1 To N + 1: For j = i To N + 1: A(i, j) = TX(i + j - 2): Next j, i
    For i = 2 To N + 1: For j = 1 To i - 1: A(i, j) = A(j, i): Next j, i
    N = N + 1: For i = 1 To N: S(i) = TXY(i - 1): Next
```

```
    GoSub DENK
    cc = X(1): bb = X(2): aa = X(3)
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 8 + 5).Value = aa
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 9 + 5).Value = bb
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 10 + 5).Value = cc
    If Range("sol_iç_sınır_beşli").Value = "" Or Range("sol_iç_sınır_beşli").Value < aa Then
       Range("sol_iç_sınır_beşli").Value = aa
       Range("sol_iç_sınır_beşli_numara").Value = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 11).Value
    End If
   ' y = -0.000410425x2 + 0.034508790x - 0.578097699
    Exit Sub
DENK:
    For i = 1 To N: A(i, N + 1) = S(i): Next: NC = N + 1: NE = N - 1
    For i = 1 To NE:  NA = i + 1: If A(i, i) <> 0 Then GoTo 35
    For L = NA To N: If A(L, i) <> 0 Then SN = L: GoTo 110
    Next L
3     MsgBox "Matris tekildir": Stop:
110      For T = i To NC: UZ = A(SN, T): A(SN, T) = A(i, T): A(i, T) = UZ: Next
35     For j = NA To N:  ORAN = A(j, i) / A(i, i)
    For K = NA To NC: A(j, K) = A(j, K) - ORAN * A(i, K): Next K, j, i
    If A(N, N) = 0 Or Abs(A(N, N)) < 0.0000000001 Then GoTo 3
    X(N) = A(N, N + 1) / A(N, N)
    For i = NE To 1 Step -1:  For j = 1 To i
    A(j, NC) = A(j, NC) - A(j, i + 1) * X(i + 1): Next
    X(i) = A(i, NC) / A(i, i): Next: Return

End Sub
Sub sağ_beşli_UYDUR(RÖLATİF As Integer)
    Dim XV(), YV(), A(20, 20), S(20), X(20), TX(20), TXY(20)
    ReDim XV(veri_sayısı), YV(veri_sayısı)
    N = 2
    BAŞLANGIÇ = Range("YIRTIK_NUMARASI").Value - RÖLATİF
    For i = 1 To veri_sayısı
       XV(i) = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - i + 2, 1)
       YV(i) = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - i + 2, 2).Value
       ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 11 + 5).Value = BAŞLANGIÇ - i + 4
    Next
    For i = 1 To N * 2: TX(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TX(i) = TX(i) + XV(j) ^ i: Next j, i: TX(0) =
     veri_sayısı
    For i = 0 To N: TXY(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TXY(i) = TXY(i) + XV(j) ^ i * YV(j): Next j, i
```

```
    For i = 1 To N + 1: For j = i To N + 1: A(i, j) = TX(i + j - 2): Next j, i
    For i = 2 To N + 1: For j = 1 To i - 1: A(i, j) = A(j, i): Next j, i
    N = N + 1: For i = 1 To N: S(i) = TXY(i - 1): Next
    GoSub DENK
    cc = X(1): bb = X(2): aa = X(3)

    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 8 + 5).Value = aa
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 9 + 5).Value = bb
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 10 + 5).Value = cc
   ' y = -0.000410425x2 + 0.034508790x - 0.578097699
   If Range("sağ_iç_sınır_beşli").Value = "" Or Range("sağ_iç_sınır_beşli").Value < aa Then
       Range("sağ_iç_sınır_beşli").Value = aa
       Range("sağ_iç_sınır_beşli_numara").Value = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 11).Value
    End If
    Exit Sub
DENK:
    For i = 1 To N: A(i, N + 1) = S(i): Next: NC = N + 1: NE = N - 1
    For i = 1 To NE:  NA = i + 1: If A(i, i) <> 0 Then GoTo 35
    For L = NA To N: If A(L, i) <> 0 Then SN = L: GoTo 110
    Next L
3     MsgBox "Matris tekildir": Stop:
110      For T = i To NC: UZ = A(SN, T): A(SN, T) = A(i, T): A(i, T) = UZ: Next
35     For j = NA To N:  ORAN = A(j, i) / A(i, i)
    For K = NA To NC: A(j, K) = A(j, K) - ORAN * A(i, K): Next K, j, i
    If A(N, N) = 0 Or Abs(A(N, N)) < 0.0000000001 Then GoTo 3
    X(N) = A(N, N + 1) / A(N, N)
    For i = NE To 1 Step -1:  For j = 1 To i
    A(j, NC) = A(j, NC) - A(j, i + 1) * X(i + 1): Next
    X(i) = A(i, NC) / A(i, i): Next: Return
End Sub

Sub sol_ÜÇLÜ_UYDUR(RÖLATİF As Integer)
    Dim XV(), YV(), A(20, 20), S(20), X(20), TX(20), TXY(20)
    ReDim XV(veri_sayısı), YV(veri_sayısı)
    N = 2
    BAŞLANGIÇ = Range("YIRTIK_NUMARASI").Value - RÖLATİF
    For i = 1 To veri_sayısı
       XV(i) = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - i + 1, 1)
       YV(i) = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - i + 1, 2).Value
       ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 11).Value = BAŞLANGIÇ - i + 2
```

```
    Next
    For i = 1 To N * 2: TX(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TX(i) = TX(i) + XV(j) ^ i: Next j, i: TX(0) =
     veri_sayısı
    For i = 0 To N: TXY(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TXY(i) = TXY(i) + XV(j) ^ i * YV(j): Next j, i
    For i = 1 To N + 1: For j = i To N + 1: A(i, j) = TX(i + j - 2): Next j, i
    For i = 2 To N + 1: For j = 1 To i - 1: A(i, j) = A(j, i): Next j, i
    N = N + 1: For i = 1 To N: S(i) = TXY(i - 1): Next
    GoSub DENK
    cc = X(1): bb = X(2): aa = X(3)
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 8).Value = aa
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 9).Value = bb
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 10).Value = cc

    'if Range("sol_iç_sınır_üçlü").Value = "" or "sol_iç_sınır_üçlü".Value < aa then
    If Range("sol_iç_sınır_üçlü").Value = "" Or Range("sol_iç_sınır_üçlü").Value < aa Then
       Range("sol_iç_sınır_üçlü").Value = aa
       Range("sol_iç_sınır_üçlü_numara").Value = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 11).Value
    End If
'Range("sol_iç_sınır_üçlü").Value = IIf(Range("sol_iç_sınır_üçlü").Value = "" Or
     Range("sol_iç_sınır_üçlü").Value < aa, aa, Range("sol_iç_sınır_üçlü").Value)
  ' y = -0.000410425x2 + 0.034508790x - 0.578097699
    Exit Sub
DENK:
    For i = 1 To N: A(i, N + 1) = S(i): Next: NC = N + 1: NE = N - 1
    For i = 1 To NE:  NA = i + 1: If A(i, i) <> 0 Then GoTo 35
    For L = NA To N: If A(L, i) <> 0 Then SN = L: GoTo 110
    Next L
3     MsgBox "Matris tekildir": Stop:
110      For T = i To NC: UZ = A(SN, T): A(SN, T) = A(i, T): A(i, T) = UZ: Next
35     For j = NA To N:  ORAN = A(j, i) / A(i, i)
    For K = NA To NC: A(j, K) = A(j, K) - ORAN * A(i, K): Next K, j, i
    If A(N, N) = 0 Or Abs(A(N, N)) < 0.0000000001 Then GoTo 3
    X(N) = A(N, N + 1) / A(N, N)
    For i = NE To 1 Step -1:  For j = 1 To i
    A(j, NC) = A(j, NC) - A(j, i + 1) * X(i + 1): Next
    X(i) = A(i, NC) / A(i, i): Next: Return
End Sub

Sub sağ_ÜÇLÜ_UYDUR(RÖLATİF As Integer)
    Dim XV(), YV(), A(20, 20), S(20), X(20), TX(20), TXY(20)
```

```
    ReDim XV(veri_sayısı), YV(veri_sayısı)
    N = 2
    BAŞLANGIÇ = Range("YIRTIK_NUMARASI").Value - RÖLATİF
    For i = 1 To veri_sayısı
       XV(i) = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - i + 1, 1)
       YV(i) = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - i + 1, 2).Value
       ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 11).Value = BAŞLANGIÇ - i + 2
    Next
    For i = 1 To N * 2: TX(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TX(i) = TX(i) + XV(j) ^ i: Next j, i: TX(0) =
     veri_sayısı
    For i = 0 To N: TXY(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TXY(i) = TXY(i) + XV(j) ^ i * YV(j): Next j, i
    For i = 1 To N + 1: For j = i To N + 1: A(i, j) = TX(i + j - 2): Next j, i
    For i = 2 To N + 1: For j = 1 To i - 1: A(i, j) = A(j, i): Next j, i
    N = N + 1: For i = 1 To N: S(i) = TXY(i - 1): Next
    GoSub DENK
    cc = X(1): bb = X(2): aa = X(3)

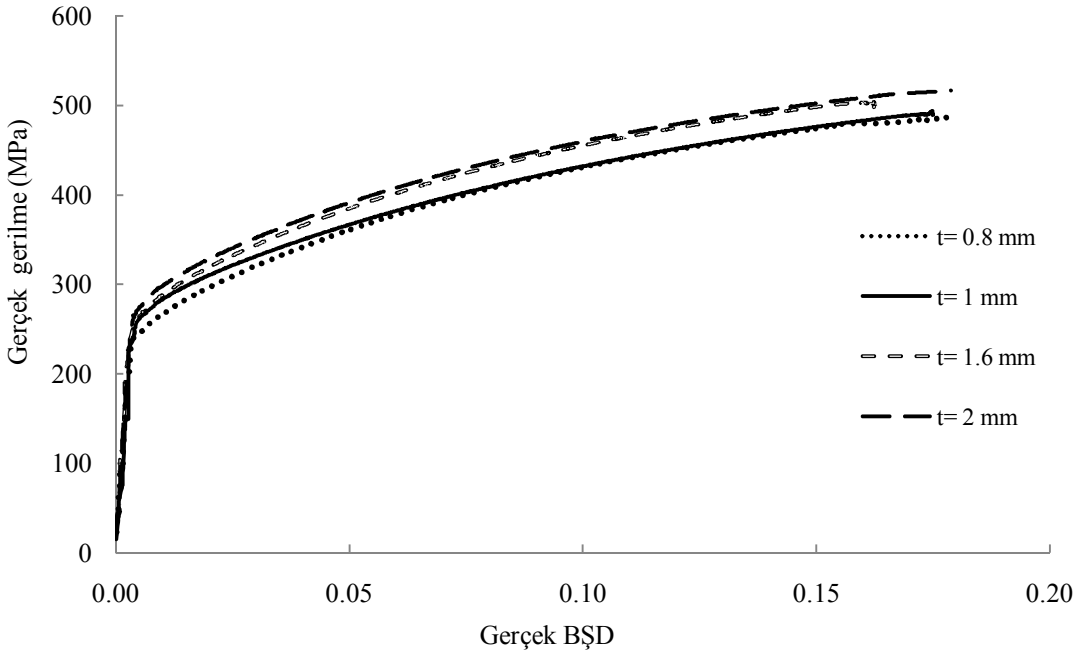
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 8).Value = aa
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 9).Value = bb
    ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 10).Value = cc
   ' y = -0.000410425x2 + 0.034508790x - 0.578097699
    If Range("sağ_iç_sınır_üçlü").Value = "" Or Range("sağ_iç_sınır_üçlü").Value < aa Then
       Range("sağ_iç_sınır_üçlü").Value = aa
       Range("sağ_iç_sınır_üçlü_numara").Value = ActiveCell.Offset(BAŞLANGIÇ - 1, 11).Value
    End If
Exit Sub
DENK:
    For i = 1 To N: A(i, N + 1) = S(i): Next: NC = N + 1: NE = N - 1
    For i = 1 To NE:  NA = i + 1: If A(i, i) <> 0 Then GoTo 35
    For L = NA To N: If A(L, i) <> 0 Then SN = L: GoTo 110
    Next L
3     MsgBox "Matris tekildir": Stop:
110      For T = i To NC: UZ = A(SN, T): A(SN, T) = A(i, T): A(i, T) = UZ: Next
35     For j = NA To N:  ORAN = A(j, i) / A(i, i)
    For K = NA To NC: A(j, K) = A(j, K) - ORAN * A(i, K): Next K, j, i
    If A(N, N) = 0 Or Abs(A(N, N)) < 0.0000000001 Then GoTo 3
    X(N) = A(N, N + 1) / A(N, N)
    For i = NE To 1 Step -1:  For j = 1 To i
    A(j, NC) = A(j, NC) - A(j, i + 1) * X(i + 1): Next
    X(i) = A(i, NC) / A(i, i): Next: Return
```

```
    End Sub
Sub eğri_uydur()
    Dim XV(), YV(), A(20, 20), S(20), X(20), TX(20), TXY(20)
    ReDim XV(veri_sayısı), YV(veri_sayısı)
    N = 2
    maxnum = Range("maxın_numarası").Value - 4
    For i = 1 To veri_sayısı: XV(i) = ActiveCell.Offset(maxnum + i, 1): YV(i) =
     ActiveCell.Offset(maxnum + i, 2).Value: Next
    For i = 1 To N * 2: TX(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TX(i) = TX(i) + XV(j) ^ i: Next j, i: TX(0) =
     veri_sayısı
    For i = 0 To N: TXY(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TXY(i) = TXY(i) + XV(j) ^ i * YV(j): Next j, i
    For i = 1 To N + 1: For j = i To N + 1: A(i, j) = TX(i + j - 2): Next j, i
    For i = 2 To N + 1: For j = 1 To i - 1: A(i, j) = A(j, i): Next j, i
    N = N + 1: For i = 1 To N: S(i) = TXY(i - 1): Next
    GoSub DENK
    cc = X(1): bb = X(2): aa = X(3): Range("yırtık_poz").Value = -bb / 2 / aa
    ' y = -0.000410425x2 + 0.034508790x - 0.578097699
    Exit Sub
DENK:
    For i = 1 To N: A(i, N + 1) = S(i): Next: NC = N + 1: NE = N - 1
    For i = 1 To NE:  NA = i + 1: If A(i, i) <> 0 Then GoTo 35
    For L = NA To N: If A(L, i) <> 0 Then SN = L: GoTo 110
    Next L
3     MsgBox "Matris tekildir": Stop:
110     For T = i To NC: UZ = A(SN, T): A(SN, T) = A(i, T): A(i, T) = UZ: Next
35     For j = NA To N:  ORAN = A(j, i) / A(i, i)
    For K = NA To NC: A(j, K) = A(j, K) - ORAN * A(i, K): Next K, j, i
    If A(N, N) = 0 Or Abs(A(N, N)) < 0.0000000001 Then GoTo 3
    X(N) = A(N, N + 1) / A(N, N)
    For i = NE To 1 Step -1:  For j = 1 To i
    A(j, NC) = A(j, NC) - A(j, i + 1) * X(i + 1): Next
    X(i) = A(i, NC) / A(i, i): Next: Return

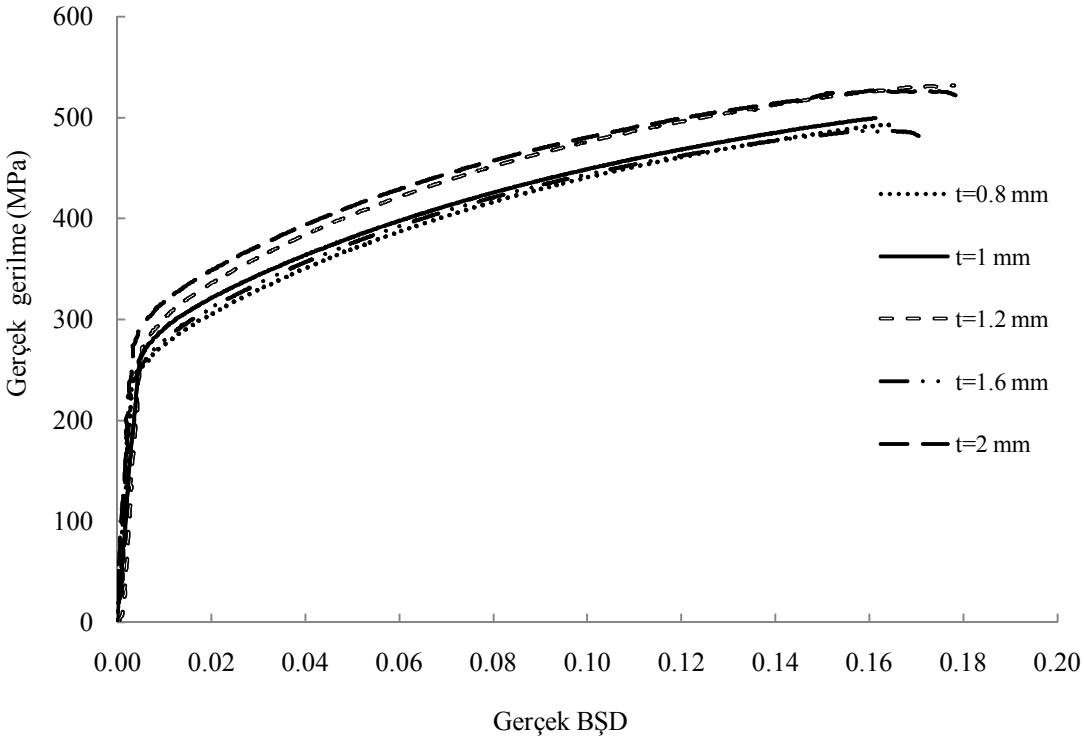
End Sub
Sub eğri_uydurilk()
    Dim XV(), YV(), A(20, 20), S(20), X(20), TX(20), TXY(20)
    ReDim XV(veri_sayısı), YV(veri_sayısı)
    N = 2
    For i = 1 To veri_sayısı: XV(i) = ActiveCell.Offset(31 - 4 + i, 1): YV(i) = ActiveCell.Offset(31 - 4 + i,
     2).Value: Next
```

```
   For i = 1 To N * 2: TX(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TX(i) = TX(i) + XV(j) ^ i: Next j, i: TX(0) =
    veri_sayısı
   For i = 0 To N: TXY(i) = 0: For j = 1 To veri_sayısı: TXY(i) = TXY(i) + XV(j) ^ i * YV(j): Next j, i
   For i = 1 To N + 1: For j = i To N + 1: A(i, j) = TX(i + j - 2): Next j, i
   For i = 2 To N + 1: For j = 1 To i - 1: A(i, j) = A(j, i): Next j, i
   N = N + 1: For i = 1 To N: S(i) = TXY(i - 1): Next
   GoSub DENK
   cc = X(1): bb = X(2): aa = X(3): max_için_x = -bb / 2 / aa
  ' = -2.309523810x2 + 21.047619048x - 19.714285714
   Exit Sub
DENK:
   For i = 1 To N: A(i, N + 1) = S(i): Next: NC = N + 1: NE = N - 1
   For i = 1 To NE:  NA = i + 1: If A(i, i) <> 0 Then GoTo 35
   For L = NA To N: If A(L, i) <> 0 Then SN = L: GoTo 110
   Next L
3     MsgBox "Matris tekildir": Stop:
110      For T = i To NC: UZ = A(SN, T): A(SN, T) = A(i, T): A(i, T) = UZ: Next
35     For j = NA To N:  ORAN = A(j, i) / A(i, i)
   For K = NA To NC: A(j, K) = A(j, K) - ORAN * A(i, K): Next K, j, i
   If A(N, N) = 0 Or Abs(A(N, N)) < 0.0000000001 Then GoTo 3
   X(N) = A(N, N + 1) / A(N, N)
   For i = NE To 1 Step -1:  For j = 1 To i
   A(j, NC) = A(j, NC) - A(j, i + 1) * X(i + 1): Next
   X(i) = A(i, NC) / A(i, i): Next: Return
   End Sub
```

EK-2 Çeşitli kalınlığına sahip Al 2024-T4 sacların 45° ve 90° doğrultuları için akma eğrileri

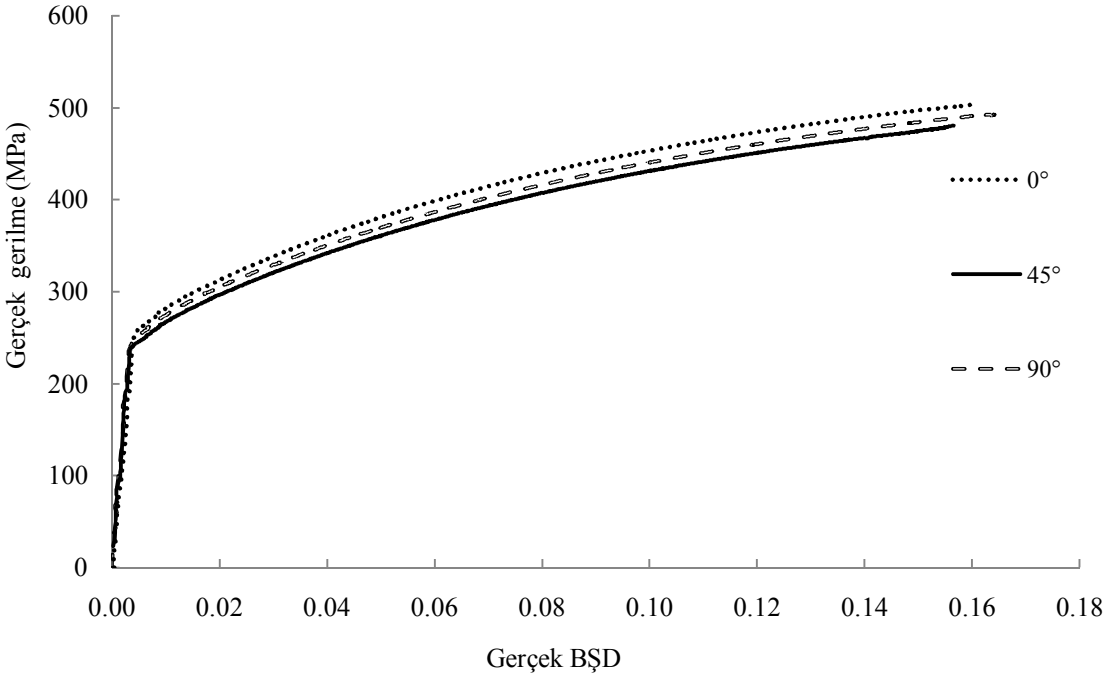


a)

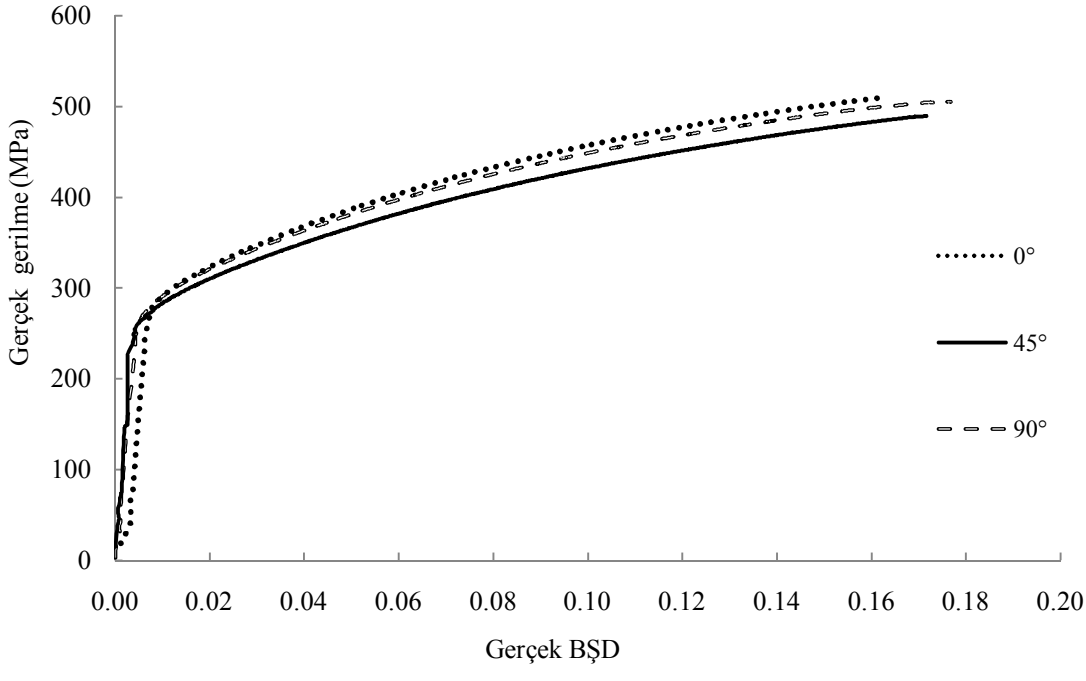


b)

Şekil Ek2.1. Çeşitli kalınlığa sahip Al 2024-T4 sacların a) 45° ve b) 90° doğrultuları için akma eğrileri

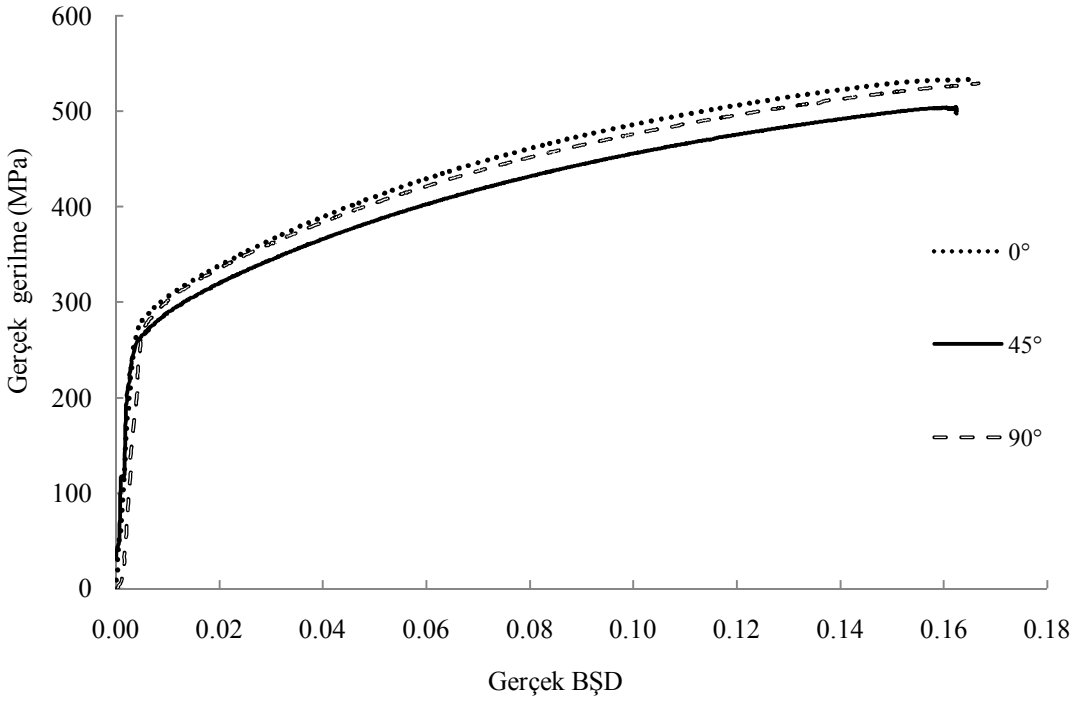


a)

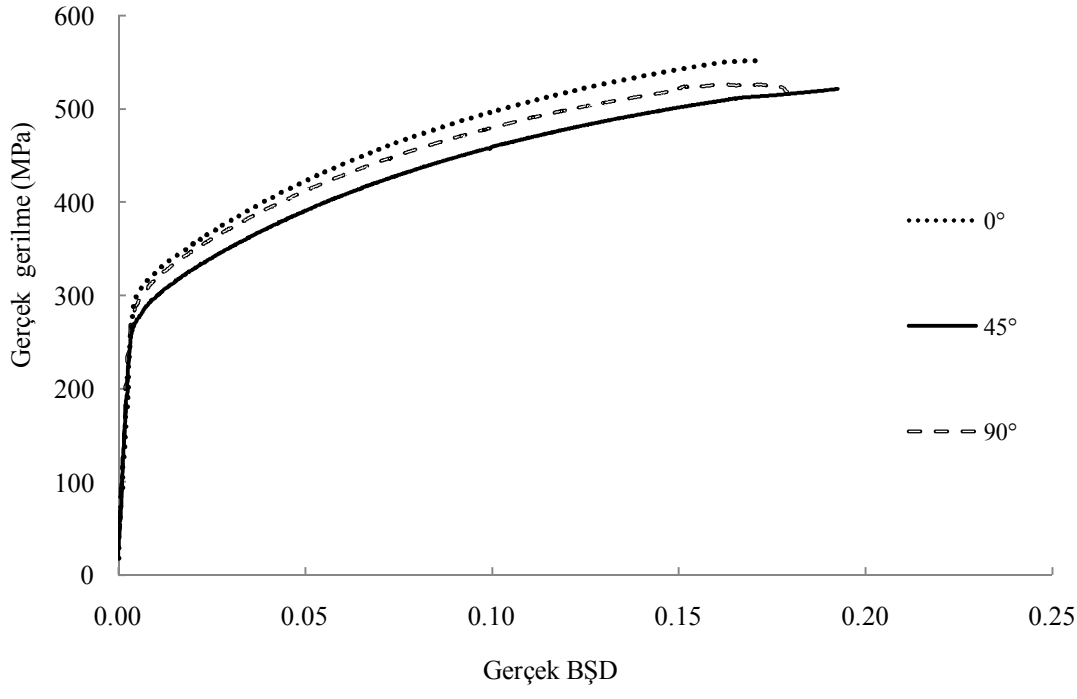


b)

Şekil Ek2.2. a) 0.8, b) 1, c) 1.6 ve d) 2 mm sac kalınlığına sahip Al 2024-T4 sacların 0°, 45° ve 90° doğrultuları için akma eğrileri



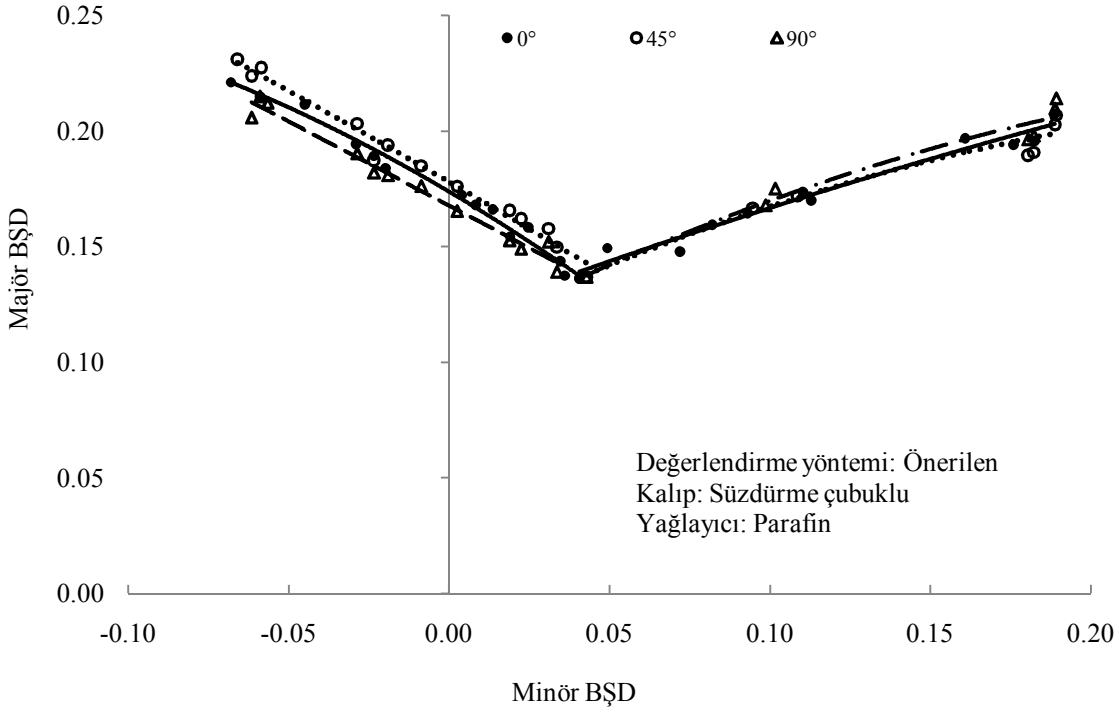
c)



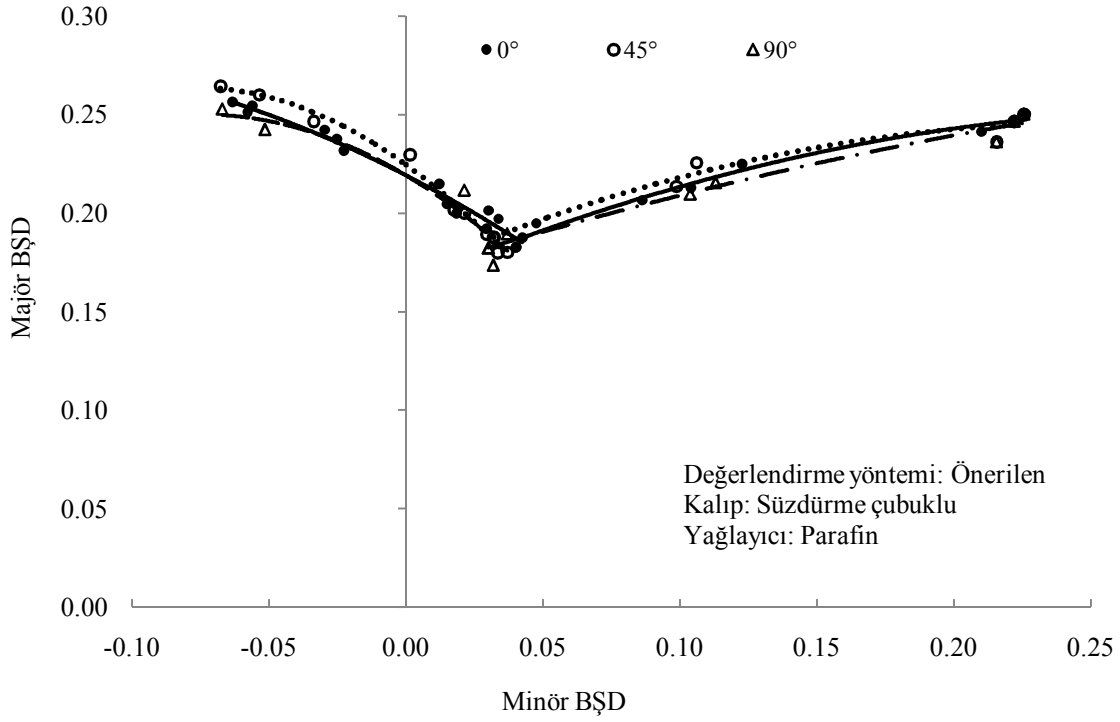
d)

Şekil Ek2.2. devam ediyor.. a) 0.8, b) 1, c) 1.6 ve d) 2 mm sac kalınlığına sahip Al 2024-T4 sacların 0°, 45° ve 90° doğrultuları için akma eğrileri

EK-3 1 ve 2 mm kalınlıklara sahip Al 2024-T4 sacların ŞSE'lerinin haddeleme doğrultusuna göre değişimi

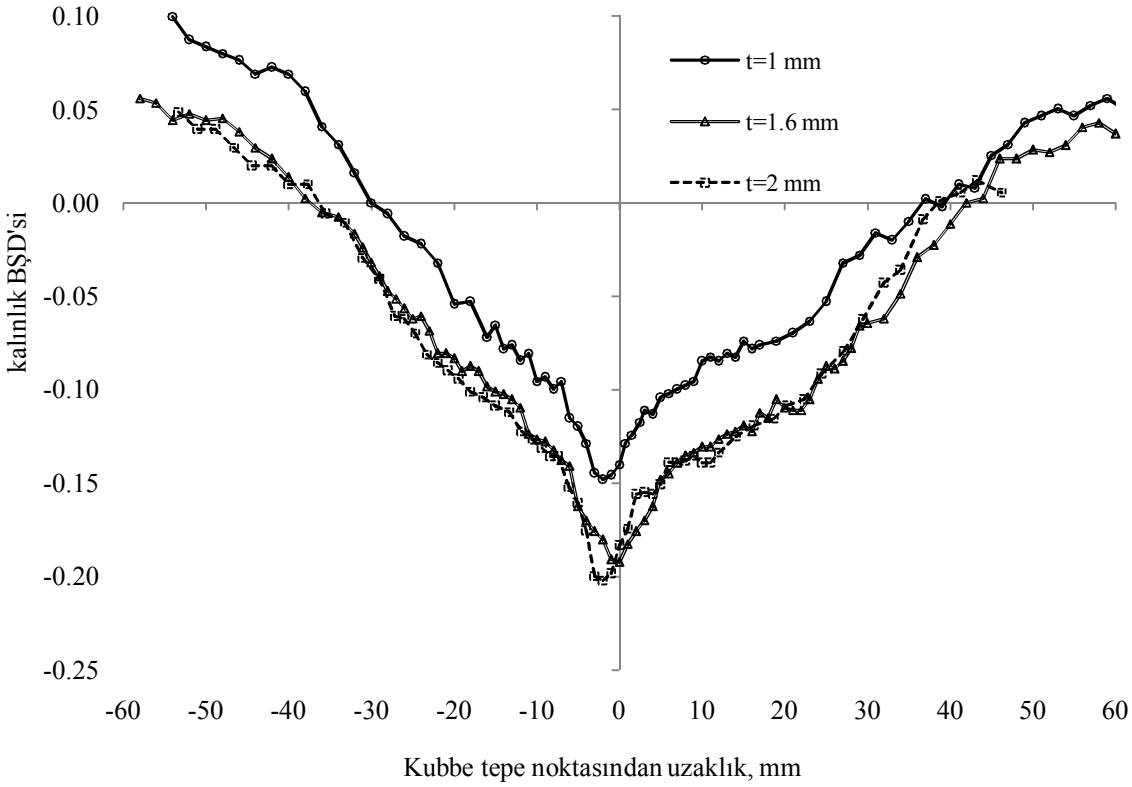


Şekil Ek3.1. 1 mm kalınlıklı Al 2024-T4'ün ŞSE'sinin haddeleme doğrultusuna göre değişimi

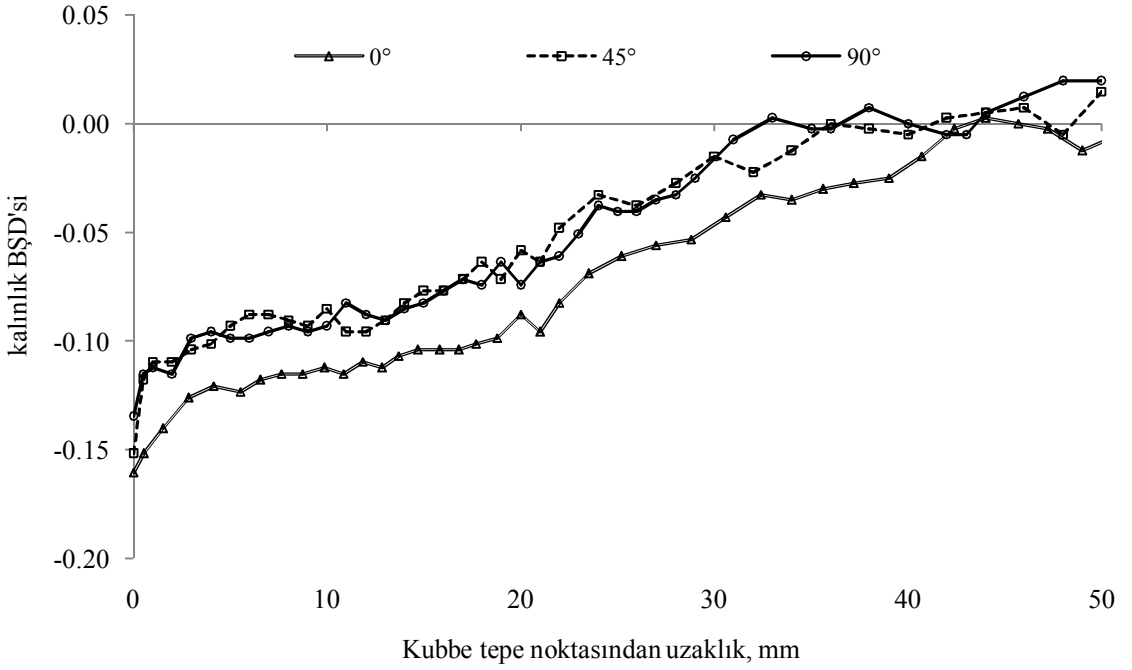


Şekil Ek3.2. 2 mm kalınlıklı Al 2024-T4'ün ŞSE'sinin haddeleme doğrultusuna göre değişimi

EK-4 Kalınlık BŞD dağılımının sac kalınlığına ve haddeleme doğrultusuna göre değişimi



Şekil Ek4.1. g100 numunesi için kalınlık BŞD dağılımının sac kalınlığına göre değişimi



Şekil Ek4.2. 0.8 mm sac kalınlığı için kalınlık BŞD dağılımının haddeleme doğrultusuna göre değişimi

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Murat DİLMEÇ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Karaman / 20.01.1979
Telefon : 0 332 223 27 49 / 0 505 409 67 73
Faks : 0 332 241 06 51
e-mail : muratdilmec@hotmail.com

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:	Karaman Fatih Lisesi, KARAMAN	1996
Üniversite	:	Niğde Üniversitesi Aksaray Mühendislik Fakültesi, AKSARAY	2001
Yüksek Lisans	:	Niğde Üniversitesi, NİĞDE	2004

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2001-2005	Niğde Üniversitesi Aksaray Müh. Fakültesi	Araştırma Görevlisi
2005-……	Selçuk Üniversitesi Müh. Fakültesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI: Sac Metal Şekillendirme, Hidroşekillendirme, Sonlu Elemanlar Analizi, Makine Elemanları, Makine Tasarımı

YABANCI DİL: İngilizce

YAYINLAR:

1. Fahrettin Öztürk, **Murat Dilmeç**, Mevlüt Türköz, Remzi E. Ece, Hüseyin S. Halkaci, Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability, 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of MACHINES and DIES/MOLDS, 18-21 June 2009, Kuşadası, Turkey.
2. Mevlüt Türköz, Osman Yiğit, **Murat Dilmeç**, H.Selçuk Halkaci, Construction of Forming Limit Diagrams for AA 5754 and AA 2024 Aluminium Alloys, Proceedings of the 12th Int. Conf. on Aluminium Alloys, pp. 516-521, September 5-9, 2010, Yokohama, Japan.

3. Mevlüt Türköz, **Murat Dilmeç**, Hüseyin Selçuk Halkaci. Investigation on Earing Behavior of AA 2024-T4 and AA 5754-O Aluminum Alloys, Advances in Materials and Processing Technologies, 2011, vol. 264-265, pp.12-17.