

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇAMAŞIR MAKİNESİ İMALATINDA KULLANILAN ÇELİK SACLARIN
ŞEKİL ALMA KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet DOĞU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇAMAŞIR MAKİNESİ İMALATINDA KULLANILAN ÇELİK SACLARIN
ŞEKİL ALMA KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet DOĞU
(506111448)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI

OCAK 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111448 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi **Mehmet DOĞU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇAMAŞIR MAKİNESİ İMALATINDA KULLANILAN ÇELİK SACLARIN ŞEKİL ALMA KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yaman ERARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **22 Ocak 2014**

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimime başladığım ilk günden tezimi teslim ettiğim son güne kadar geçen zamanda gösterdiği ilgi ve ayırdığı zamanın yanı sıra değerli birikimi ile bana destek olan, engin bilgisini esirgemeyen, bana yol gösteren ve çalışmalarım sırasında beni teşvik eden Sayın Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş. Çamaşır Makinesi Fabrikasının desteği ile gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmalarım süresince yardımları, bilgileri ve tecrübeleri ile yanımda olan Çamaşır Makinesi Fabrikası Üretim Departmanından Sayın Fikret BATAN'a ve Çamaşır Makinesi Fabrikası Geliştirme Departmanından Sayın Utku Görkem ÜNAL'a teşekkür ederim. Ayrıca zaman zaman desteğini aldığım Fırın Fabrikası Giriş Kalite Kontrol departmanı çalışanlarına da teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın başlaması için geçen süreçte bana tüm imkanları ile yardımcı olan ve yaklaşık iki yıldır birlikte çalıştığım Teknoloji ve İnovasyon Yönetimi Departmanı çalışanlarına da ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her zaman ve her koşulda yanımda olan, bu süreçte de desteklerini ve inançlarını hissettiğim canım aileme teşekkür ederim.

Ocak 2014

Mehmet Doğu
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. METALİK SACLARI ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ	1
1.1 Kesme	2
1.2 Bükme	3
1.3 Derin Çekme	5
1.4 Sıvama	6
1.5 Gererek Şekillendirme.....	8
2. SAC ŞEKİLLENDİRMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	11
2.1 Mekanik Özelliklerin Şekillendirmeye Etkisi	11
2.1.1 Akma Mukavemeti.....	12
2.1.2 Plastik Anizotropi Katsayısı.....	13
2.1.3 Deformasyon Sertleşmesi Üssü	17
2.1.4 Deformasyon Hızı Duyarlılığı Üssü	20
2.1.5 Elastisite Modülü	22
2.1.6 Uzama	23
2.2 Malzeme Yapısının Şekillendirmeye Etkisi	24
2.2.1 Kimyasal Bileşim.....	24
2.2.2 Tane Büyüklüğü.....	26
2.2.3 Kalıntı Gerilmeler	28
2.3 Proses Değişkenlerinin Şekillendirmeye Etkisi	28
2.3.1 Deformasyon Hızı	29
2.3.2 Sıcaklık.....	31
2.3.3 Sürtünme ve Yağlama	34
2.3.4 Geometrik Faktörler	35
3. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMLARI	37
4. SAC ŞEKİLLENDİRME SIRASINDA OLUŞAN HATALAR.....	43
4.1 Kırılma	43
4.2 Kırışma ve Buruşma.....	44
4.3 Şekil Bozukluğu	45
4.4 İstenmeyen Yüzey Yapısı.....	45
4.5 Gevşek Metal.....	47
5. SAC ŞEKİLLENDİRME İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	49
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	51
6.1 Numune Seçimi ve Özellikleri	51
6.1.1 DC04 Kalite Sacın Özellikleri	53

6.1.2 DC03 Kalite Sacın Özellikleri.....	55
6.1.3 AISI-430 Kalite Sacın Özellikleri	57
6.2 Deneyler	58
6.2.1 Çekme Deneyi.....	58
6.2.2 Erichsen Çökertme Deneyi.....	60
6.2.3 Sertlik Deneyi.....	62
6.2.4 Mikro Yapı İncelemeleri	63
7. DENEYSEL SONUÇLAR.....	65
7.1 DC03 – DC04 Kalite Sacların Test Sonuçları	65
7.1.1 Çekme Testi Sonuçları	65
7.1.2 Erichsen Çökertme Testi Sonuçları.....	71
7.1.3 Sertlik Testi Sonuçları.....	73
7.1.4 Mikro Yapı Analiz Sonuçları	75
7.1.5 Şekillendirme Sınır Diyagramı Çalışmaları	76
7.2 AISI – 430 Kalite Sacların Test Sonuçları	78
7.2.1 Çekme Testi Sonuçları	78
7.2.2 Erichsen Çökertme Testi Sonuçları.....	85
7.2.3 Sertlik Testi Sonuçları.....	87
7.2.4 Mikro Yapı Analiz Sonuçları	88
8. YORUMLAR VE ÖNERİLER.....	91
9. GENEL SONUÇLAR	95
KAYNAKLAR.....	97
EKLER.....	101
ÖZGEÇMİŞ	107

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
HSLA	: High Strength Low Alloy
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
SPH	: Sıkı Paket Hekzagonal
�SD	: �killendirme Sınır Diyagramı
FEM	: Finite Element Method
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
EN	: European Norms
AISI	: American Iron and Steel Institute
DIN	: Deutsche Institut für Normung
ISO	: International Organization for Standardization

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çeşitli saclara ait dikey anizotropi katsayısı.....	16
Çizelge 2.2 : Tavlanmış çeşitli metalik malzemelerin oda sıcaklığındaki deformasyon sertleşmesi üssü (n) ve mukavemet katsayısı (K) değerleri.....	19
Çizelge 6.1 : (a) Borçelik firmasına ait DC03 ve DC04 kalite saclardan alınan numunelerin gösterimi. (b) AISI-430 kalite paslanmaz çeliğin üç farklı firmadan alınan numunelerine ait gösterim..	53
Çizelge 6.2 : F03 gövde üretiminde kullanılan DC04 kalite sacın bilgileri	54
Çizelge 6.3 : F03 üretiminde kullanılan DC04 kalite sacın mekanik özellikleri.....	54
Çizelge 6.4 : F03 üretiminde kullanılan DC04 kalite sacın kimyasal özellikleri	54
Çizelge 6.5 : F14 gövde üretiminde kullanılan DC03 kalite sacın bilgileri	56
Çizelge 6.6 : F14 üretiminde kullanılan DC03 kalite sacın mekanik özellikleri.....	56
Çizelge 6.7 : F14 üretiminde kullanılan DC03 kalite sacın kimyasal özellikleri	56
Çizelge 6.8 : F03 tambur üretiminde kullanılan X6Cr17 kalite sacın bilgileri	58
Çizelge 6.9 : F03 üretiminde kullanılan X6Cr17 kalite sacın mekanik özellikleri ...	58
Çizelge 6.10 : F03 üretiminde kullanılan X6Cr17 kalite sacın kimyasal özellikleri.	58
Çizelge 7.1 : DC03 kalite sacın çekme testi sonuçları.....	66
Çizelge 7.2 : DC04 kalite sacın çekme testi sonuçları.....	67
Çizelge 7.3 : DC03 – DC04 kalite sacların ortalama dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi sonuçları.	71
Çizelge 7.4 : DC03 – DC04 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları	73
Çizelge 7.5 : DC03 – DC04 kalite sacların Vickers sertlik deneyi sonuçları.....	74
Çizelge 7.6 : ThyssenKrupp marka AISI - 430 kalite sacların çekme testi sonuçları	78
Çizelge 7.7 : Columbus marka AISI - 430 kalite sacların çekme testi sonuçları	79
Çizelge 7.8 : Outokumpu marka AISI - 430 kalite sacların çekme testi sonuçları....	80
Çizelge 7.9 : AISI - 430 kalite sacların ortalama dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi sonuçları	84
Çizelge 7.10 : AISI - 430 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları	86
Çizelge 7.11 : AISI - 430 kalite sacların Vickers sertlik deneyi sonuçları.....	87
Çizelge A.1 : DC03 kalite sacların anizotropi katsayısı analiz sonuçları.	100
Çizelge A.2 : DC04 kalite sacların anizotropi katsayısı analiz sonuçları.....	101
Çizelge A.3 : AISI - 430 kalite sacların anizotropi katsayısı analiz sonuçları.	102
Çizelge A.4 : DC03 ve DC04 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları.	103
Çizelge A.5 : AISI - 430 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları.	104

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Mekanik prese ait şematik görüntü.	1
Şekil 1.2 : Kesme prosesine ait şematik görüntü ve zımba – kalıp arası mesafenin kesme prosesine etkisi.	2
Şekil 1.3 : Bükme işleminde genişlik/kalınlık oranının iki eksenli gerilme hali ve dolayısıyla malzemenin bükülebilme kabiliyetine etkisi	3
Şekil 1.4 : Bükme genişliğinin orta kısmında çatlak oluşumu	4
Şekil 1.5 : Geri yaylanma olayının şematik gösterilişi	5
Şekil 1.6 : Derin çekme prosesinin şematik gösterilişi	5
Şekil 1.7 : Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerdeki gerilme durumu	6
Şekil 1.8 : Sıvama işleminin şematik gösterilişi. (a) Elle sıvama (b) Kesme kuvveti ile sıvama	7
Şekil 1.9 : Boru sıvama işleminin şematik gösterimi	7
Şekil 1.10 : Gererek şekillendirme işlemine ait örnekler	8
Şekil 2.1 : Farklı metallere ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri	12
Şekil 2.2 : Aynı kalınlıkta fakat farklı akma mukavemetine sahip düşük karbonlu çeliklere ait şekillendirme sınır diyagramı	13
Şekil 2.3 : Deney numunesinin yönüne göre anizotropi katsayısının tanımı	14
Şekil 2.4 : Anizotropi katsayısının çekme deneyi ile ölçümü	15
Şekil 2.5 : Düşük karbonlu çeliklerde tane boyutunun ortalama dikey anizotropi katsayısına etkisi	16
Şekil 2.6 : Kulaklanmaya ait örnek, ferritik paslanmaz çelik X6Cr17	17
Şekil 2.7 : Deformasyon sertleşmesi üssü değerinin tayini	18
Şekil 2.8 : Düşük karbonlu çelik sacda, deformasyon sertleşmesi üssünün düzlem şekil değişimi noktasına etkisi	20
Şekil 2.9 : Farklı deformasyon hızı ile yapılan deneylerden deformasyon hızı duyarlılığı üssünün tayini	21
Şekil 2.10 : Deformasyon hızını değiştirme deneyi	21
Şekil 2.11 : Elastisite modülünün gerilme – birim şekil değiştirme diyagramından tayini	23
Şekil 2.12 : Üniform uzama ve kopma uzamasının gösterimi	23
Şekil 2.13 : Kaymanın bir taneden diğer taneye iletilmesi	27
Şekil 2.14 : Deformasyon hızının çekme eğrisine etkisinin şematik gösterilişi	29
Şekil 2.15 : Çeşitli sıcaklıklarda çekme mukavemetine deformasyon hızının etkisi	30
Şekil 2.16 : Farklı kristallografik yapıdaki malzemelerde deformasyon hızı ile çekme mukavemetinin değişimi	31
Şekil 2.17 : Az karbonlu bir çeliğin çekme diyagramına sıcaklığın etkisi	31
Şekil 2.18 : Malzemelerin mekanik özelliklerine sıcaklığın etkisi	32
Şekil 2.19 : Çeşitli malzemelerde σ/E değerinin benzeş sıcaklık T/T_m ile değişimi ..	32
Şekil 2.20 : a) Transgranüler kırılma (taneleri keserek kırılma) b) İntergranüler kırılma (taneler arası kırılma)	32
Şekil 2.21 : Sürtünme kuvvetinin tanımlanması	34
Şekil 2.22 : Aynı kompozisyona sahip düşük karbonlu çeliklerde şekillendirme sınır diyagramının kalınlıkla değişimi	36
Şekil 3.1 : Şekillendirme sınır diyagramı örneği	37
Şekil 3.2 : Şekillendirme sınır eğrilerini belirlemek için numune örnekleri	38
Şekil 3.3 : Mylar bandına ait örnek	39

Şekil 3.4 : Dijital kameralara ait örnekler	39
Şekil 3.5 : Şekillendirme sınır diyagramının elde edilişi (a) deformasyon öncesi dairesel ağ yapısı, (b) deformasyon sonrası kırılma bölgesindeki dairesel ağ yapısı, (c) kullanılan test numuneleri ve (d) şekillendirme sınır diyagramı gösterilmektedir	40
Şekil 3.6 : Şekillendirme sınır diyagramının kullanımı	41
Şekil 3.7 : Farklı metallere ait şekillendirme sınır diyagramları	42
Şekil 4.1 : (a) Çamaşır makinesi tambur ön sacında oluşan kırılma örneği. (b) Fırın çekmece esas sacında oluşan kırılma örneği	43
Şekil 4.2 : Çamaşır makinesi tambur arka sacında meydana gelen kırılmaya ait bir örnek	44
Şekil 4.3 : Metal yüzeyinde portakal kabuğu hatasının görünümü	45
Şekil 4.4 : Az karbonlu bir çeliğe ait çekme deneyi eğrileri	46
Şekil 4.5 : Az karbonlu çelik sacda Lüders bantları	46
Şekil 6.1 : a) F03 model çamaşır makinesi gövdesi, b) F14 model çamaşır makinesi gövdesi, c) Ön sac, arka sac ve çevre sacının birleştirme hattında birleştirilmesi ile elde edilen tambur örneği	51
Şekil 6.2 : F03 model çamaşır makinesine ait metal parçalar	54
Şekil 6.3 : F14 model çamaşır makinesine ait metal parçalar	56
Şekil 6.4 : F03 model çamaşır makinesine ait tambur parçaları, (a) önden görünüş, (b) arkadan görünüş	58
Şekil 6.5 : Zwick Z020 model çekme cihazı ve ekstansometre	59
Şekil 6.6 : Çekme numunesinin çıkartılmasında kullanılan sac kesme kalıbı	59
Şekil 6.7 : Çekme numunesi boyutları	59
Şekil 6.8 : Rulo başı, ortası ve sonundan alınan çekme numunelerine ait örnekler ..	60
Şekil 6.9 : Erichsen çökertme testi cihazı	61
Şekil 6.10 : Erichsen çökertme testi sonucunda elde edilen numune görünümü	61
Şekil 6.11 : Vickers sertlik deneyi deney prensibi	62
Şekil 6.12 : Shimadzu marka Vickers sertlik cihazı ve elde edilen ize ait görüntü ...	62
Şekil 6.13 : Sırasıyla bakalite alma, zımparalama ve parlatma işlemlerinin gerçekleştirildiği cihazlar	63
Şekil 6.14 : Bakalite alınmış numuneye ait örnek	64
Şekil 6.15 : Mikro yapı incelemelerinin gerçekleştirildiği optik mikroskop	64
Şekil 7.1 : DC03 – DC04 kalite sacların akma mukavemetleri sonuçları	67
Şekil 7.2 : DC03 – DC04 kalite sacların çekme mukavemetleri sonuçları	68
Şekil 7.3 : DC03 – DC04 kalite sacların toplam uzama sonuçları	69
Şekil 7.4 : DC03 – DC04 kalite sacların deformasyon sertleşmesi üssü sonuçları ...	70
Şekil 7.5 : DC03 – DC04 kalite sacların ortalama dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi sonuçları	71
Şekil 7.6 : DC03 – DC04 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları	72
Şekil 7.7 : DC03 – DC04 kalite sacların Vickers sertlik deneyi sonuçları	74
Şekil 7.8 : 20X büyütme tane boyutu fotoğrafları, DC03 a) Rulo 1, b) Rulo 2, c) Rulo 3 ve DC04 d) Rulo 1, e) Rulo 2, f) Rulo 3	75
Şekil 7.9 : 50X büyütme tane boyutu fotoğrafları, DC03 a) Rulo 1, b) Rulo 2, c) Rulo 3 ve DC04 d) Rulo 1, e) Rulo 2, f) Rulo 3	75
Şekil 7.10 : Şekillendirme sınır diyagramında 1. Ruloların gösterimi	76
Şekil 7.11 : Şekillendirme sınır diyagramında 2. Ruloların gösterimi	77
Şekil 7.12 : Şekillendirme sınır diyagramında 3. Ruloların gösterimi	77
Şekil 7.13 : AISI – 430 kalite sacların akma mukavemeti sonuçları	80
Şekil 7.14 : AISI – 430 kalite sacların çekme mukavemeti sonuçları	81

Şekil 7.15 :	Columbus marka saca ait çekme eğrileri örneği a) Rulo 1, b) Rulo 2 ...	82
Şekil 7.16 :	AISI – 430 kalite sacların toplam uzama sonuçları.....	83
Şekil 7.17 :	AISI – 430 kalite sacların deformasyon sertleşmesi üssü sonuçları	83
Şekil 7.18 :	AISI – 430 kalite sacların ortalama dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi sonuçları	85
Şekil 7.19 :	AISI – 430 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları.....	86
Şekil 7.20 :	AISI – 430 kalite sacların Vickers sertlik deneyi sonuçları	87
Şekil 7.21 :	20X büyütme tane boyutu fotoğrafları, Columbus marka a) Rulo 1, b) Rulo 2, ThyssenKrupp marka c) Rulo 1, d) Rulo 2 ve Outokumpu marka e) Rulo 1, f) Rulo 2.....	88
Şekil 7.22 :	50X büyütme tane boyutu fotoğrafları, Columbus marka a) Rulo 1, b) Rulo 2, ThyssenKrupp marka c) Rulo 1, d) Rulo 2 ve Outokumpu marka e) Rulo 1, f) Rulo 2.....	89

ÇAMAŞIR MAKİNESİ İMALATINDA KULLANILAN ÇELİK SACLARIN ŞEKİL ALMA KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Şekillenebilirlik, malzemenin şekillendirme yöntemleri ile istenilen şekli alma kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Bu özellik malzemenin mekanik özellikleri, malzemenin yapısı ve proses değişkenleri gibi birçok etkene bağlı olarak değişmektedir. Üretim açısından şekillendirme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için bu özelliklerin tespit edilmesi ve doğru olarak yorumlanması önemlidir. Günümüzde şekil alma kabiliyetinin incelenmesi alanında yaygın olarak kullanılmakta olan şekillendirme sınır diyagramları, bu özelliklerin yorumlanmasında büyük kolaylık sağlamaktadır ve sacın başarılı bir şekilde üretilmesini sağlayacak bilgiler vermektedir.

Tez kapsamında öncelikle yaygın olarak kullanılmakta olan şekillendirme yöntemleri incelenmiştir. Daha sonra şekillendirmeyi etkileyen faktörler, şekillendirme sınır diyagramları, şekillendirme sırasında oluşan hatalar ve literatürde yapılan çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, beyaz eşya üretiminde yaygın olarak kullanılmakta olan düşük karbonlu DC03, DC04 kalite saclar ve AISI – 430 kalite paslanmaz çelikler incelenmiştir. Her bir kalite sac için çekme deneyi, Erichsen çökertme deneyi, sertlik deneyi ve mikro yapı analizi gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda akma mukavemeti, çekme mukavemeti, toplam uzama, deformasyon sertleşmesi üssü, dikey anizotropi katsayısı, Erichsen çökertme derinliği, sertlik değeri ve mikro yapı resimleri elde edilmiştir.

Çalışmanın amacı DC03 ve DC04 kalite saclar için mekanik özelliklerini tayin etmek ve kıyaslamaktır. Çamaşır makinesi gövdesinde kullanılan bu saclardan DC04 kalite sac yerine DC03 kalite sacın kullanılabilirliğini araştırmak ve bu değişiklik ile üretimde karlılık elde edebilmektir. Paslanmaz çelik gurubu için ise amaç farklı üreticilerden alınan sacların mekanik özelliklerini belirlemek ve üretim açısından uygunluklarını belirlemektedir.

Deneyler sonucunda DC03 ve DC04 kalite sacların standartlarda belirtilen şartları sağladıkları tespit edilmiştir. Bunun yanında incelenen rulolar arasında mekanik özellikleri açısından fark olmaması, çökertme derinliklerinin ve kuvvetlerinin yakın olması, tane boyutlarının benzer olması gibi sebeplerden dolayı DC04 kalite sacdan DC03 kaliteye geçilebileceği uygun görülmüştür. Ayrıca şekillendirme sınır diyagramlarında sınır noktaları her iki kalite sac için de yakın elde edilmiştir. Bu durum deformasyon sertleşmesi üssü ve şekillendirme sınır diyagramları ile desteklenmiştir.

Paslanmaz çelik gurubunda incelenen saclarda mekanik özelliklerin rulodan ruloya değişimleri tespit edilmiştir. Bu özellikler açısından en kararlı sonuçlar Outokumpu marka saclardan elde edilmiştir ve bu marka sacların üretimde kullanılmasının daha doğru olacağı sonucuna varılmıştır.

ANALYSIS OF FORMABILITY PROPERTIES OF STEEL SHEETS USED IN WASHING MACHINE PRODUCTION

SUMMARY

Sheet metal forming is mainly a tensile process that may be limited by necking, fracture or wrinkling. The science and art of sheet forming is to achieve the required final shape without producing strains that approach any of these limits. Forming limit diagram (FLD) has been developed for decades and is widely used in industry as a useful tool for predicting limits of sheet forming operations. In bulk – deformation processes such as forging, rolling, extrusion and wire drawing the thickness or the lateral dimensions of the workpiece are intentionally changed, whereas in most sheet metal forming processes, any change in the thickness is due to stretching of the sheet under tensile stresses. Thickness decreases in sheet forming generally should be avoided, as they can lead to necking and failure. Metallic sheets are formed in the shapes ranging from white goods to automobile components. The failures caused by the breaking or the localized necking of the sheet during the forming process and this situation affects the economy, continuity and quality of the production in a negative way. The key to a successful forming process is to obtain as uniform strain distribution as possible while keeping the strain applied to the material under the critical strain limit that causes failure. These strain limits are represented best by the concept of a forming limit diagram. Formability is defined as material forming ability of a desired shape with the forming processes. This ability varies on several factors such as mechanical properties of material, structure of material and process parameters. For a successful production, determination and interpretation of these properties are very important.

Firstly in the thesis, sheet forming processes which are widely used have been studied. Sheet metals are generally characterized by a high ratio of surface area to thickness. Forming of sheet metals generally is carried out by tensile forces in the plane of the sheet; otherwise, the application of compressive forces could lead to buckling and wrinkling of the sheet. Some shortly information are given about shearing, bending, deep drawing, spinning and stretch forming processes. After that, the thesis contains some information about the main factors affecting the forming of the steel sheets are classified into three groups. These groups are mechanical properties, material structure and process parameters in forming processes. In the first section the effects of mechanical properties on forming are considered; yield strength, plastic anisotropy constant, strain hardening exponent, strain – rate hardening exponent, elasticity modulus and elongation. The main factors affecting forming are described further in the second section as well as the parameters related to the materials structure. Effects of chemical composition, grain size and residual stresses are considered in this section. The main factors affecting forming are described the last section as well as the parameters related to the process. Effects of deformation rate, temperature, friction, lubrication and geometrical factors are considered in this section. In forming limit diagrams topic there are some

information about how to use and how to create this diagrams. In other topic is about the failures in sheet metal forming processes. Under this topic, there are some information are given about fracture, buckling and wrinkling, shape distortion, orange peel, stretch – strain markings, springback and loose metal. These are most common consisted failures in sheet metal forming processes. Studies related with sheet metal forming processes in literature have been shared as a last topic of the theoretical part of the thesis.

In experimental part, side panel and drum production unit used in the washing machines produced in BSH Home Appliances, is chosen as the application area. DC03 – DC04 grade low carbon steel sheets which are used in side panel production and AISI – 430 grade stainless steel sheets which is widely used in the production of drum have been analyzed. Tensile test, Erichsen cupping test, hardness test and microstructure analysis are applied for each quality of steel sheets. Tensile tests' samples are taken from different part of coils and different rolling directions. Tensile tests are completed in accordance with the TS EN ISO 6892-1 standart. Zwick brand tensile test machine are used in tensile tests and yield strenght, tensile strenght, elongation % are automatically obtained from this machine. Erichsen Cupping Test are taken from middle of the coils. Erichsen brand cupping machine are used in this test. When samples are fractured, the depth and the force are noted to compare formability properties of the steels. The standart using in Erichsen Cupping test is TS EN ISO 20482. Hardness test of steel sheets are measured with Vickers Hardness method and accordance with the TS EN ISO 6507-1 standart. Samples are belong to middle of the coils. Samples are retested and compared with tensile test results to see if it is suitable. The last analysis in experimental part is micro structure analysis. All of the samples are grinded with 600, 1000 and 2500 grade grinds, after that samples are polished with. Nital 2 used in DC03 – DC04 grade steels and 15 ml hydrochloric acid, 10 ml hydrogen peroxide and 30 ml ethanol solution used in AISI - 430 grade steels for etching. At last, micro structure pictures are taken after this applications. Shimadzu brand microscope are used in takin microstructure pictures. By using this microscope 20X and 50X scale pictures have been obtained. And as a result of these tests, yield strength, tensile strength, elongation %, strain hardening exponent, plastic anisotropy constant, Erichsen cupping depth, hardness and microstructure pictures has been obtained.

Aim of this thesis, by the help of experimental study, is to analyze the formability properties and mechanical properties of steel sheets that are used in washing machine production. Selection and cost optimization of new materials for production with decreasing steel grade was also another objective to attain. To accomplish these two objectives, it had been used two different working method. Firstly, DC03 and DC04 grade steel sheets from the same company are chosen to compare. In this way, the aim was to identify formability properties and mechanical properties of different grade steels of the same company. In the second method, sheet samples taken from different coils, produced by various companies are compared to determine the differences between them. In this stage, the material of washing machine drums, AISI - 430 grade stainless steel is used.

DC03 and DC04 grade steel sheet samples are taken from three different coil and produced from same company as it is mentioned before. The test result are shared separated based on grades.

DC03 grade steel sheet test results are given below. This results are average of three coils for each steel grade. sheets. These are the tensile test results; Yield Strenght is 194,83 MPa, Tensile Strenght is 332,58 MPa, Elongation % is 39,34 %, Strain Hardening Exponent is 0,2199 and Plastic Anisotropy Constant is 1,1508. Erichsen Cupping Test result is 11,33 mm depth. Vickers Hardness test results is 106,18 HV1.

DC04 grade steel sheet test results are given below. This results are average of three coils for each steel grade. sheets. These are the tensile test results; Yield Strenght is 176,08 MPa, Tensile Strenght is 308,75 MPa, Elongation % is 40,76 %, Strain Hardening Exponent is 0,2272 and Plastic Anisotropy Constant is 0,9418. Erichsen Cupping Test result is 11,46 mm depth. Vickers Hardness test results is 99,31 HV1. DC03 and DC04 grade steels tests results provided the conditions specified in the standarts. Furthermore, between examined coils, the tests results shown that there were no differences in their mechanical properties, Erichsen cupping depth and strength, and micro structures. As a consequence of these reasons, in side panels of washing machines decreasing steel grade from DC04 to DC03 has been found appropriate. These results have been also supported by strain hardening exponents and forming limit diagrams. With this way there could be possible to make some profit which is desired in the industry. Also it should be notted; this method could applied in other parts of the washing machine appliances which are produced with DC04 grade steel sheets to decrease the DC03. Decresing other parts to lower steel grade could lead to make more profit.

The samples for tests are taken from the 0,4 mm thick AISI - 430 quality stainless steel sheets used in production. Tensile tests are performed with the samples taken in the direction of rolling, 45° from the rolling direction and transverse to the rolling direction. Erichsen Cupping test results are also used in analysis. Also, these samples belong to two diffent coils from three different producer.

Thyssen Krupp brand AISI – 430 grade steel sheet test results are given below. This results are average of two coils for each steel grade. sheets. These are the tensile test results; Yield Strenght is 325,67 MPa, Tensile Strenght is 513,17 MPa, Elongation % is 25,97 %, Strain Hardening Exponent is 0,2395 and Plastic Anisotropy Constant is 0,5451. Erichsen Cupping Test result is 8,85 mm depth. Vickers Hardness test results is 160,69 HV1.

Columbus brand AISI – 430 grade steel sheet test results are given below. This results are average of two coils for each steel grade. sheets. These are the tensile test results; Yield Strenght is 328,88 MPa, Tensile Strenght is 474,46 MPa, Elongation % is 26,60 %, Strain Hardening Exponent is 0,1864 and Plastic Anisotropy Constant is 0,7663. Erichsen Cupping Test result is 8,42 mm depth. Vickers Hardness test results is 157,36 HV1.

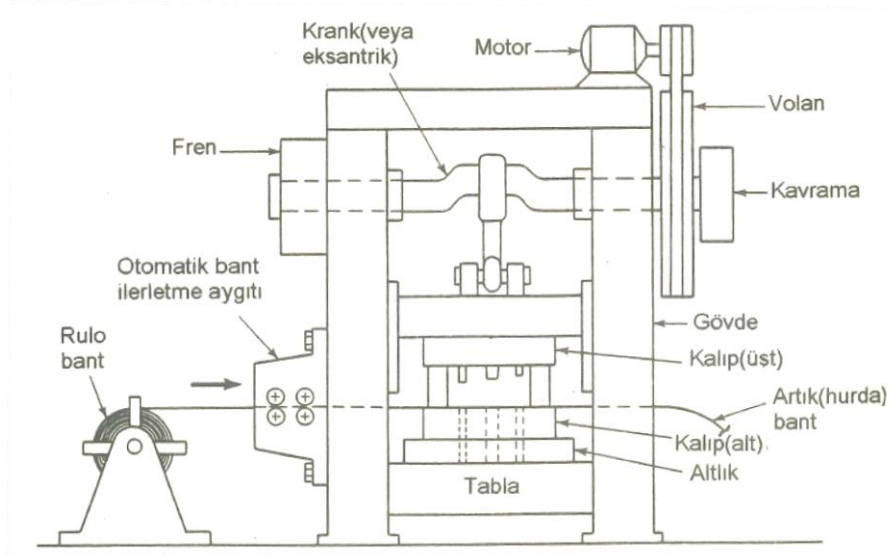
Outokumpu brand AISI – 430 grade steel sheet test results are given below. This results are average of two coils for each steel grade. sheets. These are the tensile test results; Yield Strenght is 303,96 MPa, Tensile Strenght is 477,92 MPa, Elongation % is 25,58 %, Strain Hardening Exponent is 0,2339 and Plastic Anisotropy Constant is 0,4851. Erichsen Cupping Test result is 8,68 mm depth. Vickers Hardness test results is 151,71 HV1.

As a result of these studies is that, mechanical properties of stainless steels depends from coil to coil and from direction to direction. Most stable results are obtained from Outokumpu brand and this brand of steel sheets would be more appropriate for use in the production.

1. METALİK SAÇLARI ŞEKİLENDİRME YÖNTEMLERİ

Sac metal malzemeler otomotiv, havacılık, uzay ve beyaz eşya gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. 20. yüzyılda, metallere şekil verme yöntemleri arasında en hızlı gelişme metalik saçları şekillendirme yöntemlerinde görülmüştür. Düz saçları, yüksek üretim hızlarında ekonomik olarak ve çok değişik şekillerde şekillendirmek, bu şekillendirme yöntemlerinin yaygınlaşmasını ve gelişmesini sağlamıştır.

Sac şekillendirme işlemlerinde kalıplar genellikle iki parçadan oluşur. Birincisi çıkıntılı bir şekle sahiptir ve “zımba” (punch) adını alır. İkincisi ise girintili bir şekle sahip olup, sadece “kalıp” (die) diye adlandırılır. Zımba için “ıstampa” veya “erkek kalıp”, kalıp için “matris” veya “dişi kalıp” terimleri de kullanılmaktadır. Çoğu kez metalik sacı kalıp çevresince sıkıştırarak şekillendirme esnasında, kırışmasına engel olacak yardımcı kalıba gerek vardır. Bu kalıp “sıkıştırma kalıbı” veya “pot çemberi” diye adlandırılır. Saclara şekil verme işlemlerinde kullanılmak amacıyla çeşitli tipte presler geliştirilmiştir. Bu preslerden mekanik prese ait şematik görüntü Şekil 1.1’ de görülmektedir [1-3].



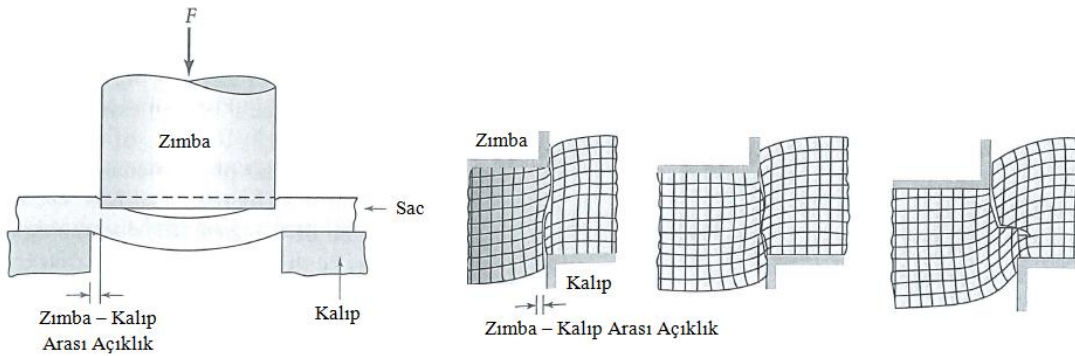
Şekil 1.1 : Mekanik prese ait şematik görüntü [2].

Sac şekillendirme yöntemleri kesme, bükme, sıvama, gererek şekillendirme ve derin çekme diye sınıflandırılabilirler. Karmaşık şekilli parçalar, uygun kalıplar kullanılarak bu işlemlerin birden fazlasının presin tek bir çevrimi esnasında arka arkaya uygulanması ile hızlı ve ekonomik olarak üretilebilirler [1].

1.1 Kesme

Kesme, metalik sacların kullanıldığı imalat endüstrisinde çok uygulanan bir ayırma ve şekillendirme işlemidir. Saclarla ilgili imalat yöntemlerinde daha fazla kullanıldığı için kesme işlemi genellikle bir sac şekillendirme yöntemi olarak tanınır. Kesme; ayırma, taslak kesme, delme, çentik açma, yarma, çapak kesme gibi işlemlerle metalik sac ve levhaları son boyutlarına getirmede kullanılır [1].

Kesme kuvveti, kesme hızı, yağlama, kesme yüzey kalitesi, zımba ve kalıp malzemesi, zımba ve kalıp köşe yuvarlatma miktarı ve zımba – kalıp arası açıklık kesme prosesindeki temel değişkenlerdir. Zımba – kalıp arası açıklık kesme yüzey kalitesini belirleyen en önemli faktördür. Zımba – kalıp arası açıklık arttıkça kesme yüzeyi daha sert ve deformasyon bölgesi daha büyük olur. Eğer, zımba – kalıp arası açıklık çok büyük ise, sac metal kesme kuvvetine maruz kalacak iken çekme kuvvetlerine maruz kalır ve bükülür. Pratikte, zımba – kalıp arası açıklık sac metalin kalınlığının %2'si ile %10'u arasında değişmektedir [4].



Şekil 1.2 : Kesme prosesine ait şematik görüntü ve zımba – kalıp arası mesafenin kesme prosesine etkisi [4].

Kesme işlemlerinde, kesme kuvveti bir diğer önemli etkidir. Kesme işlemlerinde kuvvet hesabı aşağıdaki bağıntıyla yaklaşık olarak yapılabilir:

$$P_k = 0.7 \times \sigma_{\zeta} \times h \times l \quad (1.1)$$

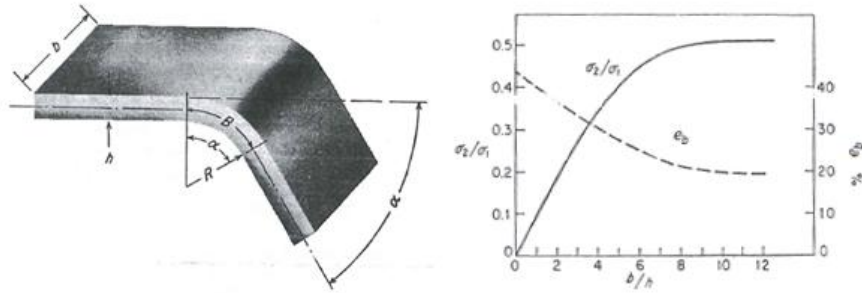
Burada :

- P_k : Kesme kuvveti
 σ_{ζ} : Malzemenin çekme gerilmesi
 h : Malzeme kalınlığı
 l : Kesme uzunluğu

dur.

1.2 Bükme

Bükme, en yaygın uygulanan sac şekillendirme yöntemlerinden biridir. Seri imalatındaki en küçük parçanın üretiminden gemi yapımındaki veya büyük makinelerdeki tek bir parçanın üretimine kadar geniş bir alanda kullanılabilir. Sac malzemelere ek olarak boru, şerit, tel ve çubuk şeklindeki parçalar da bükme yöntemiyle şekillendirilebilir [5].

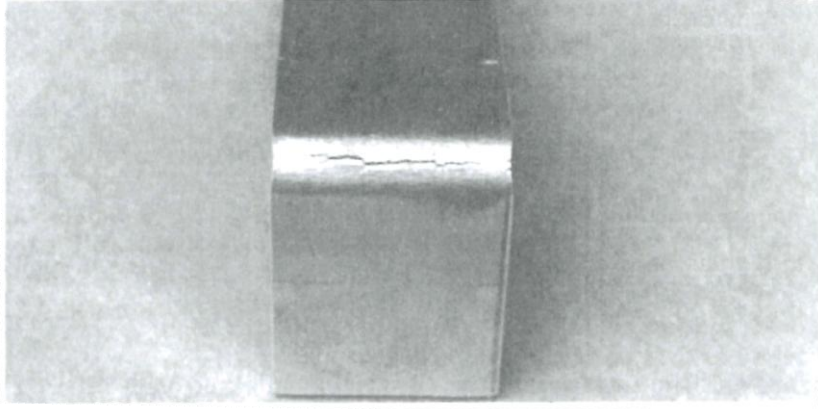


Şekil 1.3 : Bükme işleminde genişlik/kalınlık oranının iki eksenli gerilme hali ve dolayısıyla malzemenin bükülebilme kabiliyetine etkisi [6].

Malzemenin çatlamadan bükülebilmesi için bükme yarıçapı belirli bir değerden küçük tutulamaz. En küçük bükme yarıçapı genellikle sacın kalınlığının katlarıyla ifade edilir. Buna bağlı olarak en küçük bükme yarıçapı şekillendirme sınırını oluşturur. Bu sınır büyük ölçüde malzemeden malzemeye değişir ve soğuk işlem görmüş metallerde her zaman artar. Bazı sünek metallerde bu değer sıfır alınabilir, yani metal kendi üzerine katlanabilir. Fakat genel bir uygulama olarak bükme yarıçapı zımba ve kalıba zarar vermemek için 1 mm' den küçük alınmaz. Yüksek

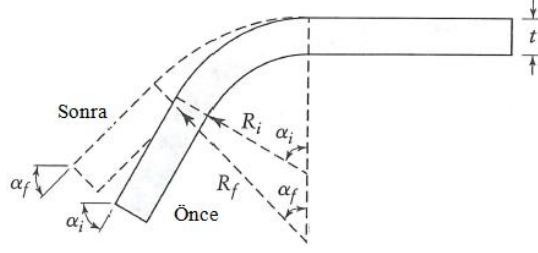
mukavemetli saclarda en küçük bükme yarıçapı kalınlığın 5 katı veya daha büyük olabilir [6].

Bükme işleminde dış yüzeyin şekil değiştirme kabiliyeti, yüzeydeki gerilme – birim şekil değiştirme durumuna bağlıdır. Daha önce belirtildiği gibi iki eksenli çekme gerilmesinin olduğu durumlarda, metalin şekil değiştirme kabiliyeti oldukça azalır. Bükülen parçada genişlik/kalınlık (b/h) oranı arttıkça, iki eksenli çekme gerilmesinde σ_2/σ_1 oranı artar. Burada σ_1 çevresel çekme gerilmesi, σ_2 ona dik yöndeki çekme gerilmesidir. b/h oranı küçük iken gerilme durumu daha çok tek eksenli çekme haline benzer durumdadır. b/h oranı arttıkça σ_2/σ_1 oranı artar ve sonunda $b/h = 8$ değerinden sonra $\sigma_2/\sigma_1 = 0,5$ sabit değerine ulaşır. Kırılma olmaksızın malzemeden sağlanabilen maksimum şekil değiştirme miktarı ise b/h ile ters orantılı olarak değişir. b/h oranı büyük ise aşırı plastik şekil değiştirme durumunda çatlak, bükme genişliğinin orta kısmında görülür. Ancak malzemenin kenarları düzgün işlenmeyip kaba durumda ise kenar çatlaklarına rastlanabilir. Genişliği az olan malzemelerin bükülmesinde çatlak oluşursa, genellikle kenar çatlağı halindedir. Çünkü bu durumda genişliğin orta kısmında iki eksenli çekme gerilmesi durumu ihmal edilecek kadar zayıftır [1].



Şekil 1.4 : Bükme genişliğinin orta kısmında çatlak oluşumu [4].

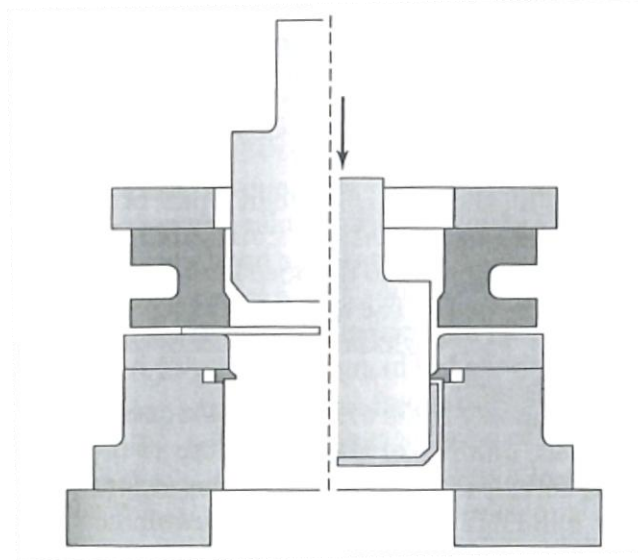
Bükme işleminde geri yaylanma (springback) karşılaşılan bir diğer sorundur. Şekillendirme işleminde takımın parçadan ayrılması sonucu elastik toparlanmadan dolayı bükme açısı ve bükme yarıçapı büyür. Sac şekillendirme işlemlerinde en çok bükme işleminde görülen bu olay geri yaylanma olarak bilinir.



Şekil 1.5 : Geri yaylanma olayının şematik gösterilişi [4].

1.3 Derin Çekme

Derin çekme seri imalatta sıkça kullanılmakta olan, yassı sac metalden kap şeklinde parçalar elde etme yöntemi olarak tanımlanabilir. Şekil 1.6'da derin çekme prosesine ait parametreler incelenebilir.



Şekil 1.6 : Derin çekme prosesinin şematik gösterilişi [4].

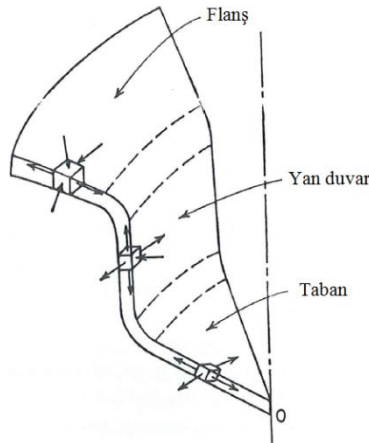
Derin çekme işleminde zımba, sacı belirli bir kuvvetle kalıba iterek sacın şekillendirilmesi gerçekleştirilir. Şekillendirme işlemi sonrası parçanın kalıptan ayrılması gerekir. Bu işlem mekanik sistemle devreye giren sıyrıcılar, sıkıştırma kalıbı ya da basınçlı hava kullanılarak gerçekleştirilir ve ürün elde edilir.

Derin çekme işleminde aranan en önemli özelliklerden biri sacın derin çekilebilirlik özelliğinin yüksek olmasıdır. Bu özelliği etkileyen birçok parametre vardır. Bu özellikler şu şekildedir:

- Sac metalin özellikleri,
- Sacın kalınlığı,

- Zimba – kalıp arası mesafe,
- Zımbanın ve kalıbın köşe yarıçapı,
- Sıkıştırma kalıbının kuvveti,
- Sürtünme ve yağlama özellikleri,
- Zımbanın hızı.

Derin çekme işleminde Şekil 1.7’ de görüldüğü gibi malzeme üç ayrı bölgede farklı gerilme ve plastik şekil değiştirmenin etkisi altındadır.



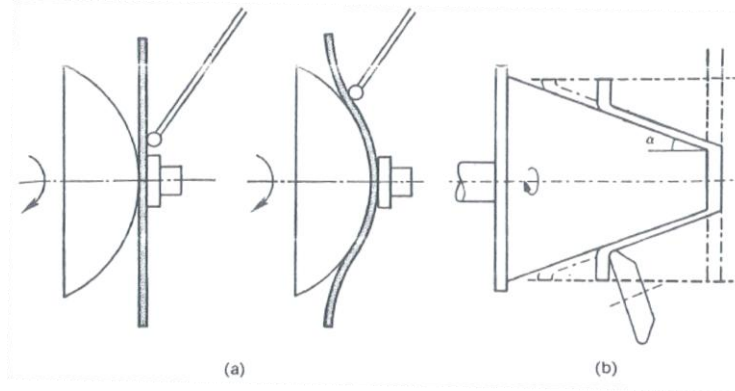
Şekil 1.7 : Derin çekme işlemi esnasında farklı bölgelerdeki gerilme durumu [6].

Zımbanın tabanına temas eden taslağın orta bölgesi zımbanın çevresi boyunca zımbanın üstüne doğru bükülür. Bükmeden dolayı bu bölgede kalınlık bir miktar azalır. Zımbanın hareketinden dolayı parçanın tabanında iki eksenli çekme gerilmesi vardır. Taslağın dış çevresi kalıp içine çekildikçe taslak çevresi πD_0 değerinden πD_z değerine doğru azalır. Böylece malzeme çevresel olarak basma, radyal olarak çekme gerilmelerinin etkisindedir. Ayrıca sıkıştırma kalıbı da taslak düzlemine dik yönde basınç uygulamaktadır. Parçanın yan duvarlarında ise iki yönlü sadece çift eksenli çekme gerilmesi söz konusudur [1].

1.4 Sıvama

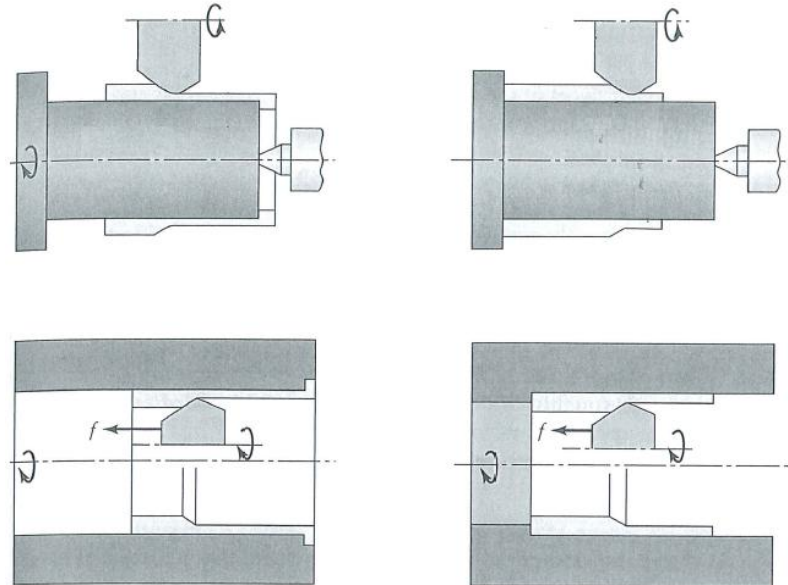
Dairesel simetriye sahip derin parçaların, metalik sacın üretilcek parça şeklindeki dönen bir kalıp üzerine bastırılması yoluyla elde edilmesi işlemine sıvama denir. Sıvama işlemi ile silindir, küre, tüp, koni gibi dairesel şekilli parçalar üretmek mümkündür. Sıvama işlemi elle sıvama, kesme kuvveti ile sıvama ve boru sıvama olarak üç gruba ayrılabilir.

Elle sıvama ile parça üretimi zaman alan bir işlem olduğu için seri üretime uygun değildir. Fakat ilk yatırım maliyeti düşük olduğu için sayıca az olan parçaların üretiminde kullanılabilir. Bu işlemde kullanılan taslağın kalınlığında değişim gerçekleşmez iken çapında azalma meydana gelir.



Şekil 1.8 : Sıvama işleminin şematik gösterilişi. (a) Elle sıvama, (b) Kesme kuvveti ile sıvama [6].

Kesme kuvveti ile sıvama yönteminde şekil değiştirme sırasında başlangıç sacındaki her elemanın dönme eksenine olan uzaklığı sabit kalır. Bu nedenle elle sıvamada olduğu gibi çevre kısalması olmadığı için şekil değişimi yalnızca kayma ile oluşur. Şekillendirme işlemi sacın kalınlığı inceltirilerek gerçekleştirilir. Kalınlığı inceltme metalin sünekliliğine bağlı olarak yapılabilir.



Şekil 1.9 : Boru sıvama işleminin şematik gösterimi [4].

Boru sıvama yöntemiyle makara tipinde sıvama takımıyla mandrel üzerine sıvanan boruların et kalınlığı düşürülür. İşlem boruların içinden veya dışından ve ileriye veya

geriye olmak üzere çeşitli şekillerde gerçekleştirilebilir. Sonuç olarak et kalınlığı daha ince fakat daha uzun bir boru elde edilir. Boru sıvama yöntemiyle boruların iç ve dış yüzeylerine çeşitli profiller de verilebilmektedir [2].

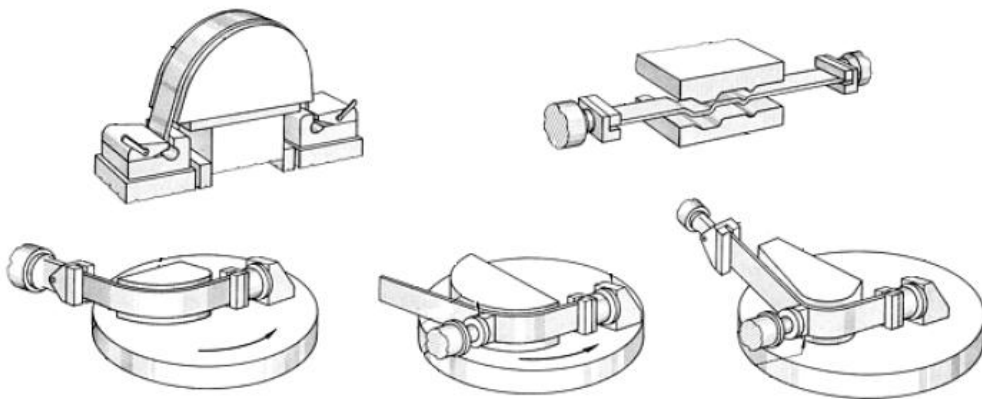
1.5 Gererek Şekillendirme

Gererek şekillendirme öncelikle uçak ve otomobil endüstrilerinde uygulanan bir yöntemdir. Otomobillerin tavan saclarıyla çamurlukları, uçak kanatları bu yöntemle üretilen parçalardır.

Özellikle üretim adedi düşük ve/veya üretilecek parçanın yüzeyi büyük olduğu takdirde normal preslerin kullanılması ekonomik olmamaktadır. Bu gibi durumlarda, takım ve tezgâhın maliyete etkileri üretim yönteminin belirlenmesinde ön plana geçmekte ve üretilecek parçanın boyutları göz önüne alındığında takım ve tezgah harcamalarının düşüklüğü nedeniyle gererek şekillendirme yöntemi uygulanmaktadır [2].

Gerilmelerin parçaya homojen olarak dağılması nedeniyle, gererek şekillendirme işleminde geriye yayılma olayı büyük oranda önlenmiştir. Genellikle çekme gerilmelerinin etkin olduğu bu şekillendirme yönteminde işlemin başarılı olabilmesi için malzemenin yeteri kadar sünek olması gerekir [1].

Sac genellikle karşılıklı iki ucundan veya bazen tüm çevresi boyunca bağlanır. Daha sonra zımba ilerleyerek şekillendirme işlemi yapılır. Şekil 1.10' da gererek şekillendirme prosesi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.10 : Gererek şekillendirme işlemine ait örnekler [7].

Gererek şekillendirme prosesi aşağıdaki avantajlara sahiptir;

- Şekillendirme için %70 daha az kuvvet gereklidir.
- Malzeme maliyeti %15 oranında daha düşüktür.
- Plastik deformasyonun yapıda homojen uygulanmasından dolayı %10 oranında akma dayanımında artış vardır.
- Sertlik yaklaşık %2 oranında artar.
- Geri yaylanma büyük ölçüde engellenmiştir. Çok az oranda meydana gelen geri yaylanma kontrol edilebilir.
- Kalıntı gerilmesi şekillendirilen parçada düşüktür [7].

2. SAC ŞEKİLLENDİRMEYİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Plastik şekillendirmede malzeme katı halde, hacim değişikliğine uğramadan, kristal yapı özelliklerini koruyarak ve kırılma gibi herhangi bir süreksizlik yaratmadan kalıcı olarak şekil değiştirmektedir [8]. Sacların kırılma, yırtılma, patlama gibi hasarlara uğramadan şekillendirilmesi sanayide en çok istenilen durumlardan biridir. Şekillendirme proseslerinde istenilen mekanik özellikleri sağlayan malzeme seçilse dahi, şekillendirme sorunsuz devam edememektedir. Bu sorunlardan en önemlisi, işlem değişkenlerinden ziyade, malzemenin sahip olduğu mekanik özelliklerdeki tutarsızlıktır. Sacın hasarsız bir şekilde şekillendirilebilmesi için sacın şekil alma kabiliyetini etkileyen faktörlerin iyi bilinmesi gerekir.

Bu bölümde malzemenin mekanik özelliklerinin, malzemenin yapısının ve proses değişkenlerinin şekillendirmeye olan etkileri incelenmiştir.

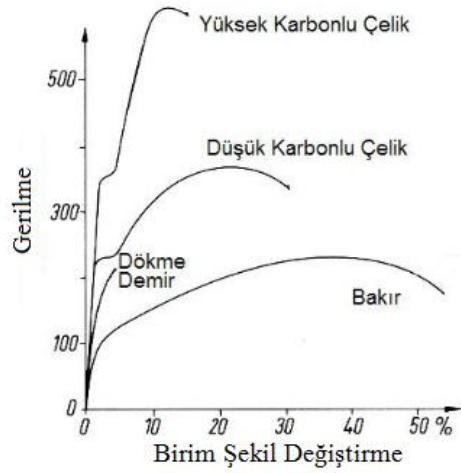
2.1 Mekanik Özelliklerin Şekillendirmeye Etkisi

Metalik malzemelerin mekanik özellikleri şekillendirmeyi etkileyen en önemli değişkenlerdendir ve malzemenin kimyasal ve metalurjik yapılarına bağlıdır. Malzemenin mekanik özelliklerinin tespiti için farklı deneyler uygulanabilir. Bunlar arasında en yaygın olanları çekme, basma, burma gibi deneylerdir. Çekme deneyi uygulamada en fazla kullanılan deneydir. Akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama, % kesit daralması, tokluk, anizotropi katsayı, deformasyon sertleşmesi üssü, deformasyon hızı duyarlılığı üssü, elastisite modülü, rezilyans gibi özellikler çekme deneyi ve çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme diyagramıyla tespit edilebilir.

Şekillendirme prosesinde kullanılacak olan malzeme sacın mekanik özelliklerine göre seçilir, bu yüzden mekanik özelliklerin şekillendirmeye olan etkisinin incelenmesi önemlidir.

2.1.1 Akma Mukavemeti

Çekme deneyinde elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme diyagramlarında malzemenin elastik deformasyon bölgesinden plastik deformasyon bölgesine geçtiği nokta akma noktasıdır. Bu noktaya karşılık gelen gerilme değeri malzemenin akma mukavemetini verir. Malzemenin gerilme – birim şekil değiştirme diyagramından elastik bölgeden plastik bölgeye geçiş noktası okunamıyorsa, yani malzeme belirgin akma göstermiyorsa, %0,2 plastik birim uzamaya karşılık gelen gerilme değeri akma noktası olarak alınır ve $\sigma_{0,2}$ olarak gösterilir.

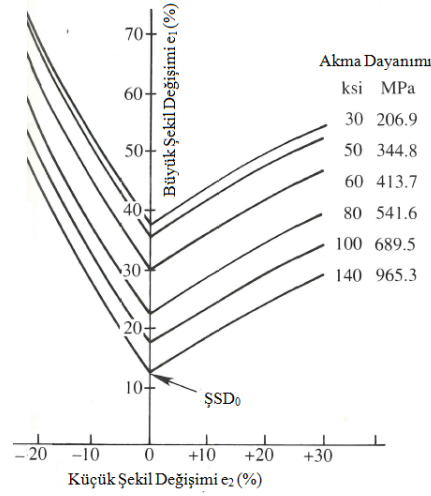


Şekil 2.1 : Farklı metallere ait gerilme – birim şekil değiştirme eğrileri [9].

Şekillendirme uygulanacak olan parçada akma mukavemetinin bilinmesi doğru kuvvetin uygulanması ve oluşabilecek olan hataların önüne geçilmesi açısından önemlidir. Şekillendirmede yüksek akma mukavemeti geri yaylanma olasılığı, hızlı kalıp aşınması ve sınırlı süneklik ile kusurların oluşması olasılığını belirtir. Bununla beraber düşük akma mukavemeti parçanın şekillendirme sırasında uygulanan gerilmeye dayanamamasına neden olur.

Akma mukavemetinin şekillendirmeye olan etkisini şekillendirme sınır diyagramları üzerinden görmek mümkündür. Şekil 2.2’de aynı kalınlıkta fakat farklı akma mukavemetine sahip az karbonlu çeliklere ait şekillendirme sınır diyagramları verilmiştir. Akma mukavemeti arttıkça diyagramın aşağıya doğru kaydığı görülmektedir. Yani güvenli şekillendirme yapılabilecek olan bölgenin daraldığı ve burdan artan akma mukavemeti ile şekillendirme kabiliyetinin azaldığı yorulumu yapılabilir. Düşük akma mukavemetine sahip metaller daha yüksek şekillendirme

sınır diyagramına sahip olmaktadır. Şekillendirme sınır diyagramlarıyla ilgili ileriki bölümlerde daha ayrıntılı bilgi verilmiştir.



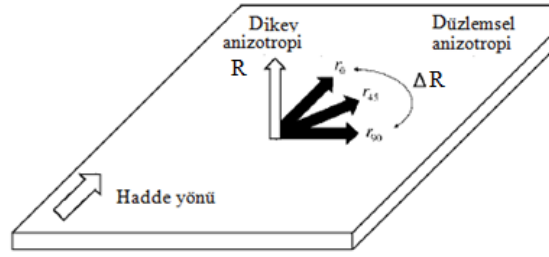
Şekil 2.2 : Aynı kalınlıkta fakat farklı akma mukavemetine sahip düşük karbonlu çeliklere ait şekillendirme sınır diyagramları [10].

2.1.2 Plastik Anizotropi Katsayısı

Mekanik özelliklerin yöne bağımlılığına anizotropi denir. Metalik malzemelerde anizotropinin kristallografik anizotropi ve mekanik fiberleşme olmak üzere iki genel tipi vardır. Kristallografik anizotropi, plastik deformasyon ve tavlama ile meydana gelebilir. Plastik deformasyon sonucunda tanelerin kristallografik açıdan tercihli yönlenmesine deformasyon tekstürü, yeniden kristalleşme tavlama sonucunda tanelerin kristallografik tercihli yönlenmesine de tavlama tekstürü denir. Dolayısıyla kristallografik anizotropinin, deformasyon tekstürü ve tavlama tekstürü olarak isimlendirilen iki tipi vardır.

Mekanik fiberleşme ise plastik deformasyon sırasında, şekil değişiminin en fazla olduğu doğrultuda yani deformasyon yönünde ikinci fazın, mikro boşlukların ve kalıntıların yönlenmesi olup, anizotropik durum yaratır. Kristallografik anizotropi ve mekanik fiberleşme, özellikle çubuk veya sac halindeki malzemelerin mekanik özelliklerinin yöne bağlı olarak değişmesine sebep olur [1].

Sac malzemelerde anizotropi, normal anizotropi (dikey anizotropi) ve düzlemsel anizotropi olmak üzere iki başlıktan oluşur. Dikey anizotropi sacın kalınlığına göre değişiklik gösteren malzeme özelliklerinin değişimlerini ölçerken, düzlemsel anizotropi ise sac yüzeyinin farklı yönlerindeki malzeme özelliği farklılıklarını ölçer [11].



Şekil 2.3 : Deney numunesinin yönüne göre anizotropi katsayısının tanımı [11].

Dikey anizotropi katsayısı çeliğin şekillendirme sırasında incelmeye karşı direncini belirler ve derin çekilebilirliğin bir ölçüsüdür. Literatürde metalik sac malzemelerde dikey anizotropi katsayısı R ile gösterilir ve sacın genişlikteki birim şekil değişiminin kalınlıktaki birim şekil değişimine oranı olarak tanımlanır. Dikey anizotropi katsayısı (R) :

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{W_i}{W_s}\right)}{\ln\left(\frac{t_i}{t_s}\right)} \quad (2.1)$$

Burada;

ε_w : Genişlikteki birim şekil değiştirme

W_i : Deney parçasının ilk genişliği

W_s : Deney parçasının son genişliği

ε_t : Kalınlıktaki birim şekil değiştirme

t_i : Deney parçasının ilk kalınlığı

t_s : Deney parçasının son kalınlığı

dır.

Sac metallerin ince olması sebebiyle kalınlıklarındaki birim şekil değişikliğini ölçmek boylarındaki birim şekil değişikliğini ölçmekten daha zordur. Bu durum kalınlık ölçümünde hatalara sebep olmaktadır. Bu yüzden hacim sabitliği temel alınarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

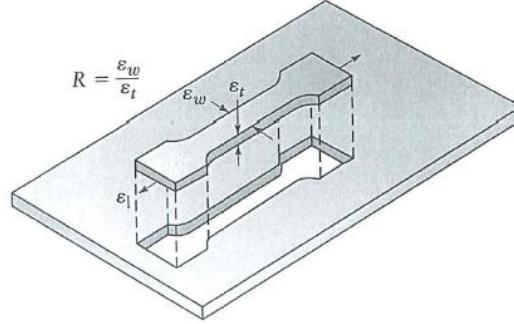
$$R = \frac{\ln\left(\frac{W_i}{W_s}\right)}{\ln\left(\frac{W_s \ell_s}{W_i \ell_i}\right)} \quad (2.2)$$

Burada;

ℓ_i : Deney parçasının ilk uzunluğu

ℓ_s : Deney parçasının son uzunluğu,

dur.



Şekil 2.4 : Anizotropi katsayısının çekme deneyi ile ölçümü [4].

Deney parçasının son uzunluğu ve kalınlığı genellikle %15 - %20 uzama miktarlarında ölçülür veya düşük süneklığe sahip malzemelerde boyun vermenin başladığı %uzamanın altındaki uzama miktarında ölçülür [4]. Deformasyonun yapıldığı yöne göre dikey anizotropi katsayısının değeri değişebilir. Bu yüzden numuneden farklı yönlerde alınan örnekler ile ölçülen R değerinin ortalamasının alınması gerekir. Bu değer ortalama dikey anizotropi katsayısıdır ($\bar{R}$).

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2 R_{45} + R_{90}}{4} \quad (2.3)$$

Burada :

R_0 : Deformasyon yönünde dikey anizotropi katsayısı

R_{45} : Deformasyon yönü ile 45°'lik açı yapan dikey anizotropi katsayısı

R_{90} : Deformasyon yönü ile 90°'lik açı yapan dikey anizotropi katsayısı,

dır.

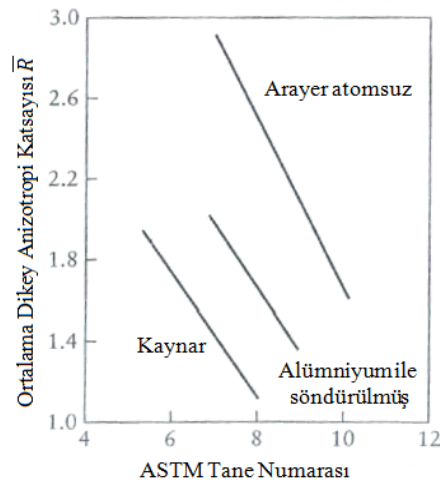
Sıcak çekilmiş ve soğuk çekilip normalize edilmiş çelikler genelde izotropiktir ($\bar{R}=1$). Kaynar çeliklerde genelde $\bar{R}=1,2$ değerine sahiptir ama düşük manganez ve düşük kükürt değeri içeren özel uygulamalar için bu değer biraz daha yüksek olabilir. Alüminyum ile söndürülmüş çelikler $\bar{R}=1,6$ değeri ile daha anizotropik davranış gösterirler. Daha yüksek değerlere bileşimi ve prosesi kontrol ederek ulaşılabilir. Ticari çelikler için üst limit 3,0 civarındadır fakat 3,0 değerine ulaşıldığı çok az görülmüştür. Arayer atomu içermeyen çeliklerde $\bar{R}$ değeri en fazla 2,0 civarındadır.

Daha çok şekillendirilebilirlik, daha az şekillendirme kademesi ve daha karmaşık şekiller iyi geliştirilmiş bir yönlenme ile düşük karbonlu çeliklerde sağlanabilir. Çizelge 2.1’de bazı çeliklere ait $\bar{R}$ değerleri verilmektedir.

Çizelge 2.1 : Çeşitli saclara ait ortalama dikey anizotropi katsayısı [4].

Çinko Alaşımları	0,4 – 0,6
Sıcak Haddelenmiş Çelik	0,8 – 1,0
Soğuk Haddelenmiş Kaynar Çelik	1,0 – 1,4
Soğuk Haddelenmiş Alüminyum ile Söndürülmüş Çelik	1,4 – 1,8
Alüminyum Alaşımları	0,6 – 0,8
Bakır ve Pirinç	0,6 – 0,9
Titanyum Alaşımları (α)	3,0 – 5,0
Paslanmaz Çelik	0,9 – 1,2
Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelikler	0,9 – 1,2

$\bar{R}$ değeri, sac metalin türüne ve üretim geçmişine göre değişmesinin yanında tane büyüklüğüne de bağlı olarak değişmektedir. $\bar{R}$ tane büyüklüğünün artması ile artar [12]. Şekil 2.5’ de düşük karbonlu çeliklerin ortalama dikey anizotropi katsayısının tane büyüklüğü ile değişimi verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere tane büyüklüğü azaldıkça $\bar{R}$ değeri de azalmaktadır. ASTM tane numarası ile tane büyüklüğünün ters orantılı olduğu dikkat edilmesi gereken noktadır.



Şekil 2.5 : Düşük karbonlu çeliklerde tane boyutunun ortalama dikey anizotropi katsayısına etkisi [4].

Düzlemsel anizotropi derin çekme operasyonlarında kulaklanma olarak bilinen, parçanın kenarlarında dalgalanmalara neden olur. Kulaklar, derin çekme işleminden sonra, kabın çevresi boyunca kesilir. Dolayısıyla hem malzeme kaybına hemde ek bir kesme işlemine sebep olduğu için bu durum istenmez. Düzlemsel anizotropi ΔR ile gösterilmektedir. ΔR büyüdükçe kulak yüksekliği artar ve $\Delta R=0$ ise kulaklanma oluşmaz. ΔR Formül 2.4' de tanımlanmaktadır.

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



Şekil 2.6 : Kulaklanmaya ait örnek, ferritik paslanmaz çelik X6Cr17 [13].

Sacın şekil alma kabiliyeti yüksek $\bar{R}$ ve düşük ΔR değeri ile yakından ilişkilidir. Fakat genellikle sac metaller yüksek $\bar{R}$ değerinin yanında yine yüksek ΔR değerine sahiptir.

2.1.3 Deformasyon Sertleşmesi Üssü

Deformasyon sertleşmesi üssü değeri (n) şekillendirme yöntemlerinde büyük öneme sahiptir. Çünkü deformasyon sertleşmesi üssü değeri homojen deformasyon bölgesinde malzemenin hataya uğramadan alabileceği şekillendirme miktarını belirler. Sonuç olarak, yüksek deformasyon sertleşmesi üssü değeri hatasız kompleks şekillendirme işlemlerine olanak sağlar.

Deformasyon sertleşmesi üssü değeri malzemenin sertleşme özelliğini ortaya koyar ve bu özelliğinin belirlenmesi şekillendirme açısından öneme sahiptir. Bu görevi yerine getirmek için standart metot tek eksenli çekme testinden elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme verilerine dayanır [14].

Metalik malzemelerde deformasyon sertleşmesinin görüldüğü deformasyon sıcaklıklarında ($T < 0,5 T_m$) gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin homojen deformasyon bölgesi Holloman denklemi olarak bilinen

$$\sigma_g = K \times \varepsilon^n \quad (2.5)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir.

Burada;

σ_g : Gerçek plastik gerilme,

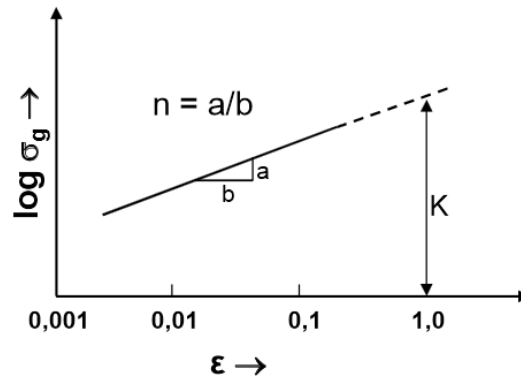
ε : Gerçek plastik birim şekil değiştirme,

K : Malzeme mukavemet katsayısı,

n : Deformasyon sertleşmesi üssü,

dür.

Deformasyon sertleşmesi üssü ; plastik deformasyonun başladığı akma gerilmesi ile boyun vermenin başladığı nokta arasında bulunan homojen deformasyon bölgesindeki gerçek gerilme ve gerçek birim şekil değiştirme değerlerine göre çizilen $\log \sigma_g$ ve $\log \varepsilon$ grafiğinin eğimine eşittir. Malzeme mukavemet katsayısı K ise, $\varepsilon = 1$ olduğu noktadaki gerçek gerilme değeridir [1].



Şekil 2.7 : Deformasyon sertleşmesi üssü değerinin tayini [1].

Saçların soğuk şekillendirilme kabiliyetinin yüksek olması, sacın deformasyona uğradığı sürece sertleşmesine bağlıdır. Deformasyon sırasında incelmeye başlayan bir bölge, deformasyon sertleşmesi sonucunda deformasyonun komşu bölgelere yayılmasını sağlar ve bu sayede malzemede homojen bir incelme gerçekleşir.

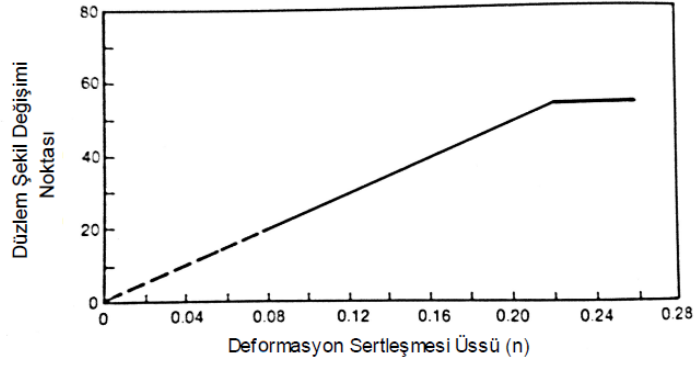
Deformasyon sertleşmesi üssü, $n = 0$ ideal plastik malzeme ile $n = 1$ elastik malzeme değerleri arasında olabilir. Bazı metallere ait n ve K değerleri Çizelge 2.2’ de görülmektedir.

Çizelge 2.2 : Tavlanmış çeşitli metalik malzemelerin oda sıcaklığındaki deformasyon sertleşmesi üssü ve mukavemet katsayısı değerleri [1].

Malzeme	n	K (MPa)
% 0,08 C Çeliği (1008)	0,25	600
%0,15 C Çeliği (1015)	0,18	620
% 0,45 C Çeliği (1045)	0,12	950
302 Paslanmaz Çeliği	0,3	1300
410 Paslanmaz Çeliği	0,1	960
Bakır	0,33	450
Pirinç (70/30)	0,41	500
Muntz Metali (40 Zn)	0,5	800
1100 Alüminyum	0,25	140
2017 Alüminyum	0,15	380
5052 Alüminyum	0,13	210
7075 Alüminyum	0,17	400

Derin çekme kalite, az karbonlu çelik saclarda deformasyon sertleşmesi üssü değeri 0,18’ in üstünde ve genellikle 0,22 civarındadır. Deformasyon yaşlanması ve soğuk deformasyon bu değerin azalmasına sebep olur. Tane boyutunun artması deformasyon sertleşmesi üssü değerini artırır fakat, şekillendirme sonrasında portakal kabuğu görünlü yüzey oluşmasına yol açar [16]. Deformasyon sertleşmesi üssü çeliğin gererek şekillendirilebilirlik kabiliyetini tanımlar. Gererek şekillendirmede en önemli malzeme değişkeni n değeridir çünkü malzeme boyun vermeden yada kırılmadan şekillendirilmelidir. Eğer yüksek gerilmeli şekillendirme isteniyorsa yüksek n değerli malzeme seçilmelidir. Sıcak haddelenmiş saclarda n değeri yaklaşık 0,1 ve soğuk haddelenmiş saclarda ise n değeri 0,2 – 0,25 arasındadır [17].

Deformasyon sertleşmesi üssü değerinin artması, çelik sacların şekil alma kabiliyetini arttırmaktadır. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi deformasyon sertleşmesi üssünün artışı 0,22 değerine kadar sacın şekillendirilebilirliğini arttırmaktadır. Bu değerden sonra şekillendirilebilirlik n değerindeki artıştan etkilenmez [15].



Şekil 2.8 : Düşük karbonlu çelik sacda, deformasyon sertleşmesi üssünün düzlem şekil değişimi noktasına etkisi [15].

2.1.4 Deformasyon Hızı Duyarlılığı Üssü

Önceki bölümde deformasyon sertleşmesi üssü değerinin, $T < 0,5 T_m$ sıcaklıklarında şekillendirmeyi etkileyen önemli parametre olduğu belirtilmiştir. Şekillendirme sıcaklığı arttıkça ($T > 0,5 T_m$) deformasyon sertleşmesi üssü değerinin etkinliği azalır ve şekillendirmeyi etkileyen en önemli parametrelerden biri olan deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m) değerinin etkinliği artar.

Zımbayla gererek şekillendirmede deformasyon konsantrasyonu nedeni ile deformasyon hızı aniden artar. Bu nedenle bu tür şekillendirmelerde deformasyon hızı duyarlılığı, deformasyonun başladığı andan itibaren çok önemlidir. m değerinin yüksek olması üniform gerilme dağılımının olduğuna işaretler. Gerilmenin üniform olarak yayılması hatasız olarak, istenilen parça üretebilmek için istenilen bir durumdur.

Yüksek sıcaklıklarda ($T > 0,5 T_m$) deformasyon hızının malzemenin mukavemetine etkisi çok fazla olup, sabit sıcaklık ve birim şekil değiştirme miktarı için;

$$\sigma = C \times \dot{\epsilon}^m \quad (2.6)$$

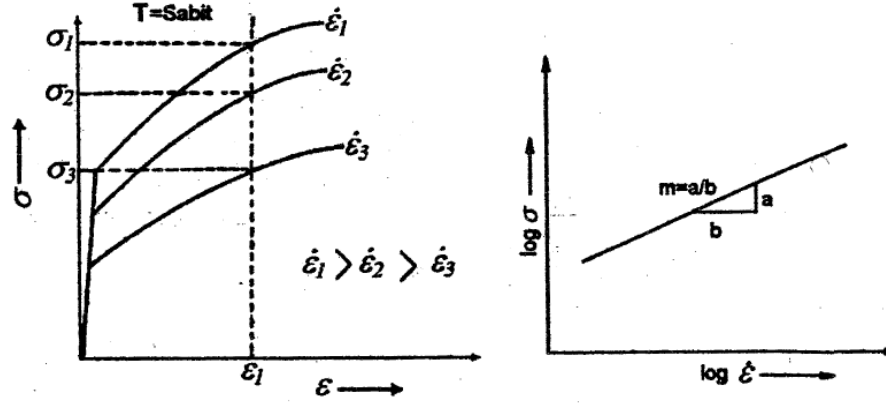
bağıntısının geçerli olduğu saptanmıştır.

Burada;

- σ : Plastik gerilme,
- C : Malzeme sabiti,
- $\dot{\epsilon}$: Deformasyon hızı,
- m : Deformasyon hızı duyarlılığı üssü,

dür.

Deformasyon hızı duyarlılığı üssü, $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$ grafiğinin eğimine eşittir. Böyle bir grafik sabit sıcaklıkta, farklı deformasyon hızlarında yapılan çekme veya basma deneyleri sonuçlarından faydalanılarak çizilebilir.

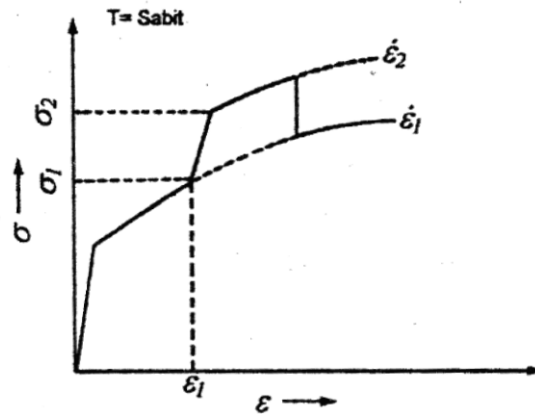


Şekil 2.9 : Farklı deformasyon hızı ile yapılan deneylerden deformasyon hızı duyarlılığı üssünün tayini [1].

Deformasyon hızı duyarlılığı üssünü daha hassas olarak saptamak için kullanılan diğer metot ise deformasyon hızını değiştirme deneyidir. Sabit sıcaklıkta yapılan çekme deneyi esnasında herhangi bir ϵ_1 birim şekil değiştirme miktarına ulaşıldığında, deformasyon hızının aniden $\dot{\epsilon}_1$ değerinden $\dot{\epsilon}_2$ değerine arttırılması sonucu plastik gerilme değerinde meydana gelen değişimden yararlanılarak deformasyon sertleşmesi üssü (m);

$$m = \frac{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}{\log \dot{\epsilon}_2 - \log \dot{\epsilon}_1} = \frac{\log(\sigma_2 / \sigma_1)}{\log(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)} = \frac{\ln(\sigma_2 / \sigma_1)}{\ln(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)} \quad (2.7)$$

bağıntısı ile bulunabilir [1].



Şekil 2.10 : Deformasyon hızını değiştirme deneyi [1].

2.1.5 Elastisite Modülü

Bir malzemenin elastik deformasyona karşı koyma kabiliyeti, elastik rijitlik (stiffness) olarak adlandırılmakta; elastiklik modülü de bunun bir ölçütünü ifade etmektedir. Elastiklik modülü yüksek olan malzemelerde, belli bir gerilme sistemi altında zorlanma ile ortaya çıkan elastik deformasyonlar, düşük elastiklik modülü değerine sahip malzemelere göre daha az olmaktadır. Metalsel malzemelerde atomlararası bağ kuvvetine veya enerjisine dayanan elastik rijitlik ve bunun göstergesi olan elastiklik modülü, artan sıcaklık ve atomlararası mesafe ile düşüş sergilemekte; malzemeye uygulanan ısı işlemlerden, belli orana kadar yapılan alaşımlandırmadan, malzemenin mikro yapısından veya hata yapısından fazla etkilenmemektedir. Elastiklik modülünde sıcaklık ile ortaya çıkan düşüşler; atomlararası mesafenin artması ve bağ kuvvetinin azalması ile bağdaştırılmaktadır. Anizotropik metallerin kafes yapıları dikkate alındığında, atomlararası mesafenin doğrultulara göre farklılaşması, bağ kuvveti ve elastik sabitlerin, dolayısıyla da elastiklik modülünün farklı kristallografik doğrultularda birbirinden farklı değerler sergilemesine yol açmaktadır [18].

Çekme deneyindeki elastik deformasyon bölgesinde elastiklik modülü Hooke kanununa göre ;

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (2.8)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir.

Burada;

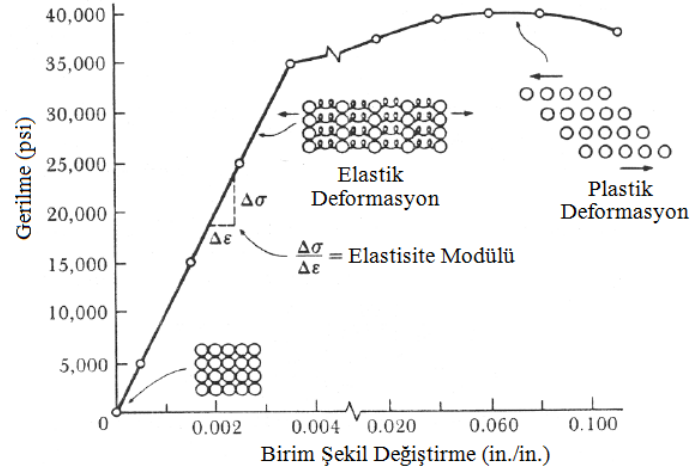
E : Elastisite modülü,

σ : Gerilme,

ε : Birim şekil değişime,

dir. Yani elastisite modülü, çekme testinden elde edilen gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin eğimine eşittir.

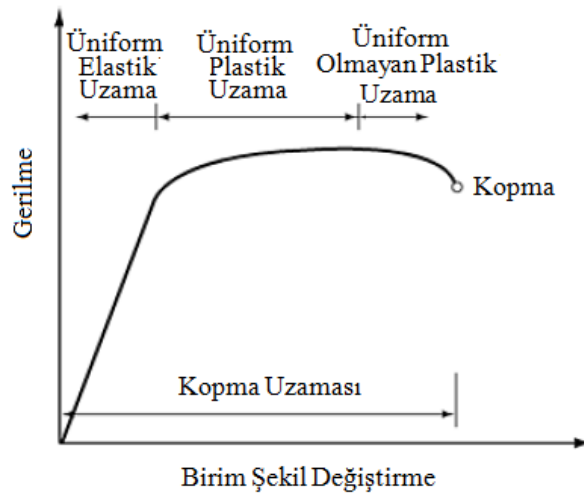
Elastisite modülünün şekillendirme açısından metallere şekil verme sırasında görülen elastik geri yaylanmayı belirlediği için önemlidir. Bu olay daha çok yüksek akma mukavemeti ve düşük elastisite modülüne sahip malzemelerde görülür. Bu yüzden şekillendirme açısından yüksek elastisite modülüne sahip malzemeler tercih edilmelidir.



Şekil 2.11 : Elastisite modülünün gerilme – birim şekil değiştirme diyagramından tayini [19].

2.1.6 Uzama

Çekme deneyinde, deney parçası, en büyük yüke kadar tüm ölçü boyunda üniform olarak şekil değiştirir. Çekme kuvvetinin en büyük değerini almasıyla yerel kesit daralması (boyun verme) başladığı için uzama da üniform olmaktan çıkar. Sacların şekillendirilmesinde malzemenin üniform uzama yüzdesinin yüksek olması istenir. Gerilme – birim şekil değiştirme davranışı $\sigma = K \varepsilon^n$ ile gösterilebilen bir malzemenin çekme deneyinde maksimum yükte $\varepsilon = n$ olduğundan plastik şekil verilecek bir sacın deformasyon sertleşmesi üssünün yüksek olması faydalıdır [2].



Şekil 2.12 : Üniform uzama ve kopma uzamasının gösterimi [12].

Çekme deneyinde kopma uzaması üniform uzama ile boyun vermeden kopmaya kadar gerçekleşen uzamanın toplamıdır. Üniform uzamaya malzemenin deformasyon sertleşmesi üssü n , boyun verme ile kopma arasındaki uzamada

(büzölme uzaması) ise m etki eder. Yüksek m değeri kırılmadan önce oluşan büzölme uzamasının büyük olmasına yol açar. Dolayısıyla n ve m değerleri büyüdükçe toplam uzama da artar.

2.2 Malzeme Yapısının Şekillendirmeye Etkisi

Malzemenin yapısı kimyasal bileşimi ile termo-mekanik geçmişine bağlıdır. Çeşitli mekanik ve ısı işlemleri malzeme yapısını değiştirmek mümkündür. Malzemenin mukavemeti, sünekliği, kırılma şekli gibi deformasyon kabiliyetini belirleyen özellikleri malzeme yapısına bağlıdır.

Malzeme yapısının şekillendirmeye etkisi, malzeme yapısında bulunan elementlerin etkisinin ve üretimden kaynaklı kalıntıların etkisinin incelendiği kimyasal bileşim başlığı, tane büyüklüğünün etkisinin incelendiği tane yapısı başlığı ve deformasyon sonrası yapıda oluşan gerilmelerin etkisinin incelendiği kalıntı gerilmeler başlıkları altında incelenecektir.

2.2.1 Kimyasal Bileşim

Sacın bileşiminde, çeliğin üretimi aşamasından itibaren bulunan çeşitli alaşım elementleri ve empüriteler şekillendirme davranışını çeşitli yönlerde etkiler. Kimyasal bileşimin bu etkisi olumlu ya da olumsuz yönde olabilir. Bu bölümde elementlerin şekillendirmeye olan etkilerinden kısaca bahsedilmiştir.

Karbon: Çeliğin karbon içeriği arttıkça mukavemet artar ve süneklik düşer. Bunun nedeni ferrit yapısındaki karbür fazının oluşumu ve ince tane boyutunun oluşumudur. Genellikle karbon miktarı %0,10 ile sınırlıdır ve şekillendirme kabiliyetini arttırmak için daha da azaltmak gerekir.

Manganez: Düşük karbonlu çeliklerde manganez içeriği sıcak şekillendirme kabiliyetinin artırılması amacıyla genellikle %0,15 – 0,35 arasında tutulur. Çeliğin kükürt içeriğinin düşük olduğu durumlarda, manganez içeriği de düşük tutularak çeliğin yüksek anizotropi katsayısı değerlerine sahip olması sağlanır.

Kükürt: Çeliklerin bileşiminde istenmeyen bir elementtir ve çeliğin bileşiminde olabildiğince düşük düzeylerde tutulmalıdır. Kükürt çeliği gevrek ve kırılğan yapar ve şekillendirmeyi olumsuz yönde etkiler. Çelikte genel olarak %0,02-0,035 düzeyinde kükürde izin verilir.

Fosfor: Malzeme tokluğunu düşüren, zararlı etkiye sahip bir elementtir. Çeliğin dayanımını ve sertliğini arttırıcı özelliği olmasına karşın süneklik ve darbe dayanımını düşürür. Bu etki yüksek karbonlu çeliklerde daha net görülür. Çelik içerisinde mümkün olduğunca düşük seviyede tutulmaya çalışılır ve kükürtle birlikte fosfor azlığı malzeme kalitesinde birinci kriterdir.

Silisyum: Çelik üretiminde oksijen giderici (deoksidan) olarak kullanılan temel elementlerden biridir. Silisyum miktarındaki artış mukavemeti arttırdığından, şekillenebilme özelliğini azaltır.

Krom: Çeliklerde sıklıkla kullanılan alaşım elementlerinden biridir. Çeliğin bileşimine korozyon direncini, oksitlenme direncini, aşınma direncini ve sertleşebilirliğini arttırmak amacıyla katılır. Paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementidir. Krom, yüksek karbonlu çeliklerde karbon ile bileşik oluşturarak karbürler oluşturur. Krom çelikte sertleştirici ve tokluğu düşürücü yönde etki yaratır. Bu yüzden şekillendirmeyi olumsuz yönde etkiler.

Nikel: Nikel %5'e varan oranlarda, alaşımlı çeliklerde geniş bir biçimde kullanılır. Nikel malzemenin mukavemetini ve tokluğunu artırır. Özellikle paslanmaz çeliklerde geniş yer alır. Nikel aynı zamanda tane küçültme etkisine de sahiptir.

Molibden: Düşük alaşımlı çeliklerin bileşiminde % 0,15 - % 0,30 oranlarında bulunur ve genellikle en yüksek etkinliği krom ve nikel ile birlikte olduğunda gösterir. Molibden çeliklerin akma ve çekme dayanımını artırır ve şekillendirmeyi düşürür.

Vanadyum: Nikel gibi vanadyum da çelikler için önemli bir tane küçültücüdür. % 0,1 gibi bir oranda kullanılması bile tane irileşmesini önemli ölçüde engeller. Vanadyum en güçlü karbür oluşturucu olduğundan takım çeliklerinde sıcak sertlik değerini arttırmak amacıyla kullanılır.

Niobyum: Niobyum karbür ve nitrürler oluşturarak yüksek-mukavemet düşük-alaşım (HSLA) çeliklerinin mukavemetini arttırmada kullanılır. Tek başına veya titanyum ile birlikte kullanılarak yüksek anizotropi katsayısı değerine sahip arayer atomsuz çeliklerin üretiminde de kullanılabilirler.

Titanyum: Kuvvetli bir karbür ve nitrür oluşturunucudur. Yüksek anizotropi katsayısı değerleri elde edilmesini sağlar, süreksiz akma olayını önler ve soğuk haddelenmiş tavllanmış çelik saclarda yaşlanma olayını ortadan kaldırır.

Alüminyum: Çeliklerin söndürölme işleminde kullanılır. Alüminyum oksijen ve azot ile birleşerek gaz çıkışını önler. Ayrıca soğuk haddelenmiş ve tavllanmış çeliklerde tercih edilen tane düzeni sağlayarak yüksek anizotropi katsayısı değerleri sağlar. Alüminyum azotu bağladığı için deformasyon yaşlanmasını önler.

Azot: Düşük karbonlu çeliklerin mukavemetini büyük oranda arttırır, deformasyon yaşlanması olayına neden olur. Azot miktarı alüminyum ilavesi ile azaltılır.

Oksijen: Yüksek miktardaki oksijen alaşım elementlerinin etkisini azaltarak, deformasyon yaşlanmasını arttırır. Silisyum, alüminyum ve titanyum gibi oksijen bağlayıcı elementler ile oksijen miktarı kontrol altında tutulur. Oksijenin bu elementlerle bileşik oluşturması sonucunda metalik olmayan bileşikler oluşur. Eğer bu bileşiklerden cürufa geçemeyenler olursa, çelikte yüzey hatalarına neden olur.

Hidrojen: Çeliğin içyapısı içinde en tehlikeli ve zararlı elementtir. Çeliğe, kullanılan hidrokarbon kökenli ve nemli hammadde ve katkı maddelerinden ya da atmosferdeki nemden girer. Çeliğin içyapısında oluşan H_2 gazı çatlaklar yaratarak çeliğin mekanik özelliklerini bozar. Katı çelikten giderilmesi uzun süreli ısıtımlarla olasıdır. Vakum altında gaz giderme işlemiyle sıcak çelikten çok daha kolaylıkla giderilebilir.

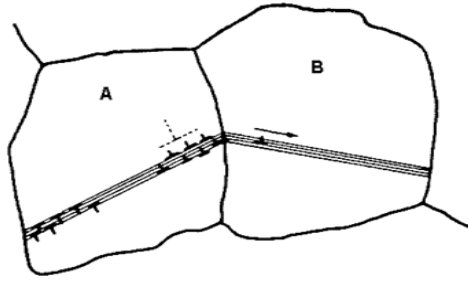
Elementlere ek, yapı içerisinde kalıntılarda bulunabilir. Malzeme yapısında bulunan metalik olmayan oksit, sülfür veya nitrür gibi kalıntılar (inklüzyonlar) genellikle plastik deformasyon kabiliyetini azaltır. Kalıntılar da ikinci faz tanelerinin etkilerine benzer şekilde deformasyonu etkilerler. Kalıntıların mukavemeti ve sünekliği yüksek ise ve de matris taneleri içinde küresel veya lifsel şekilde dağılmışlar ise genellikle zararsızdırlar. Eğer kalıntılar çok küçük, küresel tanecikler halinde, homojen olarak malzeme yapısında dağılmışlarsa zararsız olmaları yanında dispersiyon sertleşmesinde olduğu gibi malzemenin mukavemetinin artmasına da sebep olurlar. Kırılgan kalıntılar ince bir film halinde tane sınırlarında toplandıklarında çok zararlıdırlar. Deformasyon sırasında şekil değiştirebilen kalıntılar, deformasyonun en fazla olduğu doğrultuda yönlendirilerek mekanik fiberleşmeye sebep olabilirler [1].

2.2.2 Tane Büyüklüğü

Metalik malzemelerde plastik deformasyonu etkileyen malzeme yapısı ile ilgili önemli faktörlerden birisi de tane boyutudur. Malzemenin üretiminde kullanılan plastik deformasyon veya ısıtım işlemi sırasında tanelerin kristallografik açıdan tercihli

yönlenmesi sonucunda oluşan tekstür de mekanik özelliklerin anizotropisine sebep olduğundan malzemenin plastik deformasyon özelliklerini etkiler.

Küçük taneli malzeme yüksek kırılma tokluğu ve süneklik özelliklerine sahip olmasına karşın mukavemetinin yüksek olması nedeniyle plastik deformasyon için daha yüksek gerilme uygulanmasını gerektirir. Büyük taneli yapılarda ise şekillendirme için gerekli olan kuvvet düşük olsa da şekil alma kabiliyetleri küçük taneli yapılara göre daha sınırlıdır.



Şekil 2.13 : Kaymanın bir taneden diğer taneye iletilmesi [20].

Çok kristalli malzemelerde akma mukavemeti ile tane boyutu arasında;

$$\sigma_a = \sigma_i + kd^{-1/2} \quad (2.8)$$

bağıntısı mevcuttur.

Burada;

σ_a : Akma gerilmesi,

σ_i : Dislokasyonların hareketine karşıt sürtünme gerilmesi,

k : Dislokasyonlarla ilgili bir sabit,

d : Tane boyutu,

dur.

Çok kristalli malzemede akmanın meydana gelebilmesi için plastik şekil değişimi bir taneden diğer taneye ilerlemelidir. Yani kayma bandının sonunda oluşan gerilme yoğunlaşması, ikinci tanede akmayı başlatacak seviyede olmalıdır. Kayma bandının ucunda oluşan gerilme yoğunlaşması, malzemeye uygulanan gerilmeye ve kayma bandının uzunluğuna bağlıdır. İlk kayma bandı uzunsa, tane boyutu büyükse, kayma bandı ucunda oluşan gerilme yoğunlaşmasının yüksek olduğu söylenebilir, çünkü akma başlamamış ise kayma düzlemine etkiyen kayma kuvveti kayma bandının

ucuna iletilerek burada gerilme yoğunlaşmasına sebep olur. Bu nedenle, tane boyutu büyük olan malzemeler düşük akma mukavemetine sahiptirler [20].

Yüzey kalitesi açısından da küçük taneli malzemeler daha iyi sonuç vermektedir. Büyük taneli malzemelerde yüzeyde portakal kabuğu görünümünde hatalar oluşabilmektedir.

Bu sebeplerden dolayı şekillendirme açısından küçük taneli malzemeler daha çok tercih edilmelidir.

2.2.3 Kalıntı Gerilmeler

Kalıntı gerilmeler (residual stresses), şekillendirme işlemi sonrası dışarıdan herhangi bir kuvvet etkisi olmadığında, malzemede mevcut olan gerilmelerdir. Kalıntı gerilmeler homojen olmayan deformasyon sonucu veya malzeme içindeki sıcaklık gradyanları nedeni ile oluşabilir.

Bütün plastik şekil verme işlemlerinde malzemeler homojen deformasyona uğrayamaz ve bu durum kalıntı gerilmelerin oluşmasına sebep olur. Bir levhanın haddelenmesi bu duruma örnek olarak gösterilebilir. Haddeleme sırasında, plastik deformasyon sadece yüzeye yakın kısımlarda meydana geldiğinden, yüzeydeki taneler hadde yönünde uzama gösterir. Fakat iç kısımdaki taneler deformasyondan etkilenmediği için aynı kalırlar. Yüzey ve iç kısımlardaki tanelerin bu homojen olmayan deformasyona uyum sağlayabilmesi iç gerilmeler ile gerçekleşir. Yüzeydeki taneler iç kısımdaki taneleri uzatabilmek için çekme gerilmeleri iç kısımdaki taneler ise yüzeydeki taneleri kısaltabilmek için basma gerilmeleri oluşturur.

Sıcaklık gradyanlarının oluşturduğu kalıntı gerilmeleri ısıtma işlemi veya döküm ürünlerinin farklı kalınlıklardaki, kesitlerdeki soğuma miktarı veya hava ile temas eden yüzeylerin daha çabuk soğuması sonucunda meydana gelir.

Şekillendirme açısından kalıntı gerilmelerin üründe hatalara sebep olmaması için giderilmesi gerekir. Kalıntı gerilmeler ısıtma işlemi veya plastik şekil değişimi ile azaltılabilir veya yok edilebilir.

2.3 Proses Değişkenlerinin Şekillendirmeye Etkisi

Deformasyon hızı, sıcaklık, sürtünme ve yağlama, geometrik faktörler başlıkları altında proses değişkenlerinin şekillendirmeye olan etkisi incelenecektir.

2.3.1 Deformasyon Hızı

Deformasyon hızının mekanik özelliklere önemli ölçüde etkisi vardır. Malzemelere uygulanan deformasyon hızı, mühendislik deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) ve gerçek deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir. Bunlardan mühendislik deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$), çekme veya basma deneyinde cihazın çene hızı ile doğru orantılıdır. Mühendislik deformasyon hızı, numune boyuna ve çene hızına bağlı olarak;

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{d[(L - L_0)/L_0]}{dt} = \frac{1}{L_0} \times \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L_0} \quad (2.9)$$

bağıntısı ile bulunabilir.

Burada;

L_0 : Numunenin deformasyon öncesi ölçü uzunluğu,

L : Numunenin deformasyon sonrası ölçü uzunluğu,

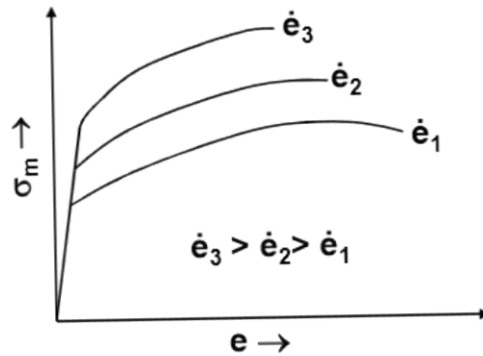
V : Çene hızı

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

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d[\ln(L/L_0)]}{dt} = \frac{1}{L} \times \frac{dL}{dt} = \frac{V}{L} \quad (2.10)$$

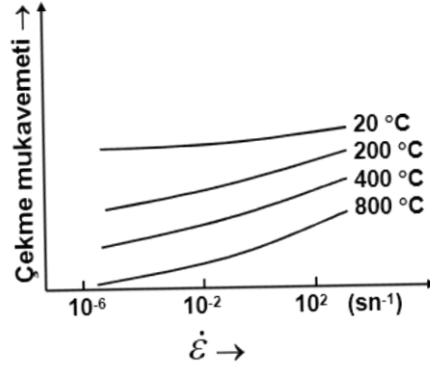
şekilde ifade edilir.

Deformasyon hızı arttıkça malzemenin mukavemeti artar. Artan deformasyon hızları ile çekme eğrilerinin yukarıya doğru kaydığı, buna karşılık toplam birim – şekil değiştirme miktarlarının azaldığı Şekil 2.14’ de görülmektedir.



Şekil 2.14 : Deformasyon hızının çekme eğrisine etkisinin şematik olarak gösterilişi [1].

Deformasyon hızının mukavemete etkisi Şekil 2.15’ de görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça artar. Yüksek sıcaklıklarda deformasyon hızının malzemenin mukavemetine etkisi çok daha fazladır. Bu etki deformasyon hızı duyarlılığı üssü başlığı altında incelenmiştir.



Şekil 2.15 : Çeşitli sıcaklıklarda çekme mukavemetine deformasyon hızının etkisi[1]. Deformasyon hızının mukavemete etkisinden ayrı olarak sünekliğe etkisi de şekillendirme açısından önemli bir yere sahiptir. Çeşitli sıcaklıklarda deformasyon hızı artarken malzemenin sünekliği azalır. Buna paralel olarak deformasyon hızı duyarlılığı üssü (m) de azalır. Deformasyon hızı duyarlılığı üssü malzemenin sünekliğini karakterize eder ve aralarında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır:

$m \leq 0,1$ ise malzeme sünek değildir,

$m \approx 0,3 - 0,4$ ise malzeme sünektir,

$m \geq 0,5$ ise malzeme süperplastiktir,

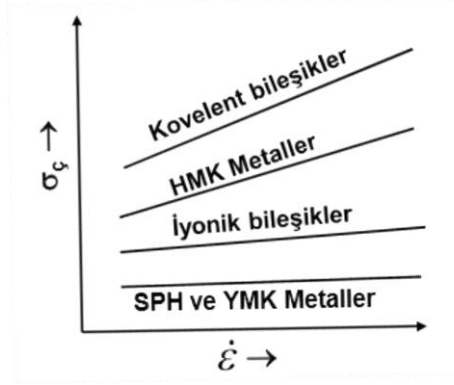
$m = 1$ ise malzeme cam gibi akar.

Mekanik işlemlerde deformasyon hızının başlıca üç etkisi vardır.

Bunlar,

- Metalin plastik gerilmesi deformasyon hızıyla artar, dolayısı ile mekanik işlemlerde deformasyonu gerçekleştirecek kuvvet artar,
- İş parçasının sıcaklığı, artan deformasyon hızı ile ısınma yüzünden artar,
- Deformasyon hızının artması ile metal – takım ara yüzeyindeki yağ filmi dağılmadan deformasyon tamamlanabileceğinden yağlama durumu geliştirilmiş olur [1].

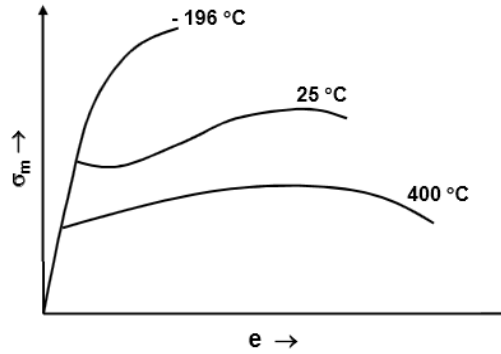
Deformasyon hızı farklı kristallografik yapıdaki malzemelere farklı şekilde etki etmektedir. Deformasyon hızındaki değişime hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki metaller, sıkı paket hekzagonal (SPH) ve yüzey merkezli kübik (YMK) yapıdaki metallerden daha duyarlıdır.



Şekil 2.16 : Farklı kristallografik yapıdaki malzemelerde deformasyon hızı ile çekme mukavemetinin değişimi [1].

2.3.2 Sıcaklık

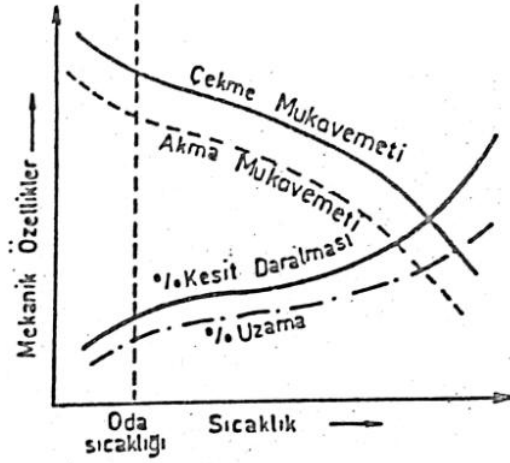
Gerilme birim – şekil değiştirme eğrisinin şekline, mukavemet, süneklik ve kırılma özelliklerine deformasyon sıcaklığının etkisi çok fazladır. Şekil 2.17’ de sıcaklığın gerilme – birim şekil değiştirme diyagramına olan etkisi görülmektedir.



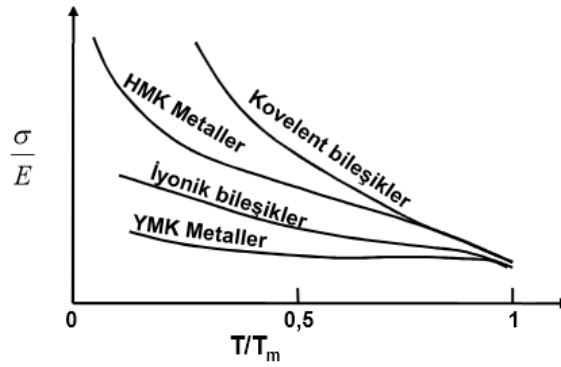
Şekil 2.17 : Az karbonlu bir çeliğin çekme diyagramına sıcaklığın etkisi [1].

Genel olarak sıcaklık arttıkça malzemenin mukavemeti azalır, sünekliği ise artar. Farklı kristallografik yapıdaki malzemelerin sıcaklığa olan duyarlılığı aynı değildir. Hacim merkezli kübik (HMK) sistemdeki metallerde sıcaklığın artması ile akma mukavemeti hızla azalırken, yüzey merkezli kübik (YMK) sistemdeki metallerde sıcaklık arttıkça akma mukavemetinin azalması daha yavaştır [20]. Aynı şekilde HMK metaller düşük sıcaklıklarda gevrek kırılma gösterirlerken, YMK metallerde bu durum görülmez. Yani HMK metallerde sünek – gevrek geçiş sıcaklığı olmasına

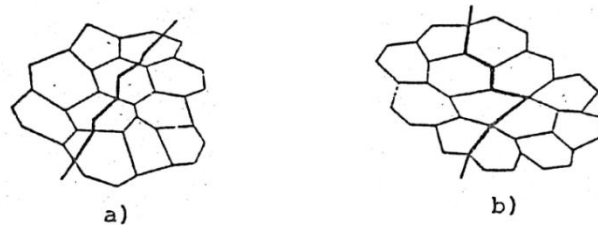
karşın, YMK metallerde bu durum yoktur. YMK sistemdeki metaller genellikle daha sünektirler ve deformasyon sıcaklığı azaldıkça süneklilikleri HMK metallere kıyasla çok az azalır.



Şekil 2.18 : Malzemelerin mekanik özelliklerine sıcaklığın etkisi [20].



Şekil 2.19 : Çeşitli malzemelerde σ/E değerinin benzeş sıcaklık T/T_m ile değişimi[1]. Sıcaklık malzemenin mekanik özelliklerine olan etkisinin yanında malzemenin kırılma tipine de etki etmektedir. Malzemede sıcaklık arttıkça kırılma transgranüler (taneler içi) kırılmadan intergranüler (taneler arası) kırılmaya geçiş göstermektedir.



Şekil 2.20 : a) Transgranüler kırılma (taneleri keserek kırılma)
b) İntergranüler kırılma (taneler arası kırılma) [20].

Transgranüler kırılmada kayma düzlemleri tane sınırlarından daha zayıftır ve kırılma taneler içindeki kayma düzlemleri boyunca olur. İntergranüler kırılmada ise, tane sınırlarının daha zayıf olması sebebiyle kırılma tane sınırları boyunca olur [20].

Deformasyon işlemlerinin gerçekleştiği sıcaklık da deformasyona uğrayan malzemenin mekanik özelliklerine etki etmektedir. Bu yüzden deformasyon sıcaklığı şekillendirme açısından önem taşımaktadır. Şekillendirmenin gerçekleştiği sıcaklığa göre;

$T/T_m > 0,5$ ise sıcak işlem,

$0,5 > T/T_m > 0,3$ ise ılık işlem,

$T/T_m < 0,3$ ise soğuk işlem,

şeklinde sınıflandırma yapılmaktadır.

Burada;

T : Malzemenin deformasyona uğradığı sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$),

T_m :Malzemenin ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$),

dır.

Şekillendirme sırasında meydana gelen deformasyon sertleşmesi ve bozulan tane yapısı şekillendirmeyi sınırlandırır. Sıcak işlemin avantajı burada görülebilir. Sıcak işlem sırasında yeniden kristalleşme sonucu deformasyon sertleşmesi ve bozulan tane yapısı giderilebilir. Bu sebeple büyük oranda deformasyon gerektiren şekillendirme işlemlerini sıcak işlemle yapmak gerekmektedir. Sıcak işlemin bir diğer avantajı şekillendirme için gerekli olan enerji soğuk ve ılık işleme göre daha düşüktür. Bunun sebebi sıcaklık arttıkça mukavemetin düşmesi ve sünekliğin artmasıdır.

Ilık işlemde şekillendirme oda sıcaklığının üstünde ancak yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapılır. Bu sebeple ılık işlemde yeniden kristalleşme olmaz fakat dinamik toparlanma meydana gelir. Bu durum, soğuk işleme göre daha kolay şekillendirme imkanı sağlar.

Soğuk işlem oda sıcaklığında veya oda sıcaklığının biraz üzerinde gerçekleşir ve deformasyon sertleşmesi gerçekleşir. Şekillendirme işleminde daha büyük kuvvetler ve güçler gerekir. Soğuk işlemin avantajı daha düzgün yüzeyli ürünler elde edilebilmesidir.

2.3.3 Sürtünme ve Yağlama

Sürtünme kuvveti temel olarak, takımın veya zımbanın sabit bir yük altında sac malzemenin yüzeyinde ilerlerken yüzeyler arasında meydana gelen ve ilerleme yönüne zıt yönde oluşan kuvvet olarak tanımlanmaktadır. Sac şekillendirme yöntemlerinde, sacın deformasyonunu etkileyen birçok parametre vardır ve bunlardan biri de sürtünme ve yağlayıcıların durumudur. Sürtünme ürün boyunca deformasyon dağılımını önemli derecede etkilemektedir. Temas eden arayüzeylerde etkili bir şekilde yağlayıcı kullanımı şekil alma kabiliyetini ve ürün kalitesini arttırmaktadır ve takımın aşınmasını engellemektedir [21,22].

Sürtünme katsayısı Amontons – Coulomb Kanununa göre ;

$$\mu = F / N \quad (2.11)$$

olarak tanımlanmaktadır.

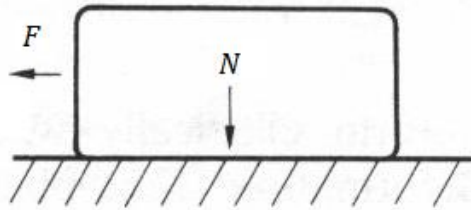
Burada,

μ : Sürtünme katsayısı,

F : Sürtünme kuvveti,

N : Normal kuvvet,

dir.



Şekil 2.21 : Sürtünme kuvvetinin tanımlanması.

Sürtünme katsayısı arttıkça iş parçasının deformasyon kabiliyeti azalır. Bu durumun önüne geçebilmek için yağlayıcılar kullanılmaktadır. Şekillendirme işlemlerinde yağlamanın etkisi şu şekildedir:

- Sürtünmeyi azaltır.
- Aşınmayı kısmen veya tamamen önler.
- Deformasyon için uygulanması gereken kuvveti azaltır.

- İş parçasının deformasyon oranını artırır.
- Parça yüzeyinin düzgün çıkmasını sağlar.
- Sürtünme nedeniyle oluşması muhtemel yüzey hatalarını azaltır.
- Takımın aşınmasını azaltarak ömrünü artırır.
- Parça ile takım arasında ısı yönünden yalıtkanlık sağlar.
- Isınmayı önleyerek parça ve takımı soğutur [1].

Yağlayıcılar katı, sıvı ve gaz yağlayıcılar olarak üç gruba ayrılırlar. Sıvı yağlayıcılar sürtünen yüzeyler arasına kolayca girip çıkabildikleri için ve ısıyı kolayca uzaklaştırabildikleri için sanayide en çok tercih edilen yağlayıcı tipidir.

Yağların seçiminde özellikle çalışma şartları ve kalitesi göz önüne alınmalıdır. Çalışma şartları olarak temas yüzeyinin durumu, sıcaklık, hız ve basınç gibi faktörler ve yağ kalitesi olarak ısılatma kabiliyeti, oksidasyona karşı dayanıklılık, korozyondan koruma, temizleme kabiliyeti, katılaşma ve alevlenme noktası gibi özellikleri düşünülmelidir. Fakat tüm bu özellikler için kesin değerler bulunmadığından yağların seçimi genellikle viskoziteye göre yapılmaktadır. Aynı zamanda yağın maliyeti de göz önünde bulundurulması gereken bir diğer özelliktir.

2.3.4 Geometrik Faktörler

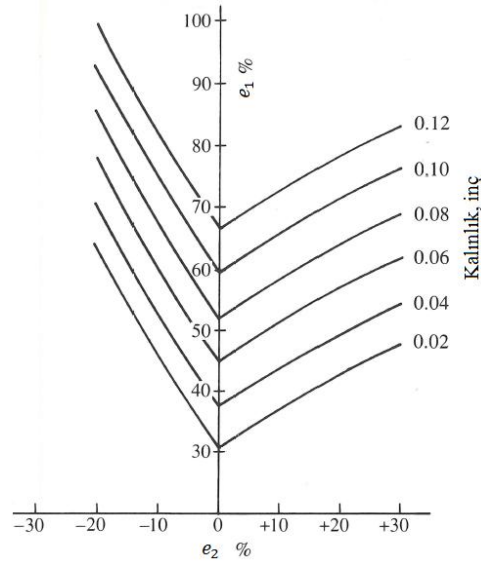
Plastik deformasyonu gerçekleştirecek gerilmeyi, malzemeye uygulanabilecek deformasyon oranını ya da deformasyon kuvvetini etkileyen faktörlerden biri de geometrik faktörlerdir. Deformasyon öncesi metalin şekli, kalıbın şekli ve elde edilmek istenilen ürünün şekli geometrik faktörleri oluşturmaktadır.

Deformasyon öncesindeki metalin kalınlığı malzemenin şekil alma kabiliyetini yakından etkiler. Metal kalınlığı arttıkça verilebilecek deformasyon miktarı da artar. Böylece ince bir sacda meydana gelebilecek yırtılma gibi hasarlar daha kalın sac kullanılarak önlenabilir. Sac kalınlığının artması aynı zamanda şekillendirme için gerekli olan kuvvetin artmasını da gerektirmektedir.

Kalıbın şekli ise elde etmek istediğimiz ürünün şekli ile doğrudan ilişkilidir. Elde edilmek istenilen ürünün şeklinde yapılmak istenilen bir değişiklik kalıp dizaynında yapılan değişiklik ile elde edilebilir ve bu durum da uygulanan kuvvette değişiklik yapılmasını gerektirir. Sabit bir deformasyon oranı uygulanarak yapılan bir parçanın

retiminde kullanılan kalıbın şekli aynı kaldığı halde sadece köşe eğrilik yarıçapları değiştirilmesi durumunda bile farklı kuvvetlerin uygulanması gerekmektedir.

Üretimde kullanılacak sacın seçiminde geometrik faktörlere dikkat edilmelidir. Üründe istenilen deformasyon miktarı seşilen sacın mekanik özellikleri tarafından karşılanmalıdır. Bu gibi sebeplerden dolayı geometrik faktörler sac şekillendirme aēısından önemli bir faktördür.



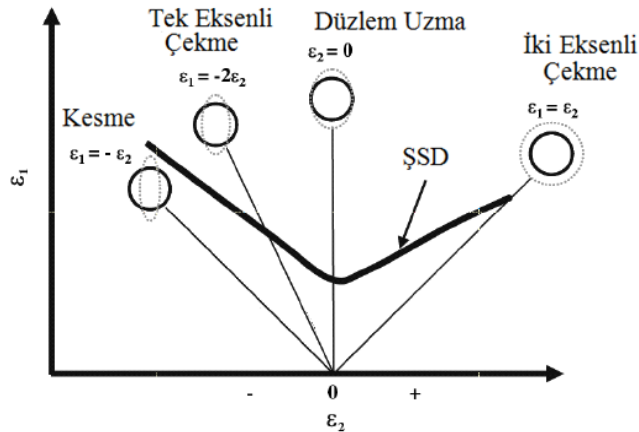
Şekil 2.22 : Aynı kompozisyona sahip düşük karbonlu çeliklerde şekillendirme sınır diyagramının kalınlıkla değişimi [10].

3. ŞEKİLENDİRME SINIR DİYAGRAMLARI

Şekillendirilebilirlik (formability), belirli bir sac şekillendirme yöntemiyle sacın ilk şekline son şekline hata olmaksızın deforme edilebilme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır [10]. Şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD) ise sacın şekil alma kabiliyeti, şekillendirilebilirliği, hakkında bilgi veren diyagramlardır.

Bir parçanın üretimi bükme, gererek şekillendirme ve derin çekme işlemlerinin saca aynı anda uygulanmasıyla gerçekleşir. Bu yüzden çekme deneyi ile elde ettiğimiz mekanik özelliklerin şekillendirme işlemlerinde karmaşık deformasyona uğrayan sacın göstereceği davranış hakkında tahminde bulunmak için tam anlamıyla yeterli değildir.

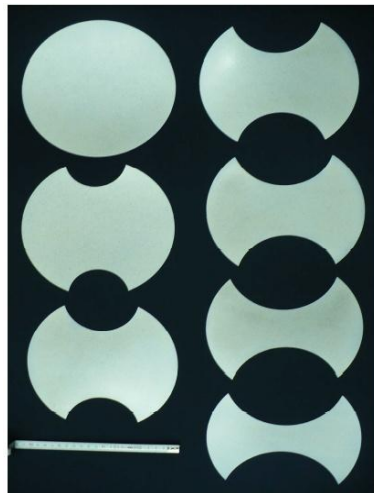
Mekanik özelliklere ek olarak şekillendirme özelliklerini daha iyi belirleyebilmek için gererek şekillendirme işlemine benzeyen Erichsen veya Olsen deneyi ve derin çekme işlemine benzeyen Swift deneyi kullanılmaktadır. Fakat bu deneyler laboratuvar koşullarında yapılmaktadır ve endüstriyel koşullardan farklılık göstermektedir. Dolayısıyla bu deneyler malzeme sınıflandırma ve seçme konusunda yararlı olurlar. Malzemenin üretim koşullarındaki davranışını inceleyebilmek için, plastik şekil değiştirme analizlerine ihtiyaç vardır [1]. Bu gibi sebeplerden dolayı şekillendirme sınır diyagramları kullanılmaktadır. Şekil 3.1’de şekillendirme sınır diyagramına ait bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.1 : Şekillendirme sınır diyagramı örneği [23].

Şekillendirme sınır diyagramının üst bölgesi şekillendirmede hataların olduğu tehlikeli bölgedir. Diyagramın alt bölgesi ise şekillendirmenin yapılabildiği emniyetli bölgedir. Diyagramın x – ekseni en küçük birim şekil değiştirme (e_2) ve y – ekseni en büyük birim şekil değiştirme (e_1) olarak adlandırılır. Diyagram ayrıca, çekme – çekme ve çekme – basma tipi şekil değiştirme türlerinin bulunduğu iki bölgeye ayrılır. Çekme – çekme bölgesinde e_2 pozitif işaretlidir ve bu bölgeye ait ilk çalışmalar Keeler tarafından gerçekleştirilmiştir. Çekme – basma bölgesinde e_2 negatif işaretlidir ve bu bölgeye ait ilk çalışmalar Goodwin tarafından yapılmıştır. Şekillendirme sınır diyagramı bu yüzden Keeler – Goodwin diyagramı olarak da adlandırılır.

Sac malzemenin şekillendirme sınır diyagramını oluşturabilmek için ilk adım sac malzemenin yüzeyine lazer tekniği, elektrokimyasal teknik gibi yollarla dairelerden oluşan bir ağ çizilmesidir. Daha sonra deney numunesinin boyutları, yağlama yöntemi ve yağlayıcı türü değiştirilerek; çekme, Erichsen, Swift, Marciniak, Nakazima gibi deneyler yardımıyla plastik şekil değiştirme işlemi için farklı yük durumları oluşturulur. Bu yük koşulları altında, sac malzemedeki çatlama gerçekleşinceye kadar plastik şekil değiştirme uygulanır. Deney numunelerinin şekil değiştirmelerinin ölçülmesinden elde edilen en büyük (e_1) ve en küçük (e_2) birim şekil değiştirme miktarları diyagram üzerine yerleştirilerek ŞSD elde edilir. e_1 ve e_2 değerleri sac üzerine çizilen dairelerden iki tanesinin şekil değişimi Formül 3.1 ve 3.2 kullanılarak elde edilir. Bu işlem sırasında kullanılan daireler çatlama en yakın komşu tam dairelerdir [1,24]. Şekil 3.2’deki deney numuneleri, ŞSD elde etmek için kesilmiş deney numuneleridir.



Şekil 3.2 : Şekillendirme sınır eğrilerini belirlemek için numune örnekleri [25].

e_1 ve e_2 değerleri;

$$e_1 = (D_1 - D_0) / D_0 \quad (3.1)$$

$$e_2 = (D_2 - D_0) / D_0 \quad (3.2)$$

formülleriyle hesaplanır. Burada;

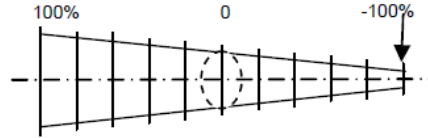
D_1 : Şekil değiştirmiş dairenin en büyük ekseni,

D_2 : Şekil değiştirmiş dairenin en küçük ekseni,

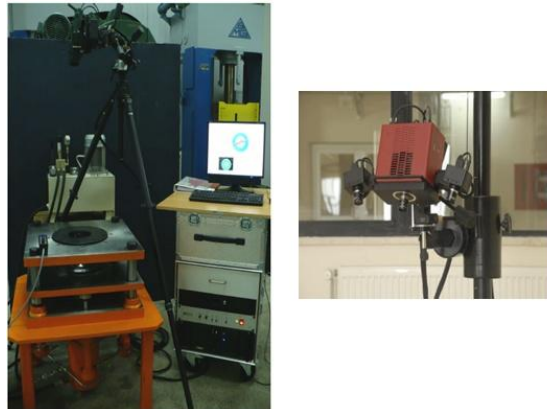
D_0 : Başlangıç daire çapı,

dır.

Sac malzeme yüzeyine işaretlenmiş olan dairelerdeki şekil değişimlerinin ölçülmesi için uygulanan bir diğer yöntemde, Mylar bandı kullanılmaktadır [24]. Mylar bandı ile ölçüm zaman alan ve ölçüm hatalarına sebep olan bir yöntemdir. Bunun sonucunda otomatik olarak yüzeydeki şekil değişimlerini ölçen sistemler geliştirilmiştir [26]. Bu yüzden bazı çalışmalarda Mylar bandları yerine yüksek çözünürlüklü kameralar ile numune yüzeyindeki şekil değişimi kayda alınmaktadır. Böylece e_1 ve e_2 değerleri hassas olarak ölçülebilmektedir.

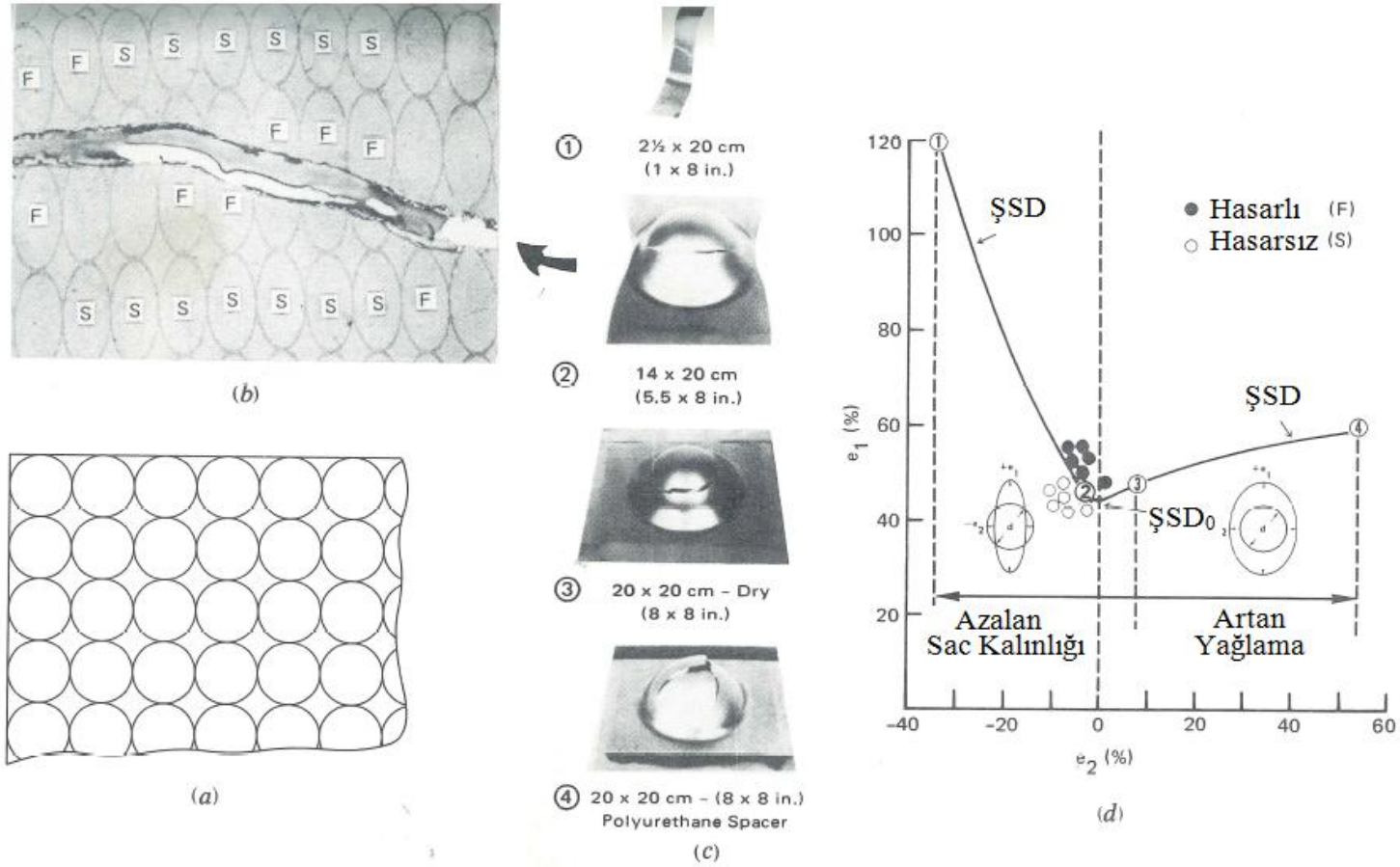


Şekil 3.3 : Mylar Bandına ait örnek [24].



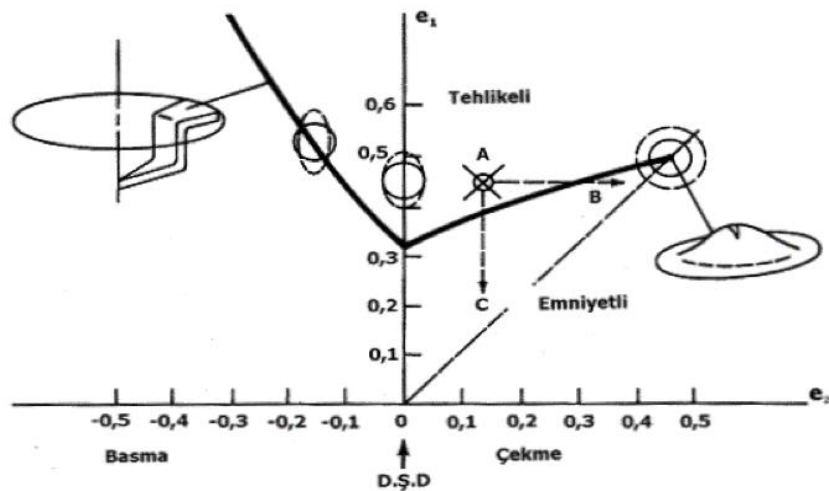
Şekil 3.4 : Dijital kameralara ait örnekler [25].

Şekillendirme sınır diyagramının oluşturulmasında gerçekleştirilen adımlar özet halinde Şekil 3.5' de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Şekillendirme sınır diyagramının elde edilişi (a) deformasyon öncesi dairesel ağ yapısı, (b) deformasyon sonrası kırılma bölgesindeki dairesel ağ yapısı, (c) kullanılan test numuneleri ve (d) şekillendirme sınır diyagramı gösterilmektedir [10].

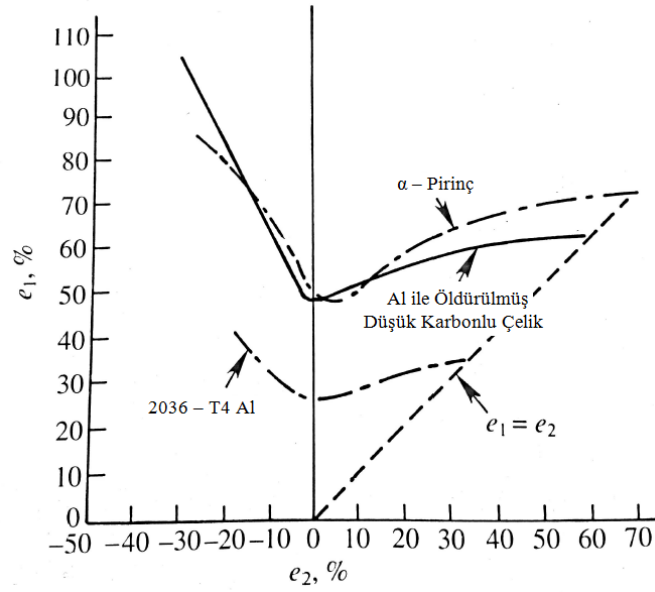
Seri üretim esnasında şekillendirme sınır diyagramlarından faydalanılır ve kritik bölgelerde şekil değiştirme analizleri yapılır. Sınır eğrisine yakın değerlerin bulunması üretim sırasında hata oluşma ihtimalinin yüksek olduğunu gösterir. Bu durumda şekillendirme işleminin emniyetli bölgede gerçekleştirecek önlemler alınmalıdır.



Örneğin iki eksenli çekme gerilmesinin hakim olduğu gererek şekillendirme işlemine uğramış bir parçada, plastik şekil değiştirme eğrisinin üst bölgesinde kalıyorsa malzemede çatlama olur. Çatlamayı önlemek için küçük şekil değiştirme miktarını (e_2) artırma veya büyük şekil değiştirme (e_1) miktarını azaltma yoluna gidilir. Küçük şekil değiştirme miktarını arttırmak için malzemenin bu yöndeki hareketi sınırlandırılır. Bunun için sıkıştırma kalıbına girinti çıkıntı verilerek veya bu bölgedeki sürtünme artırılarak malzemenin hareketi zorlaştırılır. Büyük şekil değiştirme miktarını azaltmak için şekillendirme derinliğini azaltma veya bölgesel incelme olayını önleme yoluna gidilir. Bölgesel incelmeyi önlemek için, erkek kalıbın bu bölge ile temas eden kısmında sürtünme artırılarak şekil değiştirme miktarı azaltılır. Bu anlatılanlar söz konusu örnek için geçerlidir. Her durum için önce bir şekil değiştirme analizi yapılarak, daha sonra çözüm yoluna gidilmelidir. Genelde zimba veya erkek kalıp kuvvetini azaltacak önlemler, şekillendirme işleminin emniyetli bölgede kalmasına katkıda bulunacaktır. Belirli bir kalıp tasarımı ile koşulları değiştirerek, şekillendirme işlemini emniyetli bölgeye çekmek mümkün değilse daha kaliteli malzeme

seçimi yoluna gidilir. Bunun tersine, deneme çalışmaları sonunda şekillendirme işlemine ait veriler, şekillendirme sınır diyagramının çok altında bulunuyorsa, daha düşük kalitelerde malzeme kullanımına geçilerek, maliyet açısından ekonomi sağlanmalıdır [1].

Sac malzemenin kalınlığının artışı eğrinin daha yüksek oluşmasını sağlar. Deformasyon sertleşmesi üssü (n) değerinin yüksek olması da şekillendirme sınır eğrisinin yüksek oluşmasını sağlamaktadır. Buradan; diğer faktörler aynı kalmak şartıyla, kalınlığı daha büyük veya n değeri daha büyük sac malzemenin şekillendirilebilirliğinin daha iyi olacağı düşünülür.



Şekil 3.7 : Farklı metallere ait şekillendirme sınır diyagramları [10].

4. SAC ŞEKİLENDİRME SIRASINDA OLUŞAN HATALAR

Sac şekillendirme yöntemlerinde kırılma, kırışma ve buruşma, şekil bozukluğu, gevşek metal ve istenmeyen yüzey yapısı karşılaşılan temel hatalardır. Bu hatalardan birinin veya birkaçının birlikte bulunması sac parçanın kullanılmamasına neden olmaktadır. Karşılaşılan başka bir hata ise geri yaylanmadan dolayı istenilen parça boyutlarının elde edilememesidir [6,27].

Sac şekillendirme işlemleri bu hatalar tarafından sınırlandırılır ve üretimin temel amacı hatalar oluşmadan istenilen son şeklin saca verilmesidir [28]. Üretim sırasında oluşan bu hataların sebebinin bilinmesi gerekli önlemlerin alınabilmesi açısından önem taşımaktadır.

4.1 Kırılma

Kırılma sac metale uygulanan germe ve derin çekme kuvvetlerinin malzemenin belirlenmiş kırılma sınırını aşması durumunda oluşur. Germe sırasında sac başlangıçta homojen daha sonra bölgesel incelme gösterir. Deformasyon yoğunlaşması sonucu boyun verme olarak bilinen bölgesel incelmeye kırılma meydana gelir. Boyun vermenin oluşumu genellikle hasar olarak kabul edilir çünkü bu durum gözle görülür bir kusur ve yapısal bir zayıflığa sebep olur [27].



Şekil 4.1 : (a) Çamaşır makinesi tambur ön sacında oluşan kırılma örneği. (b) Fırın çekmece esas sacında oluşan kırılma örneği.

Şekillendirme sırasında oluşan kırılma;

- Sacın mekanik özelliklerinin zayıf olması,
- Zımba veya kalıp eğrilik yarıçapının küçük olması,
- Sıkıştırma basıncının yüksek olması,
- Derin çekme oranının büyük olması,
- Yağlama işleminin uygun olmaması,
- Zımba ile kalıp arasındaki mesafenin küçük olması,

gibi nedenlerden dolayı oluşabilir [29].

4.2 Kırışma ve Buruşma

Tipik bir biçimlendirme işleminde zımba saca temas eder ve onu sıkıştırma kalıbı içine doğru iter. Sacın kenarları, giderek daralan bir bölge içine çekilir. Bu da dairesel bir basma gerilmesi oluşturur. Eğer bu gerilmeler malzeme ve kalınlığına bağlı olan kritik bir değere ulaşırsa, buruşukluk (buckle) denilen hafif engebeler oluşur. Buruşukluklar, eğer sıkıştırma kalıbı basıncı yeterli değilse kırışıklık(wrinkle) adı verilen daha büyük engebeler veya dalgalar halinde olabilir. Kesit değişiminin fazla olduğu veya kalıpla temasın olmadığı bölgelerde de kırışmalar olabilir. Sıkıştırma kalıbının basıncını arttırmak genellikle bu sorunu engeller [27].



Şekil 4.2 : Çamaşır makinesi tambur arka sacında meydana gelen kırışmaya ait bir örnek.

Derin çekme işleminde kırışma olayı,

- Sıkıştırma kuvvetinin yeterli olmaması,
- Kalıp veya zımba eğrilik yarıçapının aşırı büyük olması,

- Zımba ile kalıp arası mesafenin gereğinden büyük olması,
- Taslak çapının gereğinden büyük olması,
- Malzemenin çok ince olması,

hallerinde görülür [29].

4.3 Şekil Bozukluğu

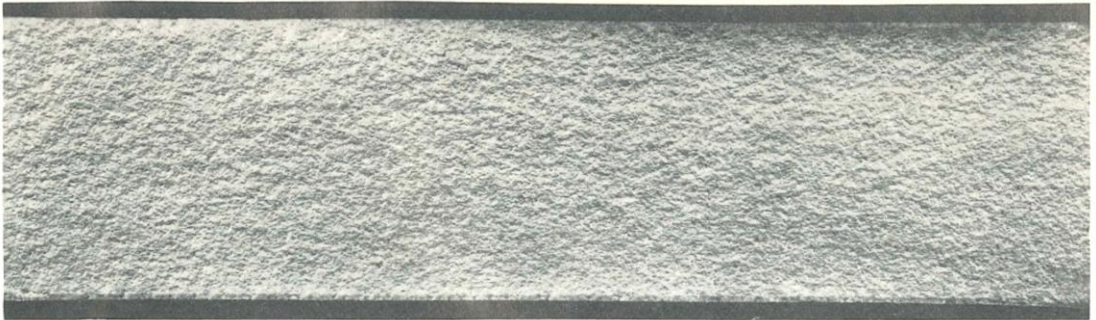
Şekillendirme sırasında uygulanan kuvvetler kaldırıldığı zaman iç gerilmeler gevşer. Bazı bölgelerde parçanın ölçülerinde küçük değişimler ile gevşeme tamamen gerçekleşir. Bükülmeye uğramış bölgelerde dış yüzey ile iç yüzey arasında gerilme farklılığı kalınlık boyunca elastik gerilme değişimleri oluşturur.

Eğer bu gerilmeler engellenmezse veya parçanın geometrisi tarafından kilitlenmezse, gerilme gevşemesi şekil bozukluğu veya geri yaylanma olarak bilinen parça ölçülerindeki değişime sebep olur. Geri yaylanma kısmen olsa da kalıp dizaynındaki değişiklikler ile engellenebilir [27].

4.4 İstenmeyen Yüzey Yapısı

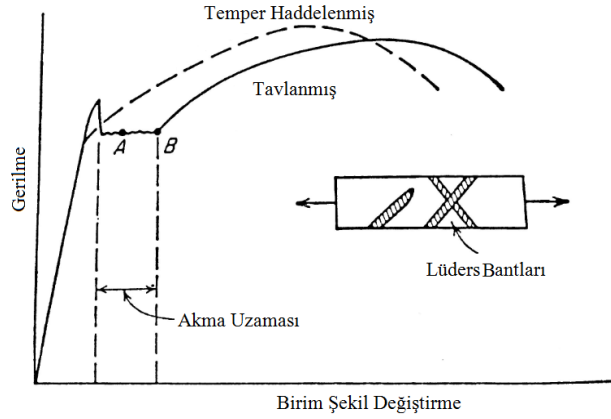
Sac malzemelere kırılma, çatlama, buruşma gibi parçayı kullanılamaz hale getiren hatalar olmadan istenilen şekil verilebilse dahi bazı durumlarda parça yüzeyinin görsel açıdan hatalı olması da parçanın kullanılmaz olmasına neden olur.

Tane yapısı iri olan metalik saclar büyük oranlarda plastik şekil değişimine uğrarlarsa portakal kabuğuna benzer yüzey pürüzleri oluşur. Küçük taneli malzeme kullanarak bu hata önlenir. Portakal kabuğu şekillendirme sonrası yüzeyde görünür hale gelir, bu yüzden şekillendirme öncesi tespit edilemezler [1,30].



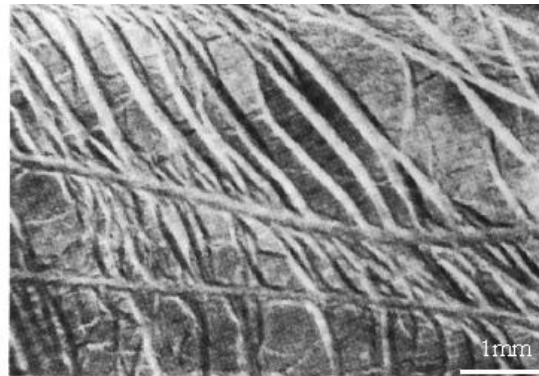
Şekil 4.3 : Metal yüzeyinde portakal kabuğu hatasının görünümü [30].

Çeliklerde görülen bir yüzeysel hata türü de Lüders bantlarıdır. Bu hata türü akma uzaması gösteren az karbonlu çeliklerde meydana gelir. Şekil 4.4’ de soğuk çekilmiş ve yumuşatma tavına uğramış az karbonlu çelik malzemenin gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.4 : Az karbonlu bir çeliğe ait çekme deneyi eğrileri [6].

Bu malzemelerde gerilme elastik bölge içinde artar, sonra aniden düşer ve belirli bir gerilme altında homojen olmayan plastik değişime uğrar. Daha sonra plastik şekil değiştirme homojen gerilme artışı ile devam eder. Süreksiz akma olayı diye adlandırılan bu homojen olmayan plastik şekil değişiminin başlangıcında çekme yönüne yaklaşık 45° eğimli gözle görülebilir bir bant oluşur. Akma uzaması boyunca Lüders bandı numuneyi boydan boya kat eder. Bundan sonra plastik şekil değiştirme homojen olarak devam eder. Biçimlendirme sırasında akma uzamasından daha küçük oranlarda plastik şekil değişimine uğrayan bölgelerde Lüders bantları kalıcı olur ve yüzey bozukluğuna yol açar [29].



Şekil 4.5 : Az karbonlu çelik sacda Lüders bantları [6].

Süreksiz akma olayını önlemek için az karbonlu çelik sac üretiminin son aşamasında temper haddesi ile saca yüzeysel ezme uygulanır. Fakat malzeme uzun bir süre bekletilirse yani deformasyon yaşanmasına uğrarsa süreksiz akma olayı tekrar

görülür. Alüminyum ile söndürülmüş az karbonlu çeliklerde deformasyon yaşlanması oldukça geciktiği için Lüders bantlarının oluşma ihtimali yoktur.

4.5 Gevşek Metal

Şekillendirme sonrasında malzemenin deformasyona uğramamış bölgelerinde istem dışı çarpılmalar (parçanın bir bölgesi iç bükey/dış bükey) oluşabilir. Aynı yönde ve aynı keskin bükme köşeleri bulunan parçalarda köşeler arasında serbest metal bölgeleri kalabilir. Bu bölgelerin şekillendirme sırasında çekilmesi zordur. Büyük, yassı ve bir miktar eğilmiş parçalarda serbest metal oluşma ihtimali yüksektir. Sac kenarlarındaki sıkıştırma kuvvetlerini arttırmak bu problemi çözebilir [27].

5. SAC ŞEKİLENDİRME İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Literatürde sac şekillendirme konuları üzerine birçok çalışma yapıldığı görülmektedir ve bu çalışmaların çoğunda simülasyon programları kullanarak üretimde oluşabilecek hataları önlemenin yolları, sacların şekillendirilebilme kabiliyetleri ve şekillendirme sınır diyagramlarının oluşturulması araştırılmıştır.

Volk ve arkadaşları sac metal şekillendirme simülasyonlarında hasar oluşumunun engellenmesinin zor bir iş olduğunu ve birkaç adımlı şekillendirme proseslerinde geleneksel şekillendirme sınır diyagramlarının boyun vermenin başlangıcını belirlemede yetersiz olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum için yeni bir yöntem belirtmişler ve bunun uygunluğunu göstermişlerdir [31]. Bir diğer simülasyon çalışmasında Gantar ve arkadaşları endüstriyel uygulamalarda Finite Element Method (FEM) analizine bağlı olarak şekillendirme proseslerinin optimizasyonu üzerine örneklemelere yer vermiştir [32]. Benzer bir çalışmada Makinouchi ve arkadaşları sac metal şekillendirme prosesleri için ITAS-3D isimli üç eksenli sonlu elemanlar programı geliştirmişlerdir. Özellikle otomotiv endüstrisinde kompleks yapıları parçaların üretiminde bu programın kullanılabileceğinden bahsedilmiştir [33].

Literatürde sıklıkla rastlanan bir diğer konu ise şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesine yönelik çalışmalardır. Girjob ve arkadaşları 0,5 ile 1,2 mm kalınlık aralığında ve maksimum çekme mukavemeti 600 MPa olan farklı çeşitlerdeki sac metallerin şekillendirme sınır diyagramlarını Nakajima ve Marciniak yöntemi ile elde edebileceklerini belirtmişlerdir. Çalışmalarında 1 mm kalınlıkta DC03 kalite sac için yapılan şekillendirme sınır diyagramı yer almaktadır [25]. Barlat ve arkadaşları da şekillendirme sınır diyagramlarının oluşturulması üzerine çalışmışlar, 0,1 mm kalınlıktaki saca Marciniak ve ASTM standart testini uygulamışlardır. İnce saclarda Marciniak testinin daha uygun olduğu sonucuna ulaşmışlardır [34].

Bu çalışmaların yanı sıra şekillendirmeyi etkileyen faktörleri inceleyen makalelere ulaşmak da mümkündür. Antonie ve arkadaşları deformasyon sertleşmesi üssü değerinin etkilerini incelemiştir. Deformasyon sertleşmesi üssü ile akma mukavemeti arasında lineer bir ilişki olduğuna ulaşmışlardır [35]. Nagarjuna ve arkadaşları ise

deformasyon sertleşmesi üssü değerinin 15 – 120 μm tane boyutu değerleri arasında tane boyutundan bağımsız olduğunu belirtmişlerdir [36].

Literatürde bulunan bu çalışmalar konunun sanayi açısından öneminin bir göstergesidir. Aynı zamanda uzun yıllardır bu alanda çalışmalar yapıldığı anlaşılmaktadır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

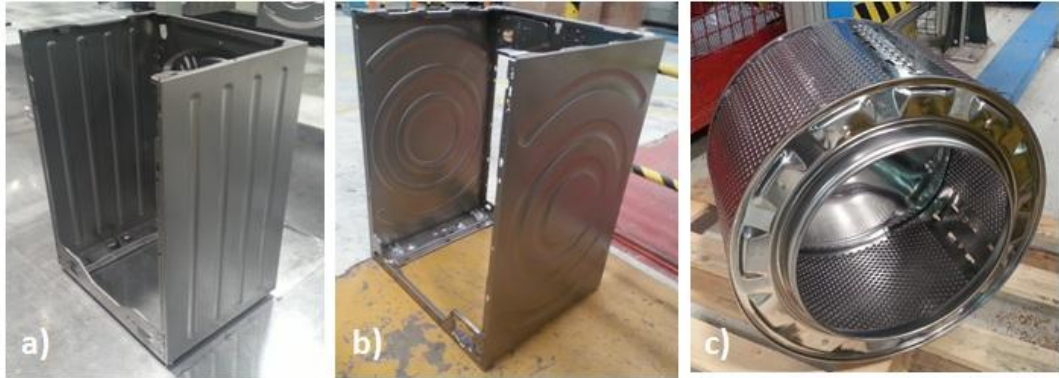
Bu bölüm iki başlıktan oluşmaktadır. İlk başlıkta kullanılan numuneler ve numunelerin kimyasal ve mekanik özellikleri hakkında ilgili standartlarda verilen bilgiler paylaşılmıştır. İkinci başlıkta ise deneylerin yapılış yöntemleri aktarılmıştır.

6.1 Numune Seçimi ve Özellikleri

Deneysel çalışmalar için numune alımı BSH Ev Aletleri Sanayi ve Ticaret A.Ş., Çamaşır Makinesi Fabrikası (Factory Laundry Care Istanbul – FLCI) üretim hatlarından gerçekleştirilmiştir. Numune seçimi Çizelge 6.1’ de belirtilen yöntemle uygun olarak yapılmıştır. Bu yöntemle göre;

- F03 gövde hattından Borçelik firmasına ait üç farklı rulodan rulo başı, rulo ortası ve rulo sonu,
- F14 gövde hattından Borçelik firmasına ait üç farklı rulodan rulo başı, rulo ortası ve rulo sonu,
- F03 tambur hattından Thyssen Krupp, Columbus ve Outokumpu firmalarına ait ve her biri için iki farklı rulodan rulo başı, rulo ortası ve rulo sonu,

olmak üzere toplam 12 rulodan 36 plaka toplanmıştır. Burada ismi geçen F03 ve F14 iki farklı çamaşır makinesi modeline aittir.



Şekil 6.1 : a) F03 model çamaşır makinesi gövdesi, b) F14 model çamaşır makinesi gövdesi, c) Ön sac, arka sac ve çevre sacının birleştirme hattında birleştirilmesi ile elde edilen tambur örneği.

Çizelge 6.1 : (a) Borçelik firmasına ait DC03 ve DC04 kalite saclardan alınan numunelerin gösterimi. (b) AISI-430 kalite paslanmaz çeliğin üç farklı firmadan alınan numunelerine ait gösterim.

Borçelik	DC03 - 1.0347								
	F14 Gövde Hattı								
	Rulo 1			Rulo 2			Rulo 3		
	Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu
	DC04 - 1.0338								
	F03 Gövde Hattı								
	Rulo 1			Rulo 2			Rulo 3		
	Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu

(a)

AISI-430 1.4016	Thyssen	Tambur Ön Sacı						
		Rulo 1			Rulo 2			
		Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	
	Outokumpu	Tambur Arka Sacı						
		Rulo 1			Rulo 2			
		Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	
	Columbus	Tambur Çevre Sacı						
		Rulo 1			Rulo 2			
		Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	Rulo Başı	Rulo Ortası	Rulo Sonu	

(b)

6.1.1 DC04 Kalite Sacın Özellikleri

F03 gövde parçası TS EN 10130 standardına uygun olarak üretilmiş DC04 kalite rulo halindeki saclar kullanılarak üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu standart, soğuk şekillendirme amaçlı soğuk haddelenmiş, kaplanmamış, düşük karbonlu, haddeleme genişliği 600 mm veya daha fazla, siparişte aksi belirtilmedikçe kalınlığı en az 0,35 mm olmak üzere 3 mm'ye kadar (dahil) olan sac, rulo, dilimlenmiş rulo veya dilimlenmiş sac veya rulodan belirli boylarda kesilmiş parçalar halinde teslim edilen çelik yassı mamulleri kapsar [37].

Üretim sırasında kullanılan sacın ölçüsü, standardı, kalitesi ve çelik numarası Çizelge 6.2' de özetlenmiştir ve sacın mekanik özellikleri Çizelge 6.3' de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.4' de sacın kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 6.2 : F03 gövde üretiminde kullanılan DC04 kalite sacın bilgileri.

Malzeme Adı	Sacın Tanımı			
	Ölçü (mm)	Standart	Kalite	Numara
Gövde U - Housing	0,88 x 855	TS EN 10130	DC04	1.0338

Çizelge 6.3 : F03 üretiminde kullanılan DC04 kalite sacın mekanik özellikleri [37].

Malzeme Adı	Mekanik Özellikler				
	Akma Dayanımı Max. (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	% Uzama Min.	Deformasyon Sertleşmesi Üssü n90 Min.	Anizotropi Katsayısı r90 Min.
Gövde U - Housing	210	270 - 350	38	0,18	1,6

Çizelge 6.4 : F03 üretiminde kullanılan DC04 kalite sacın kimyasal özellikleri [37].

Kalite	Numara	Kimyasal Bileşim Max.								
		%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Al	%Ti	%Nb	%V
DC04	1.0338	0,08	0,40	-	0,030	0,030	-	-	-	-

F03 model çamaşır makinesinde kullanılan metal parçalar ve bu modele ait resim Şekil 6.2' de verilmiştir. Aynı zamanda tez kapsamında deneysel çalışmalar için kullanılan gövde parçası da bu resim üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 6.2 :F03 model çamaşır makinesine ait metal parçalar.

6.1.2 DC03 Kalite Sacın Özellikleri

F14 gövde parçası TS EN 10130 standardına uygun olarak üretilmiş DC03 kalite rulo halindeki saclar kullanılarak üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu standart, soğuk şekillendirme amaçlı soğuk haddelenmiş, kaplanmamış, düşük karbonlu, haddeleme genişliği 600 mm veya daha fazla, siparişte aksi belirtilmedikçe kalınlığı en az 0,35 mm olmak üzere 3 mm'ye kadar (dahil) olan sac, rulo, dilimlenmiş rulo veya dilimlenmiş sac veya rulodan belirli boylarda kesilmiş parçalar halinde teslim edilen çelik yassı mamulleri kapsar [37].

Üretim sırasında kullanılan sacın ölçüsü, standardı, kalitesi ve çelik numarası Çizelge 6.5' de özetlenmiştir ve sacın mekanik özellikleri Çizelge 6.6' da verilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.7' de sacın kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 6.5 : F14 gövde üretiminde kullanılan DC03 kalite sacın bilgileri.

Malzeme Adı	Sacın Tanımı			
	Ölçü (mm)	Standart	Kalite	Numara
Yan Panel Side Panel	0,80 x 831	TS EN 10130	DC03	1.0347

Çizelge 6.6 : F14 üretiminde kullanılan DC03 kalite sacın mekanik özellikleri [37].

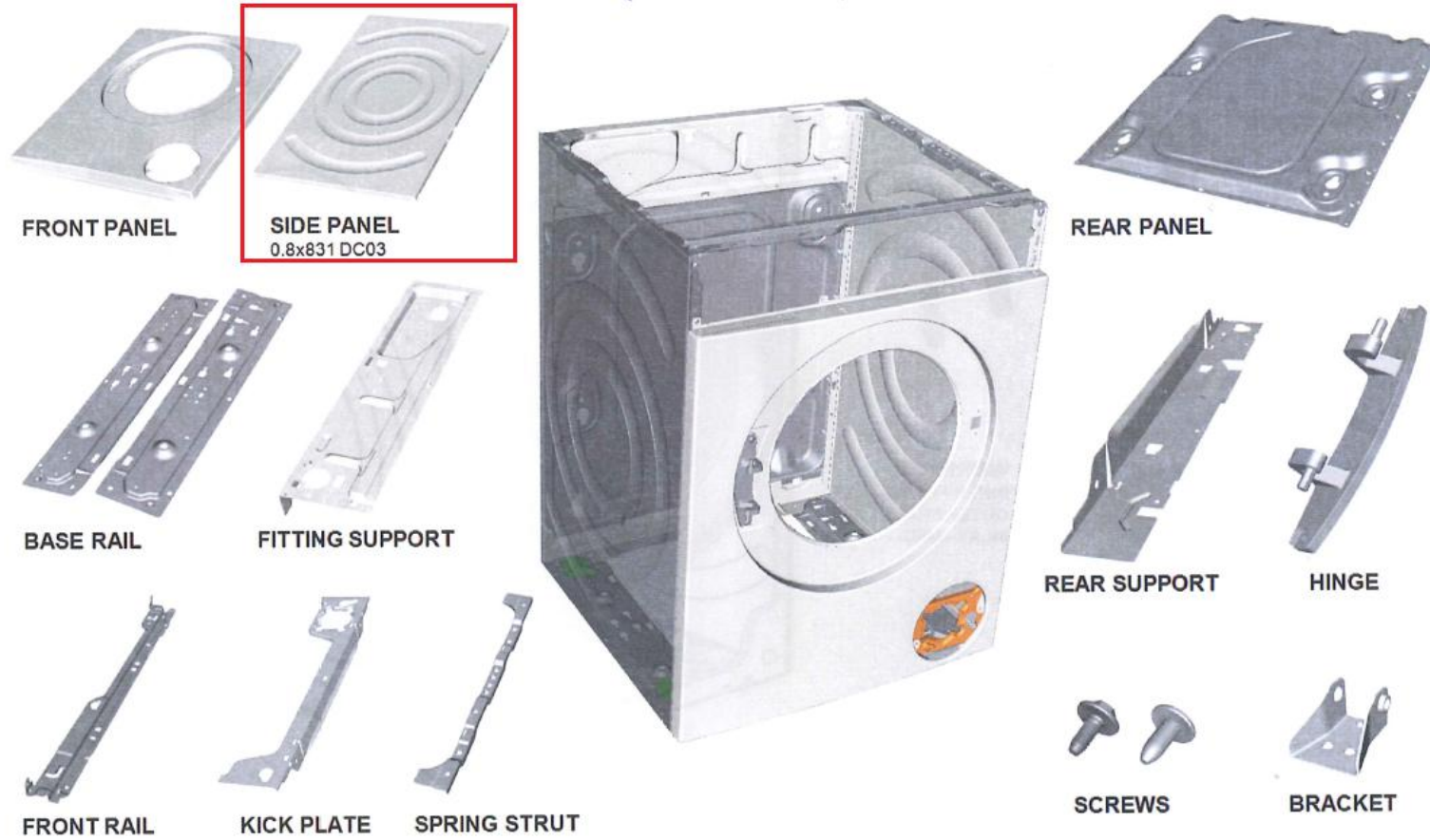
Malzeme Adı	Mekanik Özellikler				
	Akma Dayanımı Max. (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	% Uzama Min.	Deformasyon Sertleşmesi Üssü n ₉₀ Min.	Anizotropi Katsayısı r ₉₀ Min.
Yan Panel Side Panel	240	270 - 370	34	-	1,3

Çizelge 6.7 : F14 üretiminde kullanılan DC03 kalite sacın kimyasal özellikleri [37].

Kalite	Numara	Kimyasal Bileşim Max.								
		%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Al	%Ti	%Nb	%V
DC03	1.0347	0,10	0,45	-	0,035	0,035	-	-	-	-

F14 model çamaşır makinesinde kullanılan metal parçalar ve bu modele ait resim Şekil 6.3' de verilmiştir. Aynı zamanda tez kapsamında deneysel çalışmalar için kullanılan gövde parçası da bu resim üzerinde gösterilmiştir.

F14 HOUSING GROUP (Metal Parts)



Şekil 6.3 : F14 model çamaşır makinesine ait metal parçalar.

6.1.3 AISI-430 Kalite Sacın Özellikleri

F03 tambur üretiminde kullanılan saclar TS EN 10088-2 standardına uygun olarak üretilmiş AISI-430 (American Iron and Steel Institute) kalite rulo halindeki saclar kullanılarak üretimi gerçekleştirilmektedir. Sacın kalitesi DIN (Deutsche Institut für Normung) standartlarında ise X6Cr17 olarak verilmektedir. Bu standart genel amaçlar için standart tip ve özel tip, sıcak ve soğuk haddelenmiş korozyona dirençli paslanmaz çeliklerden yapılmış sac/levha ve şeritlerin teknik teslim şartlarını kapsar [38].

Üretim sırasında kullanılan ön, arka ve çevre sacının ölçüsü, standardı, kalitesi ve çelik numarası Çizelge 6.8’ de özetlenmiştir ve sacın mekanik özellikleri Çizelge 6.9’ da verilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.10’ da sacın kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 6.8 : F03tambur üretiminde kullanılan X6Cr17 kalite sacın bilgileri.

Malzeme Adı	Sacın Tanımı			
	Ölçü	Standart	Kalite	Numara
Tambur Arka Drum Back	0,40 x 540	TS EN 10088 -2	X6Cr17	1.4016
Tambur Ön Drum Front	0,40 x 510	TS EN 10088 -2	X6Cr17	1.4016
Tambur Çevre Drum Shell	0,40 x 287	TS EN 10088 -2	X6Cr17	1.4016

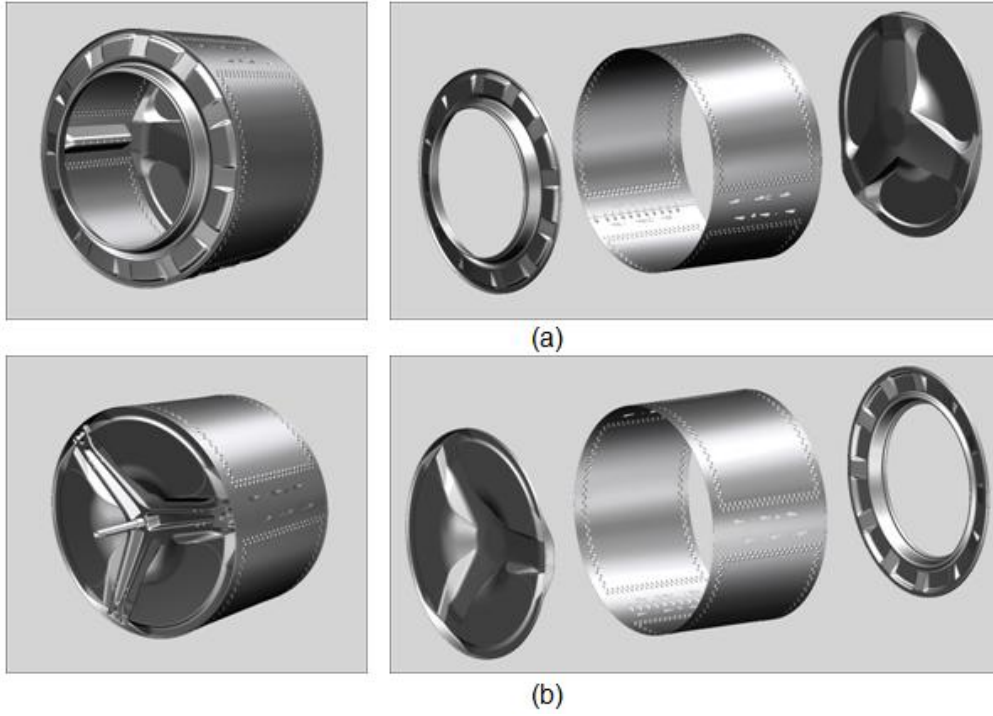
Çizelge 6.9 : F03 üretiminde kullanılan X6Cr17 kalite sacın mekanik özellikleri [38].

Malzeme Adı	Mekanik Özellikler		
	Akma Dayanımı Min. (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	% Uzama Min.
Tambur Arka Drum Back	260	450-600	20
Tambur Ön Drum Front			
Tambur Çevre Drum Shell			

Çizelge 6.10 : F03üretiminde kullanılan X6Cr17 kalite sacın kimyasal özellikleri [38].

Standart	Kalite	Numara	Kimyasal Bileşim Max.					
			%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Cr
TS EN 10088-2	X6Cr17	1.4016	0,08	1	1	0,015	0,04	16-18

F03 model çamaşır makinesinde kullanılan tambur ön, tambur arka ve tambur parçaları Şekil 6.4’ de gösterilmiştir.



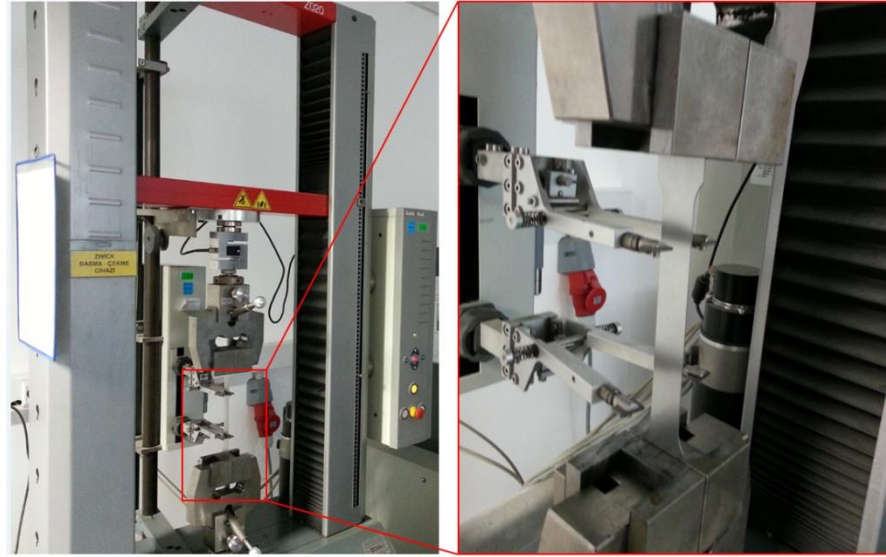
Şekil 6.4 : F03 model çamaşır makinesine ait tambur parçaları, (a) önden görünüş, (b) arkadan görünüş.

6.2 Deneyler

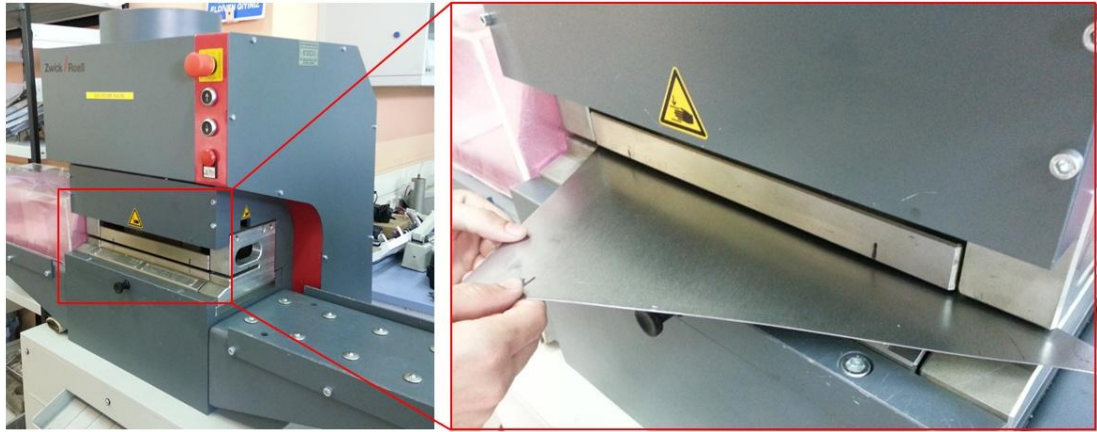
6.2.1 Çekme Deneyi

Çekme deneyi malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan ve farklı veya aynı sınıftaki malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılmasını sağlayan test yöntemlerinden biridir. Çekme testi aynı zamanda sac üreticileri tarafından garanti edilen sac özelliklerinin doğruluğunu kontrol etmek ve standartlarla karşılaştırmak için de kullanılmaktadır. Çekme test numunelerine tek eksenli çekme gerilmesi uygulanır, bu sayede malzemenin akma mukavemeti, çekme mukavemeti, üniform uzama, elastiklik modülü, kopma uzaması, deformasyon sertleşmesi üssü (n) ve dikey anizotropi katsayısı (R) gibi malzemeye ait mekanik özellikleri belirlenebilmektedir.

Tez kapsamında çekme deneyi TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak Zwick Z020 model çekme test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu standart, metalik malzemelerin çekme deneyi metodunu ve oda sıcaklığında tayin edilebilecek mekanik özellikleri kapsar [39]. Çekme numuneleri ise belirtilen standarda uygun olarak sac kesme kalıbından çıkartılmıştır.

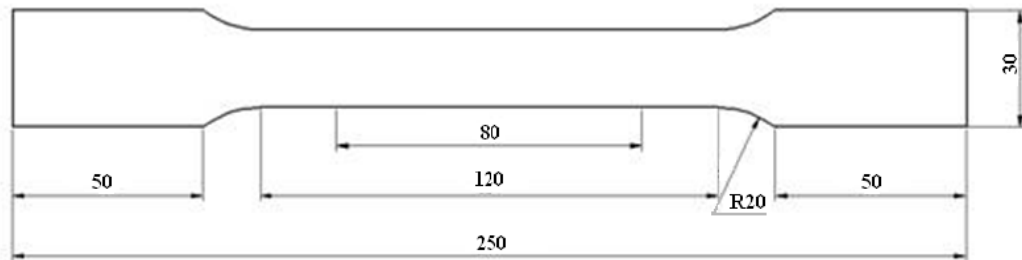


Şekil 6.5 : Zwick Z020 model çekme cihazı ve ekstansometre.

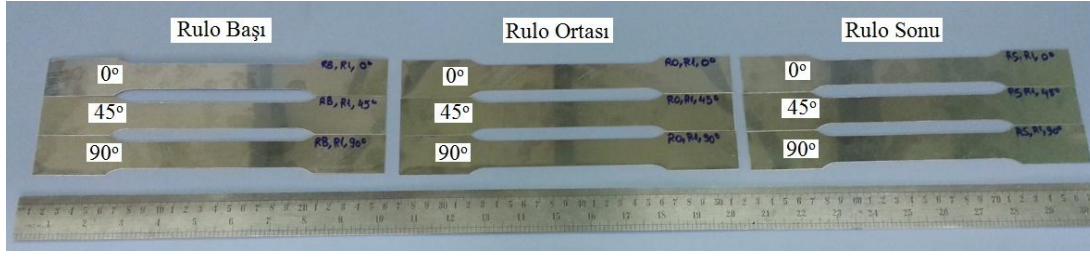


Şekil 6.6 : Çekme numunesi çıkartılmasında kullanılan sac kesme kalıbı.

Deneysel çalışmalar Çizelge 6.1'e uygun olarak ruloların başından, ortasından ve sonundan alınan numunelerden haddeye göre 0° , 45° ve 90° açılarında çekme numuneleri kesilmiştir. Çekme deneyleri Zwick Z020 marka çekme cihazında 25 mm/dak. çekme hızında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çekme numunelerinin boyutlarına ait detaylar Şekil 6.7'de verilmiştir. Ekstansometrenin boyu 80 mm olarak ayarlanmıştır.



Şekil 6.7 : Çekme numunesi boyutları.



Şekil 6.8 : Rulo başı, ortası ve sonundan alınan çekme numunelerine ait örnekler.

Çekme deneyi ile elastisite modülü, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, üniform uzama değerleri otomatik olarak çekme cihazından elde edilmektedir.

Dikey anizotropi katsayısı (R) değeri çekme deneyi sırasında %10 deformasyon oranına karşılık gelen endeki daralma değeri Formül 2.2' de yerine yazılarak hesaplanmıştır. Endeki daralma 1/100 hassasiyetindeki kumpas kullanılarak ölçülmüştür ve hacim sabitliği kuralından yararlanılarak kalınlıktaki incelme yerine %10 deformasyon oranına karşılık gelen boydaki uzama değeri kullanılmıştır.

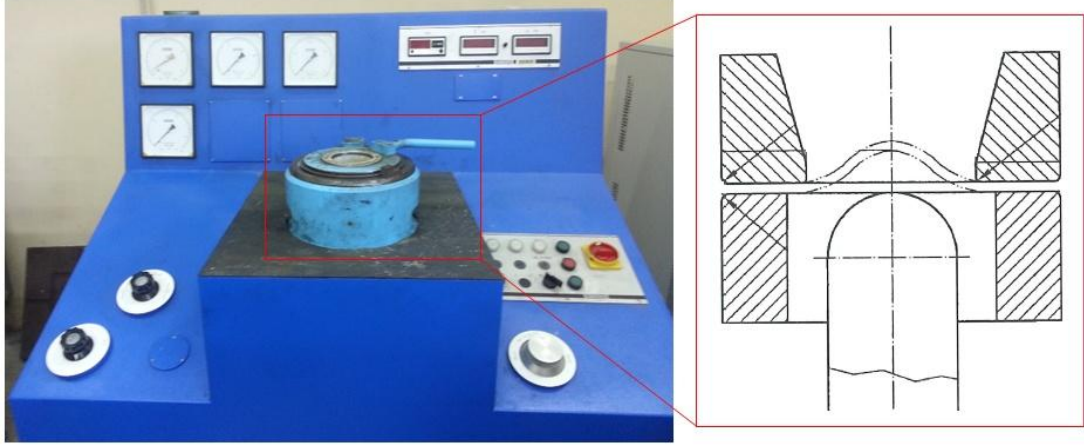
Deformasyon sertleşmesi üssü (n) değeri çekme eğrileri üzerinden homojen deformasyon bölgesine denk gelen %2, %4 ve %6 deformasyon oranlarının karşılığı olan gerilme değerleri temel alınarak hesaplanmıştır. Bu değerler $\log \sigma_g$ ve $\log \epsilon$ grafiğine aktararak grafiğinin eğimi n değeri olarak sonuçlara yazılmıştır.

6.2.2 Erichsen Çökertme Deneyi

Çökertme testinin yapılmasındaki amaç sac malzemelerin şekillendirilebilirlik özellikleri hakkında fikir sahibi olabilmektir. Yarı küresel uçlu zımbayla, şerit şeklinde kesilmiş malzeme üzerinde, yırtılana kadar çökertme işlemi yapılır. İşlem sırasında çökertme derinliği (yırtılma derinliği) ve yırtılma kuvveti değerleri tutulur. Küresel uçlu zımba ile derin çekme işlemi yapıldığından taslak üzerinde iki eksenli çekme gerilmesi oluşturulur. İki eksenli çekme gerilmesi sınır şekillendirme diyagramlarında grafiğin en sağında oluşturulan gerilme türüdür. Yırtılma derinliği ve kuvveti ölçülerek farklı saclardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla şekillendirilebilirlik özelliği daha iyi olan sac belirlenebilmektedir.

Deney sırasında Erichsen marka çökertme cihazı kullanılmıştır ve deney TS EN ISO 20482, metalik malzemeler – sac ve şeritler – Erichsen çökertme deneyi, standardına uygun olarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Bu standart, kalınlığı 0,1 mm ile 2 mm, genişliği 90 mm veya daha fazla olan metalik sac ve şeritlerin gerilerek

şekillendirilmesinde uğradığı plastik deformasyon yeterliliğinin tayini için bir standart deney metodunu kapsar. Tam çatlak oluşana kadar, bir tutucu çember ile kalıp arasına tutturulmuş deney parçasına küresel uçlu zımba ile bastırılarak bir basma oluşturulur. Zımbanın hareketi esas alınarak bu basmanın ölçülen derinliği deney sonucudur [40].



Şekil 6.9 : Erichsen çökertme testi cihazı.

Yırtılma derinliğini doğru ölçebilmek için zımba sac yüzeyine hafifçe değdirildikten sonra çökertme derinliği sıfırlanmakta ve ölçüm işlemine başlanmaktadır. Çatlak veya yırtık oluşumu gerçekleştiğinde ise zımbanın ilerlemesi durdurulmaktadır. Durdurma işlemi yırtılma kuvvetindeki düşüşün görülmesiyle yapılmaktadır ve bu noktadaki derinlik değeri kaydedilmektedir. Kuvvetteki düşüşten ayrı olarak çatlak oluşumu gözlenmesi ve çatlağın oluştuğu derinlik değerlerinin kaydedilmesiyle de deney sonuçları elde edilebilmektedir.

Erichsen çökertme deneyi sonuçları seri üretime geçilmeden önce malzemenin şekillendirme kabiliyeti hakkında bilgi verir ve oluşabilecek hasarlar için önlem alınmasına imkan sağlar. Ayrıca farklı sacların şekillendirme kabiliyetlerinin karşılaştırılmasını sağlar.



Şekil 6.10 : Erichsen çökertme testi sonucunda elde edilen numune görünümü.

6.2.3 Sertlik Deneyi

Sac numunelerin sertlik değerleri Vickers sertlik yöntemiyle TS EN ISO 6507-1 standardına uygun olarak ölçölmüştür. Sertlik değerleri numune alınan 12 rulonun rulo ortasına aittir ve her parça için deney üçer kere tekrarlanmıştır. Böylece çekme testi ile elde edilen değerlerin sertlik değerleri ile doğrulanması sağlanmıştır ve değerlerin rulodan ruloya değişimi ile ilgili sonuçlar da elde edilmiştir.

Deney, Shimadzu marka sertlik ölçüm cihazında 1 kg yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sac yüzeyinde elmas ucun bıraktığı izin köşegen uzunluğu ölçölerek sertlik değeri,

$$HV = 0.1891xF / d^2 \quad (6.1)$$

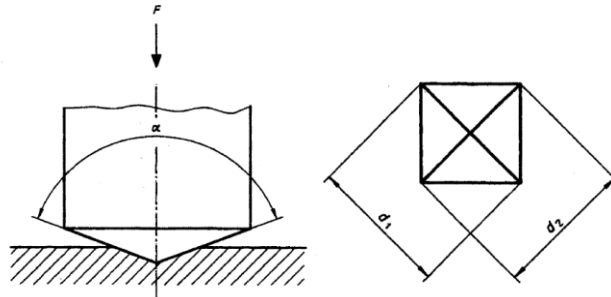
formölünden yararlanılarak hesaplanmıştır.Burada;

HV : Vickers sertlik değeri,

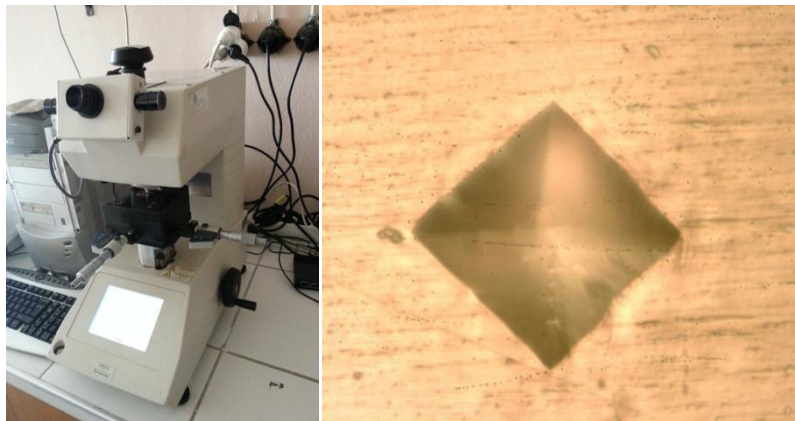
F : Uygulanan kuvvet (N),

d^2 : İzin köşegen uzunluklarının aritmetik ortalaması,

dır.



Şekil 6.11 : Vickers sertlik deneyi deney prensibi [41].



Şekil 6.12 : Shimadzu marka Vickers sertlik cihazı ve elde edilen ize ait görüntü.

6.2.4 Mikro Yapı İncelemeleri

Mikroyapı analizleri ile rulolar arasında mikro yapı değişimlerini belirlemek ve bu değişimlerin şekillendirme üzerindeki etkisini anlayabilmek amaçlanmıştır. 12 rulodan alınan numunelerin, rulo ortasındaki plakalar kullanılmıştır. Bu plakaların yüzeylerinden birer numune alınarak inceleme gerçekleştirilmiştir.

Mikro yapı incelemesinde ilk adım olarak numuneler sıcak bakalite alınmıştır. Bakalite alma işleminden sonra numuneler 600, 1000 ve 2500 numaralı SiC zımpara kağıtları kullanılarak zımparalanmıştır. Bir sonraki adımda ise 3 µm çapında alümina pasta ile 250 devir hızda parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonrasında yüzeyin çiziksiz ve temiz olması sağlanmıştır. Daha iyi görüntü elde edebilmek için yüzey kalitesinin yüksek olması istenir çünkü görüntü kalitesi ile yüzey kalitesi birbiri ile doğrudan ilişkilidir.

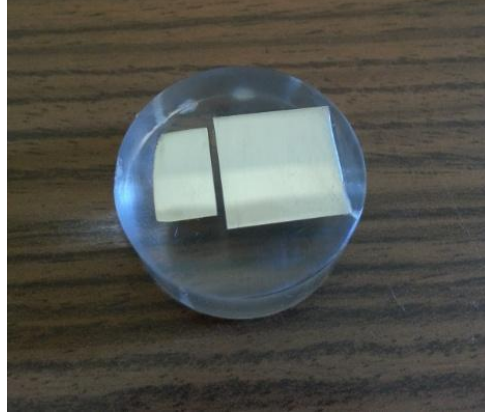


Şekil6.13 : Sırasıyla bakalite alma, zımparalama ve parlatma işlemlerinin gerçekleştirildiği cihazlar.

Bakalite alma, zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi optik görüntü alabilmek için yapılması gereken bir işlemdir. Bu işlem için DC03 ve DC04 kalite saclarda Nital 2 dağlayıcı kullanılmıştır ve çözelti içeriği 98 ml etanol ve 2 ml nitrik asit (HNO₃) şeklindedir.

AISI – 430 paslanmaz çelik için ise 15 ml hidroklorik asit (HCl), 15 ml nitrik asit (HNO₃), 10 ml hidrojen peroksit (H₂O₂) ve 30 ml etanol (C₂H₆O) karışımından oluşan çözelti kullanılmıştır [42].

Hazırlanan çözeltiler ile numuneler uygun sürelerde dağlanmış, yıkanmış ve hemen ardından kurutulmuştur. Bu işlemler sonrasında numuneler mikro yapı incelemesi için hazır hale getirilmiştir.



şekil 6.14 : Bakalite alınmış numuneye ait rnek.

Toplamda 12 adet numune optik mikroskopta inceleme için hazırlanmıştır ve 20X ve 50X büyütmede mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



şekil 6.15 : Mikro yapı incelemelerinin gerçekleştirildiği optik mikroskop.

7. DENEYSEL SONUÇLAR

7.1 DC03 – DC04 Kalite Sacların Test Sonuçları

7.1.1 Çekme Testi Sonuçları

Çizelge 7.1 : DC03 kalite sacın çekme testi sonuçları.

Firma / Kalite	Rulo No	Rulo Yeri	Hadde Yönü	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Üniform Uzama (%)	Toplam Uzama (%)	Deformasyon Sertleşmesi Üssü (n)	
Borçelik DC03	55972S02 – Rulo 1	Rulo Başı	0°	171	311	24,5	43,9	0,2134	
			45°	179	317	22,69	42,1	0,2275	
			90°	175	307	22,72	42,5	0,2003	
		Rulo Başı Ortalama			176	313	23,15	42,65	0,2172
		Rulo Ortası	0°	171	311	24,83	43,7	0,2318	
			45°	181	316	22,76	42,4	0,2381	
			90°	178	308	23,14	42,8	0,2149	
		Rulo Ortası Ortalama			177,75	312,75	23,37	42,83	0,2307
		Rulo Sonu	0°	171	312	24,81	44,2	0,226	
			45°	183	318	22,64	40	0,2347	
			90°	177	308	22,81	41,1	0,2149	
		Rulo Sonu Ortalama			178,50	314	23,23	41,33	0,2276
	Rulo Genel Ortalama			177,42	313,25	23,25	42,27	0,2252	
	56066S04 – Rulo 2	Rulo Başı	0°	167	312	24,33	44,6	0,2251	
			45°	176	318	22,36	41,5	0,253	
			90°	171	307	23,34	43,5	0,209	
		Rulo Başı Ortalama			172,50	313,75	23,10	42,78	0,2350
		Rulo Ortası	0°	225	363	19,89	37,4	0,2048	
			45°	239	375	18,24	35,1	0,1969	
			90°	231	357	18,75	34	0,185	
		Rulo Ortası Ortalama			233,50	367,50	18,78	35,40	0,1959
		Rulo Sonu	0°	220	357	19,96	37,9	0,2134	
			45°	232	364	18,17	33,2	0,2061	
			90°	225	350	21,25	37,6	0,1884	
		Rulo Sonu Ortalama			227,25	358,75	19,39	35,48	0,2035
	Rulo Genel Ortalama			211,08	346,67	20,42	37,88	0,2115	
	56161S01 – Rulo 3	Rulo Başı	0°	191	332	23,05	40,7	0,2135	
			45°	200	342	21,42	36,3	0,2308	
			90°	194	329	22,13	39,7	0,2302	
		Rulo Başı Ortalama			196,25	336,25	22,005	38,25	0,2263
		Rulo Ortası	0°	193	332	23,37	40,9	0,207	
			45°	201	343	21,18	36,7	0,2109	
			90°	192	325	22,71	40,2	0,2168	
		Rulo Ortası Ortalama			196,75	335,75	22,11	38,63	0,2114
		Rulo Sonu	0°	193	333	21,15	38,5	0,2214	
			45°	199	348	20,55	34,6	0,2385	
			90°	189	337	22,47	39,2	0,2266	
		Rulo Sonu Ortalama			195	341,50	21,18	36,73	0,2313
	Rulo Genel Ortalama			196	337,83	21,77	37,87	0,2230	
		Standart			Max. 240	270-370	-	Min. 34	-

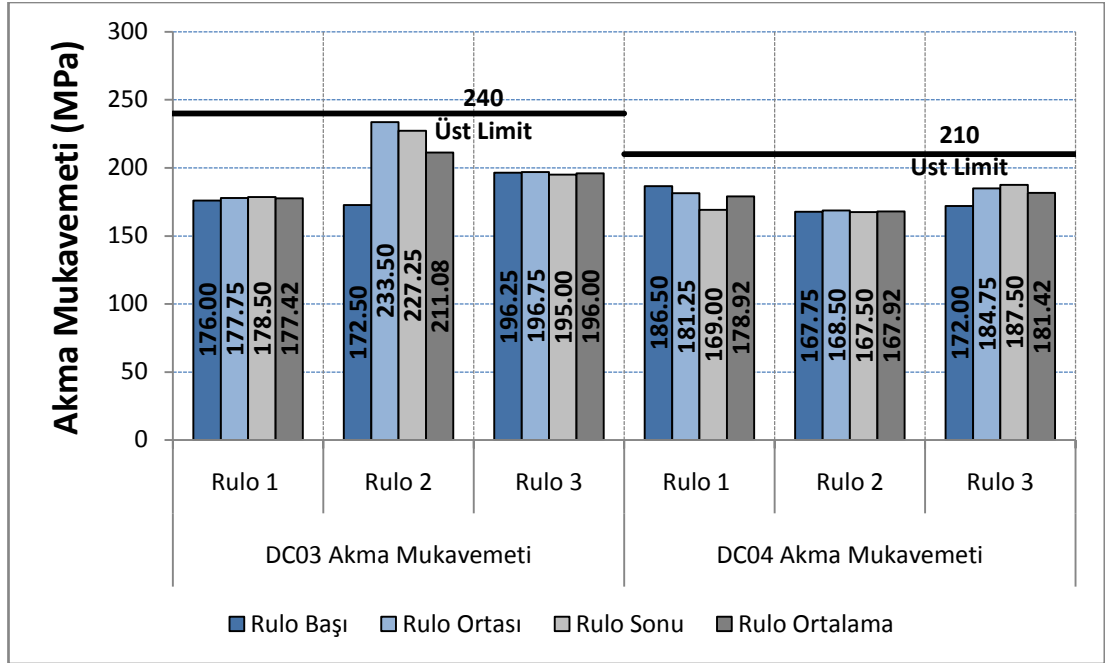
DC03 kalitesindeki saclar için çekme testlerinin sonuçları Çizelge 7.1’ de verilmiştir. Çizelge 7.2’de ise DC04 kalitesindeki saclar için gerçekleştirilen çekme testlerinin sonuçları verilmiştir.

Çizelge 7.2 : DC04 kalite sacın çekme testi sonuçları.

Firma / Kalite	Rulo No	Rulo Yeri	Hadde Yönü	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Üniform Uzama (%)	Toplam Uzama (%)	Deformasyon Sertleşmesi Üssü (n)	
Borçelik DC04	55450S03 – Rulo 1	Rulo Başı	0°	179	311	24,89	44,30	0,2251	
			45°	192	316	22,22	38,90	0,2252	
			90°	183	306	23,3	41,70	0,212	
		Rulo Başı Ortalama			186,50	312,25	23,16	40,95	0,2219
		Rulo Ortası	0°	174	311	24,53	43,80	0,2171	
			45°	186	322	22,61	37,30	0,2285	
			90°	179	304	23,73	44,90	0,2207	
		Rulo Ortası Ortalama			181,25	314,75	23,37	40,83	0,2237
		Rulo Sonu	0°	164	297	25,11	44,30	0,215	
			45°	173	306	21,91	35,60	0,2127	
			90°	166	289	23,74	43,50	0,2058	
		Rulo Sonu Ortalama			169	299,50	23,17	39,75	0,2116
		Rulo Genel Ortalama			178,92	308,83	23,23	40,51	0,2190
	56252S01 – Rulo 2	Rulo Başı	0°	159	298	24,55	43,60	0,2402	
			45°	173	305	23,42	42,10	0,226	
			90°	166	295	24,52	42,20	0,2286	
		Rulo Başı Ortalama			167,75	300,75	23,98	42,50	0,2302
		Rulo Ortası	0°	160	299	25,12	44,20	0,2402	
			45°	173	304	23,61	41,60	0,223	
			90°	168	296	24,64	44,50	0,2357	
		Rulo Ortası Ortalama			168,5	300,75	24,25	42,98	0,2305
		Rulo Sonu	0°	164	300	25,31	45,90	0,2382	
			45°	167	296	24,49	43,00	0,2249	
			90°	172	304	23,77	39,60	0,2319	
		Rulo Sonu Ortalama			167,5	299	24,52	42,88	0,2300
		Rulo Genel Ortalama			167,92	300,17	24,25	42,78	0,2302
	56465S02 – Rulo 3	Rulo Başı	0°	163	300	24,36	42,10	0,2374	
			45°	178	316	21,41	36,10	0,2373	
			90°	169	299	23,01	40,40	0,2388	
		Rulo Başı Ortalama			172	307,75	22,55	38,68	0,2377
		Rulo Ortası	0°	179	317	24,4	42,10	0,2275	
			45°	190	329	21,97	37,20	0,2353	
			90°	180	310	22,85	40,50	0,2242	
		Rulo Ortası Ortalama			184,75	321,25	22,80	39,25	0,2306
		Rulo Sonu	0°	180	318	24,24	42,10	0,2282	
			45°	193	330	21,84	36,70	0,2301	
			90°	184	313	22,69	40,90	0,2263	
		Rulo Sonu Ortalama			187,5	322,75	22,65	39,10	0,2287
		Rulo Genel Ortalama			181,42	317,25	22,67	39,01	0,2323
	Standart				Max. 210	270-350	-	Min. 38	Min. 0,18

Her iki çizelgede sac malzemelerin akma, çekme mukavemetleri, üniform uzamaları, toplam uzamaları ve deformasyon sertleşmesi üssü değerleri verilmiştir. Çizelgeler hadde yönüne göre 0°, 45°, 90° açılarıyla alınmış numunelerin sonuçlarını, rulo başı, ortası ve sonunun ortalama değerlerini, rulonun genel ortalama değerini ve

standartlardaki değerlerini içermektedir. Böylece rulolar hakkında ayrıntılı bilgi elde edilmiş, iki farklı kalitedeki sacı karşılaştırma imkanı doğmuştur. Hem sonuçları incelemek hem de karşılaştırmaları daha rahat yapabilmek için sonuçlar grafiklere dönüştürülmüştür.

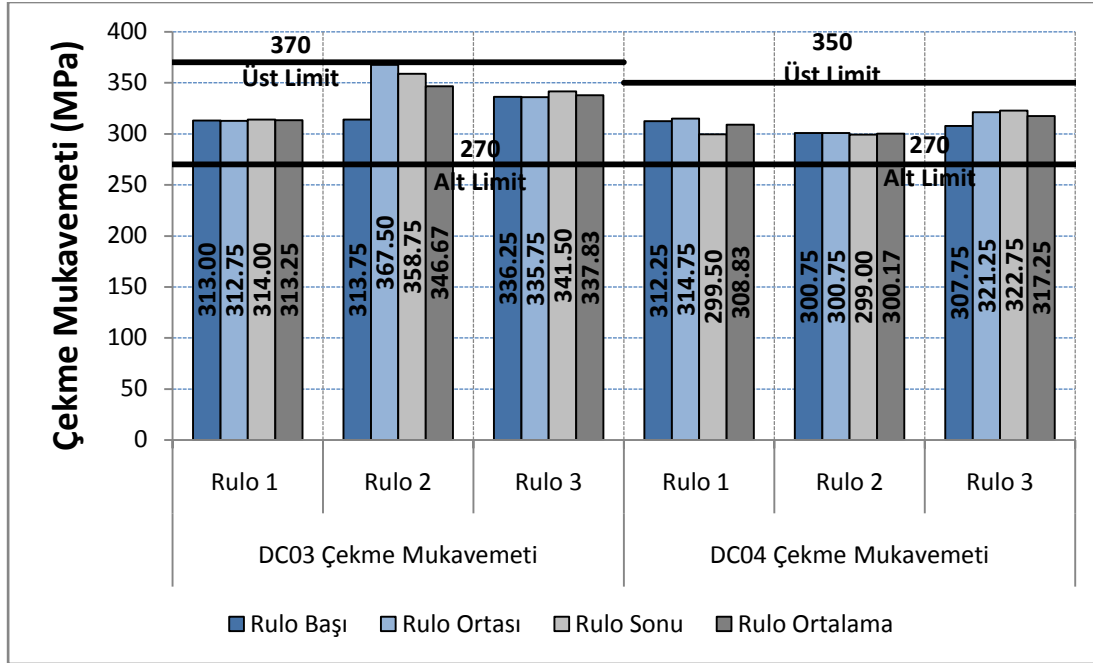


Şekil 7.1 : DC03 – DC04 kalite sacların akma mukavemeti sonuçları.

Akma mukavemeti için değerlendirme yapıldığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- DC03 ve DC04 kalite sacların akma mukavemeti değerlerinin standartlarda belirtilen değerleri sağladığı görülmektedir.
- DC03 standartlarda belirtilen 240 MPa üst limiti ve DC04 standartlarda belirtilen 210 MPa üst limiti geçmemektedir.
- DC03 kalite sacın üç rulo için ortalama akma mukavemeti değeri 194,83 MPa, DC04 kalite sacın üç rulo için ortalama akma mukavemeti ise 176,08 MPa' dır.
- DC03 kalite sac için rulo başı, rulo ortası ve rulo sonu akma mukavemet değerleri Rulo 1 ve Rolu 3 için birbirine yakın iken Rulo 2 için bu değerler daha yüksek çıkmıştır.
- DC04 kalite sac için rulo başı, rulo ortası ve rulo sonu akma mukavemet değerleri her üç rulo için paralellik göstermektedir.
- Akma mukavemeti değerleri rulodan ruloya ve numunenin alınış yönüne göre değişiklik göstermektedir.

- Her iki kalite sacın, rulo ortalama akma mukavemeti değerleri DC04 için belirtilen üst limiti geçmediği görülmektedir. Yani DC03 kalite sac da 210 MPa standart değerini sağlamaktadır. Bu durum akma mukavemeti değerlerinin iç içe geçmiş olduğunun bir göstergesidir.

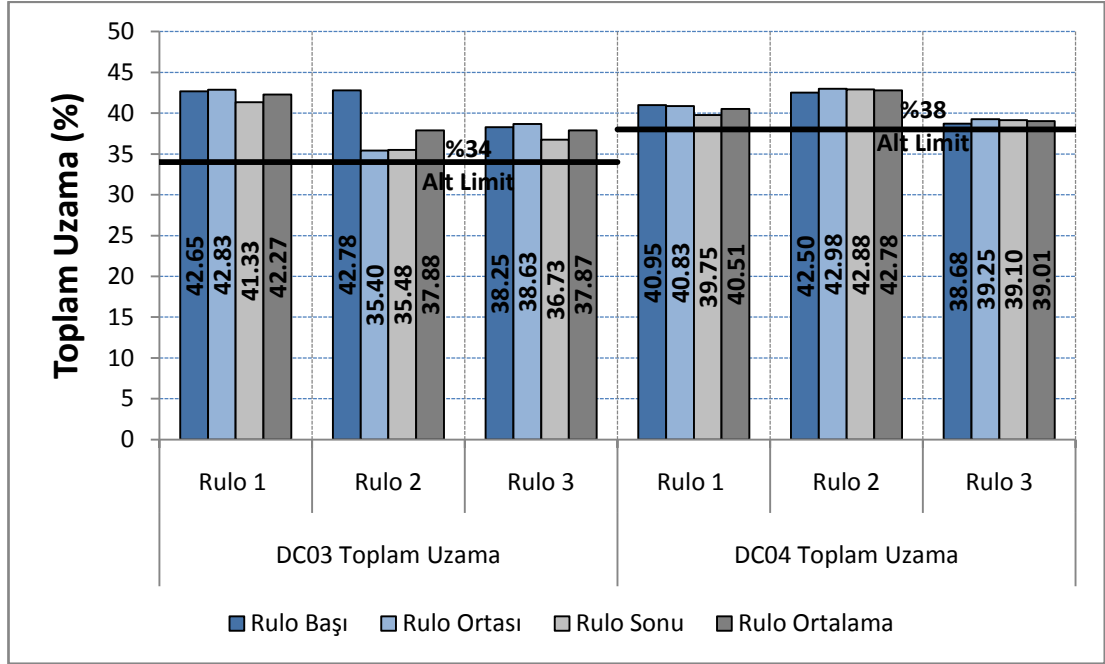


Şekil 7.2 : DC03 – DC04 kalite sacların çekme mukavemeti sonuçları.

Çekme mukavemeti için değerlendirme yapıldığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- DC03 ve DC04 kalite sacların ortalama çekme mukavemeti değerlerinin standartlarda belirtilen değerleri sağladığı görülmektedir. Fakat Çizelge 7.1’ de DC03 kalite saca ait Rulo 2’nin rulo ortasından 45⁰ yönünde alınan numunenin çekme mukavemeti 375 MPa ile standardın üzerinde bir değerdir.
- DC03 kalite sacın üç rulo için ortalama çekme mukavemeti değeri 332,58 MPa, DC04 kalite sacın üç rulo için ortalama çekme mukavemeti ise 308,75 MPa’ dır.
- DC03 kalite sac için rulo başı, rulo ortası ve rulo sonu çekme mukavemet değerleri Rulo 1 ve Rolu 3 için birbirine yakın iken Rulo 2 için bu değerler daha yüksek çıkmıştır.
- DC04 kalite sac için rulo başı, rulo ortası ve rulo sonu çekme mukavemet değerleri her üç rulo için paralellik göstermektedir.

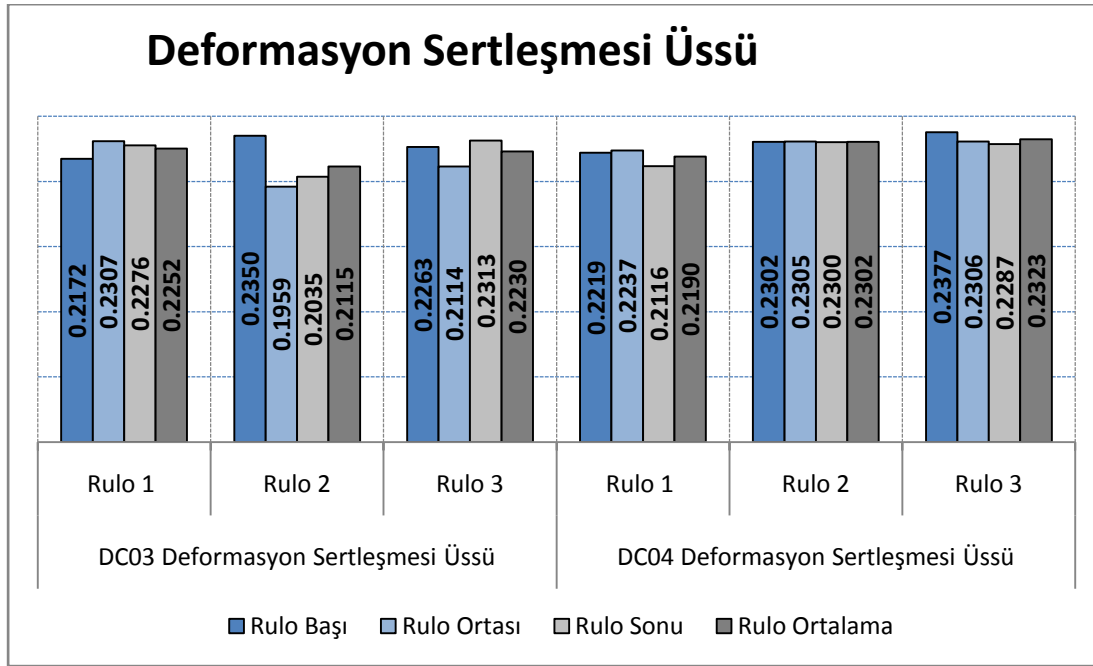
- Akma mukavemeti değerleri ile çekme mukavemeti değerleri bir birini desteklemektedir. Akma değeri yüksek olan sacların çekme değeri de yüksektir. Bu durum testlerin doğruluğunun bir göstergesidir.



Şekil 7.3 : DC03 – DC04 kalite sacların toplam uzama sonuçları.

DC03 ve DC04 kalite sacların toplama uzama değerleri karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- DC03 ve DC04 kalite sacların ortalama uzama değerleri standartlarda belirtilen değerleri sağlamaktadır.
- DC03 kalite sacın üç rulosunun ortalama toplam uzama değeri % 39,34 iken bu rakam DC04 kalite sac için % 40,76 dir.
- Her iki kalite sac birbiri ile kıyaslandığı zaman değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Aynı zamanda uzama değerleri akma ve çekme mukavemeti değerlerinin yüksek olduğu rulo bölgelerinde düşük, düşük olduğu rulo bölgelerinde ise yüksektir.
- Hadde yönüne göre inceleme yapıldığı zaman, 45⁰ yönünde alınan numunelerin en düşük uzama değerlerini verdiği görülmektedir. Akma ve çekme mukavemeti değerlerinde 45⁰ yönündeki sonuçların en yüksek değerler olması bu sonucu doğrulamıştır.



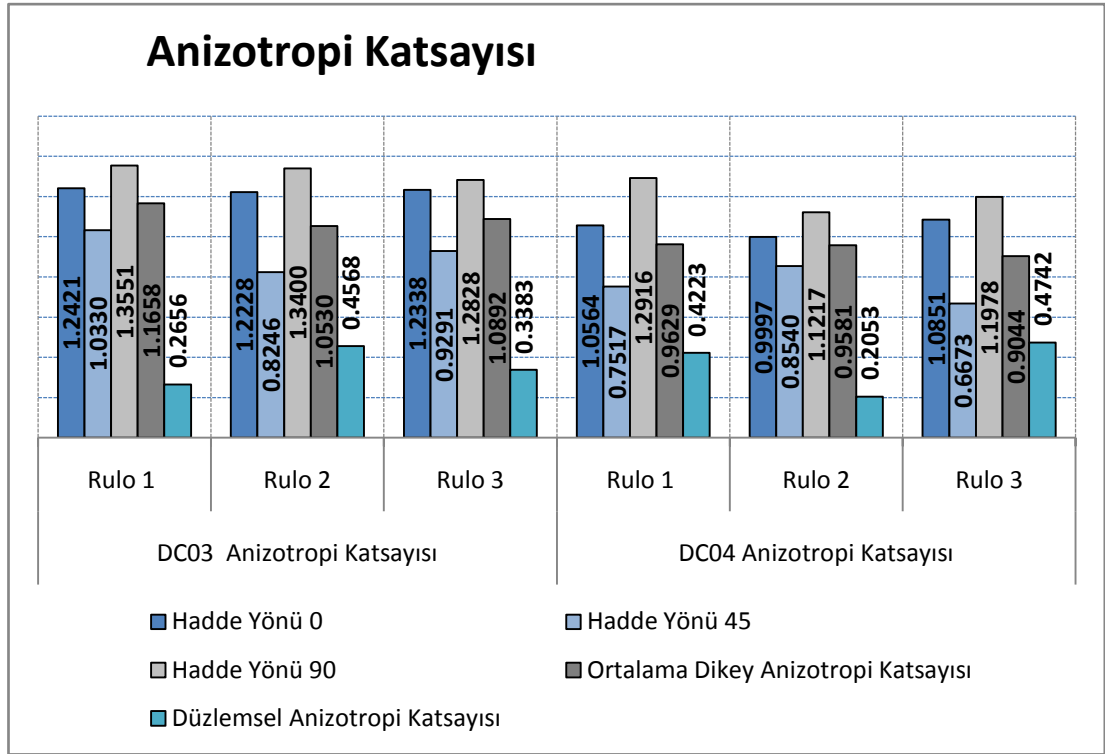
Şekil 7.4 : DC03 – DC04 kalite sacların deformasyon sertleşmesi üssü sonuçları.

- DC03 kalite üç rulonun ortalama deformasyon sertleşmesi üssü değeri 0,2199 olarak belirlenmiştir.
- DC04 kalite üç rulonun ortalama deformasyon sertleşmesi üssü değeri 0,2272 olarak belirlenmiştir.
- Deformasyon sertleşmesi üssü değeri şekillendirilebilirliğinin ölçütü kabul edildiği düşünülürse, DC03 ve DC04 kalite sacların şekillendirme özelliklerinin yakın olduğu sonucuna varılabilir.

Çizelge 7.3’ de çekme deneyleri sırasında elde edilen ortalama dikey anizotropi katsayısı ve düzlemsel anizotropi katsayısı değerleri verilmiştir. Bu değerler her rulo için rulo başı, ortası ve sonundan hadde yönüne göre 0^0 , 45^0 ve 90^0 derecelik açılardan alınan numunelerin test sonuçlarıdır fakat çizelgede özet olarak verilmiştir. Sonuçlar ayrıntılı incelenmek istenirse EK A değerlendirilebilir.

Çizelge 7.3 : DC03 – DC04 kalite sacların ortalama dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi sonuçları.

Firma / Kalite	Rulo No	R0	R45	R90	$\bar{R}$	ΔR
Borçelik - DC03	55972S02 - Rulo 1	1,2421	1,0330	1,3551	1,1658	0,1328
	56066S04 - Rulo 2	1,2228	0,8246	1,3400	1,0530	0,2284
	56161S01 - Rulo 3	1,2338	0,9291	1,2828	1,0892	0,1691
Borçelik - DC04	55450S03 - Rulo 1	1,0564	0,7517	1,2916	0,9629	0,2112
	56252S01 - Rulo 2	0,9997	0,8540	1,1217	0,9581	0,1027
	56465S02 - Rulo 3	1,0851	0,6673	1,1978	0,9044	0,2371



Şekil 7.5 : DC03 – DC04 kalite sacların ortalama dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi sonuçları.

- Öncelikle rulo içerisinde 0^0 , 45^0 ve 90^0 açılarındaki değerlerin arasında değişim olduğu görülmektedir. En yüksek değerlerin 90^0 ve en düşük değerlerin 45^0 açılarında alınan numunelerde olduğu tespit edilmiştir.
- DC03 kalitesindeki saclarda Rulo 2 ve Rulo 3 ortalama dikey anizotropi değerleri yakın iken, Rulo 1 için bu değer yüksek çıkmıştır.
- DC04 kalitesindeki saclara her üç rulonun ortalama dikey anizotropi katsayısı değerleri birbirine yakındır.
- DC03 kalite sacın Rulo 1 hariç tutulduğunda DC03 ve DC04 rulolarının ortalama dikey anizotropi katsayısı değerleri birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.
- Düzlemsel anizotropi değerleri incelendiğinde bu değerlerin değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bu değer 0,2053 ile 0,4742 arasında değişmektedir.

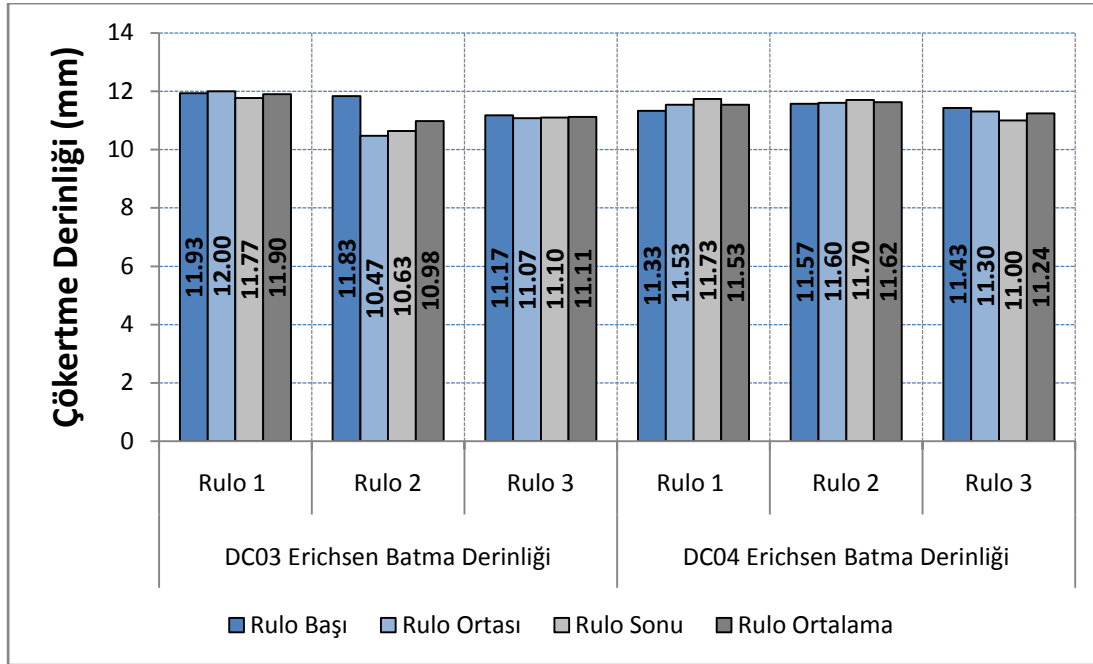
7.1.2 Erichsen Çökertme Testi Sonuçları

Deney sonuçları Çizelge 7.4’ de özet olarak verilmiştir. Bu çizelgedeki değerler rulo başı, ortası ve sonu için tekrarlanan deneylerin ortalaması ve standart sapması şeklinde düzenlenmiştir. EK A incelendiğinde rulonun her bölgesi için elde edilen deney sonuçları daha ayrıntılı bir şekilde görülebilir.

Çizelge 7.4 : DC03 – DC04 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları.

Borçelik DC03						
Rulo No	55972S02 - Rulo 1		56066S04 - Rulo 2		56161S01 - Rulo 3	
	Çökertme Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Çökertme Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Çökertme Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)
Rulo Başı	11,93	14,83	11,83	14,90	11,17	14,10
Rulo Ortası	12,00	14,87	10,47	14,70	11,07	13,80
Rulo Sonu	11,77	14,87	10,63	15,20	11,10	14,23
Rulo Ortalama	11,90	14,86	10,98	14,93	11,11	14,04
Standart Sapma	0,103	0,109	0,077	0,067	0,154	0,169
Borçelik DC04						
Rulo No	55450S03 - Rulo 1		56252S01 - Rulo 2		56465S02 - Rulo 3	
	Çökertme Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Çökertme Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Çökertme Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)
Rulo Başı	11,33	15,20	11,57	15,53	11,43	15,93
Rulo Ortası	11,53	15,83	11,60	15,57	11,30	15,57
Rulo Sonu	11,73	15,40	11,70	15,43	11,00	15,27
Rulo Ortalama	11,53	15,48	11,62	15,51	11,24	15,59
Standart Sapma	0,077	0,153	0,138	0,089	0,105	0,171

Şekil 7.6’ da sonuçların grafiksel olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 7.6 : DC03 – DC04 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları.

Sonuçlar değerlendirildiğinde :

- DC03 kalite sacların üç rulo için ortalama çökertme derinliği 11,33 mm dir.
- DC04 kalite sacların üç rulo için ortalama çökertme derinliği 11,46 mm dir. Bu

sonuçlar DC03 ve DC04 arasında çökertme derinliği açısından bir farkın olmadığını göstermektedir.

- Yırtılma kuvvetleri incelendiğinde DC03 kalite sacların üç rulo için ortalama değeri 14,61 kN iken DC04 kalite saclar için bu değer 15,53 kN dur. Bu durum da şekillendirme için gerekli olan kuvvet değerlerinin de farklı olmadığını göstermektedir.
- Rulolar kendi içerisinde kıyaslandığında DC03 kalite Rulo 1 sacın Rulo 2 ve Rulo 3' e göre yaklaşık 1 mm daha fazla çökertme derinliği gösterdiği görülmektedir. Bu durum dışında rulolar arasında belirgin farklılık yoktur.
- DC03 ve DC04 kalite sacların çökertme derinliği ve yırtılma kuvvetleri rulo boyunca çok fazla değişim göstermemektedir ve standart sapması çok azdır.

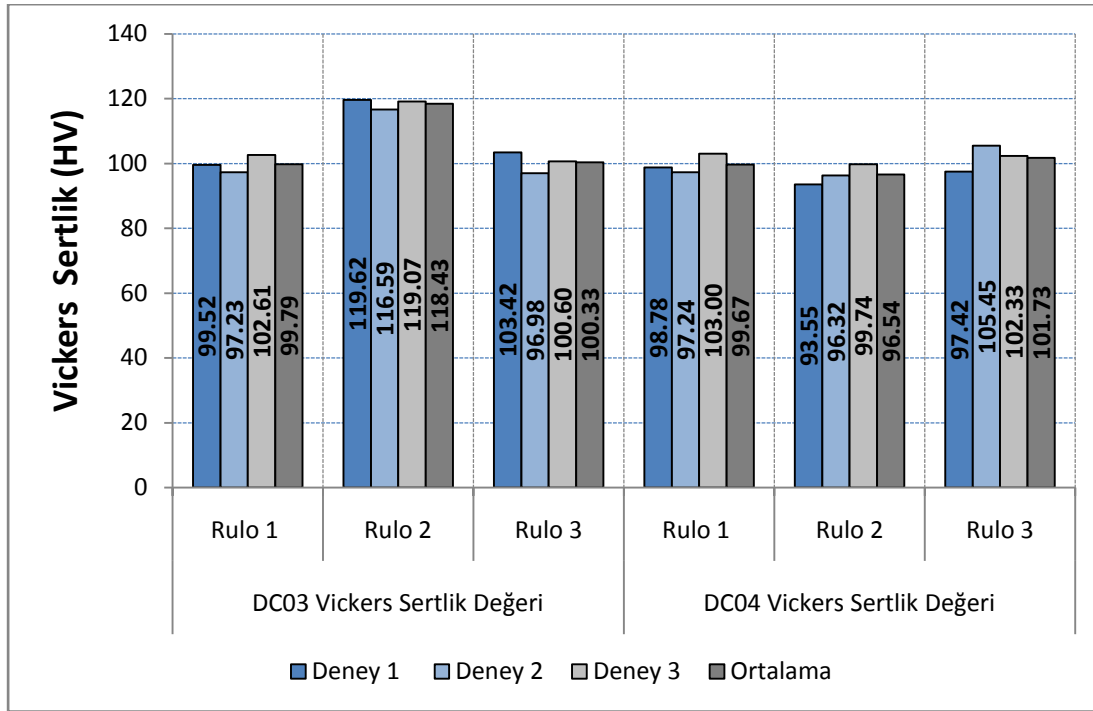
7.1.3 Sertlik Testi Sonuçları

Ruloların orta bölümünden alınan numunelere HV1 sertlik deneyi uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7.5' de verilmiştir.

Çizelge 7.5 : DC03 – DC04 kalite sacların Vickers sertlik deneyi sonuçları.

Borçelik DC03			
Rulo No	55972S02 - Rulo 1	56066S04 - Rulo 2	56161S01 - Rulo 3
	Sertlik (HV1)	Sertlik (HV1)	Sertlik (HV1)
Deney 1	99,52	119,62	103,42
Deney 2	97,23	116,59	96,98
Deney 3	102,61	119,07	100,60
Ortalama	99,79	118,43	100,33
Standart Sapma	2,70	1,61	3,23
Borçelik DC04			
Rulo No	55450S03 - Rulo 1	56252S01 - Rulo 2	56465S02 - Rulo 3
	Sertlik (HV1)	Sertlik (HV1)	Sertlik (HV1)
Deney 1	98,78	93,55	97,42
Deney 2	97,24	96,32	105,45
Deney 3	103,00	99,74	102,33
Ortalama	99,67	96,54	101,73
Standart Sapma	2,98	3,10	4,05

Deney sonuçları Şekil 7.7' de grafik haline dönüştürülmüştür.



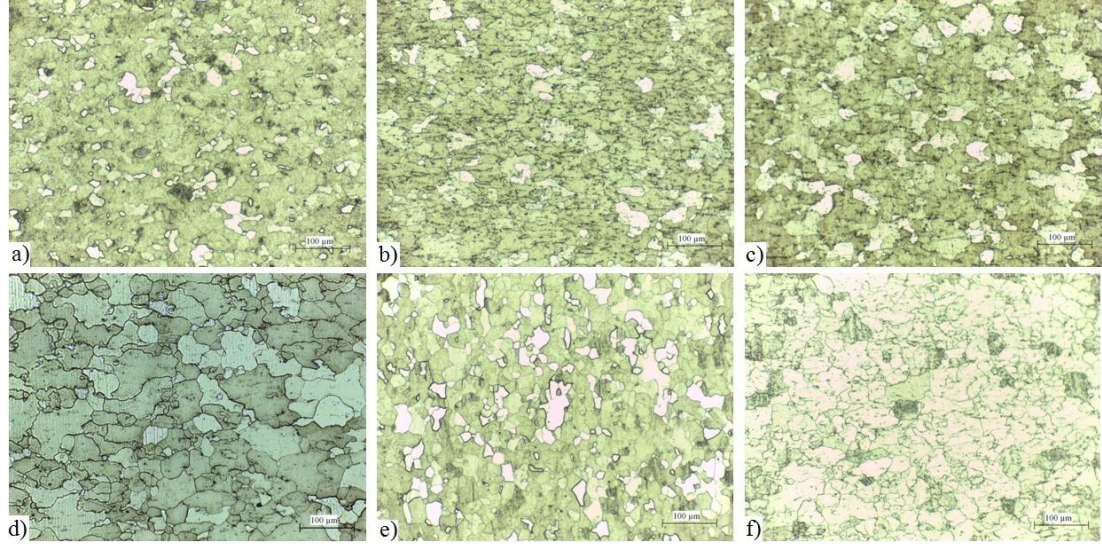
Şekil 7.7 : DC03 – DC04 kalite sacların Vickers sertlik deneyi sonuçları.

Test sonuçları değerlendirildiğinde :

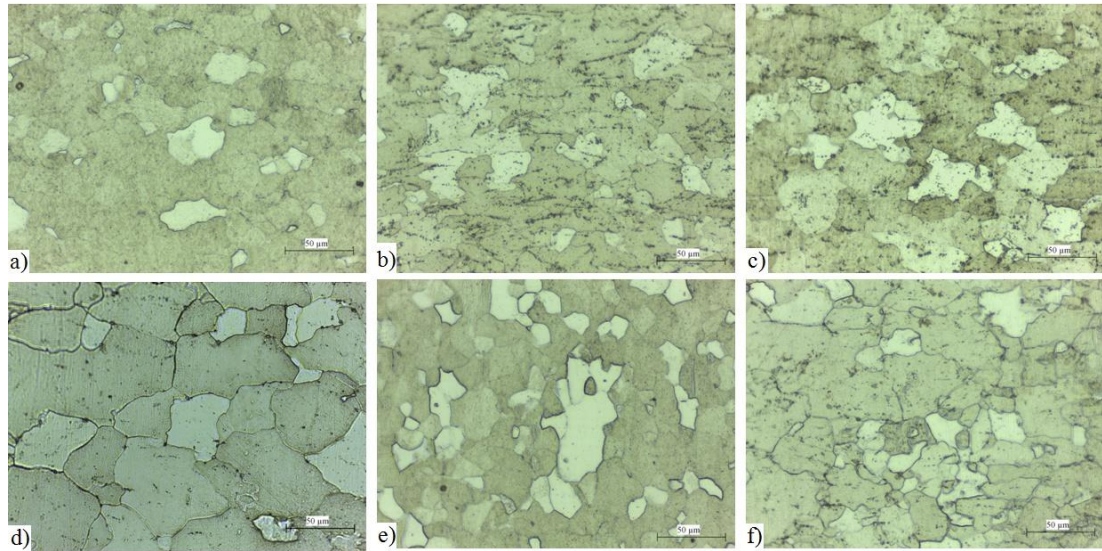
- DC03 kalite sacdan elde edilen ortalama sertlik değerleri sırasıyla; 99,79, 118,43 ve 100,33 HV1 dir. Bu üç rulonun ortalama sertlik değeri ise 106,18 HV1 dir.
- DC04 kalite sacdan elde edilen ortalama sertlik değerleri sırasıyla 99,67, 96,54 ve 101,73 HV1 dir. Bu üç rulonun ortalama sertlik değeri ise 99,31 HV1 dir.
- Genel ortalamalara bakıldığı zaman saclar arasında sertlik açısından çok fazla farkın olmadığı tespit edilmiştir. DC03 kalite sacların çok az bir değer daha yüksek sertliğe sahip olduğu söylenebilir fakat bu fark şekillendirme açısından önem taşımamaktadır.
- DC03 kalite sacın Rulo 2 deney sonuçları yüksek çıkmıştır. Bu değerler akma ve çekme mukavemetleri ile paralellik göstermektedir. Sertlik değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde akma ve çekme mukavemeti değerleri de yüksektir. Akma ve çekme mukavemeti sonuçları incelendiğinde bu verilerin desteklendiği görülebilir.
- Yapılan deneylerde alınan sonuçların birbirini tekrarladığı ve standart sapma değerlerinin 2 ile 4 HV1 arasında değiştiği söylenebilir.

7.1.4 Mikro Yapı Analiz Sonuçları

Numunelerin sac yüzeyinden çekilmiş tane boyutu fotoğrafları verilmiştir. DC03 ve DC04 kalite sacların tane boyutları arasındaki farklar gözlemlenmiştir. 20X ve 50X büyütmede alınan fotoğraflar Şekil 7.8 ve Şekil 7.9 ‘ da verilmiştir.



Şekil 7.8 : 20X büyütme tane boyutu fotoğrafları, DC03 a) Rulo 1, b) Rulo 2, c) Rulo 3 ve DC04 d) Rulo 1, e) Rulo 2, f) Rulo 3.



Şekil 7.9 : 50X büyütme tane boyutu fotoğrafları, DC03 a) Rulo 1, b) Rulo 2, c) Rulo 3 ve DC04 d) Rulo 1, e) Rulo 2, f) Rulo 3.

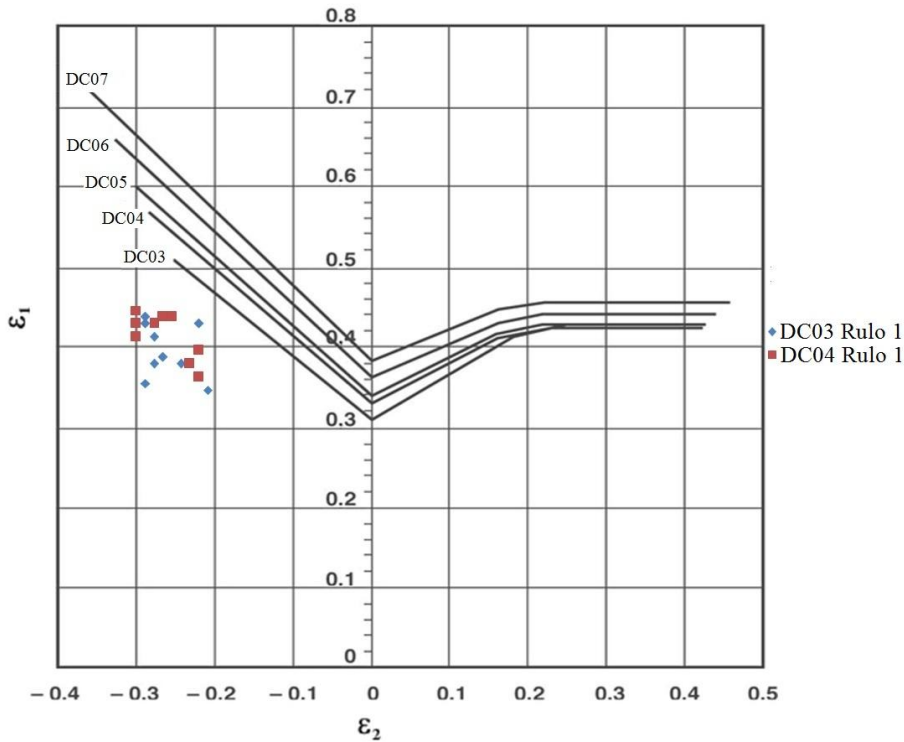
Fotoğraflar değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır :

- Öncelikle tanelerin hadde yönünde uzaması belirgin bir şekilde görülmemektedir. Bu durum üretim sonrasında ısıtıl işlem gerçekleştirildiğinin göstergesi olabilir.

- Tane boyutlarının rulolar arasındaki ve kaliteler arasındaki değişme miktarı çok azdır.
- Tane boyutlarının yakın olması sac malzemenin akma ve çekme mukavemetlerinin de yakın olması sonucunu doğurmuştur. Bu deneylerde elde edilen sonuçlar ve tane boyutu incelemelerinde elde edilen sonuçlar birbirlerini doğrulamaktadır.

7.1.5 Şekillendirme Sınır Diyagramı Çalışmaları

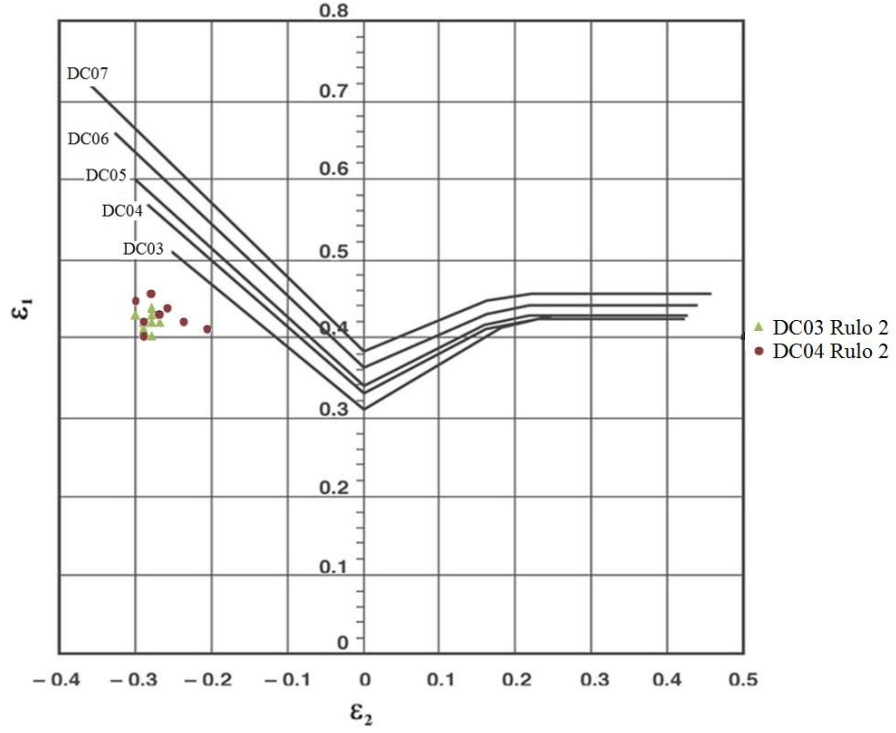
DC03 ve DC04 kalite sacların şekillendirme kabiliyetlerini kıyaslamak için çekme testi sonuçları şekillendirme sınır diyagramlarına aktarılmıştır. Çekme testi sonucunda elde edilen toplam uzama değeri kullanılarak numunenin son boyu hesaplanmıştır ve Formül 3.1’ de D_1 yerine yazılarak e_1 (en büyük şekil değiştirme) hesaplanmıştır. Çekme deneyi sonucunda, numunede endeki daralmanın en fazla olduğu kırılma bölgesi D_2 kabul edilerek Formül 3.2’ de yerine yazılmış ve e_2 (en küçük şekil değiştirme) hesaplanmıştır.



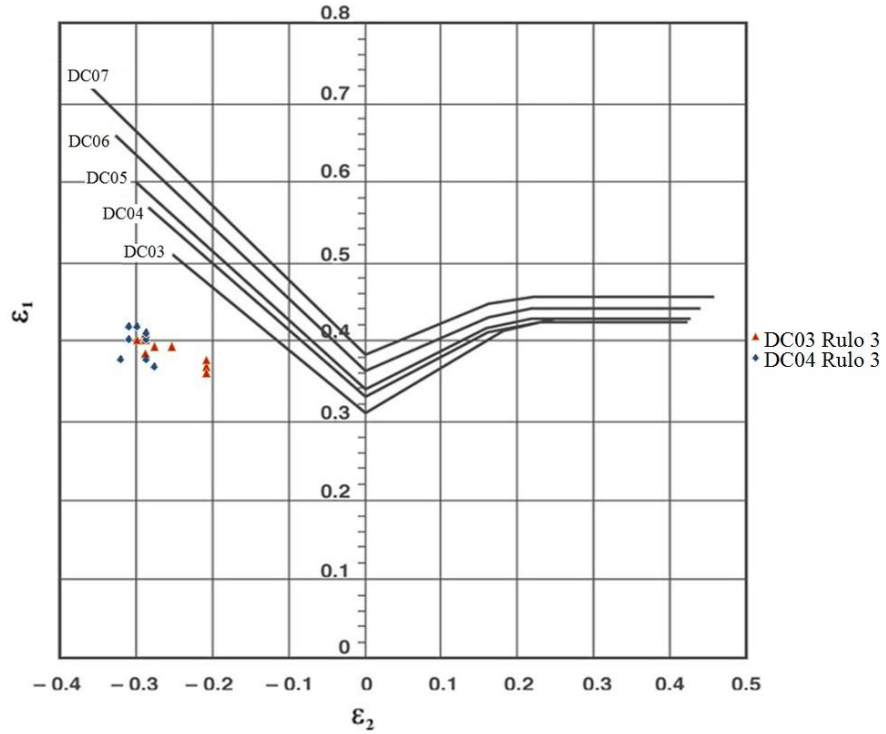
Şekil 7.10 : Şekillendirme sınır diyagramında 1. Ruloların gösterimi [43].

Bu işlem DC03 ve DC04 sacların üçer rulosundan alınan rulo başı, rulo ortası ve rulo sonundaki plakaların 0° , 45° , 90° yönlerindeki numunelerine uygulanmıştır ve toplamda 54 adet nokta elde edilmiştir. Bu noktalar şekillendirme sınır diyagramına

yerleştirilerek şekillendirme eğrisinin kalınlığa bağlı olarak aşağıya kayma miktarı ve DC03 ile DC04 için elde edilen noktaların yakınlığı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.10, Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’ de verilmiştir.



Şekil 7.11 : Şekillendirme sınır diyagramında 2. Ruloların gösterimi [43].



Şekil 7.12 : Şekillendirme sınır diyagramında 3. Ruloların gösterimi [43].

Grafiklerde bulunan eğriler 1 mm kalınlıktaki saclara aittir. Deneylerde kullanılan sacların kalınlığının 0,80 mm olduğu düşünüldüğünde eğrilerin beklenildiği gibi aşağıya kayması gözlenmiştir. Her iki kalite sacda elde edilen sınır noktaları yakındır ve sınır eğrilerinin bu noktalardan geçmesi beklenir. Bu durum DC04 kalite sac yerine DC03 kalite sacın kullanılabileceğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

7.2 AISI – 430 Kalite Sacların Test Sonuçları

7.2.1 Çekme Testi Sonuçları

AISI – 430 kalite ferritik paslanmaz çelik saclar için gerçekleştirilen çekme testi sonuçları üç farklı firma için ayrı ayrı Çizelge 7.6, Çizelge 7.7 ve Çizelge 7.8’ de verilmiştir. Daha sonra bu sonuçlar grafikler halinde daha detaylı olarak incelenmiştir.

Çizelge 7.6 : ThyssenKrupp marka AISI – 430 kalite sacların çekme testi sonuçları.

Firma / Kalite	Rulo No	Rulo Yeri	Hadde Yönü	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Üniform Uzama (%)	Toplam Uzama (%)	Deformasyon Sertleşmesi Üssü (n)	
ThyssenKrupp AISI-430	331251-4 - Rulo 1	Rulo Başı	0°	323	511	16,48	24	0,2269	
			45°	337	516	17,9	28,2	0,2552	
			90°	329	519	16,93	23,6	0,2373	
		Rulo Başı Ortalama			331,5	515,5	17,30	26	0,2437
		Rulo Ortası	0°	332	524	16,97	24,3	0,2256	
			45°	339	525	17,27	28,8	0,2325	
			90°	352	549	16,98	25,5	0,2455	
		Rulo Ortası Ortalama			340,5	530,75	17,12	26,85	0,2340
		Rulo Sonu	0°	332	525	17,02	24,8	0,2431	
			45°	332	517	17,04	26,3	0,2379	
			90°	347	545	16,22	21	0,2432	
		Rulo Sonu Ortalama			335,75	526,00	16,83	24,60	0,2405
		Rulo Genel Ortalama			335,92	524,08	17,09	25,82	0,2394
	333560-5 - Rulo 2	Rulo Başı	0°	308	497	17,92	26,1	0,2328	
			45°	316	500	18,09	27,7	0,2386	
			90°	327	514	17,25	25,4	0,2481	
		Rulo Başı Ortalama			316,75	502,75	17,84	26,73	0,2395
		Rulo Ortası	0°	296	484	18,19	25,1	0,2339	
			45°	307	494	17,68	25,7	0,2334	
			90°	319	509	17,41	25,1	0,2347	
		Rulo Ortası Ortalama			307,25	495,25	17,74	25,40	0,2339
		Rulo Sonu	0°	322	509	18,29	24,8	0,2481	
			45°	318	502	18,36	27,7	0,2487	
			90°	331	522	17,42	24,8	0,2365	
		Rulo Sonu Ortalama			322,25	508,75	18,11	26,25	0,2455
		Rulo Genel Ortalama			315,42	502,25	17,90	26,13	0,2396
	Standart				Min. 260	450 - 600	-	Min. 20	-

Çizelge 7.7 : Columbus marka AISI – 430 kalite sacların çekme testi sonuçları.

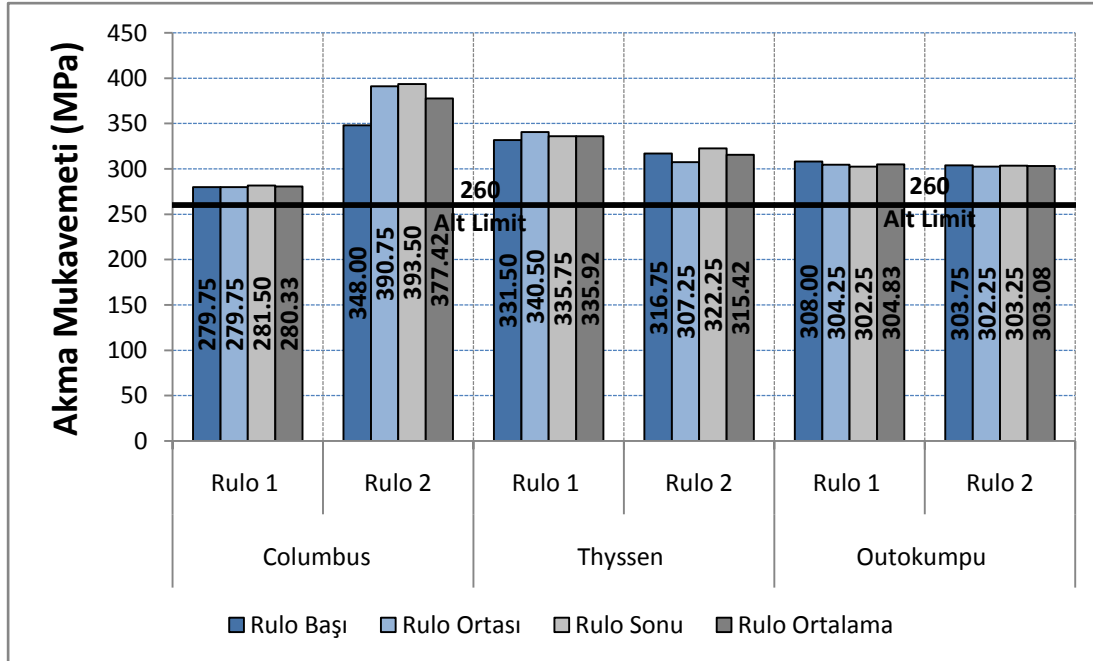
Firma / Kalite	Rulo No	Rulo Yeri	Hadde Yönü	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Üniform Uzama (%)	Toplam Uzama (%)	Deformasyon Sertleşmesi Üssü (n)	
Columbus AISI-430	3888241-1 - Rulo 1	Rulo Başı	0°	272	470	19,62	28,8	0,2485	
			45°	280	470	19,26	27,8	0,2475	
			90°	287	478	18,45	27,6	0,2338	
		Rulo Başı Ortalama			279,75	472,00	19,15	28,00	0,2443
		Rulo Ortası	0°	273	473	19,42	27,6	0,2454	
			45°	280	470	19,65	29,9	0,2338	
			90°	286	479	18,44	26,8	0,2456	
		Rulo Ortası Ortalama			279,75	473	19,29	28,55	0,2397
		Rulo Sonu	0°	276	469	19,02	29,4	0,2382	
			45°	281	472	19,33	28,7	0,2314	
			90°	288	480	18,37	27,5	0,2368	
		Rulo Sonu Ortalama			281,50	473,25	19,01	28,58	0,2345
		Rulo Genel Ortalama			280,33	472,75	19,15	28,38	0,2395
	3855802-3 - Rulo 2	Rulo Başı	0°	295	477	18,4	30	0,2306	
			45°	390	473	15,31	23,9	0,1229	
			90°	317	501	16,37	23,1	0,2328	
		Rulo Başı Ortalama			348,00	481,00	16,35	25,23	0,1773
		Rulo Ortası	0°	374	471	16,23	26,7	0,1246	
			45°	393	473	15,03	23,9	0,1148	
			90°	403	479	14,24	25,3	0,1006	
		Rulo Ortası Ortalama			390,75	474,00	15,133	24,95	0,1137
		Rulo Sonu	0°	385	473	15,76	25,2	0,1267	
			45°	397	472	14,24	23,9	0,1028	
			90°	395	477	14,4	24,1	0,1047	
		Rulo Sonu Ortalama			393,50	473,50	14,66	24,28	0,1093
		Rulo Genel Ortalama			377,42	476,17	15,38	24,82	0,1334
	Standart				Min. 260	450 - 600	-	Min. 20	-

Paslanmaz çelik grubu için üç farklı firmadan (ThyssenKrupp, Columbus ve Outokumpu) ve her firmadan ikişer rulo alınarak toplamda altı rulo incelenmiştir.

Her üç çizelgede sac malzemelerin akma, çekme mukavemetleri, üniform uzamaları, toplam uzamaları ve deformasyon sertleşmesi üssü değerleri verilmiştir. Çizelgeler hadde yönüne göre 0°, 45°, 90° açılarıyla alınmış numunelerin çekme testi sonuçlarını, rulo başı, ortası ve sonunun ortalama değerlerini, rulonun genel ortalama değerini ve standartlardaki değerlerini içermektedir. Ayrıca dikey anizotropi katsayısı hesaplanmıştır ve ileriki bölümlerde paylaşılmıştır. Böylece rulolar hakkında ayrıntılı bilgi elde edilmiş, aynı kalitedeki sacın özelliklerinin farklı üreticiler arasında karşılaştırılması imkanı doğmuştur.

Çizelge 7.8 : Outokumpu marka AISI – 430 kalite sacların çekme testi sonuçları.

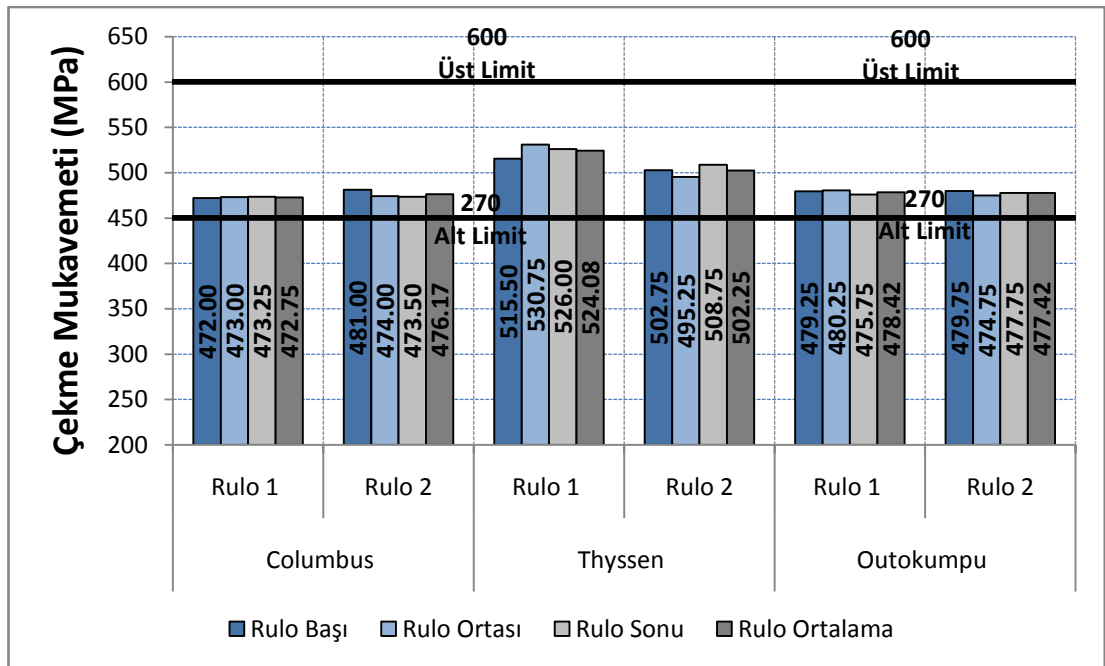
Firma / Kalite	Rulo No	Rulo Yeri	Hadde Yönü	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Üniform Uzama (%)	Toplam Uzama (%)	Deformasyon Sertleşmesi Üssü (n)	
Outokumpu AISI-430	339163-5 - Rulo 1	Rulo Başı	0°	309	480	18,08	24,5	0,2326	
			45°	311	482	17,84	23,2	0,2323	
			90°	301	473	18,11	25,7	0,2351	
		Rulo Başı Ortalama			308	479,25	17,97	24,15	0,2331
		Rulo Ortası	0°	288	469	18,63	26,7	0,2429	
			45°	312	487	18,04	24,8	0,2438	
			90°	305	478	18,86	29,2	0,2240	
		Rulo Ortası Ortalama			304,25	480,25	18,39	26,38	0,2386
		Rulo Sonu	0°	287	465	19,33	29,2	0,2395	
			45°	309	481	17,42	22,8	0,2369	
			90°	304	476	18,52	25,4	0,2295	
		Rulo Sonu Ortalama			302,25	475,75	18,17	25,05	0,2357
		Rulo Genel Ortalama			304,83	478,42	18,18	25,19	0,2358
	339141-5 - Rulo 2	Rulo Başı	0°	288	467	19,15	28,5	0,2409	
			45°	311	487	17,94	25,9	0,2351	
			90°	305	478	17,91	25,7	0,2360	
		Rulo Başı Ortalama			303,75	479,75	18,24	26,50	0,2368
		Rulo Ortası	0°	288	464	18,93	25,1	0,2243	
			45°	309	480	17,73	23,7	0,2225	
			90°	303	475	18,41	27,8	0,2320	
		Rulo Ortası Ortalama			302,25	474,75	18,20	25,08	0,2253
		Rulo Sonu	0°	289	468	19,15	27,6	0,2362	
			45°	310	484	17,97	25,5	0,2316	
			90°	304	475	18,49	26,7	0,2351	
		Rulo Sonu Ortalama			303,25	477,75	18,40	26,33	0,2336
		Rulo Genel Ortalama			303,08	477,42	18,28	25,97	0,2319
	Standart				Min. 260	450 - 600	-	Min. 20	-



Şekil 7.13 : AISI - 430 kalite sacların akma mukavemeti sonuçları.

Akma mukavemetine ait olan grafik incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- AISI - 430 kalite sacların akma mukavemeti değerlerinin standartlarada belirtilen değerleri sağladığı görülmektedir. Belirtilen 240 MPa asgari limitin altında kalan değer yoktur.
- Columbus marka saclardan alınan numunelerin Rulo 1 ve Rulo 2 akma mukavemeti değeri arasında yüksek bir fark vardır. Daha düşük bir fark Thyssen marka saclarda da görülebilir. İki rulo arasındaki en tutarlı sonuç ise Outokumpu marka saclardan elde edilmiştir.
- Rulo başı, ortası ve sonu akma mukavemeti değerlerinin de kendi içinde değişiklik gösterebildiği bilinmektedir. Bu duruma Columbus marka sacın Rulo 2 örneğinde açık bir şekilde rastlanmaktadır.
- Akma mukavemeti değeri için hem rulolar arası hem de rulo içinde en tutarlı değerler Outokumpu marka sacdan elde edilmiştir.

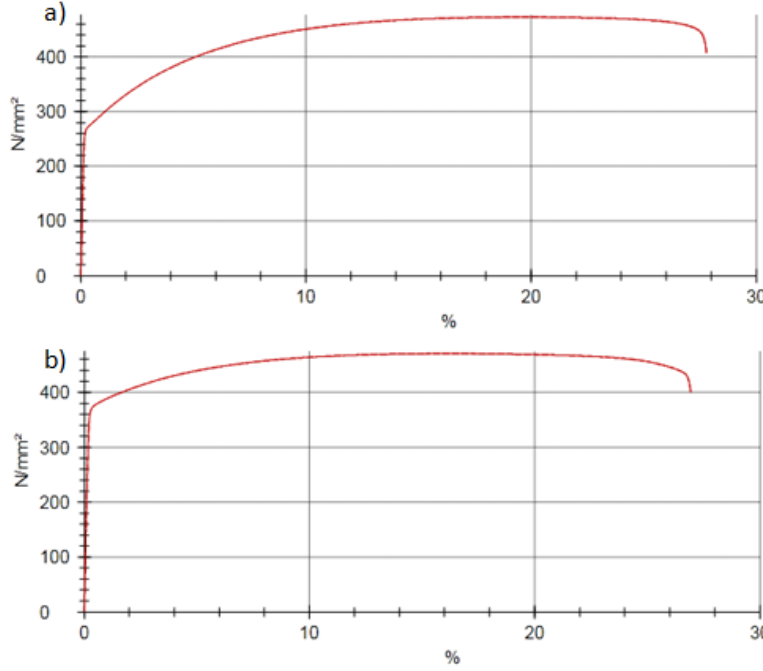


Şekil 7.14 : AISI - 430 kalite sacların çekme mukavemeti sonuçları.

Çekme mukavemetine ait grafik incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır :

- Sacların her üç marka içinde standartlarda belirtilen asgari 450 MPa ve azami 600 Mpa çekme mukavemeti aralığına uygun olduğu saptanmıştır.
- Sonuçlar akma mukavemeti değerleri ile karşılaştırıldığında akma mukavemet değeri Columbus marka Rulo 2 sac için yüksek elde edilmişti. Fakat çekme

mukavemeti değerlerinde bu durum görülmemektedir. Bunun sebebi çekme eğrileri incelendiğinde anlaşılmaktadır. Rulo 2'nin akma mukavemeti değerinin yüksek olmasının sebebi elastik deformasyon bölgesinden plastik deformasyon bölgesine geçişinin daha yüksek değerlerde gerçekleşmesindendir. Bu durum Şekil 7.12' de net biçimde görülmektedir. Fakat çekme mukavemeti değerlerinin yakın olması eğrinin eğimlerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun sonucu da deformasyon sertleşmesi üssü değerine yansımaktadır.

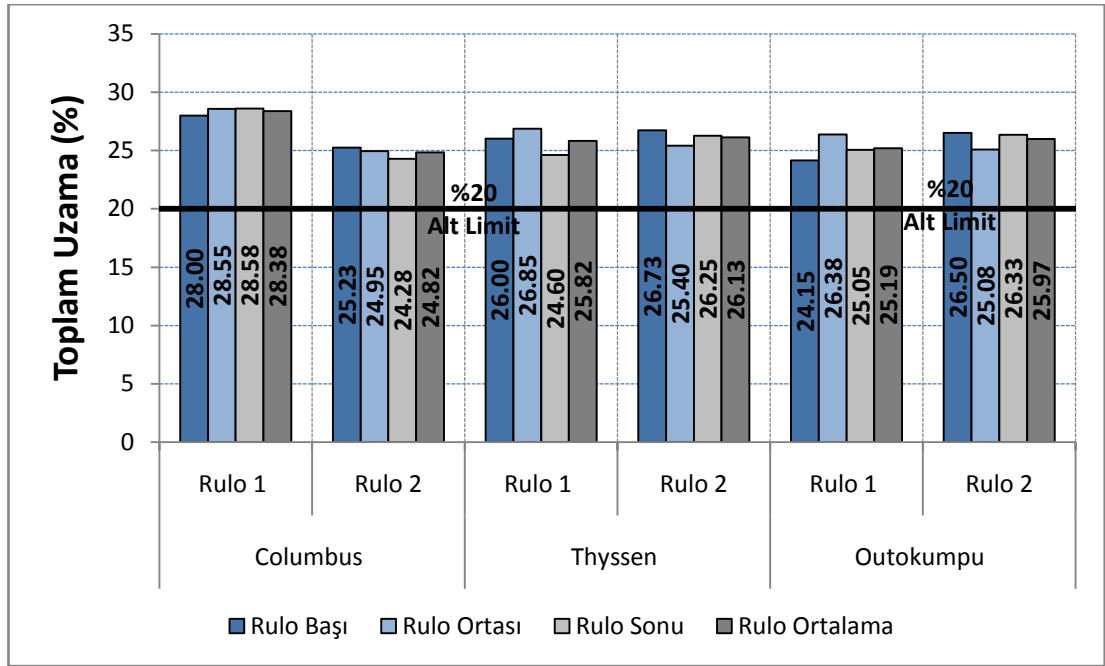


Şekil 7.15 : Columbus marka saca ait çekme eğrileri örneği a) Rulo 1, b) Rulo 2.

- Thyssen marka saclarda görülen fark akma mukavemetinde görülen fark ile uygundur. Outokumpu marka saclarda ise hem rulolar arası hem de rulo içinde en tutarlı değerler elde edilmiştir.

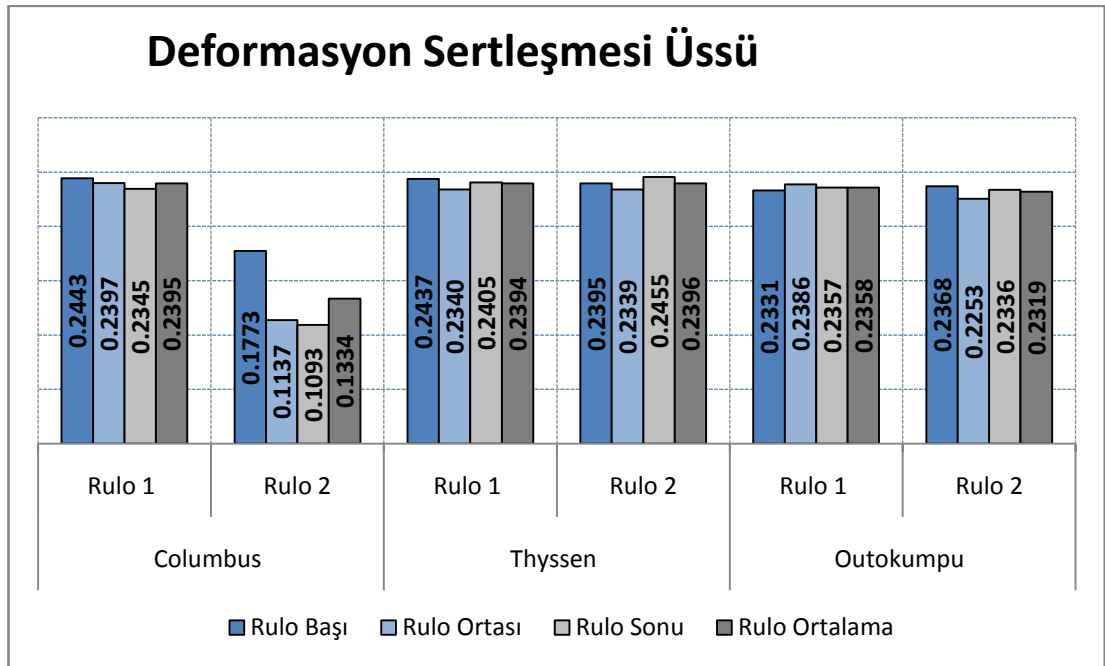
AISI – 430 kalite sacların toplam uzama değerleri Şekil 7.13' de grafiğe dökülmüştür. Grafik incelendiği zaman aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır :

- Toplam uzama değerleri %20 alt limit standart değerini sağlamaktadır.
- Ruloların ortalama toplam uzama değerleri incelendiği zaman değerlerin bir birine yakın olduğu görülmektedir. Columbus marka saclarda iki rulonun ortalaması %26,60, Thyssen marka saclarda %25,97 ve Outokumpu marka saclarda %25,58 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.16 : AISI - 430 kalite sacların toplam uzama sonuçları.

- Hadde yönüne göre karşılaştırma yapıldığında da değerlerin çok fazla değişmediği, %1 ile %2 değerinde değişim olduğu saptanmıştır.



Şekil 7.17 : AISI – 430 kalite sacların deformasyon sertleşmesi üssü sonuçları.

Sonuçlar değerlendirildiğinde :

- Columbus marka iki rulonun ortalama deformasyon sertleşmesi üssü değeri 0,1864, Thyssen marka iki rulonun ortalama değeri 0,2395 ve Outokumpu marka iki rulonun ortalama değeri 0,2339 olarak hesaplanmıştır.

- Columbus marka sacda deformasyon sertleşmesi üssü değerinin düşük olmasının sebebi Rulo 2' den kaynaklanmaktadır. Rulo 2' nin ortalama değeri 0.1334 dır ve diğer rulolarla kıyaslandığı zaman düşüktür. Bu değerin düşük olmasının sebebi akma mukavemeti değerinin yüksek olması ve çekme mukavemeti değerinin diğer rulolarla yakın olması dolayısıyla çekme eğrisinin eğiminin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 7.12'de de gösterilmiştir.
- Diğer rulolar kıyaslandığında sacların şekillendirme kabiliyetlerinin yaklaşık aynı olduğu söylenebilir.

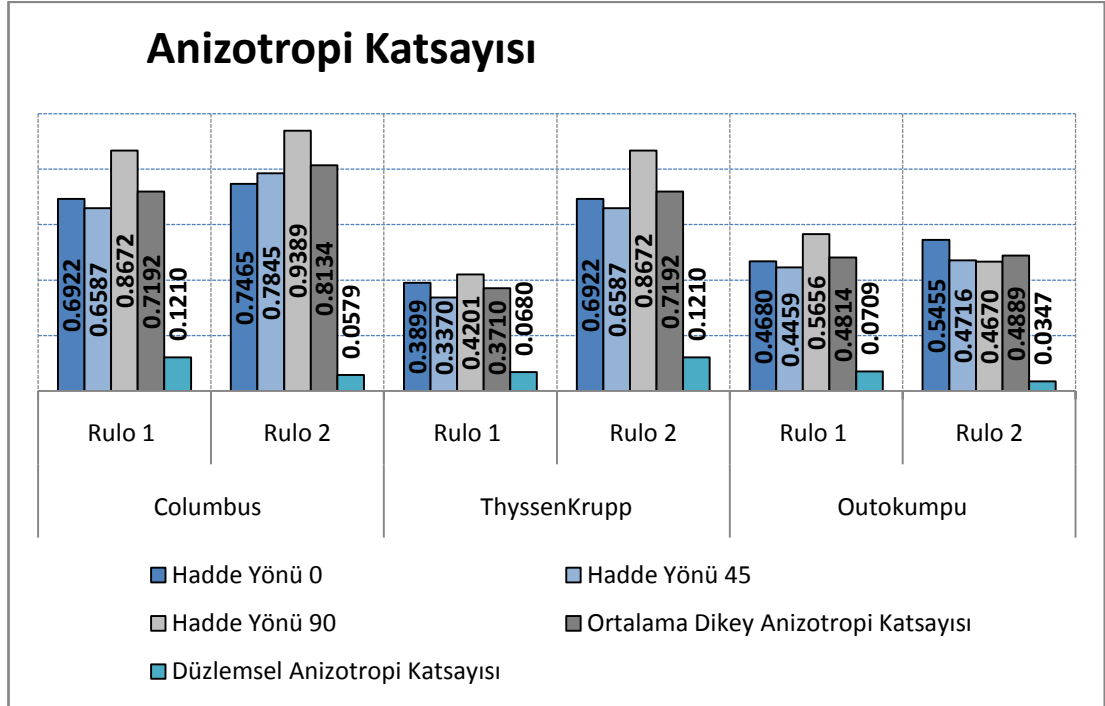
Çizelge 7.9' da çekme deneyleri sırasında elde edilen ortalama dikey anizotropi katsayısı ve düzlemsel anizotropi katsayısı değerleri verilmiştir. Bu değerler her rulo için rulo başı, ortası ve sonundan hadde yönüne göre 0^0 , 45^0 ve 90^0 derecelik açılardan alınan numunelerin test sonuçlarıdır fakat çizelgede özet olarak verilmiştir. Sonuçlar ayrıntılı incelenmek istenirse EK A değerlendirilebilir.

Çizelge 7.9 : AISI - 430 kalite sacların ortalama dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi sonuçları.

Firma / Kalite	Rulo No	R0	R45	R90	$\bar{R}$	ΔR
Columbus	3888241-1 - Rulo 1	0,6922	0,6587	0,8672	0,7192	0,1210
	3855802-3 - Rulo 2	0,7465	0,7845	0,9383	0,8134	0,0579
ThyssenKrupp	331251-4 - Rulo 1	0,3899	0,3370	0,4201	0,3710	0,0680
	333560-5 - Rulo 2	0,6922	0,6587	0,8672	0,7192	0,1210
Outokumpu	339163-5 - Rulo 1	0,4680	0,4459	0,5656	0,4814	0,0709
	339141-5 - Rulo 2	0,5455	0,4716	0,4670	0,4889	0,0347

- Öncelikle rulo içerisinde 0^0 , 45^0 ve 90^0 açılarındaki değerlerin arasında değişim olduğu görülmektedir. En yüksek değerlerin genellikle 90^0 ve en düşük değerlerin genellikle 45^0 açılarında alınan numunelerde olduğu tespit edilmiştir.
- Ortalama dikey anizotropi katsayısı Outokumpu marka saclarda daha tutarlı olduğu, Thyssen ve Columbus marka saclarda bu değerin değişim gösterdiği görülmektedir. Bu değişim en fazla Thyssen marka saclarda olduğu tespit edilmiştir.
- Düzlemsel anizotropi değerleri incelendiğinde bu değerlerin değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Bu değer en düşük 0,0347 ile en yüksek 0,1201 arasında değişmektedir.

- Düzlemsel anizotropi değerinin sıfıra yakın olması üretim sırasında kulaklanma riskini azalttığı düşünülürse, Outokumpu saclarda bu riskin en düşük olduğu düşünülebilir.



Şekil 7.18 : AISI – 430 kalite sacların ortalama dikey anizotropi ve düzlemsel anizotropi sonuçları.

7.2.2 Erichsen Çökertme Testi Sonuçları

Deney sonuçları Çizelge 7.10’ da özet olarak verilmiştir. Bu çizelgeki değerler rulo başı, ortası ve sonu için tekrarlanan deneylerin ortalaması ve standart sapması şeklinde düzenlenmiştir. EK A incelendiğinde rulonun her bölgesi için elde edilen deney sonuçları daha ayrıntılı bir şekilde görülebilir.

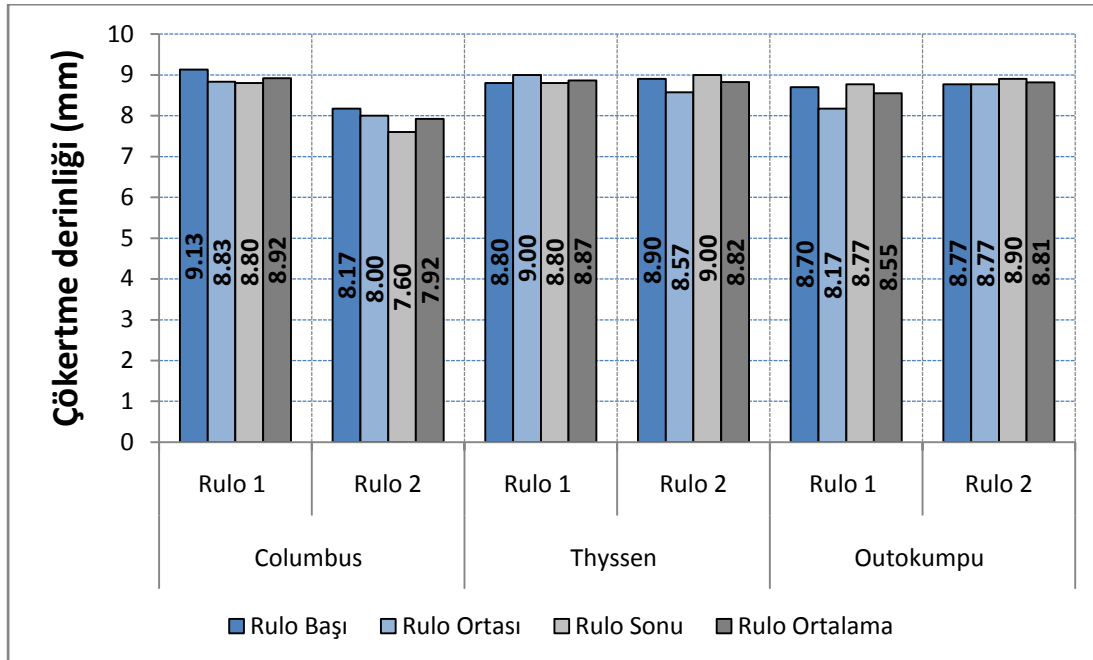
Sonuçlar değerlendirildiğinde :

- Columbus marka sacların iki rulo için ortalama çökertme derinliği 8,42 mm, Thyssen marka sacların ortalaması 8,85 mm ve Outokumpu marka sacların ortalaması 8,68 mm dir. Bu sonuçlar markalar arasında çökertme derinliği açısından bir farkın olmadığını göstermektedir.
- Yırtılma kuvvetleri incelendiğinde Columbus marka iki rulo için bu değer ortalaması 7,32 kN, Thyssen marka sacların ortalaması 7,73 kN ve Outokumpu marka sacların ortalaması 7,81 kN dur. Bu durum da şekillendirme için gerekli olan kuvvet değerlerinin de farklı olmadığını göstermektedir.

Çizelge 7.10 : AISI - 430 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları.

Columbus	Rulo No	3888241-1 - Rulo 1		3855802-3 - Rulo 2	
		ÇökertmeDerinliği (mm)	Kuvvet (kN)	ÇökertmeDerinliği (mm)	Kuvvet (kN)
	Rulo Başı	9,13	8,43	8,17	6,73
	Rulo Ortası	8,83	8,10	8,00	6,43
	Rulo Sonu	8,80	8,13	7,60	6,07
	Rulo Ortalama	8,92	8,22	7,92	6,41
	Standart Sapma	0,103	0,091	0,118	0,109
ThyssenKrupp	Rulo No	331251-4 - Rulo 1		333560-5 - Rulo 2	
		ÇökertmeDerinliği (mm)	Kuvvet (kN)	ÇökertmeDerinliği (mm)	Kuvvet (kN)
	Rulo Başı	8,80	7,77	8,90	7,70
	Rulo Ortası	9,00	7,93	8,57	7,53
	Rulo Sonu	8,80	7,97	9,00	7,50
	Rulo Ortalama	8,87	7,89	8,82	7,58
	Standart Sapma	0,100	0,108	0,231	0,142
Outokumpu	Rulo No	339163-5 - Rulo 1		339141-5 - Rulo 2	
		ÇökertmeDerinliği (mm)	Kuvvet (kN)	ÇökertmeDerinliği (mm)	Kuvvet (kN)
	Rulo Başı	8,70	8,07	8,77	7,77
	Rulo Ortası	8,17	7,67	8,77	7,73
	Rulo Sonu	8,77	7,93	8,90	7,67
	Rulo Ortalama	8,55	7,89	8,81	7,72
	Standart Sapma	0,103	0,173	0,091	0,158

- Rulolar kendi içerisinde kıyaslandığında Columbus marka Rulo 2 sac dışındaki ruloların yırtılma kuvvetleri hemen hemen aynıdır. Columbus marka Rulo 2 sacda da bu değer ortalama 1 kN daha düşüktür.



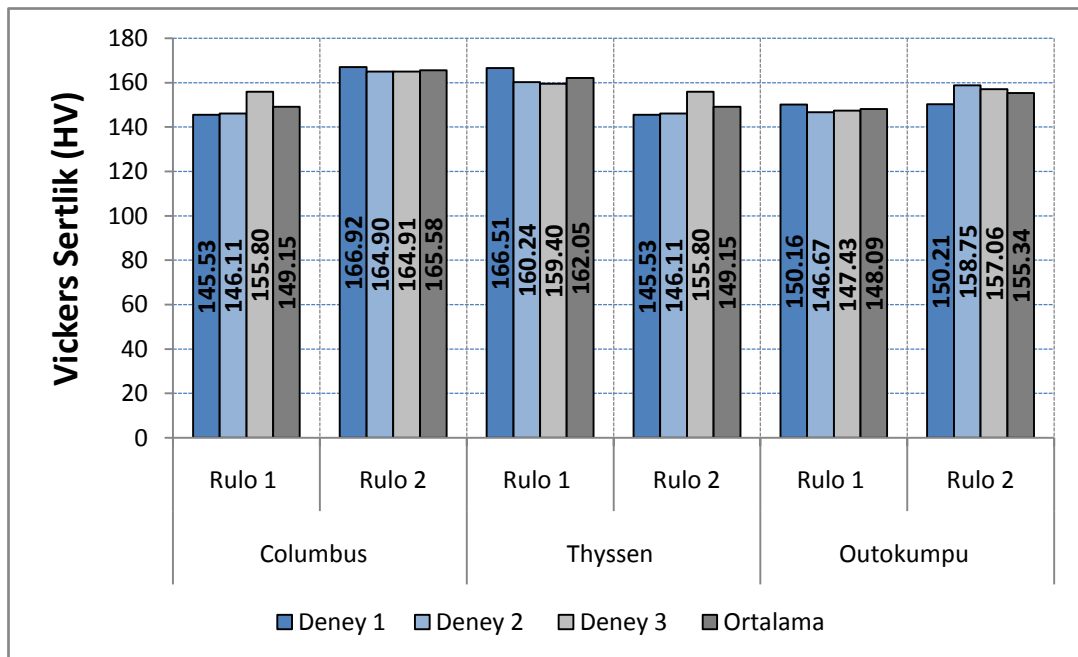
Şekil 7.19 : AISI - 430 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları.

7.2.3 Sertlik Testi Sonuçları

Ruloların orta bölümünden alınan numunelere HV1 sertlik deneyi uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7.11’ de verilmiştir.

Çizelge 7.11 : AISI - 430 kalite sacların Vickers sertlik deneyi sonuçları.

Columbus	Rulo No	3888241-1 - Rulo 1	3855802-3 - Rulo 2
		Sertlik (HV1)	Sertlik (HV1)
	Deney 1	145,53	166,92
	Deney 2	146,11	164,90
	Deney 3	155,80	164,91
	Ortalama	149,15	165,58
	Standart Sapma	5,77	1,16
ThyssenKrupp	Rulo No	331251-4 - Rulo 1	333560-5 - Rulo 2
		Sertlik (HV1)	Sertlik (HV1)
	Deney 1	166,51	160,04
	Deney 2	160,24	163,78
	Deney 3	159,40	154,16
	Ortalama	162,05	159,33
	Standart Sapma	3,89	4,85
Outokumpu	Rulo No	339163-5 - Rulo 1	339141-5 Rulo 2
		Sertlik (HV1)	Sertlik (HV1)
	Deney 1	150,16	150,21
	Deney 2	146,67	158,75
	Deney 3	147,43	157,06
	Ortalama	148,09	155,34
	Standart Sapma	1,84	4,52



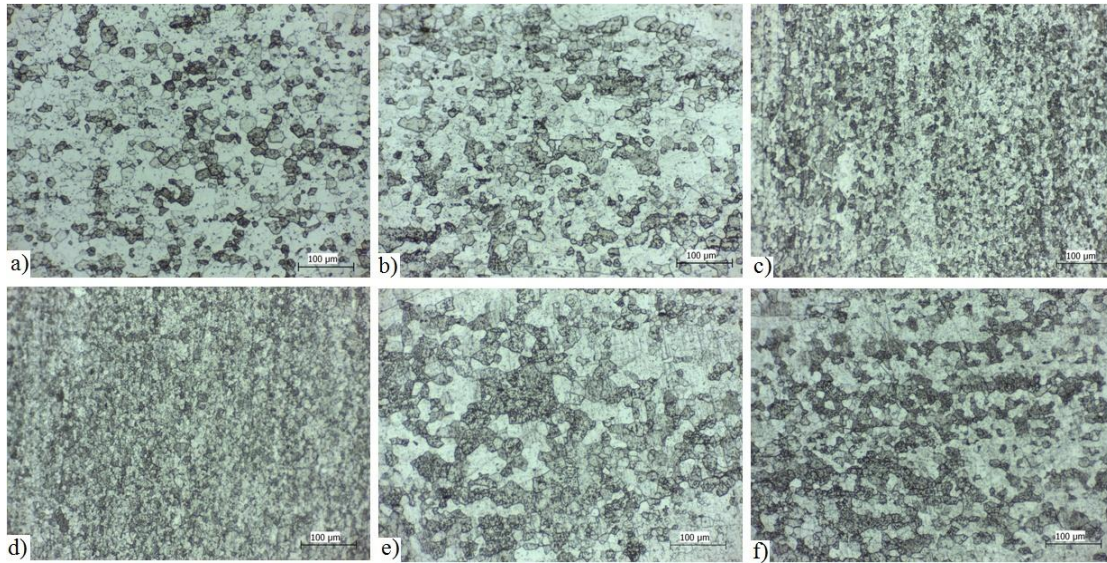
Şekil 7.20 : AISI – 430 kalite sacların Vickers sertlik deneyi sonuçları.

Sonuçlar değerlendirildiğinde :

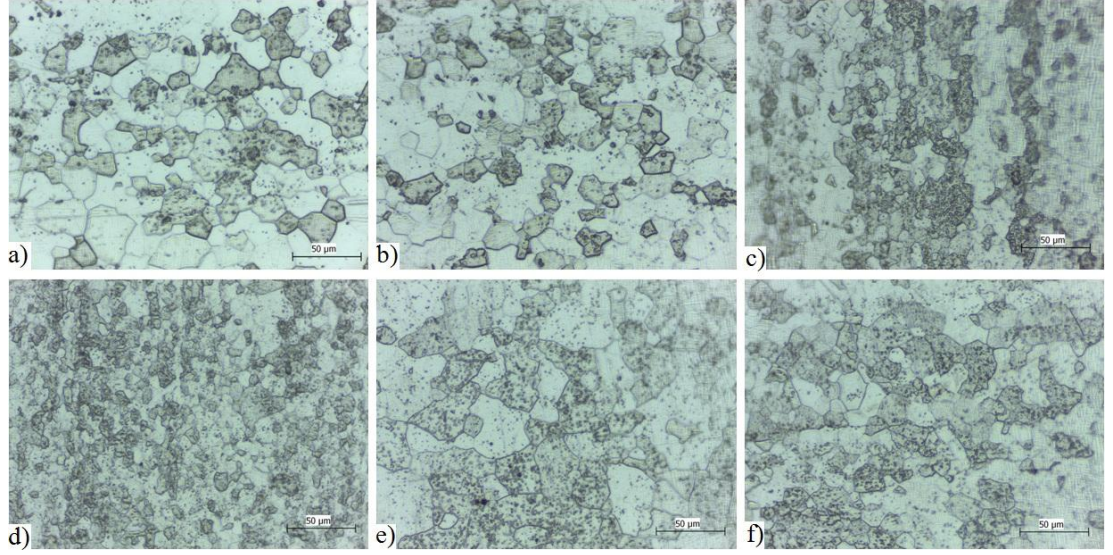
- Columbus marka iki rulodan elde edilen ortalama sertlik değeri 157,36 HV1, Thyssen marka iki rulodan elde edilen ortalama sertlik değeri 160,69 HV1 ve Columbus marka iki rulodan elde edilen ortalama sertlik değeri 151,71 HV1 dir.
- Genel ortalamalara bakıldığı zaman markalar arasında sertlik açısından çok fazla farkın olmadığı tespit edilmiştir.
- Vickers HV1 sertliğine göre yapılan ölçüm sonuçları, akma dayanım değeriyle paralellik göstermektedir. Akma dayanımı rulo boyunca belirgin şekilde yüksek ölçülen bölgelerin sertlik değerleri de belirgin olarak yüksek ölçülmüştür. Aynı eğilim çekme dayanım değerleri içinde geçerlidir. Sertlik değerlerinin yüksek olduğu bölgelerde çekme dayanım değeri de yüksektir.
- AISI - 430 kalite sacların sertlik sonuçlarından elde edilmiş ortalama standart sapma değeri 1 HV1 ile 5 HV1 arasında değişmektedir.

7.2.4 Mikro Yapı Analiz Sonuçları

AISI - 430 numunelerin sac yüzeyinden çekilmiş tane boyutu fotoğrafları verilmiştir. Böylece aynı kalite sacların farklı üreticiler arasındaki farklarının gözlemlenmesi imkanı doğmuştur. 20X ve 50X büyütmede alınan fotoğraflar Şekil 7.18 ve Şekil 7.19 ‘ da verilmiştir.



Şekil 7.21 : 20X büyütme tane boyutu fotoğrafları, Columbus marka a) Rulo 1, b) Rulo 2, ThyssenKrupp marka c) Rulo 1, d) Rulo 2 ve Outokumpu marka e) Rulo 1, f) Rulo 2.



Şekil 7.22 : 50X büyütme tane boyutu fotoğrafları, Columbus marka a) Rulo 1, b) Rulo 2, ThyssenKrupp marka c) Rulo 1, d) Rulo 2 ve Outokumpu marka e) Rulo 1, f) Rulo 2.

20X ve 50X büyütmede alınan mikro yapı resimleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır :

- Thyssen marka saclarda tanelerin diğer markalara göre daha ince olduğu ve deformasyona bağlı yönelmenin daha belirgin olduğu görülmektedir.
- Çekme mukavemeti sonuçlarına bakıldığı zaman bu değerlerin en yüksek değerler olduğu ve bu durumun tane boyutundan kaynaklandığı söylenebilir.
- Outokumpu ve Columbus marka saclarda tane boyutlarının birbirlerine yakın olduğu belirlenmiştir. Bu saclarda deformasyon yönünde yönelme çok belirgin değildir.
- Columbus marka sacın taneleri daha homojen dağılımlıdır.

8. YORUMLAR VE ÖNERİLER

Çamaşır makinesi üretiminde kullanılan çelik sac özelliklerinin incelenmesi üzerine yapılan bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar DC03 – DC04 kalite saclar için değerlendirildiğinde aşağıdaki yorumlar ve öneriler yapılabilir :

- DC03 ve DC04 kalite soğuk şekillendirme için üretilmiş sacların mekanik özellikleri çekme deneyi, Erichsen çökertme deneyi, Vickers sertlik deneyi ve mikro yapı incelemeleri ile tespit edilmiştir. Elde edilen değerler TS EN 10130 standardına uygun çıkmıştır.

- Standartlarda belirtilen değerlerin yanında aşağıdaki değerler de elde edilmiştir;

- DC03 için ;

Erichsen çökertme derinliği : 11,33 mm

Sertlik : 106,18 HV1

Deformasyon Sertleşmesi Üssü : 0,2199

Dikey Anizotropi Katsayısı : 1,1508

- DC04 için ;

Erichsen çökertme derinliği : 11,46 mm

Sertlik : 99,31 HV1

Deformasyon Sertleşmesi Üssü : 0,2272

Dikey Anizotropi Katsayısı : 0,9418

- Erichsen çökertme deneyi sonuçları ile sacların şekillendirilebilirlik özellikleri arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarının her iki kalite sac için aynı değerlerde olması sacların şekillendirilebilirlik özelliklerinin de benzer olması sonucunu oluşturmuştur. Ayrıca bu sonuç deformasyon sertleşmesi üssü değerleri ile de desteklenmiştir.

- Yapılan deneyler sonucunda sacların mekanik özelliklerinin çok yakın değerlerde olduğu görülmüş ve DC04 için belirlenen mekanik özellik değerlerinin DC03

kalite sacın standart değerlerini sağladığı belirlenmiştir. Tüm bu durumlar değerlendirildiğinde DC04 kalite sac yerine DC03 kalite sac kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Yani kalite düşürme yöntemi ile deneylerin gerçekleştirildiği çamaşır makinesi gövde parçasında karlılık elde edilebilecektir. Bu karlılık DC04 kaliteden DC03 kaliteye geçilmesinden dolayı parça başına 23\$ olarak belirlenmiştir. Yıllık üretim adeti 420.000 adet kabul edilerek, yaklaşık yıllık 87.000\$ kar elde edilebileceği düşünülmektedir.

- Çamaşır makinesi gövde parçaları üzerinde yapılan bu çalışma, diğer DC04 kalite sac kullanılan parçaların DC03 kaliteye geçirilmesine örnek olabilir ve bu şekilde maliyet düşürme daha fazla arttırılabilir. Diğer parçalarda kalite düşürmenin yanı sıra, kalınlık düşürme ile de farklı üretim denemeleri gerçekleştirilebilir ve farklı miktarlarda karlılık elde edilebilir.
- Daha fazla rulo kullanılarak deneyler tekrarlanabilir ve şekillendirme için ihtiyaç duyulan gerçek mekanik özellikler belirlenebilir. Böylece geniş bir aralıkta belirlenen standartlardan dolayı, değişken mekanik değerlerde gelebilen ruloların önüne geçilebilir.

Üç farklı firmadan temin edilen, tambur üretiminde kullanılan AISI – 430 kalite paslanmaz çelik saclar için genel değerlendirilme yapıldığı zaman aşağıdaki sonuç ve önerilere ulaşılmıştır :

- AISI – 430 kalite sacların mekanik özellikleri TS EN 10088-2 standardında belirtilen değerlere uygundur. Bu sac grubuna çekme deneyi, Erichsen çökertme deneyi, Vickers sertlik deneyi uygulanmış ve mikro yapısı incelenmiştir.

- Standartlarda belirtilen değerlerin yanında aşağıdaki değerler de elde edilmiştir;

- Columbus için ;

Erichsen çökertme derinliği : 8,42 mm

Sertlik : 157,36 HV1

Deformasyon Sertleşmesi Üssü : 0,1864

Dikey Anizotropi Katsayısı : 0,7663

- Thyssen Krupp için ;

Erichsen çökertme derinliği : 8,85 mm

Sertlik : 160,69 HV1

Deformasyon Sertleşmesi Üssü : 0,2395

Dikey Anizotropi Katsayısı : 0,5451

- Outokumpu için ;

Erichsen çökertme derinliği : 8,68 mm

Sertlik : 151,71 HV1

Deformasyon Sertleşmesi Üssü : 0,2339

Dikey Anizotropi Katsayısı : 0,4851

- Yapılan deneyler sonucunda iki rulo arasında değişimin en az gerçekleştiği firma olarak Columbus marka saclar belirlenmiştir. Bu durum üretim sırasında devamlılık için önemlidir. Çünkü değişen özellikler pres ayarlarında değişim yapmayı gerektirmektedir.
- Tane yapıları incelendiği zaman Thyssen marka sacların daha ince tane yapısına sahip olduğu ve yönlenmeyi daha belirgin sergiledikleri görülmüştür.
- Paslanmaz sac grubu için de daha fazla rulo kullanılarak deneyler tekrarlanabilir ve şekillendirme için ihtiyaç duyulan gerçek mekanik özellikler belirlenebilir. Böylece geniş bir aralıkta belirlenen standartlardan dolayı, değişken mekanik değerlerde gelebilen ruloların önüne geçilebilir.

9. GENEL SONUÇLAR

Bu başlık altında DC03 – DC04 kalite saclar için elde edilen sonuçlar ve AISI -430 kalite saclar için elde edilen sonuçlar ayrı ayrı paragraflarda kısaca özetlenmiştir.

DC03 – DC04 kalite sacların mekanik özellikleri Çekme Deneyi, Erichsen Çökertme Deneyi, Vickers Sertlik Deneyi ve Mikro Yapı Analizi ile incelenmiştir. İncelenen rulolar arasında mekanik özellikleri açısından fark olmadığı, çökertme derinliklerinin ve kuvvetlerinin yakın olduğu, tane boyutlarının ve sertlik değerlerinin benzer olduğu tespit edilmiştir. Şekillendirme sınır diyagramında her iki kalite sac için elde edilen sınır noktalarının yakın olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar göz önünde tutularak F03 model çamaşır makinesi gövde parçasında DC04 kalite sac yerine aynı kalınlıkta DC03 kalite sac kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Böyle bir seçimin yıllık karlılığı hesaplanmıştır. Çalışmanın Diğer parçalarda da böyle bir değişimin gerçekleştirilebilmesi için örnek olabileceği ve kalınlıklık düşürerek de farklı karlılık oranları elde edilebileceği önerilmiştir.

AISI – 430 kalite çelik sacların mekanik özellikleri de Çekme Deneyi, Erichsen Çökertme Deneyi, Vickers Sertlik Deneyi ve Mikro Yapı Analizi ile incelenmiştir. Markaların mekanik özelliklerinin ortalamasının yakın olduğu tespit edilmiştir fakat rulodan ruloğa değişimler olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Markalar arasında sertlik değerleri ve Erichsen çökertme değerleri arasında büyük değişimler yoktur. Yapılan deneyler sonucunda iki rulo arasında değişimin en az gerçekleştiği firma olarak Outokumpu marka saclar belirlenmiştir. Mekanik özelliklerdeki değişimin en az gerçekleştiği marka olan Outokumpu' nun, üretimde kullanılması devamlılık için önemlidir. Çünkü değişen özellikler pres ayarlarında değişim yapmayı gerektirmektedir. AISI – 430 kalite saclar için de şekillendirme sınır diyagramı çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kayalı, E. S. ve Ensari, C.** (2000). Metallerde Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları. İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya – Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul
- [2] **Çapan, L.** (2003). Metallerde Plastik Şekil Verme. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- [3] **Karaağaç, I. ve Özdemir, A.** (2009). Sıvı Basıncı ile Sac Şekillendirme (SBŞ) Yönteminin Derin Çekilebilirlik Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye
- [4] **Kalpajian, S.** (2003). Manufacturing Processes for Engineering Materials, 4th. Edition, Chapter 7, Upper Saddle River N.J.
- [5] **Lange, Kurt.** (1985). Handbook of Metal Forming, McGraw – Hill Book Company, New York.
- [6] **Dieter, G. E.** (1988). Mechanical Metallurgy, Chapter 20 Sheet – Metal Forming, McGraw – Hill Book Company, New York.
- [7] **ASM Handbook.** (1988). Forming and Forging Volume 14, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [8] **Demirkol, M.** (2010). Plastik Şekil Verme ve Teknolojisi Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Eylül.
- [9] **Aran, A.** (2008). Malzeme Bilgisi Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [10] **Mielnik, E. M.** (1991). Metalworking Science and Engineering, McGraw –Hill Book Company, New York.
- [11] **Altan, T. ve Tekkaya, A. E.** (2012). Sheet Metal Forming Fundamentals, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [12] **ASM Handbook.** (1988). Mechanical Testing and Evaluation Volume 8, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [13] **Tikhovskiy, I., Raabe, D. ve Roters, F.** (2008). Simulation of a 17% Cr Stainless Steel Considering Texture Gradients, Materials Science and Engineering, A488, 482 – 490.
- [14] **Ebrahimi, R. ve Pardis, N.** (2009). Determination of Strain Hardening Exponent Using Double Compression Test, Materials Science and Engineering, A518, 56 – 60
- [15] **Dieter, G. E.** (1984). Workability Testing Techniques, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- [16] **Akoy, M. A.** (2001). Düşük Karbonlu Çelik Sacların Biçimlendirme Sınır Diyagramlarının Belirlenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Haziran.

- [17] **Yıldız, İ.** (2006). Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Sacların Şekillenebilirlik Özellikleri, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans Tezi, Eylül.
- [18] **Öztürk, F., Toros, S., Esener, E. ve Uysal, E.** (2009). Otomotiv Endüstrisinde Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Kullanımının İncelenmesi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 11. Otomotiv Sempozyumu, 8 -9 Mayıs Bursa.
- [19] **Baydoğan, M. ve Kayalı, E. S.** (2012). İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Malzemenin Mekanik Özellikleri Ders Notu.
- [20] **Çimenoglu, H. ve Kayalı, E. S.** (1991). Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya – Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [21] **Carlsson, P.** (2005). Surface Engineering in Sheet Metal Forming, University of Uppsala, Sweden.
- [22] **Darendeliler, H., Akkök, M. ve Yücesoy, C. A.** (2001). Effect of Variable Friction Coefficient on Sheet Metal Drawing, Tribology International 35, 97 – 104.
- [23] **Holmberg, S., Enquist, B. ve Thilderkvist, P.** (2000). Evaluation of Sheet Metal Formability by Tensile Tests, Journal of materials Processing Technology, 145 72-83.
- [24] **Anket, O., Koruvatan, T. ve Ay, İ.** (2011). Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Kullanımı, Journal of Polytechnic, Vol:14, No:1, pp. 39-47.
- [25] **Girjob, C., Racz, G. ve Bologa, O.** (2010). The Determination of the Forming Limit Curve Using a Modular Device, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol.8, Issue 2/2010.
- [26] **Bao-Quan, S., ve Liang, J.** (2012). Circular Grid Pattern Based Surface Strain Measurement System for Sheet Metal Forming, Optics and Laser Engineering, 50, 1186-1195.
- [27] **ASM Handbook.** (1988). Failure Analysis and Prevention Volume 11, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [28] **Li, Y., Luo, M., Gerlach, J. ve Wierzbicki, T.** (2010). Prediction of Shear-Induced Fracture in Sheet Metal Forming, Journal of Materials Processing Technology, 210, 1858 – 1869
- [29] **Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y., Kayalı, E. S. ve Çimenoglu, H.** (1997). Hasar Analizi Seminer Notları, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 07 -11 Nisan.
- [30] **Grünhofer, H. G., Hesse Th., Nachtigaller, H., Roth, W., Schmithals, P. U., Schreiber, D., Selige, A. ve Skock K.** (1967). Surface Defects on Cold Rolled Strip and Sheet, Verlag Stahleisen M.B.H., Düsseldorf.
- [31] **Volk, W., Hoffmann, H., Suh, J. ve Kim, J.** (2012). Failure Prediction for Nonlinear Strain Paths in Sheet Metal Forming, CIRP Annals – Manufacturing Technology 61, 259 – 262.

- [32] **Gantar, G., Pepelnjak, T. ve Kuzman, K.** (2002). Optimization of Sheet Metal Forming Processes by the Use of Numerical Simulations, *Journal of Materials Processing Technology* 130 – 131, 54 – 59.
- [33] **Makinouchi, A. ve Kawka, M.** (1995). Prediction of Geometrical Defects in Sheet Metal Forming Processes by Semi – Implicit FEM, *Materials Processing Defects*, 265 – 281.
- [34] **Bong, H. J., Barlat, F., Lee, M. G. ve Ahn, D. C.** (2012). The Forming Limit Diagram of Ferritic Stainless Steel Sheets: Experiments and Modeling, *International Journal of Mechanical Sciences* 64, 1 – 10.
- [35] **Antonie, P., Vandeputte, S. ve Vogt, J.-B.** (2006). Empirical Model Predicting the Value of the Strain – Hardening Exponent of a Ti-IF Steel Grade, *Materials Science and Engineering A* 433, 55 – 63.
- [36] **Nagarjuna, S., Gopalakrishna, B. ve Srinivas, M.** (2006). On the Strain Hardening Exponent of Cu-26Ni-17Zn Alloy, *Materials Science and Engineering A* 429, 169 – 172.
- [37] **TS EN 10130.** (2008). Soğuk Haddelenmiş, Düşük Karbonlu Çelik Yassı Mamuller – Soğuk Şekillendirme için – Teknik Teslim Şartları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Aralık.
- [38] **TS EN 10088-2.** (2006). Paslanmaz Çelikler – Bölüm 2 : Genel Amaçlar için Korozyona Dirençli Çeliklerden Yapılan Sac/Levha ve Şeritlerin Teknik Teslim Şartları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Aralık.
- [39] **TS EN ISO 6892-1.** (2011). Metalik Malzemeler – Çekme Deneyi – Bölüm 1 : Oda Sıcaklığında Deney Metodu, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Mart.
- [40] **TS EN ISO 20482.** (2007). Metalik Malzemeler – Sac ve Şeritler – Erichsen Çökertme Deneyi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Aralık.
- [41] **TS EN ISO 6507 -1.** (2007). Metalik Malzemeler – Vickers Sertlik Deneyi – Bölüm 1 : Deney Metodu, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, Nisan.
- [42] **Sung, J. H., Kong, J. H., Yoo, D.K., On, H. Y., Lee, D. J. ve Lee, H. W.** (2008) Phase Changes of the AISI 430 Ferritic Stainless Steels After High – Temperature Gas Nitriding and Tempering Heat Treatment, *Materials Science and Engineering A* 489, 38 -43.
- [43] **Arcelor Mittal,** (2012). Extract from the Product Catalogue, p. 75.

EKLER

EK A : Ayrıntılı Anizotropi katsayısı ve Erichsen çökertme deneyi sonuçları.

EK A

Çizelge A.1 : DC03 kalite sacların anizotropi katsayısı analiz sonuçları.

Firma / Kalite	Rulo No	Rulo Yeri	Hadde Yönü	Dikey Anizotropi Katsayısı (R)	$\overline{R}$	Rulo Ortalama $\overline{R}$	ΔR	Rulo Ortalama ΔR
Borçelik DC03	55972S02 – Rulo 1	Rulo Başı	0°	1,0542	1,0627	1,1658	0,2758	0,2656
			45°	0,9248				
			90°	1,3469				
		Rulo Ortası	0°	1,2169	1,2086		0,2701	
			45°	1,0736				
			90°	1,4704				
		Rulo Sonu	0°	1,4551	1,2261		0,2509	
			45°	1,1007				
			90°	1,2480				
	56066S04 – Rulo 2	Rulo Başı	0°	1,2169	1,1458	1,0530	0,3957	0,4568
			45°	0,9480				
			90°	1,4704				
		Rulo Ortası	0°	0,9964	0,8233		0,4443	
			45°	0,6011				
			90°	1,0944				
		Rulo Sonu	0°	1,4551	1,1900		0,5303	
			45°	0,9248				
			90°	1,4551				
	56161S01 – Rulo 3	Rulo Başı	0°	1,1866	1,1026	1,0892	0,2614	0,3383
			45°	0,9719				
			90°	1,2800				
		Rulo Ortası	0°	1,0214	1,0090		0,3853	
			45°	0,8164				
			90°	1,3819				
		Rulo Sonu	0°	1,4935	1,1560		0,3682	
			45°	0,9719				
			90°	1,1866				

Çizelge A.2 : DC04 kalite sacların anizotropi katsayısı analiz sonuçları.

Firma / Kalite	Rulo No	Rulo Yeri	Hadde Yönü	Dikey Anizotropi Katsayısı (R)	$\bar{R}$	Rulo Ortalama $\bar{R}$	ΔR	Rulo Ortalama ΔR
Boçelik DC04	55450S03 – Rulo 1	Rulo Başı	0°	1,1007	0,9628	0,9629	0,5220	0,4223
			45°	0,7018				
			90°	1,3469				
		Rulo Ortası	0°	1,0214	0,9460		0,3775	
			45°	0,7572				
			90°	1,2480				
		Rulo Sonu	0°	1,0472	0,9799		0,3674	
			45°	0,7962				
			90°	1,2800				
	56252S01 – Rulo 2	Rulo Başı	0°	1,1007	1,0118	0,9581	0,2638	0,2053
			45°	0,8799				
			90°	1,1866				
		Rulo Ortası	0°	0,9020	0,8840		0,2913	
			45°	0,7383				
			90°	1,1572				
		Rulo Sonu	0°	0,9964	0,9785		0,0609	
			45°	0,9480				
			90°	1,0214				
	56465S02 – Rulo 3	Rulo Başı	0°	1,1866	0,9343	0,9044	0,5350	0,4742
			45°	0,6668				
			90°	1,2169				
		Rulo Ortası	0°	1,0214	0,8884		0,3732	
			45°	0,7018				
			90°	1,1286				
		Rulo Sonu	0°	1,0472	0,8905		0,5143	
			45°	0,6333				
			90°	1,2480				

Çizelge A.3 : AISI - 430 kalite sacların anizotropi katsayısı analiz sonuçları.

Firma / Kalite	Rulo No	Rulo Yeri	Hadde Yönü	Dikey Anizotropi Katsayısı (R)	$\bar{R}$	Ortalama Rulo $\bar{R}$	ΔR	Ortalama Rulo ΔR
Columbus	3888241-1 - Rulo 1	Rulo Başı	0°	0,6668	0,6636	0,7192	0,1561	0,1210
			45°	0,5855				
			90°	0,8164				
		Rulo Ortası	0°	0,7765	0,7201		0,1735	
			45°	0,6333				
			90°	0,8371				
		Rulo Sonu	0°	0,6333	0,7739		0,0335	
			45°	0,7572				
			90°	0,9480				
	3855802-3 - Rulo 2	Rulo Başı	0°	0,6668	0,6698	0,8134	0,0655	0,0579
			45°	0,6371				
			90°	0,7383				
		Rulo Ortası	0°	0,7962	0,9343		-0,1243	
			45°	0,9964				
			90°	0,9480				
		Rulo Sonu	0°	0,7765	0,8362		0,2327	
			45°	0,7199				
			90°	1,1286				
ThyssenKrupp	331251-4 - Rulo 1	Rulo Başı	0°	0,3068	0,2988	0,3710	0,0266	0,0680
			45°	0,2855				
			90°	0,3173				
		Rulo Ortası	0°	0,3864	0,3855		0,0605	
			45°	0,3552				
			90°	0,4450				
		Rulo Sonu	0°	0,4764	0,4287		0,1170	
			45°	0,3702				
			90°	0,4980				
	333560-5 - Rulo 2	Rulo Başı	0°	0,6668	0,6636	0,7192	0,1561	0,1210
			45°	0,5855				
			90°	0,8164				
		Rulo Ortası	0°	0,7765	0,7201		0,1735	
			45°	0,6333				
			90°	0,8371				
		Rulo Sonu	0°	0,6333	0,7739		0,0335	
			45°	0,7572				
			90°	0,9480				
Outokumpu	339163-5 - Rulo 1	Rulo Başı	0°	0,4844	0,4662	0,4814	0,0925	0,0709
			45°	0,4199				
			90°	0,5404				
		Rulo Ortası	0°	0,5119	0,5158		0,0356	
			45°	0,4980				
			90°	0,5552				
		Rulo Sonu	0°	0,4077	0,4622		0,0845	
			45°	0,4199				
			90°	0,6011				
	339141-5 - Rulo 2	Rulo Başı	0°	0,5702	0,5028	0,4889	0,0096	0,0347
			45°	0,4980				
			90°	0,4450				
		Rulo Ortası	0°	0,5404	0,4657		0,0669	
			45°	0,4323				
			90°	0,4579				
		Rulo Sonu	0°	0,5260	0,4982		0,0276	
			45°	0,4844				
			90°	0,4980				

Çizelge A.4 : DC03 ve DC04 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları.

Rulo Numarası	55972S02 - Rulo 1						56066S04 - Rulo 2						56161S01 - Rulo 3					
Borçelik DC03	Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu		Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu		Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu	
	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)
	11,90	14,70	12,00	14,90	11,80	14,70	11,80	14,90	10,40	14,60	10,60	15,20	11,20	14,20	11,30	14,00	11,10	14,30
	12,00	14,90	12,10	14,90	11,60	14,90	11,90	14,90	10,40	14,70	10,70	15,10	11,30	14,10	11,00	13,80	11,20	14,40
	11,90	14,90	11,90	14,80	11,90	15,00	11,80	14,90	10,60	14,80	10,60	15,30	11,00	14,00	10,90	13,60	11,00	14,00
Ortalama	11,93	14,83	12,00	14,87	11,77	14,87	11,83	14,90	10,47	14,70	10,63	15,20	11,17	14,10	11,07	13,80	11,10	14,23
Standart Sapma	0,058	0,115	0,100	0,058	0,153	0,153	0,058	0,000	0,115	0,100	0,058	0,100	0,153	0,100	0,208	0,200	0,100	0,208

Rulo Numarası	55450S03 - Rulo 1						56252S01 - Rulo 2						56465S02 - Rulo 3					
Borçelik DC04	Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu		Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu		Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu	
	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)
	11,40	15,30	11,60	15,90	11,60	15,10	11,50	15,60	11,40	15,60	11,80	15,40	11,50	15,90	11,30	15,80	11,10	15,30
	11,30	15,20	11,50	15,80	11,80	15,70	11,50	15,50	11,60	15,50	11,70	15,30	11,30	15,80	11,20	15,50	10,90	15,10
	11,30	15,10	11,50	15,80	11,80	15,40	11,70	15,50	11,80	15,60	11,60	15,60	11,50	16,10	11,40	15,40	11,00	15,40
Ortalama	11,33	15,20	11,53	15,83	11,73	15,40	11,57	15,53	11,60	15,57	11,70	15,43	11,43	15,93	11,30	15,57	11,00	15,27
Standart Sapma	0,058	0,100	0,058	0,058	0,115	0,300	0,115	0,058	0,200	0,058	0,100	0,153	0,115	0,153	0,100	0,208	0,100	0,153

Çizelge A.5 : AISI - 430 kalite sacların Erichsen çökertme deneyi sonuçları.

Rulo Numarası	3888241-1 - Rulo 1						3855802-3 - Rulo 2					
Columbus AISI-430	Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu		Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu	
	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)
	9,00	8,30	8,90	8,20	8,90	8,20	8,00	6,60	8,10	6,40	7,60	6,00
	9,30	8,50	8,80	8,00	8,80	8,10	8,20	6,70	8,00	6,40	7,70	6,20
	9,10	8,50	8,80	8,10	8,70	8,10	8,30	6,90	7,90	6,50	7,50	6,00
Ortalama	9,13	8,43	8,83	8,10	8,80	8,13	8,17	6,73	8,00	6,43	7,60	6,07
Standart Sapma	0,153	0,115	0,058	0,100	0,100	0,058	0,153	0,153	0,100	0,058	0,100	0,115

Rulo Numarası	331251-4 - Rulo 1						333560-5 - Rulo 2					
ThyssenKrupp AISI-430	Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu		Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu	
	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)
	8,70	7,70	9,10	8,10	8,90	8,00	9,00	7,80	8,90	7,70	9,00	7,60
	8,90	7,80	9,00	8,00	8,70	7,90	8,80	7,70	8,80	7,40	8,90	7,60
	8,80	7,80	8,90	7,70	8,80	8,00	8,90	7,60	8,00	7,50	9,10	7,30
Ortalama	8,80	7,77	9,00	7,93	8,80	7,97	8,90	7,70	8,57	7,53	9,00	7,50
Standart Sapma	0,100	0,058	0,100	0,208	0,100	0,058	0,100	0,100	0,493	0,153	0,100	0,173

Rulo Numarası	339163-5 - Rulo 1						339141-5 - Rulo 2					
Outokumpu AISI-430	Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu		Rulo Başı		Rulo Ortası		Rulo Sonu	
	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)	Batma Derinliği (mm)	Kuvvet (kN)
	8,60	7,80	8,30	7,90	8,70	7,90	8,90	8,00	8,70	7,70	9,00	7,90
	8,70	8,10	8,00	7,50	8,80	8,00	8,70	7,70	8,80	7,80	8,90	7,50
	8,80	8,30	8,20	7,60	8,80	7,90	8,70	7,60	8,80	7,70	8,80	7,60
Ortalama	8,70	8,07	8,17	7,67	8,77	7,93	8,77	7,77	8,77	7,73	8,90	7,67
Standart Sapma	0,100	0,252	0,153	0,208	0,058	0,058	0,115	0,208	0,058	0,058	0,100	0,208

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mehmet Doğu

Doğum Yeri ve Tarihi: Konak / 25.05.1989

Adres: Eryaman 5.Etap Kur Sitesi B1/2-O D:6 Etimesgut/ANKARA

E-Posta: mehmedogu05@hotmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği