

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN DERİN ÇEKME SACLARININ
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bora ŞENER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

OCAK 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN DERİN ÇEKME SACLARININ
ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bora ŞENER
(503081325)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ

OCAK 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503081325 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Bora ŞENER**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN DERİN ÇEKME SACLARININ ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN ANALİZİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **19 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **26 Ocak 2012**

Sevgili aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bana yol gösteren sayın hocam Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ'e, tez çalışmam boyunca her aşamada sabırla ilgisini üzerimden eksik etmeyen, değerli yardımlarını, emeklerini benden esirgemeyen, kendi ailemden biri olarak gördüğüm ve saydığım sayın Kani YILMAZ'a, gösterdikleri iyi niyet ve desteklerden dolayı ÖZTİRYAKİLER firmasının tüm çalışanlarına, çalışmamda bilgi ve tecrübeleriyle hep yardımcı olan sayın Mehmet ÖZÇİÇEK'e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca desteklerinden ötürü Sayın Şenol DEĞİRMENCİ, Sayın Yusuf KARADUMAN'a, ASSAB firmasından Sayın Özgür ÖZTÜRK ve İsmail GEZİCİ'ye, ERDEMİR firması Satış ve Pazarlama Müdürü Sayın Meltem ALİM'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak beni bu günlere getiren maddi ve manevi sürekli yanımda olan sevgili annem ve babam Gülsüm & Aydın ŞENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2012

Bora ŞENER
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	5
1.2 Literatür Araştırması	6
2. SAC ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ.....	9
2.1 Sacların Şekillendirilebilirliğini Etkileyen Faktörler	9
2.1.1 İşlem değişkenleri.....	9
2.1.2 Malzeme değişkenleri	10
2.1.2.1 Akma noktası.....	10
2.1.2.2 Elastiklik modülü.....	12
2.1.2.3 Pekleşme üsteli	13
2.1.2.4 Deformasyon hızına duyarlılık üsteli	14
2.1.2.5 Plastik anizotropi	16
2.2 Tek Eksenli Çekme Durumunda Plastik Dengesizlik	21
2.3 Şekillendirme Sınır Diyagramları	24
2.4 Şekillendirme Sınır Diyagramları	28
2.5 Deneysel Yöntemler	29
2.5.1 Hecker testi.....	29
2.5.2 Keeler testi	30
2.5.3 Marciniak testi.....	31
2.5.4 Nakazima testi	31
2.5.5 Hasek testi	32
2.5.6 Erichsen testi	32
2.5.7 Swift kap testi	33
2.5.8 Olsen kap testi	33
2.5.9 Fukui kap testi	34
2.5.10 Delik genişletme testi.....	35
2.5.11 Hidrolik şişirme testi.....	36
2.6 Test Yöntemlerinin Karşılaştırılması	37
2.7 Şekillendirme Sınır Diyagramlarını Etkileyen Faktörler.....	37
2.8 Grid İşleme Yöntemleri	44
2.8.1 Elektro-kimyasal dağlama yöntemi	44
2.8.2 Fotokimyasal dağlama yöntemi.....	45

2.8.3 Lazerle dağlama yöntemi.....	47
2.8.4 Serigrafi yöntemi.....	47
2.9 GridMarkalama Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	49
2.10 Şekil Değişimlerinin Hesaplanması.....	50
2.11 Deformasyonların Ölçülmesinde Kullanılan Metotlar.....	51
2.11.1 Manuel ölçüm metotları	51
2.11.1.1 Mylar cetvelle ölçüm	51
2.11.1.2 Hareketli mikroskopla ölçüm	51
2.11.2 Otomatik ölçüm metotları	52
3. ARAYER ATOMLARINDAN ARINDIRILMIŞ (IF) ÇELİKLERİ İLE SOĞUK ŞEKİLLENDİRMEYE UYGUN DÜŞÜK KARBONLU GALVANİZE EDİLMİŞ ÇELİKLERİN ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİM PROSESLERİ.....	55
3.1 Arayer Atomsuz (IF) Çeliklerin Özellikleri ve Çeşitleri.....	55
3.1.1 Derin çekme kalite (DDQ) ultra düşük karbonlu (ULC) IF çelikleri	60
3.1.2 Fırında sertleşebilen (Bake Hardenable: BH) çelikler	61
3.1.3 HSS (Yüksek Mukavemetli) IF çelikleri.....	62
3.1.4 Ekstra derin çekilebilen (EDDQ) IF çelikleri.....	63
3.1.5 Fosforlu IF çelikleri.....	65
3.2 IF Çeliklerinin Üretimi ve Proses Kademeleri	65
3.2.1 Çelik üretimi	65
3.3 IF Çeliklerin Vakum Prosesi	67
3.3.1 Vakumda gaz giderme	67
3.3.2 RD-KTB prosesi	68
3.3.3 Vakum işleminde karbon kontrolü.....	68
3.3.4 RD-KTB proseslerinin avantajları	69
3.3.5 Sürekli döküm.....	69
3.3.6 Slab ısıtma	69
3.3.7 Sıcak haddeleme	70
3.3.8 Asitleme.....	70
3.3.9 Soğuk haddeleme ve sürekli tavlama	70
3.3.10 NKK-CAL prosesinin prensipleri	71
3.4 Sıcak ve Soğuk Haddelenmiş IF Çeliklerinin Özellikleri ve Uygulamaları ..	72
3.4.1 Sıcak haddeleme özellikleri	72
3.4.2 IF Çeliklerinin özellikleri ve uygulamaları	74
3.4.2.1 Sıcak ürün özellikleri.....	74
3.4.2.2 Soğuk ürün özellikleri ve yeniden kristalleşme davranışı	76
3.5 Galvanizleme ve Galvanizlenmiş Saclar.....	76
3.5.1 Sıcak daldırma yöntemiyle galvanizleme.....	76
3.5.2 Sıcak daldırma ile galvanizlemede proses aşamaları	76
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	79
4.1 Deney Malzemeleri.....	79
4.2 Tek Eksenli Çekme Deneyleri.....	81
4.3 Anizotropi Deneyleri	87
4.4 Şekil Değiştirme Hızı Duyarlılık Üstelinin (m) Belirlenmesi.....	88
4.5 Düzlem Dışı Germe Deneyi	89
4.6 Deney Numunelerinin Hazırlanması	90
4.7 Deney Düzenegi	93
4.8 Deneyin Yapılması	96
4.9 Deformasyonların Ölçülmesi	101

5. DENEYSEL SONUÇLAR	105
5.1 Tek Eksenli Çekme Deneyleri	105
5.2 Anizotropi Deneyleri	115
5.3 Şekil Değişirme Hızı Duyarlılık Üstelinin Belirlenmesi	115
5.4 Düzlem Dışı Germe Deneyi	119
6. SONUÇLAR VE İRDELEME	121
6.1 Çekme Deneyi Sonuçları	121
6.2 Düzlem Dışı Germe Deneyi Sonuçları	122
7. GENEL SONUÇLAR	127
KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ	137

KISALTMALAR

UHSS	: Ultra Yüksek Mukavemetli Çelikler
IF	: Arayer Atomsuz (interstitial-free)
DP	: Çift fazlı
SSD	: Şekillendirme Sınır Diyagramları
CQ	: Ticari Kalite (commercial quality)
ULC	: Ultra Düşük Karbon (ultra low carbon)
BH	: Fırında Sertleşebilen Çelikler

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Grid markalama yöntemlerinin karşılaştırılması	49
Çizelge 3.1 : Sıcak daldırma ile galvanizlenmiş yüksek mukavemetli IF çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri	64
Çizelge 4.1 : İki malzemenin kimyasal kompozisyonları.	80
Çizelge 4.2 : Cihazın transfer ettiği verilerden bir örnek.....	86
Çizelge 5.1 : Çekme deneyi sonuçları.....	105
Çizelge 5.2 : Anizotropi değerleri.....	115
Çizelge 5.3 : Deney malzemelerinin şekil değiştirme hızı duyarlılık üsteli değerleri.....	115
Çizelge 6.1 : ERD 1313 ve ERD 7114 saclarında ölçülen kubbe yükseklikleri	123

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kazalarda kullanılan malzemelere göre koruma oranı.....	1
Şekil 1.2 : Yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımına bağlı olarak ağırlıktan sağlanan kazanç	2
Şekil 1.3 : Çeliklerin mukavemet özelliğine göre uzama miktarındaki değişimi.....	3
Şekil 1.4 : IF çeliğinden üretilen bir otomobil kapı iç paneli.....	4
Şekil 1.5 : Arayer atomsuz ve yumuşak çeliğin akma eğrileri.....	4
Şekil 1.6 : Otomobil gövdesinde galvanizli sacların kullanıldığı yerler.....	5
Şekil 2.1 : Arayer atomlarının kenar dislokasyonunun altındaki bölgede toplanması.....	11
Şekil 2.2 : Akma uzaması.....	11
Şekil 2.3 : Düşük karbonlu çelikten bir çekme numunesi,numune boyunca Lüders bantlarının hareketiyle gerçekleşen şekil değişimi.....	12
Şekil 2.4 : Çekme deneyinde üniform uzama, büzülme ve kopma.....	13
Şekil 2.5 : Logaritmik gerçek gerilme-logaritmik gerçek birim şekil değişim doğrusu	14
Şekil 2.6 : 6063-O Alüminyum alaşımında şekil değiştirme hızının akma dayanımına etkisi	14
Şekil 2.7 : m'in belirlenmesinde kullanılan 2 metot.....	16
Şekil 2.8 : Saf demirde tercihli yönlenmenin gösterimi.....	17
Şekil 2.9: % 13 Cr içeren haddelenmiş bir çelikte kalıntılar.....	17
Şekil 2.10 : Bükme ve haddeleme doğrultusu	18
Şekil 2.11 : Anizotrop bir sacın bükme kıvrımının haddeleme doğrultusuna dik olmaması halinde çatlaması... ..	18
Şekil 2.12 : Ortalama dikey anizotropi parametresinin derin çekme oranı sınırına etkisi	19
Şekil 2.13 : Üç farklı bakır sacdan yapılmış kaplardaki kulak oluşumu.....	20
Şekil 2.14 : Saclarda düzlemsel anizotropinin haddeleme doğrultusu ile değişiminin kulak oluşumuna etkisi.....	21
Şekil 2.15 : Çekme Deneyinde büzülme ve kopma	21
Şekil 2.16 : Sac çekme numunesinde yaygın ve yerel büzülmenin gösterimi	24
Şekil 2.17 : Şekillendirme sınır diyagramı ve kabul edilen şekil değiştirme bölgesi	24
Şekil 2.18 : Deforme edilmiş dairesel gridlerdeki birim şekil değişimleri	25
Şekil 2.19 : Keeler tarafından tanımlanan şekillendirme sınır diyagramı.....	26
Şekil 2.20 : Keeler ve Goodwin tarafından tanımlanan şekillendirme sınır diyagramları.....	26
Şekil 2.21 : Örnek bir şekillendirme sınır diyagramı.....	27
Şekil 2.22 : Şekillendirme sınır diyagramlarını belirleyebilmek için hazırlanmış test numuneleri.....	28
Şekil 2.23 : Zimba ile gererek şekillendirmede kullanılan Hecker test düzeneği. ...	29
Şekil 2.24 : Hecker'in önerdiği test tekniğine göre oluşturulmuş ŞSD.	30
Şekil 2.25 : Keeler testinde kullanılan zimbalar.....	30
Şekil 2.26 : Marciniak düzlem içi test düzeneği.....	31
Şekil 2.27 : Nakazima test düzeneğinin şematik resmi.....	31
Şekil 2.28 : Hasek testinde kullanılan numunelerin şekli	32
Şekil 2.29 : Erichsen testinin görünüşü.....	32
Şekil 2.30 : Swift kap derin çekme testi.....	33

Şekil 2.31 : Olsen ve Erichsen testleri.....	34
Şekil 2.32 : Fukui konip kap testi.....	34
Şekil 2.33 : Hasarlı Fukui kap.....	35
Şekil 2.34 : Değişik kap testlerinde germe ve derin çekmeye bağlı oranlar.....	35
Şekil 2.35 : Delik genişletme deney düzeneği.....	36
Şekil 2.36 : Eliptik kalıplı hidrolik şişirme testi	36
Şekil 2.37 : Değişik test metotları kullanılarak oluşturulmuş şekillendirme sınır diyagramları	37
Şekil 2.38 : Şekillendirme Sınır Diyagramı üzerinde $\dot{\epsilon}_{SD_0}$ değerinin gösterilişi.....	38
Şekil 2.39 : Düşük karbonlu çeliklerde $\dot{\epsilon}_{SD_0}$ ile pekleşme üsteli n arasındaki ilişki	38
Şekil 2.40 : n değeri ile $\dot{\epsilon}_{SD_0}$ ilişkisi	39
Şekil 2.41 : Şekillendirme sınır diyagramları üzerinde sac kalınlığının etkisi.	39
Şekil 2.42: Sac kalınlığı ve pekleşme üstelinin $\dot{\epsilon}_{SD_0}$ üzerindeki etkisi.....	40
Şekil 2.43 : Düzlem birim şekil değişiminde şekillendirme sınırı üzerinde kalınlığın etkisi.....	41
Şekil 2.44 : Akma dayanımının $\dot{\epsilon}_{SD_0}$ üzerindeki etkisi	41
Şekil 2.45 : Şekillendirme sınır eğrisi üzerinde birim şekil değişimi yolunun etkisi	42
Şekil 2.46 : Haddeleme yönüne göre şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması	43
Şekil 2.47 : Elektrokimyasal dağlama yönteminde kullanılan elemanlar	44
Şekil 2.48 : Elektrokimyasal dağlama yönteminin gösterimi	45
Şekil 2.49 : Metal yüzeyi ve fotogrid arasında vakumla fotokimyasal dağlama tekniği	46
Şekil 2.50 : Grid işleme düzeneği	46
Şekil 2.51 : Serigrafi yönteminin gösterimi.....	48
Şekil 2.52 : Serigrafi yöntemiyle yüzeyi daire desenleri işlenmiş sac malzeme	48
Şekil 2.53 : Deformasyon sonrası oluşan elipsler	50
Şekil 2.54 : Mylar şerit.	51
Şekil 2.55 : Tekil eleman şekil değişimi ölçümüne dayalı dijital kamera.....	52
Şekil 2.56 : Stereo-görüntü ölçümünün ilkesi.....	53
Şekil 2.57 : Pozisyon aygıtı ile tek dijital kameralı stereo-görüntü	53
Şekil 2.58 : Grid ölçme metodunda kullanılan kamera yöntemleri	54
Şekil 3.1 : Çeliklerde karbon miktarının r değeri üzerindeki etkisi.	56
Şekil 3.2 : Değişen soğuk haddeleme miktarlarına göre karbon yüzdesinin r üzerindeki etkisi	56
Şekil 3.3 : Nb / C oranının $\bar{r}$ değerine etkisi.....	57
Şekil 3.4 : Ti ile stabilize IF çeliğinde denge koşulları altında çökelme mekanizması.....	58
Şekil 3.5 : Mn'ın değişik karbon miktarları içeren çeliklerde r değerleri üzerindeki mekanizması	58
Şekil 3.6 : Ti stabilize IF çeliklerinde çökelme sıcaklığının ve Ti çökeltilerinin şematik gösterilişi.....	59
Şekil 3.7 : Fırında sertleşme işlemi görmüş çelik levhanın gerilme deformasyon ilişkisi.....	61
Şekil 3.8 : Çeşitli çeliklerin çekme mukavemeti ve anizotropi (r_m) katsayısı arasındaki ilişkisi.....	62
Şekil 3.9 : Nb veya Ti ile stabilize edilmiş IF çeliğinde fosfor kuvvetlendirmesi...	63
Şekil 3.10 : Yüksek mukavemetli EDDQ-IF çeliğinin proses şartları	64
Şekil 3.11 : IF çeliklerinin üretim akım şeması.....	66

Şekil 3.12 : Ti ile stabilize edilmiş ULC 'lu çeliklerin dekarbürizasyonu sırasında karbon miktarındaki değişim	69
Şekil 3.13 : Konvansiyonel kutu tavlama prosesi ile NKK-CAL prosenin karşılaştırılması	71
Şekil 3.14 : Sıcak deformasyon sırasında ortaya çıkan gerilimin sıcaklığın azalmasıyla artması	73
Şekil 3.15 : Tufal tabakasını temizlemek için gerekli olan asitle temizleme zamanının sıcak şerit sıcaklığına bağlı olarak incelenmesi	73
Şekil 3.16 : 680 °C'ye yakın soğutma sıcaklıkları altında IF çelikleri içerisinde C+N yerleşimi	74
Şekil 3.17 : Haddeleme sıcaklığının tane boyutuna etkisi	75
Şekil 3.18 : Haddeleme Sıcaklığının Akma Dayanımına Etkisi	75
Şekil 3.19 : Sıcak Daldırma ile galvanizlemede gerçekleştirilen işlem aşamaları	77
Şekil 4.1 : Erdemir 1313 (galvanizli)	79
Şekil 4.2 : Erdemir 7114 (galvanizsiz)	79
Şekil 4.3 : ERD 1313 ve ERD 7114 her üç haddeleme yönüne göre hazırlanmış çekme deneyi numuneleri	81
Şekil 4.4 : Çekme deneyi numunesi boyutları	82
Şekil 4.5 : Shimadzu çekme deneyi cihazı	82
Şekil 4.6 : Video tip ekstansometre ile ölçüm.	83
Şekil 4.7 : Deney numunesinin bağlanmış görüntüsü	83
Şekil 4.8 : ERD 1313 çekme deneyi sonrası kopan numuneler	84
Şekil 4.9 : ERD 7114 çekme deneyi sonrası kopan numuneler	84
Şekil 4.10 : ERD 1313 5 mm/dak ve 50 mm/dak çene hızlarında kopan çekme deneyi numuneleri	88
Şekil 4.11 : ERD 7114 5 mm/dak ve 50 mm/dak çene hızlarında kopan çekme deneyi numuneleri	88
Şekil 4.12 : Şekil değiştirme hızının akma gerilmesine etkisi	89
Şekil 4.13 : Numunelerin lazer makinesinde kesimleri	90
Şekil 4.14 : ERD 1313 deney numuneleri	91
Şekil 4.15 : ERD 7114 deney numuneleri	91
Şekil 4.16 : Serigrafi ile daire grid işlenmiş deney numunesi	92
Şekil 4.17 : Düzlem dışı germe testinin şematik görüntüsü	93
Şekil 4.18 : Zimba	94
Şekil 4.19 : Pot çemberi	94
Şekil 4.20 : Dişi Kalıp	95
Şekil 4.21 : Kalıplar ve pot çemberinin prese monte edilmiş resmi.	95
Şekil 4.22 : Hidrolik pres.	96
Şekil 4.23 : Galvanizli (ERD 1313) deforme edilmiş deney numuneleri	97
Şekil 4.24 : IF (ERD 7114) deforme edilmiş deney numuneleri	97
Şekil 4.25 : Farklı yağlayıcılarla deforme edilmiş 200 x 200 galvanizli(ERD 1313) deneyi numuneleri	98
Şekil 4.26 : Farklı yağlayıcılarla deforme edilmiş 200 x 200 IF (ERD 7114) deneyi numuneleri	98
Şekil 4.27 : Yüksek pot basıncı nedeniyle yarılan hatalı IF deney numunesi	99
Şekil 4.28 : Yetersiz baskı basıncı sonucu yırtılamayan IF deney numunesi	100
Şekil 4.29 : Deneyde kullanılan ve sonuç alınamayan numuneler	100
Şekil 4.30 : Fotoğraf çekimi için hazırlanan düzenek	102

Şekil 4.31 : Deforme olmamış numune ile ölçülecek bölgenin aynı fotoğraf karesine alınmış hali	103
Şekil 4.32: Ölçüm alınan bölgeler	104
Şekil 5.1 : ERD 1313 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi grafikleri	106
Şekil 5.2 : ERD 1313 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° numunelerin toplu mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi grafikleri	107
Şekil 5.3 : ERD 7114 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi grafikleri	108
Şekil 5.4 : ERD 7114 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° numunelerin toplu mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi grafikleri	109
Şekil 5.5 : ERD 1313 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.....	110
Şekil 5.6 : ERD 7114 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.....	111
Şekil 5.7 : ERD 1313 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin logaritmik gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.....	113
Şekil 5.8 : ERD 7114 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin logaritmik gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.....	114
Şekil 5.9 : ERD 1313 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafikleri.....	117
Şekil 5.10 : ERD 7114 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafikleri	118
Şekil 5.11 : ERD 1313 (Galvanizli) için şekillendirme sınır diyagramı	119
Şekil 5.12 : ERD 7114 IF için şekillendirme sınır diyagramı.	119
Şekil 5.13 : ERD 1313 ve ERD 7114 malzemelerine ait şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	120
Şekil 6.1 : ERD 1313 ve ERD 7114 saclarının kubbe yükseklikleri.....	123
Şekil 6.2 : Farklı yağlayıcılarla çökertilen IF deney numuneleri.....	124
Şekil 6.3 : Farklı yağlayıcılarla çökertilen ERD 1313 deney numuneleri.....	125
Şekil 6.4 : IF sacı için mineral yağ ve kuru halde elde edilen şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması.....	125
Şekil 6.5 : Kuru ve teflon film ile yağlanmış numunelerde gerçekleşen yırtık konumlarının karşılaştırılması.....	126

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN DERİN ÇEKME SACLARININ ŞEKİLENDİRİLEBİLİRLİĞİNİN ANALİZİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında otomotiv sektöründe karmaşık geometrili parçaların üretiminde kullanılan IF (interstitial-free, arayer atomsuz) çelik sacı, aynı karbon oranına sahip sıcak daldırma ile galvanize edilmiş bir sacın şekillendirilebilirlikleri karşılaştırılmıştır. Sac kalınlığının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisini elimine edebilmek için çalışmada her iki sacın da kalınlıkları aynı alınmıştır.

Öncelikle malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için sırasıyla çekme, anizotropi ve şekil değiştirme hızına duyarlılık deneyleri gerçekleştirilerek malzeme parametreleri elde edilmiştir. Daha sonra düzlem dışı test yöntemi kullanarak malzemelerin şekillendirme sınır diyagramları deneysel olarak elde edilmiş ve ilgili sacların şekillendirilebilirlikleri karşılaştırılarak ortaya çıkan sonuçlar malzemelerin mekanik özellikleriyle ilişkilendirilmiştir.

Ayrıca yağlayıcıların şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisini görebilmek için katı ve sıvı yağlayıcılar kullanılmış ve her yağlayıcı için iki malzemenin sac çökertme yükseklikleri ölçülmüştür. Ek olarak farklı yağlayıcıların kullanılmasıyla şekillendirme sınır diyagramının sağ tarafının nasıl değiştiği irdelenerek yağlayıcıların iki eksenli şekil değişimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çalışmanın sonucunda IF (ERD 7114) malzemesinin şekillendirilebilirliğinin galvanizli malzemeye (ERD 1313) göre daha yüksek olduğu ve sıvı esaslı yağlayıcıların içerisinde mineral yağın diğer yağlayıcılara oranla daha yüksek sınır deformasyon değerleri verdiği ve en yüksek performansa sahip olduğu tespit edilmiştir.

FORMABILITY ANALYSIS OF DEEP DRAWING QUALITY STEEL SHEETS USED IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

SUMMARY

In this thesis, formability of IF (interstitial-free steel) and hot dip galvanized steel sheets which are used manufacturing of complex geometry parts in automotive industry compared.

Especially interstitial free steels had widely used in automotive industry, because this steel had the minimum carbon levels and higher plastic anisotropy coefficients. This steel is used especially complicated part geometries such as outer or inner panel of automobiles because of the better formability.

In order to eliminate effect of sheet thickness on formability, thickness of these two steel sheets were received the same. Thickness of these steel sheets were 1.2 mm.

Firstly, chemical compositions of these two sheets were analysed and results were compared to with the informations of the company. Same carbon levels were obtained in tests, so carbon levels had no significant effects on formability.

In order to evaluate formability of these two steel sheets, primarily uniaxial tensile test, anisotropy and strain rate sensitivity tests were done to obtain the mechanical properties of these two steel sheets.

Strain hardening coefficient (n), plastic anisotropy (n), planar anisotropy (Δr) coefficients which are important material properties were obtained by uniaxial tensile tests.

After the uniaxial tensile tests were done, forming limit diagrams of these two steel sheets have been determined experimentally by out-of-plane formability test.

Firstly, same length, but different widths sheet samples were prepared by laser cutting in order to obtain different deformation situations.

While lengths of these steel samples were 200 mm, the widths of these 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 and 200 mm respectively.

While small widths (25, 50 and 75 mm) showed the uniaxial deformation situations, 100 and 125 mm widths plane strain deformation situations, 200x200 mm square steel samples showed the biaxial deformation situations. All deformation situations were obtained with these steel samples.

Then, surfaces of these steel samples were marked with serigraphy method. Circle grid marking technic was used and diameter of each circle grids were selected 2.5 mm. Then these steel sheets were deformed by hemispherical punch until the first necking or crack started.

After the out of plane formability test were done, these circle grids were turned into ellipses and major and minor diameters of these circle grids were measured with image pro plus software. After these tests were done, formability of these two steel sheets were evaluated and formability, observed from FLDs, has been correlated with mechanical properties of materials.

Relationships between formability and mechanical properties were investigated and three different material parameters were used in this relationship. (strain hardening coefficient, normal anisotropy and planar anisotropy)

In addition to that solid and liquid lubricants were used to evaluate lubrication effect on formability, therefore six different lubricants were tried in this thesis. These were mineral oil, silikon spray, silikon jel, PTFE, polietilen, PVC respectively.

The effect of lubricants on biaxial forming area were investigated and the right hands of forming limit diagrams of these two sheets were analyzed in six different lubrications.

Moreover, limiting dome heights of these sheets were measured and these heights were evaluated according to these six different lubrications and correlations of the limiting dome heights and right hand of forming limit diagrams were analysed together.

Also, situations of failure sites were compared in six different lubrications and distance of failure site were analysed in six different lubrications.

After the uniaxial tensile tests, strain hardening coefficient (n), plastic anisotropy (r), planar anisotropy (Δr) coefficients of interstitial free steels were higher than the other steels.

Deep drawability and earing tendency of IF steels were higher than the galvanized steel sheets, because of the , plastic anisotropy (r), planar anisotropy (Δr) coefficients.

Formability of IF (interstitial-free steels) were higher than galvanized steel sheet has determined at the end of the out-of-plane formability tests

Although these two steel sheets had the same carbon level, formability of galvanized steel sheet were lower, because of the Fe-Zn intermetallic brittle layers.

After the six different lubrications were analysed, higher limit strains were obtained by mineral oils. Mineral oil showed the maximum limited deformations not only in interstitial free, but also galvanized steel.

Performances of PTFE and PVC solid lubricants were the second, but silikon spray and silikon gres showed the poor performance.

The slopes of the right hand of forming limit diagrams had the maximum in mineral oil and this oil gave the highest dome height.

In addition to that distance of the failure site to dome was the closest in mineral oil.

Therefore mineral oil had the best performance within the six different lubrications. Mineral oil formed the better film between sheet and punch, friction and metal-metal contact decreased, the limiting dome heights of these two sheets were the highest and failure obtained in dome in mineral oil

In this work, we obtained the following results:

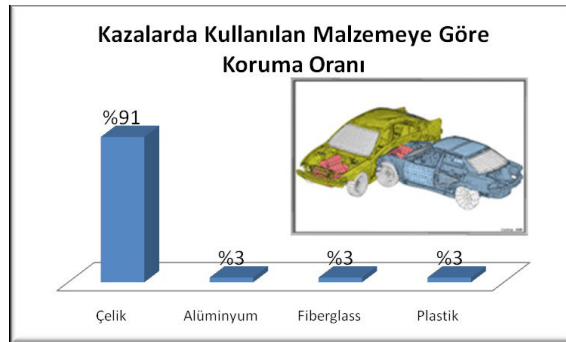
- 1) Formability of the interstitial free steel was higher than the galvanized steel sheet, these differences were related to brittle intermetallic layers
- 2) Strain hardening coefficient (n) of interstitial free steel was higher than the galvanized steel sheets, therefore strain distributions were higher in interstitial free steel.

- 3) Plastic anisotropy coefficient (r) of interstitial free steel was higher than the galvanised steel sheets. Therefore deep drawability of this steel was higher than the galvanised steel sheet.
- 4) Planar anisotropy coefficient (Δr) of interstitial free steel was higher than the galvanised steel sheets, so earing tendency was higher in interstitial free steel.
- 5) Lubricants effected the right hand diagram of forming limit diagrams significantly, mineral oil had the maximum performance within the six different lubrications, because limiting dome height of these steels were the highest in mineral oil and the slopes of the right-hand forming limit diagram were the highest and highest limit deformations were obtained in the same oil.
- 6) Mineral oil formed the better film layer between the sheet-punch interface and friction decreased and failure obtained in the dome within the other lubrications, so both interstitial free and galvanised steel sheets formed better in this oil and gave the highest limiting dome height results.

1. GİRİŞ

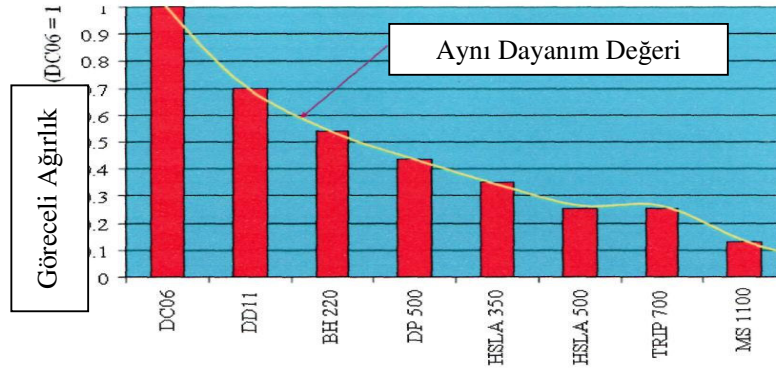
Günümüzde enerji fiyatlarındaki artışlar, yakıtların sürekli olarak azalıyor olması, CO₂ salınımı nedeniyle çevre kirliliğinin artması otomobil üreticilerinin karşısında duran önemli sorunlardır [1]. Otomotiv endüstrisi bu problemlerin üstesinden gelebilmek için araçların yakıt sarfiyatını azaltma yönünde son zamanlarda önemli çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmaların başında mevcut taşıt ağırlığının azaltılması hedeflenmektedir [2]. Çünkü taşıt ağırlığı ile yakıt tüketimi arasında yakın bir ilişki vardır ve ağırlıkta yapılacak %50'lik bir azalma, %35 civarında bir yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Bu amaçla, otomotiv sanayi araçların gövdesinde daha hafif malzeme kullanıp, araç ağırlığını azaltarak daha az yakıt tüketimi yoluna gitmektedir [3].

Hafif malzemelerin kullanılması ihtiyacı, otomobil üreticilerini yumuşak çeliğin yerine alüminyumun kullanılmasına yöneltmektedir [4]. Ancak alüminyumun cevherden itibaren üretimi sırasında birim miktarı için kullanılan enerjinin yüksek olması maliyet açısından geride kalmasına yol açmaktadır [5]. Bununla birlikte taşıtlar için bir başka önemli unsur olan güvenliğin geliştirilmesi arzusu çelik gibi yüksek mukavemetli malzemelerin daha yoğun kullanılmasına yol açmaktadır. Şekil 1.1'de kullanılan malzeme türüne göre kazalardan korunma oranları verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, yapılan kazalarda çelik yapılar ile tasarımı yapılmış araçlarda can kaybı %90 oranında azaltılması mümkün olabiliyorken, alüminyum ve diğer fiberglass, plastik malzemelerde ise bu oran % 3 seviyelerine kadar düşmektedir.



Şekil 1.1 Kazalarda kullanılan malzemelere göre koruma oranı [6]

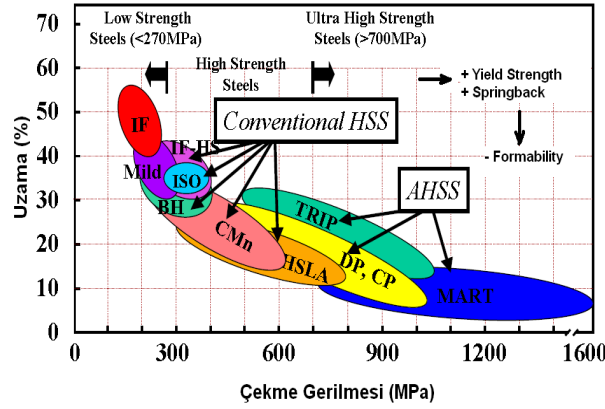
Günümüzde çelik endüstrisi geliştirmiş olduğu yeni nesil otomotiv çelikleriyle (HSLA, DP, IF, TRIP vb. çelikler) mukavemet açısından üstün olmakla kalmayıp, aynı zamanda ağırlık açısından da alüminyuma karşı rekabet edebilmektedir [4]. Çünkü bu çeliklerin mukavemet/ağırlık oranları yüksektir ve birim ağırlık için daha yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilir [7]. Dolayısıyla bu malzemeler sayesinde sağlanan mukavemet artırımı ile mekanik performanstan ödün vermeden daha ince kalınlıklarda parçaların kullanılması mümkün hale gelmektedir [8]. Şekil 1.2 sırasıyla düşük karbonlu çeliklerden başlayarak yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımına bağlı olarak taşıtlarda sağlanan ağırlık kazancını karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Burada DC 06 olarak gösterilen çok düşük karbonlu çeliğin ağırlığı referans olarak alındığında, diğer yüksek mukavemetli çelikler aynı dayanımı daha düşük ağırlıkta sağlayabilmektedir [4]. Özellikle, otomobil gövdesinin metal sac parçalardan oluştuğu ve yaklaşık olarak toplam araç kütleinin %25'ini meydana getirdiği göz önüne alınacak olursa, gövdeye ait parçaların yeni nesil çelikler ile üretilmesinin önemi daha iyi anlaşılacaktır [7].



Şekil 1.2 Yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımına bağlı olarak ağırlıktan sağlanan kazanç [4]

Otomotiv sektöründe kullanılan yeni nesil çelik malzemeler çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır, ancak en çok tercih edilen sınıflandırma ise mekanik özelliklere ve özellikle çeliğin mukavemet değerlerine göre yapılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre; 270 MPa'nın altında çekme dayanımı olan çelikler düşük mukavemetli çelikler olarak adlandırılırken, 270 ile 700 MPa arasında çekme dayanımına sahip olan çelikler yüksek mukavemetli çelikler (HSS), 700 MPa'dan daha yüksek çekme dayanımına sahip olanlar ise ultra yüksek mukavemetli çelikler (UHSS) olarak adlandırılmaktadır.

Ancak belirtilen malzemelerin mukavemet özellikleriyle beraber şekillendirilebilirlik kabiliyetlerinin de göz önüne alınması gerekmektedir. Çünkü, parçaların üretimi süresince tasarlanan geometrilerin ilgili malzemeler tarafından kabul edilebilir ölçülerde olması gerekmektedir [8]. Yüksek mukavemetli malzemelerde ise karmaşık geometrili parçaların üretimini sağlayabilmek zordur. Çünkü, genelde malzemelerin mukavemet ve süneklik özellikleri birbiriyle ters orantılı olup, malzemenin mukavemeti arttıkça, şekillendirilebilirliği azalmaktadır [9-12]. Şekil 1.3 de otomotiv sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılan yeni nesil ve diğer çeliklerin uzama miktarlarının mukavemete göre değişimi verilmiştir. Özellikle ultra yüksek mukavemetli çeliklerin uzama miktarlarındaki düşüş bu malzemelerin tasarımlarda özgürce kullanılmasını kısıtlandırmaktadır.

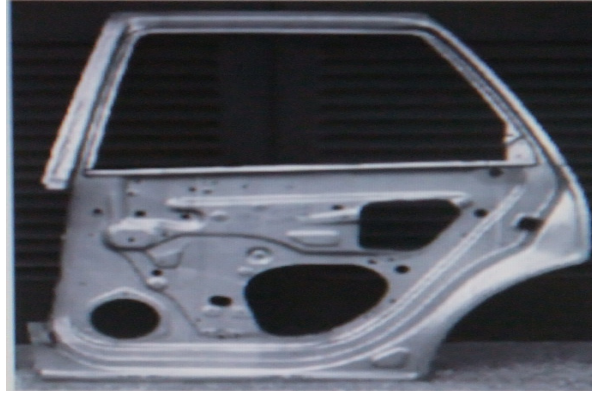


Şekil 1.3 Çeliklerin mukavemet özelliğine göre uzama miktarındaki değişimi [8]

Bu tür malzemelerle karmaşık geometrili parçalar elde edilmek istendiğinde, malzeme istenilen şekil değişimini sağlayamadığından üretim esnasında erken yırtılmalar görülebilmektedir. Özellikle karmaşık geometriye sahip gövde panellerinin üretiminde yüksek şekillenebilirlik özelliğine sahip sacların kullanılmasına ihtiyaç vardır.

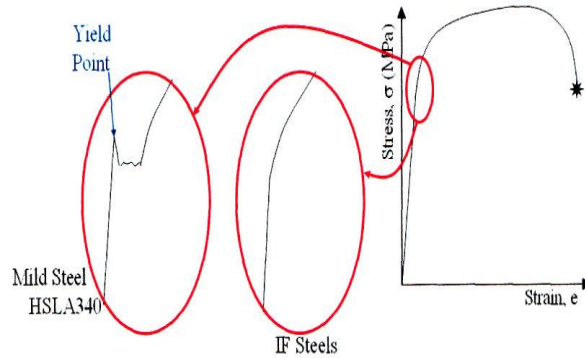
Yüksek şekillendirilebilirliğe sahip çelikler içerisinde arayer atomsuz çeliklere (IF) değinilecek olursa, adından da anlaşılacağı üzere bu çeliklerde C ve N gibi arayer atomları çözelti içerisinde uzaklaştırılmıştır. Bu uzaklaştırma işlemi, kuvvetli karbid ve nitrid yapıcıları olan Ti veya Nb'un eklenmesiyle gerçekleştirilmektedir. Arayer atomlarının çözelti içerisinde ayrılması, çeliğe yaşlanmama ve üstün şekillendirilebilirlik özelliği kazandırmaktadır [13]. Bu özellikleri sebebiyle IF çelikleri otomotivde ön ve arka kapı iç paneli, stepne muhafazası ve arka taban

paneli gibi karmaşık parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.4 de IF çeliğinden üretilen bir kapı iç paneli gösterilmektedir [14].



Şekil 1.4 IF çeliğinden üretilen bir otomobil kapı iç paneli [14]

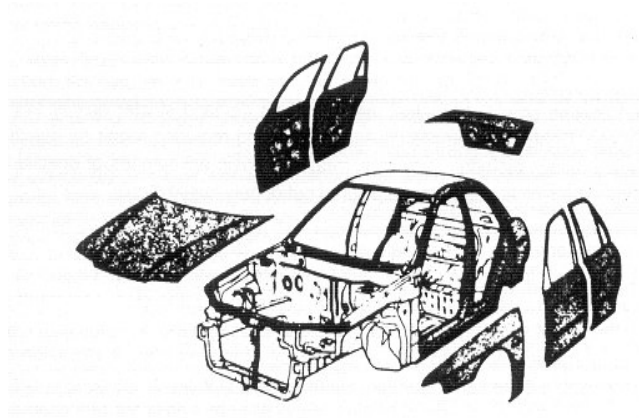
IF çelikleri, diğer düşük karbonlu çelikler gibi deformasyon yaşlanması ve belirgin akma göstermezler. Çünkü, çeliğin ve özellikle düşük karbonlu çeliklerin deformasyon yaşlanmasına uğramasının temel sebebi arayerlerde bulunan C ve N atomlarından kaynaklanmaktadır. Bu atomlar kendi enerji seviyelerini minimuma indirgeyebilmek için kenar dislokasyonlarının altındaki boşluklara yerleşmekte ve burada Cottrell atmosferi adı verilen atom kümelerini oluşturmaktadırlar. Bu atom kümesi dislokasyonların ileri hareketini engellemekte ve onları kilitlemektedir. Bu da malzemenin akma dayanımını artırarak belirgin akmanın ve buna bağlı olarak da Lüders-Hartman bantlarının oluşmasına sebep olmaktadır [15]. Ancak, IF çeliklerinde ise C ve N arayer atomları çözelti içerisinde bulunmadığından malzemenin çekme eğrisinde belirgin akma görülmemektedir [16] (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 Arayer atomsuz ve yumuşak çeliğin akma eğrileri [16]

Ek olarak IF çeliklerinin üretimi, günümüzde sadece soğuk ve sıcak sac lar için değil aynı zamanda çinko kaplı çelik sac lar, yüksek dayanımlı çelik sac lar vb. değişik uygulamalarla artmakta ve yüksek dayanımlı IF, paslanmaz IF şeklinde yeni tipleri oluşturularak dayanımları artırabilmektedir [16].

Otomotivde, dış panellerde görülen korozyona karşı iyi korumanın yapılmak istenmesi galvanizli sac ların kullanımını cazip hale getirmektedir. Galvanizleme, çelik yüzeyinin çinko ile kaplanması işlemidir. Galvanizleme, korozyona karşı korumanın yanında, sıcaklık direnci, lehimlenebilme ve boyanabilme gibi nedenlerden ötürü de uygulanmaktadır. Şu anda korozyon direncinde en etkili yol olarak sıcak daldırmayla galvanizleme işlemi görüldüğü için otomotiv endüstrisinde sıcak daldırmayla galvanize edilen çelik sac ların kullanımında artış görülmektedir [17]. Bugün bir araba gövdesinin yaklaşık % 40'lık bir bölümü galvanizli sac lardan oluşmaktadır. Dış paneller, ön ve arka taban panelleri, çamurluk, yağ karteri vb gibi parçalar sıcak daldırmayla galvanize edilmiş sac ların otomotivde kullanım yerlerine örnektir. Şekil 1.6 galvanizli sac ların otomotivde kullanıldığı bölümleri göstermektedir.



Şekil 1.6 Otomobil gövdesinde galvanizli sac ların kullanıldığı yerler

1.1 Tezin Amacı

Sıcak daldırma yöntemiyle galvanize edilmiş çelik sac lar, günümüzde daha iyi korozyon dayanımını sağlayabilmek için otomobil uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle sıcak daldırma yöntemiyle galvanize edilmiş çelik sac ların şekillendirilebilmesi otomobil endüstrisi için korozyona dayanıklı parçaların üretilmesinde önemli bir yere sahiptir. Galvanizli sac ların şekillendirme davranışı, kaplanmamış sac ların şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkan plastik dengesizlik,

boyun verme ve yırtılma gibi faktörler ile sınırlı olmasının yanı sıra kaplama içerisinde çatlakların oluşması, çelik ile kaplama arasındaki bağın deformasyon sırasında bozulması, ara yerde oluşan sürtünme koşulları gibi faktörlere de bağlıdır [18].

Bu yüksek lisans tezinin amacı, arayer atomsuz çelik sac (IF) ile aynı karbon oranına sahip olan sıcak daldırmayla galvanize edilmiş sacın şekillendirilebilirliklerini karşılaştırarak, ortaya çıkan farklılıkları yorumlayabilmek ve galvanizli sacın şekillendirme davranışını incelemektir. Ayrıca sürtünmenin şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisini görebilmek için, katı esaslı yağlayıcılar ve sıvı yağların performansları da iki malzeme üzerinde değerlendirilmiştir.

Bu amaçla çalışmada öncelikle malzemelerin mekanik özellikleri çekme testleriyle belirlenmiş, daha sonra ilgili sacların şekillendirilebilirliklerini karşılaştırabilmek için şekillendirme sınır diyagramları deneysel olarak elde edilip, malzemeler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Ardından yağlayıcıların iki eksenli şekil değiştirme bölgesindeki etkileri incelenip, yağlayıcı performansları değerlendirilmiştir.

Bölüm 2’de sacların şekillendirilebilirliği, şekillendirme sınır diyagramları, bu diyagramların oluşturulması için kullanılan test yöntemleri ve deformasyonların ölçülmesinde gerekli donanımlar hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 3’te çalışmada kullanılacak olan malzemeler tanıtılmış ve bu malzemelerin özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 4’te deneysel çalışmalar ortaya konulmuştur. Burada deney düzenekleri hakkında bilgi verilip, deneysel çalışmaların nasıl yapıldığı ve çalışma kapsamında ne tür ölçümler gerçekleştirildiği anlatılmıştır.

Bölüm 5’te deneysel çalışma sonuçları ortaya konulmuştur. Malzemelerin çekme testinden elde edilen mekanik özellikleri ve şekillendirilebilirlikleri arasındaki ilişki açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıca çalışmada yağlayıcılar üzerinde detaylı olarak durulmuş ve deneyde kullanılan yağlayıcıların şekillendirilebilirlik üzerindeki etkileri de bu bölümde incelenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Literatürde derin çekme saclarının şekillendirilebilirliği üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bunlardan biri Kumar [19] tarafından yapılmış olup, çalışmasında ekstra derin çekme kalite sacların şekillendirilebilirliğini incelemiş ve sac

kalınlığının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bunun için 5 farklı kalınlıkta ekstra derin çekme kalite sacın her birinin şekillendirme sınır diyagramını deneysel olarak elde edip kalınlığın diyagramı nasıl etkilediğini incelemiş ve sonuçlarını malzemenin mikro yapı, mekanik özellikleri ile ilişkilendirmiştir.

Narayanasamy ve arkadaşları [20], iki farklı kalınlıkta IF sacının şekillendirilebilirliğini karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında malzemelerin mekanik özelliklerini, şekillendirme sınır diyagramlarını belirlemişler ve ayrıca hasarlı bölgelerden taramalı elektron mikroskobu ile görüntüler alarak kırılma yüzeylerini inceleyip malzemelerin kırılma davranışını şekillendirilebilirlikle ilişkilendirmişlerdir. Nourani ve arkadaşları [21], aynı kalınlıkta galvanize edilmiş IF, galvanizsiz IF ve RRSt14O3 derin çekme kalite saclarının şekillendirilebilirliklerini karşılaştırmışlar ve gerçek bir otomobil iç kapı panelinin üretilmesinde bu sacları kullanarak kırılma risk bölgelerini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında çekme deneyi ile elde edilen sonuçlar, şekillendirme sınır diyagramları ve otomobil iç kapı panelinin üretimi sırasında sacların gösterdikleri davranış farklılıkları, ilgili malzemelerin sürtünme katsayılarına ve yüzey pürüzlülüklerine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Safaeirad ve arkadaşları [22], farklı kurşun yüzdelerine sahip olan 5 adet sıcak daldırmayla galvanize edilmiş IF saclarında, kurşun oranının şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında belirtilen 5 sacın her birinde, tekstür katsayıları hesaplanmış, kaplamaların kristalografik yönelmesi, malzemelerin mekanik özellikleri ve şekillendirme sınır diyagramları belirlenmiştir. Böylelikle mikroyapı, tekstür ve şekillendirilebilirlik konularını birlikte ele almışlardır. Araştırmacılar, çalışmalarının sonucunda çinko banyosunda kurşun oranının artmasının akma dayanımını arttırdığını, sünekliği azalttığını ve şekillendirilebilirliği düşürdüğünü belirtmişlerdir. Öztürk ve Lee [23], alüminyum ile deokside edilmiş elektro galvanizli derin çekme kalite sacın şekillendirilebilirliğinde sürtünme etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında düzlem dışı (out-of-plane) şekillendirme test yöntemini kullanmışlar ve numuneleri farklı yağlayıcılarla şekillendirip, deneysel olarak elde ettikleri deformasyon yörüngelerini nümerik olarak karşılaştırmışlardır. Sonuçta her iki sonucun uyumlu olduğunu, yağlayıcıların deformasyon dağılımını iyileştirdiğini ve bölgesel incelmeyi geciktirdiğini tespit etmişlerdir. Moshksar ve Mansorzadeh [24], çalışmalarında düzlem dışı şekillendirme testini kullanıp, yağlayıcılı ve yağlayıcısız

olarak şekillendirme sınır diyagramlarını ayrı ayrı elde etmişler ve yağlayıcı
koşulda şekillendirme sınır diyagramının daha yukarıda olduğunu bildirmişlerdir.

2. SAC ŞEKİLLENDİRİLEBİLİRLİĞİ

Şekillendirilebilirlik, bir malzemenin hasar olmadan belirli bir şekle dönüşebilme yeteneği olarak tanımlanır. Bu, karmaşık parçaların başarılı bir şekilde üretilmesinde sac malzemelerin önemli bir özelliğidir.

Bu tanımlamanın üç anahtar elemanı bulunmaktadır : (1) malzeme, (2) işlem, ve (3) şekil. Bu üç anahtar elemanın tümü şekillendirilebilirliğin herhangi bir aşamasında birlikte göz önüne alınmak zorundadır, çünkü bunların tümü parça üretimine birlikte etki ederler [25]. Fazla sayıdaki değişkenin şekillendirilebilirlik üzerine karmaşık bir şekilde etki etmesinden dolayı, malzemenin değişik koşullar altında şekillendirilebilme yeteneğini kapsamlı olarak tek başına tanımlayan bir parametre bulunmamaktadır [19].

2.1 Sacların Şekillendirilebilirliğini Etkileyen Faktörler

Çok sayıda değişken şekillendirilebilirliği etkilemesine rağmen, en önemli olarak kabul edilen birkaç değişken üzerinde durulacaktır. Bu değişkenler, işlem ve malzeme değişkenleri olarak sınıflandırılır. Genel olarak, işlem değişkenleri sac üzerine gelen dış zorlamayı tanımlarken, malzeme değişkenleri ise sac malzemenin bu zorlamalara karşı sacın göstereceği direnci tanımlar. İşlem değişkenlerinin sabit kaldığı durumda, malzeme özelliklerindeki bir değişiklik sac üzerindeki şekil değiştirme durumunu değiştirecektir. Bu yüzden sacın zorlanma durumu tamamiyle işlem değişkenleri tarafından kontrol edilmemektedir [26].

2.1.1 İşlem Değişkenleri

Kalıp ve zımba geometrileri, konfigürasyonları, kalıp mamul boşlukları, pres hızı vb. gibi değişkenler, sac şekillendirme işlemini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu parametreler arasında, kalıp ve zımba radyüsü bölgesel şekil değişimlerinden dolayı oldukça önemlidir. Tasarımcılar tarafından keskin hatlara sahip karmaşık şekilli parçalar için küçük radyüslü zımbalar kullanılır. Fakat bu radyüslerin oluşturduğu yerel şekil değişimlerinden dolayı, bu tür parçaların imalatında büyük zorluklar açığa

çıkar. Radyüs üzerindeki bölgesel şekil değişimleri, deformasyonun diğer bölgelere yayılmasını önleyerek hasar olasılığını artırır. Bu tür parçalarda yumuşak geçişlerin olmayışı, işlem sırasında kalıbın deformasyonu takip edememesi problemini de meydana getirebilir. Bu problemi ortadan kaldırmak için daha büyük zımba radyüsleri kullanımı yoluna gidilmektedir. Ayrıca montaj sırasında, zımba-kalıp grubundaki eksen kaçıklıkları da, şekillendirme sırasında sacda farklı doğrultularda kuvvet bileşenleri oluşturur. Bu şekilde, kalıp ve zımbanın montaj sırasında düzgün bağlanmaması sonucu metal akışının süreksizliğinden dolayı hasar meydana gelebilir [26].

Pres hızının etkisi iyi ayarlanabildiği gibi iyi de anlaşılabilmesi gerekmektedir. Şekillendirme işlemi ve malzemeye bağlı olarak birbiriyle ters düşen sonuçlar elde edilebilir. Artan hız metallerin sünekliğini azaltabildiği gibi, aynı zamanda kalıp ile sac arasındaki sürtünmeyi azaltıp daha üniform bir incelmeye imkan da sağlayabilir. Ayrıca pres tam olarak üniform bir hız sağlayamamakta, sinüzoidal bir değişim göstermektedir. Bu nedenle, artan hız malzeme üzerinde bölgesel ısınmalara neden olup malzeme davranışlarının değişmesinde etkili olabilir. Sonuç olarak farklı hızlarda farklı malzeme duyarlılığı elde edilmektedir [27].

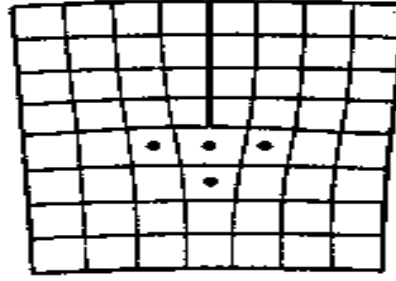
2.1.2 Malzeme Değişkenleri

Sac şekillendirmede en önemli rol oynayan malzeme özellikleri, plastik akma ve kopma davranışlarıdır. Bu özellikler malzemenin kimyasal bileşimi, döküm tekniği, sıcak soğuk haddeleme gibi faktörler tarafından kontrol edilmektedir. Bir malzemenin dayanımını artıran etkenler, genellikle şekillendirilebilirliğini azaltırlar. Bu etkenler; a) katı çözelti sertleşmesi, b) çökelme veya dispersiyon sertleşmesi, c) soğuk şekil verme ve ince taneli yapı, d) çelikteki martenzit gibi sert fazlardır. Sac şekillendirilebilirliği etkileyen malzeme değişkenleri çekme deneyi sonucu elde edilen akma noktası, elastiklik modülü, pekleşme üsteli, deformasyon hızına duyarlılık katsayısı, plastik anizotropi değerleri olarak sayılabilir.

2.1.2.1 Akma noktası

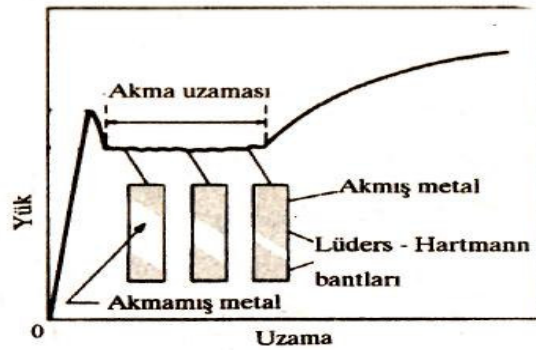
Bazı metaller ve özellikle yumuşak çeliğin çekme deneyinde, çekme eğrisinde ani bir düşme ve daha sonra iniş çıkışlar görülür. Akmanın bu şekilde meydana geldiği en yüksek nominal gerilme değerine üst akma sınırı, akmanın devam ettiği ortalama nominal gerilme değerine de alt akma sınırı denir. Bu olayın nedeni Cottrell tarafından açıklanmıştır. Çözeltilerin ana kafesinde ara yerlere yerleşen çözünen

atomlar, örneğin hacim merkezli kübik metallerin çoğunda karbon ve azot atomları, kendi enerji seviyelerini minimuma indirgeyip, enerji açısından en uygun konuma erişebilmek amacıyla yayınarak tercihli konumlar elde etmeye çalışırlar ve böylelikle kenar dislokasyonlarının altındaki boş bölgelerde toplanıp Cottrell atmosferi adı verilen atom kümelerini oluştururlar. Bu durum Şekil 2.1 de şematik olarak gösterilmektedir.



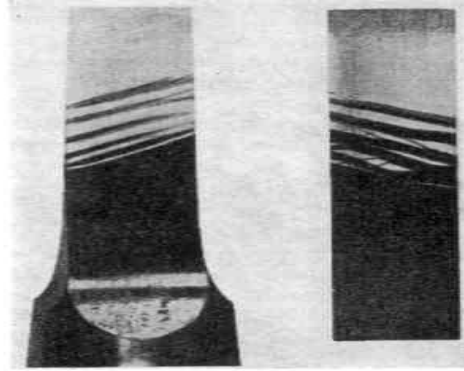
Şekil 2.1 Arayer atomlarının kenar dislokasyonunun altındaki bölgede toplanması

Cottrell atmosferi dislokasyon hareketini engellemektedir. Dolayısıyla dislokasyonun hareket edebilmesi için Cottrell atmosferinden kurtulması, bunun için de uygulanan gerilmenin yükseltilmesi gerekir. Gerilme, dislokasyonları atmosferden kurtardığı anda onları kristal içinde yürütmek için gerekli olandan fazla olduğundan, dislokasyonlar ani olarak hızla hareket ederken gerilme değerinde de ani bir düşme gerçekleşir. Akmanın bu şekilde meydana geldiği en yüksek nominal gerilme değerine üst akma sınırı, akmanın devam ettiği ortalama nominal gerilme değerine de alt akma sınırı denir. Gerilme üst akma sınırından alt akma sınırına düştükten sonra, alt akma sınırı boyunca oluşan uzamaya akma uzaması denir. Şekil 2.2’de bu durum çekme eğrisi üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Akma uzaması

Üst akma sınırından sonra çekme çubuğunda şekil değişimi homojen olmaktan çıkar ve şekil değiştirmiş bölge ile değiştirmemiş bölgeler arasında çekme doğrultusu ile yaklaşık 45° açı yapan bantlar oluşur[15]. Lüders-Hartmann bantları olarak adlandırılan bu bantlar akma süresince tüm çekme çubuğuna yayılır ve yüzeyde istenmeyen timsah derisi görünümlü yüzey hatalarına sebep olurlar. Şekil 2.3’de çekme çubuğunda oluşan Lüders-Hartman bantları görülmektedir.



Şekil 2.3 Düşük karbonlu çelikten bir çekme numunesi, numune boyunca Lüders bantlarının hareketiyle gerçekleşen şekil değişimi [28]

Derin çekme saçları için arzu edilmeyen bu olayı önlemek için şu önlemler alınabilir:

1. Ferrit fazındaki çözülmüş C ve N miktarını azaltmak için malzeme bünyesine, Al, Cr, Ti, Nb, B gibi kuvvetli karbür ve nitrür yapıcı elementler ilave edilebilir.
2. Yumuşatma tavlı sonrası küçük miktarlarda (% 2-5 gibi) soğuk haddeleme ve hemen kullanım gibi bir uygulama yapılabilir. Bu işlem sanayide temper haddesi olarak anılır.
3. Yaklaşık olarak 700° C de tavlanan çelik su verilmek suretiyle ani olarak soğutulmakta, böylece C ve N atomlarının yapıda homojen bir şekilde dağıtılarak Cottrell atmosferi oluşturmaması sağlanmaktadır. Ancak bu yöntemin ısıtıl işlem sırasında bazı çarpılmalara neden olmasından dolayı teknik açıdan uygulanması zordur [29].

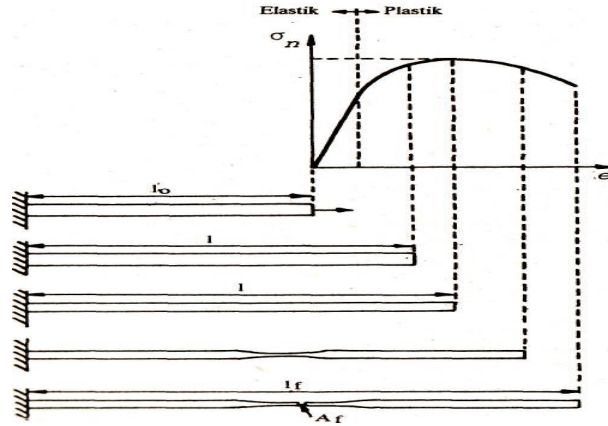
2.1.2.2 Elastiklik modülü

Elastiklik modülü malzemenin elastik davranışını belirleyen en önemli faktördür. Elastiklik modülü akma dayanımı ile birlikte geri yaylanma probleminin olduğu bükme işlemlerinde önemli rol oynamaktadır. Geri yaylanmayı kontrol eden elastik

şekil değişimidir Bundan dolayı artan elastik şekil değişimi miktarı ile geri yaylanma da artacaktır [26].

2.1.2.3 Pekleşme üsteli

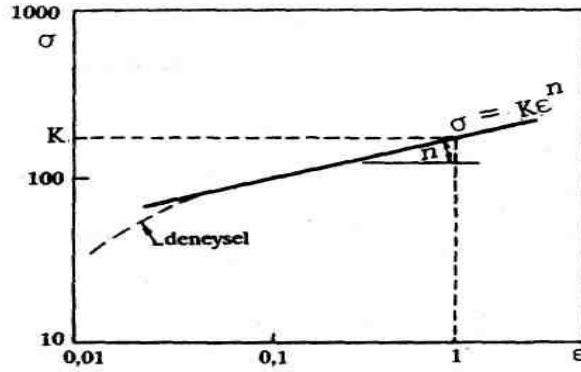
Bir sacın uygulanan gerilmedeki artış ile plastik şekil değişimi sırasındaki sertleşme yeteneği, soğuk şekillendirilebilirliğini etkileyen en önemli malzeme özelliğidir. Yerel olarak plastik şekil değişimine uğrayan bir bölgede, burada oluşacak pekleşmeden dolayı dayanım artacağından, bu bölgedeki şekil değişimi durur ve parçanın diğer komşu bölgelerinde plastik şekil değişimi başlar. Bu şekilde, pekleşmeden dolayı daha fazla üniform şekil değişimi elde edilerek, parça daha geç hasara uğramaktadır. Şekil değiştirme sertleşmesi (pekleşme), çok kısa olarak deformasyon sırasında dislokasyon yoğunluğundaki artış ve artan dislokasyonların gerek birbirleri gerekse diğer engellerle etkileşmesi ile açıklanmaktadır [26]. Çekme deneyinde, malzeme maksimum yüke kadar üniform şekil değiştirir. Yani, deney çubuğunun çekme doğrultusuna dik kesiti çubuk boyunca her yerde aynı oranda azalır. Çekme dayanımının aşılmasıyla birlikte plastik şekil değişimleri bir bölgede yığılmaya başlar ve malzemede boyun verme görülür. Şekil 2.4 de çekme deneyinde malzemede gerçekleşen safhalar gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Çekme deneyinde malzemede gerçekleşen safhalar gösterilmektedir [15]

Üniform şekil değişimi, sacın pekleşme yeteneğinin bir ölçütüdür. Diğer bir ölçüt de, pekleşme üsteli (n) değeridir. Plastik şekil değişiminin üniform olduğu akma ile çekme dayanımı arasındaki bölgede, gerilme ile birim şekil değişimi arasındaki ilişki Holloman bağıntısı olarak bilinen $\sigma = K \cdot \epsilon^n$ üstel fonksiyonu ile tanımlanmaktadır. Burada K dayanım sabiti, n de pekleşme üstelidir. Bu denklemdeki değerler gerçek gerilme gerçek birim şekil değişimi eğrisinden, logaritmik koordinatlara taşınırsa üniform plastik şekil değişimi bölgesinde birer doğruya dönüşürler. Bu doğrunun

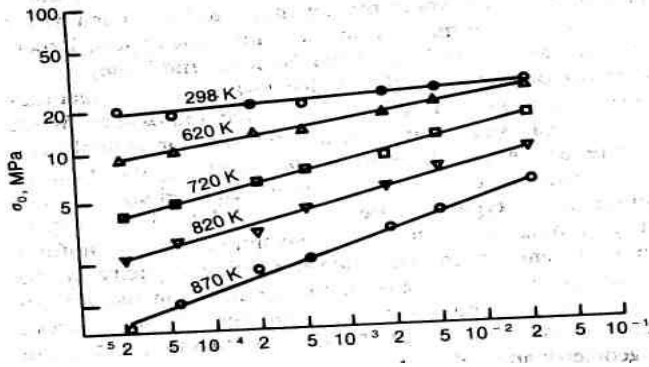
eğimi n (pekleşme üsteli), y eksenini kestiği nokta da $\log K$ değerini vermektedir. Şekil 2.5 de logaritmik gerilme-logaritmik gerilme birim şekil değişimi doğrusu gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Logaritmik gerilme-logaritmik gerilme birim şekil değişim doğrusu [15]

2.1.2.4 Deformasyon hızına duyarlılık üsteli

Bir parçaya uygulanan şekil değiştirme hızı, akma gerilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tarif olarak şekil değiştirme hızı $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ şeklinde ifade edilir ve birimi s^{-1} dir. Şekil 2.6 şekil değiştirme hızının akma gerilmesine olan etkisini göstermektedir. Ayrıca bu şekilde, şekil değiştirme hızının akma gerilmesine etkisinin yüksek sıcaklıklarda daha fazla olduğu görülmektedir [30].



Şekil 2.6 6063-0 Alüminyum alaşımında şekil değiştirme hızının akma dayanımına etkisi [31]

Nadai [32] bir ucu sabitlenmiş ve diğer ucu test makinesinin hareketli kafasına bağlanmış silindirik numunenin çekilmesi sırasında meydana gelen durumları matematiksel olarak analiz etmiştir.

Makinenin kafa hızı $v = dL / dt$ olduğundan mühendislik birim şekil değiştirme hızı

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d(L - L_0)/L_0}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L_0} \quad (2.1)$$

Gerçek birim şekil değiştirme hızı;

$$\dot{\epsilon} = \frac{ds}{dt} = \frac{d[\ln(L/L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} = \frac{v}{L} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2, sabit bir takım hızı için, l boyunun sürekli olarak artmasından ötürü, $\dot{\epsilon}$ sürekli olarak azaldığını göstermektedir.

Çekme deneyinde gerçek şekil değiştirme hızının sabit kalabilmesi için deney süresince v çene hızı deney numunesinin uzunluğundaki artış kadar artırılmalıdır. Sabit sıcaklık ve birim şekil değişimi için şekil değiştirme hızıyla akma gerimesi arasındaki ilişki denklem 2.3 de ifade edilmektedir.

$$\sigma = C(\dot{\epsilon})^m \quad (2.3)$$

Burada C bir malzeme sabiti m ise şekil değişimi hızına duyarlılık üstelidir. M' in belirlenmesinde iki tip metot kullanılmaktadır.

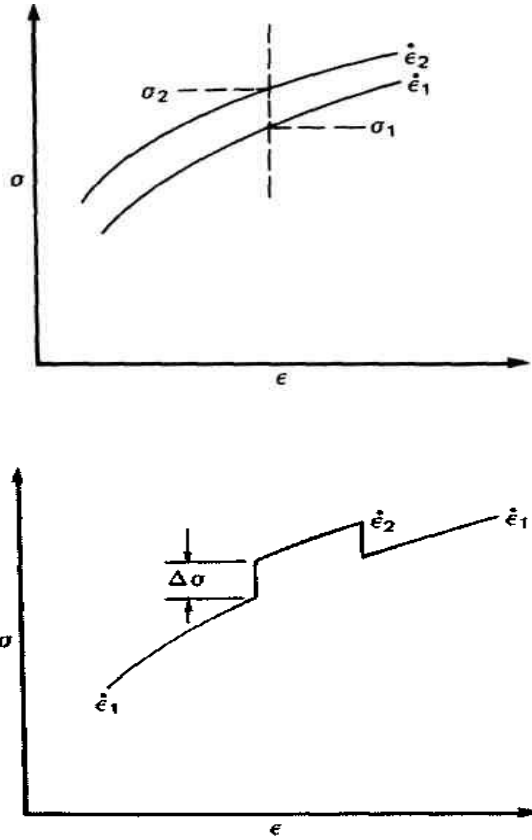
Bunlardan biri, farklı şekil değişim hızlarında gerilme-birim şekil değişimi eğrileri elde edilir ve yukarıdaki denklem kullanılarak sabit bir şekil değişiminde gerilmelerin oranları kıyaslanır.

Diğer yöntem ise çekme testi sırasında, şekil değişim hızlarında değişiklikler yapıp, buna karşılık gelen gerilme değerleri arasındaki farkın saptanmasıyla elde edilmektedir [30]. Denklem 2.4'de m değerinin nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir.

$$m = \frac{\Delta \log \sigma}{\Delta \log \dot{\epsilon}} = \frac{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}{\log \dot{\epsilon}_2 - \log \dot{\epsilon}_1} = \frac{\log(\sigma_2 / \sigma_1)}{\log(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)} \quad (2.4)$$

Hem pekleşme üsteli hem de şekil değişim hızına duyarlılık üsteli uniform olmayan incelmenin azalmasında ve hasara kadar olan şekil değişim miktarının artmasında

önemli rol oynamaktadır [30].Şekil 2.7 a ve b de m değerinin hesaplanmasında kullanılan 2 yöntem gösterilmektedir.



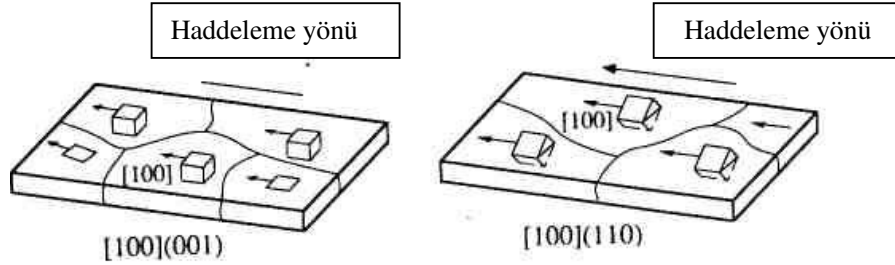
Şekil 2.7 m'in belirlenmesinde kullanılan 2 metot (a) Farklı şekil değişim hızlarında elde edilen gerilme- birim şekil değişimi eğrileri (b) Çekme testi sırasında şekil değişimi hızının değiştirilmesi [33]

2.1.2.5 Plastik anizotropi

Yapılan deneylerde, metallerin çekme özelliklerinin sıklıkla bütün yönlerde aynı olmadığı görülmüştür. Malzeme özelliklerinin bu şekilde yöne bağlı olarak değişmesine anizotropi denilir [30]. Metallerde kristalografik ve mekanik olmak üzere iki tip anizotropi bulunmaktadır. Mekanik anizotropi veya lifli yapı oluşumu kopma ile ilişkili iken, kristalografik anizotropi veya tercihli yönlenme plastik deformasyon veya akma ile ilişkilidir.

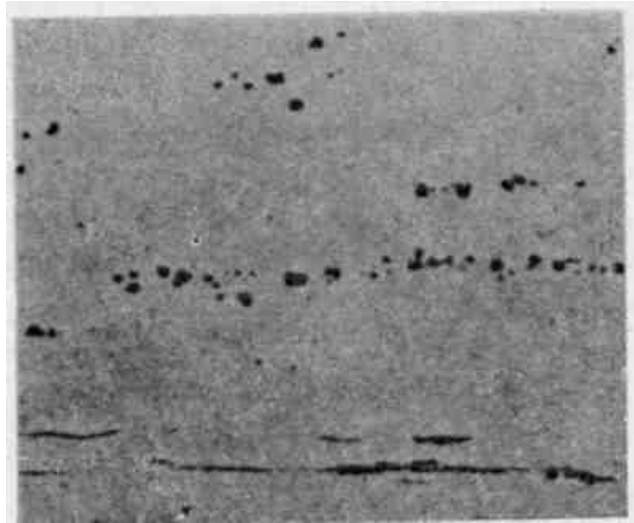
Kristalografik anizotropi, şekillendirme nedeniyle, kristal tanelerinin tercihli olarak yönlenmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin soğuk haddeleme sırasında taneler

belirli bir yol üzerinde dönmekte ve böylelikle belirli düzlemler sac düzlemine paralel hale gelmektedir. Bu durum Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



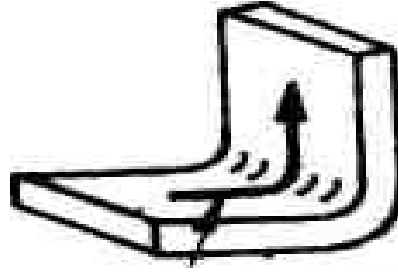
Şekil 2.8 Saf demirde tercihli yönlenmenin gösterimi a) Küp {100} yüzeyi, {100} düzlemleri sac düzlemine paralel b) Kübün {110} kenarı {100} düzlemleri sac düzlemine paralel [25]

Belirli kristalografik yönlerin ve düzlemlerin sıralanmasına tercihli yönlenme, kristalografik tekstür veya sadece tekstür denilir. Metal kristalleri farklı yönlerde farklı özelliklere sahip olduğundan tekstür malzeme anizotropiktir [25]. Mekanik anizotropi (bantlı veya lifli yapı), malzemedeki segregasyonlu bölgelerin ve şekil verilebilen kalıntıların uzaması, şekil verilemeyen kalıntıların da kırılarak şekil verme doğrultusunda sıralanması sonucunda oluşur. Şekil 2.9 da bu durum gösterilmektedir [15].



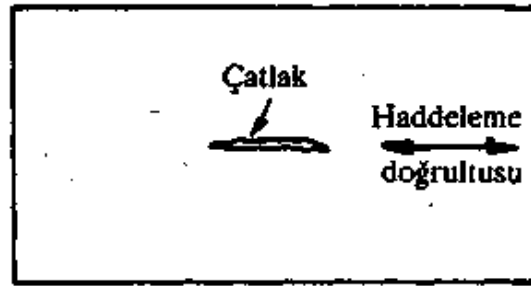
Şekil 2.9 %13 Cr içeren haddelenmiş bir çelikte kalıntılar. Üstte, şekli verilemeyen kalıntıların (kromit) kırılarak haddeme doğrultusunda sıralanması, alta ise şekil verilebilen kalıntıların (krom ve demir sülfür) haddeme doğrultusunda uzaması görülmektedir [15]

Bantlı bir iç yapı, şekil değiştirme doğrultusuna dik doğrultuda çok sık tekrarlanan süreksizliklerden dolayı anizotropudur. Anizotropi mekanik ve fiziksel özellikleri etkiler. Malzemelerde üretim sırasında anizotropi oluşumu, bu malzemelerin daha sonraki kullanımları bakımından önemlidir. Örneğin soğuk haddelenmiş saclarda enine doğrultudaki süneklik boyuna doğrultudakine (haddeleme doğrultusu) kıyasla düşüktür. Dolayısıyla anizotrop bir sac kullanılarak yapılacak herhangi bir üretimde, örneğin bükmede, bu husus göz önüne alınmalı ve bükme kıvrımının haddeleme doğrultusuna dik olması sağlanmalıdır. Şekil 2.10 da ilgili durum şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Bükme ve haddeleme doğrultusu [15]

Eğer bu duruma dikkat edilmezse Şekil 2.11 de görüldüğü gibi sacda çatlama gerçekleşir.

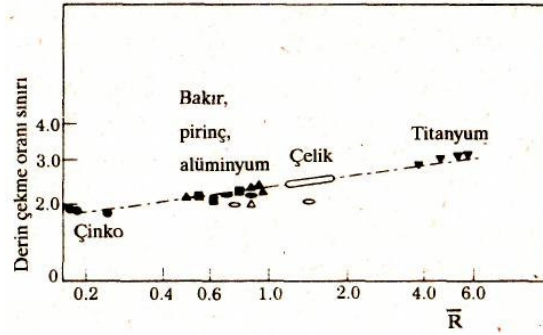


Şekil 2.11 Anizotrop bir sacın bükme kıvrımının haddeleme doğrultusuna dik olmaması halinde çatlama [15]

Sac düzlemi içerisinde özelliklerin değişimi düzlemsel anizotropi, normal yönde özelliklerin değişimi ise normal anizotropi (plastik anizotropi, dikey anizotropi) olarak adlandırılır [26].

Plastik anizotropi (r), bir sacın sac düzlemi üzerinde çekme veya basma kuvvetlerine maruz kaldığı zaman incelmeye karşı direnebilme yeteneğini gösteren bir

parametredir. İncelmeye karşı olan bu direnç derin çekmede düzgün şekil alabilmeye katkı sağlamaktadır. Bu nedenle r değeri sac metalin derin çekilebilirliğinin bir ölçüsü olarak göz önüne alınır [34]. Şekil 2.12 plastik anizotropinin derin çekme oranı sınırına etkisini göstermektedir.



Şekil 2.12 Ortalama dikey anizotropi parametresinin derin çekme oranı sınırına etkisi [35]

Plastik anizotropi, kristalografik yapıdan ortaya çıkmaktadır. Örneğin çeliklerde sac düzlemine normal olarak $\langle 111 \rangle$ yönlerinin sıralanması yüksek bir anizotropi değeri sağlamaktadır. Bu alüminyum ile sakınleştirilmiş çeliklerin soğuk haddeleme işleminin kontrol edilmesi ile gerçekleşir. Pirinç ve sakınleştirilmiş çelik genel olarak izotropik bir davranış sergilerlerken, hekzagonal metaller birim hücrenin kafes parametresine bağlı olarak değişik r değerleri vermektedirler [30].

Plastik anizotropi, çekme testinde genişlik yönündeki birim şekil değişiminin, kalınlık yönündeki birim şekil değişimine oranı olarak tanımlanır.

$$r = \frac{\text{genişlik yönündeki birim şekil değişimi}}{\text{kalınlık yönündeki birim şekil değişimi}} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} \quad (2.5)$$

r değeri genişlikteki birim şekil değişiminin kalınlıktaki birim şekil değişimine oranı olarak tanımlanmasına rağmen, sacın kalınlık boyunca olan şekil değişiminin doğru olarak ölçülmesi mümkün değildir. Bunun yerine kalınlık boyunca olan şekil değişimi hacim sabitliği göz önüne alınarak genişlik ve uzunluk şekil değişimleri cinsinden elde edilir.

$$\epsilon_t = - (\epsilon_w + \epsilon_l) \quad (2.6)$$

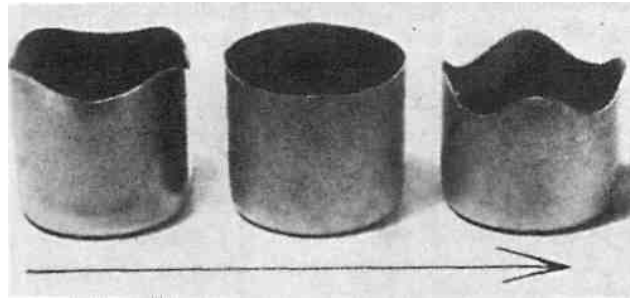
ϵ_t 'nin bu değeri plastik anizotropi denkleminde yerine konulur ve r değeri uzunluk ve genişlik birim şekil değişimleri cinsinden hesaplanır.

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\epsilon_w}{-[\epsilon_w + \epsilon_t]} = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 \cdot l_0}{w \cdot l}\right)} \quad (2.7)$$

Bir plaka sacdan farklı doğrultularda alınan çekme deneyi örnekleriyle yapılan deneylerde değişik r değerleri bulunabilir. Böyle bir sacda düzlemsel anizotropi olduğu söylenir. Düzlemsel anizotrop bir sacda plastik anizotropi parametresi için bir ortalama değer tarif edilir. Ortalama plastik anizotropi parametresi denklem 2.8 deki gibi hesaplanır [15].

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.8)$$

Derin çekme işleminde çekilmiş kapların kenarları dalgalı olup, üst kenar çevresi boyunca girinti ve çıkıntılar görülebilmektedir. Üst kenar boyunca meydana gelen bu durum kulak oluşumu olarak adlandırılır [25]. Şekil 2.13'de derin çekme işlemi sonucunda kulak oluşumu görülen kap örnekleri gösterilmektedir.

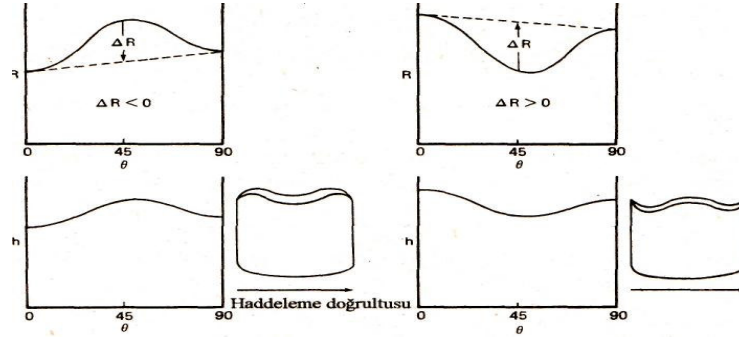


Şekil 2.13 Üç farklı bakır sacdan yapılmış kaplardaki kulak oluşumu. Ok sacların haddelme yönünü göstermektedir [37]

Kulak oluşumuna, Δr ile gösterilen düzlemsel anizotropi neden olur ve şu denklemle ifade edilir:

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.9)$$

$\Delta r = 0$ olduğu zaman kulak oluşumu görülmemektedir. Kulakların yüksekliği ve açısal konumları Δr 'nin açısal değişimiyle ilişkilidir [33]. Şekil 2.14'de Δr ile kulak oluşumu arasındaki ilişki gösterilmektedir.



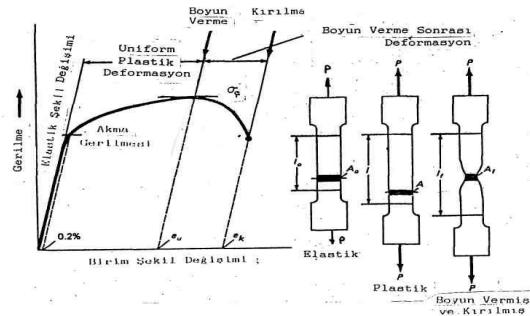
Şekil 2.14 Saclarda düzlemsel anizotropinin haddeleme doğrultusu ile değişiminin kulak oluşumuna etkisi (h: kap yüksekliği) [15]

r 'nin yüksek olup sacın derin çekilebilme kabiliyetini artırması, Δr 'yi çok yükseltiyor ise tercih edilmez, çünkü bu takdirde kulak oluşumu görülebilir [33].

Kulakların sayısı 2, 4 veya 6 olabilmektedir. Kulaklar, derin çekme işleminden sonra, kabın çevresi boyunca kesilir. Dolayısıyla gerek malzeme kaybına yol açması, gerek ek bir kesme işlemiyle maliyeti yükseltmesi nedeniyle kulak oluşumu olabildiğince önlenmelidir [15].

2.2 Tek Eksenli Çekme Durumunda Plastik Dengesizlik

Tek eksenli çekme deneyinde, mühendislik gerilmesinin maksimum değer aldığı noktaya kadar (çekme dayanımı), şekil değişimi üniformdur. Bu noktanın aşılması ile birlikte deney çubuğu belirli bir bölgeden büzölmeye başlar ve çekme dayanımından daha düşük bir nominal gerilme değerinde kopar [15]. Şekil 2.15'de çekme deneyi sırasında gerçekleşen durumlar gösterilmektedir.



Şekil 2.15 Çekme Deneyinde büzölme ve kopma [29]

Sünek malzemelerde büzülme yükün maksimum olduğu noktada başlar. Bu noktada numunenin kesitindeki azalma nedeniyle meydana gelen dış gerilme artışı, pekleşme nedeniyle malzemenin dayanımındaki artıştan daha fazla olup, plastik şekil değişimleri üniform olmaktan çıkarak bölgesel olarak yığılır. Bu durum plastik dengesizlik olarak tanımlanır [30].Büzülme maksimum yükte başladığı için, plastik dengesizlik koşulu, $dP=0$ şartı ile tanımlanır.

$$P = \sigma \cdot A \text{ olduğundan;} \quad (2.10)$$

$$dP = \sigma \cdot dA + A \cdot d\sigma = 0 \text{ ve} \quad (2.11)$$

$$-\frac{dA}{A} = \frac{d\sigma}{\sigma} \quad (2.12)$$

yukarıda ifade edilen eşitliğin fiziksel anlamı, pekleşme nedeniyle malzemenin dayanımındaki artışın, kesit küçülmesi nedeniyle yük taşıma kabiliyetindeki azalmayı dengelediğini göstermektedir [25]. Çekme deneyi sırasında çekme kuvvetinin etki ettiği kesit sürekli olarak azalmaktadır. Eğer kesit azalması olmasa, gerilme, pekleşmeye bağlı olarak sürekli bir şekilde artacaktı. Buna karşılık, eğer pekleşme olmasa, kesit küçülmesi nedeniyle malzemenin yük taşıma yeteneği sürekli azalacaktı. Çekme kuvvetinin maksimum olduğu noktaya kadar, pekleşme nedeniyle gerilmedeki artış, yük taşıma yeteneğindeki düşüşten daha fazladır, bu yüzden bu noktaya kadar gerilme artmaktadır. Ancak daha ileri şekillendirmede şekil değişimleri plastik dengesizliğe yol açacak, deney çubuğu bir noktadan büzülmeye başlayacak ve bu bölgede yoğunlaşan şekil değiştirme sonucunda parça kopacaktır [15].

Eğer hacim sabitliği ilkesi korunursa;

$$V = A l = C \quad (2.13)$$

$$dv = A dl + l dA = 0 \text{ buradan;} \quad (2.14)$$

$$-\frac{dA}{A} = \frac{dl}{l} = d\varepsilon \quad (2.15)$$

Bu ifade denklem (2.12)'de yerine konursa,

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = d\varepsilon \quad \text{veya} \quad \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma = \sigma_u \quad (2.16)$$

burada σ_u çekme dayanımıdır.

$\sigma = K\varepsilon^n$ Holloman bağıntısı kullanılır ve türevi alınırsa o zaman,

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n.K.\varepsilon^{n-1} = \sigma = K\varepsilon^n \quad (2.17)$$

$$n.K.\varepsilon^{n-1} = K\varepsilon^n \quad (2.18)$$

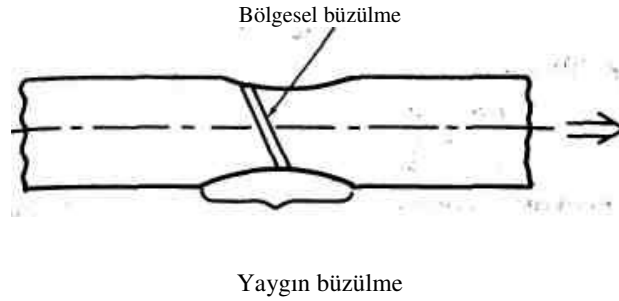
$$\frac{n}{\varepsilon} = 1, \quad n = \varepsilon \quad (2.19)$$

bulunur [25].

Bu birim şekil değiştirme değeri aynı zamanda malzemenin üniform birim şekil değişimi değeridir. Buna göre malzemede oluşturulan birim şekil değişimi miktarı malzemenin pekleşme üsteline eşit olduğu zaman büzülme başlamaktadır. Dolayısıyla üretim sırasında büyük şekil değişimleri geçiren malzemelerde, örneğin derin çekme olayında, büzülmeden şekil verebilmek için malzemenin pekleşme üsteli büyük olacak şekilde seçilmesi gerekmektedir [29].

Eğer malzeme izotropik ise; silindirik çekme numunesinde büzülme, çekme ekseninde etrafında simetrik olur. Ancak, bir sactan kesilmiş dikdörtgen kesitli çekme numunesinde ise farklı bir büzülme davranışı görülür. Sac çekme numunesinde genişlik kalınlıktan çok büyük olduğundan iki tip plastik dengesizlik vardır. Birincisi yaygın büzülme olarak adlandırılır, çünkü bunun uzunluğu sac kalınlığından çok

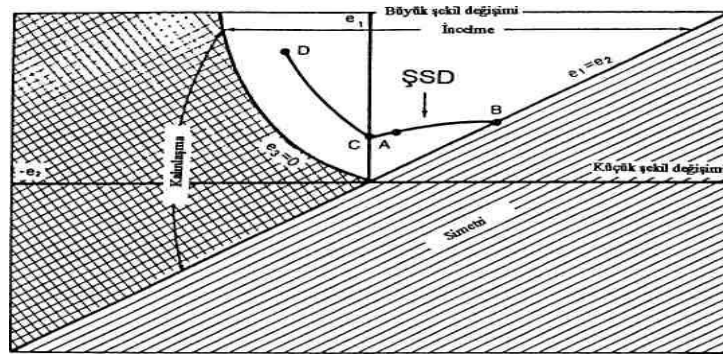
fazladır. Sac çekme numunelerindeki bu tip dengesiz akış, silindirik çekme numunelerinde görülen büzülme benzerdir. Yaygın büzülme yukarıda bahsedilen eşitlik gerçekleştiğinde başlar. Yaygın büzülme kopmayla sonlanabilir, ancak sıklıkla bunu bölgesel (yerel) büzülme olarak adlandırılan ikinci bir plastik dengesizlik takip eder. Bu ikinci tip davranışta büzülme, genişliği yaklaşık olarak sac kalınlığına eşit olan ve numune eksenine göre eğimli konumlanmış dar bir bant şeklindedir [30]. Şekil 2.16 da yaygın ve bölgesel büzülme gösterilmektedir.



Şekil 2.16 Sac çekme numunesinde yaygın ve yerel büzülmenin gösterimi [30]

2.3 Şekillendirme Sınır Diyagramları

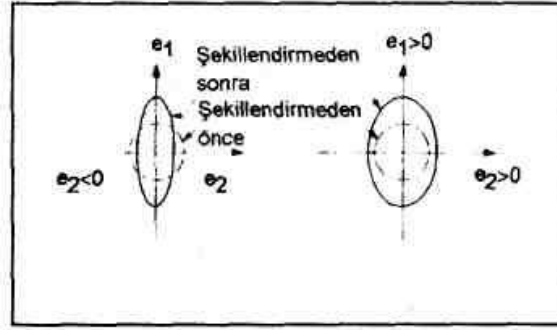
Bütün sac malzemeler yerel boyun vermenin başladığı, şekillendirme sınırı olarak ifade edilen belirli bir değere kadar ancak düzgün olarak şekillendirilebilirler. Bu değer üstündeki durumlarda sacda hasar meydana gelir. Bu sınırı tanımlayan en bilinen kavram şekillendirme sınır diyagramlarıdır [38]. Şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) farklı sac şekillendirme operasyonlarına karşılık gelen kabul edilebilir sınır şekil değişim değerlerini gösteren bir grafikdir. Şekil 2.17’de şematik olarak bir şekillendirme sınır diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.17 Şekillendirme sınır diyagramı ve kabul edilen şekil değiştirme bölgesi [26]

Bu diyagramlar, üzeri daire veya kare şeklinde grid desenleriyle markalanmış sac metal numunelerinin, yarı küresel veya silindirik bir zımba vasıtasıyla deforme edildiği çok sayıda deney sonucunda elde edilebilmektedir.

Deforme olmuş gridlerin büyük ve küçük eksenleri, iki temel yön sunarlar. Bu yönlerdeki şekil değişimleri sırasıyla büyük ve küçük birim şekil değişimi olarak adlandırılır. Büyük birim şekil değişimi, sac metalin gerdirilmesinden dolayı her zaman pozitifdir. Buna karşın küçük birim şekil değişimi ise, numune genişliğine bağlı olarak pozitif veya negatif olabilmektedir [38]. Şekil 2.18’de deformasyon öncesi ve sonrasında büyük ve küçük birim şekil değişimleri şematik olarak gösterilmektedir.

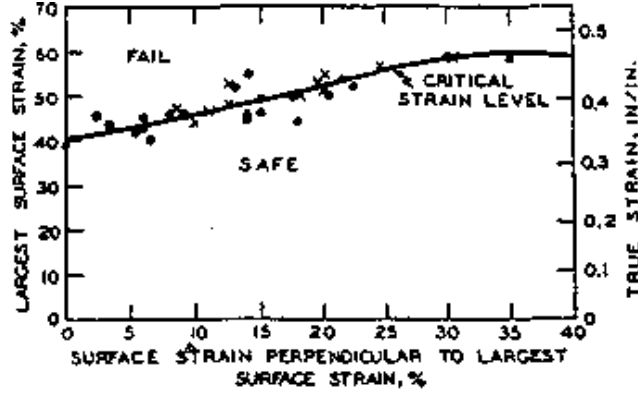


Şekil 2.18 Deforme edilmiş dairesel gridlerdeki birim şekil değişimleri. e_1 daima pozitifdir, e_2 ise pozitif veya negatif olabilir (solda) [15]

ŞSD kavramı, ilk olarak 1963 yılında Keeler ve Backofen tarafından ortaya çıkarılmıştır [27].

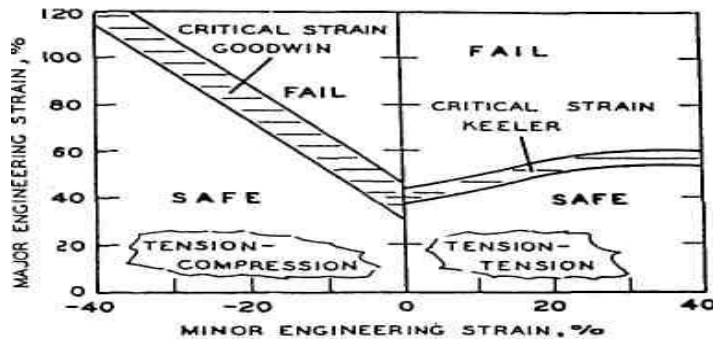
Keeler, çalışmasında Gensamer’in [39] gözlemlerinden yola çıkarak, çok sayıda iki eksenli germe ile şekillendirme ($\epsilon_1 > 0$, $\epsilon_2 > 0$) deneyi yapıp, hasarın başladığı bölgelerdeki birim şekil değişimleri hakkında bilgi toplamıştır. Şekillendirme sırasında sac üzerine markalanan daire gridlerin elipse dönüştüğünü gözlemlemiş ve bu elipslerden yararlanarak minimum birim şekil değişimlerine karşılık gelen maksimum birim şekil değişimlerini grafiğe aktarmıştır. Böylelikle Keeler sac yüzeyinde hasara neden olan sınır deformasyon değerlerini birbiriyle ilişkilendirmiştir. Sac malzemenin hangi deformasyon değerlerinde hasara uğrayabileceğini grafiksel olarak tanıtmıştır.

Keeler, bu çalışmasıyla her iki birim şekil değişiminden de pozitif değerler elde ederek diyagramın sadece sağ tarafını belirleyebilmiştir. Şekil 2.19 da Keeler'in elde ettiği şekillendirme sınır eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 2.19 Keeler tarafından tanımlanan şekillendirme sınır diyagramı [27]

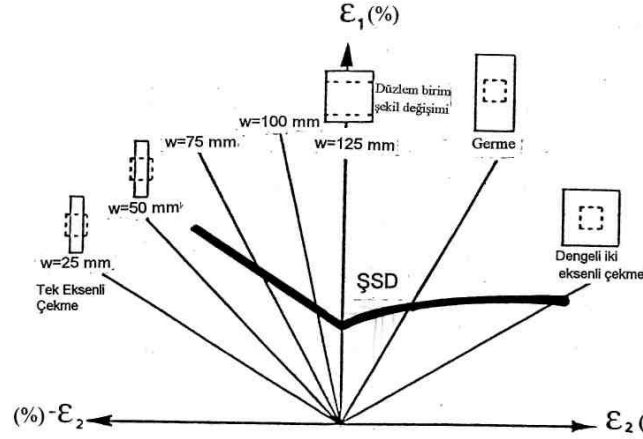
Goodwin [40] farklı mekanik testler kullanarak, Keeler'in çalışmasını genişletmiş ve büyük birim şekil değişimlerinin pozitif, küçük birim şekil değişimlerinin negatif olduğu çekme-basma bölgeleri ($\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 < 0$) için eğri elde etmiştir. Bu diyagram günümüzde Keeler-Goodwin şekillendirme sınır diyagramları olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.20'de Keeler-Goodwin tarafından oluşturulmuş olan şekillendirme sınır diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.20 Keeler ve Goodwin tarafından tanımlanan şekillendirme sınır diyagramları [40]

Şekillendirme sınır diyagramının sol tarafı negative küçük birim şekil değişimi ve pozitif büyük birim şekil değişimini içermektedir. Bu bölge tek eksenli çekmeden düzlem birim şekil değişimine kadar oluşabilecek bütün deformasyon koşullarını göstermektedir. Diyagramın sağ tarafı ise, pozitif büyük ve pozitif küçük birim şekil

değişimlerini içermekte olup düzlem birim şekil değişiminden dengelenmiş iki eksenli germeye kadar olan deformasyon koşullarını göstermektedir [38]. Tipik bir şekillendirme sınır diyagramı şekil 2.21 de gösterilmektedir.



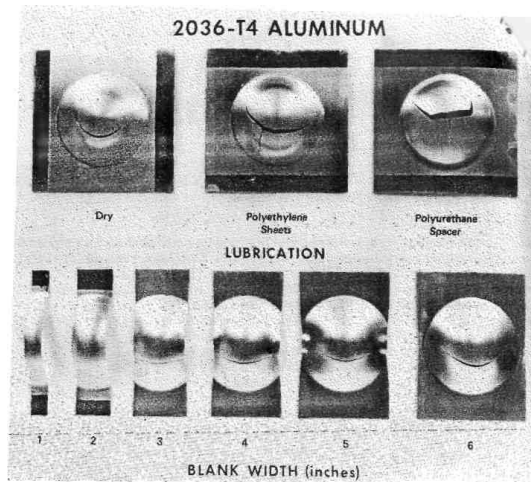
Şekil 2.21 Örnek bir şekillendirme sınır diyagramı [25]

Bu eğrinin üstünde olan her deformasyon değerinde sac malzemede hasar gerçekleşirken, eğrinin altında kalan deformasyon değerleri ise güvenilir bölgeyi göstermektedir. Bazen belirlenmiş diyagramın %10 kadar altında, güvenilir şekillendirme sınır eğrisi olarak adlandırılan başka bir eğri daha çizilir. İkinci bir eğrinin daha çizilmesinin sebebi işlemin deneyi yapan kişinin yeteneğine ve deney teçhizatının doğruluğuna dayalı olmasındandır. ŞSD ne kadar yüksekse, malzemenin şekillendirilebilme kabiliyeti de o kadar yüksektir [23]. Şekillendirme sınır diyagramları, sac malzemelerin şekillendirilebilirliğinin değerlendirilmesinde ve prosesinde meydana gelebilecek üretim problemlerinin teşhis edilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekillendirilebilirlik analizinin temel prensibi, parçanın herhangi bir bölgesinde meydana gelen deformasyon miktarının sınır değerleri aşmadığının belirlenmesine dayanmaktadır. Örneğin sac malzeme şekillendirme sırasında yırtılmaya veya bölgesel bir boyun vermeye maruz kalırsa, o zaman parçanın yeniden tasarlanmasının yanı sıra, üretim metodunun da değiştirilmesi gerekmektedir.

Sac malzemenin şekillendirilebilirlik sınırı, yırtılma öncesi yerel büzülmenin başlamasıyla belirlenmektedir. Ancak, farklı sac şekillendirme koşulları altında büzülmenin başlaması karmaşık bir prosestir ve bunun belirlenmesinde deneysel, analitik veya nümerik yöntemlerle iyi bir uyumluluk bulunmamaktadır [38].

2.4 Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Deneysel Olarak Belirlenmesi

Şekillendirme sınır diyagramlarının deneysel olarak belirlenmesinde, düzlem içi germe ve düzlem dışı germe olmak üzere iki tip test yöntemi bulunmaktadır. Düzlem içi germe tekniğinde, numunenin üniform olarak plastik şekil değiştirmesine izin verilir, sürtünme ve geometri rol oynamaz. Düzlem dışı germe tekniği ise, genellikle sürtünme ve geometrinin önemli olduğu zımba ile germe işleminden oluşur. Bu iki teknik oldukça farklı sonuçlar doğurur. Düzlem dışı germe teknikleri, basılarak şekillendirilecek sac malzemelerin üretiminde kullanılan değişik geometrilerdeki rijit zımba-kalıp takım grubunun kullanıldığı endüstriyel sac şekillendirme işlemlerindeki deneyimler ile uyumlu sonuçlar vermektedir [26]. Diyagramın deneysel olarak elde edilebilmesinde farklı deformasyon koşullarının oluşturulabilmesi için sac numuneler değişen genişliklerde hazırlanır ve yüzeyleri daire veya kare grid ile markalanır. Daha sonra her numune bölgesel bir boyun verme görülünceye kadar deforme edilir ve deforme olmuş numunelerin hasar bölgesi üzerinden ölçümler alınarak şekillendirme sınır diyagramı oluşturulur. Burada her bir geometri bir şekil değiştirme durumunu ihtiva eder. Dar genişliğe sahip numuneler tek eksenli çekme koşullarını oluştururken, numune genişliği arttıkça sırasıyla düzlem birim şekil değişimi ve iki eksenli germe koşullarına yaklaşılmaktadır. Özellikle her iki boyutu da eşit olan sac numuneler iki eksenli germe koşullarını oluştururlar. Eşit iki eksenli germe koşullarının oluşturulabilmesi için kare numunelerin iyi bir şekilde yağlanması gerekmektedir. Şekil 2.22 de şekillendirme sınır diyagramının elde edilebilmesi için hazırlanmış deney numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 2.22 Şekillendirme sınır diyagramlarını belirleyebilmek için hazırlanmış test numuneleri (alüminyum alaşımı 2036-T4) [41]

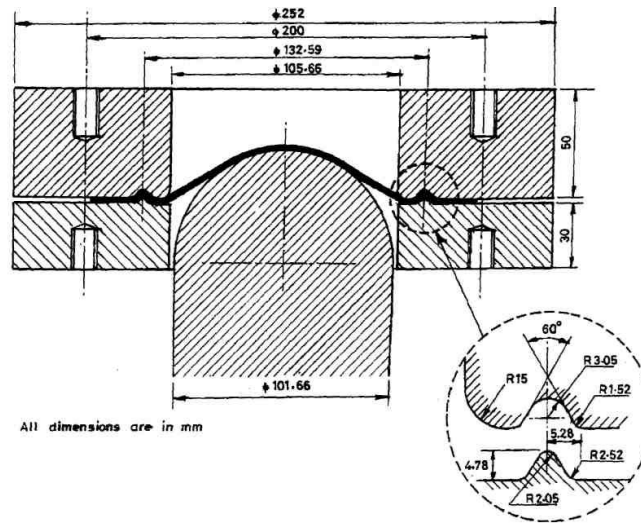
2.5 Deneysel Yöntemler

Sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini belirleyebilmek için çeşitli test yöntemleri geliştirilmiştir.

2.5.1 Hecker testi

Şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesinde Hecker basitleştirilmiş bir teknik önermiştir [41]. Hecker'in önerdiği deneysel prosedür esasen üç aşamadan oluşmaktadır. 1) sac numunelerin gridlerle markalanması 2) Yerel büzülme başlayıncaya veya hasar oluncaya kadar markalanmış numunelerin zımbayla gerdirilmesi, 3) birim şekil değişimlerinin ölçülmesi.

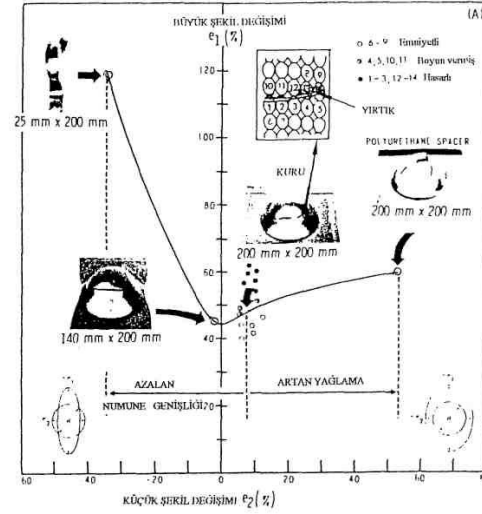
Hecker'in kullanmış olduğu zımbayla germe test düzeneği Şekil 2.23 de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.23 Zımba ile gererek şekillendirmede kullanılan Hecker test düzeneği [41]

Hecker test düzeneği 101.6 mm çapında yarı küresel zımba ve iki kalıp plakasından oluşmaktadır. İki kalıp plakası arasında güvenli bir şekilde kenetlenmiş sac numuneler hasar oluncaya kadar gererek şekillendirilmektedir. Kalıp plakalarının çıkış tarafında sacı bükülme gibi hasarlardan koruyabilmek için 15.2 mm civarında radyüsler yapılmıştır. 305 mm çapındaki kalıp plakaları üzerindeki kuvvet 178 kN (20 ton) civarındadır. Zımba hareket hızı 0.42 mm/s olacak şekilde sabit tutulmaktadır. Şekillendirme sınır diyagramlarını belirleyebilmek için, bütün birim şekil değişimi oranları (e_2/e_1) üzerinde hasarların oluşturulması gerekmektedir. Bu

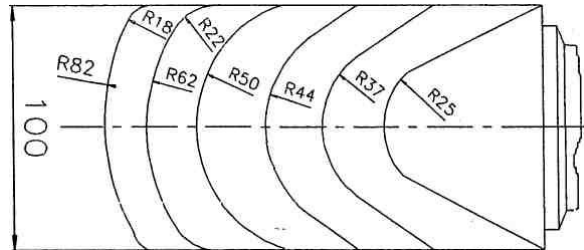
nedenle farklı e_2/e_1 oranlarına ulaşabilmek için yağlama tekniklerinden ve genişliği azaltılmış numunelerden yararlanılır. Örneğin 200x200 mm ölçüsündeki sacın yağlayıcı olmadan gererek şekillendirilmesinde pozitif e_2 değerlerinin e_1 değerlerinden daha küçük olduğu hasarlar oluşurken, yağlayıcı kullanılmasıyla beraber hasar büyük ve küçük birim şekil değişimlerinin birbirine eşit olduğu dengeli iki eksenli çekme bölgesine doğru kaymaktadır. Bu durum Şekil 2.24 de gösterilmektedir.



Şekil 2.24 Hecker'in önerdiği test tekniğine göre oluşturulmuş ŞSD [26]

2.5.2 Keeler testi

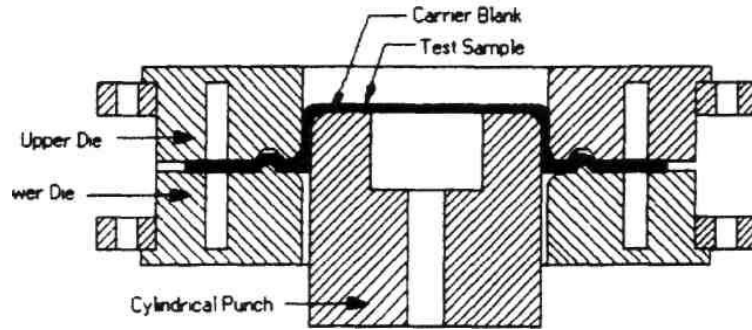
Keeler zımbayla sacların gererek şekillendirilmesini ilk öneren araştırmacıdır. Keeler, bu yöntemde pozitif küçük birim şekil değişimini elde edebilmek için, farklı zımba geometrileri kullanmıştır. Ancak bu yöntem çok fazla kullanılmamaktadır. Çünkü bu yöntemde çok fazla miktarda deneysel çalışma yapılması gerekliliği, yöntemin şekillendirme sınır eğrisinin sadece pozitif kısmını verebilmesi dezavantajlı yönleridir. Şekil 2.25 Keeler'in çalışmasında kullandığı zımba geometrilerini göstermektedir.



Şekil 2.25 Keeler testinde kullanılan zımbalar [27]

2.5.3 Marciniak testi

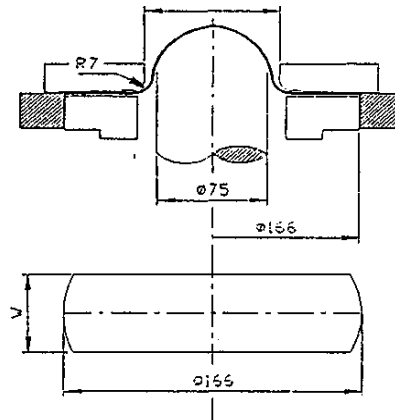
Marciniak düzlem içi testinde, silindirik kesite sahip delikli bir zımba üzerinde sac numune gerdirilmektedir [38]. Tek eksenli çekmeden dengelenmiş iki eksenli çekmeye kadar farklı birim şekil değişimi yollarında hasarları oluşturabilmek için değişik geometrilere numunelerin kullanılması gerekmektedir [42,43]. Merkezde delikli bir taşıyıcı sac, zımba radyüsünde malzeme hasarlarını önlemek amacıyla geniş boyutlu numuneler için kullanılmaktadır. Sac numune ve taşıyıcı sac zımba tarafından gerdirilirken, taşıyıcı sacda bulunan delik genişler ve numunenin merkezi kısmı üniform olarak deforme olur. Basit bir Marciniak düzlem içi test düzeneği şekil 2.26 da gösterilmektedir.



Şekil 2.26 Marciniak düzlem içi test düzeneği [42]

2.5.4 Nakazima testi

Bu test yöntemi farklı genişliklere sahip dikdörtgen numuneler dairesel kalıp ve yarı küresel zımba kullanarak derin çekilmesini içermektedir. Şekil 2.27 de Nakazima test düzeneği şematik olarak gösterilmektedir [44].



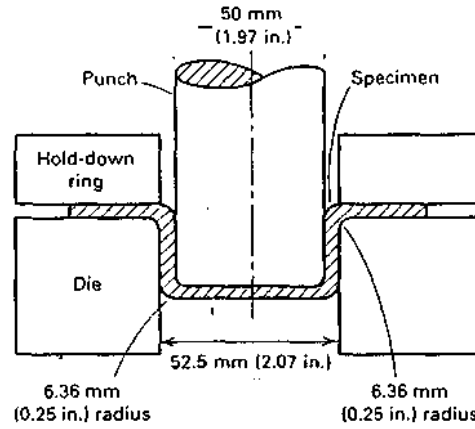
W=66 / 77 / 88 / 99 / 104 / 112 mm

Şekil 2.27 Nakazima test düzeneğinin şematik resmi [44]

Sac numune üzerinde mm olarak gösterilen zımba girintisinin derinliği Erichsen indeksi (IE) olarak tanımlanır. Bu sac metallerin şekillendirilebilirliğini açıklamada en yaygın kullanılan parametrelerden biridir. Çeşitli araştırmacılar, test sonuçlarına etki eden faktörlerle birlikte testin uygulanabilirlik sınırlarını da analiz etmişlerdir [46-48].

2.5.7 Swift kap testi

Swift kap test yöntemi, temelde derin çekmeyi esas alan bir yöntemdir. Bu yöntemde, alt kenarı kavisli yassı bir zımba kullanılmaktadır. Test düzeneği Şekil 2.30 da gösterilmektedir.



Şekil 2.30 Swift kap derin çekme testi

Bu test yöntemi farklı çaplı derin çekilmiş silindirik parçaları ve derin çekme oranı sınırının (yırtılma olmadan derin çekilmiş iş parçasının maksimum çapının zımba çapına oranı) belirlenmesini kapsamaktadır.

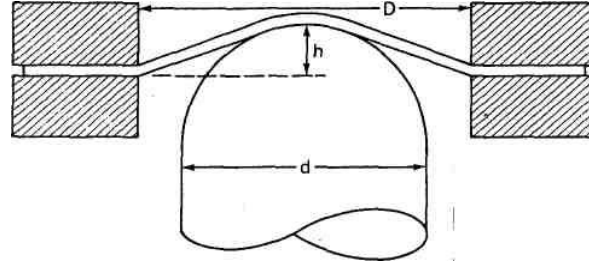
$$\text{Derin Çekme Oranı sınırı} = \frac{D_{\text{mak}}}{d} \quad (2.20)$$

Swift'in metodu yaygın olarak kullanılmaktadır ve uluslararası derin çekme araştırma grubu tarafından standart metot olarak göz önüne alınmaktadır [49-50].

2.5.8 Olsen kap testi

Olsen kap testi Erichsen testine oldukça benzerdir, ancak kullanılan takımlar farklı boyutlardadır. Olsen testinde de Erichsen testinde olduğu gibi şekillendirme indeksi zımba girintisinin ölçüsüyle ifade edilir. Her iki testte de kap oluşturma yarı küresel

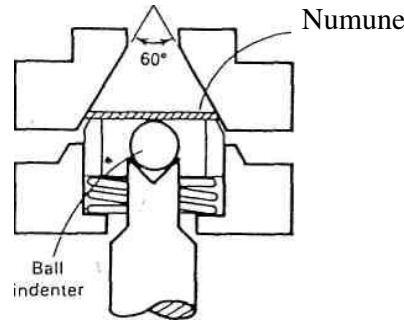
bir zımba üzerinde gererek şekillendirme yaparak gerçekleştirilmektedir. Flanşlar çok büyük olmakta bu yüzden küçük miktarda derin çekme gerçekleşmektedir. Şekil 2.31 de gösterilmektedir.



Şekil 2.31 Olsen ve Erichsen testleri [36]

2.5.9 Fukui konik testi

Fukui konik testinde, 17.5 mm çapında bilye şeklinde zımba ve 20 mm çapında konik bir kalıp kullanılan takım konfigürasyonlarıdır ve Şekil 2.32 de gösterilmektedir.



Şekil 2.32 Fukui konik testi [36]

Bu boyutlar sac kalınlığı (0.762-1.016 mm) için kullanılmaktadır. Bu yöntemde yüksek vizikoziteli bir yağlayıcı kullanılmaktadır. Konik kalıpla temas halinde olan sacı zorlamak için az miktarda basınç uygulanmasına rağmen, herhangi bir baskı plakası basıncı gerekmemektedir. Başlangıç olarak zımba hızı 1.27 mm/s, daha sonra ise 0.042 mm/s hıza azaltılmaktadır. Bu durumda maksimum yük sırasındaki kap derinliği şekillendirme indeksi olarak değerlendirilir.

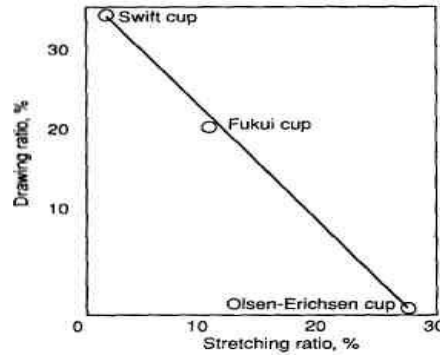
Fukui konik kap testi, bilye üzerinde hem gererek şekillendirmeyi, hem de derin çekmeyi kapsamaktadır. Erichsen ve Olsen test sonuçları derin çekmeden ziyade, gererek şekillendirmeye uyumludur. Fukui konik kap testi sonuçları ise hem gererek

şekillendirmeye hem de derin çekmeye uyumludur. Şekil 2.33 de test sonrası derin çekilmiş hasarlı Fukui kap gösterilmektedir.



Şekil 2.33 Hasarlı Fukui kap [51]

Şekil 2.34 de ise Erichsen-Olsen, Swift kap ve Fukui konik kap testlerinin germe ve derin çekme oranlarını karşılaştırmalı olarak göstermektedir.



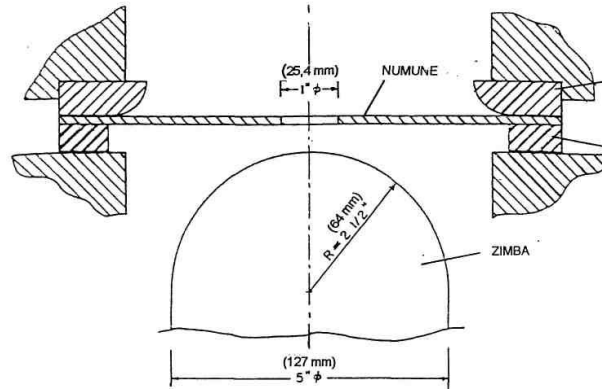
Şekil 2.34 Değişik kap testlerinde germe ve derin çekmeye bağlı oranlar [33]

2.5.10 Delik genişletme testi

Bu deney, 254 mm (10in.) çapındaki taslağın ortasına açılmış 25.4 mm (1in.) çapındaki deliğin genişletilebilme yeteneğini ölçer. Şekil 2.35 de görüldüğü gibi derin çekme türündeki deformasyonları önlemek amacıyla taslak kenarları sıkıca tutturulmaktadır. Taslak ortasındaki delik 127 mm (5in.) çapındaki yarıküresel zımba ile gerilerek genişletilmektedir. Bu sırada zımba hızı 30 mm/dak (1.2 in./dak) mertebelerindedir. Delikteki genişleme artışı ölçülerek, delik kenarındaki hasara (yırılma) kadarki sınır şekil değişimi miktarı elde edilir. Ayrıca kalınlıktaki azalma ölçülerek ve/veya taslak üzerine elektro-dağlama ile işlenmiş 2.54 mm (0.1 in.) çapındaki daire gridlerden yararlanarak yerel şekil değişim ölçümleri de

gerçekleştirilebilir [52]. Şekil 2.35’de delik genişletme deney düzeneği gösterilmektedir.

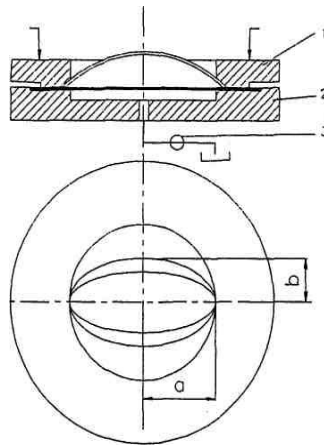
$$\text{Çaptaki Genişleme Miktarı (\%)} = \frac{\text{Ortalama son çap} - \text{Başlangıçtaki çap}}{\text{Başlangıçtaki çap}} \times 100 \quad (2.21)$$



Şekil 2.35 Delik genişletme deney düzeneği [52]

2.5.11 Hidrolik şişirme testi

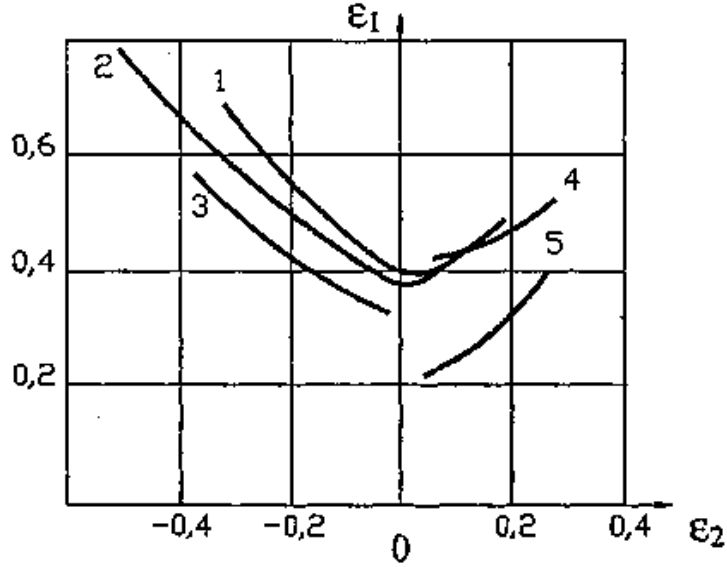
Bu test ilk olarak Olsen tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde şekillendirme sınır diyagramlarının oluşturulması için değişik birim şekil değişim oranları farklı şekillerdeki eliptik kalıplar kullanılarak elde edilmektedir. İlgili kalıplar Şekil 2.36 da gösterilmektedir. Belirli bir yağ basıncı ile numune dışarıya doğru şişirilmektedir. Bu yöntemin en önemli avantajı sürtünmenin olmaması, dezavantajı ise sadece şekillendirme sınır eğrisinin pozitif kısmının elde edilmesidir [36].



Şekil 2.36 Eliptik kalıplı hidrolik şişirme testi

2.6 Test yöntemlerinin karşılaştırılması

Yukarıda bahsedilen metotlara ek olarak sac malzemelerin şekillendirilebilirliğinin belirlenmesinde başka test yöntemleri de bulunmaktadır. Ancak oldukça sınırlı kullanılmaktadırlar. Hasek, şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesinde yukarıda bahsedilen test yöntemlerinin etkisini incelemiş ve yöntemleri birbirleriyle karşılaştırmıştır [53]. Elde ettiği sonuçlar Şekil 2.37 de gösterilmektedir.



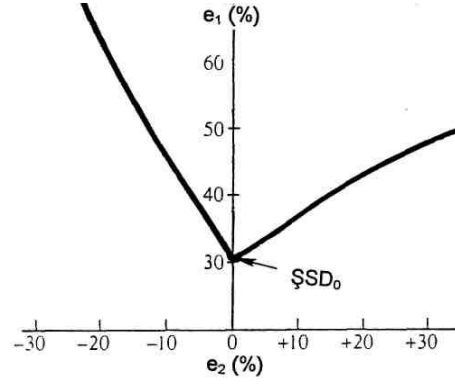
Şekil 2.37 Değişik test metotları kullanılarak oluşturulmuş şekillendirme sınır diyagramları: 1 Hasek; 2 Nakazima; 3 tek eksenli çekme; 4 Keeler; 5 hidrolik şişirme testi [53]

Şekillendirme sınır diyagramlarının oluşturulmasında, Marciniak testi veya hidrolik şişirme testi sürtünmeyi elemesi, Nakazima testinin tek eksenli deformasyon halinden, iki eksenli germe haline kadar olan bütün deformasyon değerlerini kapsaması nedeniyle önerilmektedir [54].

2.7 Şekillendirme Sınır Diyagramlarını Etkileyen Faktörler

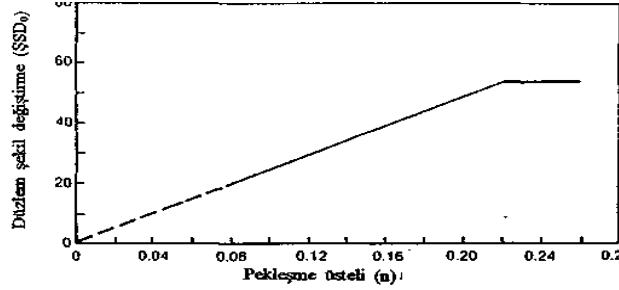
Sac malzemenin şekillendirilebilirliği, sayısal olarak diyagram üzerinde küçük birim şekil değişimlerinin sıfır olduğu, dikey eksendeki büyük birim şekil değişimi ϵ_1 tarafından belirlenen SSD_0 kavramı ile açıklanmaktadır [33]. Şekil 2.38 de görüldüğü gibi düzlem birim şekil değişim şartlarını sunan bu nokta, şekillendirme sınır diyagramının en düşük noktasıdır ve düzlem birim şekil değişiminde deformasyonu

tanımlar. Aynı zamanda $\text{\textcircled{S}SD}_0$ kavramı, şekillendirme sınır diyagramının konumunun belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır.



Şekil 2.38 Şekillendirme Sınır Diyagramı üzerinde $\text{\textcircled{S}SD}_0$ değerinin gösterilişi [33]

$\varepsilon_2 = 0$ olduğu düzlem birim şekil değişimi koşullarında, $\text{\textcircled{S}SD}_0$ 'ın değeri pekleşme üsteline büyük ölçüde bağlıdır. Şekil 2.39 daki grafikte bu durum gösterilmektedir.



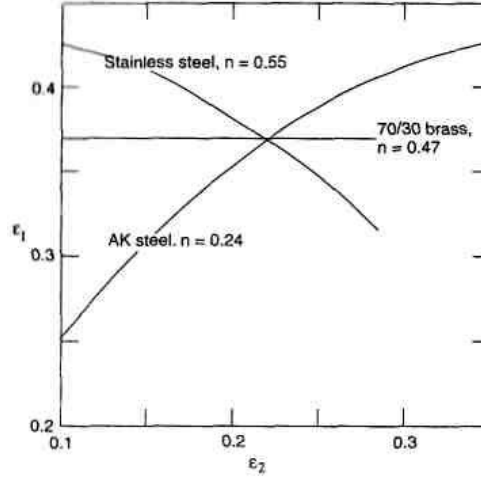
Şekil 2.39 Düşük karbonlu çeliklerde $\text{\textcircled{S}SD}_0$ ile pekleşme üsteli n arasındaki ilişki [33]

Pekleşme üstelinin yüksek olması, şekil değiştirme bölgesinde düzgün bir şekil değişimi dağılımının olmasına yardımcı olur. Ayrıca şekil değişimi ilerledikçe pekleşen malzemenin dayanımı da artmaktadır.

Pekleşme üsteli belirli bir değere kadar arttıkça $\text{\textcircled{S}SD}_0$ 'ın değeri artmaktadır, ancak şekillendirme sınır diyagramının sağ tarafının eğimi de azalmaktadır.

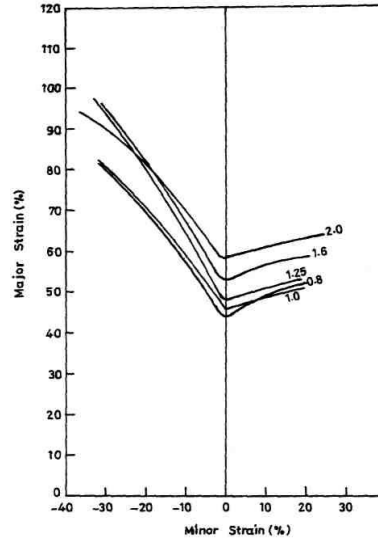
Dolayısıyla pekleşme üstelinin artması düzlem birim şekil değişimi için olumlu yönde iken sağ tarafta sınır deformasyonları için olumsuz bir durum oluşturabilmektedir.

Bu durum Şekil 2.40 da gösterilmektedir [55].



Şekil 2.40 n değeri arttıkça $\dot{\epsilon}_{SD_0}$ değeri artmakta, ancak diyagramın sağ tarafının eğimi azalmaktadır [55]

Konu üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sac kalınlığının şekillendirme sınır diyagramının seviyesini etkilediğini göstermiştir. Buna göre, sac kalınlığı arttıkça, şekillendirme sınır diyagramı da yükselmektedir. Şekil 2.41 de sac kalınlığına bağlı olarak şekillendirme sınır diyagramının nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 2.41 Şekillendirme sınır diyagramları üzerinde sac kalınlığının etkisi [19].

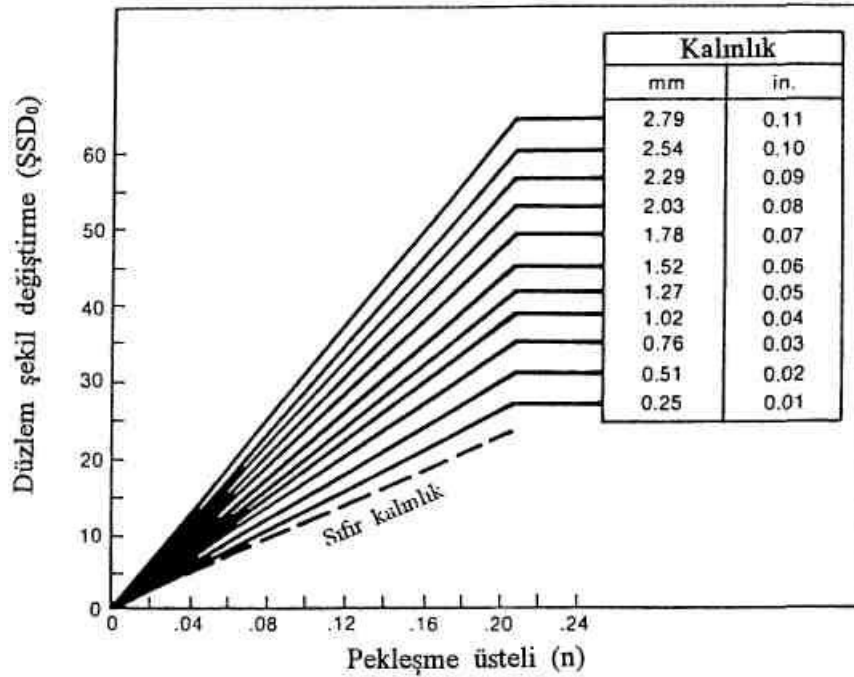
Şekilden de görüldüğü gibi düzlem birim şekil değişimi koşullarında ($e_2=0$), sac kalınlığı arttıkça SSD_0 değeri artmakta ve grafik yükselmektedir.

Keeler ve Brazier sac kalınlığıyla birlikte pekleşme üstelinin SSD_0 değerine etkisini yaklaşık bir formülle göstermişlerdir [56].

$$\text{SSD}_0 = n (1 + 0.72t) \quad n \leq 0.2 \text{ ve} \quad (2.22)$$

$$\text{SSD}_0 = 0.2 (1 + 0.72t) \quad (2.23)$$

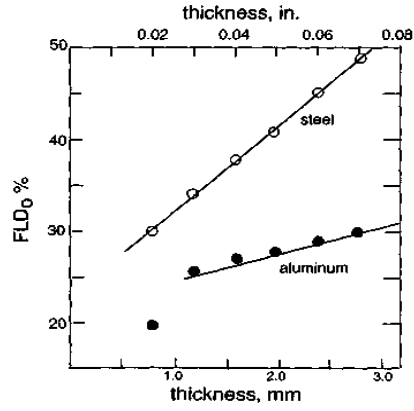
Burada t mm olarak sac kalınlığı, n de pekleşme üstelidir. Aralarındaki ilişki Şekil 2.42 de gösterilmektedir.



Şekil 2.42 Sac kalınlığı ve pekleşme üstelinin SSD_0 üzerindeki etkisi [26].

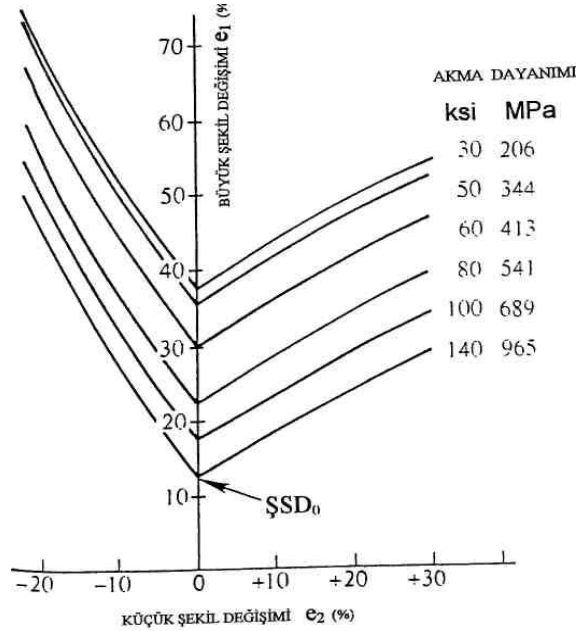
Smith ve Lee [57] çalışmalarında alüminyum alaşımlarındaki sac kalınlığının şekillendirme sınır diyagramlarına etkisinin çeliklerdekine kıyasla daha az olduğunu göstermişlerdir.

Şekil 2.43 alüminyum ve çelikte sac kalınlığının SSD_0 'a etkisini göstermektedir.



Şekil 2.43 Düzlem birim şekil değişiminde şekillendirme sınırı üzerinde kalınlığın etkisi [57]

SSD_0 , malzemenin akma dayanımından da etkilenmektedir. Düşük akma dayanımına sahip metaller, şekil 2.44 de görüldüğü gibi daha yüksek şekillendirme sınır diyagramlarına sahip olmaktadır.



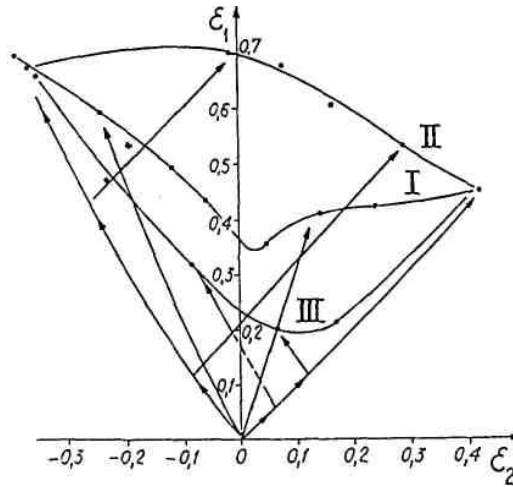
Şekil 2.44 1 mm kalınlığındaki farklı akma dayanımlarına sahip çeliklerin şekillendirme sınır diyagramlarının akma dayanımı ile değişimi [26].

Homojensizlik ve hatalar şekillendirme sınır diyagramlarını düşürmektedir. Bu homojensizlikler sac kalınlığındaki yerel değişimler, kimyasal bileşim, tane boyutu vb. akma dayanımını etkileyen diğer faktörlerdir [33].

Sanz ve Grumbach [58], sac üzerine çizilen grid boyutunun şekillendirme sınır diyagramları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar 0.5 mm den 5mm ye kadar değişen çaplara sahip gridleri kullanarak ε_1 ve ε_2 değerlerini elde etmişler ve şekillendirme sınır diyagramlarını oluşturmuşlardır.

Yapılan deneyler sonrasında gridlerin daire çapının, birim şekil değişimi üzerinde büyük bir etkisinin olduğu görülmüştür. Kikuma [59] şekillendirme sınır diyagramları üzerinde deformasyon yolunun etkisini incelemiştir.

Şekil 2.45 de birim şekil değişimi yolunun şekillendirme sınır diyagramı üzerindeki etkisi görülmektedir.



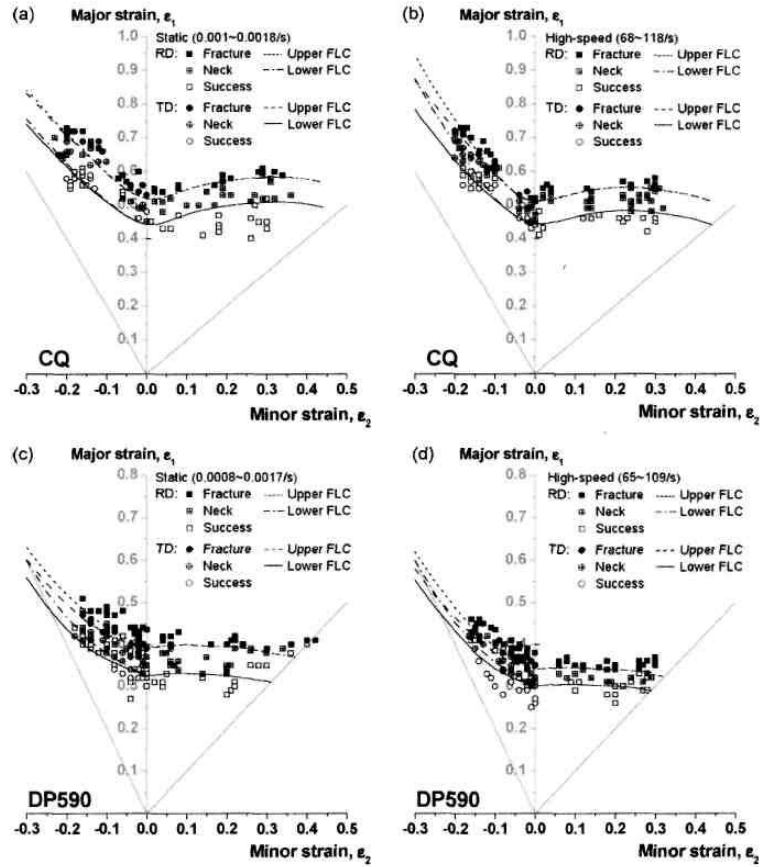
Şekil 2.45 Şekillendirme sınır eğrisi üzerinde birim şekil değişimi yolunun etkisi [59]

Başlangıçta deformasyon $\varepsilon_2 < 0$ (çekme-basma) ve bunu iki eksenli çekme takip ediyorsa o zaman 2 numaralı şekillendirme sınır eğrisi 1 den daha yüksek oluyorken. eğer ilk aşamada $\varepsilon_2 > 0$ ve çekme-basma yüklemesi bunu takip ediyorsa o zaman 3 numaralı sınır eğrisi 1 numaralı eğriden daha aşağıda olmaktadır.

Şekillendirme sınır diyagramları üzerinde şekil değiştirme hızının önemli bir etkisi vardır. Çünkü sac malzemelerin dinamik davranışı, statik davranışından belirgin olarak farklıdır.

Kim ve arkadaşları [60] şekil değiştirme hızının ŞSD üzerinde etkili olup olmadığını incelemişlerdir. Çalışmalarında, iki malzeme için (CQ ve çift fazlı çelik) orta kısmı oval olan küçük genişlikteki numuneler ve kare şeklindeki deney numunelerini kullanarak statik ve yüksek hızlı şekillendirme sınır diyagramlarını oluşturmuşlar ve bu diyagramları karşılaştırmışlardır.

Çalışmalarının sonucunda malzemelerden biri için (CQ) tek eksenli çekme bölgesinde, dinamik şekillendirme sınır diyagramının, statik şekillendirme sınır diyagramına göre daha yukarıda, iki eksenli germe bölgesinde ise daha aşağıda olduğu, diğer malzeme için ise (DP 590) bütün şekil değişimi bölgesinde dinamik şekillendirme sınır diyagramının statik şekillendirme sınır diyagramından daha aşağıda olduğunu gözlemlemişlerdir. Şekil 2.46 da statik ve dinamik olarak elde edilen ŞSD'ları gösterilmektedir.



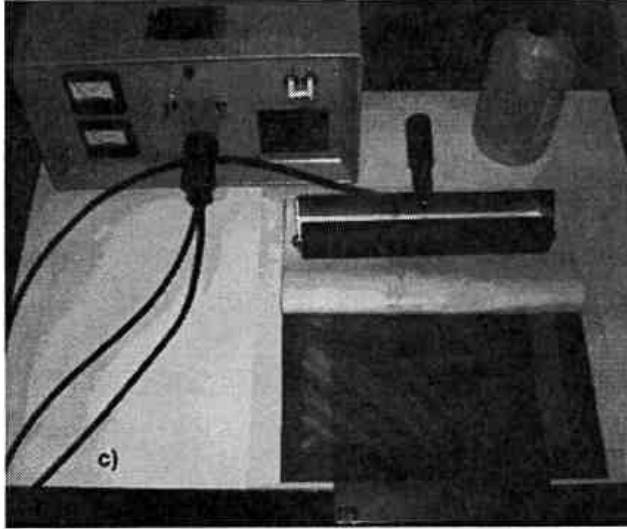
Şekil 2.46 Haddelme yönüne göre şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması: a) CQ'nun statik şekillendirme sınır diyagramı; b) CQ'nun dinamik şekillendirme sınır diyagramı; c) DP590'ın statik şekillendirme sınır diyagramı; d) DP590'ın yüksek hızlı şekillendirme sınır diyagramı [60]

2.8 Grid İşleme Yöntemleri

Şekillendirmeden önce daire gridler sac numunenin bir veya her iki yüzeyine işlenir. Şekillendirme sırasında sacın deformasyona uğramasıyla daireler çarpılmaya başlar. Bu tekniğin kısmi basitliğinden ötürü daire grid yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak kare grid vb uygulamalar da deformasyonların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Dairesel desenlerin boyutları sonuçlar açısından kritiktir, küçük çapların olması (genellikle 2.5 ile 5 mm arası) ölçümlerde daha iyi sonuçlar verecektir. Gridlerin doğruluğu, kontrastı ve çözünürlüğüne dayalı olarak farklı metotlarda grid işleme yöntemleri kullanılmaktadır

2.8.1 Elektro-kimyasal dağlama yöntemi

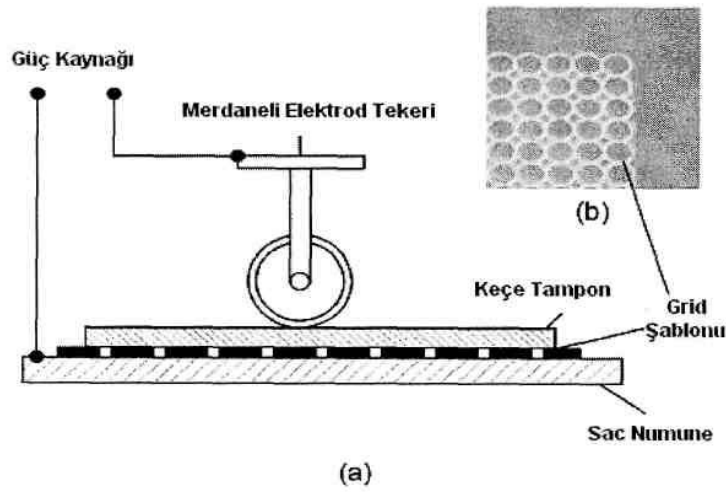
Ucuz olmasıyla beraber, basitliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle en çok kullanılan grid işleme yöntemidir [61]. Şekil 2.47 de elektrokimyasal dağlamada kullanılan elemanlar gösterilmektedir. Bunlar sırasıyla nötralize edici solüsyon, düşük voltajlı güç kaynağı, grid şablonu ve keçe tampondur.



Şekil 2.47 Elektrokimyasal dağlama yönteminde kullanılan elemanlar

Öncelikle güç kaynağı, elektrot ile sac malzemeye bağlanır. Sonra iş parçası yüzeyine, istenen grid şablonu düzenli bir şekilde yerleştirilir. Yerleştirme işleminden önce yüzey temizlenmelidir. Yalnızca şablon üzerindeki dairesel halkalar veya kare alanların solüsyonun geçmesine izin verilir.

Sonrasında üzerine uygun aşındırma solüsyonu dökülen keçe tampon kırışma yapmayacak şekilde şablon üzerine yerleştirilir. Her malzeme için farklı solüsyonlar kullanılır ve uygun solüsyonu seçmek gerekmektedir. Düz ya da merdaneli bir elektrot tekeri bir güç kaynağına bağlı olacak şekilde tampona yerleştirilir ve bu sayede akım elektrottan sac malzemeye geçer. Aşındırma solüsyonu merdaneli elektrot vasıtasıyla oluşan basınç sayesinde şablonun geçirgen sınırlarından geçip sac malzemenin yüzeyine ulaşır. Merdaneli elektrot ile numune yüzeyinden geçirilen voltaj neticesinde şablonun deseni numunenin yüzeyinde oluşur. Şekil 2.48 a da yöntem, b de ise grid şablonu şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.48 a) Elektrokimyasal dağlama yönteminin gösterimi, b) şablon [62]

Aşındırmadan sonra metal numune nötralize bir solüsyonla yıkanmalıdır. Çeşitli geometrik şekiller, elektrokimyasal dağlama yöntemi sayesinde sac numune üzerinde seri ve hatasız olarak oluşturulabilir. Elektrokimyasal dağlama için gerekli süre, malzeme ve uygulanan voltajın bir fonksiyonudur. Aşındırmanın derinliği ise akımın uygulama süresi ile orantılıdır [62].

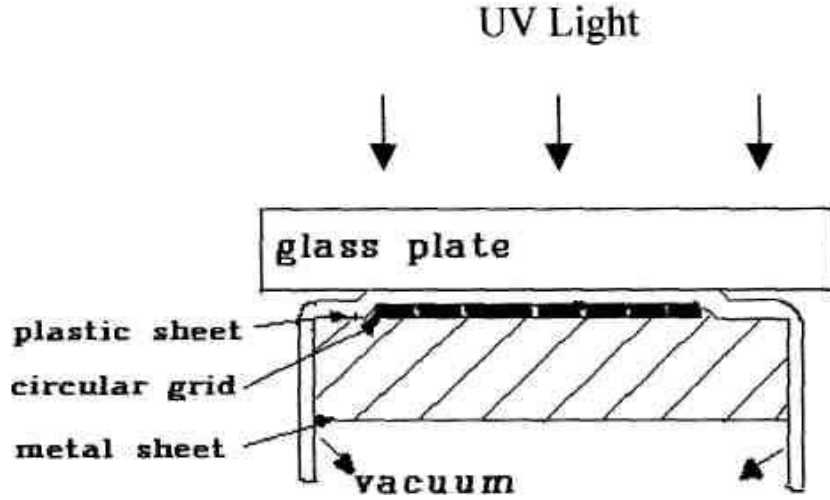
2.8.2 Fotokimyasal dağlama yöntemi

Fotokimyasal dağlama yöntemi, grid markalamada doğruluğu ve hassasiyeti yüksek olan bir yöntemdir. Bu metotla gridlerin markalanmasında şu adımlar izlenmektedir:

- Metal yüzeylerin temizlenmesi
- Foto dirençle kaplama
- UV ışığı ile aydınlatma

- Dağlama
- Yüzey temizleme

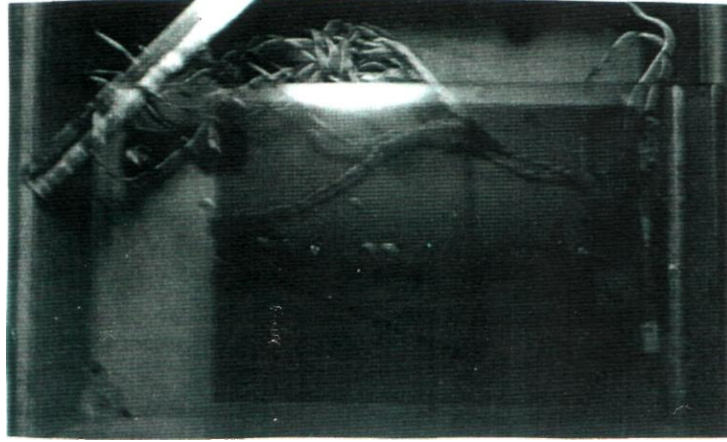
Metal yüzeylerin temizlenmesi toluen ($C_6H_5CH_3$) veya trikloretilen ($CHCl:CCl_2$) ile gerçekleştirilir, ancak bu işlem asit banyosu içerisinde çok kısa bir süre için yapılmalıdır, ardından sac üzerinde foto direnç emülsiyon uygulanır ve daha sonra emülsiyon fotografik negatif ile kaplanır ve güçlü bir ultra-viole ışığa maruz bırakılır. Negatifin görüntüsü fotografik baskı şeklinde sac üzerine işlenir. Oldukça ince, keskin çizgiler sac üzerine bu yolla baskılanır. Fotogrid sac metale kapalı olacak şekilde temas etmelidir. Bu da grid ile yüzey arasında vakum oluşturulması vasıtasıyla gerçekleştirilir. Şekil 2.49'da fotokimyasal dağlama tekniği gösterilmektedir.



Şekil 2.49 Metal yüzeyi ve fotogrid arasında vakumla fotokimyasal dağlama tekniği [63]

Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için karanlık bir oda gereklidir. Fotogrid, kimyasallar vasıtasıyla kaldırılarak hazırlanır. Bu yöntemde metal yüzeyi üzerinde ileri dağlama yapabilmek zordur. UV ışığına maruz bırakıldıktan sonra, kaplanmamış metal yüzeyini aşındırmak için yüzeye aşındırıcı uygulanır. Aşındırma için farklı asit solüsyonları kullanılır (HCl , HNO_3 , HF vb). Metal yüzeyi dağlandıktan sonra, toluen veya trikloretilen ile temizlenir [64]. İşlemin başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi için karanlık bir odaya ihtiyaç duyulması bu yöntemin dezavantajlı bir yönü olmasına rağmen, çok ince çizgiler bu teknikle sac metal yüzeyi üzerine işlenebilmektedir [65].

Şekil 2.50 de fotokimyasal grid işleme düzeneği görülmektedir



Şekil 2.50 Grid işleme düzeneği [66]

2.8.3 Lazerle dağlama yöntemi

YAG lazer kullanılarak dairesel grid şablonu sac metal yüzeyi üzerine markalanır. Sac malzemelerin boyutlarına bağlı olarak son derece uzun sürmesine rağmen, en yüksek hassasiyete ve doğruluğa sahip olan grid markalama yöntemidir ve bu metot hesaplamalı algoritmanın doğruluğunu test etmek için oldukça kullanışlı bir yöntemdir [67-68].

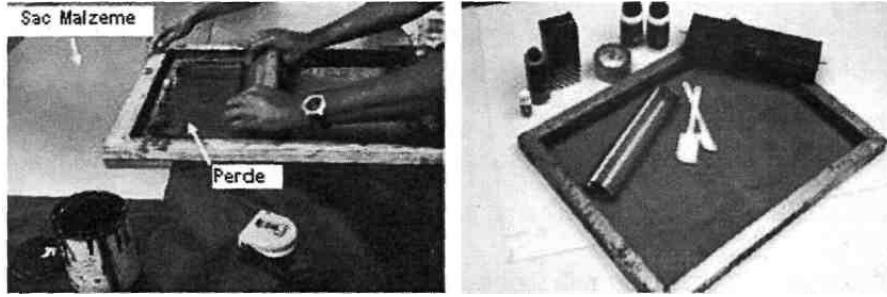
A Star Mark (Rofin) lazer, daire gridleri markalamak için kullanılmaktadır. Alüminyum, çelik, plastikler, tahta vb. gibi büyük ölçekte malzeme grubu üzerinde uygulanan oldukça iyi bir endüstriyel araçtır. Nd: YAG lazer (1064 nm dalga boyunda) içermekte olup, sürekli rejimden 30 khz frekansa kadar çalışabilmektedir. Seçilmiş malzeme üzerinde herhangi bir tip işlemeyi yapabilmesi için CAD tasarımına sahip bir yazılım paketi kullanılmaktadır [69].

Bu yöntem sayesinde kontrollü biçimde malzeme kaldırmak mümkün olmaktadır. Ancak bu yöntem, sac numunenin boyutlarına bağlı olarak ciddi derecede uzun sürebilmektedir. Ayrıca yöntem çok maliyetli olmakla beraber renkli gridler lazer grid yöntemi ile yapılamamaktadır. Bu yöntemi sınırlayan en önemli sorun gridlerin koyu renkli olmasıdır. Bu nedenle koyu renkli yüzeylerle gridler arasında yeterli renk farkı oluşmamaktadır [64].

2.8.4 Serigrafi yöntemi

Grid işleme için en basit ve hesaplı yöntemlerden biri olan serigrafi yönteminde grid deseni metalin şekillendirilmesi esnasında silinmeyecek dirençte olan bir mürekkeple

doğrudan metal malzeme yüzeyine basılarak elde edilir. Bu yöntem Şekil 2.51 de gösterilmektedir.



Şekil 2.51 Serigrafi yönteminin gösterimi [62]

Bu tekniğin kendine has özelliklerinden dolayı, herhangi bir katı yüzey üzerinde desen işleyebilme yeteneğine sahiptir [64]. Öncelikle perde, bir bölümü geçirgen olmayan bir malzeme ile bir alüminyum destek çerçevesi üzerine şablon oluşturacak şekilde sıkı biçimde gerdirilir. Perdenin malzemesi genellikle ipektir. İpek çok dayanıklı bir malzeme olmasının yanı sıra yıkanıp tekrar kullanılabilme özelliği de vardır. Perdeyi görüntü basılacak hale getirmek için temel prensip, deseni oluşturabilmesi için mürekkebin açık alanlardan sızabileceği bir şablonu perde üzerinde oluşturmaktır [62].

Bu yöntemde kullanılan mürekkeplerin, sac malzemenin şekillendirilmesi sırasında silinmemesi için yüksek esnekliğe sahip olmalıdır [68]. Bu nedenle mürekkep seçimi önemli olmaktadır. Bu durumda baskı için siyah mürekkep tercih edilir. Serigrafinin asıl avantajı basitliği, uygulama kolaylığı, maliyetinin uygun olması, gereken malzeme, işgücü ve bilginin erişilebilirliğidir. Ayrıca, metal malzemeler işlemeye dayanıklı mürekkepler vasıtasıyla kolayca işaretlenebilmektedir [62]. Şekil 2.52 de serigrafi ile üzerine daire grid markalanmış bir sac malzeme görülmektedir [69].



Şekil 2.52 Serigrafi yöntemiyle yüzeyi daire desenleri işlenmiş sac malzeme (işlenen daireler 5mm çapında) [69].

2.9 Grid Markalama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bahsedilen bu grid işleme yöntemleri, malzemelerin esas niteliklerini değiştirmeyecek şekilde şekillendirme sınır diyagramı deneylerinde geniş çapta kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin her birinin diğerine karşı avantajları ve dezavantajları olup, bunlar desen hassasiyeti, çözünürlük, kontrast, dayanıklılık, kalite ve maliyet açısından farklılık göstermektedir. Bir uygulama için en uygun olan metodun seçilmesinde o uygulamanın özellikleri göz önüne alınmalıdır. Seçilen grid oluşturma yöntemi şekillendirme işlemini etkilememeli ve gridler de şekillendirme işleminden (yağlama, sürtünme gibi) etkilenmemelidir. Çizelge 2.1 de grid işleme yöntemlerinin birbirleri ile kıyaslamaları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Grid markalama yöntemlerinin karşılaştırılması [62]

parametreler	Elektrokimyasal dağlama	serigrafi	Fotokimyasal dağlama	Lazer dağlama
hassasiyet	A	B	B	A
Kalite, çözünürlük, kontrast	B	A	B	A
dayanıklılık	A	A	C	A
Yağlama ve sürtünme direnci	A	B	B	A
Sıcaklığa karşı direnç	A	C	C	A
Farklı malzemelere uygulama	D	A	A	C
maliyet	C	A	D	D
Gerekli zaman	A	A	D	D
Büyük malzemelere uygulanabilme	C	C	D	A

Lazer aşındırma yöntemi sac numunenin boyutlarına bağlı olarak çok yavaş bir yöntem olmasına rağmen grid oluşturmada büyük saclar söz konusuysa elektrokimyasal ve fotokimyasal aşındırmaya göre daha uygun olur. Ayrıca lazer aşındırma yöntemi renkli grid oluşturma konusunda yetersizdir. Bazı durumlarda ise serigrafi yöntemi, gerek grid renklerinin seçilebilmesindeki avantajından gerekse ihtiyaç duyulan malzeme ve bilirkişinin kolay bulunması gibi avantajlarından dolayı tercih edilebilmektedir. Lazer grid işleme yöntemi en yüksek hassasiyeti sağlasa da çok pahalıdır.

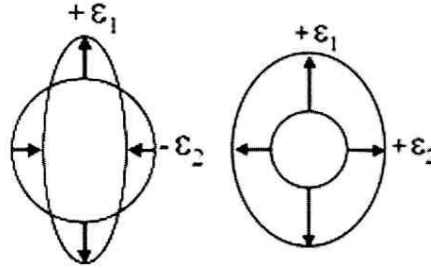
Bir çok durumda serigrafi kimyasal aşındırma yöntemine kıyasla hem daha maliyetsiz hem de gridlerin oluşumu bakımından daha net ve keskin olması açısından daha uygundur. Öte yandan, serigrafi 150°C ye kadar dayanıklıdır. Bu yüzden serigrafi sıcak süreç gerektiren durumlarda uygun değildir.

Grid oluşturma konusunda serigrafi uygulama kolaylığı, etkinlik, yüksek hassasiyet, çözünürlük ve kontrast açısından en uygun yöntem olarak görülmektedir. Fakat ortam sıcaklığının 150°C'nin üstünde olduğu durumlarda elektrokimyasal yöntem daha uygun olmaktadır [62].

2.10 Şekil Değişimlerinin Hesaplanması

Sac yüzeyinde meydana gelen şekil değişimlerinin ölçülmesinde daire grid analizi (circle grid analysis) yaygın olarak kullanılmaktadır [70].

Bu teknik, yukarıda da bahsedildiği gibi sac yüzeyinin düzenli bir şekilde daire gridle markalanmasıyla başlayıp, grid elemanlarının daireden elips haline dönüşmesini kapsamaktadır. Şekil 2.53 de şematik olarak dairelerde oluşan şekil değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 2.53 Deformasyon sonrası oluşan elipsler

Daha sonra meydana gelen elipslerin eksen uzunlukları L_1 , L_2 ölçülür ve meydana gelen gerçek birim şekil değişimleri şu formüllerle hesaplanır.

$$\epsilon_1 = \int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_1}{L_0}\right); \quad \epsilon_2 = \int_{L_0}^{L_2} \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_2}{L_0}\right) \quad (2.24)$$

burada L_0 orijinal daire çapıdır. Malzeme sıkıştırılmadığı kabul edildiğinden, parçanın toplam hacmi sabittir ve bu nedenle üçüncü veya kalınlık boyunca olan birim şekil değişimi $\epsilon_3 = -\epsilon_1 - \epsilon_2$ formülü kullanılarak hesaplanır. Şekil değişimlerinin

bu şekilde hesaplanması ölçüm yapılacak sac yüzeyindeki her grid elemanda uygulanmalıdır [71].

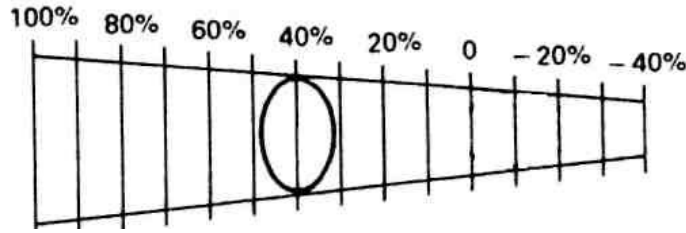
2.11 Deformasyonların Ölçülmesinde Kullanılan Metotlar

Sac şekillendirme işlemlerinde meydana gelen deformasyonları ölçmek için farklı ölçme teknikleri kullanılmaktadır. Bunlar manuel ve otomatik ölçme olmak üzere iki gruba ayrılır [70, 64, 72].

2.11.1 Manuel Ölçüm Metotları

2.11.1.1 Mylar cetvelle ölçüm

Şekil değişimlerini doğrudan ölçmek için şeffaf bir ölçeği olan, manuel olarak çok yaygın kullanılan bir araçtır. Şerit elips üzerine yerleştirilir ve elipsin büyük eksenine çakışmaya kadar ayarlanır. Daha sonra ölçek üzerinden yüzde uzamalar direkt olarak ölçülür. Küçük birim şekil değişimlerini ölçmek için ölçek 90 derece döndürülür. Basit bir Mylar cetvel Şekil 2.54 de gösterilmektedir.



Şekil 2.54 Mylar şerit [63]

Bu metot, şekil değişimi değerlerinin elde edilmesinde kolaylık sağlar, ancak oldukça yavaş ve yorucu bir yöntemdir. Hataların olmaması için ölçüm yapan kişinin yetenekli ve dikkatli olması gerekmektedir. Bu yöntemin bir diğer dezavantajı, sadece cetvelin alanına uyan elipsleri ölçebilmesidir. Bu nedenle sonuçlar ekstrapolasyon yapıldığında hatalara neden olmaktadır [61].

2.11.1.2 Hareketli mikroskopa ölçüm

Daire gridlerin boyutlarındaki değişiklikleri ölçmek için en yaygın kullanılan metottur. Çalışmanın bağlandığı yer üzerinde iki sağ aç kenarı bulunmaktadır. Çalışma mikroskop altında konumlandırılır. 0.05 ile 0.1 mm arası ölçümler yapılabilir, Mylar cetvelle ölçüme göre doğruluğu daha yüksek olan yöntemdir [63].

Bu şekilde manuel olarak yapılan ölçümler yavaş, yorucu, doğruluğu düşük ve tekrar edilebilirliği fazla olan yöntemlerdir. Düşük maliyetleri olması nedeniyle atölye seviyesinde kullanılabilirliği olan yöntemlerdir.

2.11.2 Otomatik ölçüm metotları

Manuel metotların çok yoğun çalışma gerektirmesi ve uzun sürmesi nedeniyle, bu yöntemlere alternatif olarak otomatik ölçüm metotları geliştirilmiştir [64, 73, 74].

Bu metotların tümü, şekil değişimi analizcisi adı verilen bir elemana sahiptirler. Bu tekniklerin her birisi kendine özgü optik aygıtlara sahip olup, algoritma hesapları yapmaktadır [61].

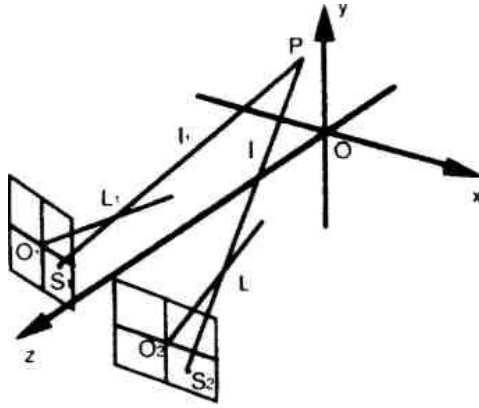
Manuel olarak kullanılan Mylar cetvel ile ölçme yöntemine alternatif, şekil değişimi ölçüm sistemi tabanlı bir dijital kameradır. Bu tip ölçüm sisteminde, iki farklı yaklaşım önerilmektedir. Birinci yaklaşım tekil eleman sistemi olup, her girddeki şekil değişimlerinin ölçülmesinde bir dijital kamera kullanılmaktadır. Şekil 2.55 de tekil eleman sistemine dayalı ölçüm işlemi gösterilmektedir.



Şekil 2.55 Tekil eleman şekil değişimi ölçümüne dayalı dijital kamera [75]

İkinci yaklaşım stereo-görüntüleme sistemini temel alan bir yaklaşımdır [71]. Stereo-görüntüleme; iki CCD kamerası ile farklı yönlerden kaydedilen nesnenin iki görüntüsü ile iki kamera arasındaki geometrik ilişkiden, nesnenin yüzeyi üzerinde üç boyutlu koordinat ölçümünü sağlayan bir metottur.

Şekil 2.56 iki kamera ve nesne arasındaki geometrik ilişkiyi göstermektedir [76]

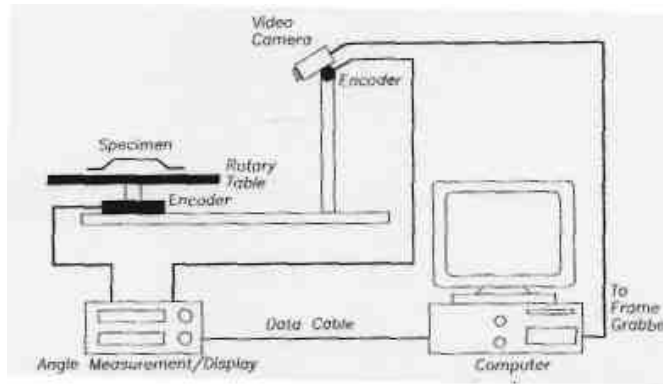


Şekil 2.56 Stereo-görüntü ölçümünün ilkesi [76]

Burada parçanın iki veya daha fazla bölgesinden görüntüler alınarak, stereo-görüntüleme ile parça geometrisi üç boyuta getirilmekte ve eş zamanlı olarak şekil değişimleri ölçülmektedir [57].

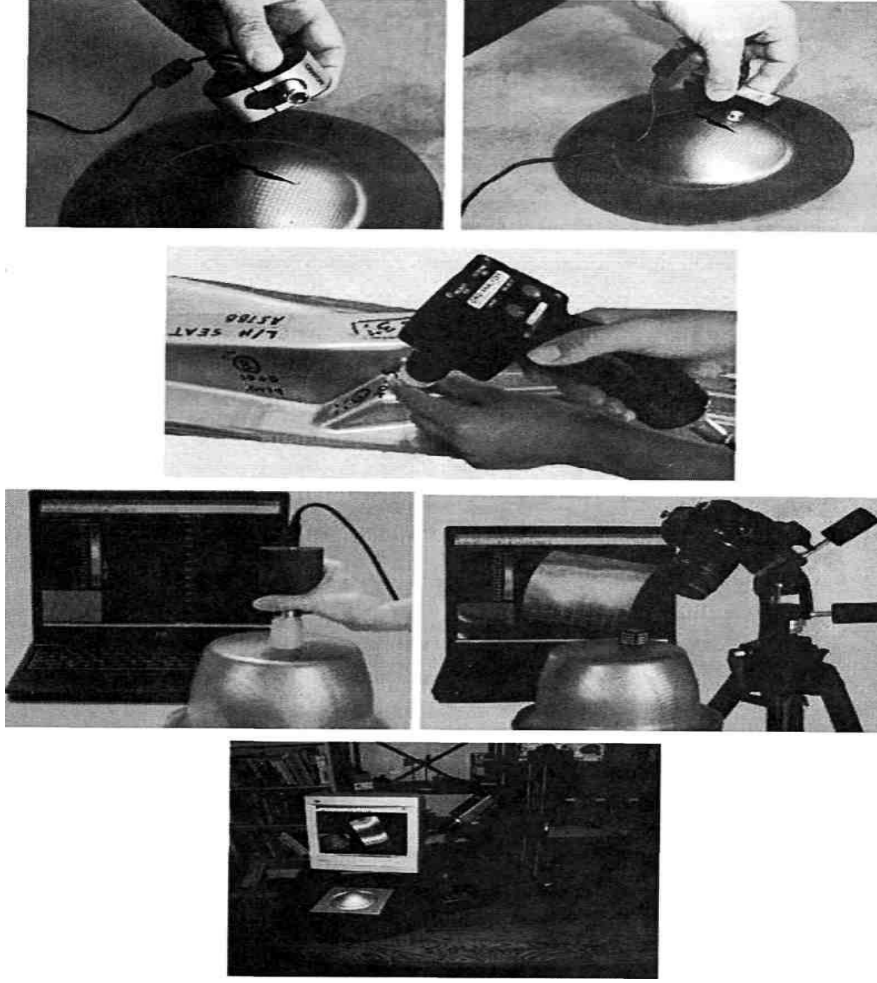
Stereo-görüntüde üç boyuta getirme işlemi, aynı görüntü özelliğine karşılık gelen pikselden (daire/elips merkezleri veya doğruların kesiştiği noktalar) eşleme yaptığı özellik tabanlı bir tekniği kullanmaktadır. Bu sistemde, özelliği olmayan bölgeler ölçülmemektedir.

Stereo-görüntüleme, bir pozisyon aygıtı veya üçayaklı taban (tripod) üzerinde hareket edebilen kameralar ile bir dijital kamerayı kapsayan ticari sistemlere başarılı bir şekilde adapte olabilmektedir.Şekil 2.57 stereo-görüntüleme işlemini şematik olarak göstermektedir [71].



Şekil 2.57 Pozisyon aygıtı ile tek dijital kameralı stereo-görüntü [71]

Aşağıdaki şekillerde grid ölçme yöntemlerinde kamera yöntemlerinin nasıl yapıldığının fotoğrafları gösterilmektedir.



Şekil 2.58 Grid ölçme metodunda kullanılan kamera yöntemleri [75]

3. ARAYER ATOMLARINDAN ARINDIRILMIŞ (IF) ÇELİKLERİ İLE SOĞUK ŞEKİLLENDİRMEYE UYGUN DÜŞÜK KARBONLU GALVANİZE EDİLMİŞ ÇELİKLERİN ÖZELLİKLERİ VE ÜRETİM PROSESLERİ

3.1 Arayer Atomsuz (IF) Çeliklerin Özellikleri ve Çeşitleri

Arayer atomsuz çelikler; titanyum veya niyobyum gibi karbid, sülfid, nitrid yapıcı elementlerin ilave edilmesiyle üretilen ultra düşük karbonlu (< 6 ppm) çeliklerdir [77]. Ti ve Nb'un mikroalaşım elementi olarak görevleri arayer atomlarını bağlamak ve bunları büyük çöktiller halinde matris içerisinde seyrek bir şekilde dağıtmaktır. Bu suretle, çöktillerin yeniden kristalleşme sırasında tane sınırlarının hareket serbestliği üzerindeki dislokasyonları durdurucu etkisi minimize edilmiş olmaktadır [78].

IF çeliğine Ti eklenmesi durumunda, karbon, nitrojen ve sülfür elementleri TiN, TiS, $Ti_4C_2S_2$ ve TiC gibi farklı tipte çöktiller oluşturmaktadır. Diğer alaşım elementleri (Mn, P) MnS ve Ti-Fe-P tipinde çöktiller oluşturabilmektedir [79-85].

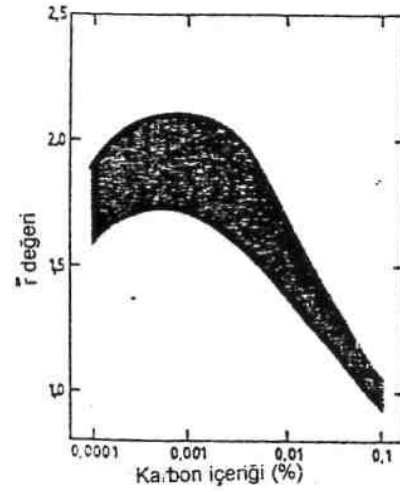
Düşük karbon miktarının olması, arayer atomlarını bağlayan Ti ile Nb elementlerinin ilave edilmesi ve kontrollü bir üretimin gerçekleştirilmesi, derin çekme gibi yüksek miktarlarda şekil değişimlerinin meydana geldiği işlemler için uygun olan $\{111\}$, $\langle 110 \rangle$ yeniden kristalleşme tekstürünün oluşmasını sağlar.

Bu tekstüre sahip mikroyapıların düşey anizotropi değerleri oldukça yüksektir. Bu şekilde stabilize edilmiş ultra düşük karbonlu çeliklerin düşey anizotropi değeri genellikle 2.0' den büyüktür.

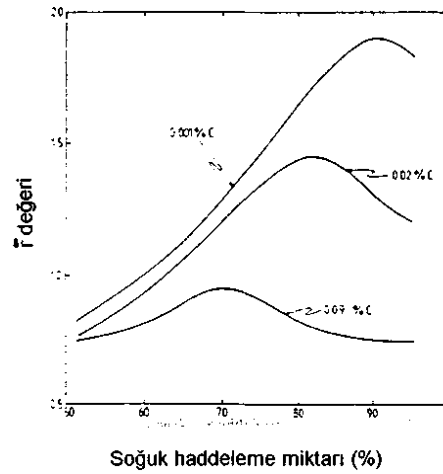
Ultra düşük karbonlu çeliklerin üretimini teşvik eden ana neden, bileşimindeki çok düşük karbon ve nitrojen elementlerinin şekillendirilebilirlik üzerindeki olumlu etkileridir [86].

Çünkü yüksek karbon içeriği, şekillendirme parametresi olan $\bar{r}$ (ortalama plastik anizotropi parametresi) değerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu parametrenin

azalması iç yapıda sementit miktarının artmasından ve tane boyutunun azalmasından dolayıdır [87]. Şekil 3.1 çelik içerisindeki karbon miktarının, Şekil 3.2 ise hem karbon miktarı hem de soğuk şekil değişim miktarının r değeri üzerindeki etkisini göstermektedir.



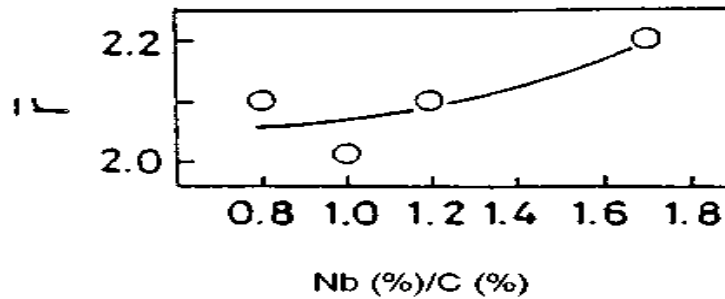
Şekil 3.1 Çeliklerde karbon miktarının r değeri üzerindeki etkisi [86].



Şekil 3.2 Değişen soğuk haddeleme miktarlarına göre karbon yüzdesinin r üzerindeki etkisi [86]

Yüksek r değerleri sıcak deformasyon, bobin sarma, soğuk haddeleme ve tavlama sonrasında elde edilen uygun yeniden kristalleşme tekstürü ile elde edilmektedir. Arayer karbon atomları ise, istenen $\{111\}$ yapısının oluşumunu engelleyerek arzu edilmeyen $\{110\}$ ve $\{100\}$ tekstürlerinin oluşumunu teşvik etmektedir [86]. Azot da çelik için genellikle çok zararlı katışkılardan biridir. Düşük karbonlu çeliklerde azotun yol açtığı en önemli gevrekleşme şekil değişimi yaşlanmasıdır. Olağanüstü bir

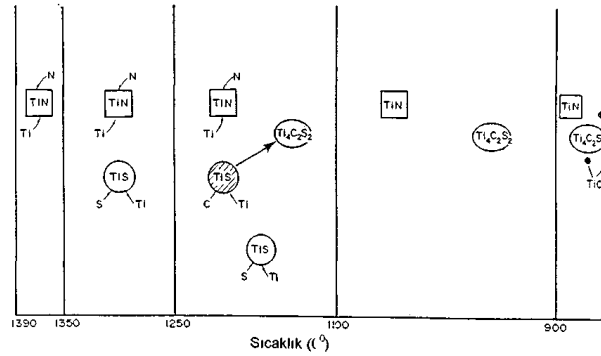
tokluk düşüşüne neden olan söz konusu yaşlanma, soğuma hızına bağlı olmaksızın sadece soğuk şekil değiştirmiş çeliklerde görülür. Çelikte çözülmüş olan azot atomları, özellikle dislokasyonların sık olduğu yerlere yayınarak, bunların hareket edebilmelerini büyük ölçüde engeller, yani malzeme gevrekleşir. Azotun bu etkisini ortadan kaldırmak için, üretim esnasında Al ilave edilerek AlN bileşiği oluşturulur [88]. Aliminyumun nitrojene oranı şekillendirilebilirliği önemli ölçüde etkilemektedir. Aliminyumun nitrojene istenilen oranı yaklaşık 10 dur. Çözülmüş haldeki aliminyum ve nitrojenin malzenin bünyesinde var olması arzu edilen {111} tekstür bileşenin gelişmesine yardımcı olmakta ve böylelikle yüksek bir $\bar{r}$ değerinin elde edilmesini sağlamaktadır [89]. Singh en iyi $\bar{r}$ değerinin 0.04-0.07% Al (total) ve 0.0065-0.0095% N ile elde edilebileceğini belirtmiştir [90]. Titanyum, N,S ve C ile bileşikler oluşturur. Ti azalan sıcaklıkla önce N ile birleşir ve TiN çökmesi gerçekleşir. TiC oluşumu için ise daha az miktarda Ti kalır. Ti bunun dışında S ile $Ti_4S_2C_2$ bileşiğini oluşturur. Bu nedenle karbonu Ti ile stabilize etmek için bu mekanizmalar göz önünde bulundurularak Ti miktarında bir düzeltme yapılmalıdır. Niyobyum, sadece karbon ile birleştiğinden miktarında herhangi bir düzeltme yapılmamaktadır. Şekil 3.3 Nb ile stabilize edilmiş ultra düşük karbonlu çelikte Nb'un çeliğin özelliklerine olan etkisini göstermektedir. Nb'nin tüm karbon ile birleşip maksimum $\bar{r}$ değeri elde etmek için söz konusu olan Nb miktarından daha fazla kullanılmalıdır.



Şekil 3.3 Nb / C oranının $\bar{r}$ değerine etkisi [89]

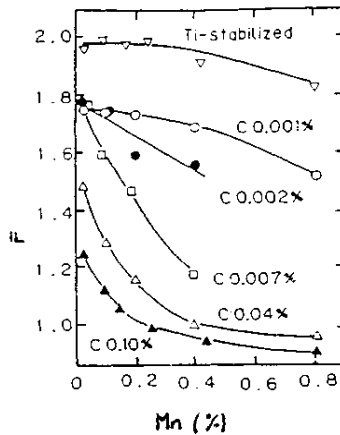
Erime sırasında sıcaklığa bağlılık ve Ti ile Nb' nin değişik bileşiklerinin çökmesi IF çeliklerinin elde ediliş prosesini önemli ölçüde etkilemektedir. Genelde Ti bileşikleri, Nb' nin oluşturduğu bileşiklere göre daha karardır ve daha düşük sıcaklık (haddeleme ve sargıya alma ve tavlama) aralıklarında sorun yaratmamaktadırlar. Bu sebeple Ti ile stabilize edilmiş IF çelikleri alaşımlama ve işlem değişkenlerine karşı hassasiyetleri daha azdır. Şekil 3.4 de görüldüğü gibi TiS' ün $Ti_4C_2S_2$ ' ye dönüşümü karbonun yüksek

sıcaklıklarda bağlanması açısından önemlidir. Çökeltilerin yüksek sıcaklıklarda difüzyonla büyümesi ile çökeltilerin arzulanan büyüklüğe ulaşmaları sağlanmış olur. TiS' den $Ti_4C_2S_2$ eldesi yüksek sıcaklıklarda izotermal tavlama veya düşük slab ısıtma sıcaklıklarıyla sağlanmış olur [91].



Şekil 3.4 Ti ile stabilize IF çeliğinde denge koşulları altında çökelme mekanizması (% C = %0.004, %N = %0.003, %S = %0.008, %Ti= %0.068, %Mn= % 0.1963) [92]

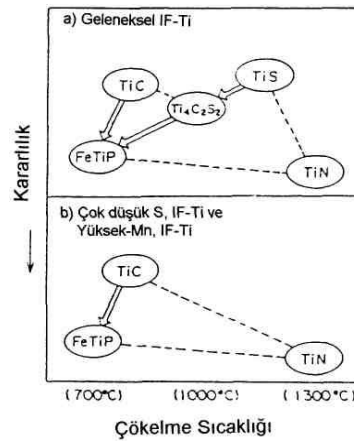
Düşük karbonlu çeliklerde mangan, sülfür ile birleşir. Eğer mangan miktarı gereğinden fazla ise Şekil 3.5 de görüldüğü gibi r değerlerinde bir düşüş meydana gelmektedir. Bunun sebebi manganın {111} doğrultulu ferrit tanelerinin büyümelerine engel olmasıdır. Bu nedenle Mn belli bir aralıkta tutulması gerekmektedir. Büyük olasılıkla C ve Mn miktarına bağlı olarak tekstür oluşumunu etkileyen başka faktörler de etkin rol oynamaktadır. Şekil 3.5 aynı zamanda azalan C miktarı ile Mn' in r değeri üzerindeki etkisinin de azaldığını göstermektedir. Bu etki Ti-stabilize IF çeliklerinde minimum olur.



Şekil 3.5 Mn'ın değişik karbon miktarları içeren çeliklerde r değerleri üzerindeki etkisi [86].

Bu konuda ayrıca Mizui ve Okamoto sürekli tavllanmış alimünyum ile sakınleştirilmiş çelik sacların derin çekilebilirliği üzerinde Mn içeriğinin (0.02-0.14% oranında) etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında kangal sıcaklığındaki artışla artan ortalama Mn değerinde $\bar{r}$ değerinin haddeleme yönünde maksimum değer gösterdiğini belirtmişlerdir, ayrıca MnS inklizyonunun dağılımındaki değişikliğin de etkili olduğunu bildirmişlerdir [93]. Fosfor ilaveleri, IF çeliklerinde katı çözelti sertleşmesine olumlu katkıda bulunur. Bu iyileşen sertleşme özelliği yüksek $\bar{r}$ değerleri ile beraber elde edilebilir. Ancak ferrit tane sınırlarında tavlama sırasında ve sonrasında fosfora bağlı olarak oluşan soğuk kırılmalığın önlenmesi için işlemin ve kimyasal bileşimin çok iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Araştırmalar, karbonun düşük karbonlu çeliklerde ferrit tane sınırlarına yöneldiğini ve çok güçlü tane sınırı bağları oluşturduğunu göstermiştir.

Ultra düşük karbonlu çeliklerde C yeterince bulunmadığından tavlama sırasında mecburen P, ferrit tane sınırlarına gitmekte ve taneler arası kırılmaya karşı hassasiyet oluşmaktadır. P gevrekliğini kontrol etmenin yolu, şekillendirilebilirliği düşürmeden ferrit tane sınırlarında fosforun yerini alacak kadar arayer karbonu bırakacak şekilde kimyasal bileşimi ve prosesi ayarlamaktır. Demir-titanyum-fosfür çökeltileri yüksek P ve Ti içeren IF çeliklerinde oluşur. Bazı çalışmalar, büyük FeTiP çökeltilerinin geliş güzel doğrultulardaki ferrit tanelerinin çekirdeklenmesini teşvik edip {111} doğrultulu tekstür yapısını azalttığını göstermektedir. Başka çalışmalar ise, FeTiP çökeltisinin kontrol edilmesinin {111} tekstür oluşumunu teşvik ettiğini ortaya koymuştur. Şekil 3.6 da görüldüğü gibi FeTiP çökeltisi düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir.



Şekil 3.6 Ti stabilize IF çeliklerinde çökeltme sıcaklığının ve Ti çökeltilerinin kararlılığının şematik gösterilişi [86]

Buna göre FeTiP çökmesi sıcak sargılarda düşük sarma sıcaklıkları ile oluşturulabilir. Araştırmacılar, yeniden kristalleşme tavlı sırasındaki yüksek ısıtma hızlarının FeTiP çökmesini arzu edilen {111} doğrultulu taneler oluşana kadar önlediğini göstermektedir. Daha sonra gerçekleşen FeTiP çökmesi arzu edilmeyen doğrultulu ferrit fazının çökmesini önlemekte ve bu şekilde yüksek $\bar{r}$ değerlerine sahip tavllanmış sacların üretimini mümkün kılmaktadır [86].

Ti ve Nb ile stabilize IF çelikleri, hızlı sürekli tavlama için çok uygundur. Stabilize IF çeliklerinde çökme dağılımı soğuk haddeleme ve tavlamadan önce sıcak sargıda gerçekleşir. Bu sebeple, tekstür oluşumu, sürekli tavlama hatlarında yüksek ısıtma hızlarında dahi kontrol edilir.

IF çelikleri ara yer atomları açısından çok düşük değerlere sahip olduğundan yapay yaşlandırma ünitesine gereksinim duymazlar ve sıcak daldırma ile galvanizleme ya da sürekli tavlama hatlarında gereken hızlı ısıtma hızlarında da üretilebilme olanağı sunarlar. Ti ilk olarak bu çeliklerde çözülmüş karbon ve azotu TiC ya da TiN şeklinde bağlamak için kullanılmış daha sonra bu amaçla Nb ve Nb + Ti da kullanılmıştır. IF çelikleri genel olarak, yüksek derecede şekillendirilebilirliğin gerektiği yerlerde ihtiyaç duyulan çeliklerdir. Sürekli tavlama hatlarının kullanımının artması, sürekli tavlama hatlarının düşük karbon ve azot içeren çeliklerde ekonomik ve çok verimli fonksiyonları olması, IF çeliklerinin üretiminde gelişmeye öncülük etmiştir. Böylece IF çelik üretiminin gelişimi, döküm ve çelik üretiminde optimizasyonu getirmiştir [94].

3.1.1 Derin çekme kalite (DDQ) ultra düşük karbonlu (ULC) IF çelikleri

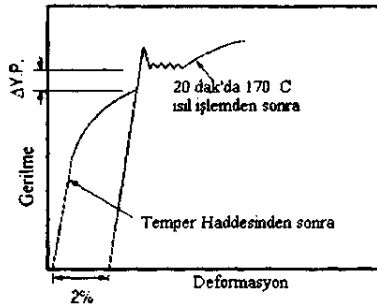
IF çeliklerinin akma mukavemeti 150 MPa, çekme mukavemeti ise 300 MPa civarındadır. Günümüzde, IF çeliği alaşımı konseptine dayalı olarak mükemmel derin çekme ve gerdirmeye ile şekillendirme kabiliyetine sahip olan yeni ultra düşük karbonlu (ULC) yüksek mukavemetli çelik saclar üretilmektedir. Bu çelikler daima IF olmaya ihtiyaç duymazlar, bu yüzden ULC terimi daha doğrudur. Vakum altında gaz giderme prosesi, son zamanlarda levha ve çelik üreticileri tarafından ürünlerin süneklik ve mukavemetini arttırmak için kullanılmaktadır. Karbon oranı % 0,003'ten daha az oranlara kadar düşürülebilir. Dikkatli alaşım katma ve proseslerle, otomotiv endüstrisi için yeni çelikler keşfedilmiştir. Bu proses ilk olarak büyük kesitlerden ve dökümlerden hidrojeni kaldırmak için kullanılmıştır. Sonraları ise özel ve üniform

kimyasal kontrolü ile daha temiz malzemeler imal edilmeye başlanmıştır [91]. Vakum altında gaz giderme prosesi ile yapılan malzemeler genellikle;

- Dövme kalıpları
- İşlenebilir çubuklar
- Büyük döküm kalıpları
- Borulardır.

3.1.2 Fırında sertleşebilen (Bake Hardenable : BH) çelikler

Fırında sertleşebilen çelikler, otomotiv imalatçılarının preslerinde kolayca işlenebilen düşük mukavemetli ve optimum olarak şekil verilebilen bir çelik grubudur. Presleme sırasındaki deformasyon, şekil verme sırasında işlem sertleşmesi ile sertleşmeye yol açar. Vakumla gazı giderilmiş çelik malzemeler özel yaşlanma karakteristikleri olan ürünler verir. Bu otomotiv çelik sac ürünleri, fırında sertleşebilir çelikler olarak bilinirler. Otomotiv gövdesi parçaları haline damgalanmadan (mühürlenmeden) önce normal depolama sırasında yaşlanmaya dirençli olarak dizayn edilirler. . Bununla beraber şekil vermede yaşlanmaya başlarlar ve boya pişirme fırınlarında ısıtıldıktan sonra malzeme tamamen yaşlanır. Orijinal çelik özelliklerine göre yaklaşık 34-70 MPa'lık bir akma mukavemeti artışı olan nihai parçalar elde edilir. Bu gibi ürünler oto imalatçılarının şekil verilebilirlikten feda edilmeden, artan ezilmeye dirençli parçalar tedarik etmelerine yardım eder. Şekil 3.7 de gösterildiği gibi numunenin fırında sertleşebilirliği, ısıtmadan önceki % 2'lik deformasyondaki akma gerilmesi ile numunenin ısıtılma sonrası alt akma noktası arasındaki farktır. Yaşlanma direnci çekme çubuklarını kaynayan suya (100 °C) bir saat daldırarak ve daha sonra çubukları test ederek tespit edilir. Eğer akma noktası kaybolursa çelik, depolamada altı haftaya kadar kararlı olabilir.

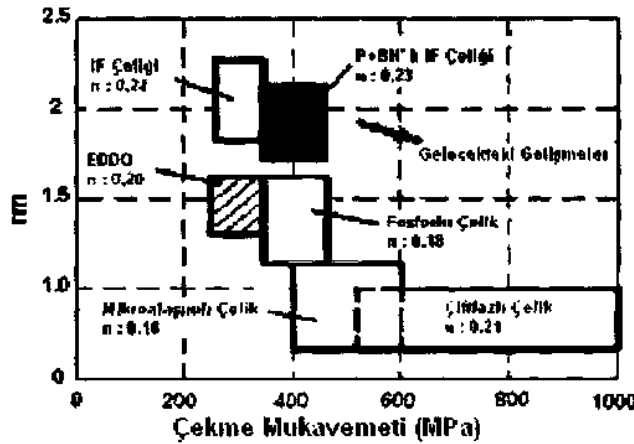


Şekil 3.7 Fırında sertleşme işlemi görmüş çelik levhanın gerilme-deformasyon ilişkisi [95].

Bileşim ve tavlamadan sonra mevcut ara yerde çözülmüş elementlerin miktarının kontrolü fırında sertleşebilir çelik üretimi için kritiktir. Çözeltideki karbon ve azot fırında sertleşebilirlik sağlayabilir fakat çözülmüş azot oda sıcaklığında demir içinde yüksek hareket etme yeteneğine sahiptir ve depolama sırasında erken yaşlanmaya sebep olacaktır. Bu yüzden bu çeliklerde bütün azotun genellikle alüminyum ile bağlanmış olması kritiktir. Karbon bu yüzden, fırında sertleşebilirliği kontrol etmede anahtar elementtir. Tavlamadan sonraki soğutma hızı, tavllanmış ürünlerdeki çözülmüş karbon seviyesini kontrol eder [99].

3.1.3 HSS (Yüksek Mukavemetli) IF çelikleri

Yüksek mukavemetli çeliklerde "r" değerinin yüksek, akma noktasının da düşük olması istenir. Çünkü malzeme presle şekillendirildiğinde kopmanın olmaması ve yüzeyin eğilmemesi gerekir. Şekil 3.8 de çeşitli HSS çelikleri için "r" değeri ile çekme dayanımları arasındaki ilişki verilmektedir. Çift fazlı çelikler ve çökelme ile sertleştirilmiş çelikler dayanım açısından uygun olmakla birlikte r değeri 1-1,3 dolaylarında kalmaktadır. Bunun anlamı, bu çeliklerin otomobil dış sacı olarak kullanılmasını imkansız hale getirmesidir.



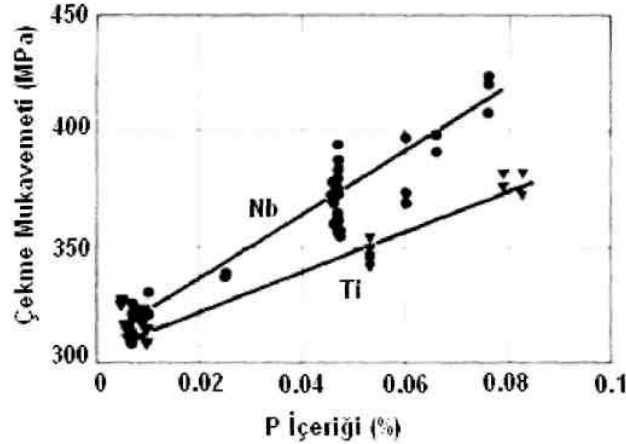
Şekil 3.8 Çeşitli çeliklerin çekme mukavemeti ve anizotropi (r_m) katsayısı arasındaki ilişki [95].

Fosfor ilave edilmiş çeliklerde "r" değeri 1,6 civarındadır, çamurluk gibi derin çekme özelliği isteyen uygulamalar dışında geniş çapta kullanılmaktadır. Fakat bükülmenin olmaması için çekme dayanımının 240 MPa olması gerekir, "r" değeri 2,0 olan IF-HSS çelikleri üretilebilmektedir, bunlar Ti ya da Ti ve Nb bazı IF çeliklerine P, Si, Mn ve

Silikon eklenerek sertleştirilirler. Bu tip çeliklerde bile çekme dayanımı 400 MPa dolayındadır.

3.1.4 Ekstra derin çekilebilen (EDDQ) IF çelikleri

Soğuk şekil verilebilirlik sadece yeniden kristalleşmiş malzeme ile mümkün olduğundan bu prosesin kinetiği karbonitrürlerin kalınlaşmasına bağlı olduğu için, karbonitrürler tarafından çökelme sertleştirmesinin uygulanma ihtimali EDDQ çeliklerinde mukavemeti arttırmak için kullanılamaz. Bu yüzden, mukavemet arttırma mekanizması olarak katı eriyik sertleştirmesi kullanılır. Bu şartlarda uygun elementler mangan ve silisyumdur ve bunlar çekme mukavemetini % 0,1 Mn, 4 MPa, %0,1 Si, 10 MPa arttırır. Fosforun etkisi ise daha büyük seviyededir. Niyobyum ile stabilize edilmiş çeliklerde % 0,1 P çekme mukavemetini 100 MPa arttırır ve Şekil 3.9 'da görüldüğü gibi titanyumlu çeliklerde bu etki biraz daha azdır. Titanyumlu çelikte daha düşük mukavemet arttırma mekanizması FeTiP fazının oluşumu, fosforun eriyik sertleştirmesi etkisini düşürmesi ile açıklanabilir [96].



Şekil 3.9 Nb veya Ti ile stabilize edilmiş bir IF çeliğinde fosfor kuvvetlendirmesi [96]

Fosforun negatif etkisi, tane sınırlarına yayınarak gevrekleşmeye yol açmasıdır. Yığın tavlama sonrasında, herhangi bir ekstra fosfor ilavesi olmaksızın IF çeliğinde böyle bir gevreklik oldukça önemli olabilir.

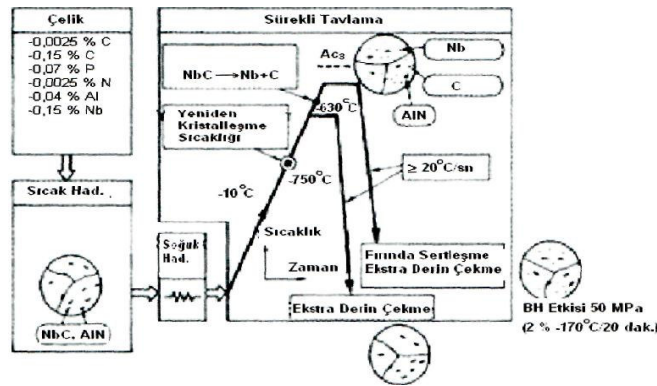
Yüksek mukavemetli EDDQ çeliklerinde tipik fosfor içeriği, kısa süreli tavlama çevrimi zamanında bile tane sınır gevrekliğine yol açabilir. Bundan kaçınmak için, yüksek mukavemetli ULC çeliklerine bor ilavesi yaygın bir uygulama olmuştur. Aynı zamanda bir arayer elementi de olan borun, fosforun tane sınırı segregasyonunu

başarılı bir şekilde önlediği görülmektedir ve bu etki niyobyum ile alaşımlandığında daha ince tane boyutu ile (daha fazla tane sınır alanı) arttırılmaktadır. Böylece niyobyum, fosforun güçlendirici etkilerine ilaveten gevrekliği azaltmaya yardım eder. Galvanizleme veya galvanizleme ısı işlemi yapılması durumunda çelik genellikle ana silisyum ilaveleri içermemelidir. Çizelge 3.1 aynı zamanda bu çeliklerin yüksek düzlemsel izotropisini de gösteren, sıcak daldırma ile galvanizlenmiş yüksek mukavemetli bir IF çeliğinin karakteristik üretim verilerini göstermektedir [97].

Çizelge 3.1 Sıcak daldırma ile galvanizlenmiş yüksek mukavemetli IF çeliğinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri [97]

Kimyasal Kompozisyon	Mekanik Özellikler
30 ppm C, 30 ppm N, % 0.35 Nb, %0,05 P, % 0,03 Al, % 0,0035 Nb, % 0,02 Ti, 10 ppm B	Akma mukavemeti 220 MPa, Çekme mukavemeti 390 MPa, Uzama (%) %37, r değeri 1,9, Δr değeri 0,1, n değeri 0,21

Çelik sacın fırında sertleşebilirliği otomotiv endüstrisi tarafından çok istenir çünkü bu sacın oldukça düşük kuvvetlerle preslenmesine müsaade eder ve nihai üründe yani presle şekillendirme ve boya pişirmeden sonra daha yüksek mukavemeti garanti eder. Fırın sertleştirilmesi, dislokasyonları arayer atomları tarafından kilitleyen bir Cottrell etkisi gösterir ve bu yüzden çelik 5 ppm'nin altında olmayan belli bir miktar çözünmüş karbona ihtiyaç duyar. Şekil 3.10 da yüksek mukavemetli bir EDDQ sacın fırın sertleştirmesinden dolayı 50 MPa civarında bir ekstra akma mukavemeti artışı elde etmek için gerekli proses rotasını şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Yüksek mukavemetli EDDQ-IF çeliğinin proses şartları [98]

Alaşım dizaynı niyobyum ile karbon bağlanmasına dayalıdır ve soğuk haddelenmeden sonra sac IF statüsü sergiler. NbC oldukęa düşük sıcaklıklarda yani ferrit bölgesinde oluşur. Böylece, sürekli tavlama prosesinde soğuk haddelenmiş sacın tamamen yeniden kristalleşmesi için gerekenden daha yüksek bir sıcaklık uygulanırsa kısmen çözünebilir. Bu çözünme işleminden sonraki hızlı soğutma, fırında sertleşebilirliğe yol açarak birkaç ppm karbonun çözültide kalmasını sağlar [98].

3.1.5 Fosforlu IF çelikleri

Bu çelikler mukavemetlerini birincil olarak katı-eriyik sertleştirmesinden kazanırlar. NbC, $Ti_4S_2C_2$ ve FeTiP 'ün çökmesi de IF çeliklerinin dayanımını etkiler. Sonuç olarak, büyük miktarlarda fosfor veya mangan ekleme ihtiyacı olmaksızın mukavemeti arttırmak için çökmenin hassas kontrolü gereklidir.

Mevcut bütün literatürün gözden geçirilmesi 150'nin üzerinde farklı IF-çelik kalitesinin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Fosfor şimdiye kadar katı eriyik sertleştirmesi için en etkili yer alan element olmasına rağmen, soğuk işlem gevrekliğine yol açması açısından zararlıdır. Bu nedenle fosfor ile katı-eriyik sertleşmesini artırarak tane sınırlarına fosforun hareketini engellemek gerekmektedir.

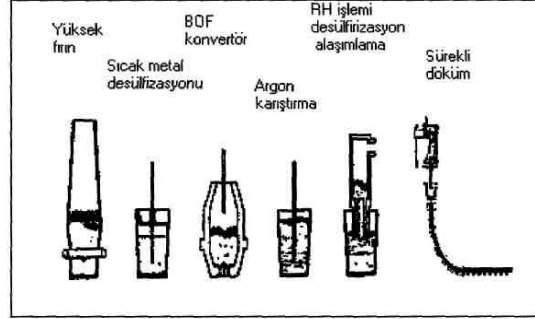
Bu durum alaşım içeriği az olan mekanik özellikleri iyileştirilmiş fosforlu IF çeliklerinin üretilmesine yol açmıştır. Daha önce 220 MPa'lık bir akma mukavemeti elde etmek için kullanılan IF-bileşimi řu anda farklılaştırılarak 260 MPa'lık bir akma dayanımı elde etmek için başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [98].

3.2 IF Çeliklerinin Üretimi ve Proses Kademeleri

3.2.1 Çelik üretimi

IF çeliklerinin üretimi, ilk önce yüksek fırınlarda pik demirin elde edilmesiyle başlar. IF çeliklerinin üretimi için genel proses akım şeması Şekil 3.11 de gösterilmiştir. Çelik üreticileri, bu çelikleri entegre edilmiş tesislerde üretmektedirler [97]. Proses, yüksek fırında pik demirin üretiminden sonra birinci olarak desülfirizasyonun devamında konvertör tipi fırınlarda rafinerizasyonu, pota karıştırmayı, vakum altında gaz gidermeyi ve sonunda sürekli dökümü içerir. Sıvı metal, torpidolar vasıtasıyla desülfirizasyon tesislerine gelir ve işleme tabi tutulur.

İşlem sırasında magnezyum ve kalsiyum içeren karpit ilave edilir ve kimyasal kompozisyon homojenleştirilir ve sülfür miktarı % 0,01'den daha az seviyelere düşürülür.



Şekil 3.11 IF çeliklerinin üretim akım şeması [97]

Desülfürizasyon işleminden geçen sıvı metal 250-350 tonluk BOF'lar içerisinde rafine edilir. Üstten üfleli BOF'larda oksijen, su soğutmalı bir lans içerisine üstten üflenir. Alttan üfleli Q-BOF fırınlarında oksijen birçok tüylerden geçerek fırının altından üflenir ve üfleme sırasında banyoda bir hareketlilik görülür. Bu iki prosesin arasında bir ara proses vardır. Bu ara proses farklı olarak, alttan üfleli tiplerde kullanılan gaz ve gaz akış oranıdır. Sıvı çeliğin etkin bir biçimde karbonsuzlaştırılması IF çelikleri için en önemli etmenlerden birisidir. Çünkü, çeliğin karbon içeriği en son ürünün özelliklerini ve üretim maliyetini etkilemektedir.

Çelik üretimindeki rafınasyon işlemi sonrasındaki karbon içeriğinin en alt sınırı konvertördeki oksijen üfleme uygulamasına bağlıdır. Sıvı çelikteki karbon içeriği % 0,05'ten daha az olduğu zaman oksijen içeriği daha hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu yüzden konvertördeki karbon içeriğinin en alt limiti ekonomik açıdan göz önünde bulundurulmalıdır. Sınırlar üstten üfleme durumunda % 0,02-0,03 ve alttan üfleme durumunda % 0,010-0,015 olarak göz önüne alınmaktadır. Üstten üfleme durumunda % 0,02-0,03 gibi karbon değerleri sıvı çelikteki ve ürün kayıplarına yol açan cüruftaki oksijen içeriğinde belirgin artışlara neden olurken, konvertörün refrakter astarlarında da aşınmalara yol açmaktadır. Konvertörde karbon değerini belirli bir kritik değere indirmek IF çeliklerinin üretiminde avantajlara yol açmaktadır.

Vakumla gaz gidericilerin kapasitelerindeki belirgin artıştan dolayı şu anki eğilim karbonsuzlaştırma işleminin konvertörden ziyade vakumla gaz gidericilerde gerçekleştirilmesi yönündedir. Bu şekilde konvertördeki işlemler Al ile

durgunlaştırma işlemindeki benzer koşullarda gerçekleştirilmektedir. Son yıllarda geliştirilen birleşik üfleme prosesi ile IF çeliklerinin üretimi daha da geliştirilmiştir. Örneğin Dofasco Steel'de IF çeliklerinin üretimi aşamasında üflemenin % 70'i üstten yapılırken % 30'u alttan yapılmaktadır. Bu şekilde demirin aşın ölçüde oksitlenmesinin önüne geçilerek düşük karbon ve azot seviyelerine inilebilmektedir. Bu uygulamada karbon için % 0,030 değeri hedeflenirken azotta 14 ppm seviyelerine ulaşılabilir [83].

3.3 IF Çeliklerin Vakum Prosesi

3.3.1 Vakumda gaz giderme

Rafinasyon işlemi sonrasında potaya alınan çelikteki oksijen seviyesi vakumda gaz gidericiye girmeden önce haddehane tufalı ya da Al ilaveleri ile hedef olarak belirlenen 700 ppm seviyesine ayarlanır. Bu vakumdaki gaz giderme işlemi sırasında etkin bir karbonsuzlaşma sağlamaktadır. Vakumda gaz giderme alttan Ar gazı ile karıştırma yapılarak 0,5 torr vakumda 20-22 dakika sürmektedir. Bu uygulama sonucunda karbon seviyesi 250 ppm'den 15-20 ppm'e düşmektedir. Çeliğin vakum altında gaz giderme işlemi, IF çelikleri için gerekli çok düşük karbon seviyelerini (< % 0,005) elde etmek için gereklidir. Kullanılan bu gaz gidericiler sirkülasyon tipi gaz gidericilerdir. Vakum prosesi, sıvı çelik banyosunun geniş bir reaksiyon yüzeyi ile güçlü bir şekilde karıştırılması, sıvı çeliğin potadan vakum kazanına ve tekrar potaya şeklinde devir daimi sırasında, içerisinde çözünmüş gazların alınması ve düşük basınç altında $C+O \rightarrow CO$ reaksiyonunun gerçekleşmesi sonucu karbon gideriminin (dekarburizasyon) sağlanmasıdır. Kazan altında snorkel adı verilen refrakter örülü iki adet tüp ile donanmıştır. Kazan altına gelen pota snorkellerin çeliğin içerisine belli bir seviyeye kadar batacağı şekilde yukarıya kaldırılır. Vakum kazanı kendisine bağlı olan güçlü bir buhar enjektörü tarafından emilir. Vakum kazanı içindeki basınç düşürüldükçe, çelik snorkellerin içine doğru yükselir. Çeliğin içinde çözünmüş halde bulunan istenmeyen gazlar (hidrojen, azot, oksijen) vakum altında moleküler hale geçerler ve vakum pompalama sistemi vasıtasıyla çelikten alınırlar. Bu sistemin amacı karbonun indirgenmesi için gerekli oksijeni sağlamak ve çeliğin devir daimi sırasında oluşacak ısı kayıplarını en düşük seviyeye indirmektir [100].

3.3.2 RD-KTB prosesi

Oksijenin vakum altında üflenmesidir. KTB tekrar gaz giderme içindir. RD prosesi (Resirculation Degassing) vakum altında gaz giderme proseslerinde ikincil metalürji işlemine daha uygundur. Bu proseste eriyiği ısıtıl işlem bölümünde düşük basınç altında tutarak açığa çıkarmaktır. Bu prosesin metalurjik görevi, proses gereği istenmeyen elementlerin sıvı çelik içinde eriterek gaz fazına geçirmektir. Bu prosesin endüstrideki uygulamalarında ekstra düşük karbonlu çelik cinsleri üretiminde ve genellikle 15 ppm'den düşük cinslerde kullanılır.

3.3.3 Vakum işleminde karbon kontrolü

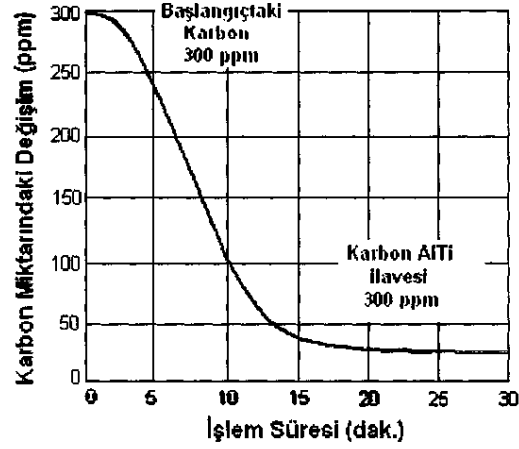
Kullanılan gaz giderici tiplerinde mutlaka, aşağıdaki reaksiyon yoluyla dekarbürizasyon meydana gelir. ($C+O=CO$) CO gazının uzaklaştırılması yoluyla, CO kısmi basıncının azaldığı yerlerde bu reaksiyon görülmektedir. Sonra reaksiyon sağa doğru gider ve dekarbürizasyon ilerler, dekarbürizasyon istenilen C miktarı elde edilinceye kadar devam eder.

Bu sürede oksitleyici alaşım ilavesiyle sıvı çelik öldürülür. Böylece karbon miktarı belirlenir. Pratikte C miktarı, gaz gidericinin matematiksel modellerinden ya da bazı durumlarda erimiş oksijen aktivitesinin ölçümlerinden hesaplanır. Gaz giderme devir zamanı, vakum işlemine gelmekte olan çeliğin karbon miktarına ve gaz giderme oranına bağlı olmaktadır [100].

Nippon Steel'de vakum işlemi ile 100-200 ppm karbon miktarından 10-15 dakikalık bir dekarbürizasyon işlemi ile 20 ppm altında karbon miktarı, 250-350 ppm karbon miktarından 20 dakikalık bir dekarbürizasyon işlemiyle 20 ppm altında karbon miktarı, sirkülasyon oranının ve argon akış hızının optimizasyon işlemiyle sağlanmıştır.

Geleneksel yöntemlerde, 40 dakika olan bu zaman yaklaşık 25 dakika azalmıştır. Bunun sonucunda IF çeliklerinde ardarda 30'dan fazla döküm yapabilme imkanı sağlanmıştır. Şekil 3.12 de işlem zamanına bağlı olarak karbon miktarının değişimi gösterilmiştir. Elde edilen sıvı çeliğin ihtiyaç duyulan alaşım elementleri azot ve karbonun en son miktarının belirlenmesinden sonra potaya ilave edilir.

Karıştırma işlemine devam edilerek sıvı çeliğin homojenizasyonu sağlanır.



Şekil 3.12 Ti ile stabilize edilmiş ultra-düşük karbonlu çeliklerin dekarburizasyonu sırasında karbon miktarındaki değişim [100]

3.3.4 RD-KTB proseslerinin avantajları

- Minimum oksijenle sıvı çelik içinde efektif karbon giderme (büyük talepler hariç).
- Büyük taleplerde CO'nin CO₂ 'e dönüşümünde radyasyon yoluyla oluşan ısı kayıpları azalmaktadır.
- Eriğin kimyasal ısıtılması mümkündür [98].

3.3.5 Sürekli döküm

Sürekli döküm tesislerinde potadan tandişe döküm öncesinde azot kapmasını engellemek amacıyla tandiş argon ile yıkanır, çeliğin potadan tandişe transferi yine azot kapmasını engellemek amacıyla koruyucu tüpler içerisinden yapılır. Sürekli döküm sırasında karbon kapmayı engellemek için % 3 karbonlu kalıp tozu kullanılmaktadır.

3.3.6 Slab ısıtma

Sürekli döküm tesislerinde 250 mm kalınlığındaki kütük şekline dökülen çelik, oda sıcaklığına soğutulup yüzey kontrolleri yapıldıktan sonra sıcak haddeleme için slab ısıtma fırınlarında 1240 °C'ye ısıtılmaktadırlar.

3.3.7 Sıcak haddeleme

Kaba haddeleme 4'lü tip tersinir haddelerde 5-7 pasoda gerçekleştirilmektedir. Malzemenin kaba haddeden son çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak 1150 °C'dir. Kaba haddeleme sonrasında 32 mm kalınlığına inmiş şerit ön malzemesinin istenilen son kalınlığa indirilmesi 7 standlı şerit haddede gerçekleştirilmektedir. Burada hedeflenen 910 °C'lik son hadde çıkış sıcaklığıyla haddelemenin kararlılığı korunurken çelik şeritte de homojen bir içyapının oluşması sağlanmaktadır. Haddeleme işlemi sonrasında belirlenen 730 °C'lik bobin sarma sıcaklığı ile soğuk haddeleme ve tavlama öncesi karbonun tümüyle çökmesi arzu edilmektedir. Buradaki karbon çökmesi çözeltide kalan karbonun en aza indirilmesi ve oluşan karbürlerin boyutlarının en büyük şekle getirilmesiyle tavlama sonrasında istenilen "r" değerlerine ulaşması arzu edilmektedir [101].

3.3.8 Asitleme

Sıcak haddeleme sonrasında IF bobinleri üzerindeki tufal olarak adlandırılan oksit tabakasının uzaklaştırılması amacıyla şerit malzemeler, HCl asit çözeltisi içerisinde geçirilirler.

3.3.9 Soğuk haddeleme ve sürekli tavlama

Soğuk haddeleme (22 °C) asitleme işleminden geçen bobinler 5'li tip bir tandem hattında % 60-80 oranında ezilirler. Soğuk haddelenmiş çok sert durumdaki IF malzemesi ideal olarak sürekli tavlama hatlarında tavlanamaktadır.

İyi bir doku oluşumu için uygun bir AlN çökmesi yaratan yığın tavlama Al ile durgunlaştırılmış derin çekme sacı için idealken Ti ve Nb ile kararlı şekle sokulmuş IF çelikleri sürekli tavlama hatları için çok uygundur. IF çeliklerinin tavlama sonrası iç yapılarındaki çok düşük ara yer içeriği sürekli tavlama sonrasında yapay yaşlandırma ünitesini gereksiz kılar.

Daha yüksek karbonlu çeliklerde sürekli tavlama sonrasında yapay yaşlandırma karbürleri çökeltirerek Lüders bantlarının oluşumuna ve sünekliğin azalmasına yol açan yaşlanma eğilimini azaltır.

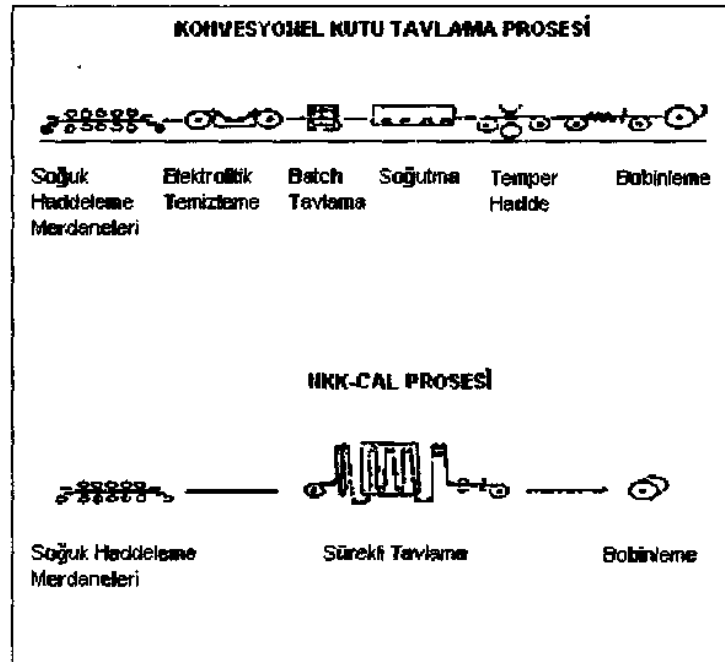
IF çeliklerindeki Ti ve Nb gibi elementler soğuk haddelenmiş sacın yeniden kristalleşme hızını ve tavlama sıcaklığını 700 °C civarına düşürür. Bununla beraber IF çeliklerindeki ferritin kararlı olduğu sıcaklık aralığının artması tek ferrit fazından oluşan

alanda çok daha yüksek sıcaklıklarda tavlamanın olası kılmasıdır. Bu nedenle 800-850 °C gibi sıcaklıklar sürekli tavlama hatlarında kullanılan tipik sıcaklıklardır [101].

3.3.10 NKK-CAL prosesinin prensipleri

Otomobil parçalarında elektrikli ev aletlerinde ve beyaz eşyada kullanılan ekstra derin çekme kalite çelik sacların üretimi birçok basamaktan oluşmaktadır. Ekstra derin çekme kalitesine sahip çeliklerin üretiminde kullanılan bu proses, dünyadaki birçok çelik üreticisinin ilgisini çekmiştir. IF çeliklerinin üretim prosesi olan NKK-CAL Prosesinin özellikleri özet olarak şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Bu proses, sürekli tavlama hattında ekstra derin çekme kaliteli sacların üretimini imkanı hale getirir.
- 2) Soğuk haddeleme de arka arkaya gelen beş proses, bir proses altında birleştirilmiştir. Soğuk haddelemeden bitiş hattına kadar olan süre, on günden on dakikaya düşürülmüştür Şekil 3.13 de NKK-CAL prosesi gösterilmektedir



Şekil 3.13 Konvansiyonel kutu tavlama prosesi ile NKK-CAL prosesinin karşılaştırılması [86]

Birçok nedenden dolayı bu saclar; preslenmeye, sarılmaya ve bükülmeye maruz kaldığı için süneklikleri ve toklukları iyi olmak zorundadır. Çeliğin şekillendirilebilirliğinin iyi olması aşağıdaki koşullara bağlıdır.

- a) Çeliğin kimyasal bileşimini ayarlamak ve empürite miktarını azaltmak (N, S gibi).
- b) Ferrit tanelerinin büyüklüğünü belli ölçülerde artırmak.
- c) Ferrit içinde çözülmüş karbon miktarını azaltarak çeliğin sünek olmasını sağlamak.
- d) Ferrit yapısındaki metalik olmayan inklüzyonları önlemek.

Yukarıdaki a, b, c, d şıkları konvansiyonel sürekli tavlama prosesinin içindeki kimyasal bileşime, sıcak haddeme koşullarına göre değişmektedir [86].

3.4 Sıcak ve Soğuk Haddelenmiş IF Çeliklerinin Özellikleri ve Uygulamaları

IF çelikleri özel derin çekilebilir çelikler olarak çok şiddetli şekillendirmelere cevap verebilecek şekilde kullanılmaktadır. Sürekli tavlama metodu ile üretilen IF çeliklerinin geçen birkaç yıl içerisinde bu yöntemle üretimi artmaktadır. IF çelikleri, mükemmel soğuk şekillendirilebilirliğinin yanı sıra yaşlandırmaya gereksinim duyulan yerlerde de kullanılmaktadır. Ayrıca bu çelikler sıcak daldırma (Hot-Dip) metodu ile galvanizleme hatlarında derin çekilebilir galvanizlenmiş çeliklerin üretimine imkan sağlamıştır [85].

3.4.1 Sıcak haddeme özellikleri

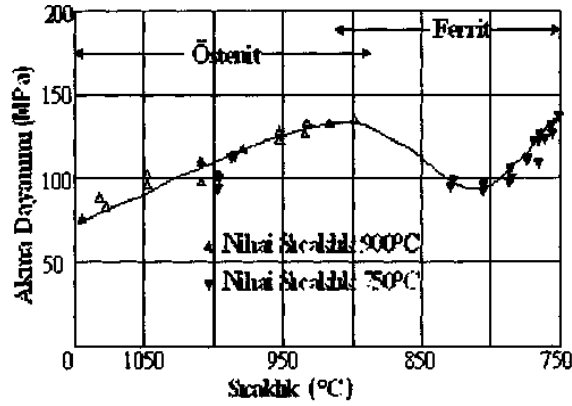
IF çelikleri modern sürekli tesislerinde döküldükten sonra 200-250 mm kalınlıkta slablar olarak üretilirler. Yüzey kalitesi o kadar iyidir ki, genellikle alevle yüzey skarfi gerektirmez.

Slablar itici tip fırınlar içerisine 600 °C ve altındaki sıcaklıklarda şarj edilir ve 1250 °C sıcaklığa ısıtılır. Daha sonra slablar ortalama 45 mm'ye ve buradan da 7 stantlı sürekli haddeme proseslerinde istenilen kalınlıklara, Ar₃ sıcaklığının altında haddelenmektedirler.

Soğutma sıcaklığı 640-690 °C arasında yer almaktadır. Bu sıcaklıklar bu sınıftaki malzemelerin üretimine bağlı olarak değişmektedir. Sıcak deformasyon sırasında ortaya çıkan gerilme sıcaklığın azalmasıyla artar.

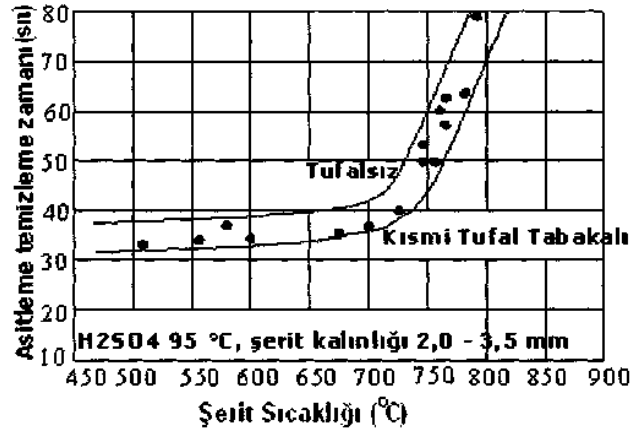
Bunun seviyesi yumuşak alaşımsız çeliklerin seviyesiyle karşılaştırılabilir. Ortaya çıkan gerilme faz dönüşümü sırasında deformasyon sıcaklığı daha da azaldıkça azalır.

Şekil 3.14 de bu durum gösterilmektedir.



Şekil 3.14 Sıcak deformasyon sırasında ortaya çıkan gerilimin, sıcaklığın azalmasıyla artması [85]

Soğuk haddelme özellikleri sıcak haddelenmiş şeritlerin asitle temizlenmesi işlemi sülfürik asitle (H_2SO_4) temizleme hatlarında yapılır. Tufal tabakasını temizlemek için gerekli olan asitle temizleme zamanı, sıcak şerit sıcaklığına bağlı olarak Şekil 3.15 de incelenmiştir. Yüksek soğutma sıcaklıkları özellikle 700 °C'nin altında temizleme verimini yarıya azaltmaktadır.



Şekil 3.15 Tufal tabakasını temizlemek için gerekli olan asitle temizleme zamanının, sıcak şerit sıcaklığına bağlı olarak incelenmesi [85]

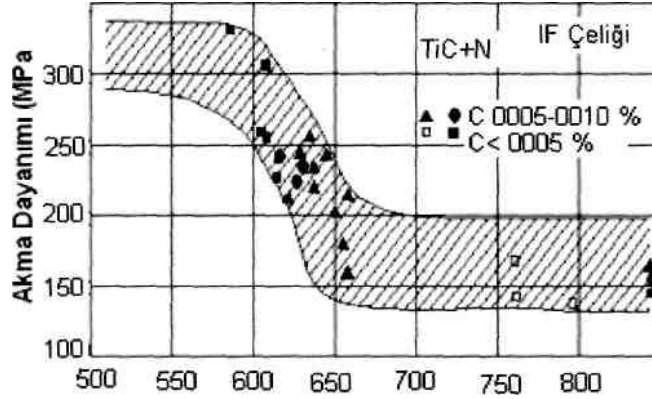
Böylece ekonomik sebepler kaçınılmaz olacaktır. Şeritler yumuşak durumdan yüksek derecede ezme ile tandem haddede soğuk olarak haddelenmektedir. Soğuk ezme oranlarının derecesi istenilen kalınlığa bağlı olarak % 70-82 arasında değişir. Soğuk haddelme sonrası yeniden kristalleşme tavlama yapılır. Sürekli tavlama hatlarında yapılan bu işlem 690-750 °C sıcaklıkları arasında gerçekleştirilir. Temper haddelme

soğuk sac yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak gerçekleşebileceği düşük bir derecede uygulanmaktadır.

3.4.2 IF Çelik Ürünlerinin Özellikleri ve Uygulamaları

3.4.2.1 Sıcak ürün özellikleri

Sıcak haddelenmiş IF çeliklerinin mekanik özelliklerini özellikle haddeleme ve soğutma sıcaklığı etkilemektedir. Normal olarak haddeleme sıcaklığı, östenit alanı içinde seçildiği zaman haddeleme sırasında ara yer atomları IF çeliği içerisinde tam yerleşmemiş durumdadır. Soğutma sıcaklığı seviyesinin, IF çeliği açısından uygun olduğu kesinleşmiştir. Uygun düşük akma dayanım değerleri sıcak haddehanelerde elde edilmektedir. Şekil 3.16 'da görüldüğü gibi 680 °C 'ye yakın soğutma sıcaklıkları altında IF çelikleri içerisinde C+N yerleşimi kesinleşmiştir.

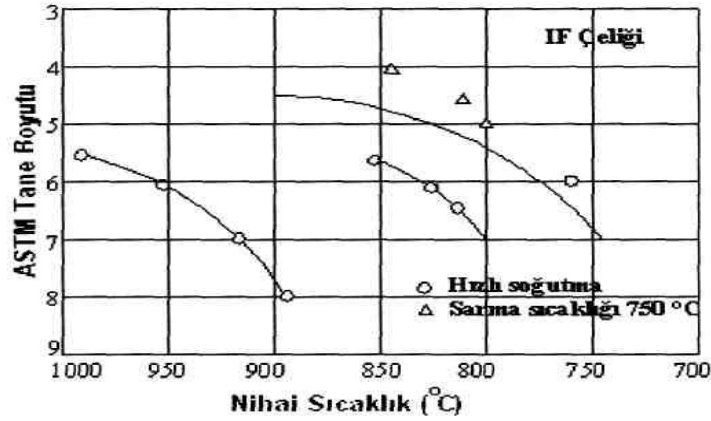


Şekil 3.16 680°C'ye yakın soğutma sıcaklıkları altında IF çelikleri içerisinde C+N yerleşimi [80]

630/680 °C civarı sıcaklık alanı içinde Ti/C+N oranları, karbürlerin çökmesini hızlandırabilir. $(Ti/C + N) > 12$ çelikler için, düşük akma dayanım değerleri belirtilmiştir.

Çok yüksek akma dayanımları, düşük soğutma sıcaklıkları durumunda görülmüştür ve muhtemelen karbon yaşlanmasının bir sonucu olduğu varsayılmaktadır. Sıcak şerit özellikleri üstünde haddeleme sıcaklığının tane boyutuna etkisi Şekil 3.17'de verilmiştir. Yüksek haddeleme sıcaklıkları, tane boyutunda aşırı tane büyümesine neden olur. Haddeleme sıcaklığı, östenit alanı içerisinde kalırsa daha fazla durumda küçük tanelerin üretilmesine neden olur.

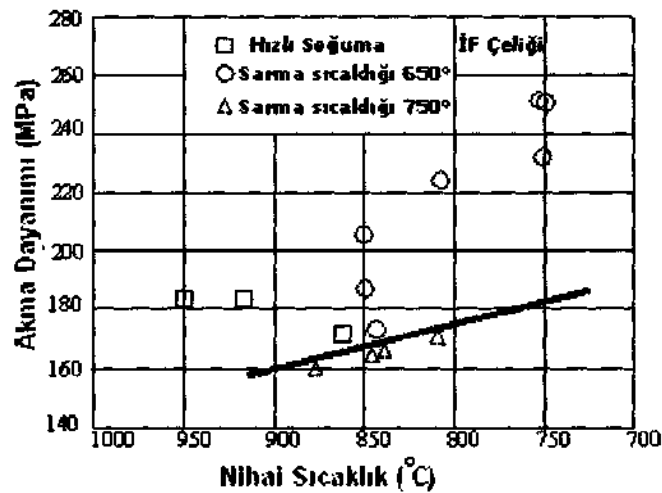
Bunun tane boyutuna etkisi, östenit ferrit dönüşümü sırasında görülmektedir.



Şekil 3.17 Haddeme sıcaklığının tane boyutuna etkisi [80]

Yüksek haddeme sıcaklıkları, tane boyutunda aşırı tane büyümesine neden olur. Haddeme sıcaklığı, östenit alanı içerisinde kalırsa daha fazla durumda küçük tanelerin üretilmesine neden olur. Bunun tane boyutuna etkisi, östenit ferrit dönüşümü sırasında görülmektedir.

Tane boyutunda, ferrit alanı içinde haddeme sona erdiği zaman, deformasyon yığılması etkilidir. Ayrıca ferrit alanı içerisinde düşük hadde sıcaklığı ve özellikle yüksek soğutma sıcaklıkları ile birleşince, Ti çökmesinin hızlanmasına sebep olabilir. Bu da iyi mekanik özellikleri beraberinde getirir. Şekil 3.18 'de haddeme sıcaklığı düşükçe, akma dayanımının arttığı görülmektedir.



Şekil 3.18 Haddeme Sıcaklığının Akma Dayanımına Etkisi [80].

3.4.2.2 Soğuk ürün özellikleri ve yeniden kristalleşme davranışı

IF çelikleri, farklı alaşım elementi ve miktarları kullanılarak üretilebilirler, soğuk haddeleme sonrası sürekli tavlama hatlarında tavlanırlar. Düşük akma dayanımları ve yüksek "r" değerleri Ti alaşımlı çeliklerle elde edilmektedir. Nb alaşımlı çelikler yüksek akma dayanımına sahiptirler [87].

3.5 Galvanizleme ve galvanizlenmiş saclar

Galvanizleme; demir veya çelik parçalar üstüne ince bir çinko tabakası kaplama işlemine verilen genel bir addır. Boya dışında, metallere en çok uygulanan koruyucu kaplamadır. Uygulama alanları arasında; yapılarda kullanılan çelik iskeletler, metal sac levhalar, civatalar, somunlar ve teller sayılabilir. Bitmiş ürünlerin büyük bir kısmında, korozyona karşı iyi bir direnç isteği, galvanize edilmiş sacların kullanımını daha da arttırmıştır. Çinko ile kaplama, çeliğin korozyona karşı dayanımını iki yolla gerçekleştirir: bariyer koruma, galvanik koruma. Bariyer korumada, çinko kaplama, çeliği korozyon ortamından ayırır, havayla temasını engeller.

Böylelikle korozyon ortamı çeliğe ulaşmadan önce ilk olarak kaplamanın kendisi aşınır. Galvanik koruma şu şekilde açıklanır. Ortam koşullarında, çinko, demire göre daha elektropozitifdir, yani başka bir elementle kimyasal tepkimeye girerek, kolayca değerlik elektronlarını yitirebilir. İçinde demir bulunan metalle elektriksel temasın sağlanması durumunda, çinko kaplama, atmosferdeki su ve oksijenin ilk hedefi olacaktır.

Çinko kaplama üretiminde kullanılan tipik metotlar, sıcak daldırma yöntemiyle galvanizleme, elektroliz ile kaplama, püskürtme veya boyama ile kaplamadır

3.5.1 Sıcak daldırma yöntemiyle galvanizleme

Sıcak daldırma yöntemiyle galvanizleme, basit anlamda kompozisyonu ve tasarımı uygun çelik malzemelerin uygun temizleme işleminden geçirildikten sonra, eriyik halde bulunan çinko veya çinko alaşımı banyosuna daldırmak suretiyle yapılan bir kaplama yöntemidir [102].

3.5.2 Sıcak daldırmayla galvanizlemede proses aşamaları

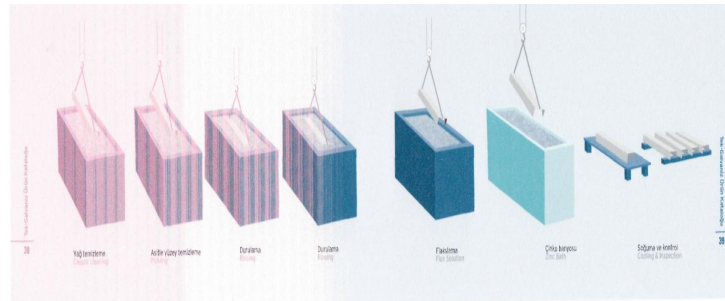
Daldırma işlemi gerçekleştirilmeden önce, bu işlemin başarılı bir şekilde yapılabilmesi için en uygun askılama şekli belirlenir. Daha sonra ürünler sırasıyla alkali banyoya daldırılır, hidroklorik veya sülfirik asitte üzerindeki pas temizleninceye kadar

bekletilir ve daha sonra su banyosuna daldırılarak durulama işlemi gerçekleştirilir [103]. Durulanan ürünler, ergimiş çinkonun ürün yüzeyine yapışması için 50 – 70 °C sıcaklıkta %30 konsantrasyonda flaks banyosuna daldırılır. Yapılan bu flaks banyosu şu ana fonksiyonlara sahiptir:

- Çelik ve çinko bu işlem sayesinde yüzeyler temizlendiği için reaksiyona girebilir
- Islak olarak daldırma yapıldığı zaman sıçrama tehlikesi bu işlem vasıtasıyla azaltılır
- Ergimiş çelik yüzeyindeki oksidasyon azaltılmış ve böylelikle kül oluşum tehlikesi de önlenmiştir.

Flaks banyosu, amonyum klorid, yüksek alüminyum içerikli sodyum alüminyum florid veya çinko amonyum kloridden meydana gelmektedir. Flaks örtüsü banyo üzerinde serbest bir şekilde akmalı ve malzeme daldırılır daldırılmaz temas kurup, kalabilmelidir. Flaks banyosunun aktivitesi, amonyum klorid içeriğine bağlıdır ve zamanla yüksek ergime noktasına sahip çinko bileşenlerinin oluşmasıyla daha akışkan olmaktadır. Ancak, flaksın akışkanlığı periodik olarak amonyum klorid ilave edilmek suretiyle ayarlanabilmektedir. Yüzeyi temizlenmiş ve flakslanmış ürünler 445 ve 455 °C sıcaklıkta ergimiş çinko banyosuna daldırılır ve banyoda iş parçasının kalınlığına bağlı olarak 3-6 dakika civarında bekletilir. Daldırma zamanı, ara yerdeki demir-çinkoyu içeren kaplamanın kalınlığını kontrol edebilmek için değiştirilebilmektedir. Çinko öz madde ile reaksiyona girmeye devam ettiği ve kaplamanın özelliklerini zararlı olarak etkilediği için iyi bir soğutma kontrolü gereklidir [102].

Şekil 3.19 da yukarıda bahsedilmiş bulunan aşamalar gösterilmektedir.



Şekil 3.19 Sıcak Daldırma ile galvanizlemede gerçekleştirilen işlem aşamaları [104].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, karbon oranları aynı olan biri sıcak daldırmayla galvanize edilmiş ultra düşük karbonlu bir sac malzemeyle, diğeri arayer atomsuz (IF, interstitial free) ve galvanizsiz bir sac malzemenin şekillendirilebilirlikleri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla çalışmada her iki malzeme için sırasıyla tek eksenli çekme deneyi, anizotropi deneyi, Hecker'in önermiş olduğu düzlem dışı (out-of-plane) gerdirme deneylerinden yararlanılmış ve malzemelerin şekillendirme sınır diyagramları elde edilerek, şekillendirme kabiliyetleri incelenmiştir.

4.1 Deney Malzemeleri

Çalışmada kullanılan galvanizli ve IF saclarının ERDEMİR kalite numaraları sırasıyla 1313 ve 7114 (DC 04)' dür. Çalışma için her iki malzemeden de 1200 x 2400 mm boyutlarında, toplam 10 adet plaka halinde sac alınmıştır (5 adet 1313, 5 adet 7114). İlgili sac malzemeler Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Erdemir 1313 (galvanizli)



Şekil 4.2 Erdemir 7114 (galvanizsiz)

Burada sac kalınlığının şekillendirme sınır diyagramları üzerindeki etkisini elimine edebilmek amacıyla, her iki malzemenin de kalınlığı aynı alınmıştır (1,2 mm). Malzemelerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 4.1 de toplu olarak verilmiştir.

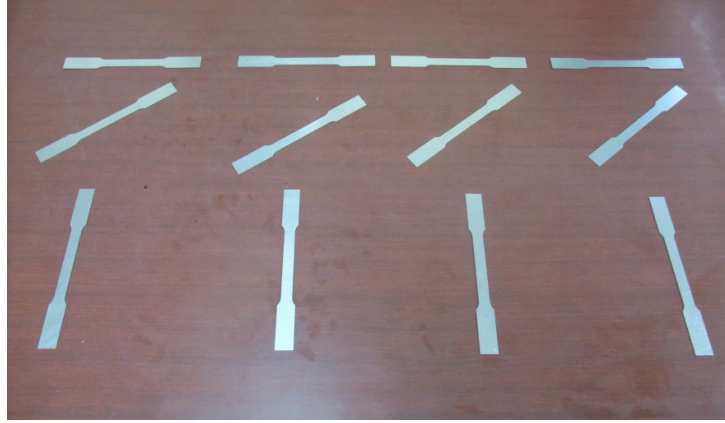
Kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonları, üretici firmanın verdiği bilgilere ek olarak, ayrıca spektrometre altında incelenmiştir. Bunun için her iki sac malzeme de kibrit kutusu büyüklüğünde kesilerek hazırlanmış ve galvanizli sac malzemeye ait numunenin yüzeyinden taşlama ile galvaniz kaldırılarak spektrometrede incelenmiştir. Çizelgede verilen değerler yapılan ölçümler sonucunda elde edilen ortalama değerlerdir.

Çizelge 4.1 İki malzemenin kimyasal kompozisyonları (% ağırlık olarak)

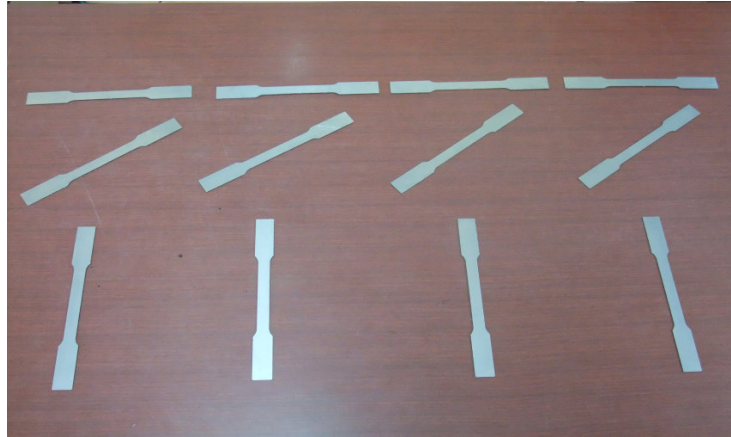
Element	1313	7114 (IF)
Karbon	0,00220	0,00200
Fosfor	0,00890	0,01200
Titanyum	0,05400	0,07000
Niobyum	0,02000	0,00770
Kobalt	0,00680	0,00400
Çinko	0,017	0,0019
Nikel	0,02300	0,00760
Azot	0,004	0,0099
Mangan	0,15800	0,15200
Alüminyum	0,05800	0,04600
Demir	Kalan	Kalan

4.2 Tek Eksenli Çekme Deneyleri

Sac malzemelerin mekanik özelliklerini farklı doğrultularda belirleyebilmek için çekme numuneleri, her iki malzeme için de haddeleme doğrultusu ile sırasıyla 0° , 45° ve 90° açı yapan doğrultularda sac plakalardan lazer kesim yöntemiyle kesilerek, ASTM E8M standardına göre hazırlanmıştır. Şekil 4.3 a ve b de iki malzeme için hazırlanmış çekme deney numuneleri gösterilmektedir.



a) ERD 1313 haddeleme yönüne 0° , 45° ve 90° hazırlanmış çekme deneyi numuneleri



b) ERD 7114 haddeleme yönüne 0° , 45° ve 90° hazırlanmış çekme deneyi numuneleri

Şekil 4.3 a ve b ERD 1313 ve ERD 7114 her üç haddeleme yönüne göre hazırlanmış çekme deneyi numuneleri

Şekil 4.4 de ASTM E8M standardına göre çekme deneyi numunelerinin boyutları teknik resim halinde gösterilmektedir [105].



Şekil 4.4 Çekme deneyi numunesi boyutları [105]

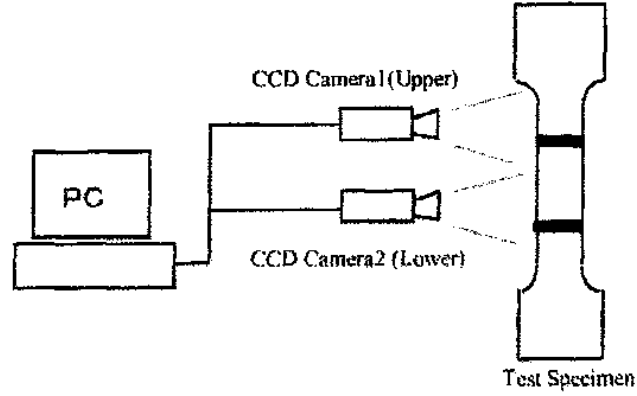
Tez çalışması kapsamında yapılan çekme deneyleri, şekil 4.5 de gösterilen 50 kN kapasiteli Shimadzu AG-IS çekme deney cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5 Shimadzu çekme deneyi cihazı (İTÜ Makine Fakültesi)

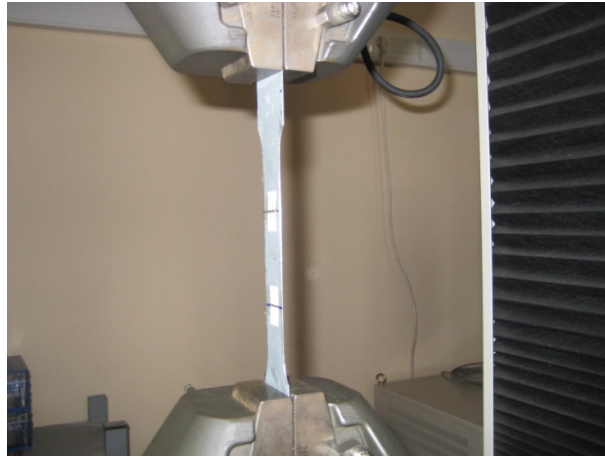
Cihazda bulunan iki adet CCD kamerayla, numunelerde meydana gelen deformasyon miktarları deney süresince izlenmekte ve bir ara program vasıtasıyla bilgisayara aktarılmaktadır.

Şekil 4.6 da çekme makinesinin çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir [106].



Şekil 4.6 Video tip ekstansometre ile ölçüm [106]

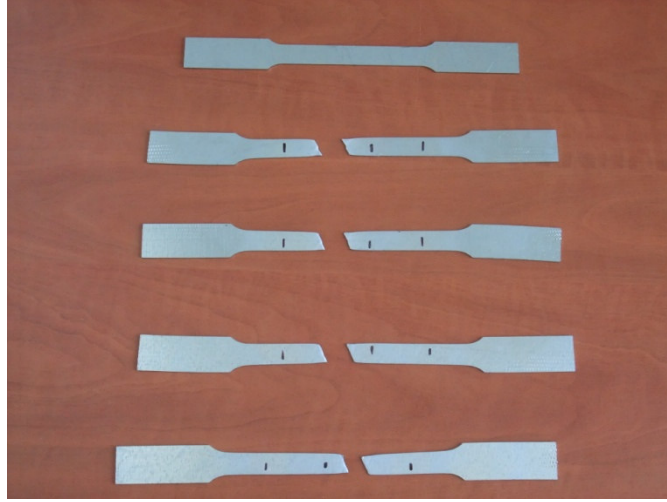
Kameraların numunelerde oluşan deformasyonları takip edebilmesi için, çekme numunelerinin ölçüm boyu üzerine referans çizgileri yapıştırılmakta ve numuneler makinenin iki çenesi arasına bağlanmaktadır. Şekil 4.7 deney numunesinin çekme cihazına bağlanmış halini göstermektedir.



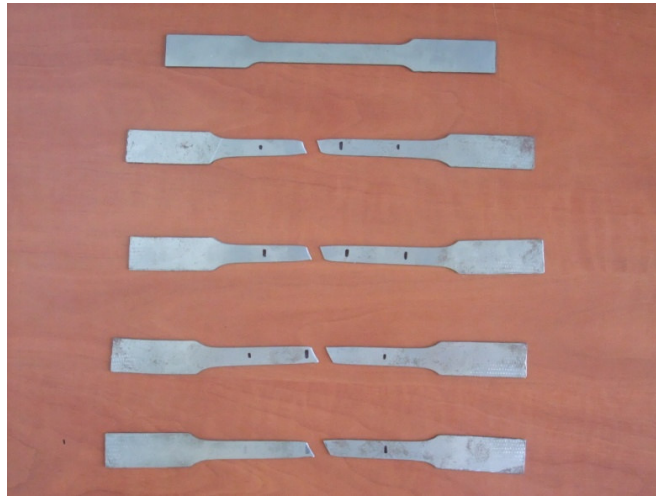
Şekil 4.7 Deney numunesinin bağlanmış görüntüsü

Çekme sırasında, çene hızı tüm numunelerde 5 mm/dak sabit hızda olacak şekilde uygulanmıştır. Her iki malzemede, üç haddeleme yönünün (0° , 45° ve 90°) her biri için deney dört kez tekrar edilmiş ve sonuçların ortalamaları alınmıştır.

Şekil 4.8 ve 4.9’da sırasıyla galvanizli ve IF malzemelerine ait deney sonrası kopan numuneler gösterilmektedir.



Şekil 4.8 ERD 1313 çekme deneyi sonrası kopan numuneler



Şekil 4.9 ERD 7114 çekme deneyi sonrası kopan numuneler

Çekme deneyi esnasında ölçülen çekme kuvveti F ve referans çizgilerinin yer değiştirme miktarı ($\Delta L=L-L_0$) eşitlik 4.1 ve 4.2’de yerine konularak, her iki malzemeye ait mühendislik gerilmesi ($\sigma_{müh}$), birim şekil değişimi ($\epsilon_{müh}$) elde edilmiş ve ilgili eğriler çizilmiştir.

Eşitlik 4.1 ve 4.2 malzemelerin mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim şekil değişimlerinin elde edebilmesi için kullanılmıştır.

$$\sigma_{müh} = F/A_0 \quad (4.1)$$

$$\epsilon_{müh} = \Delta L/L_0 \quad (4.2)$$

Burada A_0 malzemelerin başlangıç kesit alanı, ΔL anlık alınan deformasyon miktarı ve L_0 ise başlangıç ölçüsüdür. Yukarıdaki işlemler, her üç doğrultu için (0° , 45° ve 90°) de tekrar edilmiştir. Mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim şekil değişimi eğrilerinden yararlanarak malzemelere ait standart çekme özellikleri olan % 0.2 akma dayanımı (σ_{ak}), çekme dayanımı ($\sigma_{çek.}$), üniform ($\epsilon_{üni}$) ve toplam birim şekil değişimi (ϵ_{top}) değerleri elde edilmiştir.

Mühendislik gerilmesi ve birim şekil değişimi eğrilerinin elde edilmesinden sonra aşağıda verilen eşitlik 4.3 ve 4.4'den yararlanarak gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrilerine geçilmiştir.

$$\sigma_{ger} = \sigma_{müh} (1 + \epsilon_{müh}) \quad (4.3)$$

$$\epsilon_{ger} = \ln (1 + \epsilon_{müh}) \quad (4.4)$$

Malzemelerin akma dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki üniform plastik şekil değiştirme bölgesinde $\sigma = K\epsilon^n$ Holloman denklemine göre davrandıkları kabul edilmiş ve elde edilmiş olan gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değişimi değerlerinin üniform bölgede logaritmaları alınıp, en küçük kareler metodu ile lineer regresyon yapılarak logaritmik gerçek gerilme - logaritmik gerçek birim şekil değişim doğruları elde edilmiştir. Elde edilen doğru denklemlerinin eğimi ilgili malzemenin pekleşme üsteli değerini (n), doğrunun y koordinatıyla kesişimi de $\log K$ değerini vermektedir. Her bir deney için bu diyagramlar çizilerek, n ve K değerleri

hesaplanmıştır. Daha sonra, her üç haddeleme yönü için bulunan bu değerlerin ortalamaları alınmış ve sonuçlar bir tablo halinde toplu olarak verilmiştir.

Deney sırasında çekme cihazından verilerin nasıl alındığı belirtilecek olursa, cihaz 50 ms aralıklarla programa veri transferi yapıyor olup, anlık kuvveti N cinsinden, iki çene arası mesafeyi (stroke) ve ilk boya göre uzamayı mm cinsinden olmak üzere toplam 3 veri sütunu olarak aktarmaktadır. Bu veriler “.txt” uzantılı dosya olarak kaydedildikten sonra MS Excel programı kullanılarak yukarıda verilen bağıntılar vasıtası ile istenilen datalara dönüştürülmektedir. Çizelge 4.2’de bir deneye ait örnek veriler gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Cihazın transfer ettiği verilerden bir örnek

1- 1 Time	Force	Stroke	Ext.1
sec	N	mm	mm
0	-3,125	0	0
0,05	1,5625	0,002	0,0125
0,1	0	0,005	0,00625
0,15	-6,25	0,008	0,00625
0,2	-9,375	0,012	0,009375
0,25	-3,125	0,015	0,015625
0,3	0	0,019	0,015625
0,35	-6,25	0,022	0,015625
0,4	1,5625	0,025	0,003125
0,45	6,25	0,029	0,009375
0,5	0	0,032	0,0125
0,55	-1,5625	0,035	0,0125
0,6	14,0625	0,039	0,015625

Çekme cihazından transfer edilen verilerden öncelikle yukarıda belirtildiği gibi mühendislik gerilmesi-mühendislik birim şekil değişimine, daha sonra ise sırasıyla gerçek gerilme - gerçek birim şekil değişimi ve logaritmik gerçek gerilme-logaritmik gerçek birim şekil değişim değerlerine dönüştürülmüştür.

4.3 Anizotropi Deneyleri

Sac malzemenin haddeleme doğrultusundan etkilenme karakterini belirlemeye yarayan anizotropi deneyi, ASTM E517 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir [107]. Her iki malzeme için anizotropi numuneleri haddeleme doğrultusu ile 0°, 45° ve 90°'lik açılarda kesilerek ASTM E517 standardına uygun olarak hazırlanmıştır.

Shimadzu universal çekme cihazına bağlanan numuneler, ASTM E517 standardının öngördüğü şartlara uyarak, akma gerilmesi ile maksimum çekme gerilmesi arasındaki belirli bir gerilme değerine kadar çekilmiştir. Çekme hızı 5 mm/dak' da sabit tutulmuştur. Çekilen numuneler üzerinde ölçü boyu bölgesindeki kısa ve uzun kenarlardaki şekil değişimleri ölçülerek, 0°, 45° ve 90° için plastik şekil değiştirmelerin oranı yani plastik anizotropi değeri 'r' değerleri hesaplanmıştır. r değerleri denklem 4.5 deki bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 l_0}{w l}\right)} \quad (4.5)$$

Burada l_0 başlangıç ölçü boyu, l_1 ölçme anındaki ölçme boyu, W_0 başlangıç genişliği ve W_1 ise ölçme anındaki genişliktir. Hassas kalınlık ölçümü imkanı olmadığı için bu yöntemden yararlanılmıştır. Kısa ve uzun kenardaki şekil değişim ölçümleri anizotropi numunelerinin ölçüm boyu ve ölçüm genişliği üzerinde işaretlenmiş yerler arası kumpasla ölçülerek elde edilmiştir.

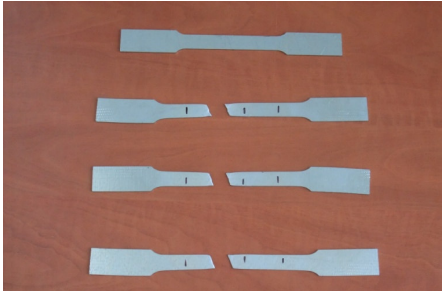
Yukarıda anlatılan işlem sırası tekrar edilerek her üç yönde r (plastik anizotropi) değeri elde edilmiştir. Normal anizotropi ($\bar{r}$) ve düzlemsel anizotropi (Δr) için denklem 4.6 ve 4.7 de verilen standart formüller kullanılmıştır.

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (4.6)$$

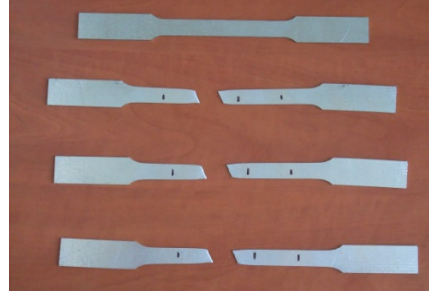
$$\Delta r = \frac{r_0 - 2r_{45} + r_{90}}{2} \quad (4.7)$$

4.4 Şekil Değiştirme Hızı Duyarlılık Üstelinin (m) Belirlenmesi

Şekil değiştirme hızı duyarlılık üstelinin elde edilmesinde, deney numunesi olarak haddeleme yönüne göre 0°, 45° ve 90° açılarda hazırlanmış çekme deneyi numunelerinden yararlanılmıştır. Burada her bir deney numunesi sırasıyla 5mm/dak ve 50 mm/dak çene hızlarında olmak üzere iki ayrı çekme testine tabi tutulmuştur. Her iki çene hızında da deney üç kez tekrar edilmiştir. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 de farklı hızlarda çekme testine tabi tutulup kopartılan iki malzemeye ait çekme numuneleri gösterilmektedir.

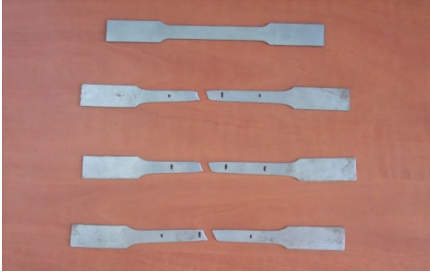


a) 5 mm/dak hızda kopan numuneler

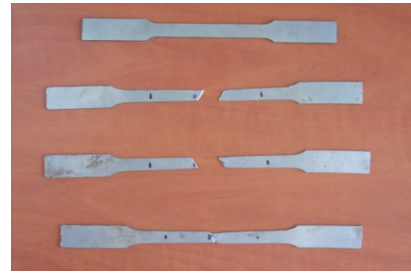


b) 50 mm/dak hızda kopan numuneler

Şekil 4.10 a ve b ERD 1313 5mm/dak ve 50 mm/dak çene hızlarında kopan çekme deneyi numuneleri



a) 5 mm/dak hızda kopan numuneler



b) 50 mm/dak hızda kopan numuneler

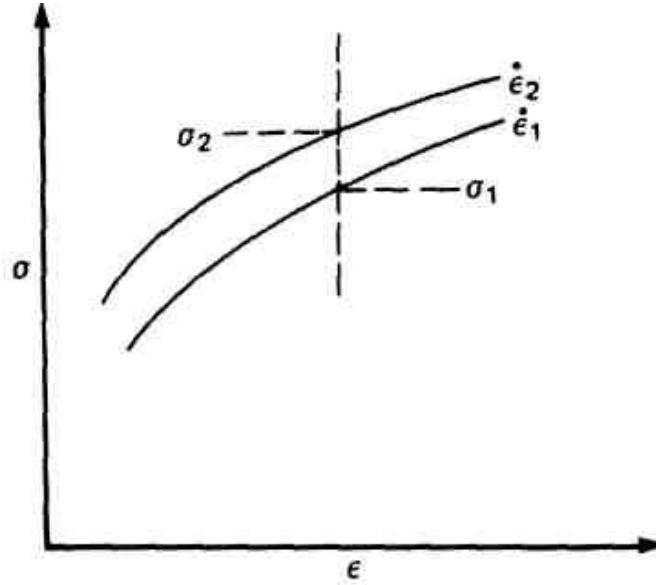
Şekil 4.11 a ve b ERD 7114 5mm/dak ve 50 mm/dak çene hızlarında kopan çekme deneyi numuneleri

Deneylerin tamamlanmasından sonra, bütün numunelerin 5 mm/dak ve 50 mm/dak hızlarındaki gerilme-birim şekil değişim eğrileri çizilerek iki hız değeri için, sabit bir

şekil değişimine karşılık gelen gerilmeler bulunmuş ve $m = \frac{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}{\log \dot{\epsilon}_2 - \log \dot{\epsilon}_1}$

denkleminde yerine konularak m değeri elde edilmiştir.

Şekil 4.12 de bu yöntem uygulanarak elde edilmiş çekme diyagramının bir örneği verilmektedir.



Şekil 4.12 Şekil değiştirme hızının akma gerilmesine etkisi

Yukarıda bahsedilen işlem sırası her iki malzemede üç farklı haddeleme doğrultusu için tekrar edilmiş olup, bulunan m değerlerinin ortalamaları alınarak sonuçlar tabloda gösterilmiştir.

4.5 Düzlem Dışı Germe Deneyi

Malzemelerin şekillendirilebilirliklerinin belirlenmesinde düzlem dışı (out-of-plane) gerdirme deneyinden yararlanılmıştır. Özellikle düzlem dışı germe deneyinin sonuçları endüstride karşılaşılan koşullara daha çok benzediği için çalışmada tercih edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında malzemelerin şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesine ek olarak, sürtünmenin şekillendirme üzerindeki etkisinin de incelenmek istenmesi düzlem dışı germe deneyinin kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Çünkü diğer test yöntemi olan düzlem içi (in-plane) testinde takım geometrisi ve sürtünme gibi değişkenler ihmal edilmektedir.

4.6 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada, deney numuneleri sac plakalardan lazer kesim yöntemi ile kesilerek hazırlanmıştır. Şekil 4.13’de numunelerin lazer makinesinde kesimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.13 Numunelerin lazer makinesinde kesimleri

Lazer kesim sonucu elde edilen numunelerin boyutsal doğruluğu yüksek olduğu gibi kesim yüzeyleri oldukça düzgün olup, yüzey kenarlarında çapaklanma görülmemiştir. Her ne kadar lazer kesimde malzemeye ısı girdisi olsa da, çalışmada kullanılan sac malzemelerin kalınlığı az olduğundan, oluşacak ısı etkisinin düşük olacağı ve malzeme özelliklerini etkilemeyeceği düşünülerek, lazer kesim yöntemi tercih edilmiştir. Ancak, kesilecek malzeme kalınlıkları yüksekse (>10 mm) ve ısı girdisi hiç istenmiyorsa o zaman su jeti ile kesim daha uygun olacaktır [108].

Deney numuneleri, düzlem dışı (out-of-plane) test yönteminin öngördüğü standart esas alınarak hazırlanmıştır [23]. Bu standarda göre; aynı boyda ancak değişen genişliklerde sac numuneler kullanılmaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan sac numunelerin boyları 200 mm olup, genişlikleri ise 25 mm den başlayarak sırasıyla 50, 75, 100, 125, 150, 175 ve 200 mm olacak şekilde belirlenmiştir.

Her iki malzemeye ait hazırlanmış deney numuneleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 de toplu olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.14 ERD 1313 deney numuneleri

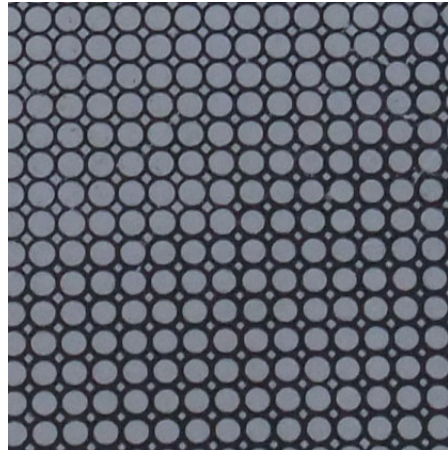


Şekil 4.15 ERD 7114 deney numuneleri

Şekillerden de görüldüğü gibi, 25 mm ile 150 mm arasındaki genişliklere sahip olan numuneler kum saatine benzer bir geometride olup, orta kısımları ovaldir [109]. Geriye kalan 175 ve 200 mm genişliğindeki numuneler ise sırasıyla dikdörtgen ve kare şeklindedir. Bu geometriler sayesinde tek eksenli deformasyon tipinden

başlayarak sırasıyla düzlem birim şekil değişimi ve iki eksenli deformasyon tipine kadar bütün deformasyonlar elde edilebilmektedir. Özellikle 25 mm genişliğindeki numunede oluşacak şekil değiştirme durumu, tek eksenli çekme deneyinde elde edilene çok benzemektedir. Ancak bu numuneler pot çemberinde sıklıkla yırtıldıkları için veri alabilmek oldukça zordur. Dar numunelerin deney sırasında pot çemberine yakın yerden yırtılmaması için, kalıp radyüsleri büyük tutulmalıdır [23-26]. Böylelikle deneyde pot çemberinde oluşabilecek hasarlara engel olunabildiği gibi, numune geometrileri çekme numunelerine benzetilerek daha doğru tek eksenli deformasyon şartları sağlanabilmektedir.

Deney numuneleri değişen genişliklerde kesilip hazırlandıktan sonra üzerleri daire grid ile işlenmiştir. Gridler yüzey üzerine serigrafi yöntemi ile markalanmıştır. Şekil 4.16 serigrafi ile yüzeyi daire grid işlenmiş deney numunesinin yakından görünüşünü göstermektedir.



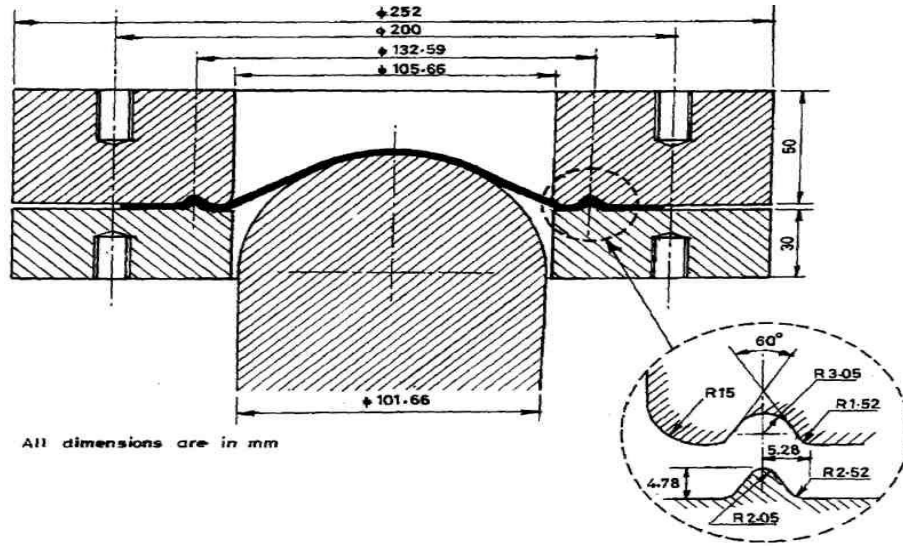
Şekil 4.16 Serigrafi ile daire grid işlenmiş deney numunesi

Burada yüzey üzerine işlenen daire gridlerin çapları 2,5 mm olup, çizgi kalınlığı ise 0,25 mm dir. Serigrafi ile markalama yapmadan önce, baskının sac yüzeyini iyi tutması için, numuneler üzerindeki üretimden kalan yağ tabakasının temizlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla numuneler yağ çözücü kimyasal karıştırılmış sıcak su ile yıkanmıştır. Serigrafinin diğer yöntemlere göre maliyetinin daha az olması, elde edilen gridlerin daha net ve keskin olup, yüksek hassasiyet, çözünürlük, kontrast içermelerinden ötürü çalışmada tercih edilmiştir. Serigrafide dikkat edilecek en önemli husus işlem esnasında mürekkebin silinmemesidir. Bunun için de mutlaka, markalanmış sac numuneler belirli bir sıcaklığa kadar fırınlanmalıdır. Aksi takdirde işlem esnasında silinmeler olur. Tez çalışmasında bu durum göz önüne alınmış ve

numuneler markalandıktan sonra 150 °C sıcaklığa ulaşınca kadar yarım saat süre ile fırınlanmıştır.

4.7 Deney Düzeneği

Malzemelerin şekillendirme işleminde düzlem dışı germe test yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 4.17 de verilmiştir.



Şekil 4.17 Düzlem dışı germe testinin şematik görüntüsü [19]

Deney düzeneği, Şekil 4.17 de gösterildiği gibi 100 mm çapında yarıküresel bir zımba, pot çemberi ve dişi kalıptan oluşmaktadır.

Süzdürme çubukları, pot çemberi ve dişi kalıp yüzeylerine çevresel olarak V şeklinde işlenmiştir. Malzeme kalıp boşluğuna doğru akarken bu çıkıntılarda bükülerek yön değiştirdiği için akışa karşı ters yönde bir frenleme kuvveti sağlanmaktadır. Bu sayede daha düşük pot çemberi kuvvetiyle malzeme sabitlenebilmektedir.

Tez çalışmasında malzemelerin şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesine ek olarak sürtünmenin şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisi de araştırıldığından düzlem dışı germe test yöntemi tercih edilmiştir. Bu nedenle çalışma kapsamında kullanılacak kalıplar ve zımba düzlem dışı test tekniğine uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Zımba yarıküresel olup, 100 mm çapındadır ve presin alt tablasına bağlanılacak şekilde tasarlanmıştır.

Şekil 4.18 de zımbanın fotoğrafı gösterilmektedir.



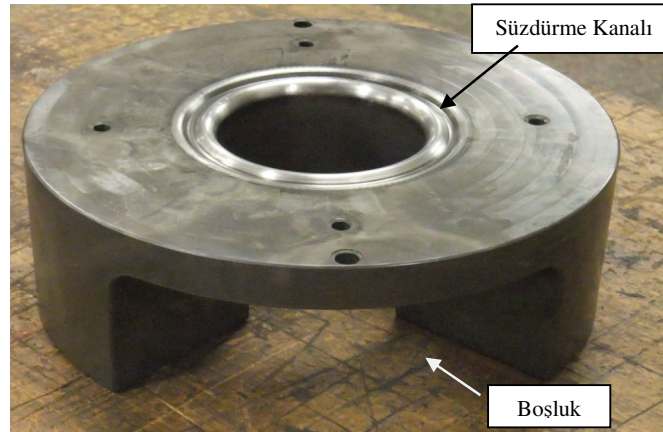
Şekil 4.18 Zımba

Pot çemberi 104 mm iç çapa sahiptir ve pot pimlerinin üzerine oturtulmuştur. Yüzeyine 132 mm çapında süzdürme çubuğu eklenmiştir. Pot çemberi, şekillendirme sırasında gelebilecek kuvvetleri karşılayabilmesi, eğilmemesi için altına destek plakası ilave edilmiştir. Şekil 4.19’da pot çemberinin fotoğrafı gösterilmektedir.



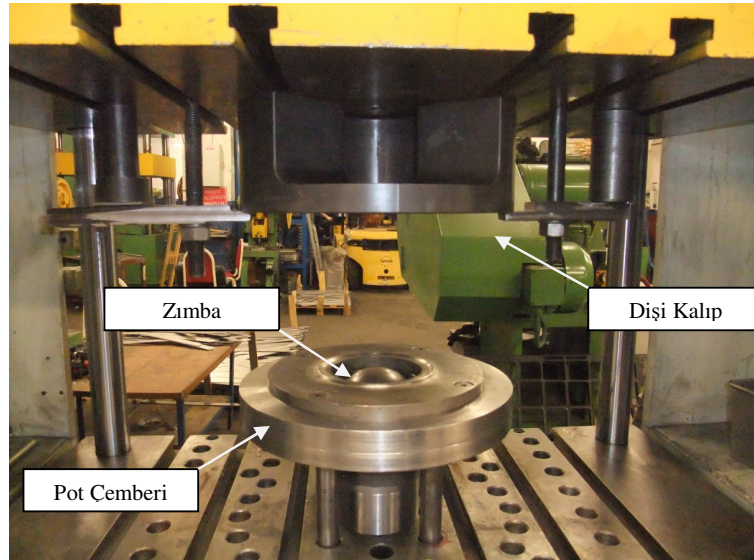
Şekil 4.19 Pot Çemberi

Çalışmada kullanılacak dişi kalıp ise dış çapı 298 mm, iç çapı 104 mm olup, yüksekliği ise 108 mm'dir. Pot çemberine karşılık olacak şekilde 132 mm çapında süzdürme kanalı kalıp yüzeylerine işlenmiştir. Ayrıca deney sırasında malzemedeki deformasyonu izleyebilmek için dişi kalıbın dörtte birlik bir kısmı boşaltılmıştır. Böylelikle kalıbın yükseltilmesine gerek kalmadığı gibi pres stroğundan da tam olarak yararlanılabilmektedir. Dişi kalıp hidrolik presin üst tablasına bağlanacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.20 de dişi kalıbın fotoğrafı gösterilmektedir.



Şekil 4.20 Dişi Kalıp

Şekil 4.21 de ise zımba, pot çemberi ve dişi kalıbın prese bağlanmış hali gösterilmektedir.



Şekil 4.21 Kalıplar ve pot çemberinin prese monte edilmiş resmi

Şekillendirme deneyleri Öztiryakiler firmasında bulunan 120 ton kapasiteli hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Silindirin maksimum hızı 50 mm/s ve presleme hızı ise 9 mm/s'dir. Presin alt ve üst plaka ebatları 900 x 500 mm ve bu plakalar arası maksimum açıklık 540 mm'dir. Hidrolik preste 11 KW gücünde elektrik motoru mevcuttur ve bu pres 250 bar maksimum hidrolik basıncına sahiptir. Ayrıca plakalara kalıpları bağlayabilmek için 6 adet T kanalı mevcuttur. Pres özellik olarak derin çekme, kesme, ütüleme tekniklerini gerçekleştirebilecek donanımlar ile teçhiz edilmiştir. Ayrıca presi kontrol edebilmek için özel kumanda merkezi mevcuttur. Üst silindir 250 mm kovan iç çapında, 220 mm piston kolu çapında ve 360 mm stroğundadır. Alt silindir ise 145 mm iç çapında, 110 mm piston kolu çapında ve 180 mm strokunda imal edilmiştir. Şekil 4.22 de hidrolik presin resmi gösterilmektedir.



Şekil 4.22 Hidrolik pres

4.8 Deneyin Yapılması

Kalıpların prese montaj işlemi tamamlandıktan sonra şekillendirme işlemlerine geçilmiştir. Burada deney numunesi öncelikli olarak pot çemberi üzerine yerleştirilir daha sonra presin üst tablasına aşağı doğru hareket verilerek dişi kalıbın numuneye temas ettirilmesi sağlanmış olur. Bu aşamada piston tarafından dişi kalıba uygulanan kuvvet ile deney numunesi iki kalıp arasında sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi sırasında sac malzeme pot çemberi ve dişi kalıp yüzeylerine işlenmiş olan süzdürme çubuklarının şeklini alır. Daha sonra presin üst tablası dişi kalıp ve pot çemberini

birlikte aşağı doğru hareket ettirerek zımbanın sacı kalıp boşluğuna doğru girmesi sağlanır ve saca yırtılma oluşuncaya kadar deneye devam edilir. Deneylerde tüm numuneler ortalama olarak 9 mm/s'lik bir ilerleme hızında deforme edilmiştir. Çalışmada 25, 50, 75, 100, 125, 150 ve 175 mm genişliğine sahip olan numunelerin her birinden 4 adet, 200 x 200'lük kare numunelerden ise 28 adet numune başarılı olarak şekillendirilmiş ve yüzeyler üzerinde şekil değiştirmiş dairelerden ölçüm alınarak malzemelerin şekillendirme sınır diyagramları elde edilmiştir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 de galvanizli (ERD 1313) ve IF (ERD 7114) malzemelerine ait deforme edilmiş deney numuneleri gösterilmektedir.



Şekil 4.23 Galvanizli (ERD 1313) deforme edilmiş deney numuneleri



Şekil 4.24 IF (ERD 7114) deforme edilmiş deney numuneleri

Deneyleerde, 25 ile 175 mm arasındaki genişliklere sahip olan numuneler kuru olarak 200 x 200'lük numuneler ise farklı yağlayıcılar kullanılarak deforme edilmiştir. Çalışmada iki eksenli şekil değiştirme bölgesinden mümkün olduğu kadar fazla veri toplayabilmek için kare numuneler farklı yağlayıcılarla deforme edilmiş olup, her bir yağlayıcıda deney 4 defa tekrarlanmıştır. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 da altı farklı yağlayıcıyla deforme edilmiş 200 x 200'lük galvanizli ve IF deney numuneleri gösterilmektedir.



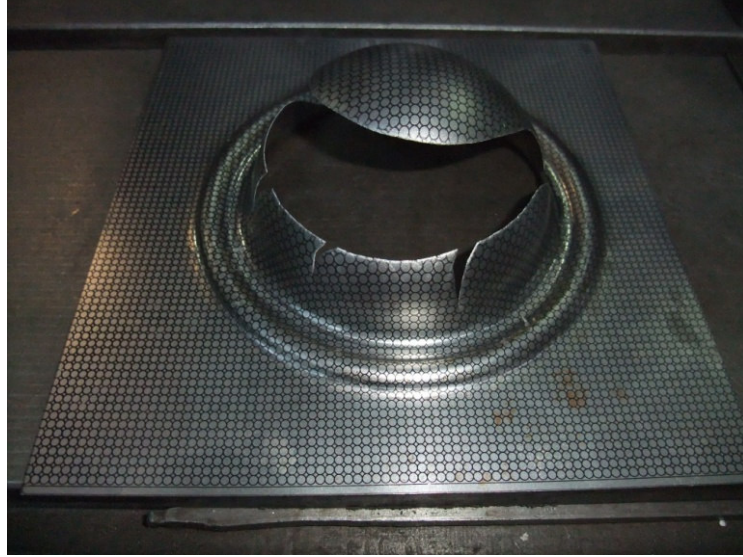
Şekil 4.25 Farklı yağlayıcılarla deforme edilmiş 200 x 200 galvanizli (ERD 1313) deney numuneleri



Şekil 4.26 Farklı yağlayıcılarla deforme edilmiş 200 x 200 IF (ERD 7114) deney numuneleri

Deneylerde polietilen, teflon, PVC film gibi katı yağlayıcılarla; silikon esaslı jel, silikon spray ve mineral yağ olmak üzere altı çeşit yağlayıcı kullanılmıştır. Kullanılan katı yağlayıcılardan PVC film 60 mikron, polietilen film 70 mikron, teflon film ise 130 mikron kalınlığındadır. Polietilen ve teflon filmler kendiliğinden yapışkanlı olup sac yüzeylerine yapıştırılarak uygulanırken, PVC film ise yapıştırılmadan uygulanmıştır.

Deneye öncelikli olarak 200 x 200'lük kare numunelerle başlanmıştır. Çalışmada sac yüzeylerinde istenilen yırtığın sağlanabilmesi için çok sayıda deney yapılmış ve bunun için farklı pot basınç değerleri uygulanmıştır. Ancak bazı durumlarda pot basıncının yüksek olmasından ötürü çekim başarıyla yapılamayıp, numuneler Şekil 4.27 de gösterildiği gibi erkenden yırtılmıştır. Yapılan ölçümlerde 200 kN'lık kuvvet uygulanmıştır.

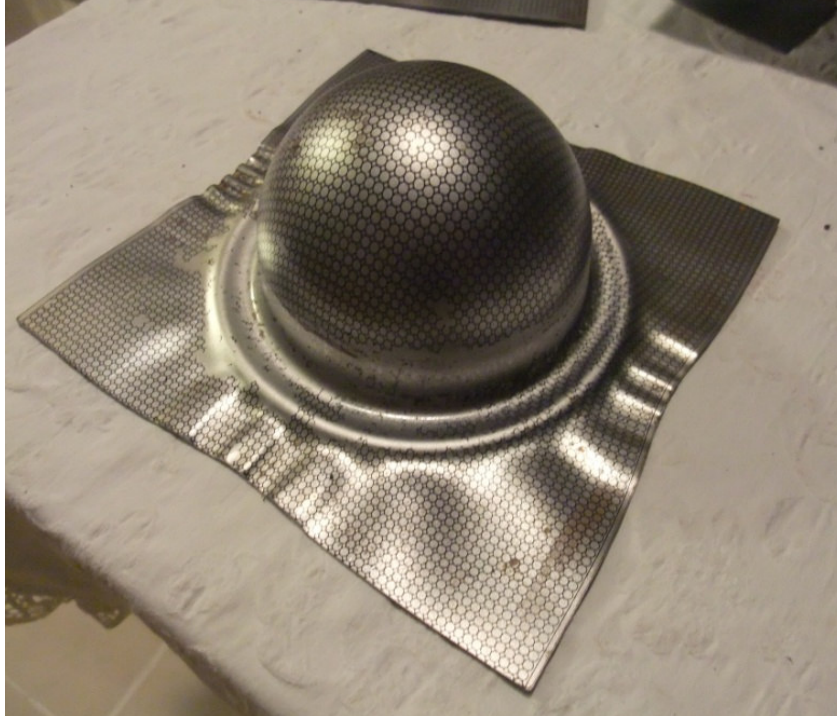


Şekil 4.27 Yüksek pot basıncı nedeniyle yarılan hatalı IF deney numunesi

Bunun üzerine numunelerin erkenden yırtılıp hasara uğramamaları için pot basıncı 70 kN değerine düşürülmüş, ancak bu durumda da yetersiz baskı basıncından ötürü sac yırtılamamış ve kenarlarda da ondülasyonlar meydana gelmiştir.

Şekil 4.28 de yetersiz baskı basıncından ötürü yırtılamayan bir numune örneği gösterilmektedir. Uygun basıncın bulunabilmesi ve yırtığın tam başladığı anda deneyin durdurulabilmesi için çalışmada çok sayıda numune kullanılmıştır.

Şekil 4.29 da deneyde kullanılan ve sonuç alınamayan hatalı numuneler toplu olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.28 Yetersiz baskı basıncı sonucu yırtılamayan IF deney numunesi



Şekil 4.29 Deneyde kullanılan ve sonuç alınamayan numuneler

Yapılan denemelerden sonra 160 kN'luk bir kuvvet ile numunelerde istenilen yırtık sağlanmıştır.

4.9 Deformasyonların Ölçülmesi

Malzemelere ait şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenebilmesi için numune yüzeyleri üzerindeki şekil değiştirmiş gridlerden ölçüm alınması gerekmektedir. Çalışmada daha öncede belirtildiği gibi daire grid geometrisi kullanılmış olup, gridler serigrafi yöntemi ile yüzey üzerine işlenmiştir. Şekillendirme sonrasında gridlerde meydana gelen deformasyonların ölçülmesinde görüntü işleme tekniğinden yararlanılmıştır. Bu teknik, dijital ortamdaki alınan numunelere ait görüntü verilerinin çeşitli yazılımlar vasıtasıyla sayısallaştırılarak bilgisayar ortamında ölçülmesine dayanmaktadır. Bu amaçla, çalışmada deforme olmuş numuneler, Pentax K-10 marka 23,5 mm x 15.7 mm boyutlarında ve 10.2 mega piksel çözünürlüğüne ve CCD görüntü algılayıcısına sahip olan bir dijital fotoğraf makinesiyle çekilmiş ve daha sonra çekilen fotoğraflar Image Pro Plus görüntü işleme programında analiz edilerek deformasyon ölçümleri yapılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, deforme olmuş numunelerin fotoğrafları çekilirken, fotoğraf makinesi objektifinin ölçüm yapılacak bölgeye dik bakışının sağlanabilmesidir. Eğer bu sağlanamazsa gridlerde meydana gelen deformasyonlar hatalı ölçülecek ve bu da şekillendirme sınır diyagramlarının yanlış çıkarılmasına neden olacaktır. Ayrıca bu yöntemde kullanılan fotoğraf makinesinin özellikleri de çok önemlidir. Makinenin netlik ayarı, odaklama, çözünürlük, objektif ayarları gibi birçok özelliğin iyi olması gerekmektedir. Fotoğrafların alınmasında bir diğer önemli nokta ise ortamdaki ışık yoğunludur. Işığın fazla olmaması ve geldiği açının doğru olması gridlerin daha sonraki analizinde kolaylık sağlaması için oldukça önemlidir. Ölçümlerin doğru olarak yapılabilmesi için yukarıda da belirtildiği gibi makine objektifinin yırtık hattındaki elipslere dik olarak bakması gerekmektedir. Ancak bunu sağlayabilmek oldukça zordur. Çünkü yırtık hattında bulunan elipsler küresel bir yüzey üzerinde oldukları için aynı anda bütün elipslere dik olarak bakabilmek mümkün değildir. Dolayısıyla çalışmada sac numunelerin kendi eksenine etrafında dönen bir tabla üzerine oturtularak, fotoğraf çekimlerinin bu tabla üzerinde yapılmasına karar verilmiştir. Çünkü makine objektifi yırtık bölgesine bir defa dik ayarlanıp çekim yapıldıktan sonra, tabla döndürüldüğünde geriye kalan elipsler objektifin karşısına geçecekleri için yine dik olarak görüleceklerdir. Bu şekilde tablanın döndürülmesiyle yırtık hattı

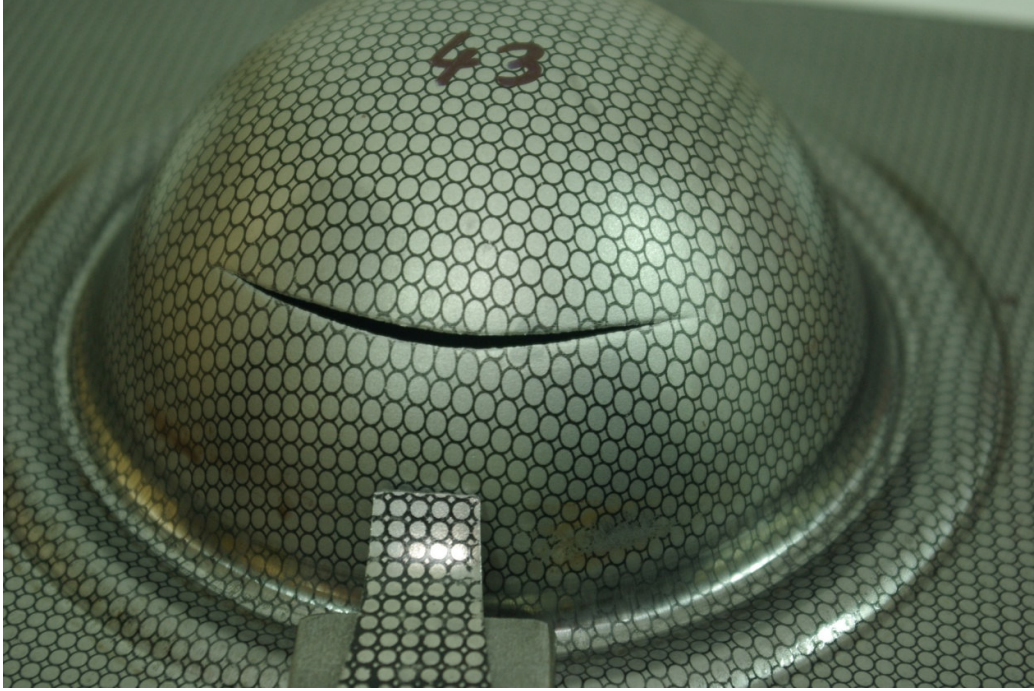
boyunca yerleşmiş bulunan bütün elipslerin boyutları ölçülmüş olur. Yapılan çekimlerde objektifin sarsılmaması için fotoğraf makinesi bir tripod üzerine konmuş ve çekimler esnasında gün ışığının çekim kalitesini etkilememesi için numune önüne 45 derecelik bir engel getirilmiştir. Şekil 4.30 da fotoğraf çekimi için hazırlanan düzenek gösterilmektedir.



Şekil 4.30 Fotoğraf çekimi için hazırlanan düzenek

Burada tek bir numune için yırtığın uzunluğuna bağlı olarak iki, bazı durumlarda ise üç fotoğraf çekimi yapılmıştır ve bu işlem sırası bütün numunelerde aynı şekilde tekrar edilmiştir. Çalışmada iki malzemeden de çok sayıda numune olduğundan çekilen fotoğrafların karışmaması için çekim öncesi bütün numuneler numaralandırılmıştır. Numunelere ait fotoğrafların çekimi yapıldıktan sonra, bütün fotoğraflar bilgisayara kaydedilmiştir. Gridlerin ölçülmesinde bilgisayar ortamında yapılan analiz için Image Pro Plus görüntü işleme yazılımı kullanılmıştır. Program, deforme olmamış nesne ile deforme olmuş nesneyi karşılaştırarak ölçüm yapmaktadır. Dolayısıyla doğru ölçüm yapabilmek için programa deforme olmamış grid boyutlarının tanıtılması gerekmektedir. Bu amaçla çalışmada ölçüm yapılacak bölgenin hemen yanına şekil değiştirmemiş numune getirilerek her ikisinin de aynı

fotoğraf karesine alınması sağlanmıştır. Şekil 4.31 de örnek bir fotoğraf gösterilmektedir.



Şekil 4.31 Deforme olmamış numune ile ölçülecek bölgenin aynı fotoğraf karesine alınmış hali

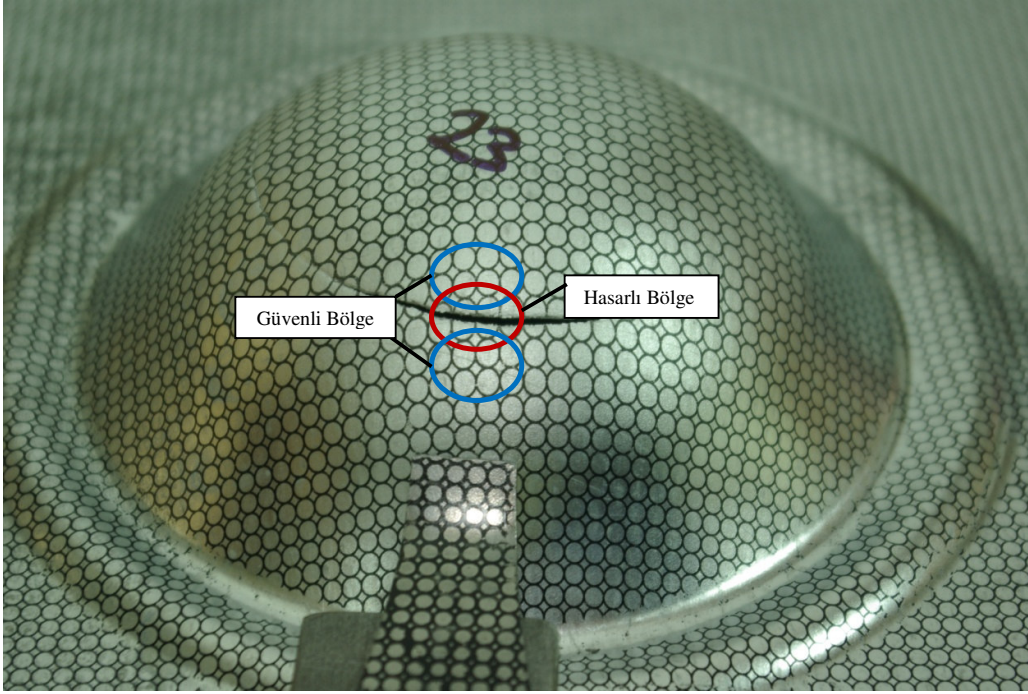
Numunelere ait fotoğraflar yukarıda gösterildiği gibi çekildikten sonra üzerinde çalışılacak fotoğraf çağrılıp, programda kalibrasyon yapılarak şekil değiştirmemiş grid boyutları programa tanıtılır.

Kalibrasyon işleminin ardından programa ölçüm yapılmak istenen bölge gösterilir. Burada programdaki parlaklık, kontrast ayarları değiştirilerek ölçüm bölgesinin dışındaki bölgeler karartılıp, ekranda sadece ölçüm bölgesi bırakılır.

Daha sonra bölgeye giren şekil değiştirmiş gridler programa saydırılır ve ilgili bölgedeki bütün gridlerin boyutları otomatik olarak programda ölçülür. Belirtilen bu işlem sırası her fotoğraf için tekrar edilir.

Çalışmada deney numunelerinin 3 ayrı bölgesinden ölçüm alınmıştır. İlk ölçüm alınan yer, hasarlı bölge olarak tanımlanan yırtık hattının merkezinde bulunan elipslerdir. Diğer iki yer ise güvenli bölge olarak tanımlanan, yırtık hattının her iki tarafında bulunup buna komşu olan elipslerdir.

Şekil 4.32 de ölçüm alınan bölgeler gösterilmektedir.



Şekil 4.32 Ölçüm alınan bölgeler

Hasarlı bölgede bulunan elipsler ikiye ayrıldıkları için program bunları tek parça olarak görememektedir. Dolayısıyla bunların ölçülmesinde programın menüsünde bulunan ölçüm oku ile yırtılmış elipsler birleştirilerek tek parça olarak kabul edilir ve boyutları buna göre belirlenir.

Çalışmada bütün numunelerden şekilde gösterildiği gibi ölçüm alınmıştır. Daha sonra alınan bu ölçümler Ms Excel programına aktarılır. Excelde numunelerin hasarlı ve güvenli bölgelerinden gelen ölçüm değerleri bir dağılım oluştururlar. Ortaya çıkan dağılıma göre programda iki bölgeyi birbirinden ayıran eğri çizdirilip, malzemelere ait şekillendirme sınır diyagramları elde edilir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Tek Eksenli Çekme Deneyleri

Her iki malzeme için haddeleme doğrultusu ile 0°, 45° ve 90° açı yapan doğrultularda hazırlanan çekme numuneleriyle yapılan çekme deneylerinin sonucunda her iki sacın oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri belirlenmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak Çizelge 5.1 de toplu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Çekme deneyi sonuçları

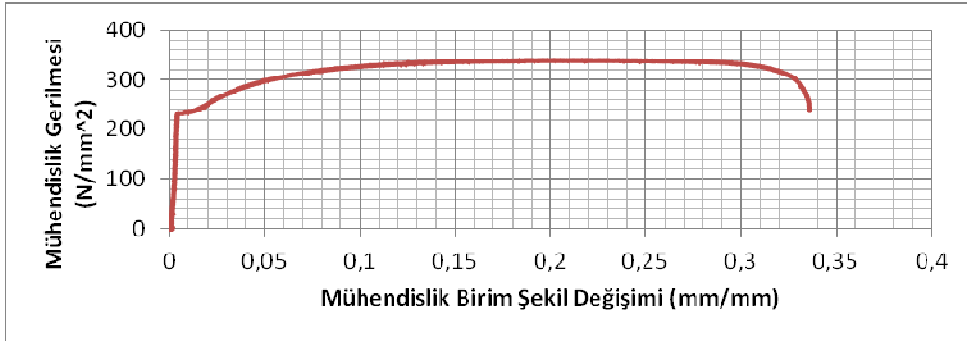
Malzemeler	Hadde Yönü	σ_{ak} (MPa)	$\sigma_{çek}$ (Mpa)	$\epsilon_{ün.}$ (%)	ϵ_{top} (%)	n	K (Mpa)
	0	232.9	339.2	19.2	32.8	0.201	572
ERD 1313	45	252.5	350.0	16.5	31,7	0,197	606
	90	263.6	353.4	16.4	28.9	0,189	603
Ortalama*		250.4	348.2	17.2	31,3	0,196	597
	0	164	298.3	25.4	48.3	0,191	530
ERD 7114	45	178.6	318.5	25.8	44.7	0.207	475
	90	182.2	318.2	23.4	45.6	0.186	454
Ortalama		175.8	313.4	25.1	45.8	0,198	484

$$* X_{ort} = \frac{X_0 + 2X_{45} + X_{90}}{4}$$

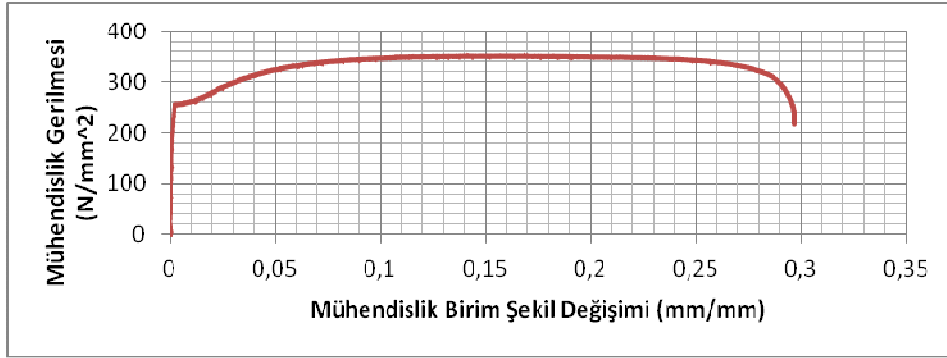
Yapılan çekme deneylerinin sonucunda, her iki malzemenin üç doğrultu için de (0°, 45°, 90°) mühendislik gerilmesi-birim şekil değişim eğrileri elde edilmiştir. İlgili eğriler Şekil 5.1 ve Şekil 5.3 de verilmektedir.

Bu eğrilerden yararlanarak malzemelerin standart çekme özellikleri olan akma dayanımı (σ_{ak}), çekme dayanımı ($\sigma_{çek}$), üniform uzama ($\epsilon_{ün.}$) ve toplam uzama ($\epsilon_{top.}$) değerleri belirlenmiş ve malzemelerin mekanik özellikleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

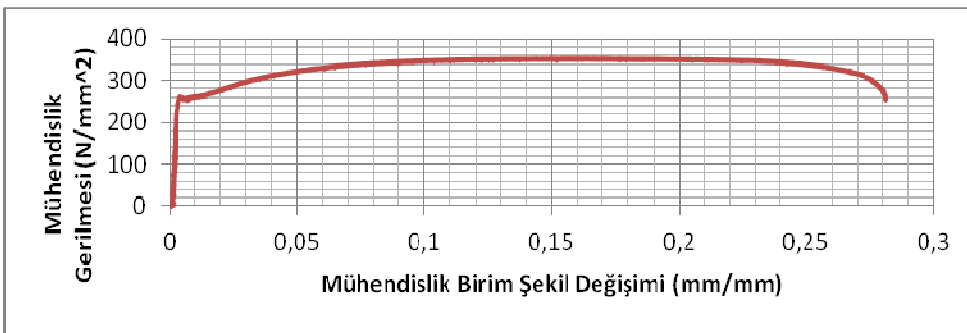
Şekil 5.1 de ERD 1313 malzemesinin üç haddeleme yönüne göre elde edilen mühendislik gerilmesi ve mühendislik birim şekil değişim eğrileri gösterilmektedir.



a) ERD 1313 hadde yönüne 0° numunenin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi



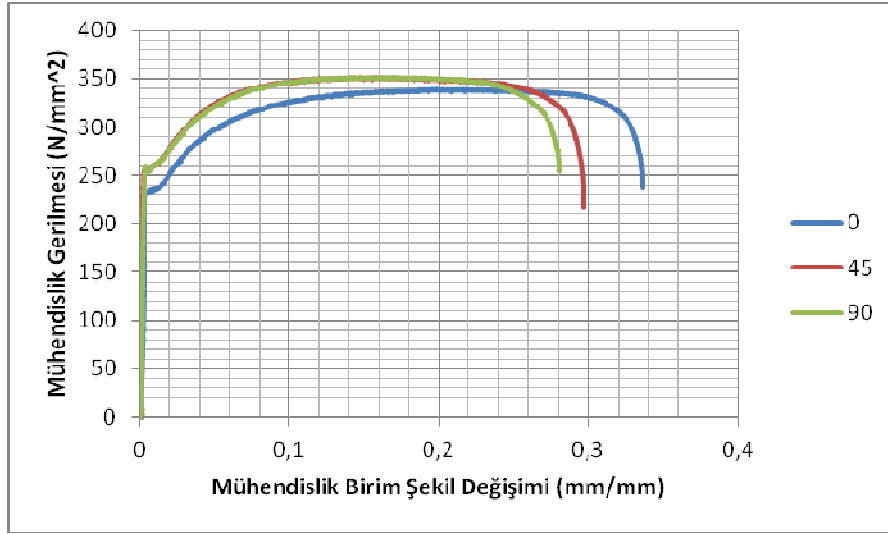
b) ERD 1313 hadde yönüne 45° numunenin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi



c) ERD 1313 hadde yönüne göre 90° numunenin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi

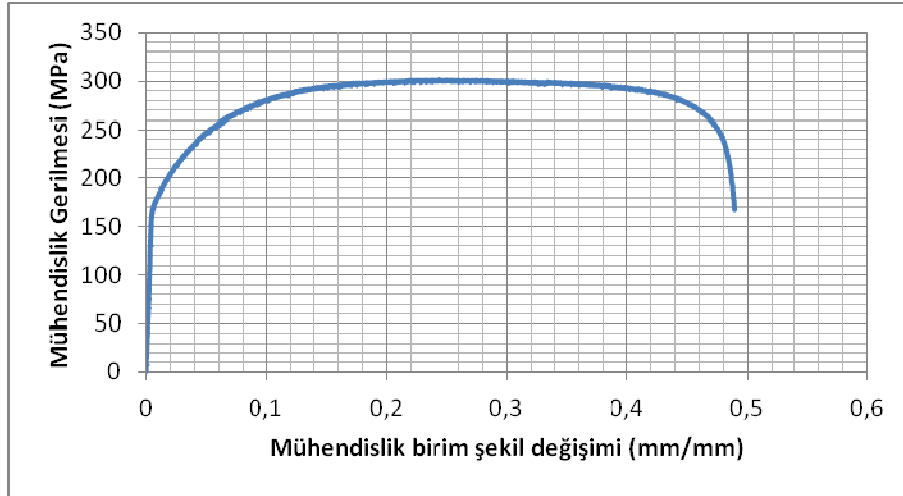
Şekil 5.1 ERD 1313 hadde yönüyle 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi grafikleri

Yukarıda gösterilen üç grafik üst üste getirilerek Şekil 5.2 de toplu olarak gösterilmektedir.

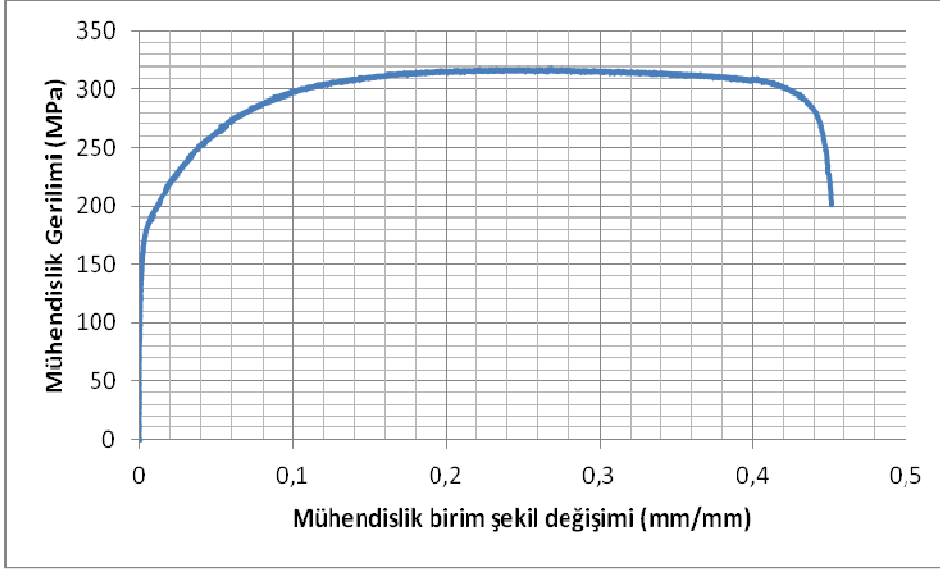


Şekil 5.2 ERD 1313 hadde yönüne 0°, 45° ve 90° numunelerin toplu mühendislik gerilme-birim şekil değişim grafikleri

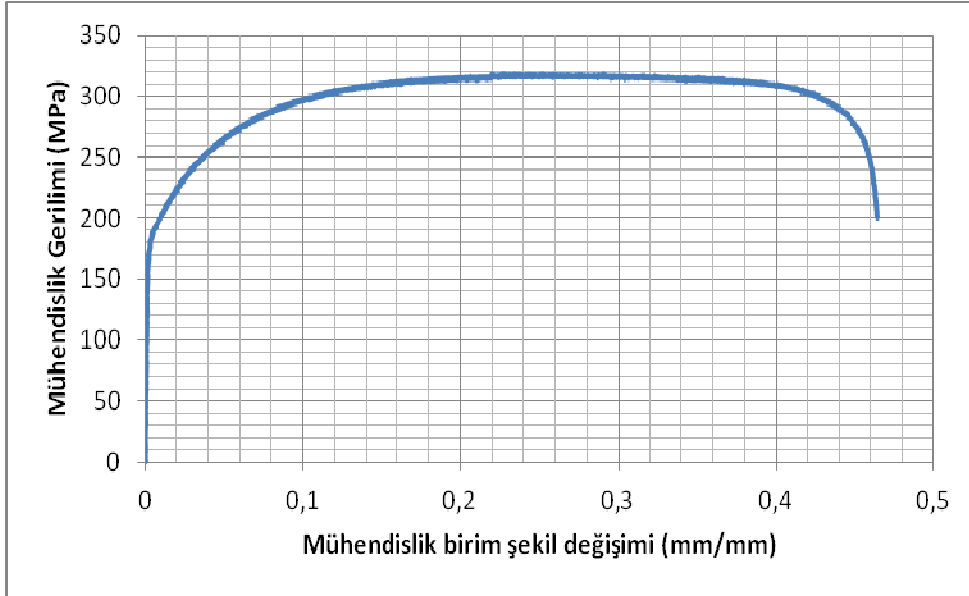
ERD 7114 malzemesine ait üç doğrultu için elde edilen mühendislik gerilmesi-mühendislik birim şekil değişimi eğrileri ise Şekil 5.3 de verilmektedir.



a) ERD 7114 hadde yönüne 0° numunenin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi



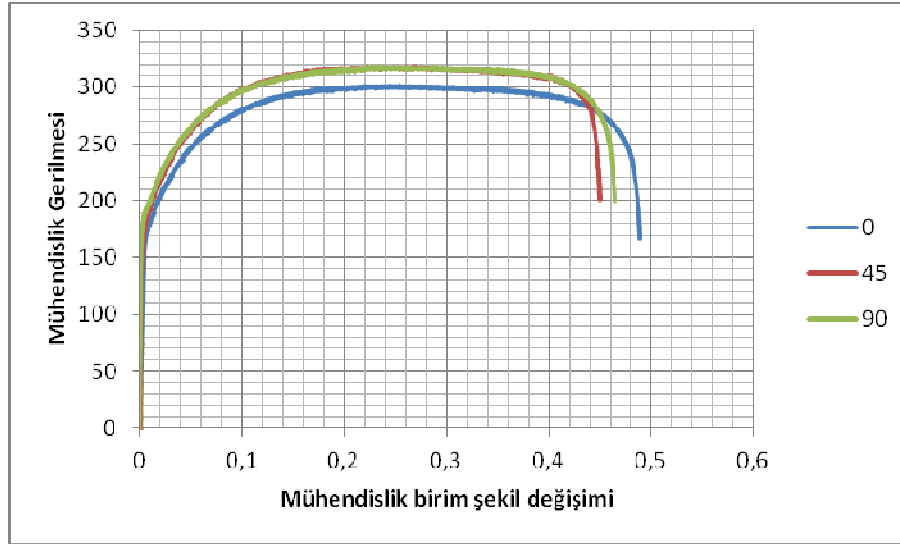
b) ERD 7114 hadde yönüne 45° numunenin mühendislik gerilmesi-mühendislik birim şekil değişimi



c) ERD 7114 hadde yönüne 90° numunenin mühendislik gerilmesi-mühendislik birim şekil değişimi

Şekil 5.3 ERD 7114 hadde yönüne 0°, 45° ve 90° numunelerin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi grafikleri

Şekil 5.4 de ise ERD 7114 malzemesinin her üç yönde elde edilen mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi grafikleri toplu olarak gösterilmektedir.

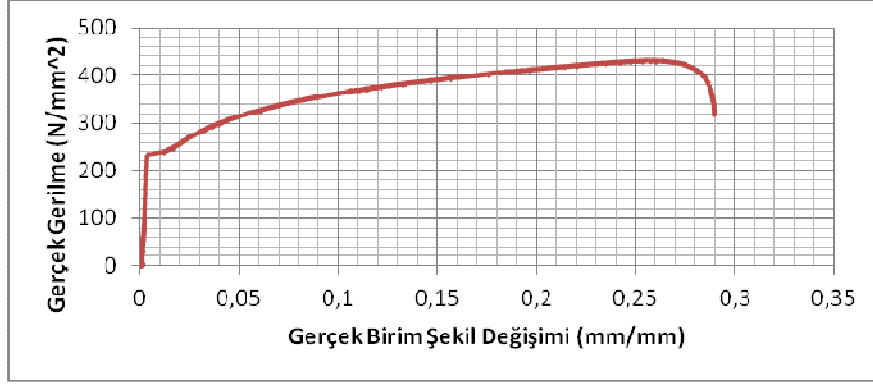


Şekil 5.4 ERD 7114 hadde yönüne 0°, 45° ve 90° numunelerin toplu mühendislik gerilme-birim şekil değişim grafikleri

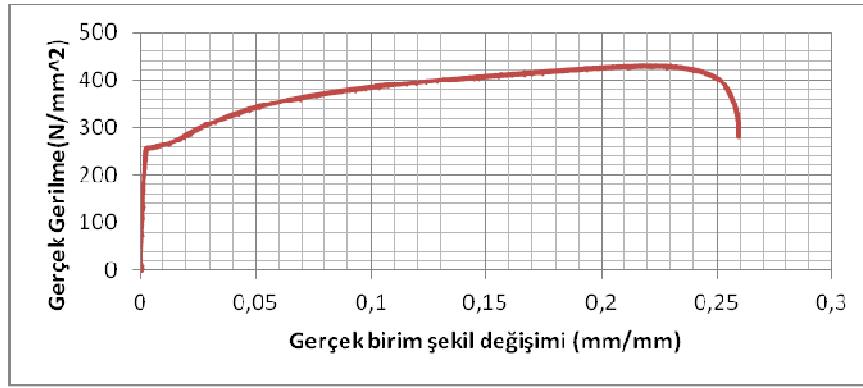
Malzemelerin mühendislik gerilmesi-birim şekil değişimi eğrileri belirlendikten sonra bölüm 4 de verilen bağıntılar vasıtasıyla gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerine geçilmiştir.

Gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinin elde edilmesi malzeme parametrelerinin belirlenebilmesi açısından önemlidir. Pekleşme üsteli ve dayanım sabiti gibi önemli malzeme parametreleri gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrilerinden yararlanarak elde edilmektedir.

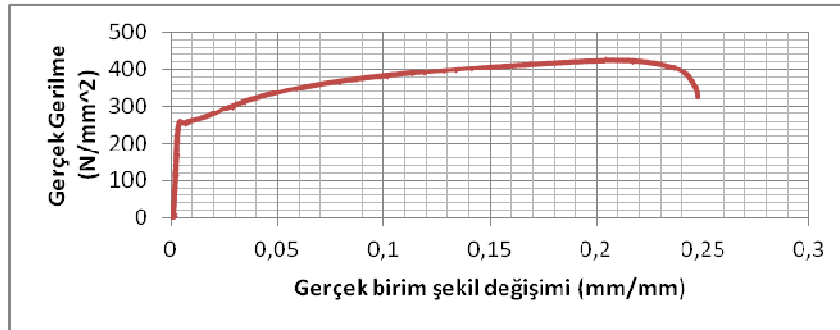
Çalışmada, iki malzemenin üç doğrultu için de gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrileri elde edilmiştir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 da ilgili eğriler gösterilmektedir.



a) ERD 1313 hadde yönüne 0° numunenin gerçek gerilme-birim şekil değişim grafiği



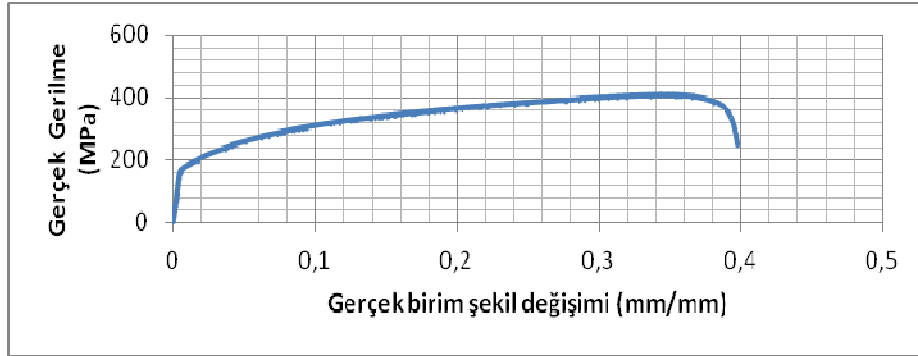
b) ERD 1313 hadde yönüne 45° numunenin gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafiği



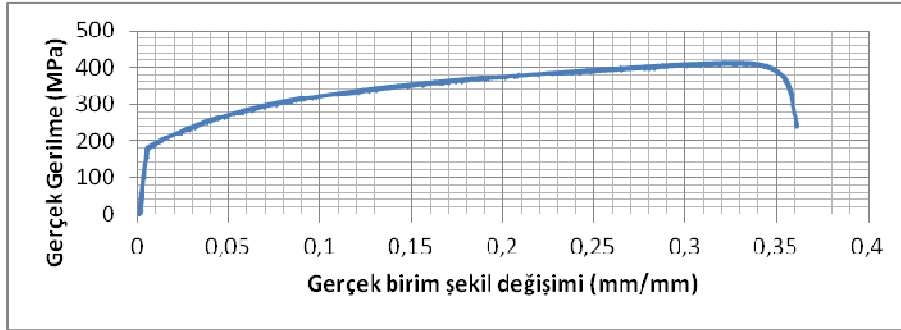
c) ERD 1313 hadde yönüne 90° numunenin gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafiği

Şekil 5.5 ERD 1313 hadde yönüne 0°, 45° ve 90° numunelerin gerçek gerilme- gerçek birim şekil değişim grafikleri

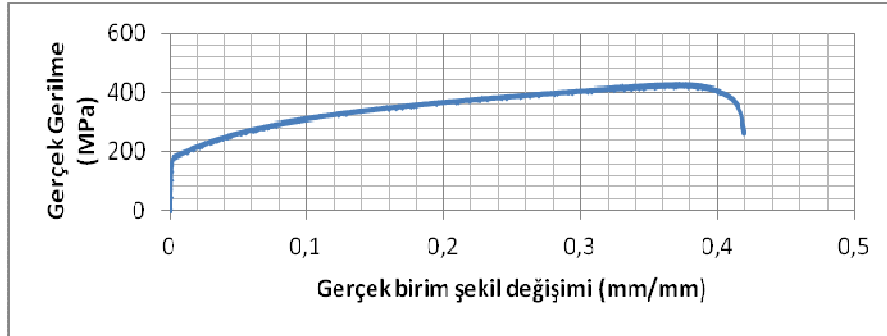
Şekil 5.6 da ise ERD 7114 malzemesinin üç doğrultu için gerçek gerilme-birim şekil değişim grafikleri verilmektedir.



a) ERD 7114 hadde yönüne 0° numunenin gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafiği



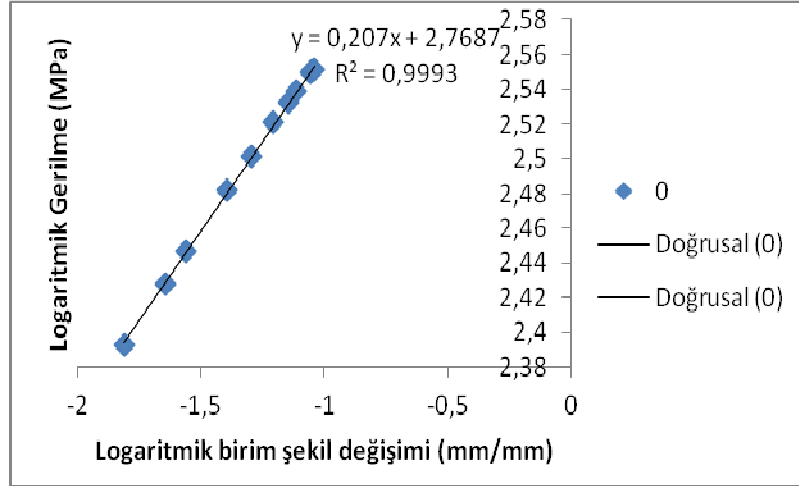
b) ERD 7114 hadde yönüne 45° numunenin gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafiği



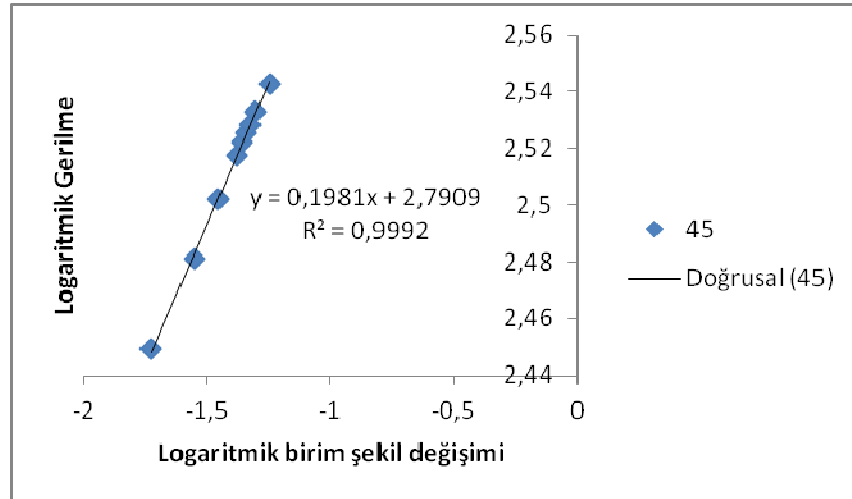
c) ERD 7114 hadde yönüne 90° numunenin gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafiği

Şekil 5.6 ERD 7114 hadde yönüne 0°, 45° ve 90° numunelerin gerçek gerilme-birim şekil değişimi grafikleri

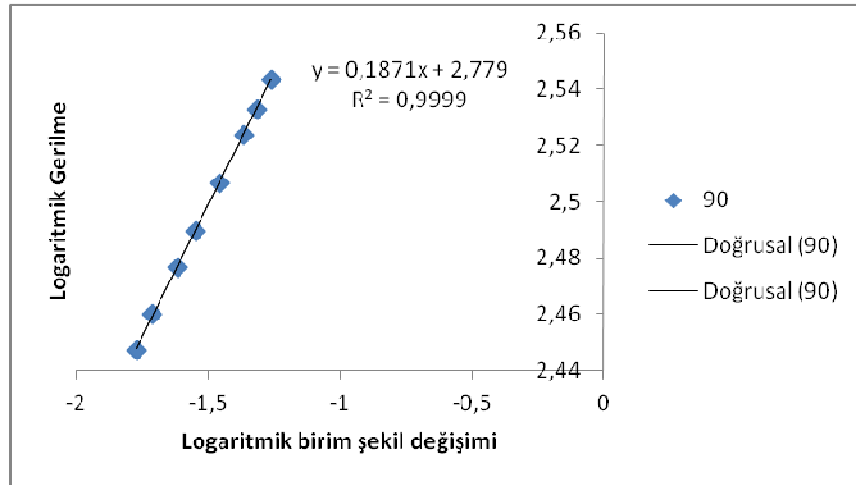
İki malzemenin her üç doğrultusu için gerçek gerilme-birim şekil değişimi eğrileri belirlendikten sonra $\sigma = K\varepsilon^n$ bağıntısı kullanılmış ve bu bağıntıya göre akma ile çekme dayanımı arasındaki değerlerin logaritmaları alınarak üç doğrultu için logaritmik gerilme-birim şekil değişimi doğruları elde edilmiştir. Şekil 5.7 de ERD 1313 malzemesine ait her üç hadde yönünde elde edilmiş olan logaritmik gerilme-logaritmik birim şekil değiştirme doğruları gösterilmektedir.



a) ERD 1313 hadde yönüne 0° numunenin logaritmik gerilme-logaritmik birim şekil değişim doğrusu



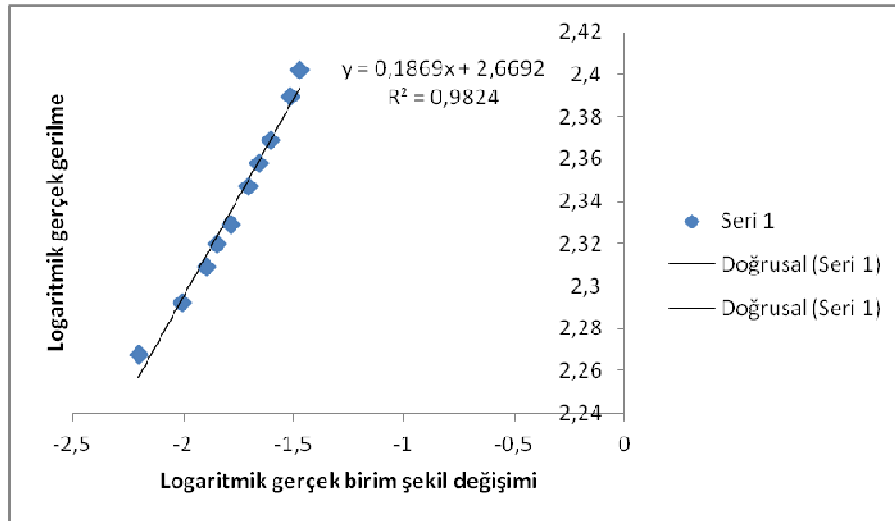
b) ERD 1313 hadde yönüne 45° numunenin logaritmik gerilme-logaritmik birim şekil değişim doğrusu



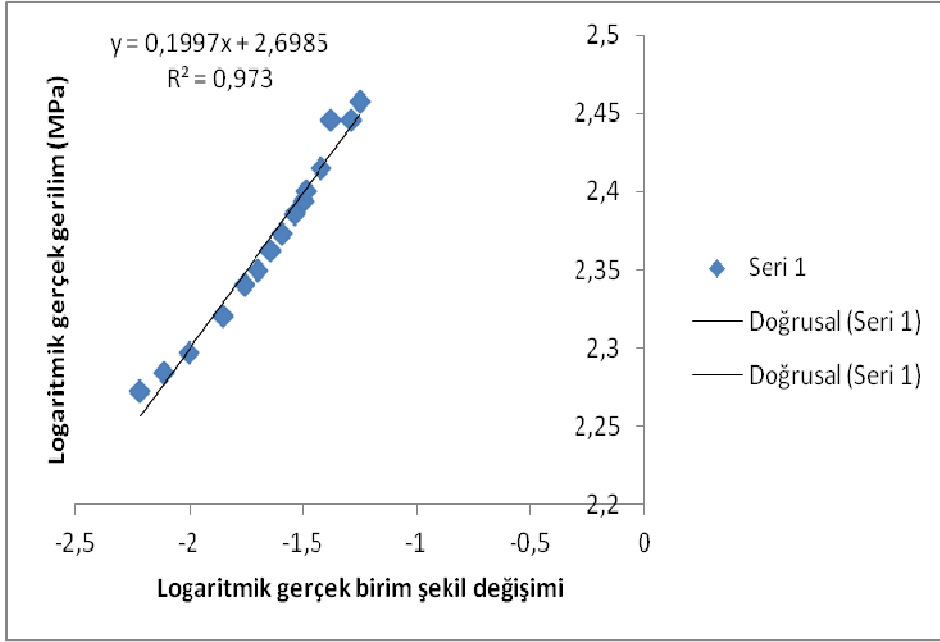
c) ERD 1313 hadde yönüne 90° numunenin logaritmik gerilme-logaritmik birim şekil değişim doğrusu

Şekil 5.7 ERD 1313 hadde yönüne 0°, 45° ve 90° numunelerin logaritmik gerilme-logaritmik birim şekil değişimi grafikleri

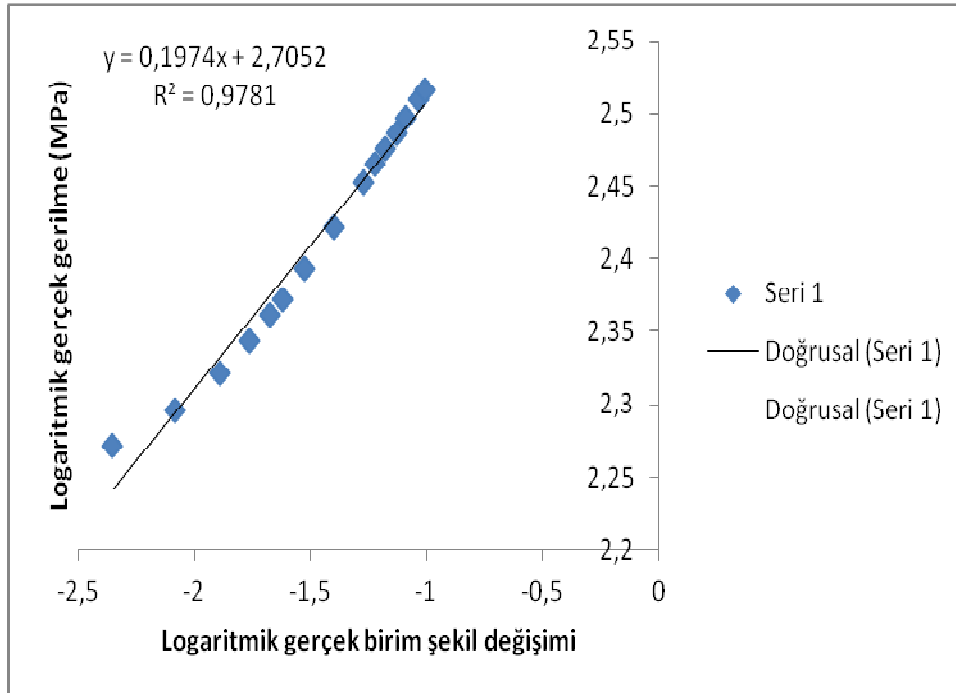
Şekil 5.8’de ise ERD 7114 malzemesine ait logaritmik gerilme-logaritmik birim şekil değiştirme doğruları verilmektedir.



a) ERD 7114 hadde yönüne 0° numunenin logaritmik gerilme-logaritmik birim şekil değişim doğrusu



b) ERD 7114 hadde yönüne 45° numunenin logaritmik gerilme-logaritmik birim şekil değişim doğrusu



c) ERD 7114 hadde yönüne 90° numunenin logaritmik gerilme-logaritmik birim şekil değişim doğrusu

Şekil 5.8 ERD 7114 hadde yönüne 0°, 45° ve 90° açı yapan numunelerin logaritmik gerilme- birim şekil değişimi grafikleri

5.2 Anizotropi Deneyleri

Her iki malzemenin plastik anizotropi değeri R , ASTM E517 standardına bağlı kalınarak belirlenmiştir. Her iki malzeme için haddeleme doğrultusu ile sırasıyla 0° , 45° ve 90° açı yapan doğrultularda hazırlanan çekme deneyi numuneleriyle yapılan deneyler sonucunda malzemelere ait normal anizotropi ve düzlemsel anizotropi (Δr) değerleri elde edilerek, sonuçlar Çizelge 5.2 de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Anizotropi değerleri

	ERD 1313	ERD 7114
r_0	1,20	2,10
r_{45}	1,3	1,70
r_{90}	1,5	2,32
$\bar{r}$	1,32	1,95
Δr	0,05	0,51

$$r = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4, \Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90}) / 2$$

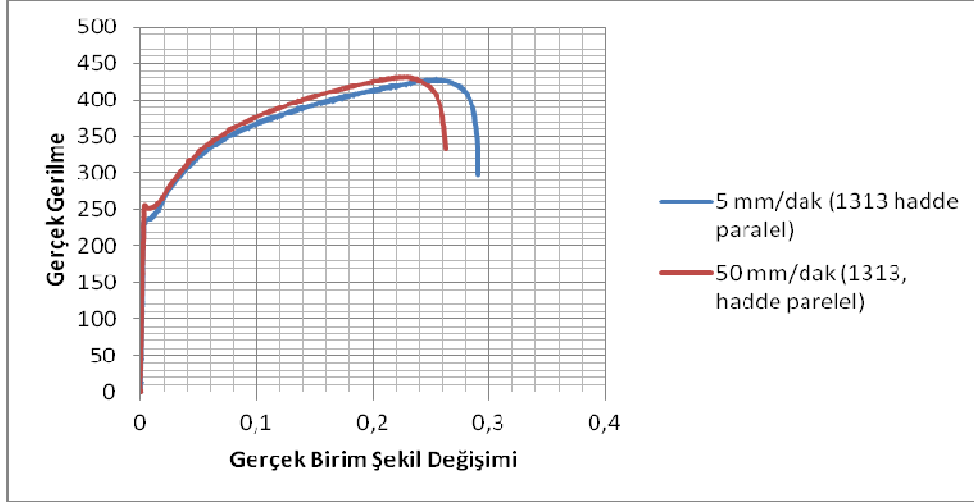
5.3 Şekil Değiştirme Hızı Duyarlılık Üstelinin Belirlenmesi

Şekil değiştirme hızına duyarlılık üstelinin (m) saptanmasında Bölüm 4 de anlatılan yöntem uygulanmıştır. Haddeleme doğrultusu ile 0° , 45° ve 90° ’lik açı yapan doğrultularda hazırlanan çekme numuneleri ile yapılan deney sonuçları ve bu sonuçların ortalamaları Çizelge 5.3 de toplu olarak gösterilmektedir.

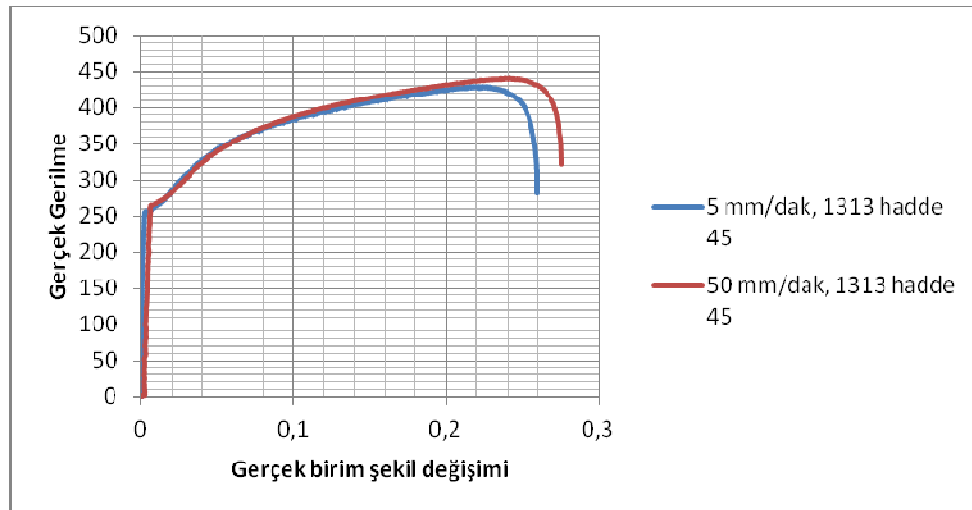
Çizelge 5.3 Deney malzemelerinin şekil değiştirme hızı duyarlılık üsteli değerleri

	Haddeleme Yönü	m	m (Ortalama)
ERD 1313	0	0,011	0.010
	45	0,010	
	90	0.009	
ERD 7114	0	0.017	0,013
	45	0.012	
	90	0,011	

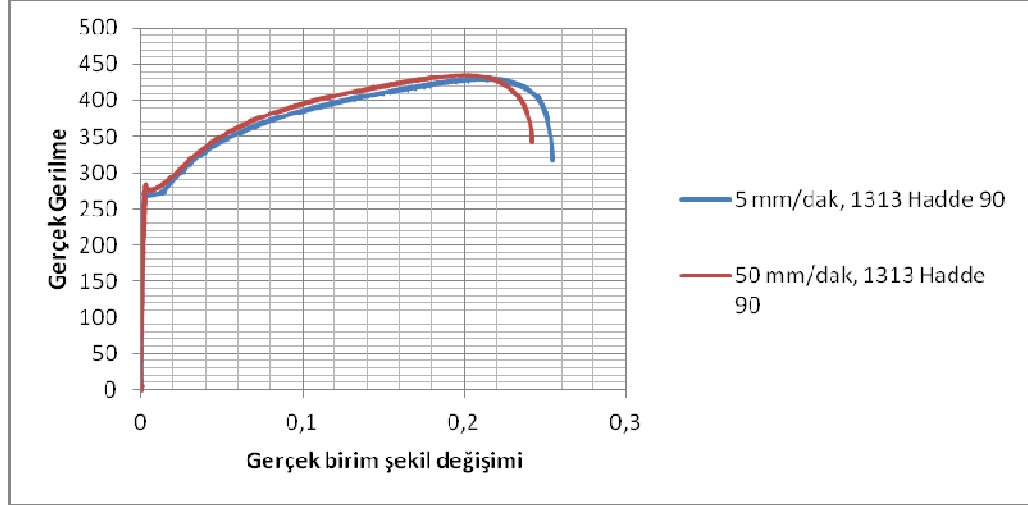
ERD 1313 ve ERD 7114 malzemelerinin iki farklı çene hızındaki gerilme-birim şekil değişimi eğrileri haddeleme doğrultularına bağlı olarak Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da verilmektedir.



a) ERD 1313 hadde yönüne 0° numunenin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişim eğrileri



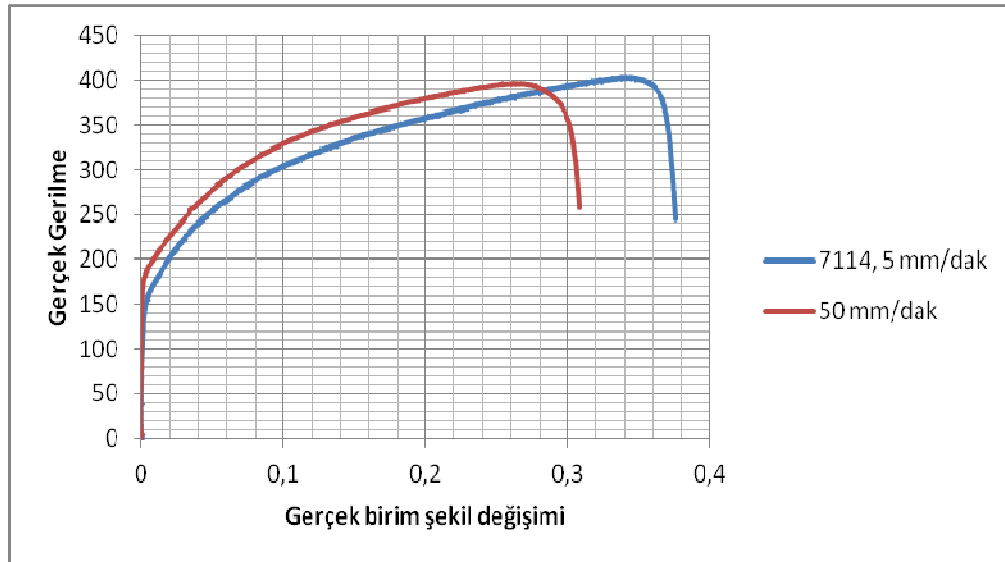
b) ERD 1313 hadde yönüne 45° numunenin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişim eğrileri



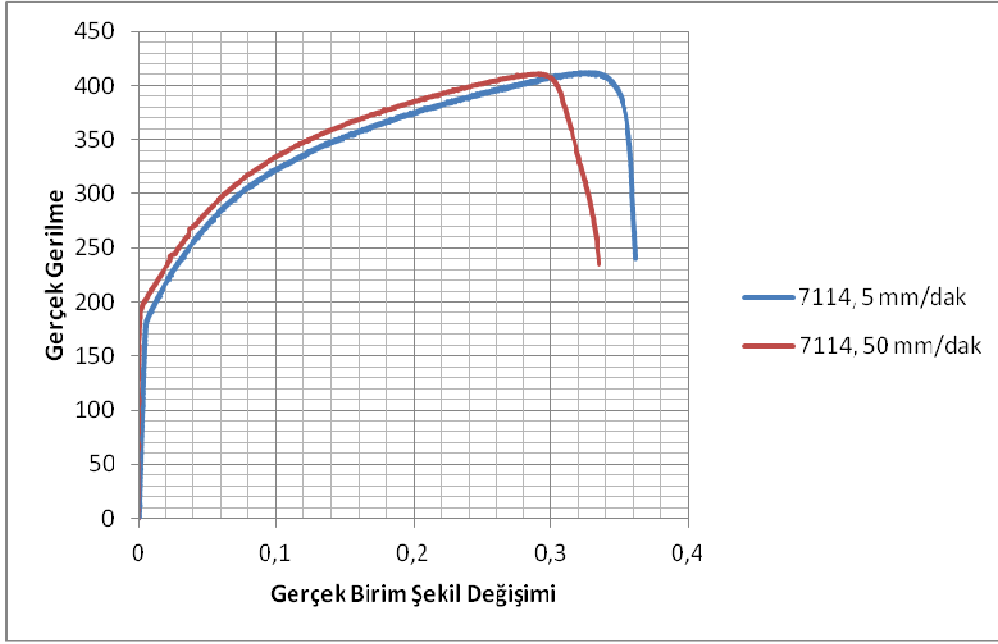
c) ERD 1313 hadde yönüne 90° numunenin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişim eğrileri

Şekil 5.9 ERD 1313 hadde yönüne 0°, 45° ve 90° numunelerin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişim eğrileri

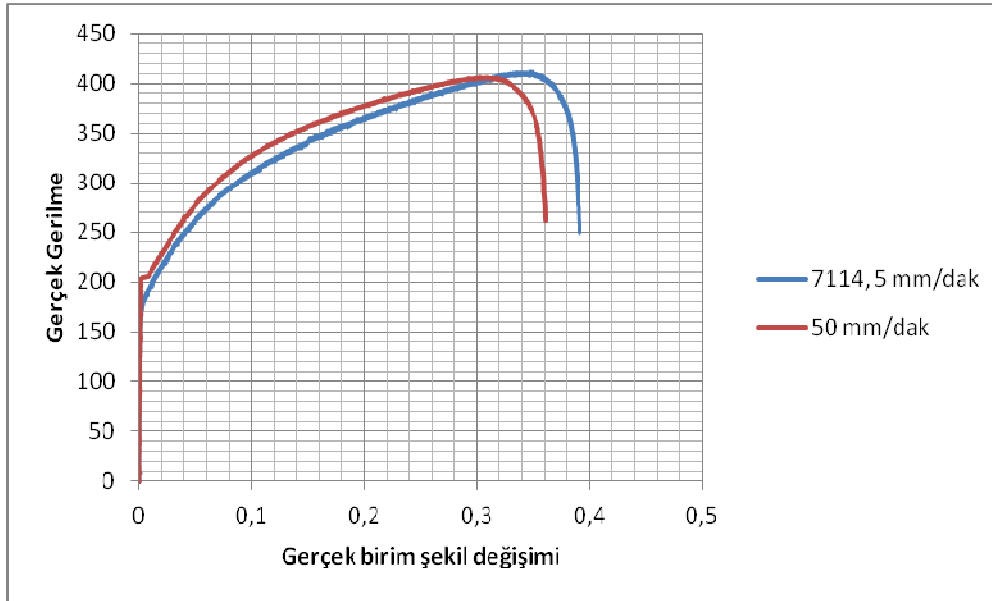
Şekil 5.10'da ise ERD 7114 (IF) malzemesinin üç haddeleme yönünde hıza bağlı olarak gerçek gerilme-birim şekil değişim eğrileri gösterilmektedir.



a) ERD 7114 hadde yönüne 0° numunenin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişim eğrileri



b) ERD 7114 hadde yönüne 45° numunenin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişim eğrileri

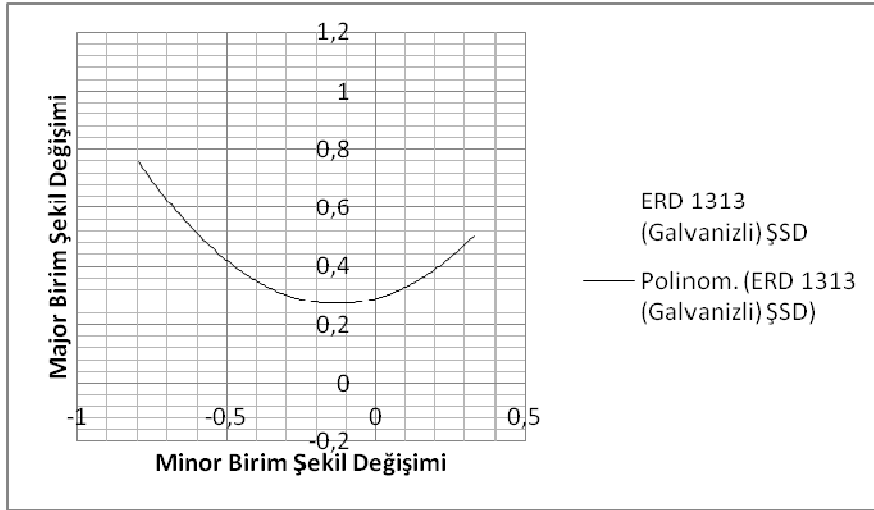


c) ERD 7114 hadde yönüne 90° numunenin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişim eğrileri

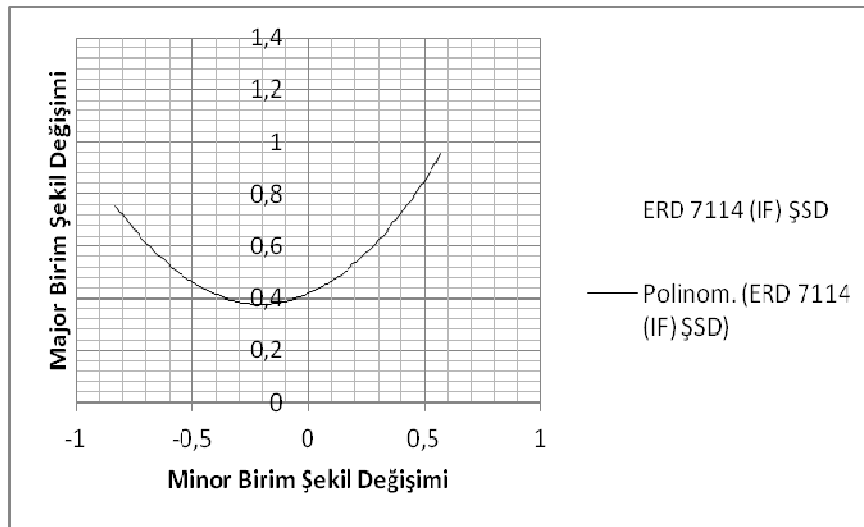
Şekil 5.10 ERD 7114 hadde yönüne 0°, 45° ve 90 ° numunelerin iki farklı çene hızındaki gerçek gerilme-birim şekil değişim eğrileri

5.4 Düzlem Dışı Germe Deneyi

Yapılan deneyler sonucunda, deforme olan numunelerin Şekil 4.32 de gösterildiği gibi hasarlı ve güvenli bölgelerinde bulunan elipsleri üzerinden ölçümler alınmış ve iki malzemeye ait şekillendirme sınır diyagramları elde edilmiştir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 de sırasıyla ERD 1313 (galvanizli) ve ERD 7114 (IF) malzemelerine ait şekillendirme sınır diyagramları gösterilmektedir. Diyagramlar gerçek birim şekil değişimlerine göre verilmiştir.

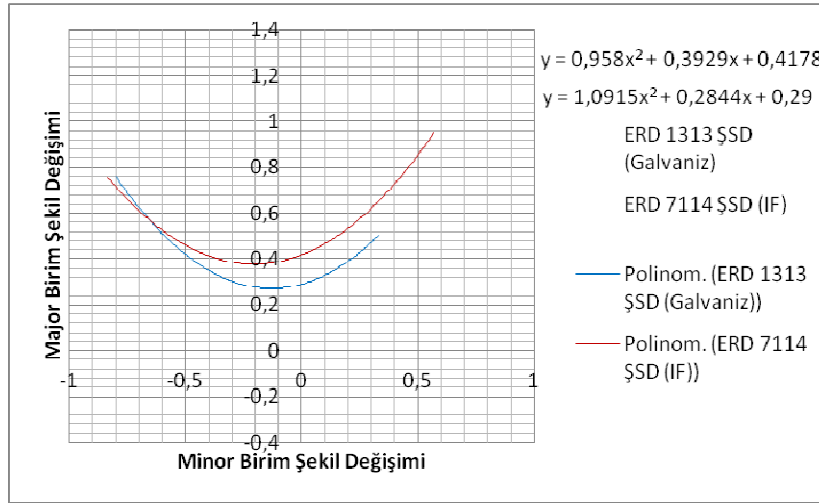


Şekil 5.11 ERD 1313 (Galvanizli) için şekillendirme sınır diyagramı



Şekil 5.12 ERD 7114 IF için şekillendirme sınır diyagramı

Malzemelerin şekillendirilebilirliklerini karşılaştırmak için, Şekil 5.13’de iki malzemeye ait diyagramlar üst üste getirilmiştir.



Şekil 5.13 ERD 1313 ve ERD 7114 malzemelerine ait şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

Eğrinin sol tarafı çekme - basma bölgesindeki sınır deformasyonları göstermektedir. Çünkü sol tarafı oluşturan numunelerin genişlikleri, süzdürme çubuğu çapından küçük olduğundan malzeme sadece iki taraftan sabitlenebilmekte ve akış tek yönlü olarak gerçekleşmektedir. Bu durum derin çekme şartlarını yansıtmaktadır. Buna karşın eğrinin sağ tarafı ise, çekme-çekme bölgesindeki sınır deformasyonları göstermektedir. Bu bölgedeki numunelerin genişlikleri ise, süzdürme çubuğu çapından fazla olduğundan malzeme her taraftan sabitlenebilmekte ve akış iki yönde de gelişmektedir. Bu durum ise, iki eksenli germe koşullarını yansıtmaktadır. Böylece diyagramda tek eksenli çekmeden, iki eksenli germe haline kadar olan bütün deformasyonlar elde edilebilmektedir.

6. SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Malzemelerin haddeleme doğrultularına göre mekanik özellikleri değerlendirildiğinde, her iki malzemenin akma dayanımlarının hadde yönüne 90°’de diğer yönler göre daha yüksek, çekme dayanımlarının ise 45° ve 90°’de birbirine yakın olup, 0°’ye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Kopuncaya kadar olan toplam uzama değerlerine bakıldığında ise küçük farklar görülmesine karşın, iki malzemedeki de haddeleme yönüne paralel yönde en yüksek olup, 45° ve 90°’de ise birbirine yakın değer almaktadır.

Her iki malzeme için çizelgedeki ortalama değerlere bakıldığında, ERD 1313 malzemesinin akma ve çekme dayanımlarının ERD 7114 malzemesine göre daha yüksek olduğu, buna karşın üniform ve toplam uzama değerlerinin ise daha düşük olduğu görülmektedir.

Malzemelerin boyun verme öncesi plastik deformasyon görebilme kabiliyetini gösteren, bu nedenle de malzemenin gerdirilebilme özelliğini yansıtan pekleşme üsteli (n) değerlerine bakıldığında, ERD 7114 (IF) malzemesinin n değerinin, ERD 1313 malzemesinin n değerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Zaten bu sonuç, ERD 7114 (IF) malzemesinin daha yüksek bir üniform uzama değerine sahip olmasıyla da uyumludur. Genelde bu saclar yüksek n değerlerine sahip olup (0.2’ye yakın veya daha fazla), iyi gerdirilebilme özelliği göstermektedirler [17]. Ayrıca malzemelerin plastik şekil alabilme yeteneğini gösteren $\sigma_{\text{çek}} / \sigma_{\text{ak}}$ oranına bakıldığında ise ERD 7114 (IF) malzemesinin, ERD 1314 malzemesine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum IF malzemenin diğer malzemeye göre plastik şekil alabilme yeteneğinin de daha iyi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.3 de malzemelerin normal anizotropi (r) değerleri karşılaştırıldığında, ERD 7114 (IF) malzemesinin r değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, IF malzemesinin diğer malzemeye göre daha iyi derin çekilebileceğini ve kritik derin çekme uygulamaları için uygun bir malzeme olduğunu göstermektedir. Ancak aynı

malzemenin düzlemsel anizotropi (Δr) değerinin de yüksek olması, bu malzemenin derin çekilmesi esnasında kulak oluşumu görülme olasılığını artırmaktadır. Buna karşılık ERD 1313 malzemesinde ise, Δr değerinin hemen hemen sıfıra yakın olması kulak oluşumu açısından bu malzemeyi avantajlı hale getirmektedir.

Malzemelerin şekil değiştirme hızı duyarlılık üsteli değerleri karşılaştırıldığı zaman, her iki malzemenin de üç doğrultudaki m değerinin birbirine yakın ve oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuç, düşük karbonlu çelik gibi metallerin çoğunun oda sıcaklığında şekil değiştirme hızına hassasiyetlerinin çok az olduğunu doğrulamaktadır. Dolayısıyla şekillendirme esnasında pres hızında küçük değişiklikler olsa bile bu değişiklik malzemelerin akış davranışını değiştirmeyecektir.

6.2 Düzlem Dışı Germe Deneyi Sonuçları

Yapılan deneylerin sonucunda her iki malzemenin şekillendirme sınır diyagramları elde edilmiştir. Diyagram üzerinde iki malzemenin minor birim şekil değişimlerinin sıfır olduğu ($\varepsilon=0$) düzlem birim şekil değişim durumundaki major birim deformasyon değerleri kıyaslandığı zaman galvanizli malzemede ilgili değer %29 iken, IF' de ise bu değer % 42 civarındadır, dolayısıyla IF Şekil 5.13 de görüldüğü gibi y ekseninde daha yukarıda yer almaktadır.

Eğrinin sol tarafındaki sınır deformasyon değerlerine bakıldığı zaman ise çok büyük bir fark olmamakla birlikte düzlem birim şekil değişimi şartlarına doğru yaklaşıldıkça sınır deformasyon değerleri arasındaki farkın arttığı ve galvanizli malzemeye göre IF'in aynı minor birim şekil değişimine karşılık daha yüksek major birim deformasyon değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum plastik anizotropi ile açıklanabilir. Çünkü şekillendirme sınır diyagramının eğimi ve sol taraftaki maksimum sınır deformasyon değerleri malzemelerin r değerleri ile ilişkilidir. Burada da IF malzemenin plastik anizotropisinin neredeyse 2.0 civarında olması ve galvanizli malzemenin anizotropi değerinden daha yüksek olması sol tarafın eğimlerinde Şekil 5.13'de görüldüğü gibi bir farklılığa sebep olabileceği düşünülmektedir.

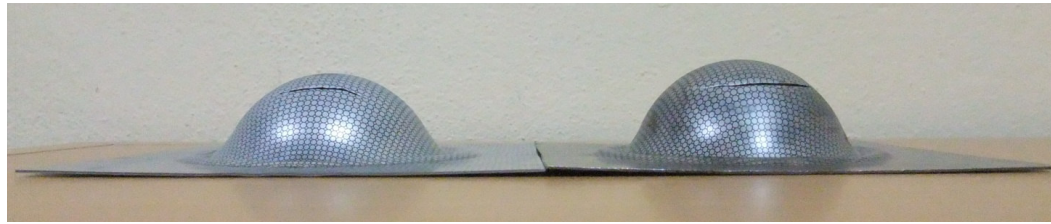
Şekil 5.13'de diyagramın sağ tarafına bakıldığında ise bu bölgede, diğer bölgelerde olduğu gibi IF malzemesinin galvanizli malzemeye göre iki eksenli sınır deformasyon değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Ancak bu bölgede ölçülen deformasyon değerlerinin geniş bir saçınım göstermesinden ötürü daha doğru bir karşılaştırma yapabilmek için malzemelerin sac çökertme yüksekliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bunun için farklı yağlayıcılarla deforme edilen iki malzemeye ait 200 x 200'lük kare numunelerin kubbe yükseklikleri çizelge 6.1 verilmektedir.

Çizelge 6.1 ERD 1313 ve ERD 7114 saclarında ölçülen kubbe yükseklikleri

Kullanılan Yağlayıcı	Kubbe Yüksekliği ERD 1313	Kubbe Yüksekliği ERD 7114-IF
Kuru	38,6 mm	40,18 mm
PVC film	41,52 mm	44,6 mm
Teflon film	40,4 mm	45 mm
Polietilen film	41,52 mm	47,4 mm
Silikon Jel	39,25 mm	41,85 mm
Silikon Spray	39,2 mm	42,55 mm
Mineral Yağ	41,63 mm	49,83 mm

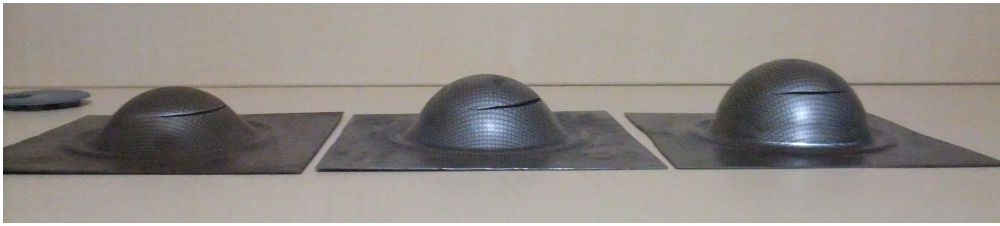
Çizelgede, IF sacının kuru halde de farklı yağlayıcılarla da galvanizli malzemeye göre daha yüksek kubbe yüksekliği değeri verdiği görülmektedir. Şekil 6.1 de ERD 1313 ve ERD 7114-IF saclarının kubbe yükseklikleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.1 ERD 1313 ve ERD 7114 saclarının kubbe yükseklikleri (sol taraftaki ERD 1313, sağ taraftaki ERD 7114, kullanılan yağ= PE film)

Bu durum, IF sacının daha iyi gererek şekillendirilebildiğini ve aynı koşullarda galvanizli saca göre daha yüksek derinlik değerlerinde hasara uğradığını göstermektedir. Elde edilen bu sonucun şekillendirme sınır diyagramlarının sağ tarafındaki sınır deformasyon değerleri ile de uyumlu olduğu görülmektedir. İki eksenli şekil değiştirme bölgesinde elde edilen bu sonuçlar malzemelerin pekleşme

üsteli (n) değeri ile açıklanmaya çalışılmaktadır. Çünkü pekleşme, şekillendirilen parçadaki şekil değişimi dağılımının kontrol edilmesinde çok önemli bir malzeme özelliği olduğu için pekleşme üstelinin (n) yüksek olması, şekil değişim bölgesinde düzgün bir gerilme dağılımının oluşmasına yardımcı olmaktadır. Pekleşmeden dolayı, daha fazla üniform şekil değişimi elde edildiğinden hasar daha geç oluşmaktadır [66]. Burada da IF sacının pekleşme üsteli değeri galvanizli malzemedan fazla olduğundan aynı koşullarda daha yüksek derinlik değerlerinde hasara uğramaktadır. Çalışmada ayrıca yağlayıcıların iki eksenli şekil değişimi üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bunun için farklı yağlayıcılarla her iki malzemenin sac çökertme yüksekliklerinin belirlenmesine ek olarak, kullanılan her bir yağlayıcı için şekillendirme sınır diyagramının sağ tarafının nasıl değiştiği belirlenmeye çalışılmıştır. İlk olarak, çizelge 6.1 de her iki malzeme için verilmiş olan sac çökertme yüksekliği değerleri incelenirse aynı malzeme için mineral yağın diğer katı esaslı yağlayıcıların tümünden çok daha iyi netice verdiği görülmektedir. Bu durum mineral yağın diğer yağlayıcılara kıyasla zımba ile sac arasında daha iyi bir film oluşturduğunu ve böylelikle metal-metal temasını azaltıp, sürtünmeyi düşürerek malzemenin şekillendirilebilirliğini arttırdığını göstermektedir. Diğer katı esaslı yağlayıcılar karşılaştırıldığında ise IF için polietilen filmin ikinci sırada olduğu, teflon ile PVC filmlerin aralarında büyük bir farkın olmadığı, silikon jel ile silikon sprayin ise en kötü performans gösterdikleri görülmüştür. Şekil 6.2 de ise yukarıda bahsedilen yağlayıcılarla çökertilen IF sacına ait numuneler karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.2 Farklı yağlayıcılarla çökertilen IF deney numuneleri (soldan sağa sırasıyla kuru, silikon esaslı jel ve mineral yağ)

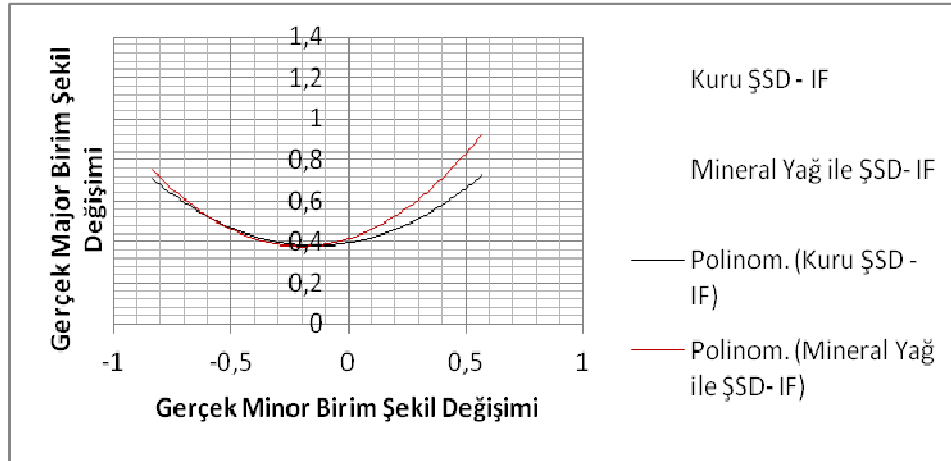
ERD 1313 malzemesi için katı yağlayıcılar karşılaştırılacak olursa polietilen filmin yine ikinci sırada olduğu, PVC ve teflon filmlerin birbirine yakın olup, silikon jel ile silikon sprayin ise yine en kötü performansa sahip oldukları görülmüştür.

Şekil 6.3’de farklı yağlayıcılarla çökertilen ERD 1313 deney numunelerinin kubbe yükseklikleri, karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 6.3 Farklı yağlayıcılarla çökertilen ERD 1313 galvanizli deney numuneleri (soldan sağa sırasıyla silikon jel, PVC ve mineral yağ)

Çalışmada yukarıda da bahsedildiği gibi yağlayıcıların diyagramın sağ tarafını nasıl değiştirdiği de incelenmiştir. Bunun için kullanılan yağlayıcılardan sac çökertme testi sonucunda en yüksek performans gösteren mineral yağın verdiği major ve minor deformasyon değerleri diyagrama taşınmış ve bu değerler arasından eğri geçirilerek, aynı malzeme için kuru halde oluşturulmuş olan şekillendirme sınır diyagramı ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.4 de IF malzemesi için sadece mineral yağ ile oluşturulmuş olan şekillendirme sınır diyagramı ile kuru halde elde edilen şekillendirme sınır diyagramları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 6.4 IF sacı için mineral yağ ve kuru halde edilen şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

Şekilde mineral yağın kullanılmasıyla, kuru hale göre daha yüksek sınır deformasyon değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Ancak deformasyon artışlarına bakıldığı zaman her iki yönde de eşit miktarda artışın olmadığı, major deformasyon yönündeki artışın minore göre daha fazla olduğu bu nedenle sağ tarafta eğrinin yukarıya doğru tırmandığı görülmektedir. Bu durum bize eşit iki eksenli şekil değişiminin

oluşturulamadığını göstermektedir. Elde edilen bu sonuç, Moshksar ve Mansorzadehin yağlayıcı etkisini göstermek amacıyla yapmış oldukları çalışma sonuçlarıyla benzer özellikte olduğu görülmüştür [24]. Bu durum, mineral yağın sac ile zımba arasında oluşturduğu filmin bir yönde etkili olup, diğer yönde ise zayıf kalması, böylelikle radyal yöndeki birim şekil değişimlerinin çevresel yöndeki birim şekil değişimlerini takip edememesiyle açıklanmaktadır. Bu nedenle sacda iki yönde de eşit uzama sağlanamamaktadır. Şekil 4.3.2 deki 200 X 200'lük numunelerin yırtılan bölgelerine bakıldığı zaman, bu bölgedeki gridlerin daha büyük bir daire yerine kısmen elipse benzeyen yumurta kabuğu şeklini alması bu sebepten kaynaklanmaktadır. 200 x 200'lük kuru halde ve yağlanmış numunelerde gerçekleşen yırtılma konumları değerlendirildiği zaman yağlanmış numunelerde oluşan yırtılmanın, kuru haldekine göre tepe noktasına daha yakın olduğu görülmüştür. Şekil 6.5 de kuru ve teflon film ile yağlanmış ERD 1313 galvanizli malzemede bu durum gösterilmektedir.



Şekil 6.5 Kuru ve teflon film ile yağlanmış numunelerde gerçekleşen yırtık konumlarının karşılaştırılması (soldaki: Teflon film ile yağlanmış, sağdaki: kuru)

Şekilden de görüldüğü gibi teflon film ile yağlanmış numunede gerçekleşen yırtık, kuru numunedekine göre tepe noktasına daha yakındır. Bu durum sürtünme ile açıklanmaktadır. Çünkü kuru numunede sürtünmenin daha fazla olması zımba üzerinde malzeme akışını geciktirmekte ve ön kısımda incelme oluşturup sacın kenar kısma doğru yırtılmasına sebebiyet vermektedir. Ancak iyi yağlama yapıldığı zaman sürtünme azaltıldığı için sac zımba etrafında daha fazla deforme olarak malzeme akışının tepe noktasına doğru ilerlemesi sağlanmakta ve yırtılma tepeye yakın bir bölgede gelişmektedir.

7. GENEL SONUÇLAR

1. Çekme deneyinin sonuçlarına göre IF (ERD 7114) malzemesi, ERD 1313 malzemesine göre akma ve çekme dayanımı daha düşük olup, kopuncaya kadar olan toplam uzaması ise daha yüksektir. Ayrıca IF malzemesinin $\sigma_{\text{çek}} / \sigma_{\text{ak}}$ daha yüksek olduğundan plastik şekillendirilme kabiliyeti ERD 1313 malzemesine göre daha iyidir.
2. Her iki sacın şekillendirme sınır diyagramları karşılaştırıldığı zaman IF sacının düzlem birim şekil değişimi ($e_2 = 0$) konumundaki major deformasyon değeri diğer malzemeye göre daha yüksektir, bu nedenle şekillendirme sınır diyagramı diğer malzemeye göre daha yukarıda kalmaktadır. Bu durum galvanizli sacda oluşan Fe-Zn intermetalik fazlara bağlanmaktadır. Çünkü oluşan bu katmanlar gevrek karakterdedir ve malzemenin şekillendirilebilirliğini düşürmektedir.
3. F sacının r değeri ERD 1313 malzemesinin r değerinden daha fazla olduğu için, şekillendirme sınır diyagramının sol tarafının eğimi diğer malzemeye göre daha yüksektir.
4. IF sacının n değerinin diğer malzemeye göre daha fazla olması bu sacın gerdirilebilirliğinin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu nedenle diyagramın sağ tarafı IF sacında daha yukarıdadır. Ayrıca farklı yağlayıcılarla yapılmış olan sac çökertme deneylerinde IF sacında elde edilen kubbe yükseklikleri galvanizli malzemeye göre daha fazladır. Bu da IF sacının daha iyi gerdirilebilir olduğunu kanıtlamaktadır.
5. Yağlayıcı olarak elde edilen şekillendirme sınır diyagramı ile kuru olarak elde edilen şekillendirme sınır diyagramı karşılaştırıldığı zaman yağlayıcı olarak elde edilen diyagramın sağ tarafının kuru olana göre daha yukarıda olduğu tespit edilmiştir. Bu durum yağlayıcı kullanılmasıyla sınır deformasyonların yükseltildiği, bölgesel incelmelerin geciktirildiği ve deformasyon dağılımının sac yüzeyinde daha üniform olarak dağıldığını göstermektedir. Ancak radyal

yöndeki deformasyon artışının çevresel yöndeki artıştan daha fazla olduğu tam olarak eşit iki eksenli şekil değişiminin oluşturulamadığı görülmüştür. Ayrıca yağlayıcı kullanılmasıyla yırtığın sacın tepe noktasına doğru yükseldiği görülmüştür.

Bu çalışma sonucunda IF (arayer atomsuz) sacın şekillendirilebilirliğinin ERD 1313 kalite kodlu sıcak daldırmayla galvanize edilmiş sacın şekillendirilebilirliğinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Galvanizli sacın şekillendirilebilirliğinin daha düşük olması bu sacda kaplamayla ana malzeme arasında oluşan gevrek karakterdeki Fe-Zn intermetalik fazlara bağlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Chung, K., Ahn,K., Yoo, D, H., Chung., K.,H., Seo.,M.,Park.,S.,H.**(2011). Formability of TWIP (twinning induced plasticity) automotive sheets, *International Journal of Plasticity*, **27**, 52-81
- [2] **Dündar, M., Keleş, Ö., Kerti, B.**(2003). Alüminyum-Yoğun Otomotiv Uygulamaları, MMO, Bursa
- [3] **Arıkan, M., Başman., G.** (2001). Otomotiv endüstrisi için yeni çelik ürünler ve özellikleri, *I.Demir Çelik Sempozyumu Bildiriler*, 350-356
- [4] **MSc Automobile Engineering- Technical developments of Materials**
- [5] **International Iron and Steel Institute** (2006). *Project reports on UltraLight Steel Auto Body* (ULSAB)
- [6] **America Iron and Steel Institute** (2003). *An investment in steel's future*, AISI Market Development
- [7] **Kleiner, M., Chatti, S., Klaus,A.** (2006). Metal Forming Techniques for Lightweight Construction, *Journal of Materials Processing Technology*, **177**,2-7
- [8] **Anderson, D.** (2008). Application and Repairability of Advanced High Strength Steels, America Iron and Steel Institute
- [9] **Zachay, F., V., Parker., R., E., Fahr., D., Bush.,R.** (1979). The Enhancement of Ductility in High Strength Steels, The Metallurgical Evolution of Stainless Steels,Editor: F.B. Picherins, by ASM and The Metal Society
- [10] **Matlock, D., K., Speer., J.G.** (2006). Proceedings of the Third International Conference on Advanced Structural Steel, 724-781
- [11] **Kwan, O., Kim, S-K.,** (2007). *Proceedings of the 21st Conference on Mechanical Behaviours of Materials*,Changwan,Korea.
- [12] **Han, H., N., Oh., C-S., Kim., G., Kwan.,O.** (2009). Design Method for TRIP-aided Multiphase Steel Based on a Microstructure-Based Modeling for Transformation Induced Plasticity and Mechanically Induced Martensitic Transformation, *Materials Science&Engineering A*,499A, 462-468
- [13] **Bakkaloğlu, A.** (2001). IF Çeliklerinin özellikleri üzerinde proses parametrelerinin etkisi, *I.Demir-Çelik Sempozyumu*,695-697
- [14] **Llewellyn, D., T., Hudd., R., C.** (1998). Steels-Metallurgy and Applications, 3rd edition 39, London, Butterworth-Heinemann
- [15] **Çapan,L.** (1999). Metallere Plastik Şekil Verme, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, p.21,129,409, 27-29

- [16] **Url-1** < [http:// www.istc.ru/istc/db/projects.nsf/we/2664](http://www.istc.ru/istc/db/projects.nsf/we/2664)>, alındığı tarih, 16.10.2010
- [17] **Gupta, K., A., Kumar., R.** (2006). Formability of galvanized interstitial-free steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology* **172**,225-237
- [18] **Gronostajski, J., Z.** (1995). Behavior of coated steel sheets in-forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, **53**,167-176
- [19] **Kumar, R.** (2002). Formability analysis of extra-deep drawing steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **53**,167-176
- [20] **Narayanasamy, R., Narayanan, S., C.** (2005). Forming limit diagram for interstitial free steels Part I, *Materials Science and Engineering A* **399**, 292-307
- [21] **Nourani, M., Aliverdilu, H., Zadeh, M.H., Khorsand, H., Shokuhfar., A., Milani, S.A.** (2010). A Study on the formability of IF and plain carbon mild steels, *Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences&Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2010*, August, Montreal, Quebec, Canada
- [22] **Safaeirad, M., Toroghinejad, M., R., Ashrafizadeh.,F.** (2008). Effect of microstructure and texture on formability and mechanical properties of hot dip galvanized steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology* **196**,205-212
- [23] **Öztürk.,F. and Lee., D.** (2005). Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test, *Journal of Materials Processing Technology* **141**, 138-142
- [24] **Moshksar, M., M., Mansorzadeh., S.** (2003). Determination of the forming limit diagram for Al 3105 sheet, *Journal of Materials Processing Technology* **141**, 138-142.
- [25] **Mielnik., E., M.** (1991). *Metalworking Science and Engineering*, McGraw-Hill, New York, p.807
- [26] **Dieter, G., E.** (1984). *Workability Testing Techniques*, ASM Yayını, Ohio, pp 149-154
- [27] **Keeler, S., P. and Backofen., W., A.** (1963). Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches, *Trans.ASM* **56**, 25-48
- [28] **Körber, F.** (1932). *J.Inst.Metals* **48**, 317-342
- [29] **Demirkol, M.** *Malzemelerin Mekanik Davranışı Ders Notları*, p.27
- [30] **Dieter, G., E.** (1988). *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, New York, p.295-296
- [31] **Mignogna, R., D'Antonia R., Maciag., C., Mukherjee., K.** (1970). The Mechanical Behavior of 6063 Aluminum, *Metallurgical and Materials Transactions* **1**, p.1771
- [32] **Nadai, A.** (1950). *Theory of Flow and Fracture of Solids*, McGraw-Hill Book Company, New York, pp.74-75

- [33] **Hosford, F., W., Caddell, M.,R.** (2007). Metal Forming Mechanics and Metallurgy, p.54
- [34] **Annual Book of ASTM Standarts** (1993). *Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal, Metals Test Methods and Analytical Procedures*, vol: 03-01, July, pp583-588
- [35] **Atkinson, M.** (1967). Assessing normal anisotropic plasticity of sheet metals *Sheet Metal Industries*, 44, p.167
- [36] **Banabic, D., H., Bunge., J., Pöhlndt., K., Tekkaya., A., E.** (2000). Formability of Metallic Materials, Springer, Berlin, p.122
- [37] **Wilson, D., V., Butler., R., D.,** (1961). The role of cup drawing test in measuring drawability, *J.Inst.Met.*, 2 (90): 473-483
- [38] **Öztürk, F.** (2002). Analysis of forming limits using ductile fracture criteria, *Doctoral Thesis*, Rensselaer Polytechnic Institute
- [39] **Gensamer, M.** (1946). Strenght and ductility, *Transactions of American Society for Metals*, 36, 30-60
- [40] **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
- [41] **Hecker, S., S.** (1975). Simple technique for determining forming limit curves, *Sheet Metal Industries* 52, 671-676
- [42] **Ragavan, K., S.** (1995). *A Simple technique to generate in-plane forming limit curves and selected applications*, Metall.Trans.A.,Vol 26 A 2075-2084
- [43] **Lewison, D., J.** (1999). An assessment of different experimental methods for determination forming limits Master's Thesis, Renssalaer Polytechnic Institute
- [44] **Nakazima, K., Kikuma.,T, Hasuka., K.** (1971). Study on the formability of steel sheets, *Yawata Tech.Rep.No 284*, 678-680
- [45] **Hasek, V.** (1973). On the strain and stress states in drawing of large unregular sheet metal components (in German). *Berchte aus dem Institut für Umformtechnik, Universitat Stuttgart*, Nr 25,Essen, Girardet
- [46] **Kokkonen, V., Hygren., G.** (1959). Investigation into accuracy of the Erichsen cupping test, *Sheet Metal Industries* 36, 167-178
- [47] **Kaftanoglu, B., Alexander, J., M.** (1962). An investigation of the Erichsen test, *J.Inst.Metals* 90, 457-470.
- [48] **Yokai, M., Alexander, J., M.** (1967). A further investigation of the Erichsen test,*Sheet Metal Industries* 44, 466-475
- [49] **Pomey, O.** (1976). Formability of thin sheet, *Collection I.R.S.I.D.-O.T.U.A I, Paris*
- [50] **Pomey, O., Parniere, P.** (1980). Formability of thin sheet, *Techniques de l'ingenieur*, Nr.1,M 695,1-16,M 696,1-19

- [51] **Fukui, S.** (1939). Researches on the deep-drawing process, *Scientific Papers of the I.P.C.R.* **34**, 1422-1527
- [52] **Waddington, E., Hobs. R., M. and Duncan, J.,L.** (1980). Comparison of a Dual Phase Steel with other formable grades, *Journal of Applied Metalworking*, **1**, 35-47
- [53] **Hasek** (1978). Research and theoretical description concerning the influences on the FLDs, *Blech Rohle Profile* **25**, 213-220
- [54] **Doege, E., Kruskja, J. U., Schroeder, M., Stock, G.** (1993). Description of cold workability of thin steel sheet by parameters determined by friction-less methods, *Blech Rohre Profile* **40**, 457-467
- [55] **Azrin, M and Backofen. W. A.** (1970). The deformation & failure of bi-axially stretched sheets, *Metallurgical and Materials Transactions*, **1**, (2957-2965)
- [56] **Keeler, S., P. and Brazier, W.,G.** (1977). Relationship between Laboratory Material Characterization and Press Shop Formability, *Microalloying* **75**, Union Carbide Corporation, New York City, 517-530
- [57] **Smith, P., E. and Lee, D.** (1988). Determination of forming limits for aluminum alloys, *Proc.Intern.Body Eng Conf.Society of Automotive Engineers*, SAE pub, vol 2, 121-128
- [58] **Grumbach, M. and Sanz, G.** (1972). Influence of various parameters on forming limit curves, *Rev de Metallurgie* **61**, 273-290
- [59] **Kikuma, T., Nakazima, K.** (1971). Aspects of deforming conditions and mechanical properties in the stretch forming limits of sheet metals, *Trans.ISIJ* **11**, 827-830
- [60] **Kim, S., B., Huh., H., Bok, H., H., Moon, M., B.** (2010). Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*
- [61] **Carasusan, E. and Canal, F.** (2003). An automated procedure for non-contact strain analysis of sheet metal parts, *Emerging Technologies and Factory Automation Proceedings*. ETFA'03, 724-731
- [62] **Öztürk, F., Dilmeç., M., Türkoç., M., Ece., R., E and Halkacı, H. S.** (2009). Grid marking and measurement methods for sheet metal formability *5th International conference and exhibition on design and production of machines and dies/molds*, Aydın, Turkey
- [63] **Joshi, M. A.** (2006). Strain studies in sheet metal stampings, *Junior research fellow*, Mechanical Engineering Department. Indian Institute of Technology.I.I.T-Bombay.pp5-6
- [64] **Kim, H., J. and Lee, D.** (1996). Further development of experimental methods to verify computer simulations, *Proceedings of Numisheet*, Dearbon, Michigan, USA, pp-316-323.
- [65] **Larsen, B.** (1974). Photo-chemical etching of circular grids, *Sheet Metal Industries*, pp.139-142

- [66] **Özenç, S.** (1995). USt 13 Derin çekme sacının şekillendirme sınır diyagramlarının teorik ve deneysel olarak saptanması, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, p.78
- [67] **Carasusan, E. and Canal, F.** (2002). Metodo de analisis de deformaciones en piezas industriales de chapa a partir de su digitalizacion 3D, *Robotica y control de procesos*, Cisci 2002, **II**, 287-292
- [68] **Carasusan, E. and Canal, F.** (2003). Development of a strain analyzer system for sheet metal stamped parts based on an optical 3D digitizer, *Machine Vision Applications in Industrial Inspection XI*.SPIE Proc. **5011**,101-111
- [69] **Carasusan, E. and Canal, F.** (2003). An Automated procedure for non-contact strain analysis of sheet metal parts, *Emerging Technologies and Factory Automation Proceedings*. ETFA'03 pp.724-731
- [70] **Dinda, S., H., F., James, S., P., Keeler and Stine, P.,A.** (1981). How to Use Circle Grid Analysis for Die Tryout, *ASM, Metals Park, Ohio*, 7-10
- [71] **Chan, H., L., Spence, A., D and Sklad, M., P.** (2005). Parallel computing for sheet metal strain analysis, *Proceedings of the 19th International Symposium on High Performance Computing and Applications*, 260-266
- [72] **Manthley, D., W. and Lee, D.** (1995). Vision-based surface strain measurement system, *JOM* **47**, pp.46-49
- [73] **Kapij, M., L, Moleski, J., Ohwue, T, Vogel, J., H. and Lee, D.** (1992). Comparison of different surface strain measurement methods used for deformed sheet metal parts, *Autobody Stamping Applications and Analysis*, **897**, 73-85
- [74] **Vogel, J., H and Lee, D.** (1990). The automated measurement of strains from three-dimensional deformed surfaces, *The Journal of Metals*, **42**, 8-13
- [75] **Grid Analyzer**, Forming Measurement Tool Innovations System Inc, Hamilton, Canada
- [76] **Yang, I., H.** (1992). Analysis of 3D shape and strain distributions of a deformable object using stereo vision, *Journal of Mechanical Science and Technology*, **8**, 107-114
- [77] **Carabajar, S., Merlin, J., Massardier., V., Chabanet, S.** (2000). Precipitation evolution during the annealing of an interstitial-free steel, *Materials Science and Engineering A281*, 32-142
- [78] **Subramanian, S., V., Priky, M., Ulabhaje, A. and Balasubramanian, K.** (1991). Thermo-Kinetic analysis of precipitation behavior of Ti stabilized interstitial free steel, *International Symposium on Interstitial-Free Steel Sheet: Processing, fabrication and properties*, Canada, August 19-20
- [79] **Kong, B., Lu, J., and Bleck, W.** (1998). *Proceedings of International Symposium on modern LC and ULC sheet steels for cold forming: Processing and Properties*, **2**, RWTH Aachen University of Technology, Aachen, Germany, 545-552

- [80] **Lanteri, S., Regle, H. and Bleck, W.** (1998). *Proceedings of International Symposium on modern LC and ULC sheet steels for cold forming: Processing and Properties*, 2, RWTH Aachen University of Technology, Aachen, Germany, 521-532
- [81] **Takechi, H. and Bleck, W.** (1998). *Proceedings of International Symposium on modern LC and ULC sheet steels for cold forming: Processing and Properties*, 2, RWTH Aachen University of Technology, Aachen, Germany, 133-144
- [82] **Xianjin, W., Yanwei, M., Yonglin, K., Di, T., Bleck, W.** (1998). *Proceedings of International Symposium on modern LC and ULC sheet steels for cold forming: Processing and Properties*, 2, RWTH Aachen University of Technology, Aachen, Germany, 27-38
- [83] **Ishigura, Y., Murayama, T., Chino, A., Sato, K., Shima, Y., Kido, A., Morita, M.** (1998). *Proceedings of 39th MWSP Conference*, ISS, 35, 255-264
- [84] **Hinotani, S., Endo, J., Takayama, T., Mizui, Y., Inokuma, Y.** (1994). *ISIJ Int.* **34**, 17-23
- [85] **Humphreys, F. J., and Hatherly, M.** (1995). *Recrystallization and related annealing phenomena*, Elsevier, Great Yarmouth, UK
- [86] **Krauss, G., Wilshynsky, D. O. and Matlock, D. K.** (1991). Processing and properties of interstitial free steels, *International Symposium on Interstitial Free Steel Sheet: Processing fabrication and properties*, Canada, August 19-20
- [87] **Mizui, N., Okamoto, A.** (1990). The effect of carbon content on the mechanical properties of continuous-annealed Al-killed sheet steels, *Sumitomo Search* **44**, 113-119
- [88] **Can, Ç., A.** (2006). *Tasarımcı Mühendisler için Malzeme Bilgisi*, Birsen Yayınevi, 169
- [89] **Dasarathy, C. and Hudd, R., C.** (1975). *Tech. Report* No. SM/PT/21/1975, B.S.C Strip Mill Division, Port Talbot Works
- [90] **Singh, R., K., P.** (1994). Effect of composition and rolling parameters on the physical and metallurgical properties of EDD low carbon Al-killed steel sheets, *Ph.D. Thesis*, Department of Metallurgical Engineering, IIT Madras, India
- [91] **Kayalı, E., S., Ensari, C., Silahıtaroğlu, S.** (1995). Derin çekme kalitesindeki saclarda özellikleri etkileyen faktörler, 3. *Ulusal Metalurji Kongresi*, ODTÜ, Ankara
- [92] **Mizui, N., Okamoto, A.** (1991). Effects of Mn content and hot band coiling temperature on deep drawability of continuous annealed Al-killed sheet steels, in *Proceedings of International Symposium on Developments in the annealing of sheet steels*, TMS Ferrous Metallurgy Committee, Cincinnati, OH, pp. 247-259

- [93] **Mizui, N., Okamoto, A.** (1991). Effects of Mn content and hot band coiling temperature on deep drawability of continuous annealed Al-killed sheet steels, in *Proceedings of International Symposium on Developments in the annealing of sheet steels*, TMS Ferrous Metallurgy Committee, Cincinnati, OH, pp.225-238.
- [94] **Mizui, N.** (1998). International Symposium on modern LC and ULC sheet steels for cold forming: processing and properties, RWTH Aachen University of Technology, Aachen, Germany, 169-178.
- [95] **Leslie, W.C.** (1981-1982). *The Physical Metallurgy of Steels*, Mc Graw-Hill, New York, 82-90.
- [96] **Akoy, M., A., Çimenoglu, H., Kayali, E. S.** (2001). Demir-Çelik Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 2, pp 37-55.
- [97] **Bleck, W., Bade, R., Hahn, F. S.** (1990). Interstitial free steels processing properties and application, *Thyssen Stahl AG Kaiser-Wilhelm*, D-4100 Duisburg 11, F.R.Germany, 73-89.
- [98] **Bakkaloğlu, A.** (2001). IF çelilerinin üretim prosesi, özellikleri ve uygulamaları, *Makine ve Metal Teknolojisi (115)*, 76-82.
- [99] **Kirmanoglu, I.** (2001). IF Çeliklerinin üretim prosesleri ve derin çekme özelliklerinin araştırılması, *Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1-78.
- [100] **Flux, J., H.** (1965). Vacuum Degassing, A Survey of process and plant for bulk steel, *Special Report No.92*, London, 1-23.
- [101] **Gupta, I., Parayil, T. and Shiang, L., T.** (1998). Effect of processing parameters on the properties of cold rolled interstitial free steels, Hot&Cold-Rolled Sheet Steels, *The Metallurgical Society*, 140-142
- [102] **Marder, A., R.** (2000). The metallurgy of zinc-coated steel, *Progress in Materials Science* 45, 191-271
- [103] **General Galvanizing Practice**, (1965). Hot dip galvanizers association
- [104] **Tek Galvaniz Ürün Kataloğu**, *Galvanizleme işleminin adımları*, 39
- [105] **Metals Test Methods and Analytical Procedures**, *Annual book of ASTM standards*, 03.01.1999, pp78-98 and 501-508
- [106] **Öztürk, F., Alkan, M.** (2009). Sıcaklık ve deformasyon hızının şekillendirilebilmeye etkisinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi, *106M058 numaralı TÜBİTAK projesi*, 23.
- [107] **Annual Book of ASTM Standards**, (1993). *Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal*, *Metals Test Methods and Analytical Procedures*, 03-01, July, 583-588
- [108] **Url-2** < http://ttconsultant.com/lazer_plazma_sujeti_kesme_yontemleri>, alındığı tarih, 18.10.2010
- [109] **Uysal, E., Öztürk, F.** (2010). Örnek bir uygulama ile yüksek mukavemetli çeliklerde şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesi, 2.Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Bora ŞENER

Doğum Yeri ve Tarihi: ISPARTA / 06.09.1984

E-Posta: bora.makina@yahoo.com.tr

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi

TEZDEN TÜRETİLEN SUNUMLAR

Şener, B (2011):. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Derin Çekme Saclarının Şekillendirilebilirliğinin Analizi *Bilecik Üniversitesi Tasarım ve İmalat Çalıştayı*, Kasım, 25, Bilecik

