



T.C.

ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN
DERİN ÇEKME VE HİDROŞEKİLLENDİRME KABİLİYETLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cengiz Görkem DENGİZ
(12210239)

Tezin Savunma Tarihi : 25.07.2014

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Kemal YILDIZLI

Bu Yüksek Lisans Tez Çalışması Ondokuz Mayıs Üniversitesi ÖYP 1919-018 numaralı Proje ile desteklenmiştir.

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında

Cengiz Görkem DENGİZ Tarafından Hazırlanan

**DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN
DERİN ÇEKME VE HİDROŞEKİLLENDİRME
KABİLİYETLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından 25/07/2014 tarihinde yapılan sınav ile
YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.**

Başkan : Doç. Dr. Fehmi NAİR
Erciyes Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Doç. Dr. İbrahim KELEŞ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Kemal YILDIZLI
Ondokuz Mayıs Üniversitesi

....../....../2014

Prof. Dr. Hüseyin DEMİR

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın başlangıcından bitimine kadar her aşamada çalışmayı yönlendiren, özverili yardımlarını esirgemeyen hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Kemal YILDIZLI' ya ve çalışmamda kullandığım, İmalat ve Konstrüksiyon Laboratuvarını Bölümümüz bünyesine kazandıran Ana Bilim Dalı Başkanımız Sayın Prof. Dr. Erdem KOÇ' a, teknik desteklerinden ötürü Erciyes Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Fehmi NAİR'e ve çalışmamın başından sonuna kadar yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen değerli eşim Emine DENGİZ' e teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca TİMAY TEMPO (Merzifon), SILVERLINE A.Ş. (Merzifon), SARIGÖL KONVEYÖR SİSTEMLERİ (Giresun) firmalarına ve OUTOKUMPU İstanbul Dış Tic. Ltd. Şti. Genel Müdürü Sayın Uğur ARPACI' ya tez çalışmama olan teknik desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Temmuz 2014

Cengiz Görkem DENGİZ
Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SEMBOLLER LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
ABSTRACT	xxiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Yapılmış Çalışmalar.....	4
2. PASLANMAZ ÇELİKLER.....	15
2.1 Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri	16
2.2 Paslanmaz Çelik Türleri.....	17
2.2.1 Ferritik paslanmaz çelikler.....	18
2.2.2 Ostenitik paslanmaz çelikler	18
2.2.3 Dupleks (Ferritik-Ostenitik) paslanmaz çelikler.....	19
2.2.4 Martenzitik paslanmaz çelikler	29
2.2.5 Çökelme sertleştirme (yaşlandırma) uygulanabilir paslanmaz çelikler	30
2.3 Genel Kullanım Alanları.....	31
3. METALLERE PLASTİK ŞEKİL VERME ESASLARI	33
3.1 Plastik Şekil Verme Yöntemleri	33
3.1.1 Dövme yöntemi.....	34
3.1.2 Haddeleme	34
3.1.3 Ekstrüzyon	35
3.1.4 Tel çekme.....	35
3.1.5 Derin çekme	36
3.1.6 Sıvama	36
3.1.7 Hidro şekillendirme (Basınçlı akışkan ile şekillendirme).....	36
3.2 Sacların Şekil Alma Kabiliyetlerinin Belirlenmesi.....	37
3.2.1 Saclara yapılan testler	37
3.2.2 Simülasyon metotları	40
3.3 Derin Çekme İşlemi	51
3.3.1 Silindirik kapların derin çekilmesi.....	56
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	71
4.1 Malzeme.....	72
4.2 Mekanik Özelliklerin Tespiti	72
4.2.1 Tek eksenli çekme testi numunelerinin hazırlanması	72
4.2.2 Tek eksenli çekme testinin yapılışı	74
4.2.3 Sacın anizotropi katsayısının belirlenmesi	75
4.2.4 Tek eksenli çekme (σ - ϵ) diyagramlarının oluşturulması	76

4.2.5	Poisson oranının belirlenmesi	82
4.3	Saclar İçin Şekillendirilebilirlik Test Metotları	83
4.3.1	Erichsen testi	83
4.3.2	Bulge testi	103
4.4	Yüzey Basıncı –Şekil Değiştirme İlişkisi	105
4.5	İki Eksenli Gerilme Hali İçin Gerilme – Şekil Değiştirme Eğrilerinin Oluşturulması	106
4.5.1	Membran (İnce zar) teorisi.....	107
4.5.2	Kubbe eğrilik yarıçapının hesaplanması	108
4.5.3	Kubbe tepesindeki sac kalınlığının hesaplanması.....	109
4.5.4	Akma kriterleri	109
5.	SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	111
5.1	Ön Deneme Çalışmalarının ABAQUS Programında Analizi	111
5.1.1	Standart düz ve baklava desenli sacların analizi	111
5.1.2	Yarı küresel desen baskılı sacların modellenmesi	113
5.2	Erichsen Testinin Simülasyonu	115
5.2.1	Düz sacların deformasyon analizi	116
5.2.2	Derin çekilen desenli sacların ABAQUS programında simülasyonu .	122
5.3	Bulge Testi Analizi	127
6.	DENEYSEL BULGULAR	129
6.1	Erichsen Testi Ön Deneme Bulguları	129
6.1.1	Düz saca ön denemeler	129
6.1.2	Desenli saclar için ön denemeler	130
6.2	Erichsen Testi Bulguları.....	133
6.2.1	Kuvvet - deformasyon derinliğinin sac genişliği ile ilişkisi	133
6.2.2	Düz ve desenli sacların şekillendirme sınır diyagramlarının (ŞSD) çizilmesi	139
6.3	Bulge Testi (Hidro-şekillendirme) Bulguları	143
7.	ANALİZ SONUÇLARI	147
7.1	Ön Deneme Çalışmalarının Sonlu Elemanlar Analizi	147
7.1.1	Düz ve baklava desenli sacların analizi	147
7.1.2	Yarı küresel desenli sacların analizi.....	148
7.2	Erichsen Testi Analizi	150
7.2.1	Düz sacların Erichsen testi analizi	150
7.2.2	Desenli sacların Erichsen testi analizi.....	152
8.	TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME	165
8.1	Deneysel Bulgular	165
8.1.1	Desen boyutuna göre kuvvet-deformasyon derinliği eğrilerinin karşılaştırılması	165
8.1.2	Şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması	169
8.2	Analiz ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	170
8.2.1	Erichsen testi analiz sonuçları.....	170
8.2.2	Erichsen testinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri	181
8.2.3	Bulge testi simülasyonu	181
9.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	187
	KAYNAKLAR.....	191
	EKLER.....	199
	ÖZGEÇMİŞ	229

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1. İçyapıdaki fazların mikro sertlikleri.	20
Çizelge 2.2. Kullanılan eliğın çeşitli standartlarda gösterimi.	22
Çizelge 2.3. Dupleks paslanmaz çeliklerin kalınlık ve genişlikleri.	23
Çizelge 2.4. Sıcak haddelenmiş dupleks paslanmaz çeliklerin eşitleri ve lleri. ...	24
Çizelge 2.5. Dörtlü tabaka dupleks paslanmaz elik sacların eşitleri ve lleri. ...	24
Çizelge 2.6. EN 1.4462 dupleks paslanmaz elik sacların kimyasal içeriğı.	25
Çizelge 2.7. EN 1.4462 dupleks paslanmaz elik sacların mekanik zellikleri.	25
Çizelge 2.8. Standart eliklerin mekanik zellikleri.	27
Çizelge 2.9. Paslanmaz eliklerin oda sıcaklığında fiziksel zellikleri.	27
Çizelge 3.1. Derin çekilecek sac çapının kap şekline göre hesaplanması için gerekli denklemler.	57
Çizelge 3.2. Çeşitli malzemeler için kademelendirme sayıları.	59
Çizelge 3.3. Bazı malzemeler için ampirik derin çekme aralığı denklemleri.	60
Çizelge 3.4. Çeşitli metalik malzemeler için pot çemberi basıncı.	62
Çizelge 3.5. Derin ekme kuvvetinin hesaplanmasında d/D oranına bağlı olarak m değerleri.	63
Çizelge 3.6. Derin ekme işinin hesaplanmasında x değerleri.	64
Çizelge 3.7. Bazı metalik malzemelerin ortalama dikey anizotropi katsayıları.	67
Çizelge 4.1. EN 1.4462 dupleks paslanmaz elik sacın kimyasal kompozisyonu.	72
Çizelge 4.2. Tek eksenli çekme deneyi numunelerine ait uzama ve daralma miktarları.	76
Çizelge 4.3. Hadde yönüne göre pekleşme üstelleri ve mukavemet katsayıları.	81
Çizelge 4.4. Erichsen deney modülü parçaları.	87
Çizelge 5.1. Sac şekline göre eleman tipi ve sayısı.	112
Çizelge 5.2. Farklı çaplara sahip doğrusal diziliimli yarı küresel desenli sanal sac modellerin ağ eleman sayıları.	114
Çizelge 5.3. ABAQUS/Standart ve ABAQUS/Explicit modellerinin karşılaştırılması.	119
Çizelge 6.1. Düz ve desenli sacların deformasyon derinliği ve yüzey basınçlarının karşılaştırılması.	131
Çizelge 6.2. 120x120 mm ² saclara uygulanan basınç, deformasyon derinliği ve hasar gözlemi.	145
Çizelge C.1. 60x10 mm ² dupleks paslanmaz elik düz sac.	202
Çizelge C.2. 60x20 mm ² dupleks paslanmaz elik düz sac.	204
Çizelge C.3. 60x30 mm ² dupleks paslanmaz elik düz sac.	206
Çizelge C.4. 60x40 mm ² dupleks paslanmaz elik düz sac.	207
Çizelge C.5. 60x50 mm ² dupleks paslanmaz elik düz sac.	208
Çizelge C.6. 60x60 mm ² dupleks paslanmaz elik düz sac.	209
Çizelge D.1. 60x10 mm ² dupleks paslanmaz elik 3 mm desen çaplı sac.	210
Çizelge D.2. 60x20 mm ² dupleks paslanmaz elik 3 mm desen çaplı sac.	211
Çizelge D.3. 60x30 mm ² dupleks paslanmaz elik 3 mm desen çaplı sac.	212

Çizelge D.4.	60x40 mm ² dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sac.	213
Çizelge D.5.	60x50 mm ² dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sac.	214
Çizelge D.6.	60x60 mm ² dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sac.	215
Çizelge E.1.	60x10 mm ² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.	216
Çizelge E.2.	60x20 mm ² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.	217
Çizelge E.3.	60x30 mm ² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.	218
Çizelge E.4.	60x40 mm ² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.	219
Çizelge E.5.	60x50 mm ² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.	220
Çizelge E.6.	60x60 mm ² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.	221
Çizelge F.1.	60x10 mm ² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.	222
Çizelge F.2.	60x20 mm ² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.	223
Çizelge F.3.	60x30 mm ² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.	224
Çizelge F.4.	60x40 mm ² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.	225
Çizelge F.5.	60x50 mm ² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.	226
Çizelge F.6.	60x60 mm ² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.	227

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Baklava baskılı çelik sac.....	2
Şekil 1.2. Piramit baskılı çelik sac.....	3
Şekil 1.3. Yıldız baskılı çelik sac.....	3
Şekil 2.1. Değişik paslanmaz çelik türlerinde nikel ve krom miktarları.....	17
Şekil 2.2. Dubleks paslanmaz çelikteki çift fazlı mikroyapı.	20
Şekil 2.3. Dubleks paslanmaz çeliğin kullanım alanları.	21
Şekil 2.4. Soğuk haddelenmiş dubleks paslanmaz çelik üretimi.	22
Şekil 2.5. Sürekli sıcak haddelenmiş dubleks paslanmaz çelik ürünlerin ölçüleri. ...	23
Şekil 2.6. Dörtlü tabaka dubleks paslanmaz çelik ürünlerin ölçüleri.	24
Şekil 2.7. Bazı paslanmaz çelik türlerinin içyapıları.	31
Şekil 2.8. 2013 yılı paslanmaz çelik tüketimi.	32
Şekil 3.1. Sıcak dövülerek imal edilmiş bazı metalik parçalar.	34
Şekil 3.2. Haddelme yöntemiyle üretilmiş yassı mamul.....	34
Şekil 3.3. Ekstrüzyon yöntemi ve şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.4. Tel çekme işlemi ve çekme halkaları.....	35
Şekil 3.5. Derin çekme yöntemiyle üretilmiş bazı ürünler.	36
Şekil 3.6. Sıvama işlemi ve üretilen bazı parçalar.	36
Şekil 3.7. Hidro şekillendirme ile üretilmiş bir çaydanlık.	37
Şekil 3.8. Şematik olarak Swift kupa testi.	37
Şekil 3.9. Kulak tipi çıkıntı örnekleri.....	38
Şekil 3.10. Fukui şematik deney düzeneği.....	38
Şekil 3.11. Fukui testinde hasara uğramış sac parça.....	39
Şekil 3.12. Olsen ve Erichsen testi şematik gösterimleri.....	39
Şekil 3.13. Bulge testi ile hasara uğratılmış numune.....	40
Şekil 3.14. Modellenerek simüle edilmiş bazı makina parçaları.	40
Şekil 3.15. ABAQUS programında yapılmış modelleme ve analiz örnekleri.	41
Şekil 3.16. ABAQUS/Standart ile yapılmış motor bloğu tasarımı.	42
Şekil 3.17. ABAQUS/Explicit ile yapılmış tekerlek-yol temas çifti.	42
Şekil 3.18. ABAQUS/CFD ile yapılmış bir çözümleme.	43
Şekil 3.19. ABAQUS/CAE ile yapılmış bir çözümleme.	43
Şekil 3.20. Bir ucu ankastre giriş problemi.....	46
Şekil 3.21. Giriş probleminin ayrıştırılmış modeli.	46
Şekil 3.22. Her düğüm noktası için serbest cisim diyagramı.....	47
Şekil 3.23. Serbest ucundan tekil yük ile yüklenmiş çubuğun başlangıç durumu.....	49
Şekil 3.24. Serbest ucundan tekil yük ile yüklenmiş çubuğun 1 arttırım sonundaki durumu.	50
Şekil 3.25. İkinci arttırım başlangıcında çubuğun durumu.....	50
Şekil 3.26. Üçüncü arttırımın başlangıcında çubuğun durumu.....	51
Şekil 3.27. Yuvarlak sac metal levhanın derin çekilmesinin şematik olarak gösterilmesi.....	52

Şekil 3.28. Silindirik bir kabın derin çekilmesindeki değişkenler.	53
Şekil 3.29. Silindirik başlı bir zımba ile derin çekme işlemi sırasında oluşan gerilmeler.	54
Şekil 3.30. (a) Saf çekme, (b) Saf gerdirme; tırnak, sac metalin serbestçe kalıp boşluğuna akmasını önler, (c) Desteklenmemiş duvar ve çekme esnasında kıvrışma olma olasılığı.	55
Şekil 3.31. (a) Çekme tırnağının şematik gösterimi, (b) kutu şeklinde parçanın çekilmesinde metal akışı, tırnak kullanılarak malzemenin hareketi kontrol edilmiştir, (c) Derin çekme esnasındaki köşe ve kenarların deformasyonu.	55
Şekil 3.32. Silindirik bir kabın ikinci ve/veya daha sonraki bir kademedede derin çekilmesi. (a) Genel yöntem. (b) Ters çekme.	59
Şekil 3.33. Kalıp ile zımba arasındaki derin çekme aralığı.	60
Şekil 3.34. (a) Çekme kenarının yuvarlatılması. (b) Çekme kenarı yuvarlatılmasının gereğinden küçük olması halinde kabın yırtılması.	60
Şekil 3.35. (a) İstampa kenarının yuvarlatılması. (b) İstampa kenarı yuvarlatılmasının gereğinden küçük olması halinde kabın yırtılması.	61
Şekil 3.36. Kısmen derin çekilmiş bir kaptaki pot çemberi kuvvetinin yetersizliği nedeniyle, flanşta katlanma (pot) oluşumu.	62
Şekil 3.37. Pot çemberi kuvvetinin gereğinden büyük olması nedeniyle derin çekme sırasında kabın yırtılması.	63
Şekil 3.38. Derin çekmede istampa kuvvetinin strokla değişimi (şematik).	64
Şekil 3.39. İncelterek derin çekme.	64
Şekil 3.40. Güç düşmeli çekiçte derin çekme.	65
Şekil 3.41. Tek eksenli çekme deneyi numunesi.	66
Şekil 3.42. Ortalama dikey anizotropi katsayısının derin çekme oranı sınırına etkisi.	67
Şekil 3.43. Derin çekilmiş kaptaki kulak oluşumu.	68
Şekil 3.44. Derin çekilmiş kaptaki kulak oluşumunun gözlemi.	68
Şekil 3.45. Silindirik kaplarda dikey anizotropi katsayısının haddeleme doğrultusu ile değişiminin kulak oluşumuna etkisi.	69
Şekil 4.1. Deneyler sırasında izlenen işlem sırası.	71
Şekil 4.2. EN 1.4462 dubleks paslanmaz çelik sacın mikroyapı görüntüsü.	72
Şekil 4.3. ASTM E8/E8M-13a standardına uygun çekme testi numunesi teknik çizimi.	73
Şekil 4.4. MITSUBISHI ML3015eX lazer kesim tezgahı (SILVERLINE A.Ş. izniyle).	73
Şekil 4.5. A4 boyutlu sacdan hadde yönüne paralel, dik, 45° açılı numune çıkarma.	73
Şekil 4.6. Hadde yönüne paralel, dik ve 45° açı ile kesilerek çıkarılan numuneler.	74
Şekil 4.7. INSTRON marka çekme test cihazı (KİTAM izniyle).	75
Şekil 4.8. Çekme numunelerinin çekme deneyinden sonraki durumları.	75
Şekil 4.9. Sacın hadde yönüne göre çekme eğrileri.	77
Şekil 4.10. Sacın hadde yönüne göre çizilmiş gerçek çekme eğrileri.	79
Şekil 4.11. Pekleşme üsteline göre çekme eğrilerinin değişimi.	80
Şekil 4.12. Pekleşme üstelinin belirlenmesi.	81
Şekil 4.13. Gerçek gerilme – gerçek plastik şekil değiştirme ilişkisi.	82
Şekil 4.14. Tek eksenli çekme yükü altındaki bir parça (sac) kabulü.	82
Şekil 4.15. Sac yüzeyine çizilen ağ çeşitleri.	84
Şekil 4.16. Erichsen deney düzeneği (Kesit görünüm).	84

Şekil 4.17. Erichsen deney düzeneği (İmalat ve Konstrüksiyon Lab.).	85
Şekil 4.18. GUNT WP 300.11 Erichsen deney düzeneği.	86
Şekil 4.19. Erichsen deney düzeneği patlatılmış katı model montaj görüntüsü.	86
Şekil 4.20. Değişik ebatta sac örnekleri.	87
Şekil 4.21. Farklı enlerde kesilerek derin çekilmiş örnek numuneler.	88
Şekil 4.22. Hasara uğramış numuneden ölçüm alınması.	88
Şekil 4.23. Başlangıç dairesi ve başlangıç dairesinin şekil değiştirmesinden sonraki durumu.	89
Şekil 4.24. Çemberlerle işaretlenmiş sac metal malzemenin şekillendirilmesinde karşılaşılabilecek durumlar.	89
Şekil 4.25. Şekillendirme sınır diyagramı örneği.	90
Şekil 4.26. Yarı küresel kubbe geometrisinde yükün dağılımı.	91
Şekil 4.27. Bu çalışma için tasarlanan yarı küresel desenli yüzeyin katı modeli.	91
Şekil 4.28. Dubleks paslanmaz çelik saclara basılan yüzey kabartı profilleri.	92
Şekil 4.29. a) Mikro işleme için kullanılan bir minyatür tezgah, b) mikro kesme ucu, c) mikro işleme ile polimerden üretilmiş bir medikal mikro iğne grubu.	93
Şekil 4.30. Mikro frezeleme işlemi.	93
Şekil 4.31. TİMAY TEMPO firmasında mikro frezeleme ile üretilmiş bakır baralar.	94
Şekil 4.32. Mikro frezeleme ile işlenmiş kalıpla yapılmış üniversitemiz logosu (TİMAY TEMPO-Merzifon firması izniyle).	94
Şekil 4.33. Yarı küresel desenler basılmış sac ve kalıpları.	95
Şekil 4.34. Dilimlenmiş numuneler.	95
Şekil 4.35. Çemberler çizilerek markalanmış numuneler.	96
Şekil 4.36. Kareler çizilerek markalanmış numuneler.	96
Şekil 4.37. 100 tonluk hidrolik şekil verme presi.	97
Şekil 4.38. 3 mm çaplı yarı küresel desen basılmış sac numuneler.	98
Şekil 4.39. 6 mm çaplı yarı küresel desen basılmış sac numuneler.	98
Şekil 4.40. 9 mm çaplı yarı küresel desen basılmış sac numuneler.	99
Şekil 4.41. Deforme olmuş sac ve referans kumpas.	101
Şekil 4.42. Referans ölçü değerinin görüntü işlemede kalibrasyonu.	102
Şekil 4.43. Gridler (parseller) üzerinden ölçü alınması.	102
Şekil 4.44. 120x120 mm ² boyutlarındaki aynı alan içerisine 3 mm (a), 6 mm (b) ve 9 mm (c) çaplı yarı küresel desen basılmış Bulge testi numuneleri.	103
Şekil 4.45. 300 tonluk hidrolik pres ve güç ünitesi.	104
Şekil 4.46. Hidrolik şekillendirme kalıbı.	104
Şekil 4.47. Brinell sertlik ölçme yöntemi.	105
Şekil 4.48. Deformasyon öncesi ve sonrası sac ve zımbanın durumu.	106
Şekil 4.49. Bu çalışmadaki Erichsen derin çekme (kesit) geometrisi.	107
Şekil 4.50. Birim hacim elemandaki gerilme hali.	108
Şekil 5.1. Düz ve desenli örnek sac katı modelleri.	112
Şekil 5.2. Deney düzeneği katı modeli.	113
Şekil 5.3. 3, 6 ve 9 mm çaplı yarı küresel desenli sac modellerin üstten görünüşü.	114
Şekil 5.4. 3, 6 ve 9 mm çaplı yarı küresel desenli sac modellerin alttan görünüşü.	114
Şekil 5.5. Analizde izlenen işlem sırası.	115
Şekil 5.6. Erichsen test düzeneği sonlu eleman modeli.	117
Şekil 5.7. Ağ eleman boyutunun çözüm zamanına etkisi.	118
Şekil 5.8. Sac modelin ağ elemanlarına bölünmüş hali.	118
Şekil 5.9. Modelin doğal frekansının bulunması.	120
Şekil 5.10. Farklı adım sürelerinde iç enerji ve kinetik enerjideki değişim.	121

Şekil 5.11. 3 mm çaplı yarı küresel desenlerin basıldığı kalıp geometrisi.....	123
Şekil 5.12. Düz sac modellere yarı küresel (3 mm çaplı) desen basılması a) Deformasyon öncesi b) Deformasyon sonrası c) Deformasyon sonrası oluşan desenli sac.....	124
Şekil 5.13. Kalıplar açılmadan önce (a) ve açıldıktan sonra (b) desenli saclarda oluşan gerilme dağılımı.....	125
Şekil 5.14. İkinci adım başında (a) ve sonunda (b) sac modelin durumu.	126
Şekil 5.15. Üçüncü adım başında (a) ve sonunda (b) sac modelin durumu.	127
Şekil 5.16. Hidro-şekillendirme test düzeneği modeli.	128
Şekil 6.1. Deney öncesi yüzeyi markalanmış galvanizli sac numune.....	129
Şekil 6.2. Deney sonrası galvanizli numune.	130
Şekil 6.3. Düz ve desenli sac numuneler.....	130
Şekil 6.4. 20 kN yük altında deformasyona uğramış düz ve desenli saclar.....	131
Şekil 6.5. Düz ve baklava desenli çelik sac numunelerin kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.....	132
Şekil 6.6. Düz ve desenli sac için yüzey basıncı-gerçek şekil değiştirme grafikleri.	133
Şekil 6.7. Dupleks paslanmaz çelik düz sacların kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.	134
Şekil 6.8. Dupleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.	135
Şekil 6.9. Dupleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sacların kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.	136
Şekil 6.10. Şematik olarak kalıp ile pot çemberi arasındaki desenli sacın ezilmeden önceki ve sonraki durumu.	137
Şekil 6.11. Ezilerek düzleşen (sönen) desenler (9 mm yarı küresel desen).	138
Şekil 6.12. Dupleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sacların kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.....	138
Şekil 6.13. Dupleks paslanmaz düz sacların şekillendirme sınır diyagramı.	139
Şekil 6.14. Dupleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların şekillendirme sınır diyagramı.....	140
Şekil 6.15. 60x50 mm ² lik 3 mm desen çaplı sacda yırtılma hasarı.	140
Şekil 6.16. Dupleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sacların şekillendirme sınır diyagramı.....	141
Şekil 6.17. 60x50 mm ² lik 6 mm desen çaplı sacda yırtılma hasarı.....	141
Şekil 6.18. Dupleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sacların şekillendirme sınır diyagramı.....	142
Şekil 6.19. 60x50 mm ² lik 9 mm desen çaplı sacda yırtılma hasarı.....	143
Şekil 6.20. Bulge testi yapılmış numuneler.	144
Şekil 7.1. Analiz sonunda hasara uğramış düz sacda gerilme dağılımı (ön deneme).	147
Şekil 7.2. Analiz sonunda hasara uğramış desenli sacda gerilme dağılımı.....	147
Şekil 7.3. 3 mm çaplı yarı küresel desenli hasara uğramış sacda gerilme dağılımı.	148
Şekil 7.4. 6 mm çaplı yarı küresel desenli hasara uğramış sacda gerilme dağılımı.	149
Şekil 7.5. 9 mm çaplı yarı küresel desenli hasara uğramış sacda gerilme dağılımı. ..	149
Şekil 7.6. Düz sacların derin çekme sırasındaki kesit gerilme dağılımı.	150
Şekil 7.7. Düz sacların Erichsen testi sırasında gerilme dağılımı ve hasar oluşumu.	151
Şekil 7.8. Düz sac modele 3 mm çaplı yarı küresel desen basımında gerilme dağılımı.	153

Şekil 7.9. 3 mm çaplı yarı küresel desenli sacın sıkıştırılması ve gerilme dağılımı.	154
Şekil 7.10. 3 mm çaplı yarı küresel desenli sacın Erichsen testi sırasında gerilme dağılımı ve hasar oluşumu.....	155
Şekil 7.11. Düz sac modele 6 mm çaplı yarı küresel desen basımında gerilme dağılımı.	156
Şekil 7.12. 6 mm çaplı yarı küresel desenli sacın sıkıştırılması ve gerilme dağılımı.	157
Şekil 7.13. 6 mm çaplı yarı küresel desenli sacın Erichsen testi sırasında gerilme dağılımı ve hasar oluşumu.....	158
Şekil 7.14. Düz sac modele 9 mm çaplı yarı küresel desen basımında gerilme dağılımı.	159
Şekil 7.15. 9 mm çaplı yarı küresel desenli sacın sıkıştırılması ve gerilme dağılımı.	160
Şekil 7.16. 9 mm çaplı yarı küresel desenli sacın Erichsen testi sırasında gerilme dağılımı ve hasar oluşumu.....	161
Şekil 7.17. Doubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların desen basımı esnasında kesit gerilme dağılımı.....	162
Şekil 7.18. Doubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sacların desen basımı esnasında kesit gerilme dağılımı.....	162
Şekil 7.19. Doubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sacların desen basımı esnasında kesit gerilme dağılımı.....	163
Şekil 7.20. Doubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların derin çekme esnasında kesit gerilme dağılımı.....	163
Şekil 7.21. Doubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların derin çekme esnasında kesit gerilme dağılımı.....	164
Şekil 7.22. Doubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların derin çekme esnasında kesit gerilme dağılımı.....	164
Şekil 8.1. 60x10 mm ² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.	166
Şekil 8.2. 60x20 mm ² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.	166
Şekil 8.3. 60x20 mm ² boyutlarındaki kalıbı sıyıran düz saclar.	167
Şekil 8.4. 60x30 mm ² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.	167
Şekil 8.5. 60x40 mm ² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.	168
Şekil 8.6. 60x50 mm ² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.	168
Şekil 8.7. 60x60 mm ² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.	169
Şekil 8.8. Doubleks paslanmaz düz ve desenli çelik sacların şekillendirme sınır eğrileri.	170
Şekil 8.9. Doubleks paslanmaz çelik düz sacların deneysel ve analizlerden elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği eğrilerinin karşılaştırılması.	171
Şekil 8.10. Sac genişliğine göre kalınlığın değişimi a) 60x10 mm ² (1/2), b) 60x20 mm ² (1/2), c) 60x30 mm ² (1/2), d) 60x40 mm ² (1/4), e) 60x50 mm ² (1/4), f) 60x60 mm ² (1/4).....	172
Şekil 8.11. Doubleks paslanmaz çelik desenli (3 mm) sacların deneysel ve analiz sonuçlarında elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.....	173

Şekil 8.12. Desenli sacların (3 mm) sac genişliğine göre kalınlığın değışimi a) 60x10 mm ² (1/2), b) 60x20 mm ² (1/2), c) 60x30 mm ² (1/2), d) 60x40 mm ² (1/4), e) 60x50 mm ² (1/4), f) 60x60 mm ² (1/4).	175
Şekil 8.13. Dubleks paslanmaz çelik desenli (6 mm) sacların deneysel ve analiz sonuçlarında elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.	176
Şekil 8.14. Desenli sacların (6 mm) sac genişliğine göre kalınlığın değışimi a) 60x10 mm ² (1/2), b) 60x20 mm ² (1/2), c) 60x30 mm ² (1/2), d) 60x40 mm ² (1/4), e) 60x50 mm ² (1/4), f) 60x60 mm ² (1/4).	178
Şekil 8.15. Dubleks paslanmaz çelik desenli (9 mm) sacların deneysel ve analiz sonuçlarında elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.	179
Şekil 8.16. Desenli sacların (9 mm) sac genişliğine göre kalınlığın değışimi a) 60x10 mm ² (1/2), b) 60x20 mm ² (1/2), c) 60x30 mm ² (1/2), d) 60x40 mm ² (1/4), e) 60x50 mm ² (1/4), f) 60x60 mm ² (1/4).	180
Şekil 8.17. İki eksenli gerilme halinde gerilme-şekil değıştirme ilişkisi (Erichsen testi).	181
Şekil 8.18. Hidrolik basınç-kubbe derinliği ilişkisi.	182
Şekil 8.19. Gerçek gerilme – gerçek şekil değıştirme ilişkisi (Bulge Testi).	183
Şekil 8.20. Desen basımından sonra saclardaki kalınlık değışimi. a) Desen çapı 3 mm (1/4) b) Desen çapı 6 mm (1/4) c) Desen çapı 9 mm (1/4).	184
Şekil 8.21. Bulge testi analizinde saclardaki kalınlık değışimi.	185
Şekil A.1. Erichsen deney düzeneği detaylı teknik çizimi.	200
Şekil B.1. Hidro-şekillendirme üst kalıbı.	201
Şekil B.2. Hidro-şekillendirme alt kalıbı.	201

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Tek eksenli çekme yüküne dik kesit alanı (mm ²)
A₀	: Tek eksenli çekme yönüne dik ilk kesit alanı (mm ²)
A_g	: Tek eksenli çekme yönüne dik gerçek kesit alanı (mm ²)
D	: İlk sac çapı veya derin çekilecek sacın çapı (mm)
D₀	: Başlangıçta çember desenlerin çapı (mm)
D_{0max}	: Maksimum sac çapı (mm)
D₁	: Çemberden elipse dönüşen desenlerin en büyük eksen (mm)
D₂	: Çemberden elipse dönüşen desenlerin en küçük eksen (mm)
D_{max}	: Derin çekilebilecek emniyetli en büyük sac çapı (mm)
D_p	: Zımba çapı (mm)
E	: Elastisite modülü (GPa)
F	: Zımba kuvveti (kN)
F	: Çekme yükü (kN)
F_N	: Pot çemberi baskı kuvveti (kN)
F_{ön}	: Öngerilme kuvveti (kN)
F_P	: Zımba kuvveti (kN)
I	: Gerilmeye sebep olan iç yük (kN)
K	: Simülasyonda kullanılan model elemanın rijitliği (-)
L	: Simülasyonda kullanılan model elemanın ilk uzunluğu (mm)
L₀	: Çekme numunesinin ilk boyu (sacdan çıkarılan) (mm)
L_s	: Çekme numunesinin son boyu (sacdan çıkarılan) (mm)
M_s	: Cıvata sıkma momenti (Nm)
P	: Gerilmeye sebep olan dış yük (kN)
P_y	: Yüzey basıncı (MPa)
R	: Dikey anizotropi katsayısı (-)
R₀	: Hadde yönü ile paralel anizotropi katsayısı (-)
R₁	: 1. asal eksen yönündeki kubbe eğrilik yarıçapı (mm)
R₂	: 2. asal eksen yönündeki kubbe eğrilik yarıçapı (mm)
R₄₅	: Hadde yönü ile 45° açı yapan anizotropi katsayısı (-)
R₉₀	: Hadde yönüne dik anizotropi katsayısı (-)
R²	: Regresyon katsayısının karesi (Lineer regresyon analizi)
R_c	: Kalıp ağzı köşe yarıçapı (mm)
$\bar{R}$	: Ortalama anizotropi katsayısı (-)
R_d	: Kalıp ağzı kavisi (mm)
R_d	: Son kubbe eğrilik yarıçapı (mm)
R_p	: Zımba kavisi (mm)
R_s	: Somun oturma yüzeyinin ortalama yarıçapı (mm)
S	: Derin çekilerek elde edilen kabın yüzeyi (mm ²)
S₁	: Çekme sacının yüzeyi (mm ²)
T	: Simülasyon süresi (s)
V₀	: Tek eksenli çekme numunesinin ilk hacmi (mm ³)
V_s	: Tek eksenli çekme numunesinin son hacmi (mm ³)
W	: Derin çekme işi (J)

Z	: Kulaklanmaya olan eğilim (-)
c	: Kalıp boşluğu (mm)
d	: Brinell sertlik izi çapı (mm)
d	: Erichsen deformasyon derinliği
d₁	: İlk kademede elede edilecek kabın iç çapı (mm)
d_c	: Alt kalıp iç çapı (mm)
d_m	: İkinci ve daha sonraki kademeler için kap çapı (mm)
e₁	: En büyük birim şekil değiştirme (-)
e₂	: En küçük birim şekil değiştirme (-)
f	: Malzemenin doğal frekansı (Hz)
h	: Derin çekme derinliği, vida adımı (mm)
h_d	: Deformasyon derinliği (mm)
m	: Kademelendirme sayısı (-)
n	: Pekleşme üsteli (-)
p	: Pot çemberi basıncı (MPa)
p_z	: Zimba tarafından uygulanan iç basınç (MPa)
r₂	: Ortalama cıvata çapı (mm)
t	: Tek eksenli çekme deneyinden sonra sac numunenin kalınlığı, sac et kalınlığı (mm)
t₀	: Tek eksenli çekme deneyinden önce sac numunenin kalınlığı, sacın ilk et kalınlığı (mm)
t_d	: Derin çekilmiş sacın son et kalınlığı (mm)
u	: Hız (mm/s)
ü	: İvme (mm/s ²)
u^a	: a düğüm noktasındaki yer değiştirme (mm)
u^b	: b düğüm noktasındaki yer değiştirme (mm)
w	: Tek eksenli çekme deneyinden sonra sac numunenin eni (mm)
w₀	: Tek eksenli çekme deneyinden önce sac numunenin eni (mm)
x	: Derin çekme kuvvetinin strok sırasındaki değişimi (mm)
Δε_{el}	: Şekil değiştirme artışı (-)
Δl	: Tek eksenli çekme yüküne paralel uzama miktarı (mm)
Δw	: Tek eksenli çekme yüküne dik daralma miktarı (mm)
ε	: Etkin şekil değiştirme (-)
ε_g	: Gerçek şekil değiştirme (-)
ε_{müh}	: Mühendislik birim şekil değiştirmesi (-)
ε_{pl}	: Plastik birim şekil değiştirme (-)
ε_t	: Kalınlık doğrultusunda gerçek şekil değiştirme (-)
ε_w	: Enine doğrultuda gerçek şekil değiştirme (-)
φ	: Sacın haddeleme doğrultusuna göre saat ibresi yönünde yapılan numune kesim açısı (°)
μ	: Sürtünme katsayısı (-)
ρ	: Sürtünme açısı (°)
σ	: Gerilme (MPa)
σ_{0,2}	: Malzemenin %0.2 plastik şekil değişimine karşılık gelen akma gerilmesi (MPa)
σ̄	: Etkin gerilme (MPa)
σ₁	: 1 yönündeki asal gerilme (MPa)
σ₂	: 2 yönündeki asal gerilme (MPa)
σ_g	: Gerçek gerilme (MPa)

$\sigma_{müh}$: Mühendislik gerilmesi (MPa)
 σ_n : Ortalama gerilme (MPa)

DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK SACLARIN DERİN ÇEKME VE HİDROŞEKİLLENDİRME KABİLİYETLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bazı yassı metal mamüllerin mikroyapısında taneler gibi, fazlarda plastik deformasyon doğrultusunda yönlenebilir. Haddeleme, germe ve derin çekme işlemleri, saclarda aşırı mikroyapısal yönlenim, mekanik ve kristalografik anizotropi meydana getirerek, sacın şekil alma kabiliyetini etkileyebilir. 0.5 mm ve daha ince sacların kalınlığı, yönlenmiş tane veya fazların boyutlarına daha yakın olduğu için, sacın mukavemeti ve şekil alma kabiliyetinde daha etkin olabilir. Dupleks paslanmaz çelik ince sacların üretim metalürjisi ve termomekanik nedenler ile yönlenmiş ferrit ve ostenitten ibaret çift (dual) fazlı mikroyapısı, bu tez çalışması için iyi bir örnek olmuştur. Bu tezde, aynı incelikte (0.5 mm) dupleks (EN 1.4462) paslanmaz çelik düz ve yarı küresel desenli sac numunelerin şekil alma kabiliyetleri, Erichsen derin çekme deneyi ve Bulge deneyi yapılarak karşılaştırılmıştır. Yarı küresel desenler sac üzerine, desen çapı 3, 6 ve 9 mm olacak şekilde özel olarak işlenmiş kalıplarda hidrolik pres ile basılmıştır. Derin çekme kuvveti artışına bağlı olarak, farklı ebatlardaki sac numunelerin deformasyon derinlikleri, saclar yırtılıncaya kadar ölçülmüş, şekillendirme sınır diyagramları ve gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Ayrıca derin çekilen saclar ve yırtılıncaya kadar şekil almaları, ABAQUS programında modellenmiştir. Sonuç olarak, derin çekilen dupleks paslanmaz çelik düz sacların şekil alma kabiliyetleri, desen çapı 9 mm olan desenli sac ile yaklaşık aynı, desen çapı 3 ve 6 mm olan desenli saclara göre % 70 daha yüksek bulunmuştur. Gerçekte, sac mikroyapısındaki fazlar, sanal sac modellere yansıtılamadığından, analizde efektif bir sürtünme katsayısı tanımlanarak, yapılan Erichsen ve Bulge deneylerinde reel olarak gözlenen kuvvet-derin çekme derinliği ilişkisine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sac, Dupleks paslanmaz çelik, Derin çekme, Erichsen deneyi, Bulge testi.

DEEP DRAWING AND HYDROFORMING CAPABILITIES OF THE DOME-TEXTURED AND PLANARY DUPLEX STAINLESS STEEL SHEETS

ABSTRACT

In some examples of rolled-sheet metals phases could be oriented to the direction of plastic deformation just like micro-scale grains. Rolling, stretching, bending and deep drawing of sheet metals yield to crystallographic texture and mechanic anisotropy. Especially, formability and strength of thin sheet metals could be more affected from the anisotropy as the thickness of sheet approaches the dimensions of the micro-scale grain and phases. Based on metallurgy and thermo-mechanical processes, duplex stainless steel thin sheets are fully consisted of the oriented dual phases, columnar austenite and ferrite lying to the rolling direction. For these reasons, this type of sheet metal is a good example for the deep drawing and simulation. In this thesis, Erichsen and Bulge tests were done to compare the formability of flat and textured duplex stainless steel sheets (EN 1.4462). Punch forces and deformation depths were measured simultaneously during the deep-drawing of the sheet metals until failure appears on the sheet surfaces. Forming limit diagrams were plotted with experimental data of deep-drawn sheets. In addition, sheets were deep-drawn in a computer aided engineering program, ABAQUS. Experimental and numerical results also indicated that the formability of the flat sheet was better than that of the textured sheet. To reach a reliable relation between punch forces and the deformation depths as-observed at the experimental Erichsen and Bulge tests, the deep-drawing simulation should be implemented along with the definition of an effective coefficient of friction, if dual phase features will be ignored for prompt analysis.

Keywords: Sheet, Duplex stainless steel, Deep drawing, Erichsen test, Bulge test.

1. GİRİŞ

Paslanmaz çelik sacların, ev gereçlerinden basınçlı tanklara, gıdadan otomotiv endüstrisine kadar yaygın bir kullanım sahası bulunmaktadır. Plaka, levha veya şerit gibi yassı mamullerden yeterli ölçülerde kesilen sac parçalar, derin çekme veya hidro şekillendirme ile plastik (kalıcı) şekil verilerek yeni bir yekpare ürüne dönüştürülür. Ostenitik ve ferritik paslanmaz çelik sacların mukavemeti, ısıtım işlem yöntemleri ile artırılmaz [1]. Ancak kalıcı ve soğuk deforme ederek pekleştirme ile artırılabilir. Kalıcı şekil değiştirmeye zorlanmış bir sac pekleşir ve mukavemeti (deformasyon öncesi) yükselir. Pekleşen yüzeyin, mukavemeti ve sertliği artar. Pekleşme, saca veya herhangi bir metalik iş parçasına, akma gerilmesini aşan ve kalıcı şekil değiştirmesine yol açan yük veya tekrarlı dış yükler uygulandığında oluşur. Kalıcı deformasyon sırasında, malzeme mikroyapısındaki dislokasyonların (atomik boyutlarda çizgisel hatalar) hareket eden kesişmesinin yanı sıra, yükleme sonrası kalan artık (iç) gerilmeler beraberinde malzeme mukavemetinde kayda değer bir yükselme meydana getirebilir. Buna en iyi örnek, ostenitik veya dubleks paslanmaz çelik saclardan yapılan basınçlı tanklara imalat sırasında su pompalanarak hidrostatik bir iç basınca maruz bırakıp soğuk deformasyona uğratmak sureti ile tank mukavemetinin artırılmasıdır [2]. Bu, sacın et kalınlığı dikkate alındığında, aynı mukavemetin, daha ince olan sacda elde edilebileceği anlamına gelir ve üreticiye ekonomik avantaj; kullanıcıya ağırlıktan kazanç sağlar.

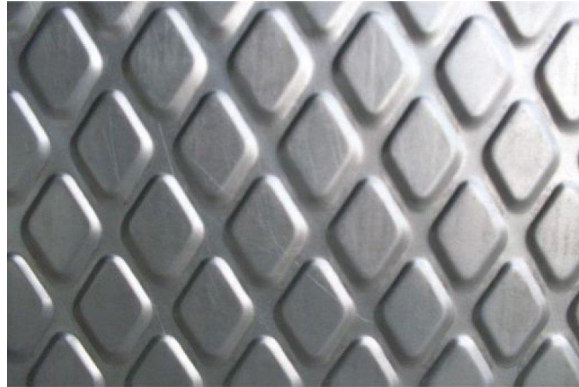
Benzer mukavemet artırma yöntemi ile yapılan diğer önemli uygulama ise, saclar üzerinde standart tiplerde desenler oluşturmaktır. Düşük karbonlu veya paslanmaz çelikten yassı mamullerin yüzeylerine standart tiplerde imalat sırasında kabartma şeklinde geometrik desenler basılarak sac yüzeyi soğuk deformasyona uğratarak sacın pekleşmesi sağlanır. Mevcut yüzey deseni sebebi ile sacın mekanik aşınma ve çizilmeye karşı direnci bağli olarak artarken, sacın şekil alma kabiliyeti azalır. Bu tipteki saclara, desenli veya teksturlu saclar adı verilir.

Desenli paslanmaz elik saclar, mekanik üstünlükleri sebebiyle, asansör, yürüyen merdiven, römork, karoser, damper imalatında taban ve basamak sacı yapımında tercih edilmektedir.

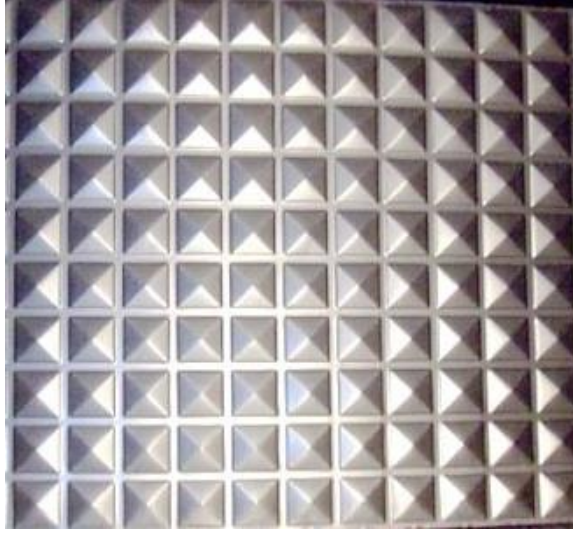
Literatürde yapılan çalışmalarda, geometrik yüzey desenlerinin sacın şekil alma kabiliyetleri ve sınırlarına ne derecede etkidiği yeterince tartışılmadığı için, bu konuda yapılacak her çalışma ve edinilecek her tecrübe paslanmaz elik sektörü ile paylaşılacak niteliktedir.

1.1 Tezin Amacı

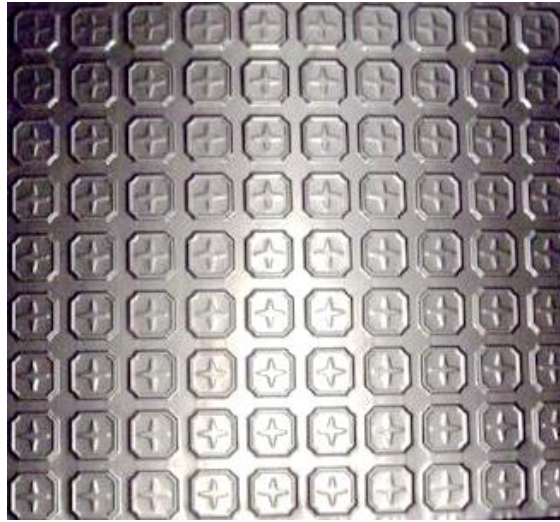
Bu tezde, dubleks paslanmaz elik sacların, derin çekme ve hidro-şekillendirme işlemlerinde şekil alma kabiliyetlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca sacın mukavemetini artırmak için, yarı küresel desenli saclar imal edilerek, düz yüzeyli dubleks paslanmaz elik saclara göre, mukavemet kazancı, şekil alma kabiliyetindeki kayıplar ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri araştırılmıştır. Desen boyutunun, sac kalınlığının, sac yüzey alanının, dubleks paslanmaz elik sacların şekil alabilirliğine etkileri araştırılarak, yırtılma ve kıvrışma gibi hasar oluşumlarının incelenmesi planlanmıştır. Bazı standart tipteki desenli saclar şekil 1.1, 1.2 ve 1.3'te verilmiştir.



şekil 1.1. Baklava baskılı elik sac [3].



Şekil 1.2. Piramit baskılı çelik sac [4].



Şekil 1.3. Yıldız baskılı çelik sac [4].

Desenli paslanmaz çelik saclar, mekanik üstünlükleri sebebiyle, asansör, yürüyen merdiven, römork, karoser, damper imalatında taban ve basamak sacı olarak tercih edilmektedir. Bilimsel çalışmalarda, geometrik yüzey desenlerinin sacın şekil alma kabiliyetleri ve sınırlarına ne derecede etkidiği yeterince tartışılmadığı için, bu konuda yapılacak her çalışma ve edinilecek her tecrübe paslanmaz çelik sektörü ile paylaşılacak niteliktedir. Paslanmaz çeliklerin soğuk deformasyon ile dayanım artırılması ve derin çekilmesi hakkında bir takım çalışmalar yapılmış, ancak son birkaç yıldır adından sıkça söz edilen dubleks paslanmaz çeliklerin bu yöntemle mukavemet artırılması ve derin çekilmesi bilimsel açıdan yeterince araştırılmamıştır. Dubleks paslanmaz çelikleri diğer paslanmaz türlerinden ayıran en temel özellik, demirin iki farklı katı çözeltisi olan, hacim merkezli kübik kristal yapılı ferrit ve yüzey merkezli

kübik kristal yapılu ostenit taneleri birarada bulundurmasıdır. Mikroyapıdaki ferrit tanelerinin mikrosertliği yaklaşık 330 HV0.1 civarında iken, ostenitik tanelerinin sertliği 150HV0.1 civarındadır. Bu nedenlerle, dubleks paslanmaz çeliklerin mukavemeti diğer türdeki paslanmaz çeliklerin mukavemetinden daha yüksektir. Metallerde, metalürjik olarak bu tür faz farklılıkları ayrıca deformasyon sonucu artık gerilme oluşumlarına sebep olabilir [5].

Bu tez, yukarıda bahsedilen mühendislik bilgisini faydalı bir şekilde dubleks paslanmaz çelik saclar üzerinde kullanmak ve deneysel yöntemler yoluyla açıkça ve daha sistematik biçimde sunmak üzere hazırlanmıştır. Tez çalışması, soğuk deforme edilmiş dubleks paslanmaz çelik sacların mukavemet artışının şekil alma kabiliyetindeki azalmaya oranı mühendislik yaklaşımları ile tahmini yönüyle son dönemlerde yapılmış çalışmalardan farklıdır. İzlenecek çalışma stratejisinde, “hidro-şekillendirme” tekniğinin de kullanılmış ve sonuçların kıyaslanmış olması özgün değer taşımaktadır.

1.2 Yapılmış Çalışmalar

Standart paslanmaz çelik sacların şekil alma kabiliyeti literatürde geniş ölçüde araştırılmasına rağmen dubleks paslanmaz çelik saclar hakkında benzer çalışma sayısı azdır. Ancak literatürde Erichsen testini konu alan birçok uygulamalı ve teorik araştırma bulguları yayımlanmıştır.

Sacların şekillendirilebilirliğini akma mukavemeti, çekme dayanımı gibi mekanik ve içyapı gibi metalürjik özellikler tek başlarına ifade edememektedir. Bu sebeple üreticiler ve kullanıcılar için şekillendirme sınır diyagramları sacın şekillendirilebilirliğinin belirlenmesinde önemli rol oynar[6]. Şekillendirme sınır diyagramlarının çizilmesinde genellikle otomatik ve deneysel olarak iki yöntem kullanılır. Otomatik çizimle sac yüzeyinin işaretlenmesi makineler yardımı ile yapılmakta ve yapılan deformasyon testi üç-boyutlu bir kamera ile kayıt altına alınarak oluşan deformasyonlar ve gerilmeler anlık olarak görüntülenmektedir. O. Anket ve arkadaşları, çalışmalarında şekillendirme sınır diyagramlarının teorisi, çizimi, okunması ve yorumlanmasını incelemiştirler [7]. Literatürdeki şekillendirme süreçlerini esas alarak bir şekillendirme sınır diyagramı elde etmişlerdir.

F. Öztürk ve arkadaşları, sac metallerin şekillendirme kabiliyetlerinin ölçümünde kullanılan sac üzerine grid çizme ve gridlerde oluşan değişimleri ölçme metotlarını karşılaştırmışlardır [8]. Yaptıkları çalışmada sac üzerine kimyasal dağlama ve serigrafi yöntemleri ile gridler oluşturmuşlardır. Kimyasal dağlama ile oluşan gridlerin sac üzerinde mikro çatlaklar oluşturarak sac malzemenin bu bölgelerden yırtıldığının tespit ederek serigrafi yönteminin daha uygun olduğunu ortaya koymuşlardır. Saclar üzerinde oluşan deformasyonları ise otomatik (ASAME grid ölçüm sistemi) ve manuel olarak ayrı ayrı ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda otomatik sistemin daha tutarlı sonuçlar verdiğini gözlemişleridir.

A. O. Balod, 1021 sac çelikler için M-K analizi ve Hosford akma kriterini kullanarak şekillendirme sınır gerilme diyagramlarını oluşturmuştur. Ayrıca çalışmada normal anizotropinin, akma kriteri indeksinin, mukavemet katsayısının teorik şekillendirme sınır gerilme diyagramına olan etkisini incelemiştir [9]. Artan normal anizotropi oranı, inhomojenite faktörü ve mukavemet katsayısı ile şekillendirme sınır gerilme eğrisinin yükseldiğini ortaya koymuştur.

M. Türköz ve arkadaşları, çalışmalarında Al 5754-0 ve Al 2024-T4 alaşımlarına Nakazima testi uygulayarak şekillendirme sınır diyagramlarını çizmeye çalışmışlardır [10]. Saclar üzerine serigrafi yöntemi ile grid oluşturmuşlar ve deformasyon sondası sacdaki değişimleri gözlemlemişlerdir. Elde edilen sonuçlar ile simülasyonlarda kullanılan sac özellikleri iyi bir şekilde tanımlanarak sonuçların tutarlılığı artırılmıştır.

Deneysel derin çekme yöntemlerinde, sac yüzeyinde hasar (yırtılma) oluşuncaya kadar hidrolik ve mekanik temaslı olmak üzere iki farklı yükleme yapılmaktadır. Sac numuneye hidrolik temaslı yöntemlerde sac, diyaframlı ve sızdırmaz bir kalıp içine yerleştirildikten sonra hidrolik yağ basıncı ile yırtıluncaya kadar şişirilmekte ve sac yüzeyinde oluşan deformasyonlar ölçülerek bir şekillendirme sınır diyagramı çizilmektedir. Bulge testi, 120x120 mm² kare sacın hidrolik basınçla şişirilip hasara uğratıldığı en bilinen metottur. J. Slota ve E. Spisak, DDQ çelik sacına bulge testi yapmışlardır [11]. Deneylerden elde ettiği veriler ile gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme diyagramı çizmişler ve tek eksenli çekme diyagramlarını bu diyagramlar ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda iki eksenli çekme diyagramının daha çok gerinim değerine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

S. Yong-na ve arkadaşları, Ti-15-3 alaşımını hidrolik, mekanik ve kauçuk yardımı ile yapılan 3 ayrı bulge testine tabi tutmuşlardır [12]. Araştırmalarında bu 3 farklı test sırasında sac metal ile kalıp ve zimba arasındaki sürtünme katsayısını ve etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca mekanik bulge testini ABAQUS sonlu elemanlar programında simüle etmişlerdir. Çalışma sonucunda Ti-15-3 alaşımının gerdirme işlemlerinde düşük şekil alma kabiliyeti olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca kauçuk sertliğinin gerinim dağılımına etkisinin olmadığını fakat metal ile sac arasındaki sürtünmenin gerinim dağılımına büyük etkisi olduğunu görmüşlerdir.

J. Sobotka ve arkadaşları derin çekmede kullanılan malzemelerde derin çekme esnasında oluşan gerilme halinin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrilerine etkisini incelemişlerdir [13]. Çalışmaları esnasında parçaları Bulge (sac şişirme) testine ve standart çekme testine tabi tutmuşlar, oluşan gerilmeleri ARAMIS isimli bir optik sistemle inceleyerek bilgisayar ortamına aktarmışlardır. Çalışmaları sonucunda elde ettikleri pekleşme üstellerini karşılaştırarak gerilme halinin gerilme-şekil değiştirme verileri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. Dolayısıyla bu gerilme halinin yapılacak numerik simülasyonlarda dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

G.Y. Li ve arkadaşları, 3-boyutlu süperplastik şekillendirmenin viskoplastik sonlu elemanlar analizinin hesaplama detaylarını araştırmışlardır [14]. Bu çalışma kapsamında konik şişirme ve dikdörtgen kutu şişirme ABAQUS/Standart programında analiz edilmiş ve bu çalışmaları doğrulamak için konik şişirme işlemi deneysel olarak çalışılmıştır. Numerik modelleme esas alınarak, sürtünme katsayısının, şekil değiştirme oranının hassasiyeti ve şekil değiştirme oranının kalınlık dağılımına olan etkisi incelenmiş ve kullanışlı sonuçlar elde edilmiştir. Deneyler esnasında şekil değiştirme oranının ve kalınlık dağılımının anlık olarak takip edilememesi karşılaşılan sorunlardan birisi olmuştur. Ancak numerik modelleme ile simülasyonun anlık olarak takip edilmesi sonlu elemanlar metodunun bir diğer avantajını ortaya koymuştur.

H. B. Campos ve arkadaşları, AISI 304 paslanmaz çeliğinin şekillendirme sınır eğrilerini oluşturmaya çalışmışlardır [15]. Çalışmada eğrilerin tahmininde Marciniak-Kuczynski metodunu, hesaplanmasında ise Hill' in akma kriteri ve Swift denklemini kullanmışlardır. Ayrıca deneysel olarak oluklu ve oluksuz olma üzere 2 çeşit çekme numunesi (tek eksenli gerilme hali) ve Bulge testi için dairesel numune (iki eksenli

gerilme hali) kullanmışlardır. Çalışmalar sonucunda elde edilen deneysel şekillendirme sınır diyagramları, M-K metoduna göre hesaplananlarla neredeyse birebir örtüştüğü görülmüştür. Ayrıca Hill ve Swift'in pekleşme kanunları şekillendirme sınır diyagramlarının doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağlamıştır.

Y. Hwang ve arkadaşları, yuvarlak profil AA6011 alüminyum alaşımını Bulge testine tabi tutarak şekillendirme sınır diyagramını hazırlamışlardır [16]. Eksenel yükleme yapan sabit tümsek yüksekliği olan Bulge deney tesisatı ile şekillendirme sınır deneyleri başarıyla gerçekleştirilmiş ve şekillendirme sınır diyagramı çizilmiştir. Analitik şekillendirme sınır eğrileri Swift' in yayılarak boyun verme kriteri ve Hill' in bölgesel boyun verme kriterleri ile Hill'in akma fonksiyonu ilişkilendirilerek çizilmiştir.

H. Ziaei-poor ve arkadaşları, hidro-şekillendirme ile derin çekme işlemlerinde kıvrışma oluşumunu ABAQUS sonlu elemanlar programında incelemişlerdir [17]. Çalışma sonucunda kıvrışmanın başladığı deformasyon derinliğini belirlemişlerdir. Ayrıca hidro-şekillendirme ile yapılan derin çekme işlemlerinde konvansiyonel sistemlere göre kıvrışmanın %85 daha fazla deformasyon derinliğinde başladığını gözlemlemişlerdir.

Mekanik temaslı yöntemlerde ise, bir kalıp ile pot çemberi arasına sıkıştırılan sac, bir zımba ile itilerek yırtılınca kadar gerdirilir (derin çekilir). Mekanik kuvvetle yapılan derin çekme deneyleri, kalıp, zımba ve sac numunenin geometrik ölçülerindeki farklılıklar sebebiyle farklı adlarla isimlendirilir. Bunlardan bazıları; Olsen deneyi, Nakazima deneyi ve Erichsen deneyi olarak adlandırılır.

Metal sacların şekillendirilebilirliği incelenen derin çekme çalışmalarında, deneyler ve sonlu elemanlar analizleri (simülasyonlar) birlikte yapılmıştır. M. Safari ve arkadaşları, 3105 alüminyum alaşımlarının deneysel olarak şekillendirme sınır diyagramlarını elde etmişler ve deneysel verilerden elde edilen şekil değiştirme miktarlarından yararlanarak şekillendirme sınır gerilme diyagramlarını hesaplamışlardır [18]. Ayrıca deneysel çalışmaları sünek hasar kriteri ile simüle ederek elde edilen sonuçların deneysel veriler ile uyuştuğunu gözlemişlerdir.

B. B. Yoon ve arkadaşları, eksenel simetrik sacların gerdirme altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri ve sürtünme katsayılarının belirlenebilmesi için nümerik çözüm oluşturmaya çalışmışlardır [19]. Bu çerçevede sürtünme katsayısını

veren bir denklem oluşturmışlardır. Ayrıca çelik, alüminyum ve pirinç malzemeler için küresel zımba ile deneyler yapmışlardır. Nümerik analiz ile öngörülen kuvvet, deformasyon derinliği ve gerinim dağılımı deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneyler ile bulunan sürtünme katsayıları ile yapılan nümerik analiz sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

S. Panich ve arkadaşları, SPCE 270 çelik malzemesine Erichsen testi yaparak şekillendirme sınır eğrisini belirlemişlerdir [20]. Aynı test ABAQUS programında da yapılarak şekillendirme sınır eğrileri çizilmiştir. Çizilen eğrilere göre otomotiv endüstrisinde kullanılan bir parça analiz edilmiş ve analiz sonucunda Hill'48 akma kriterine göre çizilen şekillendirme sınır eğrilerinin parçadaki hasar oluşumuyla daha doğru bir şekilde uyuştuğunu ortaya çıkarmıştır.

C. Maier (2013), alüminyum AA5182-O alaşımının şekillendirme sınır diyagramını Nakazima testi ile deneysel ve simüle olarak belirlemeye çalışmışlardır [21]. Farklı genişliklerdeki numuneleri için deney ve simülasyon yapmışlardır. Simülasyon sonucunda model üzerinde kopma gerilmesini geçen bölgelerdeki meshlerin büyük ve küçük şekil değiştirmelerini belirlemişlerdir. Daha sonra bunları bir grafiğe aktararak şekillendirme sınır eğrilerini oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda deneysel eğriler ile simülasyon sonuçlarının uyuştuğunu görmüşlerdir.

B. Şanay ve B. Kaftanoğlu, SAE 1006 ve AA2024-D sac malzemelere Nakazima testi uygulamış ve bu testin sonlu elemanlar simülasyonunu yapmışlardır [6]. Elde edilen veriler ile Swift-Hill, Storen-Rice, Keeler ve Kaftanoğlu'nun gerilme yayılma kriterine göre şekillendirme sınır diyagramı oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda elde edilen şekillendirme sınır diyagramları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

A. Gavrus ve arkadaşları, DC03 sac metaline deneysel ve simüle olarak Erichsen testi uygulamışlardır [22]. Simülasyonu iki farklı programda (FORGE2 ve MARC) yapmışlardır. Çalışmalarında kuvvet-deformasyon derinliği parametrelerinin deneysel ve simüle olarak birbirleri ile uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca simülasyon için programlara girilen K ve n gibi malzeme parametrelerini bu deneysel sonuçlardan tersine hareketle elde etmişlerdir.

V. Oleksik ve arkadaşları, Erichsen testini simüle ederek test esnasında karşılaşılabilecek problemleri önceden belirlemeye çalışmışlardır [23]. Çalışmalarında

kullandıkları malzemelerin özelliklerini belirlemek için malzemeleri çekme testine ve Erichsen testine tabi tutarak karakteristik özelliklerini optik bir sistem yardımı ile belirlemişlerdir. Buldukları bu verileri bilgisayar ortamında kullanarak Erichsen testini birebir simüle etmişlerdir. Böylelikle genel bir literatür oluşturarak sac metal endüstrisine katkıda bulunmayı amaçlamışlardır.

J. P. Fan ve arkadaşları, hafif çelik karesel kapların derin çekme operasyonunu “Explicit” metot ile ABAQUS programında simüle etmişlerdir [24]. Coulomb sürtünmesinin ve tutucu kuvvetinin etkisi altında hasar gelişimini ve kıvrışma formasyonunu analiz etmişlerdir. Ayrıca deneysel çalışmalar ile tutucu kuvvetinin kıvrışmaya etkisini ve hasarın başlama yerini tespit etmeye çalışmışlardır. Çalışma sonunda simülasyon süresini minimize eden zımba hızı bulunmuş ve simülasyondaki hasar oluşumu deneysel olarak da doğrulanmıştır.

T. W. Ku ve arkadaşları, kare parçaların çok aşamalı derin çekme prosesleri ile ilgili deneyler serisi yaparak ve deformasyon durumları ve kalınlık dağılımını nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır [25]. Nümerik analiz işleminde LS-DYNA3D programı kullanmışlardır. Analiz sonuçları, numune ile kalıp arasındaki düzensiz temas durumundan dolayı hasar oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca numunenin en-boy oranındaki değişikliğin düzensiz metal akışına sebep olduğunu ve bunun hasara yol açtığını saptamışlardır.

H. Takuda ve arkadaşları, magnezyum alaşımı olan AZ31 metal sacların derin çekme gibi operasyonlardaki şekil alabilirliğini nümerik olarak analiz etmişler ve bu nümerik analizleri deneysel çalışmalarıyla karşılaştırmışlardır [26]. Çalışma sonucunda deney öncesi yapılan hasar başlangıcı ve kritik zımba stroğu tahminleri deneylerle birebir örtüşmüştür.

H. J. Bong ve arkadaşları ferritik paslanmaz çelik sacların şekillendirme sınır diyagramlarını 2 farklı metot kullanarak çizmeye çalışmışlardır [27]. Bu metotlardan biri Marciniak testi, diğeri ise standart ASTM E2218-2 (Erichsen) testidir. Çalışmaları sonucunda iki metodunda yaklaşık aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Ayrıca ASTM E2218-2 standart testinde sacların küreselleşen kısımlarında hasar görülürken, tutucu ile modifiye edilen Marciniak testinde ise bu noktadaki hasarların engellendiği görülmüştür.

S. Panich ve arkadaşları ileri yüksek mukavemetli çeliklerin şekil alabilirliğini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir [28]. Teorik olarak şekillendirme sınır diyagramını belirlemek için Marciniak-Kuczinsky modelini (M-K kriteri) kullanmışlardır. Ayrıca çelikler deneysel olarak tek eksenli çekme testi, Bulge testi ve Erichsen testine maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda akma fonksiyonunun ve pekleşme durumunun malzemenin şekillendirme sınır diyagramını önemli ölçüde etkilediği ortaya çıkarılmıştır.

H. Gürün doktora çalışmasında, derin çekme kalıplarında çekmeyi etkileyen parametreleri deneysel olarak incelemiştir [29]. Deneysel çalışmalarda, alüminyum, DKP ve pirinç sac malzemelerde değişik çekme parametreleri kullanılarak, silindirik ve kare olmak üzere iki farklı geometride derin çekme işlemleri gerçekleştirmiştir. Deney sonucunda sac malzemesinin ve çekme parametrelerinin, sac malzemelerdeki kırışıklığı, yırtılmayı ve yırtılma miktarını, sac kalınlığında incelmeyi ve çekilebilirlik oranlarını doğrudan etkilediğini görmüştür. Ayrıca Gürün, deneysel numuneler ile aynı çekme parametrelerini kullanarak, DYNAFORM ve AUTOFORM gibi programlarda deneysel çalışmaları simüle etmiştir. Deneysel çalışma sonuçları ile analiz sonuçlarının çok yakın değerlerde olduğunu görmüştür. Deneysel çalışmalardan elde ettiği verilerden yararlanarak, deney yapılmayan parametre değerlerinin çekilebilirlik değerlerine etkilerini tahmin etmek amacıyla bir bulanık mantık modeli geliştirmiştir. Gürün, özellikle çekme derinliğinin arttığı durumlarda, büyük kalıp kavisi değerleri, baskı plakasının etki alanının azalmasına ve sac malzeme üzerinde kırışmaların oluşmasına sebep olduğunu belirlemiştir. Ayrıca çekme boşluğunun olması gereken değerden daha düşük değerlerinde, sac malzemelerin kalıp ve zimba arasında sıkıştığı, artan sürtünme kuvvetlerinin de etkisi ile daha çabuk yırtıldığı ve bundan dolayı çekme oranlarının da düştüğünü tespit etmiştir.

M. Başpınar yüksek lisans çalışmasında, derin çekme işlemi sırasında değişik temas yüzeyi parametreleri ve işlem karakteristiklerine göre genel bir sürtünme modeli geliştirmiştir [30]. Bunun için sürtünme hesaplamalarında hassasiyet ve verimi arttırmak amacıyla, Wilson ve Khonsari' nin sürtünme modellerini yeni bir model altında bileştiren, bir matematik programı geliştirmiştir. Silindirik ve kare kapların derin çekilmesini bilgisayar ortamında simüle ederek ve elde edilen sonuçları geliştirdiği matematik modele girmiştir.

D. Ulu yüksek lisans çalışmasında, sonlu eleman benzetimi ile alüminyum derin çekme işlemlerini değerlendirmeye ve bu işlemler için uygun parametreler geliştirmeye çalışmıştır [31]. Deneysel doğrulama çalışmasında 6061 alaşımlı alüminyumu değişik geometrilerde incelemiştir. Simülasyonlar için LS-DYNAFORM programı kullanılmıştır. Bu sonlu eleman paket programının güvenilirliği atölyede yapılan deneyler ile karşılaştırmalar yapılarak sınanmıştır. Simülasyonlardan elde edilen bulgulara ve deney sonuçlarına göre VISUAL BASIC’ de veritabanı oluşturmuştur. Yapılan çalışmalar sonunda soğuk şekillendirme işlemi için sonlu elemanlar yöntemi ile explicit analizin tutarlı sonuçlar verdiği ve tasarımı yönlendirmek için kullanılabileceği sonucuna ulaşmıştır. Bu çalışma ile parçalara ait literatür bilgilerini kullanarak çeşitli geometrilerdeki parçaların ilkel çaplarının hesaplanabileceğini, LS-DYNAFORM programı ile bu verileri kullanıp imalat öncesi parçanın şekillendirme sırasındaki davranışlarının gözlemlenebileceği ispatlanmıştır.

S. Yalçın yüksek lisans çalışmasında, buruşma fenomenini ve uygulanabilir önlemleri belirlemeye çalışmıştır [32]. Çalışmasında derin çekme işlemini simüle edebilmek için NUMISHEET ve PAMSTAMP programını kullanmıştır. Plastik buruşmayı anlamak için baskı plakası kuvvetinin buruşmaya olan etkisini araştırmıştır. Değişik baskı plakası kuvvetleri için eksenel simetrik kap modellemesi incelemiştir. Sayısal analizlere ek olarak, hidrolik pres kullanılarak klasik derin çekme işleminin deneysel doğrulama çalışması yapmıştır. Yalçın çalışma sonucunda kıvrışmanın çekilen kabın flanşlarında olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca kıvrışma enerjisinin çekme enerjisinden düşük olduğunu tespit etmiştir. Kıvrışmayı engellemek için en basit çözümün çekme tırnakları olduğunu ve artan parça kalınlığı ile birlikte kıvrışma sayısının azaldığını tespit etmiştir.

E. Gao ve arkadaşları ince cidarlı sacların yarım küre şeklinde derin çekilmesinde malzeme özelliklerinin (pekleşme üssü, akma gerilmesi vs.) etkilerini bilgisayar ortamında ABAQUS programı yardımıyla simüle etmişlerdir [33]. Araştırma sonucunda eşdeğer plastik şekil değiştirmenin kalıp köşelerinin dışında olduğu ve pekleşme üssü, akma gerilmesi ve malzemenin elastiklik modülü değiştikçe eşdeğer plastik şekil değiştirmenin değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca pekleşme üstelinin çok artmasının derin çekilen numunelerde kıvrışmaya sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Dolayısıyla yüksek akma gerilmesine ve yüksek pekleşme üsteline sahip

malzemelerde daha yüksek pot çemberi baskı kuvveti uygulamak gerektiğini ortaya koymuşlardır.

G. Özçelik yüksek lisans çalışmasında, 0,6 mm kalınlıktaki ERD 1314 (DIN EN 10327) kalite galvanize kaplanmış çelik sacdan dikdörtgen derin çekme ürünü için DYNAFORM sonlu elemanlar metodu simülasyonu çalışmıştır [34]. Bu çalışmada, 4 mm, 6 mm ve 8 mm ıstampa kavisi, 10 mm/s, 30 mm/s ve 50 mm/s derin çekme hızı değişkenlerinin en büyük kalınlık azalmasına ve hasarsız ürün yüksekliğine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada derin çekme hızı azaltılarak veya ıstampa radyüs değerleri artırılarak derin çekme yöntemiyle imal edilecek ürünlerden daha büyük yükseklik değerlerine sahip hasarsız ürünler elde edilebileceği belirlenmiştir. Ayrıca Özçelik, derin çekme hızı değerleri ile en büyük kalınlık azalması değerleri arasında doğrusal kabul edilebilecek bir ilişkinin var olduğunu ve doğrusallığın derin çekme hızı değerleri artışı ile en büyük kalınlık azalması değerleri artışı şeklinde olduğunu belirlemiştir.

Z. Zimniak, şekillendirme sınır gerilme diyagramlarının sonlu elemanlar metodunda kullanılabilirliğini araştırmıştır [35]. Çalışmada bilgisayar ortamında modellediği parçalarda oluşan gerilme dağılımını teorik şekillendirme sınır ve şekillendirme sınır gerilme diyagramları ile karşılaştırmıştır. Bu sayede kalıp ve deneme-yanılma yöntemini kullanmadan, zaman kaybı yaşamadan, düşük maliyetlerle prosesin ne şekilde sonuçlanacağını öngörebilmiştir.

J. J. Moverare ve arkadaşları, ön deforme edilmiş çift fazlı paslanmaz çeliklerin artık gerilme ve dislokasyon yapısından etkilenen anizotropik akma davranışındaki değişimi incelemişlerdir [36]. İnceleme sonucunda, ön gerilmeden dolayı hadde yönünde mikro gerilme artışı gözlemlenmiştir. Ayrıca %5.2 ön şekillendirme oranına kadar sacda herhangi bir hasar gözlemlenmemiştir.

K. Maji ve arkadaşları, kare şeklinde kesilmiş AISI 304 paslanmaz çelik sac levhalarında lazer şekillendirme sıcaklık gradyeni altında kubbe oluşumunu incelemişlerdir [37]. Deneylerde lazer gücünün, tarama hızının ve ışın çapının kubbe yüksekliğine etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda kubbe yüksekliğinin lazer gücü ile attığı, ışın çapı ile düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca tarama hızı kubbe yüksekliğinin başlangıçta arttığı ve daha sonra düştüğü gözlenmiştir.

K. Zaba ve arkadaşları, araçların egzoz sistemlerinde kullanılan kaynakla birleştirilmiş tüp parçalarda kullanılan alaşımlı ve az alaşımlı delikli çelik sacların üretim metotlarını incelemişlerdir [38]. İnceleme sonuçları delikli sacların, deformasyon oranı göz önüne alındığında, sacın herhangi bir hasara uğramadan şekil alabildiğini göstermiştir.

H. Ike, yüzeyinde elektron bombardımanı ve özel haddeleme yöntemleriyle mikro düzeyde küresel oyuklar (yaklaşık 100 μm çapında ve 10 ile 20 μm derinliğinde) oluşturduğu saclara şerit çekme testi uygulamıştır [39]. Çalışmaları sonucunda, düşük viskoziteli yağlayıcı kullanmasına rağmen yüzeydeki mikro oyukların sürtünmeyi azalttığını gözlemlemiştir. Bunu da mikro oyuklarda hapsolan yağlayıcının sürekli yağlama yapmasına bağlamıştır. Ayrıca derin çekme işlemi esnasında mikro oyukların hacmi ve kesit alanı azalmış buna rağmen herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.

Y. E. Alparslan tez çalışmasında, Al 1050 alüminyum alaşımından ortası delik sacların derin çekme kabiliyetini araştırmıştır [40]. Dört farklı kalınlıktaki numunelerin ortasındaki deliklerin derin çekme davranışına olan etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, farklı kalınlıktaki numunelerin yırtılmadan çekilebildiği maksimum delik çapı tespit edilmiştir.

2. PASLANMAZ ÇELİKLER

Alaşımsız ve az alaşımlı çelikler hijyenik ve korozyon etkilere karşı dayanıklı olmadıklarından, bu tür uygulamalar için genellikle paslanmaz çeliklerin kullanılması gerekir. Paslanmaz çelikler mükemmel korozyon dayanımları yanında, değişik mekanik özelliklere sahip türlerinin bulunması, düşük ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirliği, şekil verme kolaylığı, estetik görünüşleri gibi üstün özelliklere sahiptirler. Kullanımları giderek yaygınlaşan paslanmaz çeliklerin tüketimi, artık toplumlarda gelişmişlik düzeyinin bir göstergesi sayılmaktadır. Dünyada her yıl 20 milyon ton civarında paslanmaz çelik tüketilmektedir. Bunların büyük çoğunluğu yassı mamul biçimindedir. Daha az miktarlarda ise; çubuk, tel, boru, dövme parça ve döküm parça olarak kullanılmaktadır.

Paslanmaz çelikler sade karbonlu çeliklere oranla fiyat bakımından daha pahalıdır (yaklaşık 10 kat), ancak bakımlarının ucuz ve kolay olması, uzun ömürlü olmaları, tümüyle geri kazanılabilirliği, hijyenik ve çevre dostu bir malzeme olmaları çok büyük avantajlar sağlar. Dolayısıyla parçanın tüm ömrü dikkate alınarak yapılacak fiyat analizlerinde, tasarımlarda paslanmaz çelik kullanımının daha ekonomik olduğu görülür.

Paslanmaz çelikler, içeriğinde ağırlıkça en az %12 krom (Cr), karbon miktarı da en fazla %1,2 olan yüksek alaşımlı bir çelik ailesidir [1]. Bu çeliklerin yüksek korozyon dayanımını sağlayan unsur; yüzeye kuvvetle tutunmuş, yoğun, sünek, çok ince ve saydam bir krom-oksit tabakasının bulunmasıdır. Çok ince olan bu amorf tabaka sayesinde paslanmaz çelikler kimyasal reaksiyonlara karşı pasif davranarak indirgeyici olmayan ortamlarda korozyona karşı dayanım kazanırlar. Söz konusu oksit tabakası, oksijen bulunan ortamlarda oluşur ve dış etkilere (aşınma, kesme veya talaşlı imalat vb.) bozulsa dahi kendini onararak eski özelliklerine tekrar kavuşabilir.

2.1 Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri

a) Korozyon dayanımı

Bütün paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı yüksektir. Düşük alaşımlı türleri atmosferik korozyona, yüksek alaşımlı türleri ise asit, alkali çözeltileri ile klorür içeren ortamlara dahi dayanıklıdır. Bu çelikler yaygın olarak yüksek sıcaklık ve yüksek basınçlarda kullanılan basınçlı kap imalatında kullanılabilir [1].

b) Yüksek ve düşük sıcaklığa direnç

Bazı paslanmaz çelik türlerinde, yüksek sıcaklıklarda dahi tufalleşme ve malzemenin mekanik dayanımında önemli bir düşme izlenmez. Bazı türleri ise çok düşük sıcaklıklarda dahi gevrekleşme ve tokluklarını korurlar. Başka bir deyişle sünek-gevrek geçiş sıcaklıkları çok düşüktür.

c) İmalat (Şekil alma) kolaylığı

Paslanmaz çeliklerin hemen hepsi kesme, kaynak, sıcak ve soğuk şekillendirme ve talaşlı imalat işlemleri ile kolaylıkla biçimlendirilebilirler. Ayrıca paslanmaz çelikler, tek eksenli çekme yükü altında %50'ye varan kopma uzaması sergilerler. Bu oran düşük karbonlu çeliklerde %20 civarındadır [41]. Bu özelliği ile paslanmaz çelikler düşük karbonlu çeliklerden ve hatta alüminyumdan bile daha iyi şekil alabilirler.

d) Mekanik dayanım

Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu soğuk şekillendirme ile pekleşir ve dayanımın artması sayesinde tasarımlarda malzeme kalınlıkları azaltılarak parça ağırlığı ve fiyatta önemli düşüşler sağlanabilir. Martenzitik paslanmaz çelik türlerinde ise sertleştirme ısı işlemleri ile yüksek bir dayanım kazandırmak mümkündür.

e) Görünüm ve geometri

Paslanmaz çelikler boru, profil, lama ve sac gibi çok farklı form ve çeşitli yüzey kalitelerinde piyasadan temin edilebilirler. Sac yüzeylerin bakımı kolay olduğundan, görünümü ve kalitesi uzun süre korunabilir.

f) Hijyenik özellik

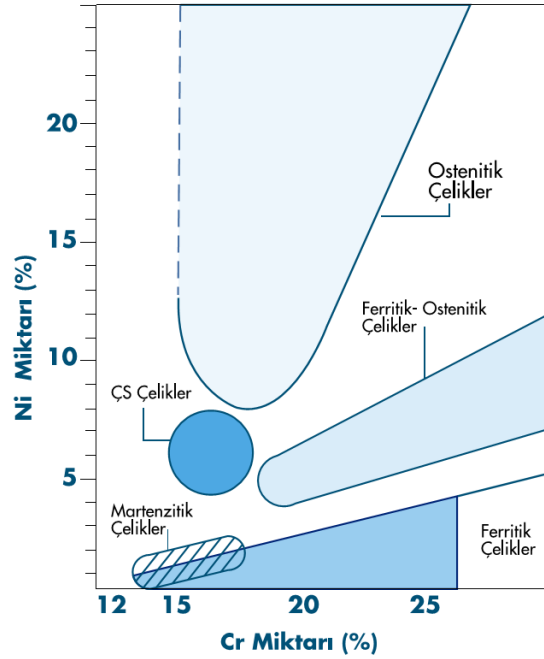
Paslanmaz çeliklerin kolay temizlenebilir olması, bu malzemelerin hastane, mutfak, gıda ve ilaç sanayinde yaygın olarak kullanılmasını sağlar.

g) Uzun ömür

Paslanmaz çelikler dayanıklı ve bakımı kolay malzemeler olduklarından, üretilen parçanın tüm kullanım ömrü dikkate alındığında ekonomik malzemelerdir.

2.2 Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çeliklerde kimyasal bileşim değiştirilerek farklı özelliklerde alaşımlar elde edilir. Krom miktarı yükseltilerek veya nikel ve molibden gibi alaşım elementleri katılarak korozyon dayanımı artırılabilir. Bunun dışında bakır, titanyum, alüminyum, silisyum, niyobyum, azot, kükürt ve selenyum gibi bazı elementlerle alaşımlama ile ilave olumlu etkiler sağlanabilir. Bu şekilde makine tasarımcıları ve imalatçıları değişik kullanımlar için en uygun paslanmaz çeliği seçme şansına sahip olurlar. Paslanmaz çeliklerde içyapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri, önem sırasına göre krom, nikel, molibden ve mangandır [1]. Bunlardan öncelikle krom ve nikel içyapının ferritik veya ostenitik olmasını belirler (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Değişik paslanmaz çelik türlerinde nikel ve krom miktarları (ÇS: Çökelme sertleşmesi uygulanabilen alaşımlar) [1].

Paslanmaz çelikler 5 ana grupta toplanırlar:

1. Ferritik paslanmaz çelikler
2. Ostenitik paslanmaz çelikler

3. Ferritik-Ostenitik (Dubleks) paslanmaz elikler
4. Martenzitik paslanmaz çelikler
5. Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen alaşımlar

Bu gruplandırma malzemelerin içyapısına göre yapılmıştır. Bu gruplar içinde en yaygın olarak kullanılanlar ostenitik ve ferritik paslanmaz çelikler olup, bunların kullanımları tüm paslanmaz çelikler içinde %95'e ulaşır.

2.2.1 Ferritik paslanmaz elikler

Bunlar düşük karbonlu ve ağırlıkça %12 - 18 krom içeren paslanmaz çeliklerdir.

Başlıca Özellikleri:

- Orta ile iyi derecede olan korozyon dayanımı, krom miktarının artması ile iyileşir.
- Isıl işlemle dayanım artırılmaz ve sadece tavllanmış durumda kullanılır.
- Manyetikler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür.
- Bu elikler hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapılı ve kayma düzlemleri sayısı daha az olduğu için ostenitik çelikler kadar kolay şekillendirilemezler.

Bazı Kullanım Alanları:

Mutfak gereçleri, dekoratif uygulamalar, otomobil şasi parçaları, egzoz elemanları, içme suyu ve sıcak su tankları, korojenik tanklar.

2.2.2 Ostenitik paslanmaz elikler

Paslanmaz eliğin kimyasal içeriğinde yeterince nikel bulunursa, içyapısı oda sıcaklığında dahi ostenitik olur. Ostenitik eliklerin içerisinde ağırlıkça %18 krom ve %8 nikel elementi bulunur.

Ostenitik paslanmaz çelikler, biçimlendirme, mekanik özellikler ve korozyon dayanımı bakımından çok uygun bir kombinasyon sunarlar. Süneklikleri, toklukları ve şekil alma kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir. Manyetik olmayan bu çeliklere, ostenitik içyapıları dönüşüm göstermediği için normalleştirme veya sertleştirme ısıl işlemleri uygulanamaz, mekanik dayanımları ancak soğuk şekillendirme ile arttırılabilir.

Toplam paslanmaz çelik üretimi içinde ostenitik çeliklerin payı % 70'tir ve aralarında en çok kullanılan 304 kalitedir [1].

Başlıca Özellikleri:

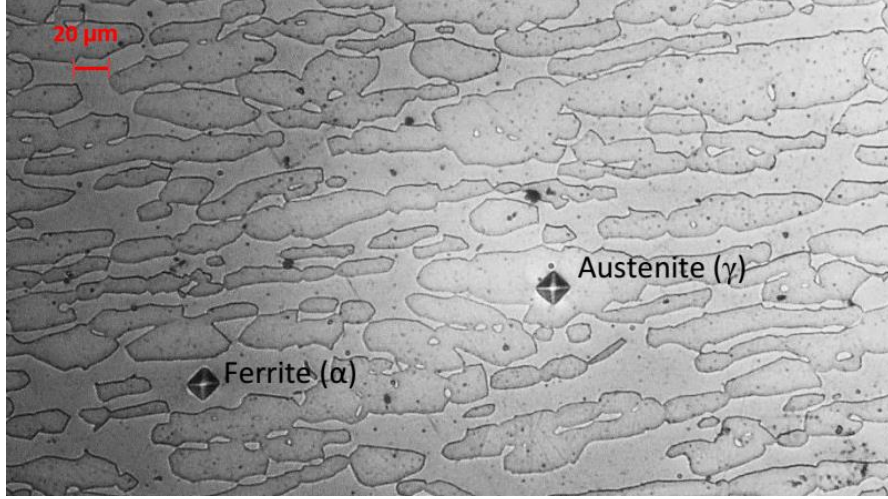
- Mükemmel korozyon dayanımına sahiptirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri mükemmeldir.
- Sünek olduklarından kolay şekillendirilebilirler.
- Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır.
- Yüksek sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler.
- Düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri mükemmeldir.
- Manyetik değildirler (tavlanmış halde).
- Dayanımları sadece pekleşme ile arttırılabilir.

Bazı Kullanım Alanları:

Makina ve imalat sanayinde çeşitli uygulamalar, asansörler, bina ve dış cephe kaplamaları, mimari uygulamalar, gıda işleme ekipmanları, mutfak gereçleri, kimya tesisleri ve ekipmanları, bilgisayar klavye yayları, mutfak evyeleri.

2.2.3 Dupleks (Ferritik-Ostenitik) paslanmaz çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler, içyapısında aynı anda ostenitik ve ferritik fazlar bulunduran çift fazlı paslanmaz çelik saclardır. Çoğunlukla %50 Ferrit ve %50 Ostenitten oluşan bir içyapıları vardır. Hem ostenitik hem de ferritik paslanmaz çeliklerin iyi özelliklerini taşırlar. Yüksek krom, azot ve sıklıkla molibden içeriğinden dolayı, bu çelikler bölgesel korozyona iyi direnç gösterirler. Dupleks mikro yapı gerilmeli korozyon çatlağına yüksek mukavemet ve direnç gösterir. Ayrıca dupleks paslanmaz çeliklerin kaynak edilebilirlikleri de iyidir. Şekil 2.2'de dupleks paslanmaz çeliğe ait bir iç yapı görülmektedir. Çizelge 2.1'de ise bu iç yapıdaki fazların mikro sertlik değerleri verilmiştir.



Şekil 2.2. Dupleks paslanmaz çelikteki çift fazlı mikroyapı [41].

Çizelge 2.1. İçyapıdaki fazların mikro sertlikleri [41].

İç Yapı	Sertlik
Ostenit	200HV0.05
Ferrit	330HV0.05

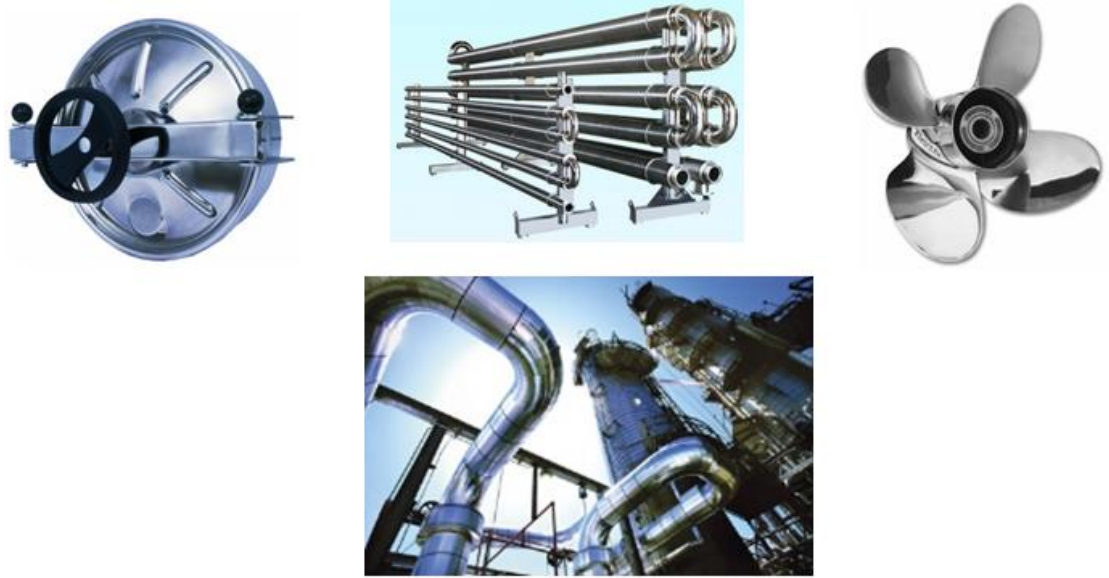
Bu tez çalışmasında, OUTOKUMPU (İsveç) firmasından tedarik edilen 0.5 mm kalınlığında dupleks paslanmaz çelik sac kullanılmıştır. OUTOKUMPU (İsveç) firması sade alaşımlı LDX 2101’ den süper çift fazlı 2507 ve 4501’ e kadar dupleks paslanmaz çelik yassı mamuller yapmaktadır.

2.2.3.1 Kullanım alanları

Dupleks paslanmaz çelikler birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır (Şekil 2.3). Bunlar;

- Posa ve kağıt endüstrisi
- Tuz arıtma tesisleri
- Baca gazı temizlemesinde
- Kargo tankerleri ve kimyasal tankların borulama sistemleri
- Deniz suyuna maruz makine ve mekanizmalar
- Açık deniz platformlarında yangın ve patlayıcılara karşı koruma duvarları
- Köprülerde
- Yapısal dizayn bileşenlerinde
- Depolama tanklarında
- Basınçlı kaplarda

- Isı değiştiricilerinde
- Su ısıtıcılarında
- Rotor, uskur ve millerde [1].



şekil 2.3. Dupleks paslanmaz çeliğin kullanım alanları [42-45].

2.2.3.2 Standart ve adlandırma

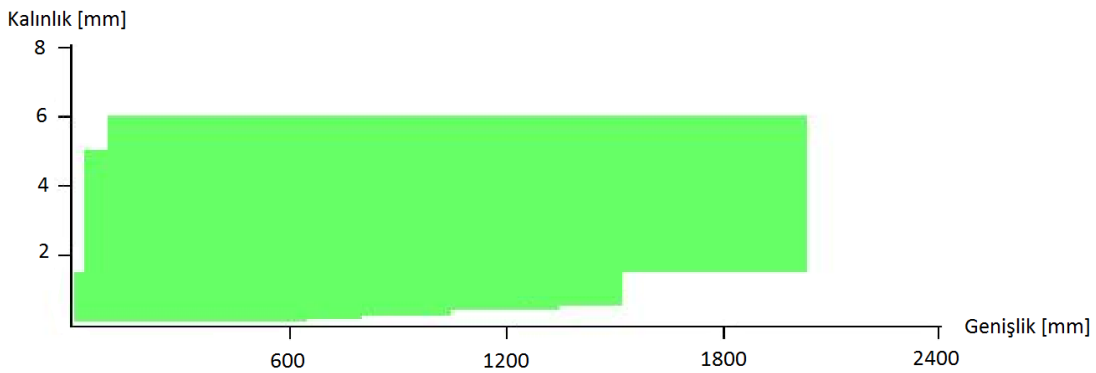
Outokumpu, birçok uluslararası ve ulusal standarda göre üretim ve sertifikasyon yapmaktadır. Üretim ilgili standartlardan sürekli farklı sınıflarda onay alarak devam etmektedir. Outokumpu 2205 (EN 1.4462) iki farklı Amerikan elik standardına tekabül etmektedir; UNS S31803 ve UNS S32205. İkinci standart korozyon direncini ve mukavemetini optimize etmek için daha yakın toleranslı bazı alaşım elementlerinin bulunduğu çeliktir. Aşağıda bazı standartlar ve bu standartlara göre kullandığımız çeliğin gösterimi verilmektedir (izelge 2.2).

Çizelge 2.2. Kullanılan çeliğin çeşitli standartlarda gösterimi [46].

Standart	Gösterim
AD 2000-Mbl W0 PMA EN 10028-7, PED 97/23/EC	1.4462
ASME SA-240M Code Sect. II. Part A	UNS S31803; UNS S32205
ASTM A240	UNS S31803; UNS S32205
Doc. No.: SA-7532-01	UNS S31803
EN 10028-7, PED 97/23/EC	1.4462
EN 10028-7:2007/PED 97/23/EC/Impact test (ISO-V) -40 °C	1.4462
EN 10088-2	1.4462
EN 10088-4	1.4462
JIS G4304: 2005/Amendment 1:2010	SUS 329J3L
Technical Agreement (H1707A-11A) Rev. 1	UNS S31803

2.2.3.3 Ürün çeşitleri ve ölçüleri

Soğuk haddelenmiş dubleks paslanmaz çelik ürünlerin ölçüleri Şekil 2.4’ te verilmiştir [46].



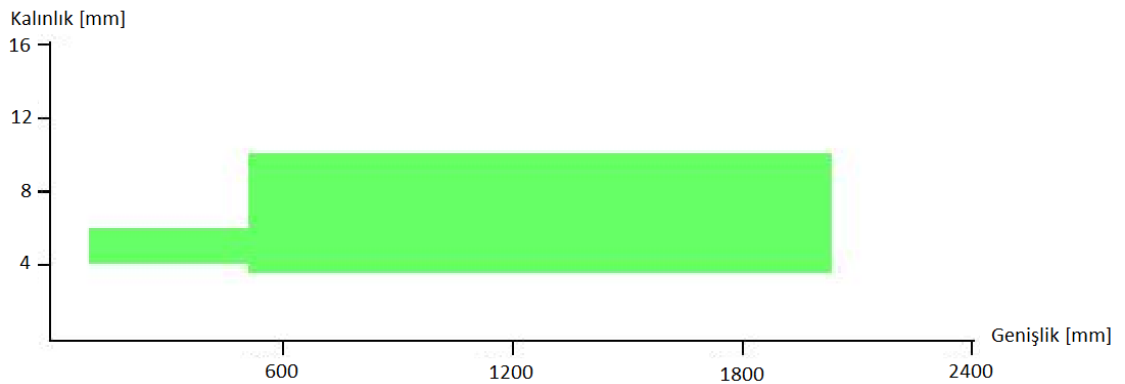
Şekil 2.4. Soğuk haddelenmiş dubleks paslanmaz çelik üretimi [46].

Çizelge 2.3’ te EN 1.4462 soğuk çekilmiş dubleks paslanmaz çelik sacların çeşitleri ve ölçüleri verilmiştir.

Çizelge 2.3. Dupleks paslanmaz çeliklerin kalınlık ve genişlikleri [46].

Son İşlem		Rulo Sarılmış		Plaka	
		Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)
2B	Soğuk çekilmiş, ısıtıl işlem görmüş, DKP, ince paso	0.50-5.00	30-1524	0.6-6.0	300-2032
2BB	Parlak-DKP	0.60-3.50	30-1250	0.6-3.5	600-1250
2C	Soğuk çekilmiş, ısıtıl işlem görmüş	0.60-5.00	30-1250	-	-
2D	Soğuk çekilmiş, ısıtıl işlem görmüş, DKP	0.60-5.00	30-1250	0.6-5.0	600-1250
2E	Soğuk çekilmiş, ısıtıl işlem görmüş, mek. DKP	0.50-6.00	30-2032	0.5-6.0	300-2032
2G	Taşlanmış	0.60-3.00	30-1250	0.6-3.0	600-1250
2J	Zımparalanmış veya mat parlatılmış	0.60-3.00	30-1250	0.6-3.0	600-1250
2K	İnce perdahlanmış	-	-	0.5-0.59	400-1350
2M	Desenli	0.40-3.00	30-1350	-	-
2R	Soğuk çekilmiş, parlak tavlı	0.05-1.50	3-1050	0.1-3.0	5-1250

Sürekli sıcak haddelenmiş dupleks paslanmaz çelik ürünlerin ölçüleri Şekil 2.5’ te verilmiştir.



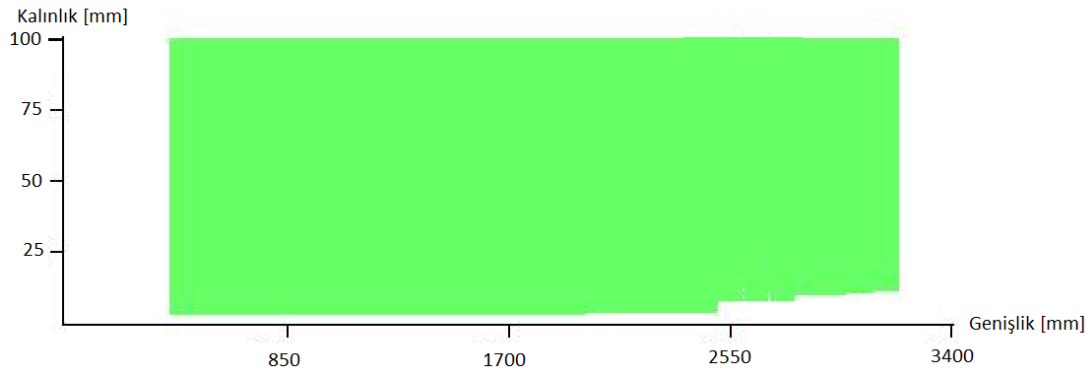
Şekil 2.5. Sürekli sıcak haddelenmiş dupleks paslanmaz çelik ürünlerin ölçüleri [46].

Çizelge 2.4’te sürekli sıcak haddelenmiş EN 1.4462 dupleks paslanmaz çelik sacların çeşitleri ve ölçüleri verilmiştir.

Çizelge 2.4. Sıcak haddelenmiş dubleks paslanmaz çeliklerin çeşitleri ve ölçüleri [46].

Son işlem		Rulo Sarılmış		Plaka	
		Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)
1C	1C	4.0-8.5	750-1350	4.0-8.5	750-1350
1D	Sıcak haddelenmiş, ısıtıl işlem görmüş, DKP	3.5-10.0	96-2032	3.5-10.0	96-2032
1U	1U siyah sıcak haddelenmiş	4.0-8.5	750-1350	4.0-8.5	750-1350

Dörtlü tabaka dubleks paslanmaz çelik ürünlerin ölçüleri Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6. Dörtlü tabaka dubleks paslanmaz çelik ürünlerin ölçüleri [46].

Çizelge 2.5’ te dörtlü tabak EN 1.4462 dubleks paslanmaz çelik sacların çeşitleri ve ölçüleri verilmiştir.

Çizelge 2.5. Dörtlü tabaka dubleks paslanmaz çelik sacların çeşitleri ve ölçüleri [46].

Son işlem		Rulo sarılmış		Plaka	
		Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)
1C	1C	-	-	2.00-100.00	400-3200
1D	Sıcak haddelenmiş, ısıtıl işlem görmüş, DKP	-	-	2.00-100.00	400-3200

2.2.3.4 Kimyasal bileşimleri

Bu sınıf sacların tipik kimyasal bileşimleri ve farklı standartlardaki bileşim limitleri Çizelge 2.6’ da verilmiştir.

Çizelge 2.6. EN 1.4462 dubleks paslanmaz çelik sacların kimyasal içeriği [46].

Tip	Standart	%C	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%N
Normal	2205	0.02		22.0	5.7	3.1	0.17
ASMEII A SA-240	UNS S31803	≤0.03	≤2.0	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20
ASMEII A SA-240	UNS S32205	≤0.03	≤2.0	22.0-23.0	4.5-6.5	3.0-3.5	0.14-0.20
ASTM A240	UNS S31803	≤0.03	≤2.0	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20
ASTM A240	UNS S32205	≤0.03	≤2.0	22.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.14-0.20
BILFAL SA-7532-01	UNS S31803	≤0.03	≤2.0	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.8-0.20
EN 10028-7	EN 1.4462	≤0.03	≤2.0	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.10-0.22
EN 10028-7 KV -40C	EN 1.4462	≤0.03	≤2.0	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.10-0.22
EN 10028-7 PMA	EN 1.4462	≤0.03	≤2.0	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.10-0.22
EN 10088-2	EN 1.4462	≤0.03	≤2.0	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.10-0.22
EN 10088-4	EN 1.4462	≤0.03	≤2.0	21.0-23.0	4.5-6.5	2.7-3.5	0.10-0.22
JIS G4304 : 2005	SUS 329J3L	≤0.03	≤2.0	21.0-24.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20
TA(H1707A-11A)	UNS S31803	≤0.03	≤2.0	21.0-23.0	4.5-6.5	2.7-3.5	0.14-0.20

2.2.3.5 Mekanik özellikleri

Dubleks paslanmaz çelikler, ostenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek mukavemete sahiptirler. Yüksek mukavemetli dubleks paslanmaz çelik sınıfları seçilirse, sac kalınlığı veya parça ölçüleri düşürülerek daha düşük maliyetler elde edilebilir. Ürün formları arasında izin verilebilir tasarım değerleri değişebilir. İlgili özelliklere ait uygun değerler Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7. EN 1.4462 dubleks paslanmaz çelik sacların mekanik özellikleri [46].

		R _{p0.2} MPa	R _{p0.1} MPa	R _m MPa	A ₅ %	Rockwell	HB
Ürün tipi: C							
Tipik (Kalınlık 1 mm)	2205	690	740	880	47	-	-
ASME II A SA-240	UNS S31803	≥450	-	≥620	-	-	≤293
ASME II A SA-240	UNS S32205	≥450	-	≥655	-	-	≤293
ASTM A240	UNS S31803	≥450	-	≥620	-	-	≤293
ASTM A240	UNS S32205	≥450	-	≥655	-	-	≤293
EN 10028-7	EN 1.4462	≥500	-	700-950	≥20	-	-
EN 10028-7 PMA	EN 1.4462	≥500	-	700-950	≥20	-	-

Çizelge 2.7 (Devam). Çeşitli standartlardaki EN 1.4462 dubleks paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri [46].

		R_{p0.2} MPa	R_{p0.1} MPa	R_m MPa	A₅ %	Rockwell	HB
EN 10088-2	EN 1.4462	≥500	-	700-950	≥20	-	-
EN 10088-4	EN 1.4462	≥500	-	700-950	≥20	-	-
Ürün tipi: H							
Tipik (Kalınlık 4 mm)	2205	630	725	840	30	-	250
ASME II A SA-240	UNS S31803	≥450	-	≥620	-	-	≤293
ASME II A SA-240	UNS S32205	≥450	-	≥655	-	-	≤293
ASTM A240	UNS S31803	≥450	-	≥620	-	-	≤293
ASTM A240	UNS S32205	≥450	-	≥655	≥25	-	≤293
EN 10028-7	EN 1.4462	≥460	-	700-950	≥25	-	-
EN 10028-7 PMA	EN 1.4462	≥460	-	700-950	≥25	-	-
EN 10088-2	EN 1.4462	≥480	-	700-950	≥25	-	-
EN 10088-4	EN 1.4462	≥480	-	700-950	≥25	-	-
JIS G4304: 2005	SUS 329J3L	≥450	-	≥620	-	-	-
Ürün tipi: P							
Tipik (Kalınlık 15 mm)	2205	510	-	750	35	-	230
ASME II A SA-240	UNS S31803	≥450	-	≥620	-	≤31HRC	≤293
ASME II A SA-240	UNS S32205	≥450	-	≥655	-	≤31HRC	≤293
ASTM A240	UNS S31803	≥450	-	≥620	-	≤31HRC	≤293
ASTM A240	UNS S32205	≥450	-	≥655	-	≤31HRC	≤293
BILFAL SA-7532-01	UNS S31803	≥450	-	≥620	-	≤31HRC	≤293
EN 10028-7	EN 1.4462	≥460	-	640-840	≥25	-	-
EN 10028-7 KV -40C	EN 1.4462	≥460	-	640-840	≥25	-	-
EN 10028-7 PMA	EN 1.4462	≥460	-	640-840	≥25	-	-
EN 10088-2	EN 1.4462	≥460	-	640-840	≥25	-	-
EN 10088-4	EN 1.4462	≥460	-	640-840	≥25	-	-
JIS G4304: 2005	SUS 329J3L	≥450	-	≥620	-	≤32HRB	-
TA(H1707A-11A)	UNS S31803	≥460	-	≥620	≥25	-	≤293
Ürün tipi: R							
Tipik	2205	510	-	750	35	-	-

Çizelge 2.8'de kıyaslama amacıyla standart çeliklerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.8. Standart çeliklerin mekanik özellikleri [46].

		R_{p0.2} MPa	R_{p0.1} MPa	R_m MPa	A₅ %	Rockwell	HB
Ürün tipi: C							
Tipik (Kalınlık 1 mm)	904L	340	375	655	55	-	-
Ürün tipi: P							
Tipik (Kalınlık 15 mm)	904L	260	285	600	50	-	155
Ürün tipi: R							
Tipik	904L	260	300	600	50	-	-

2.2.3.6 Fiziksel özellikleri

Oda sıcaklığındaki fiziksel özellikler Çizelge 2.9’da verilmiştir. Veriler EN 10088 ve EN 10095’ e göredir.

Çizelge 2.9. Paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığında fiziksel özellikleri [46].

Sınıf	Yoğunluk g/cm ³	Elastisite modülü GPa	100°C de termal genleşme 10 ⁻⁶ /°C	Termal iletkenlik W/m°C	Termal kapasite J/kg°C	Elektriksel direnc μΩm	Manyetiklik
2205	7.8	200	13	15	500	0.8	Evet
904L	8.0	195	15.8	12	500	1.0	Hayır

2.2.3.7 Korozyon direnci

Genel korozyon paslanmaz çelikte, üzerindeki pasif tabakanın tamamen ya da büyük bir kısmının kaybolması sonucu oluşur. Bu genellikle asit veya sıcak alkalin çözeltileri içerisinde gerçekleşir. Alaşım durumunun genel korozyon direncine etkileri değişik çevrelerde değişebilir; krom paslanmaz çelikteki pasif tabakanın sağlanması için önemliyen, nikel depassivize çeliğin korozyon oranını düşürmeye yardım eder, molibden pasifliği artırır (yüksek oksidasyonlu ortamların dışında, örneğin sıcak konsantre nitrik asit gibi), bakır ise seyreltik sülfirik asit gibi asit oluşumu üzerinde pozitif etkilidir. Sabit sıcaklık ve kimyasal bileşimli ortamlarda genel korozyon sabit bir oranda oluşur. Bu oran genellikle birim zamanda kaybolan kalınlık miktarı (mm/yıl) olarak tanımlanır. Paslanmaz çelikler genellikle korozyon oranı 0.1 mm/yıl aşmayan ortamlarda genel korozyona dirençli olarak kabul edilirler.

2.2.3.8 Pitting ve çatlak korozyonu

Klorür iyonları nötr veya asidik ortamlarda bölgesel olarak pasif tabakanın bozulmasına olanak sağlarlar. Sonuç olarak, pitting ve çatlak korozyonu, kısa zamanda korozyon hasarlarına sebep olarak yüksek hızda ilerleyebilir. Parçada, korozyon atakları küçük ve belki de korozyon ürünleri tarafından kaplanmış veya gizli bir çatlak olabilir ve bunlar parçada delinme veya sızıntı meydana gelene kadar keşfedilemez. Pitting korozyonuna karşı direnci temel olarak paslanmaz çelikteki krom, molibden, azot içeriğine göre belli olur. Bu genellikle Denklem 2.1 ile hesaplanan malzemenin pitting direnç eşdeğeri ile gösterilir.

$$PRE = \%Cr + 3.3 \cdot \%Mo + 16 \cdot \%N \quad (2.1)$$

PRE değeri farklı malzemelerin kabaca kıyaslanmasını sağlar. Ancak daha güvenilir bir araç olarak malzemenin kritik pitting sıcaklığı (Critical Pitting Temperature) dikkate alınabilir [46].

2.2.3.9 Üretim

Paslanmaz çeliklere uygulanan tüm şekillendirme prosesleri dubleks paslanmaz çeliklere de uygulanabilir. Yüksek dayanım gücü ostenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında, seçilen şekillendirme tekniğine bağlı olarak geri yayılma eğilimi gibi bazı farklı davranışlar gösterebilir. Bu nokta herhangi yüksek mukavemetli bir çeliğin şekillendirilmesinde önemlidir. Eğer şekillendirme prosesi belli değilse, dubleks sınıfı için en uygun yöntemi seçmek yerinde olacaktır. Ayrıca yüksek dayanıklılık, pekleşme hızı ve uzama arasındaki mükemmel etkileşim karmaşık şekilli uygulamalar için daha düşük ağırlık ve maliyet sunmaktadır. Yüksek mukavemetin etkisi şekillendirme tekniğine göre değişir. Genellikle şekillendirme kuvveti ostenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerden daha yüksek olacaktır. Bu etki genellikle, paslanmaz çelik daha düşük ölçülerde seçileceğinden, beklenen artış miktarından daha düşük olacaktır. Dubleks paslanmaz çelik aynı zamanda takım malzemesi ve yağlama için oldukça talep edilmektedir [46].

2.2.3.10 Kaynak

Dubleks elikler genellikle iyi bir kaynak edilebilirliğe sahiptirler ve ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılan birçok teknik bu çelikler içinde kullanılabilir.

- Korumalı metal ark kaynağı,
- Tungsten ark kaynağı (TIG),
- Metal ark kaynağı (MIG),
- Eritken ekirdekli ark kaynağı
- Plazma ark kaynağı
- Tozaltı arc kaynağı
- Lazer kaynağı
- Direnç kaynağı
- Yüksek frekans kaynağı

Günümüzde en çok kullanılan dubleks paslanmaz elik türü 2205 (EN 1.4462) dir. En iyi sonuçlar tasarlanmış dolgu malzemeleri ile sağlanır. 2205 sınıf paslanmaz elik, yüksek verimli kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilir. Yüksek kalınlıklarda, 3 kJ/mm' ye kadar bir ısı girişi ile genellikle kaynak özellikleri bozulmadan kullanılabilir [46].

2.2.4 Martenzitik paslanmaz elikler

Karbon miktarı % 0,1 den fazla olan çelikler yüksek sıcaklıklarda ostenitik içyapıya sahiptirler. Ostenitleme sıcaklığı çeliğin türüne göre 950-1050°C arasındadır. Bu sıcaklıklarda tutulan çeliğe su verilirse martenzitik bir içyapı elde edilir. Bu şekilde elde edilen yüksek sertlik ve mekanik dayanım, karbon yüzdesi ile birlikte artar.

rn tipine bağlı olarak martenzitik çelikler tavlanmış veya ıslah edilmiş durumda pazara sunulur. Tavlanmış olarak satın alınan ürünler biçim verildikten sonra ıslah işlemine (su verme + temperleme) tabi tutulur. Temperleme sıcaklığı değiştirilerek değişik özellik kombinasyonları elde edilebilir. En iyi korozyon dayanımını elde etmek için tavsiye edilen ısıl işlem sıcaklıklarına uyulması çok önemlidir.

Başlıca Özellikleri:

- Orta derecede korozyon dayanımına sahiptirler.
- Isıl işlem uygulanabilir, böylece yüksek dayanım ve sertlikler elde edilebilir.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür.
- Manyetikler.

Bazı Kullanım Alanları:

Bıçaklar, ameliyat aletleri, miller, pimler.

2.2.5 Çökelme sertleştirme (yaşlandırma) uygulanabilir paslanmaz çelikler

Bunların ana içyapıları ostenitik, yarı-ostenitik veya martenzitik olabilir. Çökelme olayını gerçekleştirebilmek için bazen önce soğuk şekil vermek gerekebilir. Çökelti oluşumu için alüminyum, titanyum, niyobyum ve bakır elementleri ile alaşımlama yapılır. Bu sayede mukavemetleri 1700 MPa' a kadar çıkan paslanmaz çelikler elde edilebilir. Piyasada çözme tavı görmüş halde satılır; Malzeme bu durumda yumuşak olup, imalat işlemleri uygulanabilir ve daha sonra tek kademeli bir düşük sıcaklık yaşlandırması ile sertleştirilebilir.

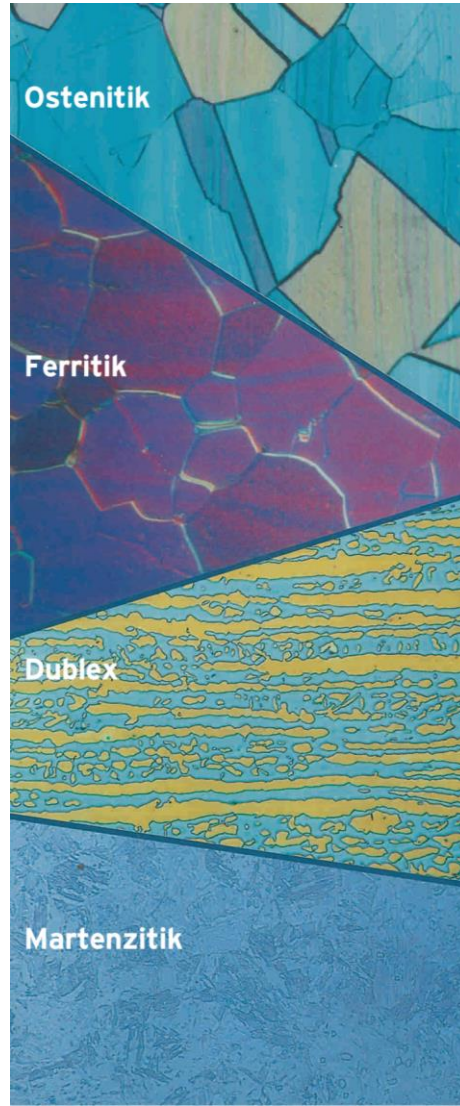
Başlıca Özellikleri:

- Orta ila iyi derecede korozyon dayanımı vardır.
- Çok yüksek mekanik dayanım gösterirler.
- Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir.
- Manyetikler.

Bazı Kullanım Alanları:

Pompa ve vana şaftları.

Bu bölümde değinilen dört farklı paslanmaz çelik türüne ait mikroyapı görüntüleri Şekil 2.7'de karşılaştırma amacıyla verilmiştir. Bu çeliklerin mikroyapılarındaki farklılıklar rahatlıkla görülebilir.



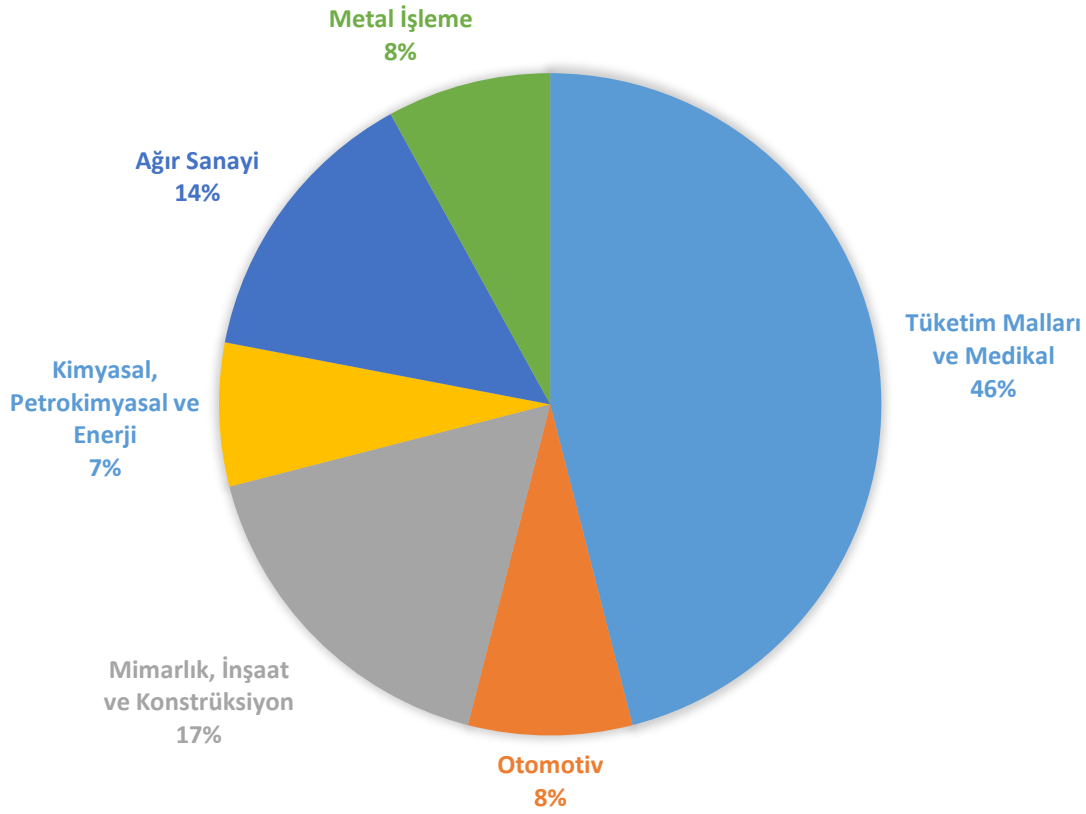
Şekil 2.7. Bazı paslanmaz çelik türlerinin içyapıları [1].

2.3 Genel Kullanım Alanları

Paslanmaz çeliğin çok değişik kalite ve özelliklerde temin edilebiliyor olması, bunların kullanımını da sürekli olarak yaygınlaştırmaktadır. Günümüzde artık ziynet eşyasından büyük sanayi tesislerine kadar uzanan geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Günlük hayatımızda kullandığımız pek çok ürün bugün paslanmaz çelikten yapılmaktadır. Paslanmaz çelik hemen her gün kullandığımız bir mutfak aleti olarak karşımıza çıktığı gibi, gezinti yaptığımız bir meydana beğenimizi kazanan bir sanat eseri şeklinde de kendini gösterebilir. Büyük bir kimya tesisinin hemen her yerinde gördüğümüz bu malzeme güzel bir gökdelenin duvarlarını kaplayan dekoratif bir malzeme olarak da kullanılabilir. Keyif duyduğumuz bir alışveriş merkezinde pek çok detayda dikkatimizi çeken paslanmaz çelik, gerçekte hiçbir zaman görmediğimiz

yerlerde bizim konforumuzu ve güvenliğimizi sağlayan endüstriyel ürünlerde de yaygın olarak kullanılabilir [1].

Paslanmaz çeliğin nerelerde hangi oranda kullanıldığı, ülkelerin ekonomisi hakkında doğrudan bilgi veren bir göstere niteliğini de taşımaktadır. Kullanım payının bireysel tüketim ürünlerinde fazla olması genellikle zayıf ekonomilere sahip ülkelerde görülür. Enerji, makina imalat ve ulaşım sektörlerinde kullanımın artması ekonomik yapının kuvvetli olduğunu gösterir. Şekil 2.8, 2013 yılında Dünya paslanmaz çelik tüketiminin oransal dağılımı hakkında bir fikir vermektedir [47].



Şekil 2.8. 2013 yılı paslanmaz çelik tüketimi [47].

3. METALLERE PLASTİK ŞEKİL VERME ESASLARI

3.1 Plastik Şekil Verme Yöntemleri

Bir katı cismin şeklini başka bir şekle dönüştürmek amacıyla uygulanan ve bu işlem sırasında cismin malzemesinde kütle ve bileşim değişikliğine yol açmayan kırılma ve ayrılma olmadan yapılan üretime plastik şekil verme yöntemleri denir [1].

Bu yöntemlerle üretilen parçaların en önemli uygulama alanları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Otomotiv, takım tezgahları gibi çeşitli endüstriler için üretilen sayısız parçalar (örneğin otomobil kaportaları, krank milleri).
- Bağlama elemanları (vida, somun, cıvata, perçin...).
- El takımları (kerpeten, çekiç, tornavida...) ve tıp aletleri (örneğin pansuman makası).
- Her çeşit metal kutular.
- Tünel, maden ve taş ocaklarında kullanılan yapı elemanları (tavan ve duvar elemanları, maden direkleri).
- İnşaat sektöründe, örneğin kapı ve pencerelerde kullanılan donatılar [48].

Metallere şekil verme yöntemleri mamul şekline göre sınıflandırılabilir. Buna göre:

a) Silindirik, çubuk ve kütük metaller

- Dövme yöntemi
- Haddeleme
- Ekstrüzyon
- Tel çekme

b) Yassı mamuller: Plaka ve saclar

- Derin çekme
- Sıvama
- Hidro şekillendirme (Şişirme)

3.1.1 Dövmeye yöntemi

Dövmeye işlemi darbe veya basınç altında kontrollü bir plastik deformasyon sağlanarak metale istenen şeklini verme, tane boyutunu küçültme ve mekanik özelliklerini iyileştirme amacıyla uygulanan bir plastik şekil verme yöntemi olarak tanımlanabilir. Kapalı kaptaki sıcak dövmeye yöntemi ile üretilmiş çeşitli parçalar Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Sıcak dövülerek imal edilmiş bazı metalik parçalar [49-51].

3.1.2 Haddelendirme

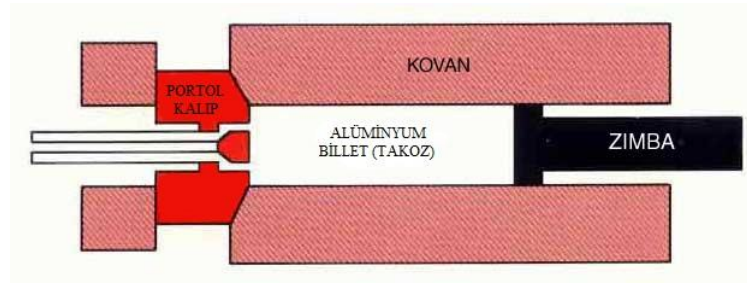
Malzemeleri eksenleri etrafında dönen iki silindir (merdane) arasından geçirerek plastik şekil verme işlemine haddelendirme denir. Haddelendirme, üretim hızı ve sürekliliği ile işlemin ve ürünün kontrolünün kolay oluşu nedenleriyle en çok kullanılan şekil verme yöntemidir. Burada merdaneler aynı hızla ve birbirine zıt yönde dönmektedir. Merdaneler arasındaki açıklık malzemenin giriş kalınlığından daha az olduğu için haddelenen malzemenin çıkış kalınlığında bir azalma meydana gelmektedir. Malzemenin merdaneler arasından her geçişine paso adı verilir. Haddelendirmede uygulanan tek kuvvet merdaneler tarafından sağlanan radyal yöndeki basınç olmaktadır [52]. Şekil 3.2’de sıcak haddelendirme yapılan yassı mamuller görülmektedir.



Şekil 3.2. Haddelendirme yöntemiyle üretilmiş yassı mamul [53].

3.1.3 Ekstrüzyon

Çubuk presleme olarak da bilinen bu işlem, ısıtılmış bir metal bloğun bir pres silindiri (kovan) içerisinde büyük bir kuvvetle sıkıştırılıp matris olarak adlandırılan bir kalıptan geçirilerek istenen şeklin verilmesidir (Şekil 3.3). Ekstrüzyon hafif metal endüstrisinin en önemli ve en çok kullanılan plastik şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemle genellikle düz veya karışık içi dolu veya boş olarak çeşitli profiller (20 m uzunluğuna kadar) elde edilirler. Buna örnek olarak çubuk ve boru imalatını gösterebiliriz [52].



Şekil 3.3. Ekstrüzyon yöntemi ve şematik gösterimi [54].

3.1.4 Tel çekme

Tel çekmede metal daralan bir çekme halkası (matris) içerisinde dolu ve daire kesitli olarak çekilmektedir. Bu yöntemle kaymalı çekmede denmektedir. Soğuk olarak yapılan bu işlemde iyi bir yağlama gerekmektedir. Yağlamadan önce malzeme yüzeyinin mekanik ve kimyasal olarak bir temizleme işlemine tabi tutulması gerekir. Burada kullanılan yağlama maddesinden sürtünme katsayısını düşürücü yönde etki etmesi, sıcaklığa ve basınca dayanıklı olması, parlak iş parçası yüzeyleri sağlaması ve kolay yağlama özelliklerine sahip olması aranmaktadır [52]. Şekil 3.4'te tel çekme yöntemi ve çekme halkaları gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Tel çekme işlemi (solda) ve çekme halkaları (sağda) [55, 56].

3.1.5 Derin çekme

Derin çekme işlemi yassı bir metalik levhadan 3 boyutlu derin bir kap elde etme işlemi olarak tanımlanır. Parçanın derinliği çapına göre büyük olduğunda derin çekme ismini alır [52]. Şekil 3.5’te derin çekme yöntemi ile üretilmiş bazı ürünler görülmektedir.



Şekil 3.5. Derin çekme yöntemiyle üretilmiş bazı ürünler [57, 58].

3.1.6 Sıvama

Dairesel simetriye sahip derin parçalar, metalik düz bir levhanın veya önceden derin çekme işlemine tabi tutulan bir kabın, üretilecek parça şeklindeki dönen bir kalıp üzerine bastırılması yoluyla elde edilebilir. Bu şekilde sac biçimlendirme işlemine sıvama denir [52]. Şekil 3.6’da sıvama yöntemi ve bu yöntemle üretilmiş bazı ürünler görülmektedir.



Şekil 3.6. Sıvama işlemi (solda) ve üretilen bazı parçalar (sağda) [59, 60].

3.1.7 Hidro şekillendirme (Basıncı akışkan ile şekillendirme)

Literatürde akışkan şekillendirme, esnek kalıp şekillendirme, lastik zar şekillendirme olarak da adlandırılan hidrolik şekillendirme işlemi, sac veya tüp metal malzemenin, üst veya alt kalıbın görevini alan akışkan bir ortam vasıtasıyla (su, viskoz, polimerik malzeme vs.) kapalı bir kaptaki şekillendirilmesi olarak tanımlanır. Akışkanın sıkıştırılmaz özelliğinden dolayı şekillendirme sırasında oluşan basınç etkisiyle malzemeler şekillendirilmektedir [61]. Şekil 3.7’de hidro-şekillendirme yöntemi ile üretilmiş çaydanlık görülmektedir.



Şekil 3.7. Hidro şekillendirme ile üretilmiş bir çaydanlık [62].

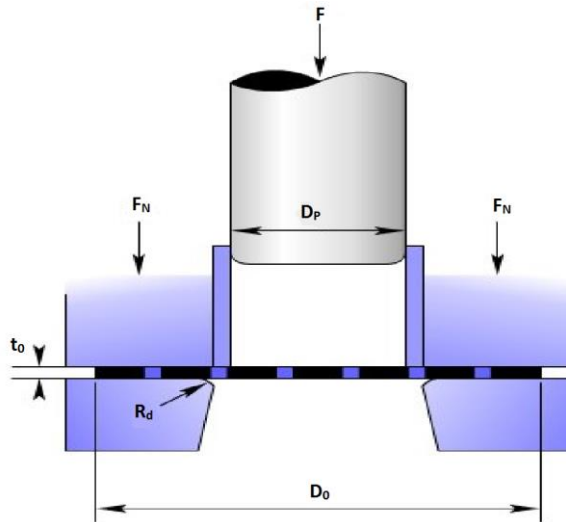
3.2 Sacların Şekil Alma Kabiliyetlerinin Belirlenmesi

Şekillendirilebilirlik, sacın hasara uğramadan istenen şekli alma yeteneği olarak tanımlanır. Bu özelliği saptamak amacıyla çeşitli deneyler uygulanır. Sacların şekil alma kabiliyetleri temel olarak 2 ana grupta belirlenebilir.

3.2.1 Sacları yapılan testler

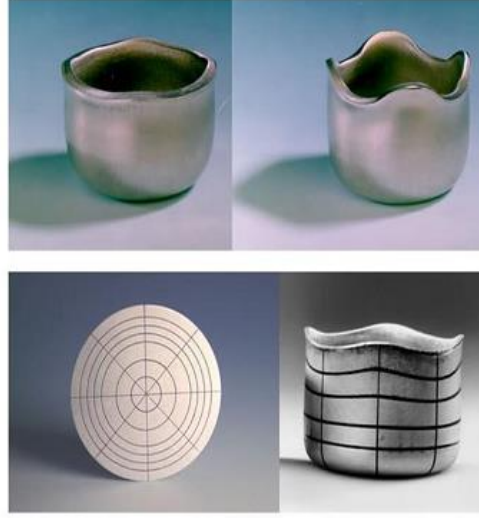
3.2.1.1 Swift kupa testi

Sacın şekillenmesi derin çekmeye benzediği için “Derin çekme oranı sınırı” tayini için swift cup testi yapılır. Çapları gittikçe artan yuvarlak dairesel parçalar derin çekme işlemine tabi tutulur (Şekil 3.8). Çatlama durumuna gelen maksimum çap tayin edilir. Bu değer zımba çapına bölünür. Böylece “derin çekme oran sınırı” $\rightarrow \beta_o = D_{o\max} / d_o$ bulunur [63].



Şekil 3.8. Şematik olarak Swift kupa testi [63].

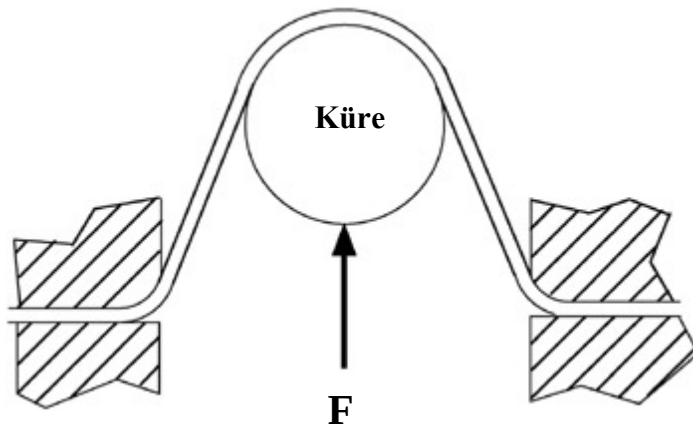
Bu test yardımıyla, plastik anizotropiden dolayı kenar boyunca cidar kalınlığı değişimi olan “kulak tipi çıkıntı” özelliği ölçülür. Bu duruma olan eğilim “Z” ile değerlendirilir. Aşağıda bir şeritin zayıf olanı ile güçlü olanının kulak tipi çıkıntı etkisi görülmektedir (Şekil 3.9).



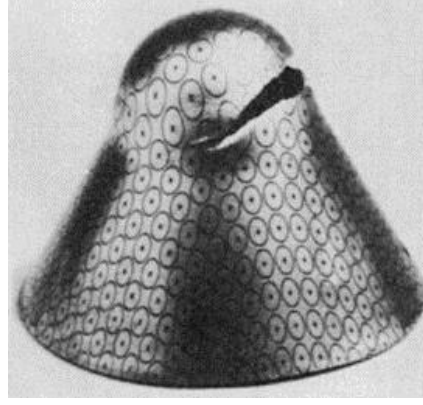
Şekil 3.9. Kulak tipi çıkıntı örnekleri [64].

3.2.1.2 Fukui konik kupa testi

Fukui konik kupa testi bir küre üzerinde hem gerdirme hem de çekme işlemini içerir. Kalıp çapı küreden çok daha büyük olduğu için çekme işlemi esnasında konik bir yapı ortaya çıkar (Şekil 3.10). Ayrıca kalıplar arasında kalan sacın çekilmesine izin verilir [65]. Şekil 3.11’de Fukui konik kupa testi yapılmış bir sac numune görülmektedir.



Şekil 3.10. Fukui şematik deney düzeneği [65].



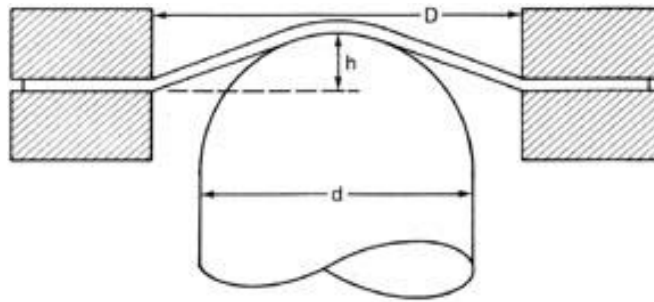
Şekil 3.11. Fukui testinde hasara uğramış sac parça [65].

3.2.1.3 Olsen testi

Olsen testi sacların şekil alma kabiliyetinin belirlendiği ve şekillendirme sınır diyagramlarının çizildiği bir testtir (Şekil 3.12). Bu testte 0.875 inç' lik küresel zımba ile alt kalıp (1 inç) ve tutucu plaka arasında bulunan numune yırtılıncaya kadar çekilir [65].

3.2.1.4 Erichsen Testi

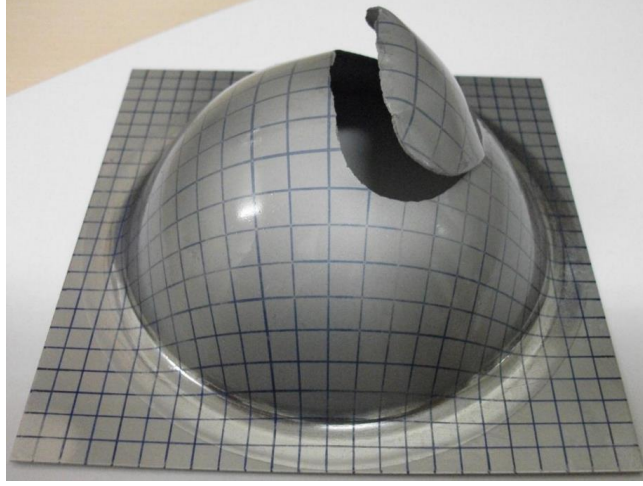
Olsen testi ile birebir aynı olan bu testteki tek fark kullanılan deney düzeneklerin ölçüleridir. Erichsen testinde küresel zımba çapı 20 mm, alt kalıp çapı ise 27 mm' dir [65].



Şekil 3.12. Olsen ve Erichsen testi şematik gösterimleri [65].

3.2.1.5 Bulge testi

Bulge testi prensip olarak Erichsen testi ile aynıdır. Ancak bu testte küresel bir zımba kuvveti yerine hidrolik basınç kullanılır. Kalıplar arasına yerleştirilen saca bir hidrolik bir akışkan ile yırtılıncaya kadar basınç uygulanır. Şekil 3.13'te Bulge testi ile yırtılma hasarı oluşturulmuş bir sac numune görülmektedir.

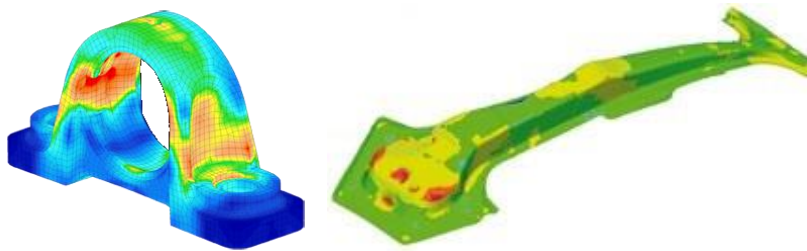


Şekil 3.13. Bulge testi ile hasara uğratılmış numune [66].

3.2.2 Simülasyon metotları

Simülasyon (benzetim) gerçek hayattaki sistemlerin bir benzerinin farklı bir ortamda kurularak düşük maliyet ile sistemin nasıl çalıştığının anlaşılması yolunda yapılan faaliyetlerdir. Günümüzde simülasyon çalışmalarının büyük çoğunluğu bilgisayarlarda yapılmaktadır[67]. Sacların şekil alma kabiliyetlerinin belirlenmesinde birçok deneysel yöntemin yanında sonlu elemanlar metodu da kullanılmaktadır. Deneysel yöntemler zaman kaybı, deneylerin zorluğu ve tutarsızlığı, kalıp ve numune maliyeti gibi birçok bakımdan dezavantajlıdır. Simülasyon metotlarında ise numune ve deney düzeneği hazırlama gibi zaman kaybı olmamakta, işlem anlık olarak takip edilebilmektedir. Ayrıca simülasyon, komponentlerin tek başına veya birlikte davranışlarını görsel ve sistematik olarak analiz edilebilmesini sağlar.

Simülasyon metotlarında kullanılmakta olan birçok mühendislik programları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları (ABAQUS, Ansys, MAGMASOFT, COMSOL gibi) bir çok analizi yapabilmekte iken bazıları da sadece derin çekme gibi pres işlerini simüle edebilmektedir (Pam-Stamp, DD3LT, Stamp Engineer). Şekil 3.14’de çeşitli programlarda yapılmış simülasyonlar görülmektedir.

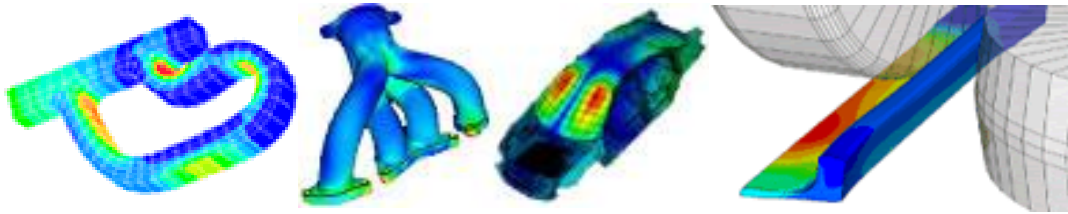


Şekil 3.14. Modellenerek simüle edilmiş bazı makina parçaları [68, 69].

3.2.2.1 ABAQUS sonlu eleman analiz programı

ABAQUS programı sonlu eleman analizi ve bilgisayar destekli tasarım için 1978 yılında geliştirilmiş bir yazılımdır. ABAQUS ile karmaşık bir montajın davranışı incelenebilir, kavramsal veya gerçek tasarımı canlandırılabilir, karmaşık üretim süreçlerinin benzetimini yapılabilir (Şekil 3.15). ABAQUS bu modelleme ve çözümlemeleri hızlı ve güvenilir yapabilmek için gerekli olan modelleme ve çözüm ortamını sunmaktadır.

Tasarımda, temas ve problemlerin lineer olmaması gibi etkilerin anlaşılması ürün geliştirme sürecinin hayati aşamalarından biridir. Üretim sürecindeki %5'lik küçük bir iyileştirmenin dahi olumlu mali geri dönüşü çok büyük olmaktadır. Fakat bunu gerçekleştirebilmek için güçlü bir araca ve teknik desteğe ihtiyacınız vardır. ABAQUS üretim sürecindeki iyileştirmeyi sağlamak açısından kullanışlı bir programdır [5].



Şekil 3.15. ABAQUS programında yapılmış modelleme ve analiz örnekleri [5].

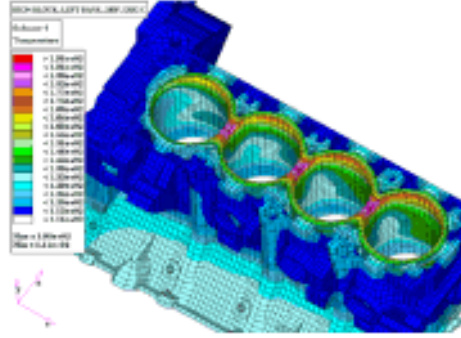
3.2.2.2 ABAQUS modülleri

Sonlu elemanlar analizleri için ABAQUS, diğer sonlu elemanlar (SE) yazılımlarına göre daha yüksek performanslı, güvenilir, kaliteli, daha gerçekçi SE modelleri oluşturmaya ve çözmeye imkan veren bir SE yazılımı olarak bilinir. ABAQUS' un dört ana çekirdek yazılımı vardır: ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit, ABAQUS/CFD ve ABAQUS/CAE. Bazı ihtiyaç duyulan çok özel birimler (modüller) haricinde yeni sürümler için geliştirilen bütün yenilikler standart bir özellik olarak kullanıcılarına sunulmaktadır.

a) ABAQUS/Standart

Statik, dinamik, ısı transferi, akustik ve bunların bağlaşımlı (çift-etkili) çözümlemeleri için geliştirilmiş, geniş ve gelişmiş eleman, malzeme ve temas modelleme kabiliyetine sahip güçlü ve güvenilir bir kapalı (Implicit) sonlu elemanlar çözücüsüdür (Şekil 3.16).

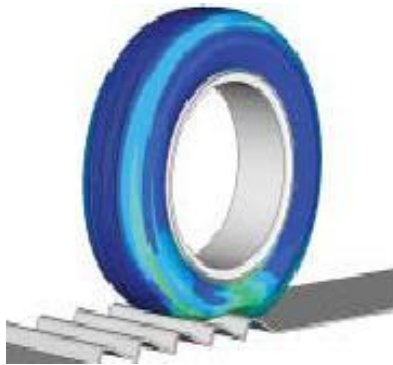
ABAQUS/Standard ayrıca plastik enjeksiyon kalıp çözümlemeleri için ilgili yazılımlarla sonuç alışverişi yapabilmektedir.



Şekil 3.16. ABAQUS/Standart ile yapılmış motor bloğu tasarımı [5].

b) ABAQUS/Explicit

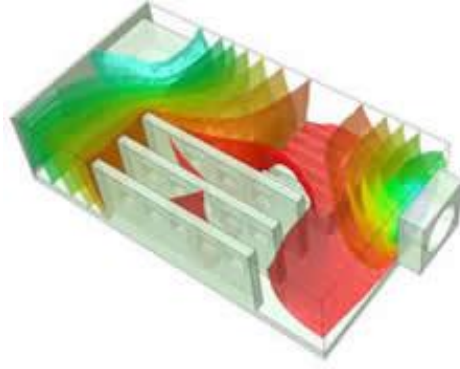
Zamana bağlı dinamik ve sanki-statik problemlerin modellenmesi ve çözülmesi için geliştirilmiş açık (Explicit) bir SE çözücüsüdür. Düşürme testi benzetimleri, çarpışma (kaza) ve ürün benzetimleri gibi yüksek derecede doğrusalsızlığın bulunduğu devinim problemlerinin çözümü için uygundur (Şekil 3.17). Mevcut yazılımlar arasındaki en kararlı ve güvenilir, tam ve yarı otomatik temas modelleme kabiliyetine sahiptir. Gelişmiş malzeme modellerine ve yüksek paralel işlem başarısına sahiptir.



Şekil 3.17. ABAQUS/Explicit ile yapılmış tekerlek-yol temas çifti [5].

c) ABAQUS/CFD

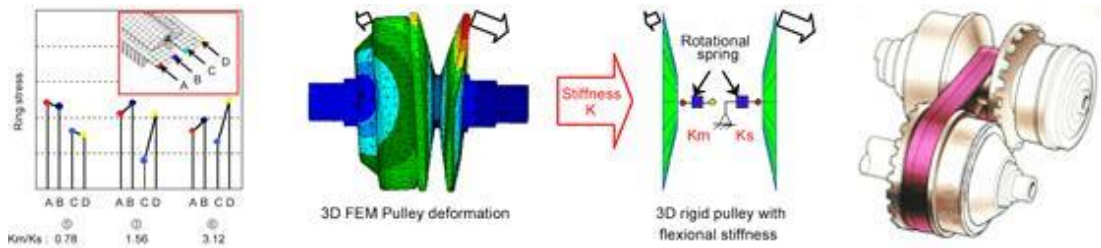
İleri seviye hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) çözücüsüdür. ABAQUS/CAE ile entegre çalışmakta olup ön/son (Pre&Post) özellikleri ABAQUS/CAE tarafından desteklenmektedir. ABAQUS/CFD ile doğrusal olmayan ısı-akış ve yapısal akış problemleri gibi birçok uygulamanın etkin ve gerçekçi bir biçimde benzetimi mümkündür (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. ABAQUS/CFD ile yapılmış bir çözümleme [5].

d) ABAQUS/CAE

Yukarıda bahsedilen ABAQUS çözümleri için tümünden bir kullanıcı ara yüzü ortamı sağlar (Şekil 3.19). Günümüz kullanıcı ve bilgisayar ihtiyaçlarına yönelik olarak geliştirilmiş bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Diğer çağdaş CAD yazılımlarında olduğu gibi unsur tabanlı değişkenli modelleme (parametrik) kabiliyetine sahiptir. Doğrudan ve dolaylı yollardan dışarıdan geometri okunabilmekte ve sadeleştirilebilmektedir (defeaturing). ABAQUS çözüm sonuçlarının değerlendirilmesi veya son işlemi ABAQUS/CAE ile yapılmaktadır. Çok büyük çözüm dosyaları (>3Gb), pahalı grafik kartlarına ihtiyaç duyulmadan çok hızlı bir şekilde okunabilmekte, model rahatlıkla döndürülebilmektedir.



Şekil 3.19. ABAQUS/CAE ile yapılmış bir çözümleme [5].

ABAQUS ayrıca mekanizmaların kinematik ve dinamik çözümlemelerini yapılabilme imkanı da sunmaktadır. ABAQUS' un sahip olduğu mafsallı eleman kütüphanesi ve çözüm yöntemiyle, mekanizmaların kinematik ve dinamik analizlerini, hem rijit hem de esnek olarak modelleyip gerilme çözümlemeleri yapılabilmektedir. Bu özelliğin kapalı (Implicit) ve açık (Explicit) sonlu elemanlar modelleri ile birlikte kullanılmasıyla iş makineleri mekanizmalarının çalıştırılması ve mekanizmaların çalışması sırasında her bir uzuv üzerindeki gerilme dağılımının hesaplanması, araç dinamiğinin sanal modellemesi, dayanıklılık, gürültü ve titreşim (NVH) analizlerinin

tek bir yazılım ve tek bir model ile diğer yazılımlara göre çok daha gerçekçi ve doğru yapılabilmektedir.

Bütün bu analizler, aynı yazılım, aynı grafik arayüzü ve aynı model kullanılarak yapıldığından, mühendislerin farklı yazılımları öğrenmesine veya farklı yazılımlar için farklı mühendisler atanmasına, farklı yazılımlar arasında model ve sonuç aktarma problemleriyle karşılaşılmasına, daha az proje zamanına ve daha az bilgisayara gerek duyulurken, düşük kullanım maliyeti sağlamaktadır.

Tek bir SE yazılımı içerisinde, aynı elemanları ve malzeme modellerini kullanarak kapalı (Implicit) ve açık (Explicit) yöntemle çözümleme yapmak mümkün olduğundan;

- Doğrusal ve doğrusal olmayan (non-linear) mukavemet çözümlmeleri
- Doğrusal ve doğrusal olmayan (non-linear) dinamik çözümlmeleri
- Doğal frekans çözümlmeleri
- Doğrusal ve doğrusal olmayan burkulma (buckling) çözümlmeleri
- İleri seviye dinamik cevap (dynamic response, frequency&transient response, random response, shock response) çözümlmeleri
- Geostatik çözümlmeler
- Isı transferi çözümlmeleri
- Elektro-mekanik
- Isıl-mekanik
- Mekanizmaların benzetimleri ve uzuvlardaki gerilme değişimlerinin hesabı
- Derin çekme ve geri yaylanma çözümlmeleri
- Ürün şekillendirme ve haddeme çözümlmeleri
- SAPAT (Su Altı PATlama) ve şok çözümlmeleri
- Araç çarpışma ve devrilme benzetimleri

vb. çözümlmeler ABAQUS ile yapılabilmektedir.

ABAQUS büyük ölçekli bir sonlu elemanlar (SE) yazılımıdır. ABAQUS ile 9 haneli (milyar büyüklüğünde eleman ve düğüm içeren) SE modellerini kararlı ve hızlı bir şekilde çözümlenebilir.

ABAQUS' u avantajlı yapan bazı güçlü yönleri:

- İleri malzeme modelleri
- Geniş ve gelişmiş eleman kütüphanesi
- Güçlü değişken temas çözümleme yeteneği
- İç ve dış akustik yayılım
- Conta modelleme yeteneği
- Kauçuk malzeme hesaplamaları
- SAPAT (Su Altı PATlama) çözümleme kabiliyeti
- Büyük ölçekli SE çözümleri
- Endüstrisi standardı güçlü ve güvenilir algoritmalar
- Hızlı, kararlı, güvenilir doğrudan ve dolaylı çözümler
- Yüksek çoklu işlem başarımı (performansı)
- Kapalı (Implicit) ve Açık (Explicit) çözümler arasındaki sonuç
- Uygulamaya dönük özelleştirilebilme
- Mekanizmaların esnek kinematik ve dinamik analizleri
- Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözümleri
- Unsur tabanlı parametrik modelleme

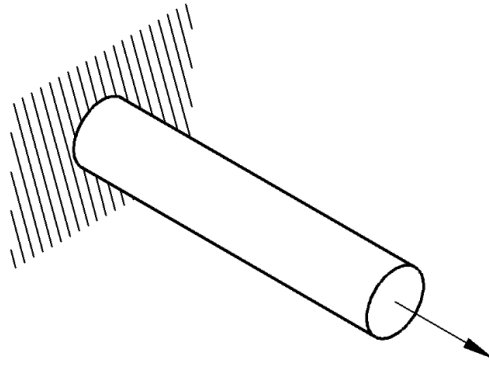
3.2.2.3 ABAQUS Sonlu Elemanlar ile Çözüm Yöntemi

Herhangi bir sonlu eleman (finite element) simülasyonunun ilk adımı, gerçek yapı geometrisini sonlu elemanları kullanarak ayrıştırmaktır. Ayrıştırılan her sonlu eleman fiziksel yapının ayrı bir bölümünü temsil eder. Bu sonlu elemanlar birbirleri ile ortak paylaşılan düğüm noktaları (node) ile birleşirler. Bu sonlu elemanlar ile düğüm noktalarının toplamı ağ (mesh) olarak adlandırılır. Birim uzunluk, alan veya ağ

içerisindeki eleman sayısı ağ (mesh) yoğunluğuna karşılık gelir. Bir gerilme analizi sırasında düğüm noktalarının yer değiştirmeleri ABAQUS tarafından hesaplanan temel değişkenlerdir. Boğum notalarındaki yer değiştirmeler bilindiğinde, her bir sonlu elemandaki gerilmeler ve şekil değiştirmeler kolayca hesaplanabilir [70].

a) Boğum noktalarındaki yer değiştirmelerin kapalı (Implicit) metot kullanarak tespit edilmesi

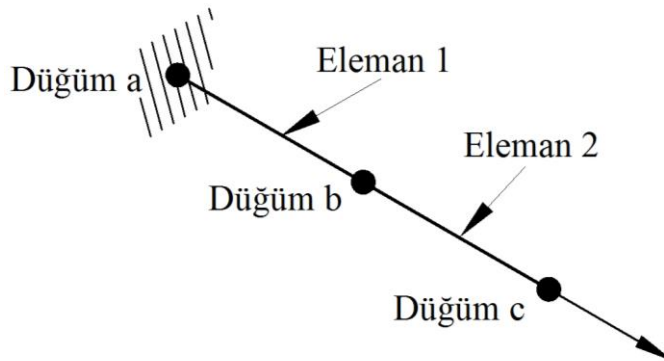
Bir tarafından sabitlenmiş ve diğer tarafından yüklenmiş bir kirişe ait basit bir örnek Şekil 3.20’de verilmiştir [70].



Şekil 3.20. Bir ucu ankastre kiriş problemi [70].

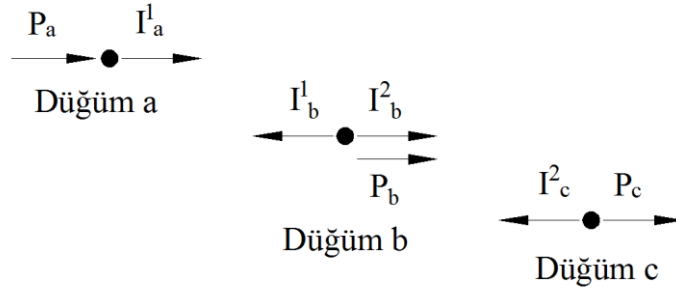
Analizin amacı kirişin serbest ucundaki yer değiştirmeyi, kirişteki gerilmeyi ve kirişin sabitlenmiş ucundaki tepki kuvvetlerini bulmaktır.

Bu çerçevede Şekil 3.20’de görülen çubuk iki parça kiriş eleman (truss element) olarak modellenenecektir. ABAQUS programında kiriş eleman sadece eksenel yükleri taşımaktadır. Ayırıştırılan model düğüm noktaları ve eleman adları ile birlikte Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Kiriş probleminin ayrıştırılmış modeli [70].

Modeldeki her bir düğüme ait serbest cisim diyagramı Şekil 3.22’de verilmiştir. Genel olarak her düğüm noktası modele uygulanan ve bu düğüme bağlı olan elemanda gerilmeye sebep olan bir dış yük (P) ve iç yük (I) taşır. Statik dengede olan bir model için her düğüm noktasına etki eden net kuvvet sıfır olmalıdır; yani iç ve dış kuvvetler birbiri ile dengeli olmalıdır. Düğüm a için bu denge denklemleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.22. Her düğüm noktası için serbest cisim diyagramı [70].

Çubuğun uzunluğundaki değişimin küçük olduğu göz önünde tutularak, eleman 1’deki şekil değiştirme

$$\varepsilon_{11} = \frac{u^b - u^a}{L} \quad (3.1)$$

olarak belirlenir. Burada u^a ve u^b , düğüm a ve düğüm b noktalarındaki yer değiştirme değeri, L ise elemanın ilk uzunluğudur.

Malzemenin elastik olduğu düşünülürse, çubuktaki gerilme, şekil değiştirme ile elastisite modülünün (E) çarpımına eşit olacaktır.

$$\sigma_{11} = E \cdot \varepsilon_{11} \quad (3.2)$$

Son düğüme etki eden eksenel kuvvet çubuktaki gerilme ile çubuğun kesit alanının (A) çarpımına eşittir. Böylelikle içsel kuvvet, malzeme özellikleri ve yer değiştirme arasında bir ilişki tanımlanabilir:

$$I_a^1 = \sigma_{11} \cdot A = E \cdot \varepsilon_{11} \cdot A = \frac{E \cdot A}{L} (u^b - u^a) \quad (3.3)$$

Buna göre düğüm a’deki denge,

$$P_a + \frac{E \cdot A}{L}(u^b - u^a) = 0 \quad (3.4)$$

şeklinde yazılabilir.

Düğüm b' deki dengede bu noktadaki her iki eleman tarafından etkiyen içsel kuvvetler de dikkate alınarak yazılmalıdır. Eleman 1 tarafından uygulanan içsel kuvvet bu sefer ters yönlüdür ve negatif alınması gerekir. Buna göre denklem,

$$P_b - \frac{E \cdot A}{L}(u^b - u^a) + \frac{E \cdot A}{L}(u^c - u^b) = 0 \quad (3.5)$$

şeklinde olur.

Düğüm c için denge deklemini ise,

$$P_c - \frac{E \cdot A}{L}(u^c - u^b) = 0 \quad (3.6)$$

şeklinde olur.

Kapalı metotta tüm düğüm noktalarındaki yer değiştirmelerin bulunması için denge denklemlerinin aynı anda çözülmesi gereklidir. Bu gereksinim, en iyi şekilde, matris tekniği ile çözülebilir. Bu yüzden içsel ve dışsal kuvvet girdileri matris şeklinde yazılır. Eğer iki elemanında özellikleri ve ölçüleri aynı ise denge denklemleri aşağıdaki gibi basitleştirilebilir:

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} - \left(\frac{E \cdot A}{L} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u^a \\ u^b \\ u^c \end{Bmatrix} = 0 \quad (3.7)$$

Genellikle, rijitlik matrisi (EA/L) elemandan elemana değişir; buna göre eleman rijitlikleri modeldeki iki eleman için K₁ ve K₂ şeklinde yazılır. Burada, dışsal P kuvveti ile içsel I kuvvetinin bulunduğu denge denklemleri ile çözüme ulaşılmaya çalışılmaktadır. Yakınsama ve doğrusal olmayan referansla bu denklem;

$$\{P\} - \{I\} = 0 \quad (3.8)$$

şeklinde yazılır.

İki elemanın tamamı için üç düğümlü yapıda eleman rijitlikleri yerine yazılacak olursa

$$\begin{Bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{Bmatrix} - \left(\frac{E \cdot A}{L} \right) \cdot \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u^a \\ u^b \\ u^c \end{Bmatrix} = 0 \quad (3.9)$$

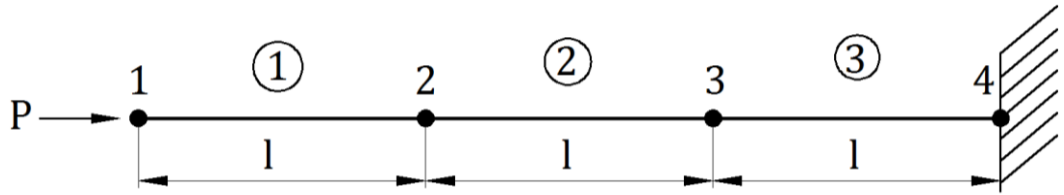
eşitliği elde edilmiş olur.

Kapalı metotta, ABAQUS/Standart' ta olduğu gibi, bu üç denklem sistemi üç bilinmeyen u^b , u^c ve P_a 'yı bulmak için çözülür (u^a problemde 0,0 olarak tanımlanmıştır.). Yer değişiklikleri bilindiğinde, geri dönüp bu değerleri giriş elemanda gerilme ve şekil değiştirmelerin hesaplanması için kullanabiliriz. Kapalı sonlu elemanlar metodu, her çözüm arttırımının sonunda denklem sistemlerinin çözülmesini gerektirir.

Kapalı metodun aksine açık (explicit) metotta, ABAQUS/ Explicit gibi, aynı anda denklem sistemlerinin çözülmesini veya küresel rijitlik matrisinin hesaplanmasını gerektirmez. Bunun yerine, çözüm bir sonraki artışa kinematik olarak ilerletilir. Açık çözüm dinamiklerinin sonlu elemanlar metodu bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

b) Gerilme dalgası yayılımının gösterilmesi (Explicit)

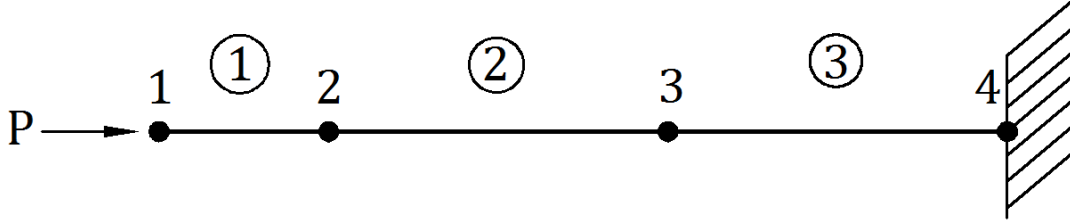
Bu bölümde, açık çözüm dinamikleri metodu kullanılarak, kuvvetlerin bir modelde nasıl ilerlediği anlatılmaya çalışılacaktır. Bu görsel örnekte, üç eleman ile modellenmiş bir çubuk boyunca gerilme dalgası ilerlemesi incelenecektir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Serbest ucundan tekil yük (P) ile yüklenmiş çubuğun başlangıç durumu [70].

İlk zaman arttırımında, çubuğa uygulanan tekil yükün (P) sonucu olarak, düğüm 1 bir ivmeye ($\ddot{u}_1$) sahiptir. Bu ivme düğüm 1 in bir hıza ($\dot{u}_1$) sahip olmasına neden olur. Bu hızda eleman 1' de şekil değiştirme hızına ($\dot{\epsilon}_{el1}$) sebep olur. Eleman 1' deki şekil değiştirme artışı ($\Delta\epsilon_{el1}$), şekil değiştirme hızının zamana göre integrali alınarak bulunur. Toplam şekil değiştirme (ϵ_{el1}) ise, başlangıçtaki şekil değiştirme (ϵ_0) ile şekil değiştirme artışının ortalamasıdır. Burada ilk şekil değiştirme değeri

sıfırdır. Elemanın şekil değişimi hesaplandığında, elemandaki gerilme (σ_{el1}) malzemesi belli modele uygulanarak bulunabilir. Doğrusal elastik malzeme için gerilme basit olarak elastisite modülü (E) ile toplam şekil değiştirmenin çarpımıdır. Bu süreç Şekil 3.24'te gösterilmiştir. Düğüm 2 ve 3, ilk arttırmada hiç kuvvet etki etmediğinden dolayı hareket etmezler.



Şekil 3.24. Serbest ucundan tekil yük ile yüklenmiş çubuğun 1 arttırım sonundaki durumu [70].

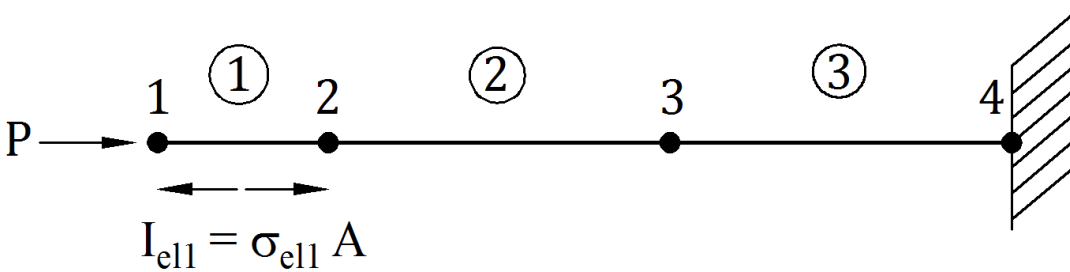
1 arttırım sonunda takip edilen işlem sırası:

$$\ddot{u}_1 = \frac{P}{M_1} \rightarrow \dot{u}_1 = \int \ddot{u}_1 dt \rightarrow \quad (3.10)$$

$$\dot{\varepsilon}_{el1} = \frac{-\dot{u}_1}{l} \rightarrow \Delta \varepsilon_{el1} = \int \dot{\varepsilon}_{el1} dt \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{el1} = \varepsilon_0 + \Delta \varepsilon_{el1} \rightarrow \sigma_{el1} = E \cdot \varepsilon_{el1} \quad (3.12)$$

İkinci arttırmada, eleman 1'deki gerilme, eleman 1 ile ilişkili düğümlere içsel kuvvet uygulamaktadır (Şekil 3.25). Bu eleman gerilmeleri düğüm 1 ve 2'deki dinamik eşitlikler ile hesaplanır.



Şekil 3.25. İkinci arttırım başlangıcında çubuğun durumu [70].

Düğüm 1 ve 2' deki dinamik eşitlikler aşağıdaki şekilde hesaplanır.

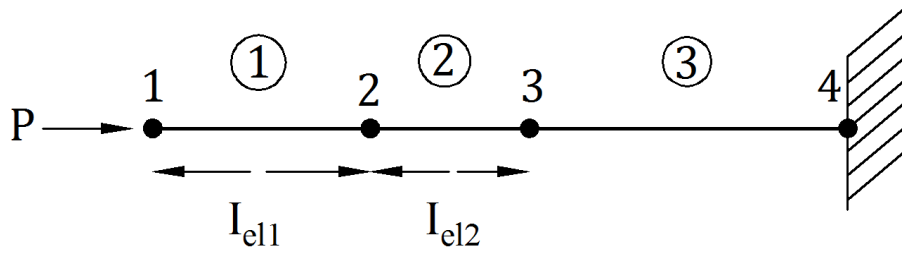
$$\ddot{u}_1 = \frac{P - I_{el1}}{M_1} \rightarrow \dot{u}_1 = \dot{u}_1^{old} + \int \ddot{u}_1 dt \quad (3.13)$$

$$\ddot{u}_2 = \frac{I_{el1}}{M_2} \rightarrow \dot{u}_2 = \int \ddot{u}_2 dt \quad (3.14)$$

$$\dot{\varepsilon}_{el1} = \frac{\dot{u}_2 - \dot{u}_1}{l} \rightarrow \Delta \varepsilon_{el1} = \int \dot{\varepsilon}_{el1} dt \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_{el1} = \varepsilon_{el1}^{old} + \Delta \varepsilon_{el1} \rightarrow \sigma_{el1} = E \cdot \varepsilon_{el1} \quad (3.16)$$

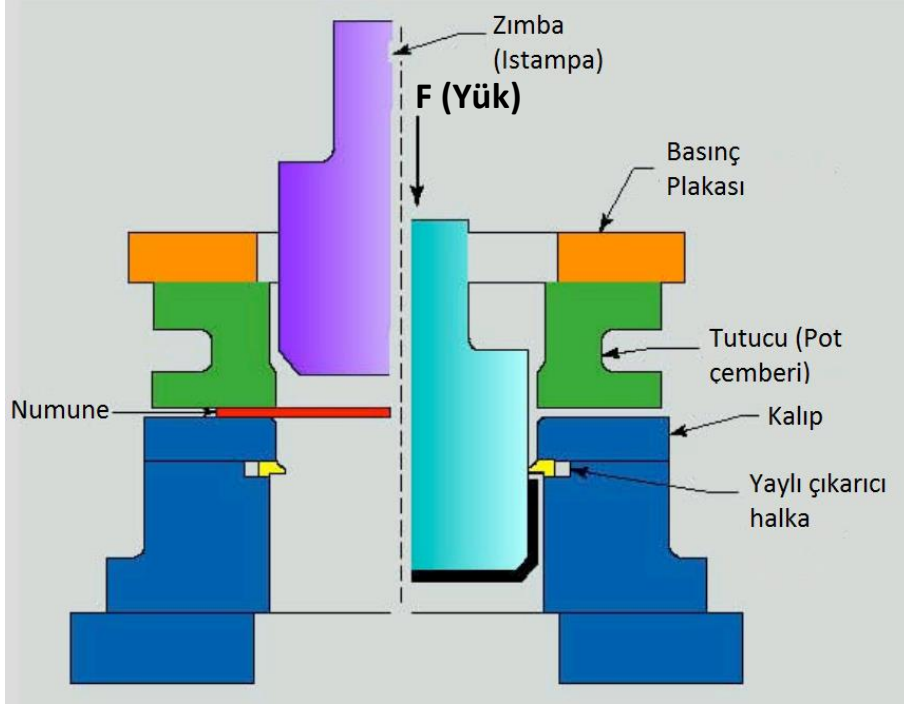
Aynı süreç devam etmektedir. Bu yüzden, üçüncü arttırımın başlangıcında eleman 1 ve 2' de gerilmeler, düğüm 1, 2, ve 3' te ise kuvvetler vardır (Şekil 3.26). Süreç, analiz istenen toplam zamana ulaşana kadar devam eder.



Şekil 3.26. Üçüncü arttırımın başlangıcında çubuğun durumu [70].

3.3 Derin Çekme İşlemi

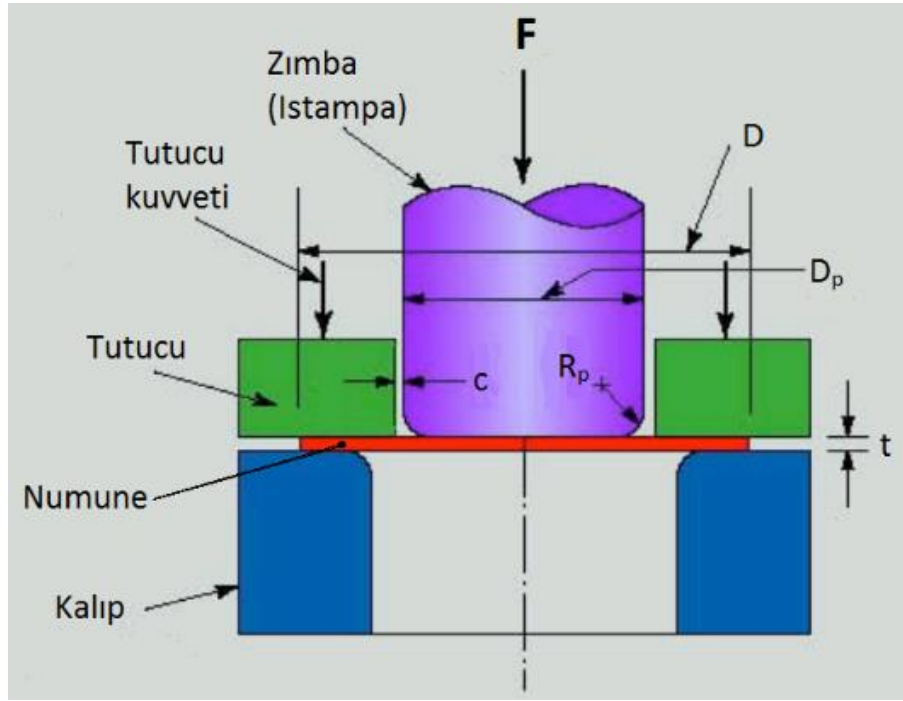
1700' lerde gelişen derin çekme önemli bir sac metal şekillendirme işlemidir. İçecek kutuları, tencere ve tavalar, çeşitli şekil ve boyutlardaki teneke kutular, evyeler, otomobil panelleri gibi çeşitli parçalar bu yöntemle yapılır. Bu işlemde düz sac bir zımba yardımıyla kalıp boşluğuna içine bastırılarak metal silindirik veya kutu şekline getirilir (Şekil 3.27). İşlemin adı derin çekme olmasına rağmen genellikle üretilen parçalar ortalama bir derinliğe sahiptirler [48, 71].



Şekil 3.27. Yuvarlak sac metal levhanın derin çekilmesinin şematik olarak gösterilmesi (Eksene göre sol taraf derin çekme işlemi öncesi, sağ taraf derin çekme sonrası) [71].

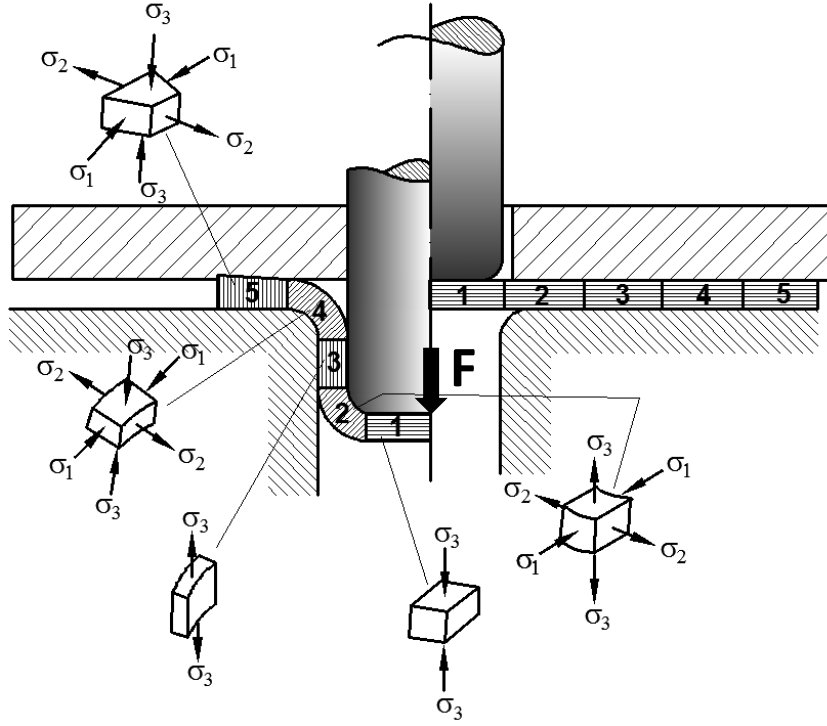
Silindirik bir parçanın derin çekilmesindeki temel parametreler Şekil 3.28’de verilmiştir. D_o çapına ve t_o kalınlığına sahip dairesel sac parça R_d kavisli kalıp ağzına yerleştirilir. Parça belli bir kuvvet altında bir tutucu veya baskı plakası yardımıyla yerinde tutulur. D_p çaplı ve R_p köşe kavisli bir zımba aşağı doğru hareket ederek numuneyi kalıp boşluğuna ittirerek sacın kupa şeklini alması sağlanır. Derin çekmedeki önemli değişkenler şunlardır;

- Sac metalin özellikleri
- Numune çapının zımba çapına oranı
- Sac kalınlığı
- Zımba ile kalıp arasındaki boşluk
- Zımba ve kalıbın köşe yarıçapları
- Tutucu kuvveti
- Zımbanın hızı
- Zımba, kalıp ve numune yüzeyleri arasındaki sürtünme



Şekil 3.28. Silindirik bir kabın derin çekilmesindeki değişkenler [71].

Silindir geometrili zimba ile bir sacın derin çekme operasyonu sırasında, çalışma parçası Şekil 3.29'daki gerilme durumlarına maruz kalmaktadır. Numune üzerindeki 5 nolu eleman, numunenin kalıp boşluğuna çekilmesinden dolayı radyal çekme gerilmesine maruz kalır, tutucu tarafından uygulanan kuvvetten dolayı kendi normalinin bulunduğu düzlemde bası gerilmesine maruz kalır. Numunenin çapı boyunca serbest cisim diyagramı ile radyal çekme gerilmesinin 5 nolu eleman üzerinde çevresel bası gerilmesi oluşturduğu görülebilir. Bu gerilme durumu altında 5 nolu eleman çevresel yönde kısalarak, radyal yönde uzar. Dikkat edilecek nokta parça kulaklarında oluşan bu çevresel gerilmeler derin çekme esnasında kıvrırmaya sebep olur. Bu sabit kuvvet altındaki tutucunun etkinliğini göstermektedir.



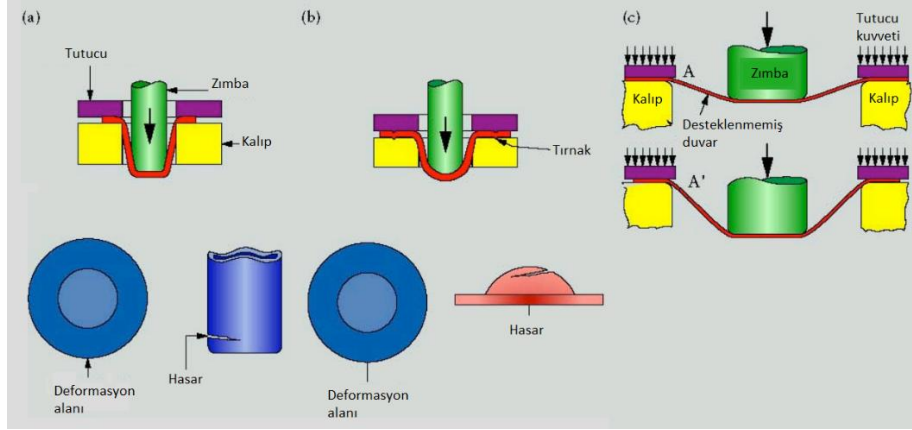
Şekil 3.29. Silindirik başlı bir zımba ile derin çekme işlemi sırasında oluşan gerilmeler [72].

Zımba, derin çekme kuvvetini (F) kupa duvarları boyunca ve kalıp boşluğuna çekilen kulaklara iletir (Şekil 3.28). Şekil 3.29’da görülen 3 nolu elemanda olduğu gibi, zaten şekillendirilmiş olan kupa duvarları aslında uzunlamasına çekme gerilmesine maruz kalırlar. Kupa duvarlarında boylamasına oluşan çekme gerilmesi altındaki kasılmasının sebep olduğu zımbanın kupayı sıkıca tutması 3 nolu elemandaki çevresel çekme gerilmesine sebep olur.

Unutulmamalıdır ki, genelleştirilmiş akma kriterleri (Tresca, Von Mises) eşitliklerinden de gözlemlenebileceği üzere, ince duvarlı bir tüpün boylamasına gerilmesi çapında küçülmeye sebep olur. Operasyonun rijit bir zımba ile yapılmasından dolayı 3 nolu elemanın genişliğinde herhangi bir değişim olmazken boylamasına uzar.

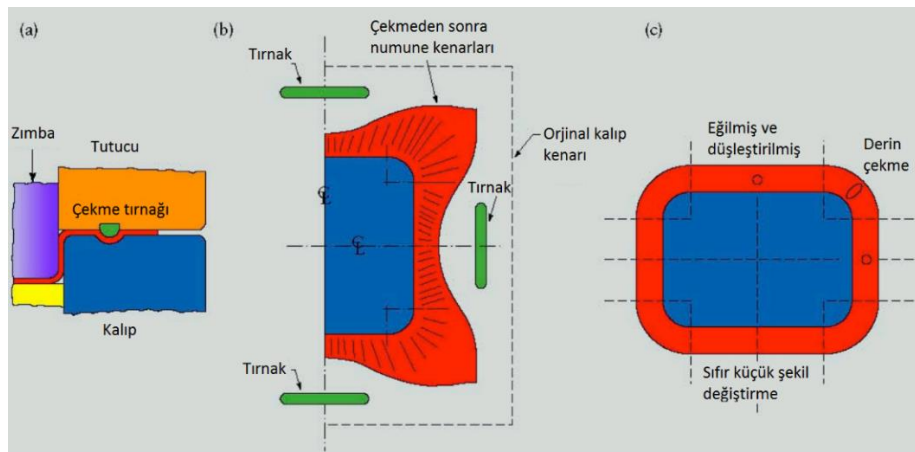
Derin çekme işlemlerinde bir diğer önemli nokta ne kadar saf çekme ve ne kadar gerdirme olacağına karar verilmesidir (Şekil 3.30). Düşük tutucu kuvvetleri numunenin kalıp boşluğuna serbestçe çekilmesine izin verir (saf çekme). Şekil 3.29’daki 3 nolu eleman kalıp içine çekilirken sac çapı ve kalınlığı azalacaktır. Sacdaki deformasyon kulaklarda olurken, kupa duvarları sadece elastik gerilmeye maruz kalır.

Bu gerilmeler artan D_o/D_p oranı ile artar ve kupa duvarlarında, kulaklar kalıp boşluğuna çekilirken gerekli olan yüklemeyi desteklemezse, sonunda hasar sebep olur (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. (a) Saf çekme, (b) Saf gerdirme; tırnak, sac metalin serbestçe kalıp boşluğuna akmasını önler, (c) Desteklenmemiş duvar ve çekme esnasında kıvrılma olma olasılığı [71].

Diğer taraftan, uygun tutucu kuvveti veya çekme tırnağı (Şekil 3.31a ve 3.31b) ile numune kalıp boşluğuna serbestçe çekilmekten korunabilir. Sac metaldeki deformasyon temel olarak kupa çekilirken oluşan zimba çevresindeki gerdirmeden dolayı oluşur ve sonuç olarak numune boyun vererek yırtılır. Boyun vermenin bölgesel veya yayılmış olup olmadığını sac metalin şekil değiştirme oranı hassaslığı üsteli (m) belirler. Yüksek m değeri daha fazla yayılmış boyun verme anlamına gelir; işlevini zımbanın geometrisi ve yağlama etkenleri belirler.



Şekil 3.31. (a) Çekme tırnağının şematik gösterimi, (b) kutu şeklinde parçanın çekilmesinde metal akışı, tırnak kullanılarak malzemenin hareketi kontrol edilmiştir, (c) Derin çekme esnasındaki köşe ve kenarların deformasyonu [71].

Desteklenmemiş sac parçası uzunluğu (kalıp ve zımba arasındaki yarıçap farkı) kıvrırmaya sebep olacağından dolayı önemlidir. Şekil 3.31c’de görüldüğü gibi zımba aşağı inerken A elemanı kalıp boşluna çekilir. Bu sırada numune çapında küçülme meydana gelir ve eleman A’ pozisyonuna hareket ederken çevresi küçülmeye başlar. Bu durumda kalıp ile tutucu arasındaki elemandan farklı olarak yeni pozisyonundaki eleman hiçbir takım tarafından desteklenmeden çevresel bası şekil değiştirmesine maruz kalır. Çünkü sac incedir ve çevresel bası gerilmesi hiçbir uzamaya karşı desteklenemez. Bu desteklenmemiş bölgede kıvrırmaya sebep olur. Bu durum özellikle çok az saf gerdirmenin olduğu saf çekmede oldukça yaygındır.

3.3.1 Silindirik kapların derin çekilmesi

Yukarıda kısaca açıklanmış olan silindirik kapların derin çekilmesi işlemiyle ilgili genel kurallar aşağıda verilmiştir [48].

3.3.1.1 Derin çekilecek sac çapının hesaplanması

Derin çekme sırasında sac kalınlığının değişmediği kabul edilirse, derin çekilerek elde edilen kabın yüzeyi (S) ile çekme sacının yüzeyi (S₁) eşit olmalıdır. Dolayısıyla, çekme sacının çapı D ile gösterilirse

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = S \quad (3.17)$$

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S} \quad (3.18)$$

bulunur. Derin çekme ile elde edilecek kap elemanlara ayrılarak bu elemanların yüzeylerinin toplamı $\sum S$ ile gösterilirse, çekme sacı çapının

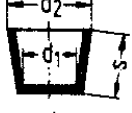
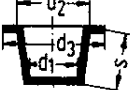
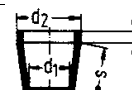
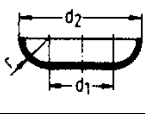
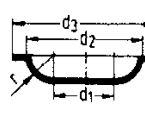
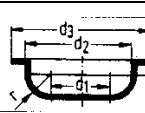
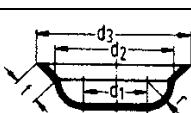
$$D = \sqrt{\sum \frac{4}{\pi} \cdot S} \quad (3.19)$$

Şeklinde hesaplanması en uygun yoldur. Çeşitli kap şekilleri için D değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Derin çekilecek sac çapının kap şekline göre hesaplanması için gerekli denklemler [48].

Kap şekli	Derin çekilecek sac çapı, D
	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)}$
	$\sqrt{d_3^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h + 2 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2) + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)}$
	$\sqrt{2 \cdot d^2} = 1,414 \cdot d$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$
	$1,414 \cdot \sqrt{d_1^2 + f \cdot (d_1 + d_2)}$
	$1,414 \cdot \sqrt{d^2 + 2 \cdot d \cdot h}$
	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$
	$1,414 \cdot \sqrt{d_1^2 + 2 \cdot d_1 \cdot h + f \cdot (d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot h^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot h^2}$
	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (h_1^2 + d_1 \cdot h_2)}$
	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot (h_1^2 + d \cdot h^2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot h^2 + 2 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot [h_1^2 + d_1 \cdot h_2] + f/2 \cdot (d_1 + d_2)}$

Çizelge 3.1 (Devamı). Derin çekilecek sac çapının kap şekline göre hesaplanması için gerekli denklemler.

Kap şekli	Derin çekilecek sac çapı, D
	$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot s \cdot (d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot s \cdot (d_1 + d_2) + d_3^2 - d_2^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot [s \cdot (d_1 + d_2) + 2 \cdot d_2 \cdot h]}$
	$\sqrt{d_1^2 + 6,28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2}$ veya $\sqrt{d_2^2 + 2,28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 6,28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + d_3^2 - d_2^2}$ veya $\sqrt{d_3^2 + 2,28 \cdot r \cdot d_2 - 0,56 \cdot r^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 6,28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 4 \cdot d_2 \cdot h + d_3^2 - d_2^2}$ veya $\sqrt{d_3^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0,57 \cdot r + h) - 0,56 \cdot r^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 6,28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)}$ veya $\sqrt{d_2^2 + 2,28 \cdot r \cdot d_2 + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3) - 0,56 \cdot r^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 6,28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 4 \cdot d_2 \cdot h + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)}$ veya $\sqrt{d_2^2 + 2,28 \cdot r \cdot d_2 + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3) - 0,56 \cdot r^2}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot (1,57 \cdot r \cdot d_1 + 2 \cdot r^2 + h \cdot d_2)}$ veya $\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (h + 0,57 \cdot r) - 0,56 \cdot r^2}$

3.3.1.2 Çekme kademelerinin belirlenmesi

Derin çekme sırasında sac pekleşir. Pekleşme ise derin çekmede kap yüksekliğini sınırlayan bir faktördür. Diğer bir deyimle, derin kaplar bir işlemde çekilemezler. Sünek metaller derin çekmeye en uygun olan malzemelerdir.

İlk kademede elde edilecek kabın iç çapı d_1 , çekme sacı çapı D ise

$$d_1 = m_1 \cdot D \quad (3.20)$$

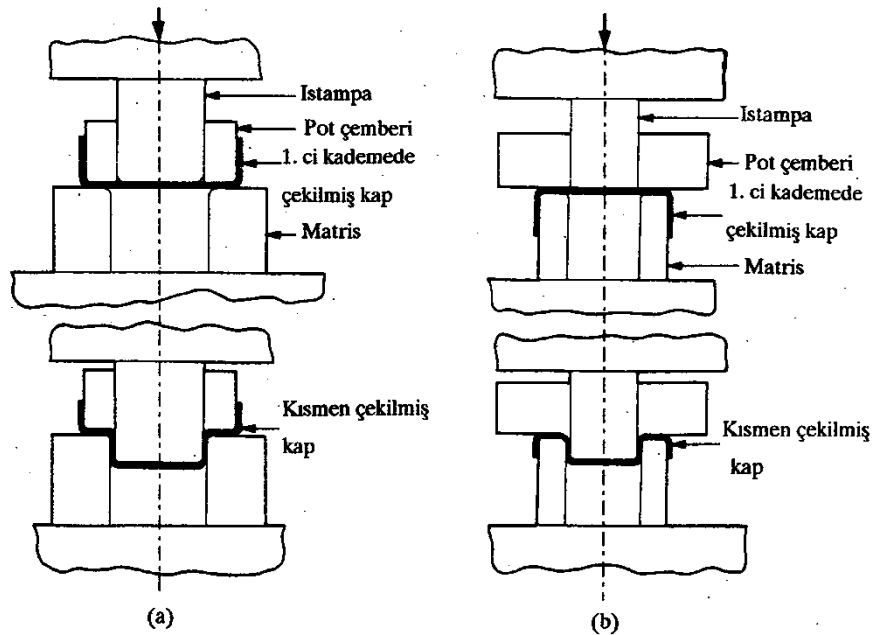
ve ikinci ve daha sonraki kademeler için kap çapı

$$d_n = m_n \cdot d_{n-1} \quad (3.21)$$

olarak hesaplanır. Kademelendirme sayısı olarak adlandırılan m değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Şekil 3.32’de ise silindirik bir kabın ikinci ve/veya daha sonraki bir kademede derin çekilmesiyle ilgili iki örnek görülmektedir.

Çizelge 3.2. Çeşitli malzemeler için kademelendirme sayıları [48].

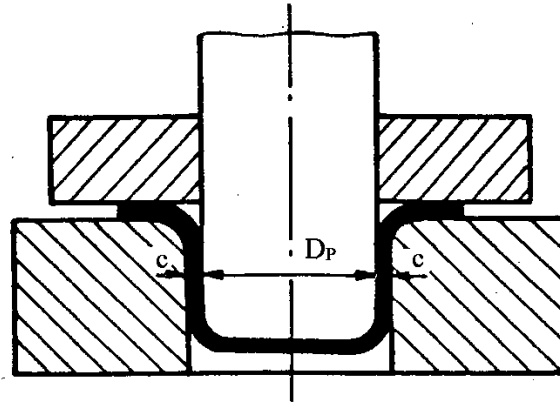
Metalik malzeme	Pot çemberli çekme		Pot çembersiz çekme
	m_1	m_2	$m_1 = m_2$
Çelik sac (kalınlık < 2 mm)	0.56	0.80	0.90...0.93
Çelik sac (kalınlık > 2 mm)	0.56	0.83	0.90...0.93
Pirinç, bakır, gümüş (kalınlık < 2 mm)	0.50	0.75	0.90...0.93
Pirinç, bakır, gümüş (kalınlık > 2 mm)	0.52	0.75	0.90...0.93
Çinko	0.75	0.91	0.90...0.93
Alüminyum (kalınlık < 2 mm)	0.55	0.80	0.90...0.93
Alüminyum (kalınlık > 2 mm)	0.55	0.83	0.90...0.93
Paslanmaz çelik	0.60	0.80	0.90...0.93



Şekil 3.32. Silindirik bir kabın ikinci ve/veya daha sonraki bir kademede derin çekilmesi. (a) Genel yöntem. (b) Ters çekme [48].

3.3.1.3 Istampı ile matris arasındaki boşluk (çekme aralığı)

Çekme aralığı için (Şekil 3.33) aşağıdaki ampirik denklemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir (Çizelge 3.3) [48].



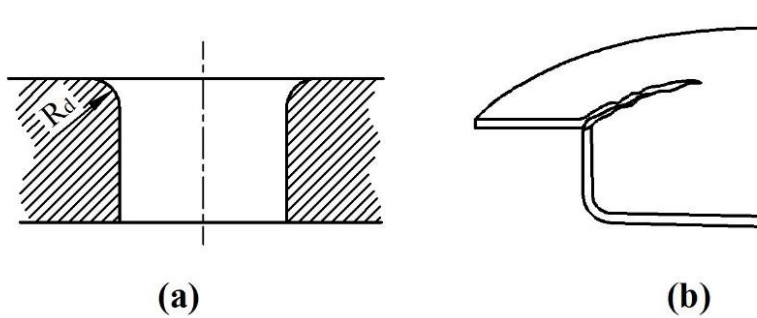
Şekil 3.33. Kalıp ile zımba arasındaki derin çekme aralığı [48].

Çizelge 3.3. Bazı malzemeler için ampirik derin çekme aralığı denklemleri [48].

Çelik	$c = t + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot t}$
Alüminyum	$c = t + 0,02 \cdot \sqrt{10 \cdot t}$
Isıya dayanıklı alaşımlar	$c = t + 0,20 \cdot \sqrt{10 \cdot t}$
Diğer demir dışı malzemeler	$c = t + 0,04 \cdot \sqrt{10 \cdot t}$

3.3.1.4 Matris kenarının (çekme kenarı) yuvarlatılması

Bir derin çekme takımından iyi sonuç alınmasında çekme kenarı yuvarlatılmasının büyük etkisi vardır (Şekil 3.34).



Şekil 3.34. (a) Çekme kenarının yuvarlatılması. (b) Çekme kenarı yuvarlatılmasının gereğinden küçük olması halinde kabın yırtılması [48].

Çelik için, birinci kademedeki kalıp kavisi (R_d),

$$R_d = 0,8 \cdot \sqrt{(D - d) \cdot t} \quad (3.22)$$

alınmalıdır (D = çekme sacı çapı; d = ıstampa çapı; t = sac kalınlığı).

Alüminyum ve alaşımlarının mekanik özellikleri daha düşük olduğundan r değeri çeliğe kıyasla %10 kadar büyük alınır:

$$R_d = 0,9 \cdot \sqrt{(D - d) \cdot t} \quad (3.23)$$

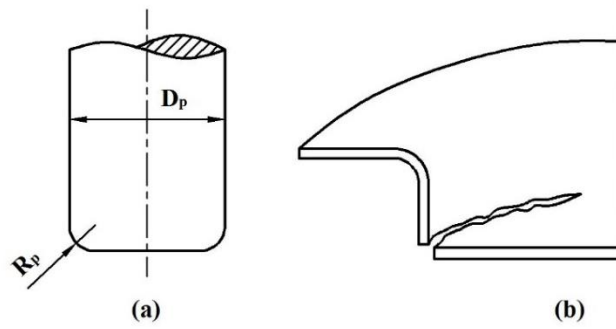
İkinci ve daha sonraki kademelerde ise çekme kenarı yuvarlatma yarıçapı

$$R_{d,n} = \frac{d_{n-1} - d_n}{2} \quad (3.24)$$

alınır.

3.3.1.5 İstampa kenarının yuvarlatılması

Sacın ıstampa tarafından delinmemesi için ıstampa kenarı uygun şekilde yuvarlatılmalıdır (Şekil 3.35).



Şekil 3.35. (a) İstampa kenarının yuvarlatılması. (b) İstampa kenarı yuvarlatmasının gereğinden küçük olması halinde kabın yırtılması [48].

Sac kalınlığına bağlı olarak

$$5 \cdot t < R_p < 10 \cdot t \quad (3.25)$$

ıstampa çapına bağlı olarak da

$$R_p = (0,1 \dots 0,3) \cdot D_p \quad (3.26)$$

alınabilir.

3.3.1.6 Pot çemberi basıncı

Çeşitli metalik malzemeler için gerekli pot çemberi basıncı Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çeşitli metalik malzemeler için pot çemberi basıncı [48].

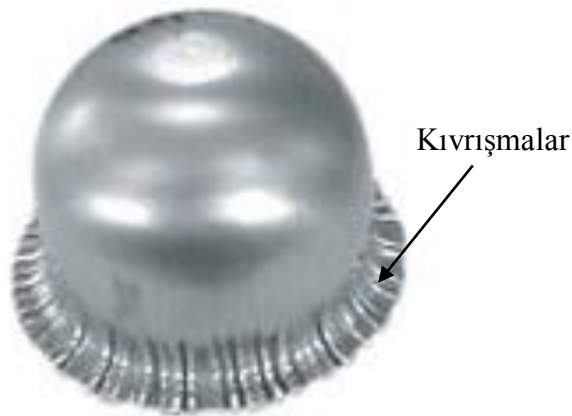
Malzeme	p (kgf / mm ²)
Alüminyum	0,10...0,12
Çinko	0,12...0,15
Düralümin	0,15...0,16
Paslanmaz çelik	0,20
Pirinç	0,20
Çelik	0,25
Kalaylı sac	0,30

Pot çemberi kuvveti ise pot çemberi basıncının sacla pot çemberi arasındaki temas alanı ile çarpımıdır. Dolayısıyla birinci kademe için pot çemberi kuvveti (F_N)

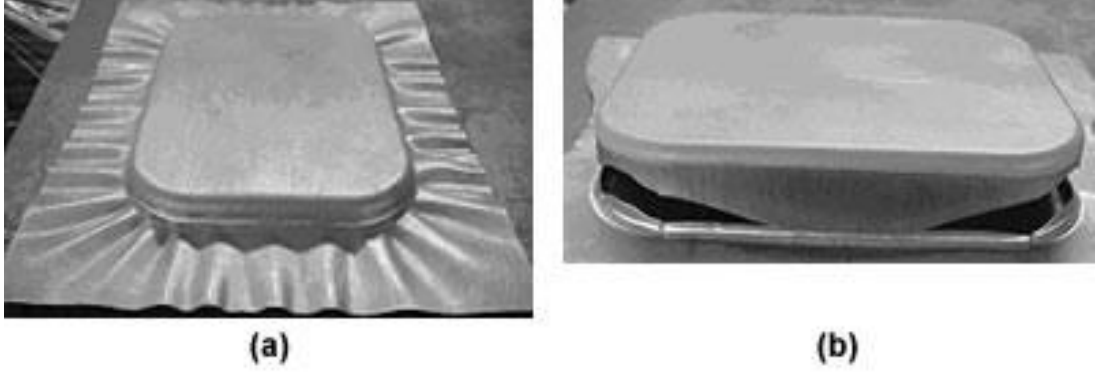
$$F_N \cong \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \cdot p \quad (3.27)$$

denklemini ile hesaplanır. Burada D çekme sacının, d ise ıstampanın çapıdır.

Pot çemberi kuvvetinin yetersiz olması halinde katlanmalara engel olunamayacağı açıktır (Şekil 3.36). Gereğinden büyük pot çemberi kuvveti ise yırtılmaya neden olur (Şekil 3.37).



Şekil 3.36. Kısmen derin çekilmiş bir kapta, pot çemberi kuvvetinin yetersizliği nedeniyle, flanşta katlanma (pot) oluşumu [73].



Şekil 3.37. Pot çemberi kuvvetinin gereğinden büyük olması nedeniyle derin çekme sırasında kabın yırtılması [74].

3.3.1.7 Derin çekme kuvveti ve işi

Derin çekme sırasında ıstampanın uyguladığı maksimum kuvvet (F_p), birinci kademe için aşağıdaki basitleştirilmiş denklemle hesaplanır [48]:

$$F_p = \pi \cdot d \cdot t \cdot \sigma \cdot m \quad (3.28)$$

Bu ifadede, d ıstampa çapı, t sac kalınlığı, σ sacın çekme dayanımı, m ise d/D oranına bağlı bir katsayıdır (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. Derin çekme kuvvetinin hesaplanmasında d/D oranına bağlı olarak m değerleri [48].

d/D	0,55	0,575	0,60	0,625	0,65	0,675	0,70	0,725	0,75	0,775	0,80
m	1,00	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40

İkinci ve daha sonraki kademelerde çekme kuvveti birinci kademe için hesaplanan değer $5/4$ katı alınır.

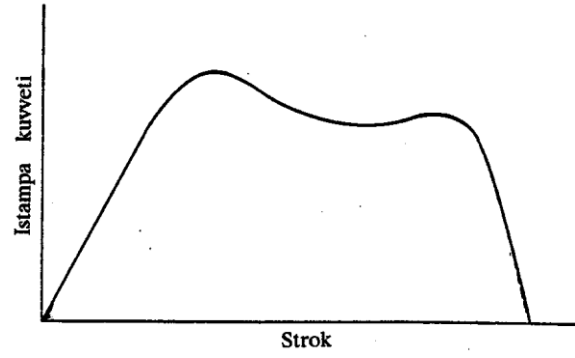
Çekme işi ise çift etkili bir preste derin çekme işi (W):

$$W = x \cdot P_d \cdot h \quad (3.29)$$

tek etkili bir preste ise:

$$W = (x \cdot P_d + P_p) \cdot h \quad (3.30)$$

denklemleriyle hesaplanır. Bu denklemlerde h çekme derinliği, x çekme kuvvetinin strok sırasındaki değişimini (Şekil 3.38) göz önüne alan bir katsayıdır (Çizelge 3.6).



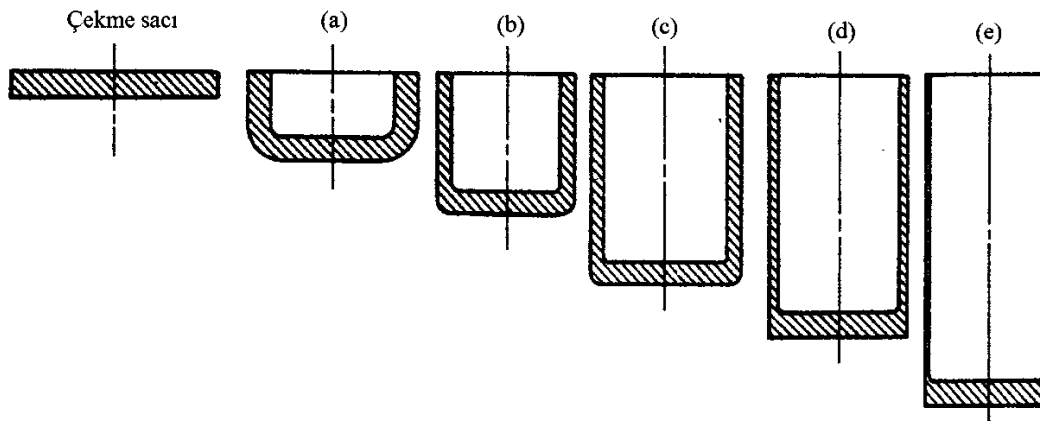
Şekil 3.38. Derin çekmede ıstampa kuvvetinin strokla değişimi (şematik) [48].

Çizelge 3.6. Derin çekme işinin hesaplanmasında x değerleri [48].

d/D	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
x	0,80	0,77	0,74	0,70	0,67	0,64

3.3.1.8 İncelterek çekme

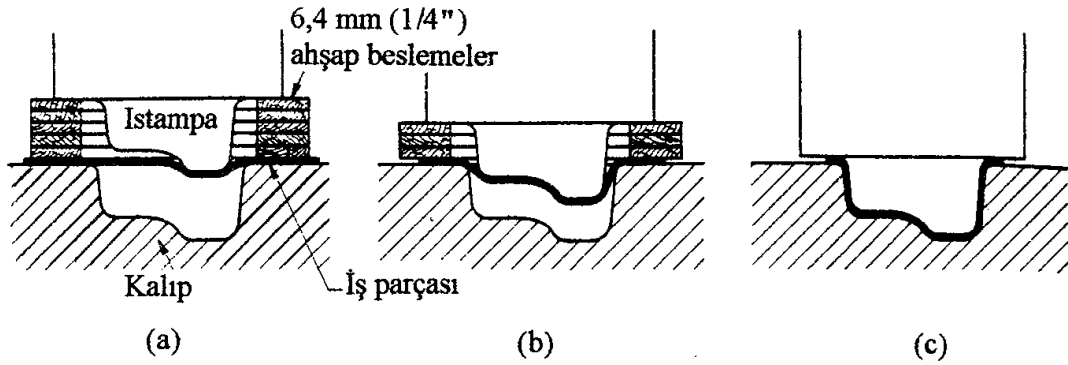
Şekil 3.39’da görüldüğü gibi, taban kalınlığı cidar kalınlığından büyük olan parçalar, örneğin top mermisi kovanları, incelterek çekme işlemleriyle üretilir. İncelterek çekme işleminde, çekme sacı kalınlığı iş parçasının taban kalınlığına eşit alınır; çekmede bu kalınlık değişmez. Cidar kalınlığı ise, çeşitli çekme kademelerinde incelterek istenen değere indirilir. İncelterek çekme, çoğu kez pot çembersiz yapılıdır. Bunu için kademelendirme sayısı $m = d_{n+1} / d_n \geq 0.90$ olmalıdır. Pirinç, alüminyum gibi sünek malzemeler için cidar kalınlığının birinci kademede %25, diğer kademelerde %30 azaltılması tavsiye edilir. Pekleşme nedeniyle, iş parçasının kademeler arasında tavllanması gerekebilir. İncelterek çekmede iç çap sabit tutulur [10].



Şekil 3.39. İncelterek derin çekme [48].

3.3.1.9 Güç düşmeli çekişte derin çekme

Az sayıda ve fazla derin olmayan kapla güç düşmeli bir çekişte çinko esaslı alaşımdan yapılmış kaplar kullanılarak çok ekonomik şekilde üretilebilirler. Bu kalıplar doğrudan doğruya döküm yoluyla elde edilebildiklerinden, çelik kalıplar için maliyeti yüksek olan talaşlı işleme söz konusu olmaktadır. Ayrıca kullanılmalarına gerek kalmadığında eritilip başka bir kalıp elde etmek üzere yeniden dökülebilirler. Bazen, şekillendirilecek sacın üzerine, koçun inişini kısıtlamak amacıyla, kontrplaktan ince besleme parçaları konulur (Şekil 3.40). Bu besleme parçaları ayrıca pot çemberi görevi de yaparlar. Koçun her strokundan sonra bir besleme parçası kaldırılarak kabın giderek derinleşmesi sağlanır. Oluşan potlar, stroklar arasında, tahta veya lastik başlı bir çekiçe düzeltilebilirler [48].



Şekil 3.40. Güç düşmeli çekişte derin çekme [48].

Güç düşmeli bir çekişte derin çekme işlemi preste çelik kalıplarla yapılan derin çekme işlemlerine kıyasla çok kaba olmasına karşın az miktarda üretimler için genellikle en ekonomik metottur. Daha çok alüminyum alaşımlarına uygun olan bu yöntemle alaşımsız ve paslanmaz çelikten ince saclarda şekillendirilebilirler.

3.3.1.10 Anizotropi katsayısı (parametresi)

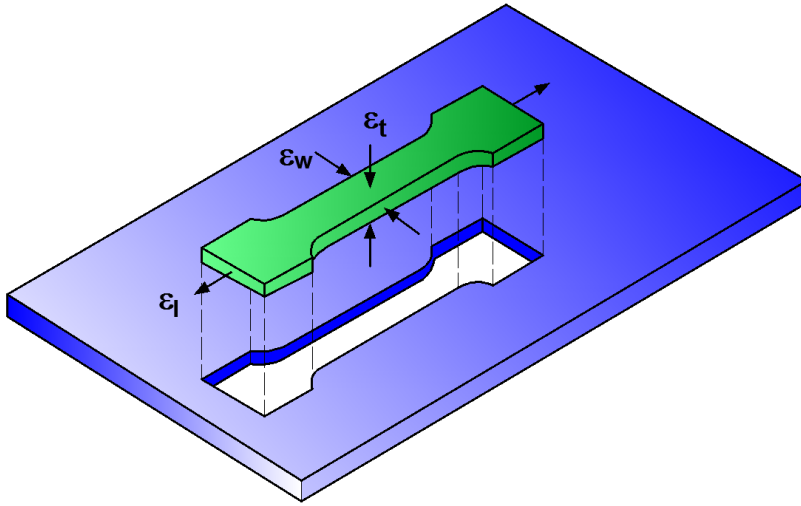
Belirli bir ıstampa çapı (d) için yırtılmadan çekilebilecek en büyük çekme sacı çapı D_{max} ise, derin çekme oranı sınırı $= D_{max} / d$. Bu oranın sacın mekanik özellikleriyle ilişkisi pek çok araştırmada incelenmiştir.

Çekme deneyinde enine doğrultuda gerçek şekil değiştirme ϵ_w , kalınlık doğrultusunda gerçek şekil değiştirme ϵ_t ile gösterilirse (Şekil 3.41) $R = \epsilon_w / \epsilon_t$ dikey

anizotropi katsayısı olarak anılır. Çekme deneyinden önce ve sonra deney parçasının eni w_0 ve w , kalınlığı ise t_0 ve t ile gösterilirse, $\varepsilon_w = \ln(w / w_0)$, $\varepsilon_t = \ln(t / t_0)$ olduğundan

$$R = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(t/t_0)} \quad (3.31)$$

Pozitif bir sayı olan dikey anizotropi katsayısının fiziksel anlamı, $R > 1$ olduğu takdirde, malzemenin sac düzlemindeki şekil değişimine kıyasla incelmeye karşı daha dayanıklı olduğu şeklindedir; aksi halde $R < 1$, izotrop bir malzemede ise $R = 1$ dir.



Şekil 3.41. Tek eksenli çekme deneyi numunesi [71].

Anizotropi katsayısının deneysel olarak saptanmasında, küçük olmaları nedeniyle ε değerlerinin ölçülmesinde hata yapılabileceği için, R 'nin yukarıdaki ifadesi, hacim sabitliğinden $t / t_0 = w_0 l_0 / w l$ alınarak

$$R = \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(w_0 \cdot l_0 / w \cdot l)} \quad (3.32)$$

şeklinde değiştirilir (burada l_0 ve l deney parçasının tek eksenli çekme deneyinden önceki ve sonraki boyudur.). Böylece çekme deney numunesinin kalınlığı yerine eni ve uzunluğu ölçülerek R nin daha sağlıklı olarak saptanması sağlanmış olur.

Bir plaka sacdan farklı doğrultularda alınan çekme deneyi örnekleriyle yapılan deneylerde değişik R değerleri bulunabilir. Böyle bir sacda düzlemsel anizotropi olduğu söylenir. Düzlemsel anizotrop bir sacda dikey anizotropi katsayısı için bir ortalama değer tarif edilir. Ortalama dikey anizotropi katsayısı ($\bar{R}$),

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (3.33)$$

denklemleriyle hesaplanır. Özetle

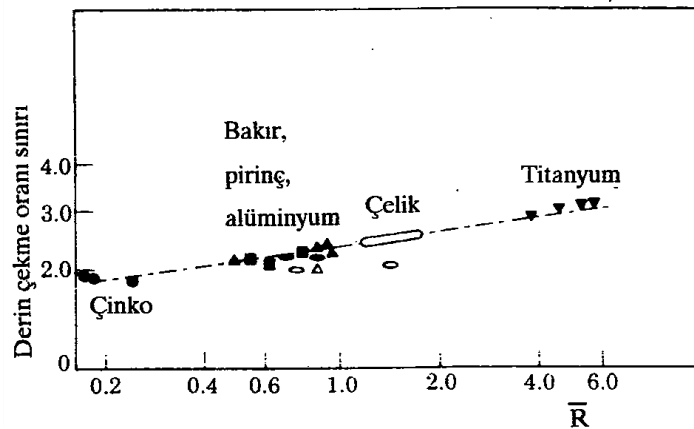
- $\bar{R} = 1$ ise malzeme izotropiktir.
- $\bar{R} \neq 1$ ise ve aynı zamanda bir plaka sacdan farklı doğrultularda alınan tek eksenli çekme deneyi örnekleriyle yapılan 3 deneyde elde edilen R değerleri farklılık göstermiyorsa metal malzemede dikey anizotropi ve düzlemsel izotropi bulunduğu söylenir.
- $\bar{R} \neq 1$ ise ve aynı zamanda sac düzleminde doğrultuya bağlı olarak değişiyorsa malzemede dikey ve düzlemsel anizotropi vardır.

Çizelge 3.7’de bazı metalik malzemelerin $\bar{R}$ değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.7. Bazı metalik malzemelerin ortalama dikey anizotropi katsayıları [48].

Metalik Malzeme	$\bar{R}$
Çinko	0.2
Sıcak haddelenmiş çelik	0.8...1.0
Soğuk haddelenmiş kaynar çelik	1.0...1.35
Soğuk haddelenmiş Al ile söndürülmüş çelik	1.35...1.8
Alüminyum	0.6...0.8
Bakır ve pirinç	0.8...1.0
Titanyum	4...6

Şekil 3.42’de ortalama dikey anizotropi katsayısının derin çekme oranı sınırına etkisi görülmektedir.



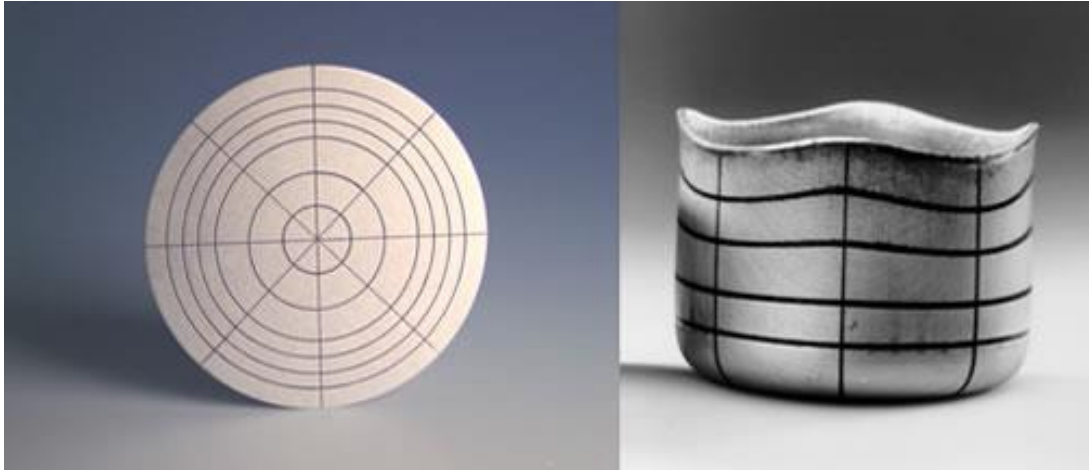
Şekil 3.42. Ortalama dikey anizotropi katsayısının derin çekme oranı sınırına etkisi [48].

3.3.1.11 Kulak oluşumu

Düzlemsel anizotropi derin çekilmiş kaplarda kulak oluşumuna yol açar (Şekil 3.43 ve 3.44). Kulak sayısı 2, 4 veya 6' dır (daha çok 4). Kulaklar, derin çekme işleminden sonra, kabın çevresi boyunca kesilir. Dolayısıyla gerek malzeme kaybına yol açması, gerek ek bir kesme işlemiyle maliyeti yükseltmesi nedeniyle kulak oluşumu olabildiğince önlenmelidir.



Şekil 3.43. Derin çekilmiş kapta kulak oluşumu [64].

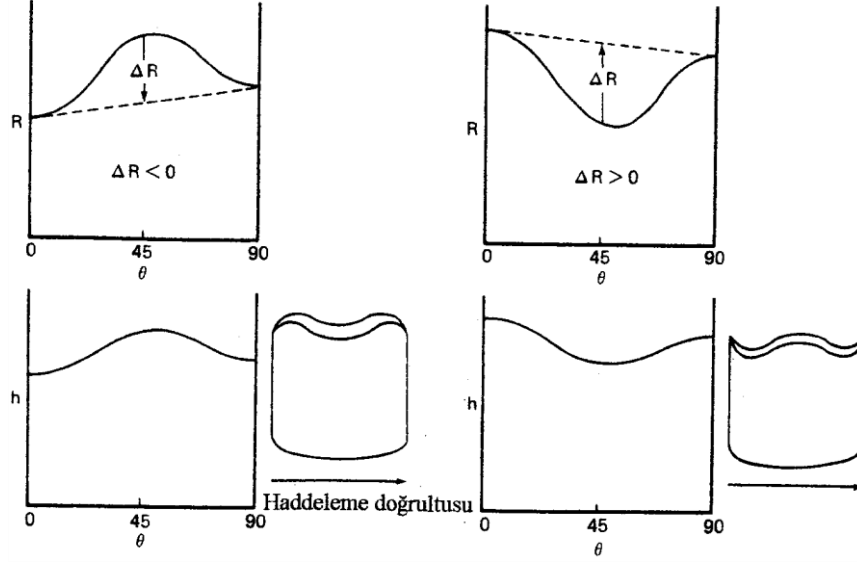


Şekil 3.44. Derin çekilmiş kapta kulak oluşumunun gözlemi [64].

Kulak oluşumuna yol açan düzlemsel anizotropi katsayısı (ΔR) ampirik bir eşitlik ile ifade edilir ve

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \quad (3.34)$$

denklemiyle hesaplanır. Düzlemsel anizotropi katsayısı ΔR , sacın haddeleme doğrultusuna göre, kulakların konumunun belirlenmesini sağlar (Şekil 3.45). ΔR büyüdükçe kulak yüksekliği de artar. $\Delta R = 0$ için kulak oluşumu görülmez.



Şekil 3.45. Silindirik kaplarda dikey anizotropi katsayısının haddeleme doğrultusu ile değişiminin kulak oluşumuna etkisi (h: kap yüksekliği) [48].

3.3.1.12 Yağlama

Derin çekmede yağlama ıstampa kuvvetini küçültmesi, derin çekme oranı sınırını yükseltmesi, takım aşınmasını azaltarak ömrünü uzatması ve üretim kusurlarının önlenmesi bakımından önem taşır. Yalnızca derin çekilen sacın matrisle temas eden yüzeyi yağlanmalıdır. Yağlayıcı olarak genel uygulamalarda mineral yağlar, sabun çözeltileri, emülsiyonlar, zor koşullarda ise kaplamalar, mum ve katı yağlayıcılar kullanılır [48].

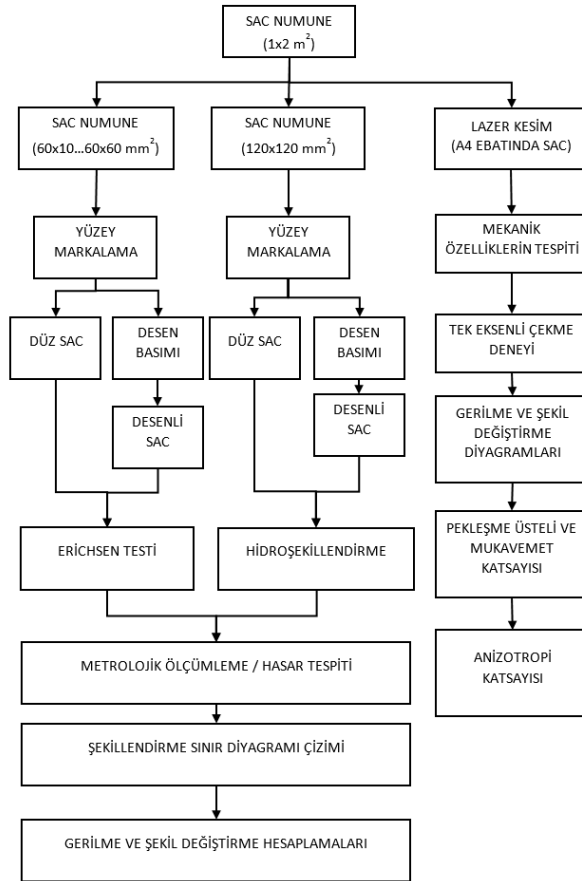
3.3.1.13 Derin çekme takımları ve presleri

Derin çekmede kalıp malzemesi olarak en çok takım çelikleri (örneğin W1, O1, A2, D2 gibi) ve alaşımlı dökme demirler kullanılır. Matris yapımında sert metallerden faydalanılmaktadır.

Derin çekmede daha çok çift tesirli hidrolik presler kullanılır. Böylece iş parçası sabit ıstampa hızında derin çekilebildiği gibi pot çemberi ve ıstampa hızları 0.1...0.3 m/s arasında alınır. Yüksek dayanımlı metaller için düşük hızların seçilmesi uygun olur [48].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, önceden hazırlanmış düz ve yarı küresel desenli dubleks paslanmaz çelik sac ($t = 0.5 \text{ mm}$) deney numuneleri hazırlanması ve Erichsen testine tabi tutulma aşamaları açıklanmaktadır. Bunun yanı sıra aynı sacdan hidro şekillendirme testi (Bulge testi) için numuneler kesilerek düz ve desenli olarak Erciyes Üniversitesi Makina Mühendisliği Kompozit Araştırma Laboratuvarlarında (Kayseri) basınçlı akışkan ile şişirme testine tabi tutulmuştur. Ayrıca deneysel çalışmaların bilgisayar ortamında simüle edilebilmesi için gerekli verileri sağlamak amacıyla OUTOKUMPU (İsveç) firmasından tedarik edilen 3 mm kalınlığındaki dubleks paslanmaz çelik sacdan çıkarılan numuneler Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma Merkezinde (KİTAM, Samsun) tek eksenli çekme testine tabi tutulmuştur. Şekil 4.1’de deneysel çalışmalarda sonuca ulaşmak için izlenen işlem sırası verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneyler sırasında izlenen işlem sırası

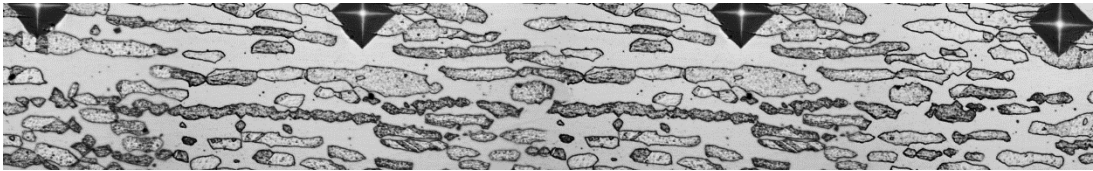
4.1 Malzeme

Çalışmada EN 1.4462 (AISI 2205) dubleks paslanmaz çelik sac ($t = 0.5$ mm) kullanılmıştır. Dubleks paslanmaz çelik sacın (EN 1.4462) iç yapısındaki elementler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. EN 1.4462 dubleks paslanmaz çelik sacın kimyasal kompozisyonu.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Ti	Ce
0.016	0.41	1.34	0.022	0.001	22.22	5.71	3.12	0.169	0.21	0.005	0.015

Şekil 4.2’de EN 1.4462 dubleks paslanmaz çelik saca ait mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Şekilde ostenit fazları sınır çizgileri ile ayrılmış olarak görülmektedir. Bu ostenitik bölgelerin dışında kalan tüm açık renkli alan ise daha sert olan (330HV0.05) ferrit fazıdır.



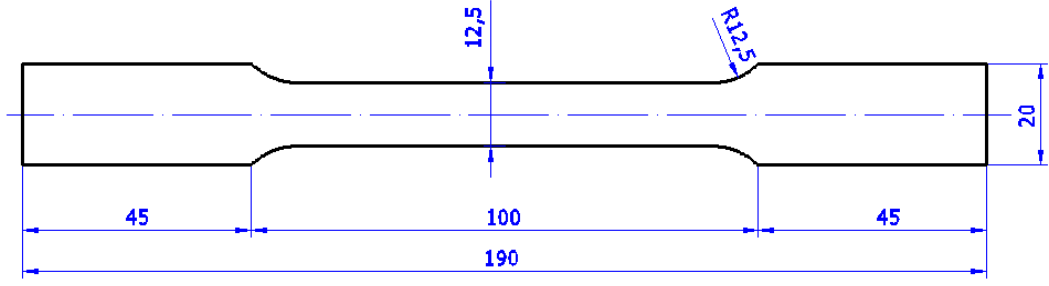
Şekil 4.2. EN 1.4462 dubleks paslanmaz çelik sacın mikroyapı görüntüsü (mikrosertlik iz aralıkları 100 μ m).

4.2 Mekanik Özelliklerin Tespiti

Çalışmanın aynı zamanda ABAQUS sonlu elemanlar programı ile modellenecek olması sebebi ile dubleks paslanmaz çelik saca ait özelliklerin belirlenmesi gerekmiştir. Çünkü deney sonuçlarının simülasyon sonuçları ile uyuşması için deney şartlarının (malzeme özellikleri, kalıp geometrileri, sürtünme katsayısı vs.) programa gerçeğe uygun biçimde girilmesi gerekmektedir. Kullanılan malzemenin mekanik özelliklerinin bilinmesi de bu noktada önem kazanmaktadır. Mekanik özelliklerin tespiti için malzeme tek eksenli çekme testine tabi tutulmuştur.

4.2.1 Tek eksenli çekme testi numunelerinin hazırlanması

OUTOKUMPU firmasından tedarik edilen A4 kağıt boyutundaki (210x297 mm²) 3 mm kalınlığındaki sac levhalardan Şekil 4.3’te teknik çizimi verilen ASTM E8/E8M-13a çekme testi standardına uygun numuneler kesilmiştir.

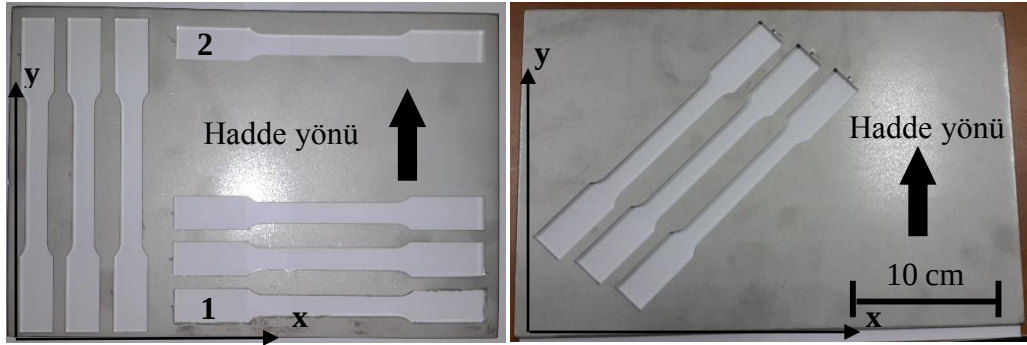


Şekil 4.3. ASTM E8/E8M-13a standardına uygun çekme testi numunesi teknik çizimi.

Numuneler SILVERLINE A.Ş. (Merzifon) firmasında MITSUBISHI marka ML301eX model lazer kesim tezgâhında kesilmiştir (Şekil 4.4). Numuneler malzemenin anizotropi katsayısını (R) belirlemek amacıyla hadde yönü 0° olmak üzere 0° , 45° ve 90° lik açılarla kesilmiştir (Şekil 4.5).



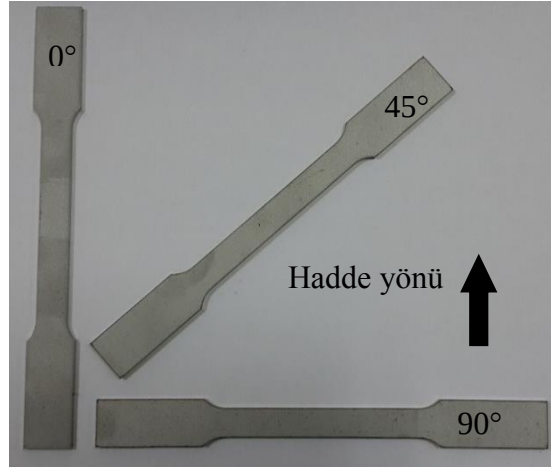
Şekil 4.4. MITSUBISHI ML3015eX lazer kesim tezgahı (SILVERLINE A.Ş. izniyle).



Şekil 4.5. A4 boyutlu sacdan hadde yönüne paralel, dik (solda), 45° açılı (sağda) numune çıkarma.

Lazer tezgahında ilk kesimde malzeme kesim hızının ayarlanması için Şekil 4.5'te gösterilen 1 nolu numune üzerinde ayarlama yapılmıştır. Ayar esnasında numune kenarlarında çapaklar oluştuğu ve numune sacdan ayrılmadığı için bu numune

ıskarta olarak ayrılmıştır. Bunu yerine Şekil 4.5'te gösterilen 2 nolu numune kesilmiştir.



Şekil 4.6. Hadde yönüne paralel, dik ve 45° açı ile kesilerek çıkarılan numuneler.

Şekil 4.6'da sacdan çıkarılmış numuneler görülmektedir. Kesim sırasında numuneler bir taraftan azot gazı ile soğutulduğu için herhangi bir ısı kaynaklı çarpılma hasarı gözlenmemiştir.

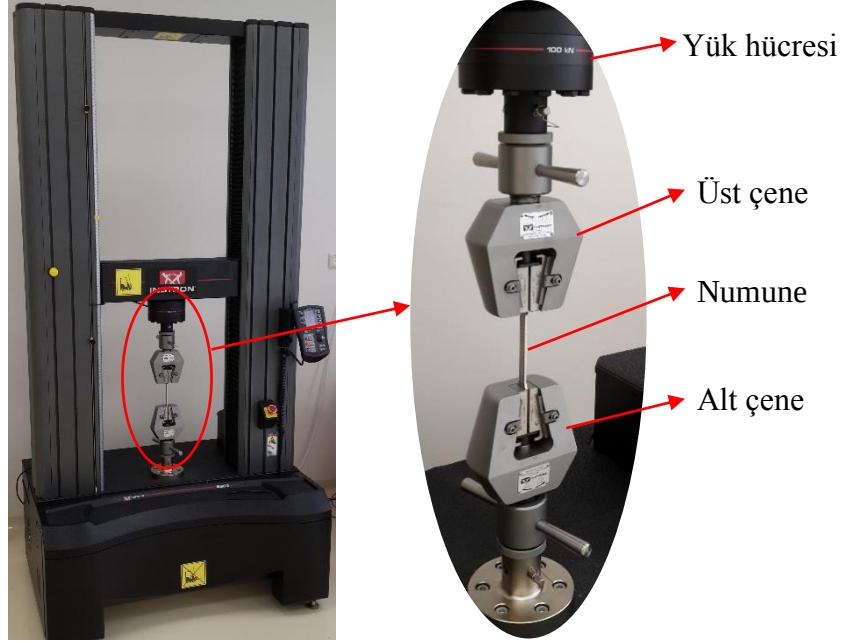
4.2.2 Tek eksenli çekme testinin yapılışı

Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması ve malzeme seçimi amacıyla yapılır. Bu deneyde standart çekme numunelerinin mukavemet değerleri belirlenir. Elde edilen değerler karşılaştırılarak, malzemelerin mekanik özellikleri değerlendirilir [75]. Ayrıca bilgisayar ortamında yapılacak olan sonraki çalışmalar için gerekli olan malzeme verileri sağlanmış olur.

Çalışmanın bu kısmında Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (KİTAM, Samsun) yapılan çekme deneyi sonuçları verilmiştir. Elde edilen veriler ile malzemelerin anizotropi katsayısı hesaplanmıştır. Ayrıca ABAQUS sonlu elemanlar programında Erichsen testini modellemek için gerekli veriler düzenlenmiştir.

Çekme deneyi maksimum 10 ton yükleme kapasiteli INSTRON marka çekme/basma ünitesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7). Daha önceden hadde yönüne paralel (0°), 45° ve 90° açılı olarak kesilmiş numuneler bu cihaza bağlanarak çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testi sırasında plastik deformasyon oluşuncaya kadar

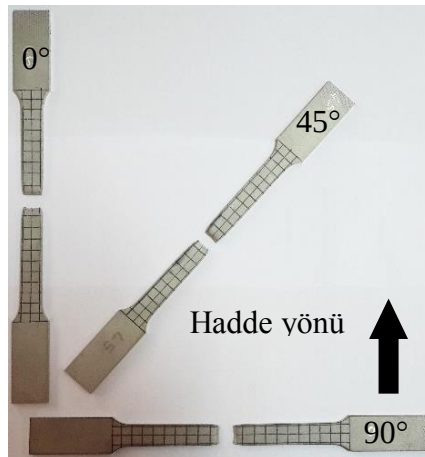
olan elastik şekil değiştirmeler ekstansometre ile ölçülmüştür. Bu sayede numunelerin elastisite modülleri (E) daha hassas (1-4 mm uzama aralığında) bir şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. INSTRON marka çekme test cihazı (KİTAM izniyle).

4.2.3 Sacın anizotropi katsayısının belirlenmesi

Şekil 4.8’de hadde yönüne göre (0° , 45° ve 90°) çıkartılmış numunelerin çekme deneyi sonrası kopartılmış durumları verilmiştir. Numuneler orta kısmına yakın bölümlerde belirgin bir büzülme (boyun verme) ve boylarında kayda değer uzamalar meydana gelmiştir. Bu durum malzemenin sünek bir malzeme olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.8. Çekme numunelerinin çekme deneyinden sonraki durumları.

Aşağıda, çekme testi sonucunda kopan numunelerin üzerinden son boy ve son en ölçüsü alınarak anizotropi katsayıları (R_0 , R_{45} , R_{90}) hesaplanmıştır. Buna göre;

$$R_0 = \left| \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(w_0 \cdot l_0 / w \cdot l)} \right| = \left| \frac{\ln(11.1/12.5)}{\ln(12.5 \cdot 90 / 11.1 \cdot 113)} \right| = 1.091 \quad (4.1)$$

$$R_{45} = \left| \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(w_0 \cdot l_0 / w \cdot l)} \right| = \left| \frac{\ln(10.6/12.5)}{\ln(12.5 \cdot 90 / 10.6 \cdot 114.5)} \right| = 2.172 \quad (4.2)$$

$$R_{90} = \left| \frac{\ln(w/w_0)}{\ln(w_0 \cdot l_0 / w \cdot l)} \right| = \left| \frac{\ln(11/12.5)}{\ln(12.5 \cdot 90 / 11 \cdot 111)} \right| = 1.561 \quad (4.3)$$

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} = \frac{1.091 + 2 \cdot 2.172 + 1.561}{4} = 1.749 \quad (4.4)$$

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} = \frac{1.091 - 2 \cdot 2.172 + 1.561}{2} = -0.846 \quad (4.5)$$

$\bar{R} = 1.749$ ortalama anizotropi katsayısı olarak bulunmaktadır. Aynı zamanda R oranı sac düzleminde yönüne bağlı olarak değişmektedir. Buna göre malzemede dikey ve düzlemsel anizotropi vardır. $R > 1$ olduğu için, malzemenin sac yüzeyindeki şekil değişimine kıyasla incelmeye karşı daha dayanıklı olduğu söylenebilir. Çizelge 4.2’de çekme numunelerine ait uzama miktarları, endeki büzülme miktarı ve hadde yönüne göre anizotropi katsayısı verilmiştir.

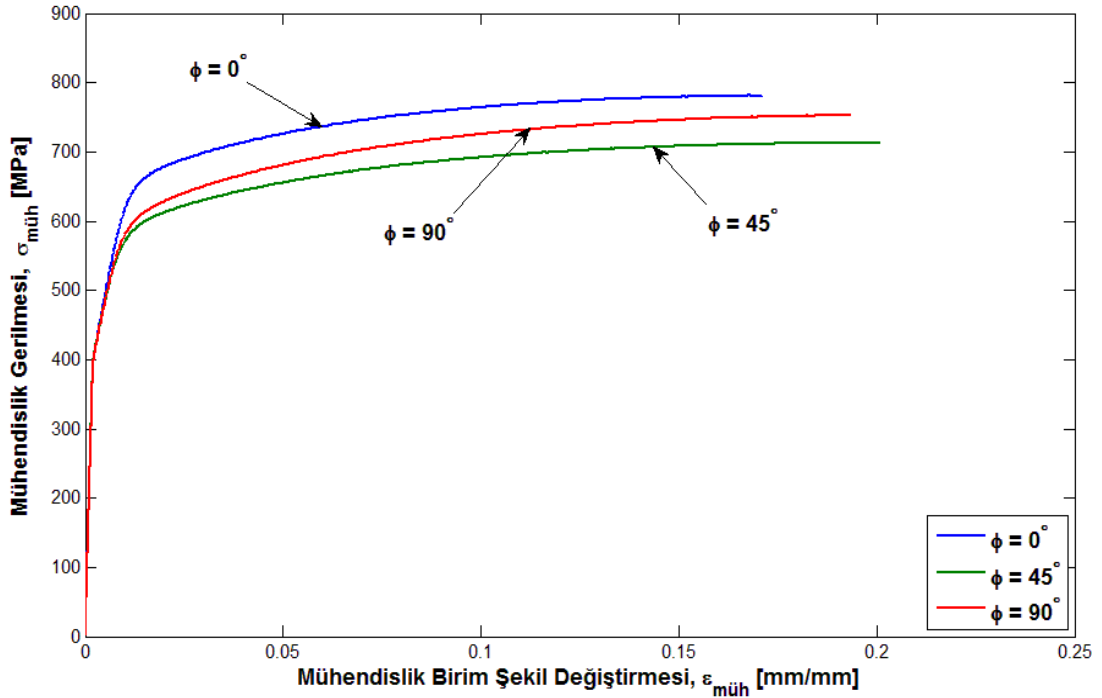
Çizelge 4.2. Tek eksenli çekme deneyi numunelerine ait uzama ve daralma miktarları.

Hadde yönü ile yaptığı açı (φ)	Uzama miktarı (Δl)	% ϵ_l	Yüke dik daralma (Δw)	% ϵ_w	R
0°	21 mm	23.33	1.5 mm	12	1.561
45°	24.5 mm	27.22	1.9 mm	15.2	2.172
90°	23 mm	25.5	1.4 mm	11.2	1.091

4.2.4 Tek eksenli çekme (σ - ϵ) diyagramlarının oluşturulması

Çekme deneyi sonucunda, kuvvet (F)-uzama (Δl) eğrisi elde edilir. Ancak bu eğri ile birlikte kullanılan numunenin boyutlarını vermek gerekir. Bu nedenle, bu eğri yerine daha evrensel olan gerilme-şekil değiştirme eğrisi kullanılır. Gerilme (σ)-şekil değiştirme (ϵ) eğrisine çekme diyagramı adı verilir [75].

Şekil 4.9’da 3 mm kalınlığında, farklı hadde yönleri için çekme testi yapılmış dubleks paslanmaz çeliğe ait mühendislik gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre, hadde yönü ile 45° açı yapan numuneye ait eğrideki gerilme değerleri en küçük, şekil değiştirme değerleri ise en büyük çıkmıştır. Bu Schmid bağıntısı ile ilişkilidir. Malzemelerde dislokasyonların kayması, yüksek atom yoğunluğuna sahip kristal düzlemleri ve bu düzlemlerde en büyük atomsal yoğunluğa sahip doğrultularda diğerlerine göre kayma hareketi çok daha kolaydır. Bu sebeple hadde yönüyle 45° yapan numunelerde kayma kolay gerçekleştiği için bu yöndeki şekil değiştirme maksimum %28 civarı, normal gerilme ise minimum 650 MPa’dır. Hadde yönüne paralel doğrultuda yüklemde normal gerilme değerleri daha yüksek, birim şekil değiştirmeler ise daha küçüktür. Bunun nedeni sac metal içindeki fazların hadde yönünde yönelmiş olmalarıdır. Sac metalin hadde yönüne dik doğrultuda yüklenmesi durumunda, faz sınırları ayrılmaya zorlandığı için sacın mukavemeti daha düşük çıkmıştır. Çekme eğrilerinin hadde yönüne göre farklılık göstermesi anizotropi varlığını doğrular niteliktedir.



Şekil 4.9. Sacın hadde yönüne göre çekme eğrileri (ϕ = Hadde yönü ile yapılan açı).

Şekil 4.9’da verilen mühendislik gerilme-şekil değiştirme eğrilerini kullanarak sonlu elemanlar programlarında gerçeğe yakın sonuçlara ulaşmak mümkün değildir. Bu yüzden malzemeye ait gerçek gerilme - gerçek şekil değiştirme eğrilerinin

hesaplanması gerekmektedir. Gerçek eğri, mühendislik eğrisinden faydalanarak çıkartılmıştır. Bu eğri oluşturulurken, hacmin değişmeyeceği prensibinden yararlanılarak yükler o anki gerçek kesitlere bölünür. Buna göre gerçek eğrinin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmıştır [62].

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{A_0} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_{müh} = \frac{L_s - L_0}{L_0} = \frac{L_s}{L_0} - \frac{L_0}{L_0} = \frac{L_s}{L_0} - 1 \rightarrow \left[\varepsilon_{müh} + 1 = \frac{L_s}{L_0} \right] \quad (4.7)$$

$$\sigma_{ger} = \frac{F_g}{A_g} \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_g = \int_{L_0}^{L_s} \frac{dL}{L} = |\ln(L)|_{L_0}^{L_s} = \ln(L_s) - \ln(L_0) = \ln\left(\frac{L_s}{L_0}\right) \quad (4.9)$$

Denklem 4.6’da bulunan değer Denklem 4.8’de yerine yazılırsa,

$$\varepsilon_g = \ln(\varepsilon_{müh} + 1) \quad (4.10)$$

olarak bulunur. Hacim sabitliği ifadesinden ($V_0 = V_s$) değerler yerine yazılırsa,

$$L_0 \cdot A_0 = L_s \cdot A \quad (4.11)$$

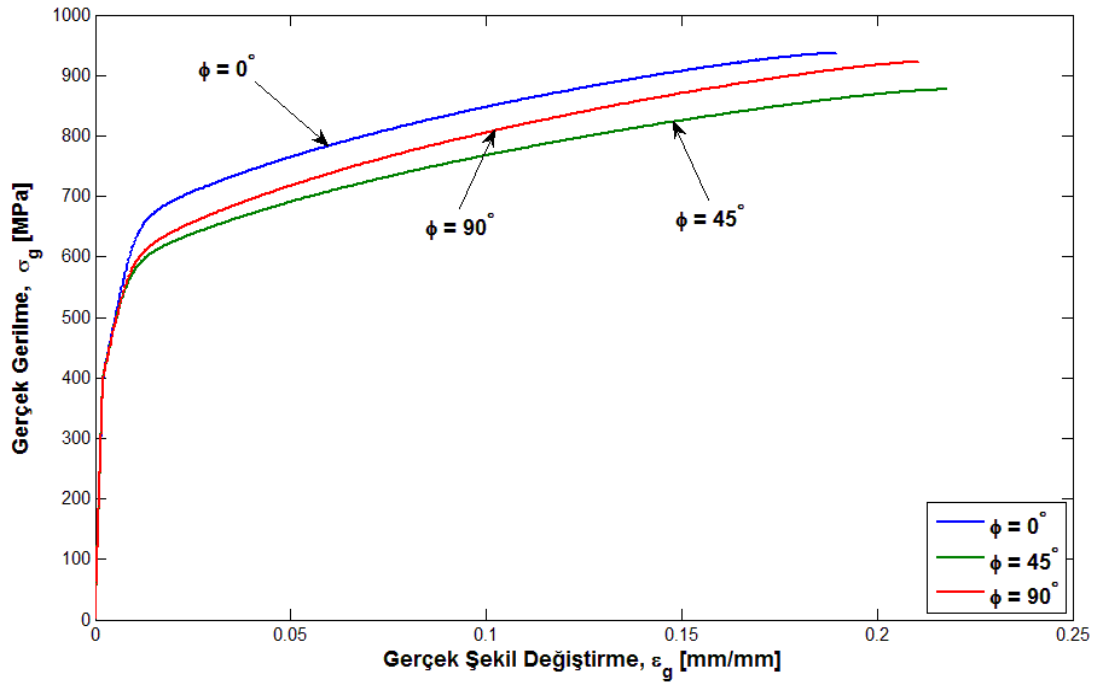
$$A = \frac{L_0 \cdot A_0}{L_s} \quad (4.12)$$

olarak bulunur. Bulunan değer Denklem 3.7’de yerine yazılırsa,

$$\sigma_g = \frac{F}{\frac{L_0 \cdot A_0}{L_s}} = \frac{F}{A_0} \cdot \left(\frac{L_s}{L_0}\right) \quad (4.13)$$

$$\sigma_g = \sigma_{müh} \cdot (\varepsilon_{müh} + 1) \quad (4.14)$$

olarak bulunur [25]. Tek eksenli çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri Denklem 4.10 ve 4.14’te yerine konularak Şekil 4.10’daki gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir.



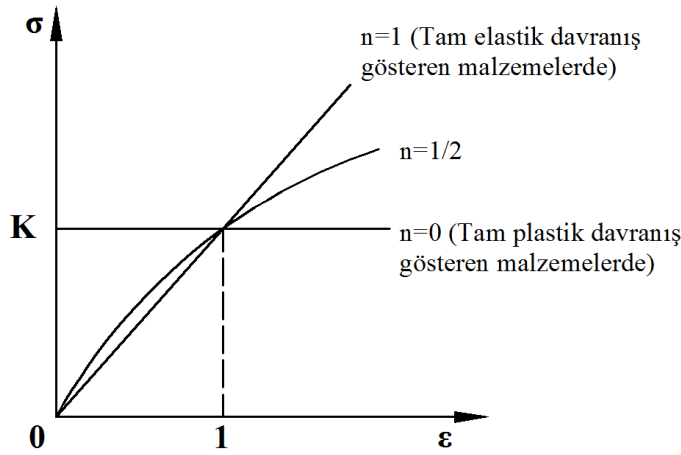
Şekil 4.10. Sacın hadde yönüne göre çizilmiş gerçek çekme eğrileri (ϕ = Hadde yönü ile yapılan açı).

Gerçek eğri aynı zamanda pekleşme üstelinin (n) bulunması için gereklidir. Bu katsayı, parça soğuk şekil değiştirirken malzemenin daha mukavemetli olmasına yol açan pekleşme ile ilgili bir metalik malzeme özelliğidir. Dislokasyon artışı ve kitlenmeleri sonucu plastik deformasyon ile mukavemette artış olur. Güçlü bir pekleşme olması, malzemenin uzama sınırının bilinmesine yardımcı olur. Pekleşme, plastik bölgede homojen şekil değiştirmenin olduğu kısımda uygulanır [63].

Homojen plastik şekil değiştirme bölgesi için deneysel olarak elde edilen gerçek gerilme (σ_g)–gerçek şekil değiştirme (ϵ_g) eğrilerine çok uyan bazı eşitlikler geliştirilmiştir. Bu eşitliklerden en çok kullanılanı Denklem 4.15’de verilen Holloman denklemidir [5].

$$\sigma_g = K \cdot \epsilon^n \quad (4.15)$$

Burada K , mukavemet katsayısı ve n ise pekleşme üstelidir. Şekil 4.11’de ise pekleşme üstelinin değişimine göre malzemelerin çekme eğrileri verilmiştir. Şekle göre tam elastik malzemelerin (kauçuk gibi) pekleşme üstelinin 1 olduğu, daha rijit malzemelerde ise pekleşme üstelinin 0’a yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 4.11. Pekleşme üsteline göre çekme eğrilerinin değişimi [71].

Pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısının belirlenebilmesi için öncelikle çekme deneyinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri ile gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme değerleri hesaplanır. Denklem 4.17’de her iki tarafında logaritması alındığında denklemin doğrusal bir denkleme ($y=mx+b$) dönüştüğü görülmektedir.

$$\log(\sigma_g) = \log(K \cdot \varepsilon^n) \quad (4.16)$$

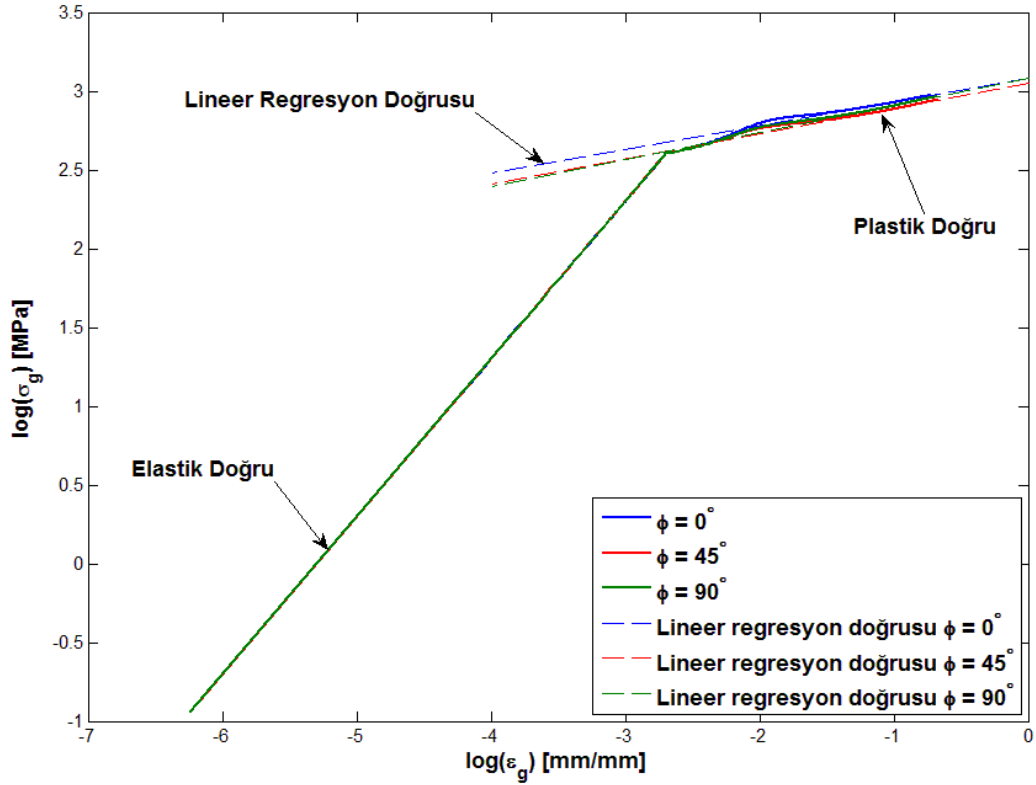
$$\log(\sigma_g) = \log(K) + n \cdot \log(\varepsilon) \quad (4.17)$$

Gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme değerlerinin 10 tabanında logaritması alınıp grafiği çizildiğinde eğrinin elastik ve plastik olmak üzere 2 kısıma ayrıldığı görülmektedir. Pekleşme üsteli, plastik eğriye doğrusal regresyon yöntemi ile uydurulan doğrunun eğimine eşittir (Şekil 4.12). Çizelge 4.3’te hadde yönüne bağlı olarak her bir numune için yapılan regresyon analizi sonucunda elde edilen pekleşme üsteli ve mukavemet katsayısı gibi değerler verilmiştir. Buna göre malzemenin ortalama pekleşme üsteli $n_{ort} = 0.160$, ortalama mukavemet katsayısı ise $K_{ort} = 1175.516$ MPa olarak belirlemiştir. Malzemenin Holloman denklemi Denklem 4.18’de verilmiştir.

$$\sigma_g = 1175.516 \cdot \varepsilon_g^{0.160} \quad (4.18)$$

Çizelge 4.3. Hadde yönüne göre pekleşme üstelleri ve mukavemet katsayıları.

Hadde yönüyle yapılan açı	Doğru Denklemi	R ²	n	K [MPa]
$\phi = 0^\circ$	$y = 0.149x + 3.08$	0.9955	0.149	1202.264
$\phi = 45^\circ$	$y = 0.160x + 3.05$	0.9943	0.160	1122.018
$\phi = 90^\circ$	$y = 0.172x + 3.08$	0.9957	0.172	1202.264

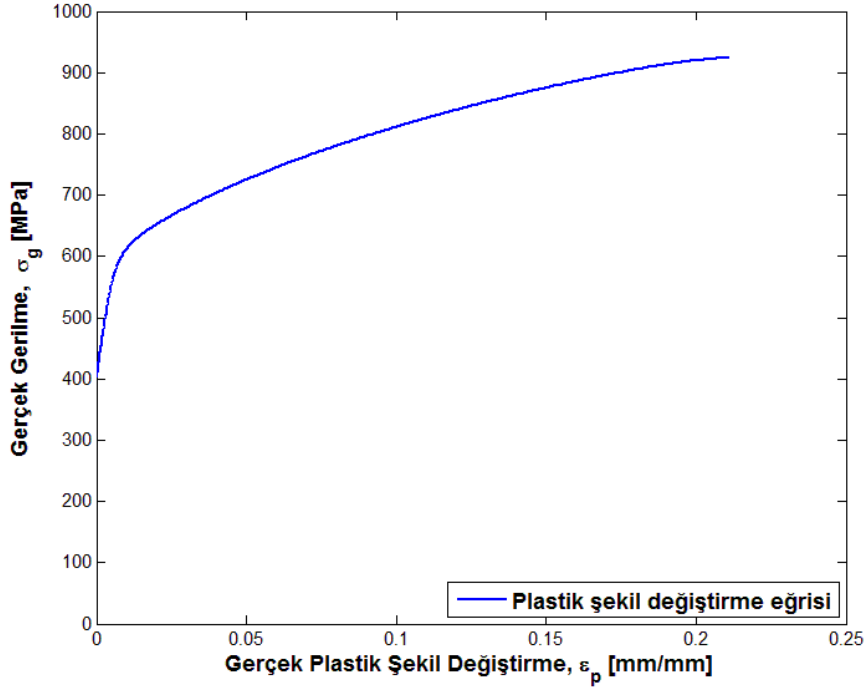


Şekil 4.12. Pekleşme üstelinin belirlenmesi.

Sac malzeme özelliklerini sonlu eleman programına girerken numuneye ait gerçek gerilme değerlerinin yanında plastik şekil değiştirme miktarlarının girilmesi gerekmektedir. Bunun için Denklem 4.19 uygulanarak plastik şekil değiştirme (ϵ_{pl}) miktarları hesaplanır.

$$\epsilon_{pl} = \epsilon_g - \frac{\sigma_g}{E} \quad (4.19)$$

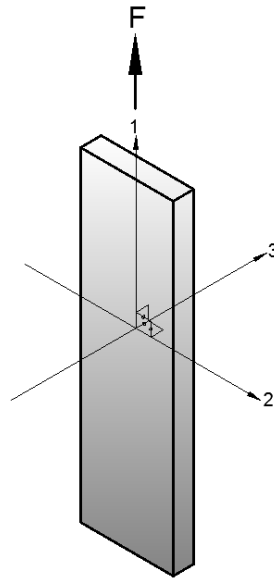
Şekil 3.13'te yukarıdaki denklem ile hesaplanan malzemeye ait gerçek gerilme–gerçek plastik şekil değiştirme eğrisi verilmiştir. Bu eğrideki gerilme ve şekil değiştirme miktarları sonlu elemanlar programına girilerek derin çekilen saclar modellenmiştir.



Şekil 4.13. Gerçek gerilme – gerçek plastik şekil değiştirme ilişkisi.

4.2.5 Poisson oranının belirlenmesi

Poisson oranı tek eksenli gerilme haline göre hesaplanır. Şekil 4.14’te verilen (1 2 3) eksen takımına göre, tek eksenli çekme gerilmesi altında malzemeler gerilme yönünde uzarken bu yöne dik doğrultularda (2 ve 3) daralır. Malzemede meydana gelen endeki daralmanın boydaki uzamaya oranı poisson oranı olarak bilinir. Bu oran kauçuk gibi tam elastik malzemeler için 0.5 iken, mantar için 0, çelik için ise 0.3’tür [71].



Şekil 4.14. Tek eksenli çekme yükü altındaki bir parça (sac) kabulü.

Plastik deformasyon işlemlerinde hacmin değişmediği kabul edilirse Denklem 4.20, 4.21, 4.22 ve 4.23'ten hareket ederek Poisson oranının alabileceği maksimum değer 0.5'dir. Bu ancak sacın Şekil 4.14'te tanımlanan (1 2 3) referans eksen takımına göre, 2 ve 3 eksenleri doğrultusunda eş daralması ile mümkündür. Ancak sacın kalınlığı boyunca (3 doğrultusu) daralma çok az olduğundan bu şartın sağlanması mümkün değildir. Bu çalışmadaki şekil değiştirme ölçümlerine göre Poisson oranı için uygun aralık 0.3-0.35 olabileceği belirlenmiştir.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu \cdot \varepsilon_1 = -\nu \cdot \frac{\sigma_1}{E} \quad (4.21)$$

$$\Delta v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_1}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_1}{E} \quad (4.22)$$

$$0 = \frac{\sigma_1}{E} \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \quad (4.23)$$

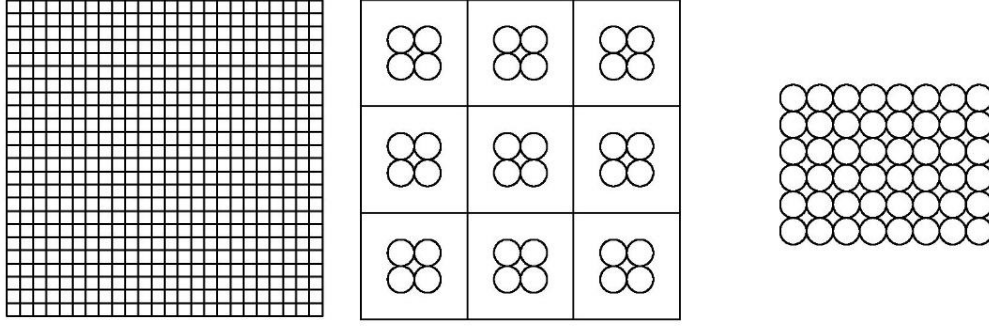
4.3 Saclar İçin Şekillendirilebilirlik Test Metotları

4.3.1 Erichsen testi

Özellikle karmaşık şekilli metal sac parçalar için şekillendirmenin analitik olarak incelenmesi güç olduğundan, malzemenin üretim koşullarındaki davranışını belirlemek amacıyla, şekillendirme sınır diyagramlarından faydalanılır. Bu diyagrama ulaşmak için yüzey markalama ve yükleme işlemleri yapmak gerekir.

a) Yüzey markalama

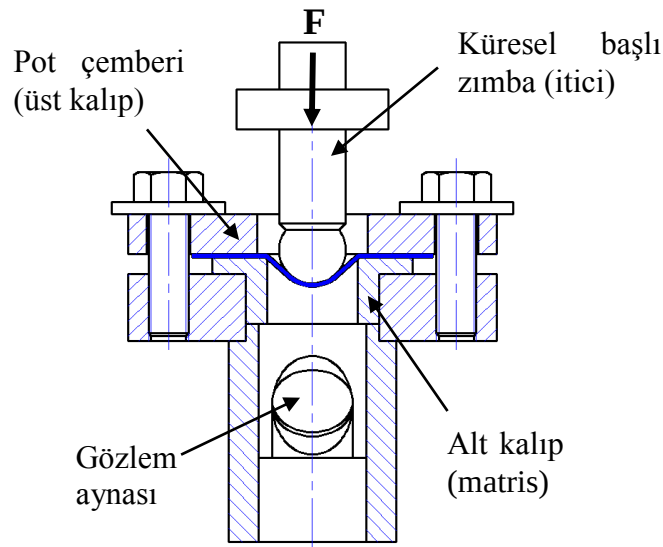
Bir şekillendirme sınır diyagramının elde edilebilmesi için önce 60x60 mm² sac malzeme yüzeyi Şekil 4.15'te görüldüğü gibi lazer tekniği, elektrokimyasal teknik vb. yollarla aynı büyüklüklerde kareler veya çemberlerden oluşacak şekilde çizilerek markalanır.



Şekil 4.15. Sac yüzeyine çizilen ağ çeşitleri (yuvarlak [48], kare [76]).

b) Yükleme

Üzerine desen çizilen sac, kalıp ile tutucu (pot çemberi) arasına konularak M12 cıvatalar ile sıkılır (Şekil 4.16). Daha sonra yağlama yapılmadan yırtılma görülene kadar sac şekillendirilerek incelme (boyun) ve yırtılma oluşan bölgelerde dairelerin şekil değişimi incelenir. Desenli saclara yük uygulanırken desenler ezilmesin diye, zımba desenli yüzeyin arka tarafından temas edecek şekilde yükleme yapılmıştır. Deney düzeneği detaylı kesit görüntüsü Ek A’da verilmiştir.



Şekil 4.16. Erichsen deney düzeneği (Kesit görünüm).

4.3.1.1 Deney Düzeneği

Bölümümüz Konstrüksiyon ve İmalat Laboratuvarında G.U.N.T. marka WP 300.11 model 1 adet Erichsen deney düzeneği mevcuttur. Ayrıca bu düzeneğe farklı

modüller takılarak farklı deneyler yapmakta mümkündür (çekme testi, eğme testi, sertlik ölçümü gibi).

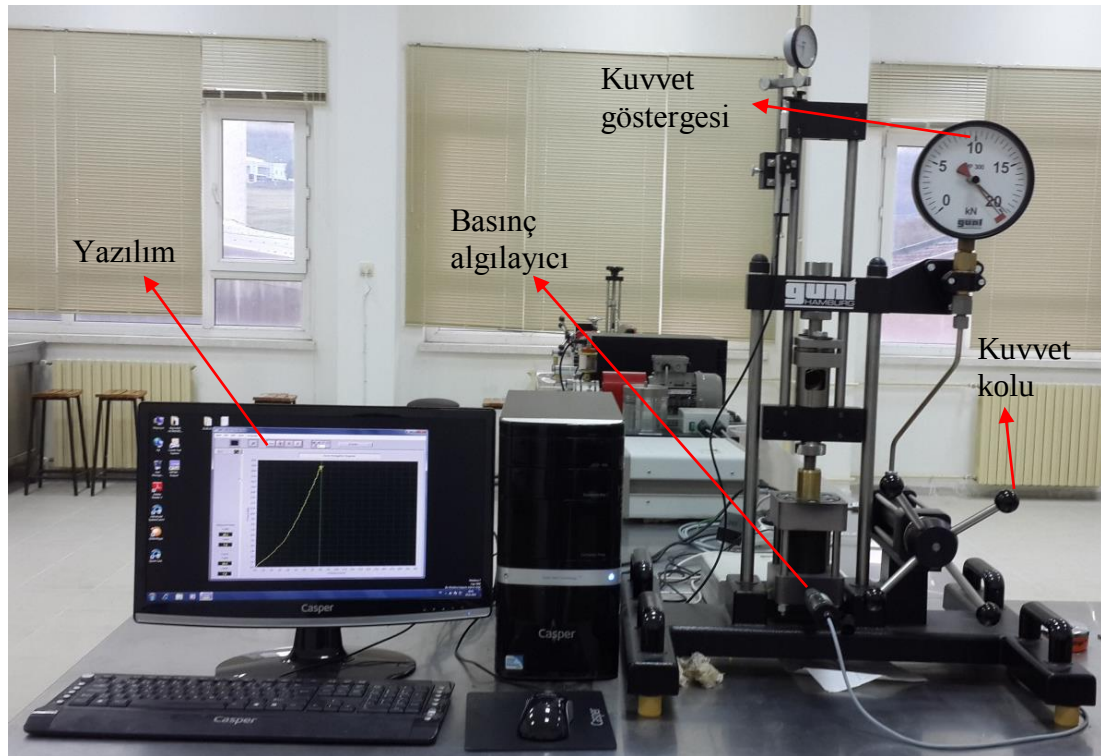
a) İnce sacların derin çekilmesi

Bu deney düzeneği 3 mm ve daha ince sacların şekil alma kabiliyetlerini belirlemek için tasarlanmıştır.

Derin çekme deneyinde, sac metal numune alt kalıp içerisine, küresel bir zımba yardımıyla, sac numunede yırtık oluşuncaya kadar çekilir. Sac ortasında oluşan çukurun d (mm) derinliği sacın derin çekilme kabiliyetini gösterir.

b) Deney düzeneği ve donanımı

Derin çekme deney düzeneği G.U.N.T. Universal Test Machine WP 300 ile bağlantılı aksesuar eklentisidir. Derin çekme işlemi, WP 300'ün alt traversi ile üst traversi arasında bulunan kompresyon kısmında gerçekleşir. Deney sırasındaki yükleme değeri analog kadrandan okunabilmekte ve aynı zamanda 1 saniye aralıklarla kuvvet ve deformasyon derinliği değerleri bilgisayar ortamına veri toplayıcı (Data Logger) vasıtasıyla aktarılmaktadır. Aşağıda deney düzeneğinin genel bir görüntüsü bulunmaktadır (Şekil 4.17 ve 4.18).

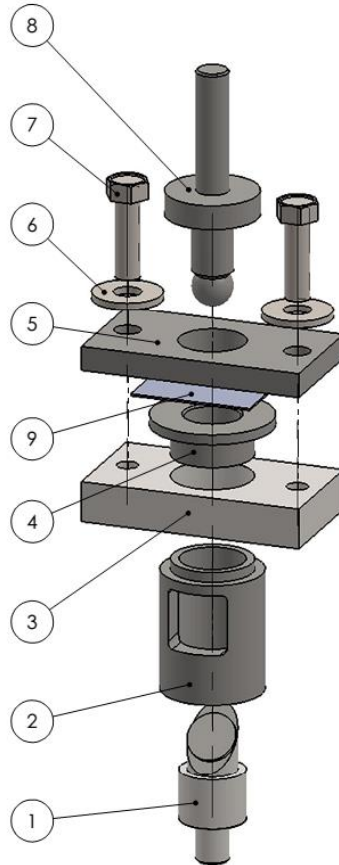


Şekil 4.17. Erichsen deney düzeneği (İmalat ve Konstrüksiyon Lab.).



Şekil 4.18. GUNT WP 300.11 Erichsen deney düzeneği [77].

Deney düzeneği Şekil 4.19’da görüldüğü üzere 8 parçadan oluşmaktadır. 9 numaralı sac numune kalıp ile tutucu plaka arasına konularak cıvatalar yardımıyla sıkılır. Derin çekme işlemi yapılırken 1 numaralı parçadaki ayna vasıtasıyla 2 numaralı gözlem silindirinden numune üzerinde hasar oluşumu izlenebilmektedir.



Şekil 4.19. Erichsen deney düzeneği patlatılmış katı model montaj görüntüsü.

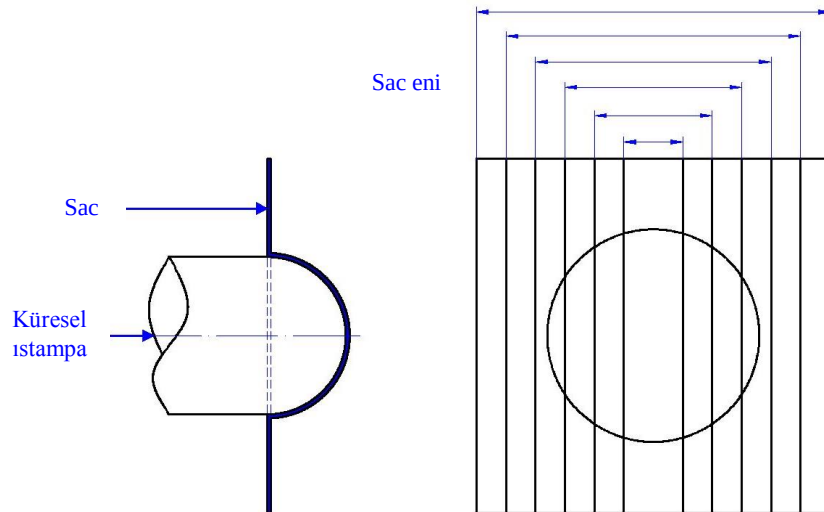
Çizelge 4.4'te Erichsen deney modülünün parça listesi verilmiştir.

Çizelge 4.4. Erichsen deney modülü parçaları.

Parça No	Parça Adı	Adet
1	Ayna	1
2	Gözlem silindiri	1
3	Alt kalıp tutucu	1
4	Alt kalıp	1
5	Pot çemberi	1
6	Rondela 12 TS79/1	2
7	Altı köşe başlı cıvata M12x1.75x40	2
8	Zimba	1
9	Düz sac numune	1

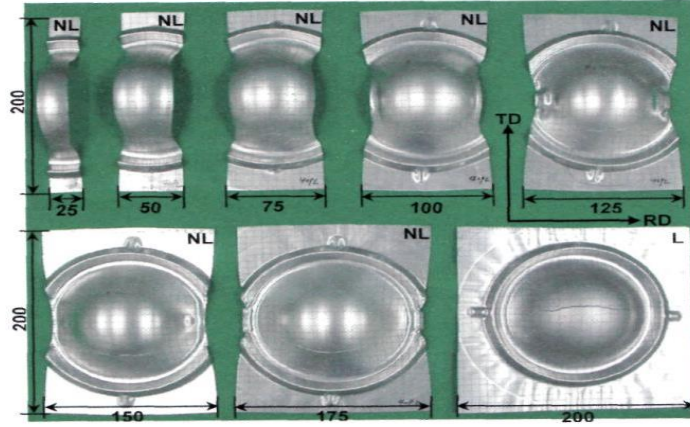
4.3.1.2 Şekillendirme sınır diyagramları

Şekillendirmede, eşit olmayan iki eksenli germe durumu oluşturmak amacıyla, değişik ebatlarda sac örnekler kullanılır (Şekil 4.20). Kare bir sacın şişirilmesinde eşit iki eksenli germe söz konusu iken daha küçük ebatlı bir örnekteki germe işlemi tek eksenli gerilme hali gibidir. Dolayısıyla Şekil 4.20' de artan sac eni ile birlikte gerilme hali tek eksenliden iki eksenli gerilme haline dönüşür [48].



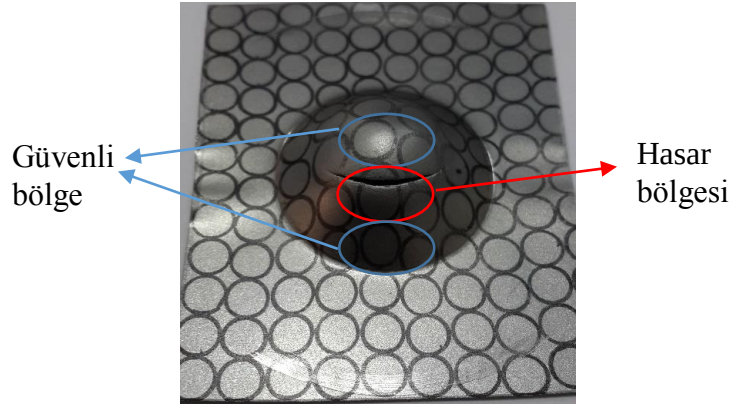
Şekil 4.20. Değişik ebatlarda sac örnekleri [47].

Farklı enlerde kesilerek derin çekilmiş deney numuneleri Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21. Farklı enlerde kesilerek derin çekilmiş örnek numuneler [78].

Numunelerin test sonunda hasara uğraması sonucunda hasar bölgesinden ve hasara en yakın iki taraftaki şekil değiştirmiş dairelerden ölçüm alınır (Şekil 4.22).

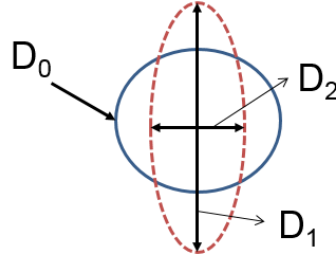


Şekil 4.22. Hasara uğramış numuneden ölçüm alınması.

Numunelerin şişirme sonrası şekil değiştirmesi sonucunda, Şekil 4.23’de görüldüğü gibi, başlangıçta sac yüzeyine işaretlenmiş olan dairenin çapında (D_0), ya büyüme olur (dengeli iki eksenli çekme gerilmesi durumu) veya daire elipse dönüşür. Şekil değiştirmiş dairenin en büyük eksenini D_1 ve en küçük eksenini D_2 ölçülerek, en büyük (e_1) ve en küçük (e_2) birim şekil değiştirme miktarları bulunur. Aynı şekilde sac yüzeyine daire yerine kare çizimleri ile işaretleme yapıldığında; deformasyon sonrası kare şekil değiştirerek dikdörtgen halini alacaktır. Bu durumda dikdörtgenin büyük kenarı büyük şekil değiştirme, küçük kenarı ise küçük şekil değiştirme olarak değerlendirilir. Birim şekil değiştirmelerin hesaplanmasında kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$e_1 = \frac{(D_1 - D_0)}{D_0} \quad (4.24)$$

$$e_2 = \frac{(D_2 - D_0)}{D_0} \quad (4.25)$$



Şekil 4.23. Başlangıç dairesi ve başlangıç dairesinin şekil değiştirmesinden sonraki durumu.

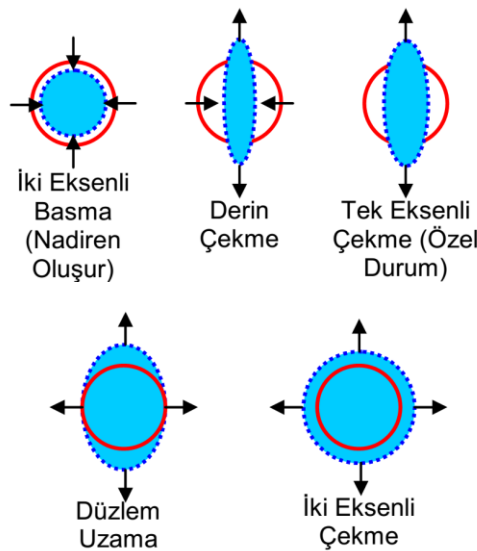
e_1 ve e_2 değerleri mühendislik şekildeğiştirme değerleridir. Literatürde gerçek uzama/daralma değerleri kullanılır. Gerçek şekil değiştirme ise [7];

$$\varepsilon_{maks} = \ln \left(\frac{D_1}{D_0} \right) \quad (4.26)$$

$$\varepsilon_{min} = \ln \left(\frac{D_2}{D_0} \right) \quad (4.27)$$

eşitliklerinden bulunur.

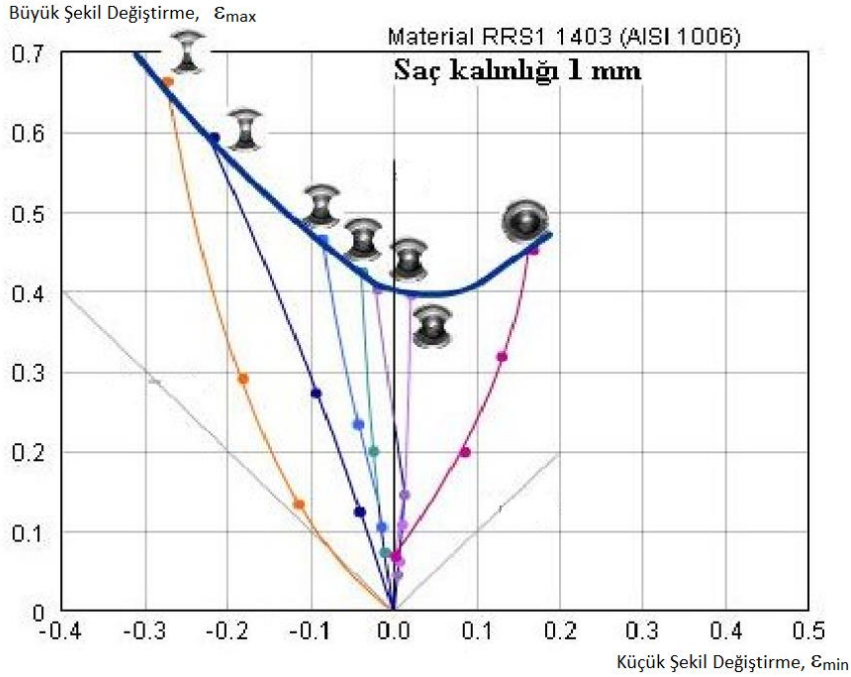
Sac malzemelerin işlevsel bir parçaya dönüştürülmesi sırasında, malzemede meydana gelebilecek yükleme durumları Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.24. Çemberlerle işaretlenmiş sac metal malzemenin şekillendirilmesinde karşılaşılabilecek durumlar [7].

Şekillendirme sırasında iki eksenli basma, derin çekme, tek eksenli çekme, düzlem uzama ve iki eksenli çekme şartları oluşmaktadır. Sacın üçüncü boyutta şekil değiştirmedeği kabul edilmektedir.

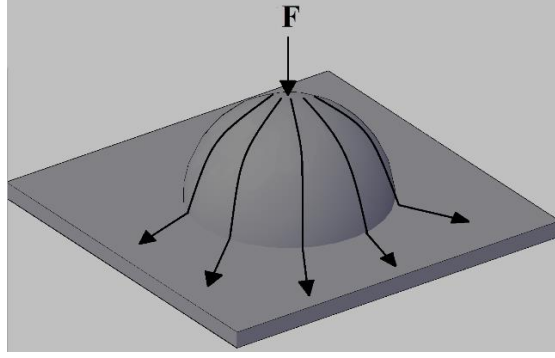
Farklı test yöntemleriyle, farklı yükler altında sac metal malzemede meydana gelebilecek şekil değişimleri (büyük ve küçük şekil değiştirmeler) bir diyagram üzerinde gösterildiğinde Şekil 4.25'te görülen “Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD)” elde edilir. Şekillendirme sınır diyagramlarında, dikey eksen büyük şekil değiştirme miktarı, yatay eksen ise küçük şekil değiştirme miktarını göstermektedir. Şekil değiştirerek elips halini alan dairenin büyük ekseninden hesaplanan şekil değiştirme miktarı ile küçük ekseninden hesaplanan şekil değiştirme miktarı dairenin grafikteki koordinatlarını belirlemektedir. Böylece yırtık bölgesinde ve yakınlarındaki her bir şekil değiştirmiş daire şekillendirme sınır diyagramında bir nokta ile temsil edilir. Daha sonra hasarlı bölgelerden alınan ölçümler arasında lineer regresyon analizi yapılarak eğri uydurulur. Böylece şekillendirme sınır eğrisi oluşturulmuş olur. ŞSD incelendiğinde, şekil değişimlerinin mavi çizginin altında kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla bu çizginin altı güvenli çalışma bölgesi üstü ise hasar bölgesidir.



Şekil 4.25. Şekillendirme sınır diyagramı örneği [78-79].

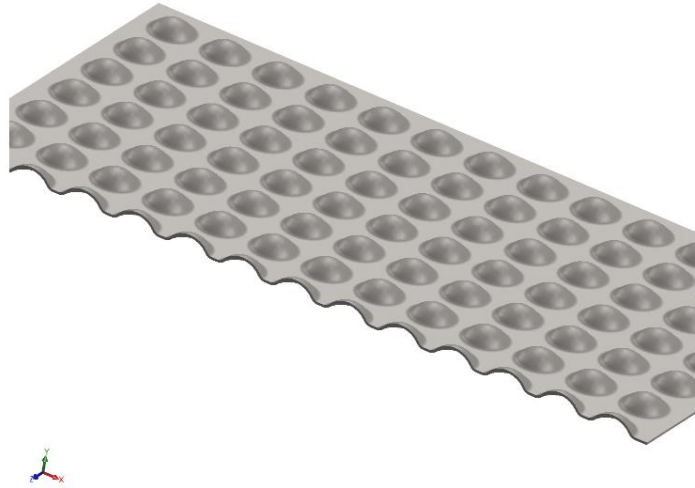
4.3.1.3 Sac yüzeylerinin hazırlanması (Desen basımı)

Çalışmamızda piyasada bulunan standart baskılı saclar yerine bu tez çalışmasına özgü tasarlanmış kalıplarda profesyonelce yarı küresel desen basılmış saclar kullanılmıştır. Mukavemet artırma işlemi sac yüzeylerine, farklı çaplarda hazırlanmış yarı küresel kabartma desen baskıları yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, yarı küresel kabartma geometrisinin seçilme nedeni, yükü (F) yüzeye düzgün yaymak (Şekil 4.26), yüzeyde çentik etkisi meydana getirme riskini azaltmak ve küreler etrafında gerilme yığılmalarının daha üniform dağılımını sağlamaktır.

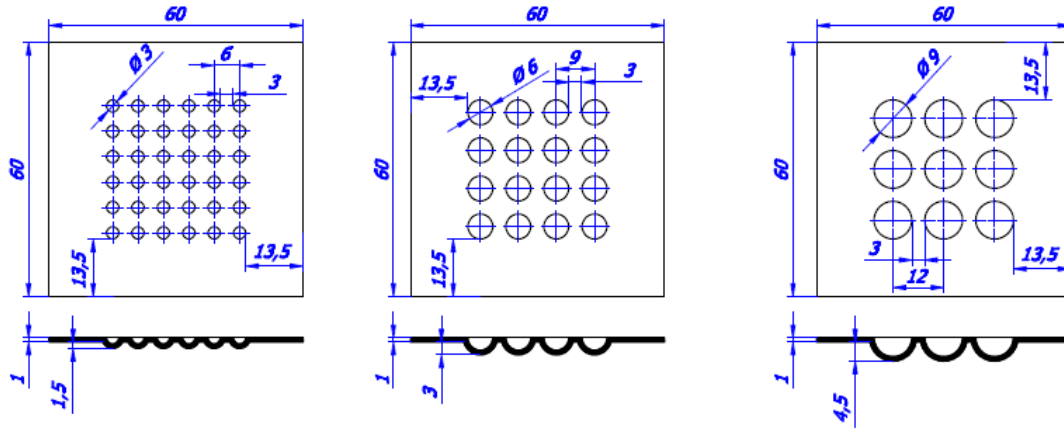


Şekil 4.26. Yarı küresel kubbe geometrisinde yükün dağılımı.

Çalışmada kullanılacak saclara 3, 6 ve 9 mm çapında ve yaklaşık sırasıyla 1.5, 3 ve 4.5 mm derinliğe sahip yarı küresel baskılar yapılmıştır. Yarı küresel baskıların merkezleri arası mesafeler sırasıyla 6, 9 ve 12 mm olacak şekilde basılmıştır. Tasarlanan yarı küresel kabartma deseninin kesit katı modeli Şekil 4.27’de verilmiştir. Ayrıca sac yüzeylerine basılan desenlere ait teknik çizimler Şekil 4.28’de verilmiştir. Yarı küresel desenler sac yüzeylerine aynı alana sırasıyla 36, 16 ve 9 adet basılmıştır.



Şekil 4.27. Bu çalışma için tasarlanan yarı küresel desenli yüzeyin katı modeli.



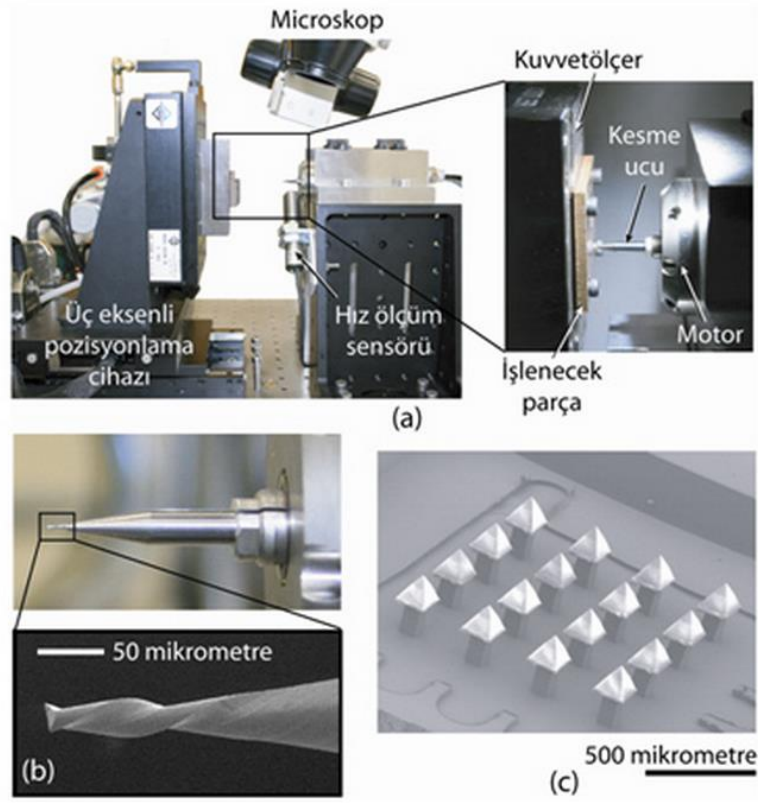
Şekil 4.28. Dubleks paslanmaz çelik saclara basılan yüzey kabartı profilleri.

4.3.1.4 Desen kalıplarının imalatı ve prototip desenli sac numune üretimi

Kullanılacak yarı küresel desenler, çelik sac numune yüzeylerine TİMAY TEMPO (Merzifon) firmasında, mikro işleme (Micromachining) yöntemi ile hazırlanan kalıplarda, hidrolik bir pres vasıtası ile basılmıştır [27].

Mikro işleme geleneksel frezeleme ve delme gibi talaşlı imalat yöntemlerinin minyatürleştirilmiş halidir. Mikro boyutlarda kesici uçlar yardımıyla malzemenin istenmeyen kısmı talaş kaldırarak işlenir.

Mikro parça boyutlarına daha iyi hakim olmak, gerekli yer, enerji ve maliyeti düşürmek için minyatür parça işleme tezgahları tasarlanıp, test edilmektedir (Şekil 4.29). Minyatür tezgâhlarda yüksek hassasiyette ve doğrulukta çalışan pozisyonlama cihazları, yüksek devirlerde kesme ucunu döndüren hava ile çalışan motorlar ve ölçüm/gözlem cihazları (hızölçerler, kuvvetölçerler, mikroskoplar vb.) bulunur. Kesici uçlar çok sert malzemelerden (tungsten karbid, elmas) mikro-taşlama/cılalama yöntemi ile üretilir.



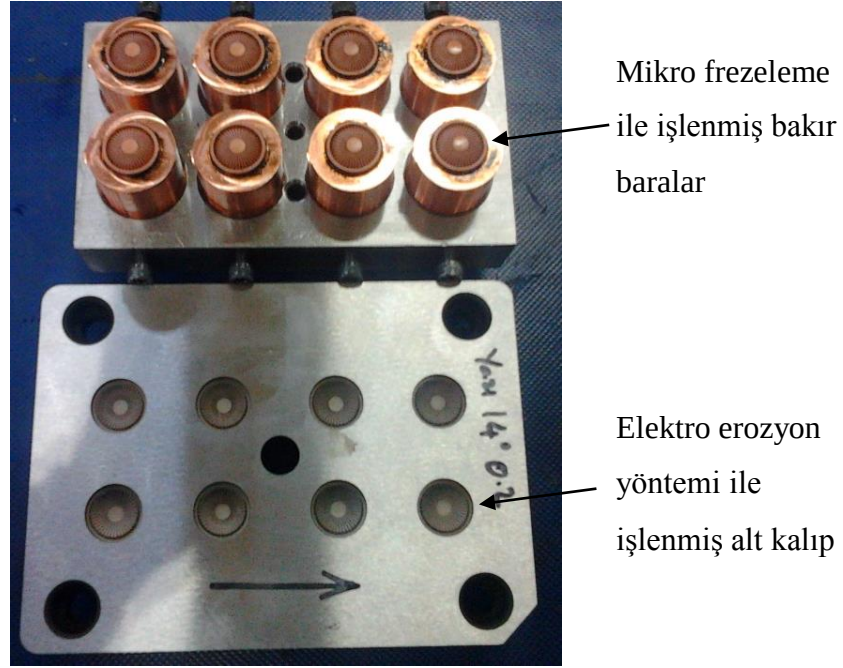
Şekil 4.29. a) Mikro işleme için kullanılan bir minyatür tezgah, b) mikro kesme ucu, c) mikro işleme ile polimerden üretilmiş bir medikal mikro iğne grubu [80].

Şekil 4.30’da örnek bir metal yüzeyin bir takım (freze ucu) mikro frezeleme işlemi görülmektedir. Kafa üzerine bağlı mikro freze ucu iş parçası üzerinde ufak yuvalar açmaktadır.



Şekil 4.30. Mikro frezeleme işlemi [81].

Şekil 4.31’de mikro frezeleme işlemi ile üretilmiş bakır baralar ve bu bakır baralar ile elektro erozyon yöntemiyle üretilmiş alt kalıp görülmektedir. TİMAY TEMPO firmasında düğme kalıplarının üretiminde mikro frezeleme işlemi sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Firma öncelikle bakır bara üzerine istenilen baskıyı mikro frezeleme işlemi ile üst kalıp şeklinde işler. Daha sonra bu bakır baralar elektro erozyon tezgahına bağlanarak metal erozyonu ile alt kalıp oluşmasını sağlar.



Şekil 4.31. TİMAY TEMPO firmasında mikro frezeleme ile üretilmiş bakır baralar.

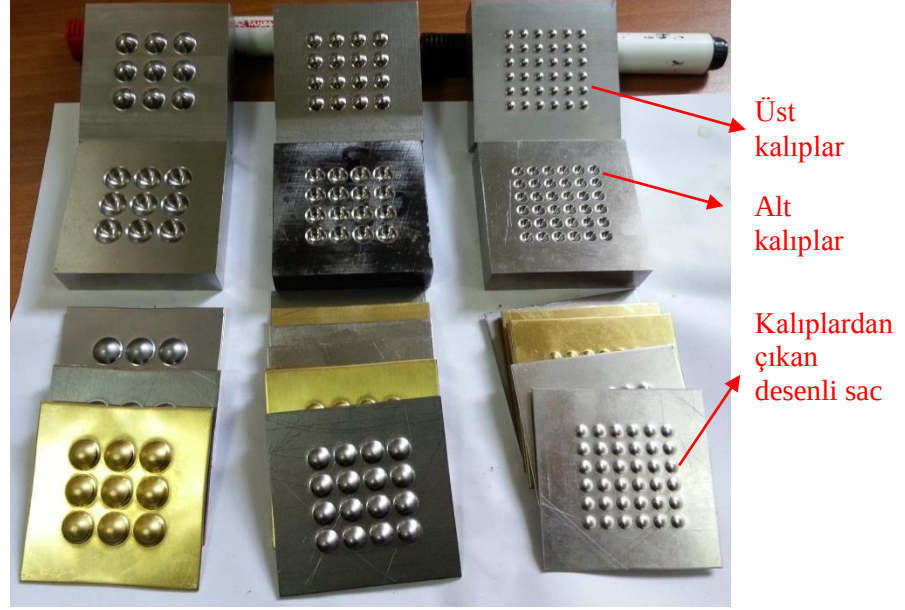
Şekil 4.32’de metal parça üzerine TİMAY TEMPO firmasında mikro frezeleme yöntemi ile işlenmiş üniversitemiz logosu görülmektedir.



Şekil 4.32. Mikro frezeleme ile işlenmiş kalıpla yapılmış üniversitemiz logosu (TİMAY TEMPO-Merzifon firması izniyle).

Şekil 4.33’te çalışmalarımızda kullanacağımız desenli sac numuneler ve bu numunelerin basıldığı kalıplar görülmektedir. Verilmek istenen kesit profillerine uygun ayrı kalıplar, TİMAY TEMPO firmasında, mikro işleme tezgahında talaşlı

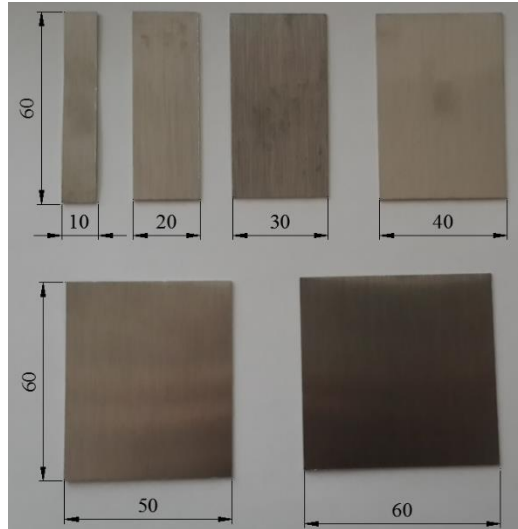
hazırlanmıştır. Üretilen kalıplar yine bu firmada 10 tonluk prese bağlanarak ön deneme amaçlı 1 mm kalınlığındaki bakır, pirinç, paslanmaz çelik ve alüminyum sac numuneler üzerine desenler basılmıştır.



Şekil 4.33. Yarı küresel desenler basılmış sac ve kalıpları

4.3.1.5 Erichsen testi numunelerinin hazırlanması

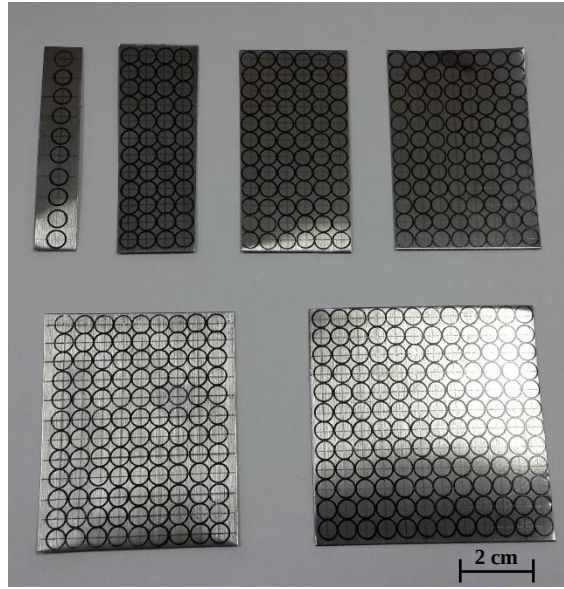
Dubleks paslanmaz çelik sac 1000x2000x0.5 mm³ boyutunda 1 tabaka halinde yurtdışından (OUTOKUMPU, İsveç) tedarik edilmiştir. Sac uzun kenarından 60 mm aralıklarla giyotinde kesilerek 60x1000 mm²'lik şeritler elde edilmiştir. Şeritler Erichsen testi için gerekli olan 60x10 mm² den 60x60 mm² ye kadar genişliği 10'ar mm arttırılarak dilimlenmiştir (Şekil 4.34).



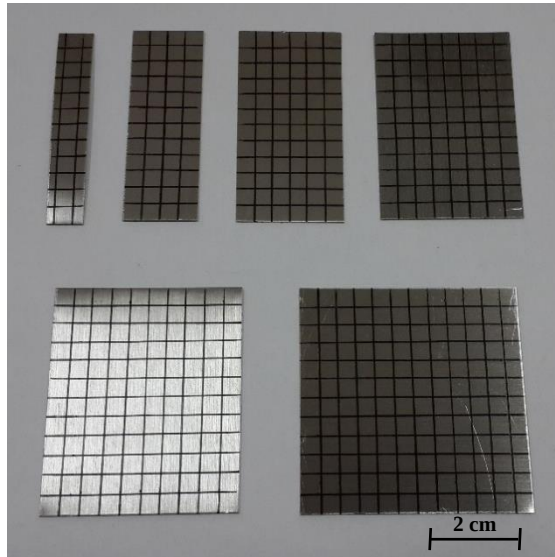
Şekil 4.34. Dilimlenmiş numuneler (ölçüler mm cinsindendir).

Şekil 4.34'te görülen numunelerden düz sac için 4 set, 3 mm çaplı yarı küresel desenli sac için 4 set, 6 mm yarı küresel desenli sac için 4 set, 9 mm yarı küresel desenli sac için 4 set dilimlenmiştir.

Düz sac numunelere deney esnasında oluşan deformasyonu gözlemleyebilmek için ilk önce 5 mm çapında dairesel ağ (grid) çizilmiştir. Dairesel grid (Şekil 4.35) çizimlerinin zaman alması ve çok fazla numuneye uygulanacak olması sebebiyle bu uygulamadan vazgeçilmiş ve bunun yerine 5 mm aralıklı kare grid çizilmiştir (Şekil 4.36).



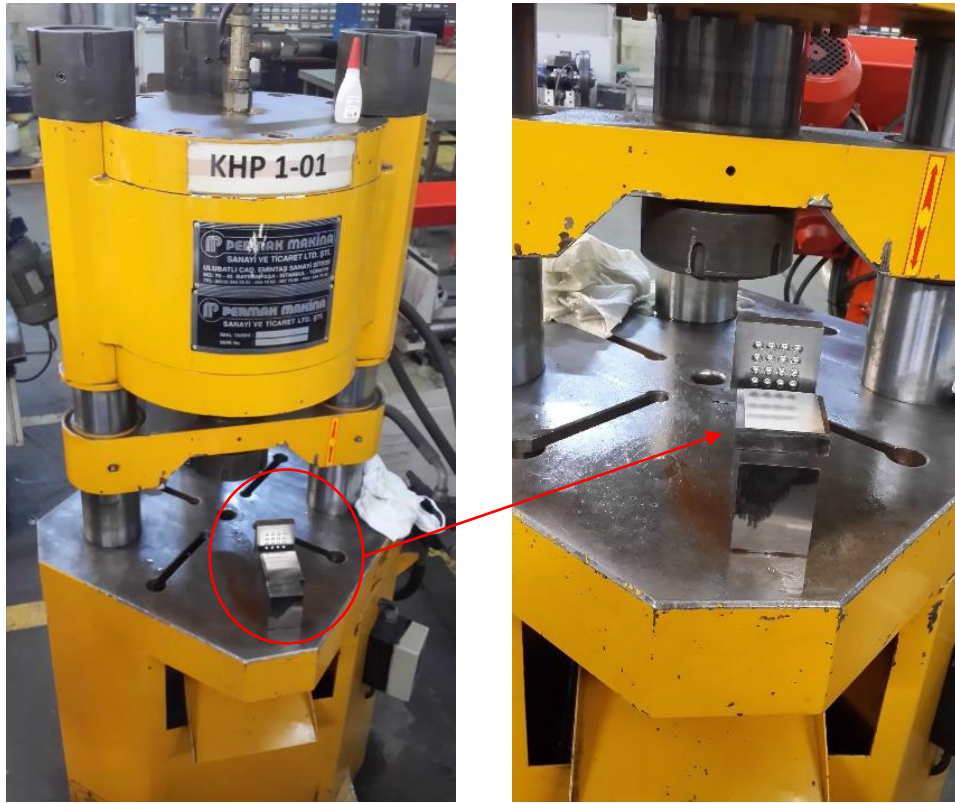
Şekil 4.35. Çemberler çizilerek markalanmış numuneler.



Şekil 4.36. Kareler çizilerek markalanmış numuneler.

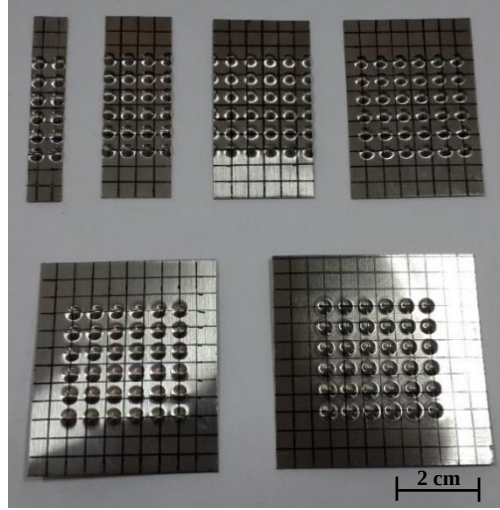
Desenli sacların desenlerinin basılmasından önce de aynı işlemler uygulanmıştır. Çünkü desen basımından sonraki profil yüzey geometrisi düzgün bir şekilde grid yapısı çizmeyi engellemektedir. Dolayısı ile düz saclara desen basılmadan önce grid çizimleri yapılmış daha sonra desen basma işlemine geçilmiştir.

Düz saclara desen basım işlemi TİMAY TEMPO A.Ş. (Merzifon) firmasında gerçekleştirilmiştir. Önceden dilimlenmiş ve üzerine grid çizimleri yapılmış saclara PERMAK marka 100 tonluk bir hidrolik preste, daha önceden yine TİMAY TEMPO A.Ş. firmasında hazırlatmış olduğumuz kalıplar ile desenler basılmıştır (Şekil 4.37).



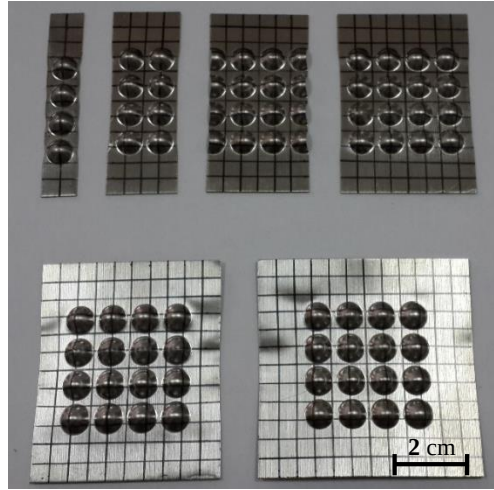
Şekil 4.37. 100 tonluk hidrolik şekil verme presi (Desen basma işlemi).

Desen basım işlemi esnasında sacların grid çizilmemiş tarafından kuvvet uygulanarak oluşan desenlerin grid çizimleri yapılmış yüzeye çıkması sağlanmıştır. Şekil 4.38’de görülen 3 mm çaplı yarı küresel desenler dubleks paslanmaz çelik sac numunelere hidrolik preste yaklaşık 60-70 bar basınçta basılarak oluşturulmuştur. Numunelerde herhangi bir yırtık veya çatlak gözlenmemiştir. Ancak sac genişliği arttıkça sacın bir miktar çarpıldığı gözlenmiştir.



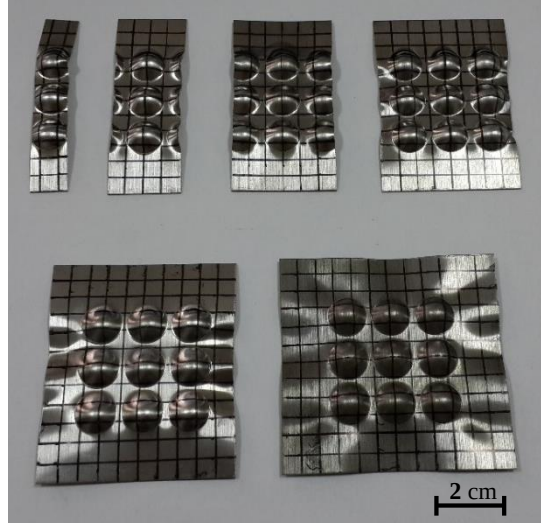
Şekil 4.38. 3 mm çaplı yarı küresel desen basılmış sac numuneler.

Şekil 4.39’da görülen 6 mm çaplı yarı küresel desenler dubleks paslanmaz çelik sac numunelere hidrolik preste yaklaşık 60-70 bar basınçta basılarak oluşturulmuştur. Numunelerde herhangi bir yırtık veya çatlak gözlenmemiştir. Ancak sacların desenlerin olduğu bölgelerden içeriye doğru çekilerek orta bölümlerdeki sac genişliğinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.39. 6 mm çaplı yarı küresel desen basılmış sac numuneler.

Şekil 4.40’ta görülen 9 mm çaplı yarı küresel desenli dubleks paslanmaz çelik sac numunelere hidrolik preste yaklaşık 50 bar basınçta basılarak oluşturulmuştur. Daha yüksek basınç uygulandığında desenler üzerinde yırtılma gözlenmiştir. Yırtılmayı önlemek amacıyla kalıba daha düşük basınç uygulanmıştır. Bu durumda da alt kalıp ile üst kalıp tam kapanmadığı için sacda marullanma (kırışma) ve distorsiyon (çarpılmalar) meydana gelmiştir.



Şekil 4.40. 9 mm çaplı yarı küresel desen basılmış sac numuneler.

4.3.1.6 Pot çemberi baskı kuvvetinin hesaplanması

Derin çekme işlemlerinde pot çemberine uygulanması gereken basıncın seviyesi oldukça önemlidir. Yüksek basınçlar malzemelerde aşırı incelmelere ve yırtılmalara, düşük basınçlar ise kırışmaya neden olduğundan pot çemberinin saca uyguladığı basma için optimum bir değer seçilmesi gerekmektedir. Pratikte bu amaç için sac malzemesinin akma dayanımının %1.5 seviyesinde oluşturulan basınçlar pot çemberine uygulanmaktadır [82]. Bu çalışmada dubleks paslanmaz çelik saca uygulanacak tutucu kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Off-set kuralına göre malzemenin akma gerilmesi (%0.2 plastik şekil değişimine karşılık gelen akma gerilmesi);

$$\sigma_{0.2} = 460 \text{ MPa} \quad (4.28)$$

Pot çemberine uygulanması gereken basınç;

$$p = 0.015 \cdot \sigma_{0.2} = 0.015 \cdot 460 = 6.9 \text{ MPa} \quad (4.29)$$

Pot çemberine uygulanması gereken kuvvet;

$$F_N = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_2^2) \cdot p = \frac{\pi}{4} \cdot (60^2 - 27^2) \cdot 6.9 = 15558.65 \text{ N} \quad (4.30)$$

Cıvatalara uygulanacak sıkma momenti (M_s) [83];

$$F_{\text{ön}} = \frac{F_N}{\text{Cıvata sayısı}} = \frac{15558.65}{2} = 7779.325 \text{ N} \quad (4.31)$$

$$M_s = F_{\text{ön}} \cdot [r_2 \cdot \tan(\alpha_m + \rho') + \mu_s \cdot R_s] \quad (4.32)$$

M12 cıvata için;

$$r_2 = \frac{d_2}{2} = \frac{10.863}{2} = 5.431 \text{ mm} \quad (4.33)$$

$$\mu_s = 0.2 \quad (4.34)$$

$$R_s \cong 0.7 \cdot d = 8.4 \text{ mm} \quad (4.35)$$

$$\alpha_m = \text{atan}\left(\frac{h}{\pi \cdot d_2}\right) = \text{atan}\left(\frac{1.75}{\pi \cdot 10.863}\right) = 2.935^\circ \quad (4.36)$$

$$\rho' = \text{atan}\left(\frac{\mu}{\cos(\beta/2)}\right) = \text{atan}\left(\frac{0.2}{\cos(60/2)}\right) = 13.004^\circ \quad (4.37)$$

Bu değerlerden sıkma momenti,

$$\begin{aligned} M_s &= 7779.325 \cdot [5.431 \cdot \text{tg}(2.935 + 13.003) + 0.2 \cdot 8.4] \\ &= 25135.76 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (4.38)$$

$M_s \cong 25.135 \text{ Nm}$ olarak bulunur. Her iki cıvatanın da 25.135 Nm tork ile sıkılması durumunda sac üzerinde yaklaşık 15.56 kN'luk bir baskı kuvveti oluşacaktır. Ancak torkmetre ile minimum 50 Nm'lik tork kontrollü olarak uygulanabilmektedir. Bu durumda sac üzerinde oluşacak baskı kuvveti;

$$\begin{aligned} F_{\text{ö}} &= \frac{M_s}{[r_2 \cdot \tan(\alpha_m + \rho') + \mu_0 \cdot r_s]} \\ &= \frac{50000}{[5.431 \cdot \tan(2.935 + 13.003) + 0.2 \cdot 8.4]} = 15474 \text{ N} \end{aligned} \quad (4.39)$$

$$F_N = 2 \cdot F_{\text{ö}} = 2 \cdot 15474 = 30948 \text{ N} \quad (4.40)$$

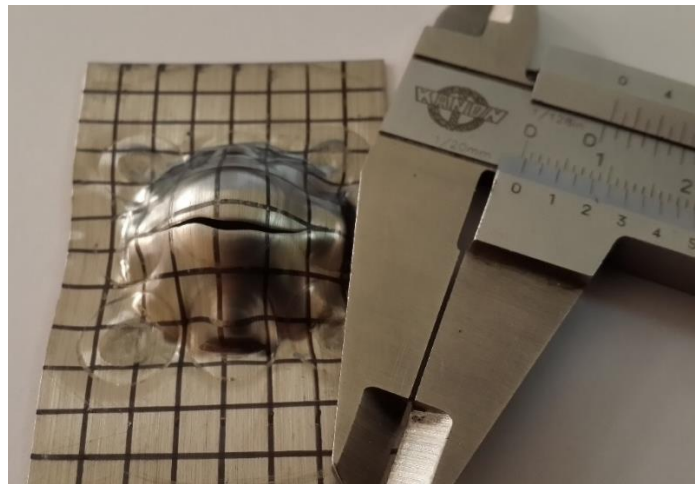
$F_N \cong 30.95 \text{ kN}$ olarak bulunur. Pot çemberi üzerindeki cıvatalar bu tork değeri ile sıkıldığında sacda bu sıkma kuvvetinden kaynaklanan herhangi bir yırtılma gözlenmemiştir. Dolayısıyla bu tork değeri (50 Nm) ile cıvataların sıkılması uygun bulunmuştur.

4.3.1.7 Şekillendirme sınır diyagramlarının çizilmesi

Derin çekme ile şekillendirilen sac metallerin şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Çünkü şekillendirme esnasında malzemenin

hasara uğrayıp uğramayacağı veya oluşacak hasarın hangi bölgelerde oluşacağını önceden kestirebilmek bu sayede mümkün olabilmektedir. Ayrıca daha önceden belirlenmiş şekillendirme sınır diyagramları üreticiyi yapılması zor ve uzun uğraşlar alan deneylerden de kurtarmaktadır. Elde edilen diyagramlar plastik şekillendirme analizinde kullanılan simülasyon programlarına girilerek deneysel sonuçlara çok yakın, hatta birebir örtüşen sonuçlar elde etmek mümkün olabilmektedir.

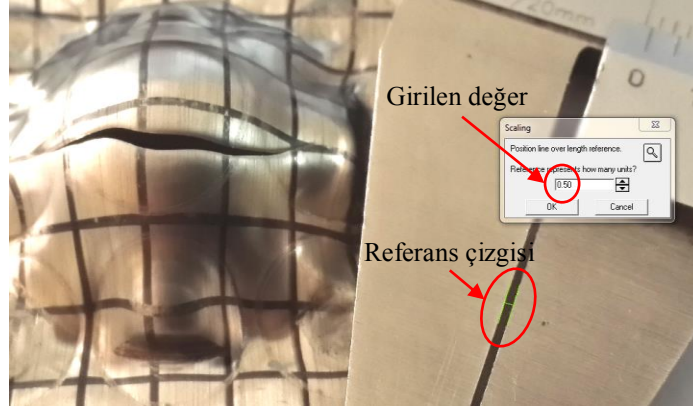
Bu bölümde daha önceden Erichsen testine tabi tutularak hasara uğratılmış düz ve desenli sacların şekillendirme sınır diyagramları belirlenmiştir. $60 \times 10 \text{ mm}^2$ den $60 \times 60 \text{ mm}^2$ ye kadar genişlikleri $10'$ ar mm arttırılarak oluşturulan 6 adet numune üzerine deney öncesinde gridler çizilmiştir. Üzerine grid çizilen saclardan bir kısmı düz olarak bırakılmış, kalanlara ise daha önceden hazırlanan kalıplarda yarı küresel desenler basılmıştır. Son olarak oluşan düz ve desenli saclar bölümümüz laboratuvarında GUNT WP300.11 Erichsen test modülünde saclar küresel bir zımba ile derin çekilerek yırtılıncaya kadar Erichsen testine tabi tutulmuştur. Deforme olan saclar yanlarına referans amaçlı bir kumpas konularak fotoğrafları çekilmiştir. Burada referans olarak kumpas seçilmesinin sebebi saclar üzerinde oluşan küçük deformasyon miktarlarını referans ölçüyü küçülterek daha yüksek hassasiyetle belirleyebilmektir. Bu amaçla 0.5 mm açılan kumpas, ölçülecek olan sacların yanına konularak uygun açıda fotoğrafları çekilmiştir (Şekil 4.41).



Şekil 4.41. Deforme olmuş sac ve referans kumpas.

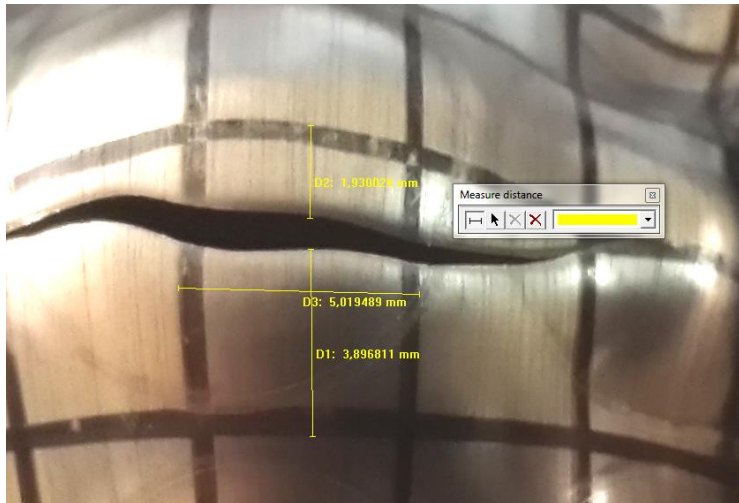
Fotoğrafları çekilen saclar Image-Pro Plus 6.0 görüntü işleme programına aktarılmıştır. Programda zıtlık (contrast) ve parlaklık (brightness) ayarları yapılarak

fotoğraflar netleştirilmiştir. Daha sonra aynı programda kumpas aralığı seçilerek referans ölçü değeri 0.5 mm olarak girilmiştir (Şekil 4.42). Girilen bu değer ile program referans çizginin geçtiği bölgedeki toplam piksel uzunluğunu 0.5 mm olarak kabul edilerek resim kalibre edilmiştir.



Şekil 4.42. Referans ölçü değerinin görüntü işlemede kalibrasyonu.

Programda referans ölçü tanımlandıktan sonra gridler üzerinden program yardımı ile ölçümler alınmıştır. Sac üzerinden ölçü alınırken ölçümün doğru olması amacıyla sadece fotoğraf makinesine dik olan grid üzerinden ölçü alınmıştır (Şekil 4.43). Aynı ölçümler basit bir iplik ile yapılarak sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. Ancak iplik ile ölçme yönteminin zaman alıcı olması ve ölçüm sayısının fazla olması fotoğraf üzerinden ölçüm yapmayı zorunlu kılmıştır. Şekil 4.43'te yırtılma hasarı oluşmuş bir grid (parsel) üzerinden ölçü alınmıştır. Yırtığın alt ve üst bölgesinden ayrı ayrı olarak alınan ölçümler toplanarak griddeki boyca toplam uzama ölçülmüştür. Ayrıca endeki değişimde ölçülerek kayıt altına alınmıştır.



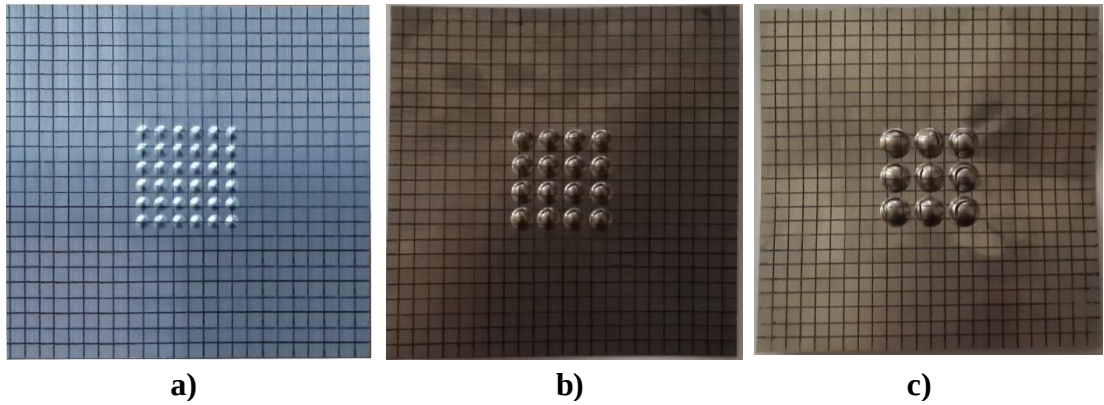
Şekil 4.43. Gridler (parseller) üzerinden ölçü alınması.

Alınan ölçümler ile en büyük ve en küçük şekil değıştirmeler hesaplanarak bir grafiğe aktarılmıştır.

4.3.2 Bulge testi

4.3.2.1 Bulge testi numunelerinin hazırlanması

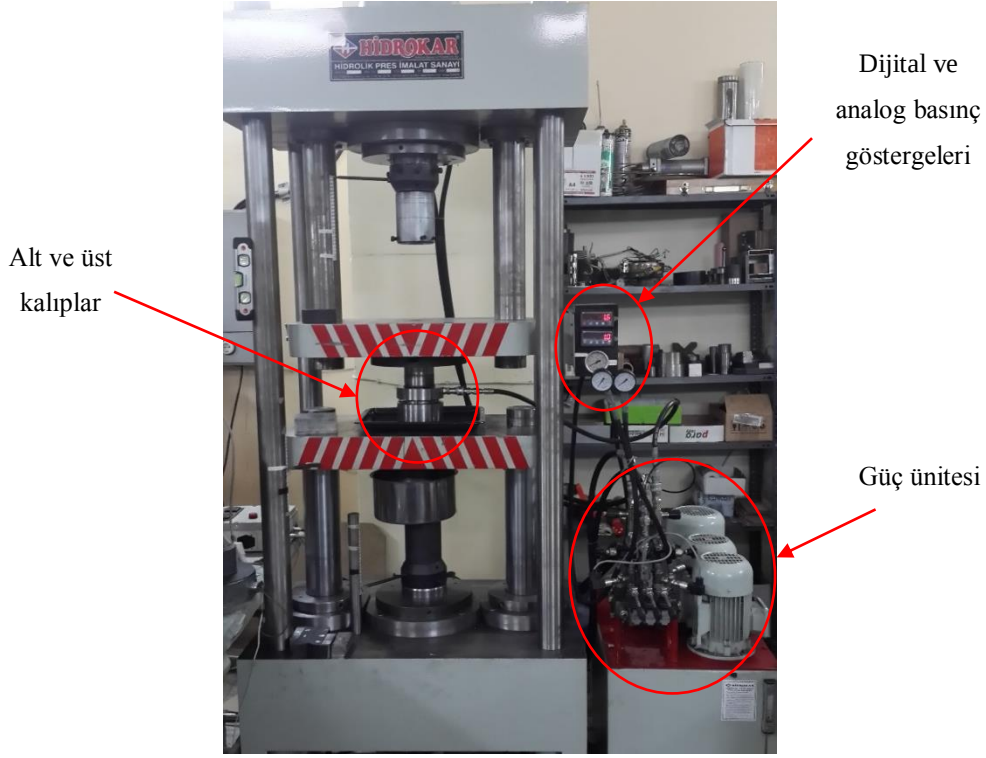
Bulge testi sacların şekil alma kabiliyetlerini belirlemek amaçlı yapılan Erichsen testi benzeri bir testir. Bulge testinde, Erichsen testinde zımba ile uygulanan kuvvet yerine hidrolik sıvı kullanılarak sac metaller hidrolik basınç altında deforme edilmektedir. Bu çalışmada 0.5 mm kalınlığındaki dubleks paslanmaz düz ve desenli çelik saclara Bulge testi uygulanmıştır. Bunun için dubleks paslanmaz çelik saclar 120x120 mm² boyutlarında (8 adet) kesilmiştir. Kesilen sacların 2 tanesi düz numune olarak ayrılmış kalan saclara TİMAY TEMPO A.Ş. (Merzifon) firmasında 3 mm, 6mm ve 9 mm çaplı yarı küresel desen basılmıştır (Şekil 4.44). Desen basımı esnasında özellikle 6 mm ve 9 mm çaplı yarı küresel desene sahip saclarda çarpılmalar ve desenler üzerinde yırtılmalar gözlenmiştir. Bu sebeple 6 mm ve 9 mm çaplı desenler, kalıplar tam kapatılmadan, desen tepe yüksekliği istenen seviyeden daha düşük olacak şekilde basılmıştır.



Şekil 4.44. 120x120 mm² boyutlarındaki aynı alan içerisine 3 mm (a), 6 mm (b) ve 9 mm (c) çaplı yarı küresel desen basılmış Bulge testi numuneleri.

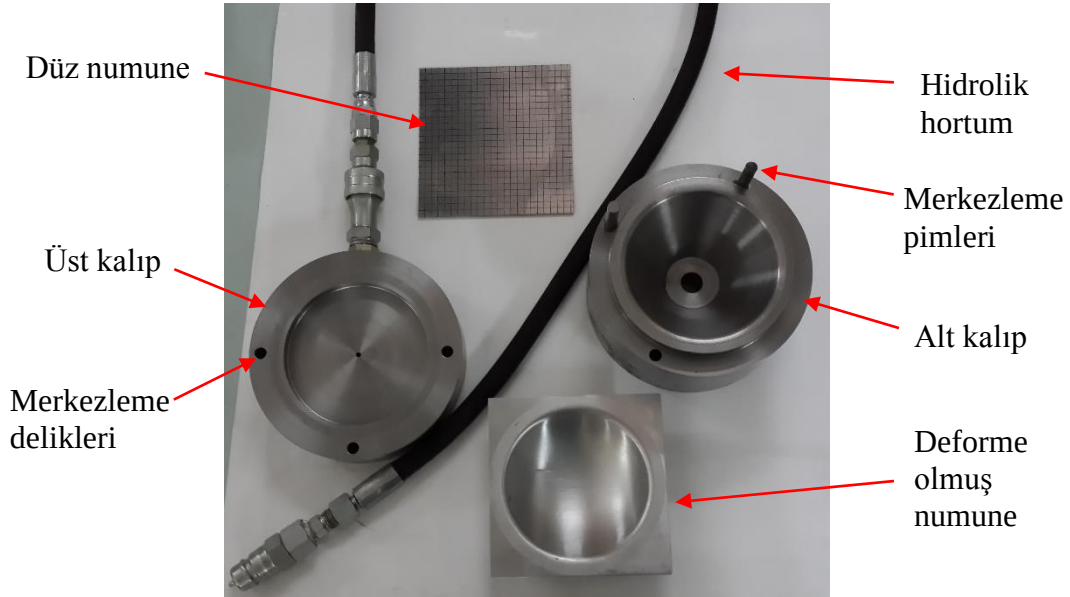
4.3.2.2 Bulge testinin yapılışı

Bu derin çekme testi, Erciyes Üniversitesi (Kayseri) Makina Mühendisliği Bölümü Kompozit Malzeme Araştırma Laboratuvarındaki 300 ton kapasiteli hidrolik pres ünitesinde (Şekil 4.45) gerçekleştirilmiştir. Daha önceden hazırlanmış 120x120 mm² boyutlarındaki sac numuneler bu laboratuvarında Bulge testine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.45. 300 tonluk hidrolik pres ve güç ünitesi.

Laboratuvarda bulunan hidrolik pres ünitesine daha önceden yaptırılmış olan hidrolik şekillendirme kalıbı (Şekil 4.46) bağlanarak Bulge testine uygun hale gelmektedir.

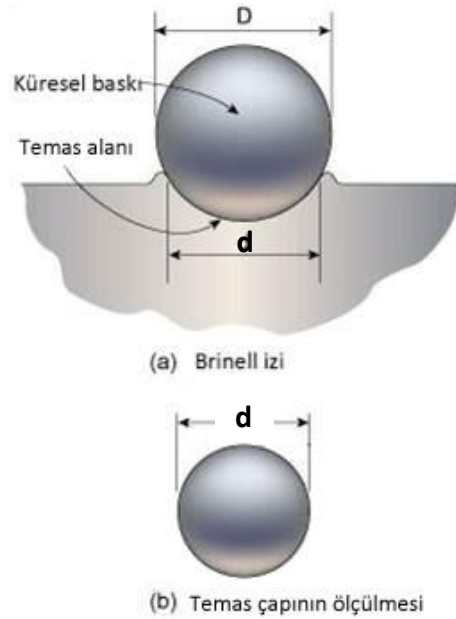


Şekil 4.46. Hidrolik şekillendirme kalıbı

Deneyi gerçekleştirmek için öncelikle alt kalıp hidrolik presin alt tablasına yerleştirilir. Alt kalıp üzerine merkezleme pimleri takılarak testi yapılacak numune kalıba merkezlenir. Numune üzerine üst kalıp, merkezleme delikleri merkezleme pimlerine gelecek şekilde kapatılır. Daha sonra istenilen kalıp sıkıştırma kuvvetine göre presin üst tablası kalıp üzerine bastırılarak gerekli kalıp sıkıştırma kuvveti sağlanır. Kalıp sıkıca kapatıldıktan sonra mekanik kollar ile istenilen basınç oluşuncaya kadar kalıp içerisine hidrolik sıvı pompalanır. Deney, sacda yırtılma hasarı oluşup kalıp altından hidrolik sıvı akana kadar devam eder. Deney düzeneğinin teknik çizimi Ek B’de verilmiştir.

4.4 Yüzey Basıncı –Şekil Değiştirme İlişkisi

Bir cisimde yüzey basıncı, yük altında kesit alanı bilinerek hesaplanır. Erichsen testinde zımba geometrisinin küresel olması ve yüzey basıncı değerini hesaplamak için gereken anlık zımba temas alanı değişimi, Brinell sertlik ölçme yöntemi ile benzeştirilerek bulunmuştur. Bilindiği üzere Brinell sertlik ölçme yönteminde sertliği ölçülecek yüzeye bir bilya yardımıyla belli bir yük uygulanarak oluşan izin çapı hesaplanır ve Brinell cinsinden sertlik değeri belirlenir. Şekil 4.47’de Brinell sertlik ölçme yöntemi basit olarak gösterilmiştir. Burada D , bilya çapı; d ise oluşan iz çapıdır.



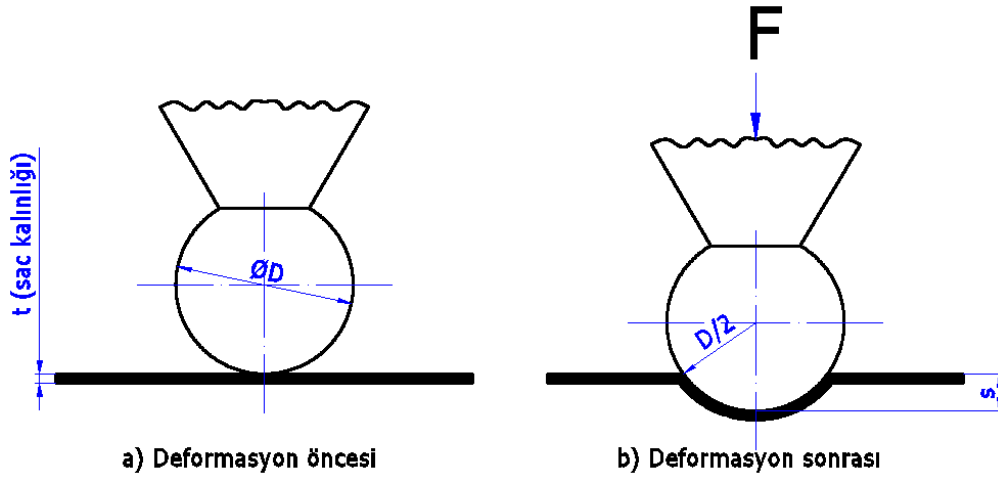
Şekil 4.47. Brinell sertlik ölçme yöntemi [84].

Bu çalışmada sacın, yük uygulandığında deforme olan temas alanı, Erichsen deformasyon derinliği Brinell sertlik ölçme yöntemindeki batma derinliği gibi düşünülerek, hesaplanmıştır (Şekil 4.48). Buna göre küresel zımbanın temas alanı $Y.A.$, Erichsen deformasyon derinliği s olmak üzere:

$$Y.A. = \pi \cdot D \cdot s \quad (4.41)$$

$$P_y = \frac{F}{Y.A.} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot s} \quad (4.42)$$

şeklinde bulunmuştur. Ancak bu hesaplama sadece deformasyon derinliğinin zımba yarıçapını geçmediği durumlarda tutarlı sonuçlar vermektedir. Hesaplanan P_y değerleri Denklem 4.44'te p_z yerine yazılarak, derin çekme işleminde deformasyon derinliklerine karşılık gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Ayrıca P_y Denklem 4.45'te yazılarak hidro-şekillendirme işleminde oluşan kubbe tepelerindeki gerilmeler hesaplanmıştır.



Şekil 4.48. Deformasyon öncesi ve sonrası sac ve zımbanın durumu [85].

4.5 İki Eksenli Gerilme Hali İçin Gerilme – Şekil Değiştirme Eğrilerinin Oluşturulması

Çekme testleri basit ve yapılması kolay olmasına rağmen sadece tek eksenli gerilme-şekil değiştirme davranışını gösterdiğinden dolayı sac malzemeler için pek kullanışlı değildir. Presleme işlemlerinde sac malzemeler genellikle iki eksenli deformasyonlara maruz kalırlar. Tek eksenli gerilme durumlarında şekil değiştirme oranı yaklaşık 0.3 değerlerinde kalmasına rağmen iki eksenli gerilme halinde bu oran 0.7 değerlerine

kadar çıkmaktadır. Bu sebeple iki eksenli durum için gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin çizilmesi daha doğru sonuç verecektir [86].

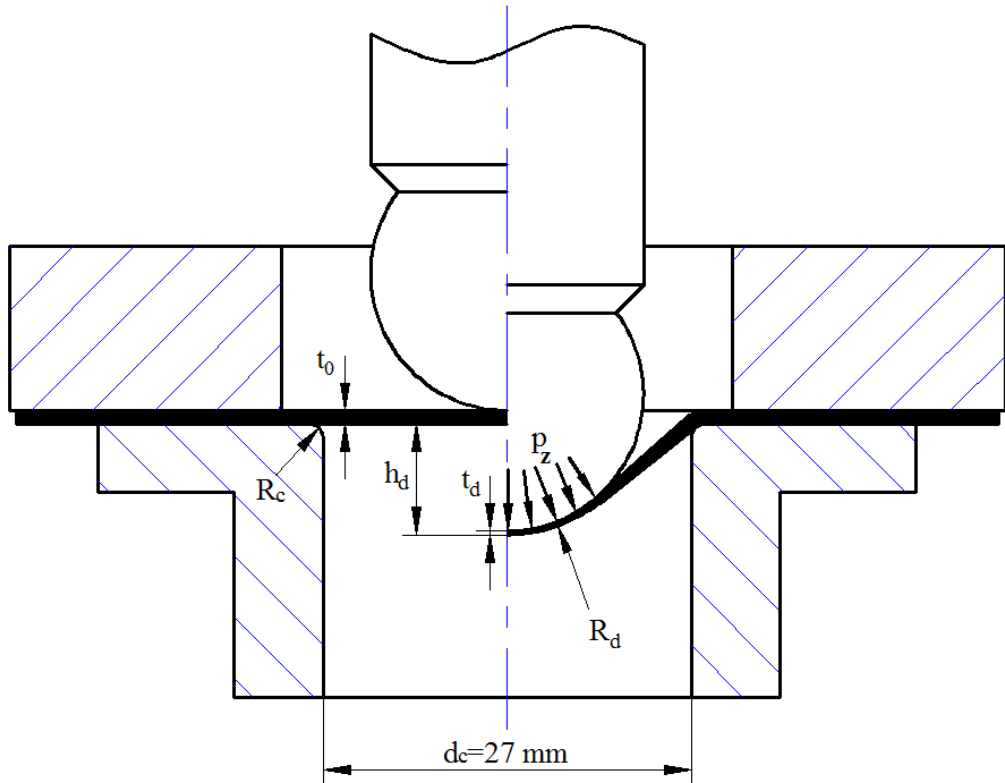
4.5.1 Membran (İnce zar) teorisi

Membran teorisi genellikle hidrolik bulge testlerinde akma gerilmesini belirlemek için kullanılmaktadır. Membran teorisi eğilmeden kaynaklı gerilmeleri ihmal eder. Bu yüzden sadece ince sac levhalar için kullanılması uygundur. Bulge testi için gerilme, sac geometrisi ve bulge basıncı arasındaki ilişki Denklem 4.43'te verilmiştir.

$$\frac{\sigma_1}{R_1} + \frac{\sigma_2}{R_2} = \frac{p}{t} \quad (4.43)$$

Burada σ_1 ve σ_2 sac yüzeyindeki asal gerilmeler, R_1 ve R_2 kavisli yüzeyin yarıçapları, p hidrolik basınç, t ise sac kalınlığıdır.

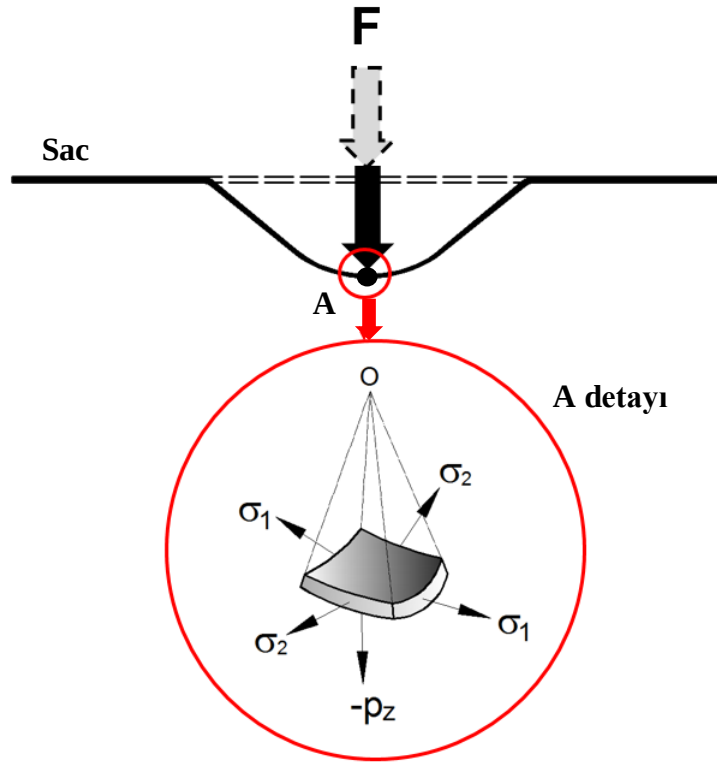
Hidrolik bulge testinin eksenel simetrik olmasından dolayı $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$ ve hidrolik yük altında oluşacak yüzeyin kubbe eğrilik yarıçapları $R_d = R_1 = R_2$ olmaktadır. Erichsen testinde de zımba yarı küresel ve kalıbın dairesel olmasından dolayı düzenek eksenel simetrik olarak kabul edilmiştir (Şekil 4.49). Buna göre Denklem 4.44 aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.



Şekil 4.49. Bu çalışmadaki Erichsen derin çekme (kesit) geometrisi.

$$\sigma = \frac{p_z \cdot R_d}{2 \cdot t_d} \quad (4.44)$$

Burada t_d kubbe tepesindeki sac kalınlığıdır. Bulge testinde hidrolik basınç belli iken Erichsen testinde hidrolik basınç söz konusu değildir. Bunun yerine Erichsen deformasyon kuvvetinin, zımbanın kuvvete dik kesit alanına bölünmesi ile uygulanan basınç basitçe bulunabilir. Hidrolik bulge testinde basınç sacın iç yüzeyinden uygulanır. Bu durum Erichsen testi içinde geçerlidir. Zımba sacın iç yüzeyinden tek taraflı olarak basmaktadır. Sacın dış yüzeyinde ise içeriye doğru etki eden herhangi bir kuvvet bulunmamaktadır (Şekil 4.50).



Şekil 4.50. Birim hacim elemandaki gerilme hali.

Buna göre ortalama gerilme sac yüzeyine dik olarak aşağıdaki gibidir [86]:

$$\sigma_n = \frac{1}{2} \cdot (-p_z + 0) = \frac{1}{2} (-p_z) \quad (4.45)$$

4.5.2 Kubbe eğrilik yarıçapının hesaplanması

Kubbe eğrilik yarıçapının hesaplanabilmesi için deformasyon sırasında oluşan kubbenin küresel olduğu kabul edilmelidir [86]. Buna göre kalıp boşluğunun kenarlarında kavis bulunmaması durumunda eğrilik yarıçapı:

$$R_d = \frac{d_c^2 + 4 \cdot h_d^2}{8 \cdot h_d} \quad (4.46)$$

Burada d_c kalıp boşluğunun çapı, h_d ise deformasyon derinliğidir. Yine oluşan kubbenin küresel olduğunu varsayarak kalıp boşluğu kenarlarında kavis (R_c) olması durumunda eğrilik yarıçapı:

$$R_d = \frac{((d_c/2) + R_c)^2 + h_d^2 - 2 \cdot R_c \cdot h_d}{2 \cdot h_d} \quad (4.47)$$

olmaktadır.

4.5.3 Kubbe tepesindeki sac kalınlığının hesaplanması

Kubbe tepesindeki sac kalınlığının hesaplanmasında birçok ampirik bağıntı olmasına rağmen en çok kullanılan bağıntı Hill'in hidrolik bulge testinde deformasyonu tanımlamak için kullandığı analitik metottur [86]. Bu metoda göre deformasyon sırasında olan sac her bir aşamada dairesel olarak kabul edilmektedir. Böylelikle kubbe tepesindeki sac kalınlığı:

$$t_d = t_0 \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(2 \cdot \frac{h_d}{d_c} \right)^2} \right)^2 \quad (4.48)$$

olmaktadır. Bu denklem daha sonra Chakrabarty ve Alexander tarafından pekleşme üssü hesaba katılarak revize edilmiştir. Buna göre kubbe tepesindeki sac kalınlığı:

$$t_d = t_0 \cdot \left(\frac{1}{1 + \left(2 \cdot \frac{h_d}{d_c} \right)^2} \right)^{2-n} \quad (4.49)$$

olmaktadır.

4.5.4 Akma kriterleri

Etkin gerilmenin $\bar{\sigma}$ hesaplanması için sıklıkla kullanılan iki kriter mevcuttur. Bunlarda biri maksimum şekil değiştirme enerjisi hipotezi olan Von Mises kriteri diğeri ise maksimum kayma gerilmesi hipotezi olan Tresca kriteridir. Dupleks paslanmaz çelik sacların plastik deformasyon mekanizmasını, Bölüm 4.2.2'deki tek eksenli çekme deneyi ile ilişkilendirmek için maksimum kayma gerilmesi hipotezi

(Tresca Akma kriteri) tanımlanmıştır. Özel bir metal sac sınıfı tanımlamak gerekmediği durumlarda (Bkz. Bölüm 7.1) hasar analizi Von Mises kriterine göre yapılmıştır. Çalışmada, saca iletilen yükün tamamı sacın elastoplastik şekil değiştirmesine ve sürtünmeye harcadığı kabul edilmiştir. Buna göre etkin gerilme Tresca plastik akma kriterinden hesaplanırsa;

$$\bar{\sigma} = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \frac{p_z \cdot R_d}{2 \cdot t_d} - \frac{-p_z}{2} \quad (4.50)$$

veya

$$\bar{\sigma} = \frac{p_z}{2} \cdot \left(\frac{R_d}{t_d} + 1 \right) \quad (4.51)$$

Efektif şekil değiştirme, Erichsen testi için sac kalınlığı kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir [84]:

$$\bar{\epsilon} = |\epsilon_t| = \left| \ln \left(\frac{t_d}{t_0} \right) \right| \quad (4.52)$$

Denklem 4.43 ve 4.44'ten akma gerilmesinin belirlenebilmesi için 4 değişkenin gerekli olduğu görülmektedir: (a) değişken kubbe eğrilik yarıçapı (R_d), (b) değişken kubbe tepe kalınlığı (t_d), (c) değişken kubbe yüksekliği (h_d), (d) basınç (p_z). Erichsen testinde deformasyon kuvveti ve kubbe yüksekliği ölçülebilmektedir. Dolayısıyla basınç, kubbe eğrilik yarıçapı ve kubbe tepesindeki sac kalınlığının hesaplanması gerekmektedir. Daha önce yapılmış çalışmalardan kubbe eğrilik yarıçapının ve kubbe tepesindeki sac kalınlığının hesaplanmasında kullanılan analitik metotların başarılı ve bu çalışma için uygun olduğu görülmüştür.

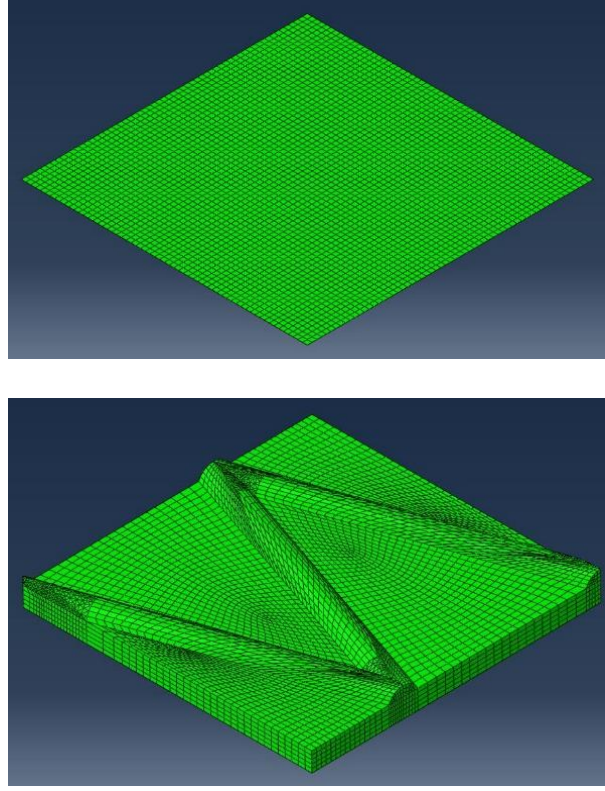
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Bu bölümde desenli ve desensiz saclar için deneysel olarak yapılan Erichsen testleri gerçeğine benzer kalacak şekilde ABAQUS isimli mühendislik programında bilgisayar destekli modellenerek analiz edilmiştir. Önce, standart desenli çelik sacların sonlu elemanlarla modelleri oluşturulmuş ardından, düz ve desen baskılı dubleks paslanmaz çelik saclar ve derin çekme davranışları modellenmiştir.

5.1 Ön Deneme Çalışmalarının ABAQUS Programında Analizi

5.1.1 Standart düz ve baklava desenli sacların analizi

Düz ve desenli saclar için deneysel olarak yapılan çalışma bilgisayar ortamında ABAQUS sonlu elemanlar programında EXPLICIT modülü kullanılarak simüle edilmiştir. İleriki bölümlerde açıklanacak olan bu modül genellikle karmaşık problemlerin (temas, akışkanlar dinamiği gibi) çözümünde kullanılan modüldür. Programda deney düzeneği için tek bir model kurulmuş, düz ve desenli saclar ise ayrı ayrı modellenmiştir. Düz sac modellenirken deforme edilebilir eleman tipi olan SHELL S4R eleman tipi kullanılmıştır. Bu eleman tipi 2 boyutlu olup kalınlık ekseninde simetrik olan (kabuk) parçalar için kullanılmaktadır. Program içerisinde bu eleman tipine uygun kalınlık verilerek parça 3 boyutlu olarak programa tanıtılır. Bu eleman tipinin seçilmesindeki asıl amaç çözüm zamanını önemli derecede düşürmesi ve modeli basitleştirmesidir. Desenli sacda ise yine deforme edilebilir olan SOLID C3D8R eleman tipi kullanılmıştır. Desenli sacda kalınlık doğrultusunda bir simetriklikten söz etmek mümkün olmadığı için modelleme esnasında bu sacın tamamen modellenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu 3 boyutlu model tipine en uygun eleman tipi olan SOLID seçilmiştir. Sac numuneler en ve boy olarak simetrik olduğundan dolayı çözüm zamanını düşürmek amacıyla parçaların $\frac{1}{4}$ 'ü modellenerek SYMMETRIC sınır koşulları uygulanmıştır (Şekil 5.1).



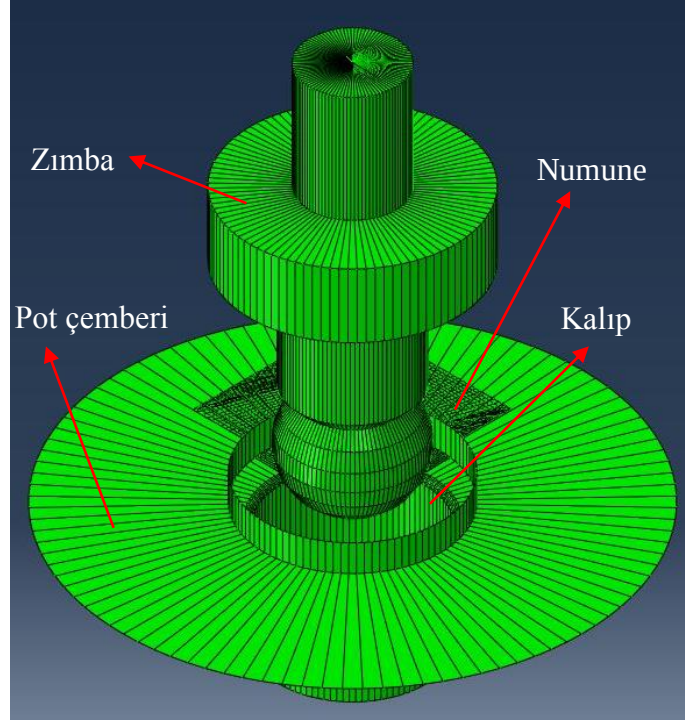
Şekil 5.1. Düz ve desenli örnek sac katı modelleri.

Çizelge 5.1’de sacın düz veya desenli olmasına göre seçilen eleman tipi ve ağ (mesh) örüldüğünde oluşan sonlu eleman sayısı gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Sac şekline göre eleman tipi ve sayısı.

Parça Adı	Eleman Tipi	Eleman Sayısı
Düz sac	SHELL S4R	10006
Baklava desenli sac	SOLID C3D8R	36074

Şekil 5.2’de Erichsen deneyinin simülasyonu için oluşturulan model görülmektedir. Burada alt kalıp, zımba ve tutucu herhangi bir deformasyona uğramadığı ve enerji absorbe etmediği (rijit cisim) kabul edilerek çözüm zamanını da azaltmak için ANALYTICAL RIJIT olarak programa tanıtılmıştır. Bu eleman tipi rijit elemanları çok az sayıda düğüm noktası ile modelleyerek çözüm zamanını önemli ölçüde düşürmektedir. Ancak sadece 2 boyutlu ve basit 3 boyutlu modeller bu eleman tipi ile modellenebileceği için kullanılabileceği alanlar sınırlıdır. Bu eleman tipine alternatif olarak DISCRETE RIJIT eleman tipide programda mevcuttur. ANALYTICAL RIJIT eleman tipi ile modellenmesi mümkün olmayan bu eleman tipi ile modellenir. Ancak çözüm zamanı artarak eleman tipi ile değişir.



Şekil 5.2. Deney düzeneği katı modeli.

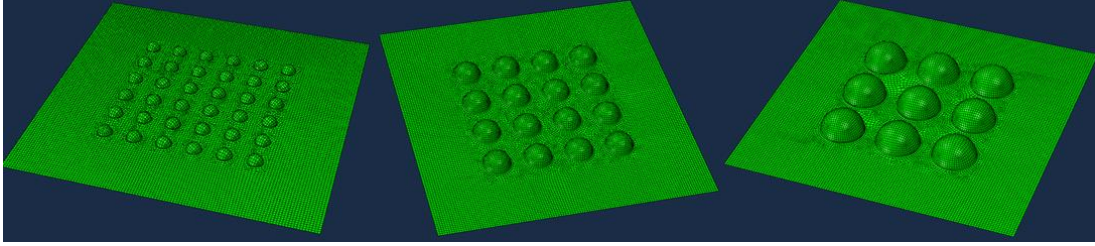
Burada deneysel olarak yapılması planlanan çalışmalar ABAQUS programında deney öncesi fikir edinme amaçlı yapılmıştır. Simülasyonlar yarı küresel desenlerin doğrusal ve dairesel dizilimine göre iki ayrı grupta yapılmıştır. Deneme amaçlı yapılan bu simülasyonlarda yarı küresel desen sadece geometri olarak parçalara uygulanmıştır.

5.1.2 Yarı küresel desen baskılı sacların modellenmesi

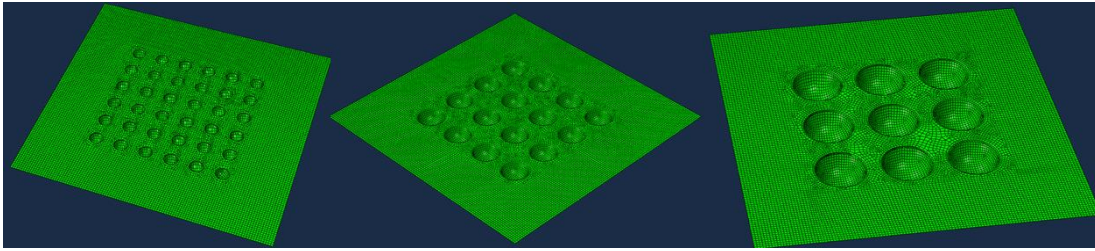
Daha önce TİMAY TEMPO firmasında preslenen doğrusal diziliimli yarı küresel desenli saclara, derin çekme işlemine tabi tutulmadan önce, fikir edinme amaçlı ABAQUS programında derin çekme simülasyonu yapılmıştır. 60x60 mm² ebatlarında ve 1 mm kalınlığa sahip saclar SOLIDWORKS programında yüzey (Surface) olarak modellenmiştir. Buradan ABAQUS programına aktarılan parçalar programa SHELL eleman olarak tanıtarak, kesit kalınlığı 1 mm girilmiştir.

Model geometrisinden dolayı parçalara ağ yapısı atmakta birçok zorlukla karşılaşmıştır. Modelin genel olarak kare ve içerisinde yarı küresel geometriler ihtiva etmesi sebebiyle eşit aralıklı ağ yapısı uygulamak mümkün olamamaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla parça sanal olarak her birinde en fazla bir adet yarı küresel desen bulunacak şekilde küçük alanlara bölünmüştür. Program bu bölünmeyi sadece ağ

yapısında kullanmakta olup, çözüme herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Şekil 5.3 ve 5.4'te ağ yapısı uygulanmış 3, 6 ve 9 mm çaplı yarı küresel desenlere sahip modellerin üstten ve alttan görünüşleri görülmektedir.



Şekil 5.3. 3, 6 ve 9 mm çaplı yarı küresel desenli sac modellerin üstten görünüşü.



Şekil 5.4. 3, 6 ve 9 mm çaplı yarı küresel desenli sac modellerin alttan görünüşü.

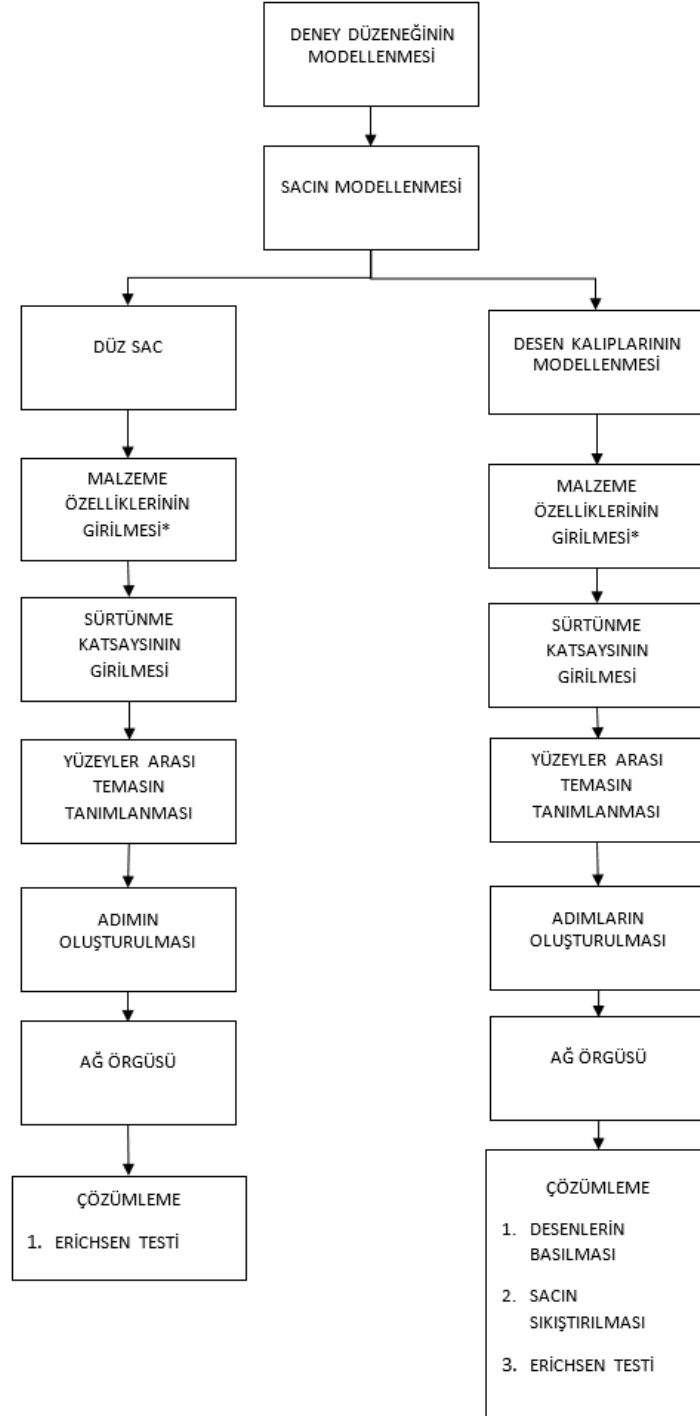
Modellere mesh yapısı uygulanırken eleman tipi olarak S4R seçilmiştir. Bu eleman tipi kabuk (SHELL) eleman tipini en iyi bezetim yapabilen eleman tipidir. Üç farklı yarı küresel desen çapına sahip modellere uygulanan ağ yapısı sonucunda oluşan eleman sayıları Çizelge 5.2’de verilmiştir. Modellerin mekanik özellikleri belirlenirken literatürde daha önce yapılmış benzer çalışmalarda aynı malzemeler için kullanılan değerler dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.2. Farklı çaplara sahip doğrusal dizilimli yarı küresel desenli sanal sac modellerin ağ eleman sayıları.

Küre Çapı	Eleman Tipi	Eleman Sayısı
3 mm	S4R	16368 adet
6 mm	S4R	18621 adet
9 mm	S4R	17904 adet

5.2 Erichsen Testinin Simülasyonu

Ön deneme çalışmaları haricindeki deneysel çalışmalar (Erichsen ve Bulge testi) aşağıdaki işlem sırasına göre ABAQUS sonlu elemanlar programında Şekil 5.5’deki adımlar takip edilerek simüle edilmiştir.



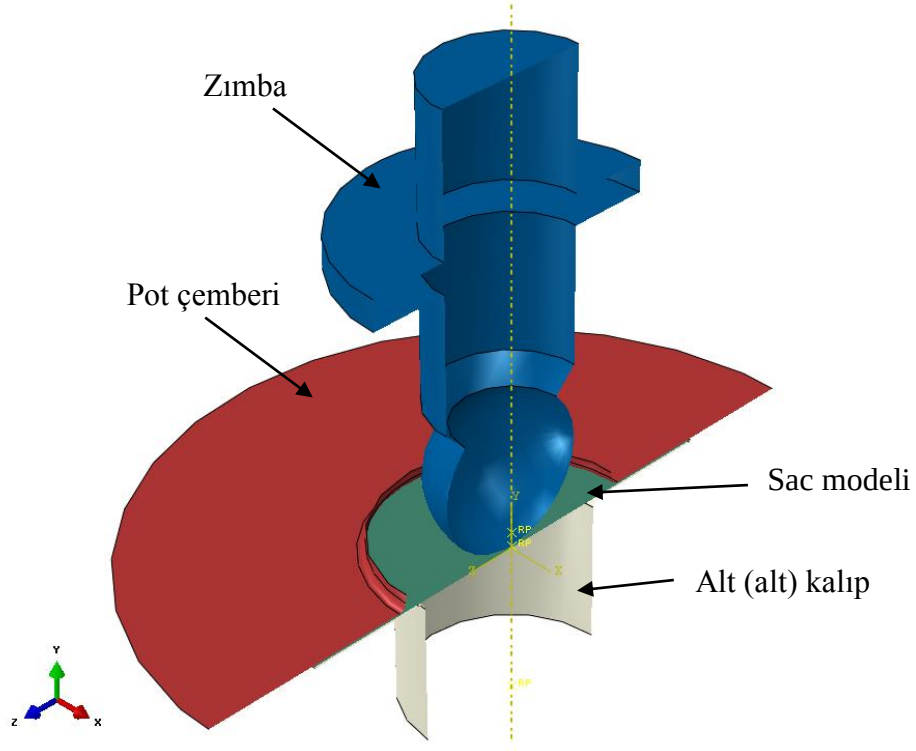
Şekil 5.5. Analizde izlenen işlem sırası.

*Burada daha önce Bölüm 4.2’de belirlenen malzeme mekanik özellikleri girilmiştir.

5.2.1 Düz sacların deformasyon analizi

Daha önceki kısımlarda ön deneme amaçlı yapılan simülasyon sonuçları verilmişti. Bu deneme çalışmalarında desenli olarak modellenmiş sac modellerine uygulanan Erichsen testinden bahsedilmişti. Bu bölümde ise bu tez çalışmasının ana konusu olan dubleks paslanmaz çelik düz ve desenli saclar bilgisayar ortamında modellenerek simüle edilmiştir. Düz ve desenli sacların bilgisayar modeli oluşturulurken bazı kabuller yapılmıştır. Simülasyon modellerinde deforme edilecek parça (düz ve desenli saclar) dışındaki tüm elemanlar (alt ve üst kalıplar, pot çemberi, zımba gibi) rijit olarak kabul edilmiştir. Çünkü bu elemanlar saca göre göreceli olarak uygulanan kuvvet ve moment altında şekil değiştirmemektedir. Bir başka deyişle bu elemanlarda oluşan deformasyon miktarı sacda oluşan deformasyon miktarına göre göz ardı edilebilir seviyededir. Dolayısıyla bu elemanlar ABAQUS programında rijit olarak modellenmiştir. Bu durum programın sadece deforme olacak eleman üzerinde hesap yaparak simülasyonu daha kısa sürede tamamlamasına olanak sağlamıştır. Bir başka kabul ise deformasyon hızıdır. Simülasyon modeli oluşturulurken deforme edilecek elemanın deformasyon hızından etkilenmediği kabul edilmiştir. Deforme edilecek sac elemanın ise kalınlık yönündeki gerilmeleri ihmal edilerek kabuk eleman olarak kabul edilmiştir. Tüm bu kabuller göz önünde bulundurularak Şekil 5.6'da kesit görünüşü verilen simülasyon modeli oluşturulmuştur.

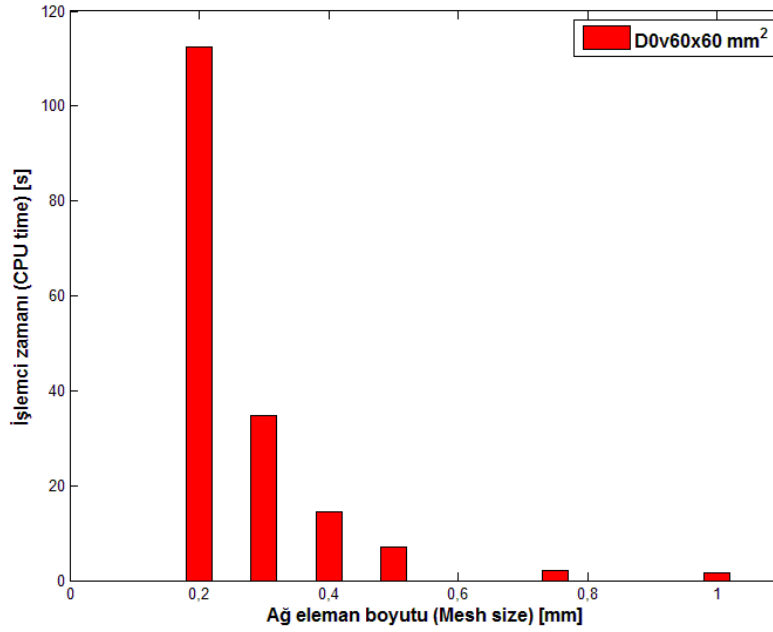
Şekil 5.6'da görülen modeldeki zımba, pot çemberi ve alt kalıp, dikey y eksenini etrafında simetriktir. Bu simetrik ve rijit elemanların modelleri ABAQUS programına ait bir özellik olan analitik rijit (analytical rigid) olarak oluşturulmuştur. Bu model tipinin seçilmesinin sebebi, programın bu tür rijit parçalar üzerinde hesaplama yapmayarak analiz süresini önemli ölçüde düşürmesidir. Ayrıca bu eleman türü çözüm anında herhangi bir ağ örmeye de gerek duymamaktadır.



Şekil 5.6. Erichsen test düzeneği sonlu eleman modeli.

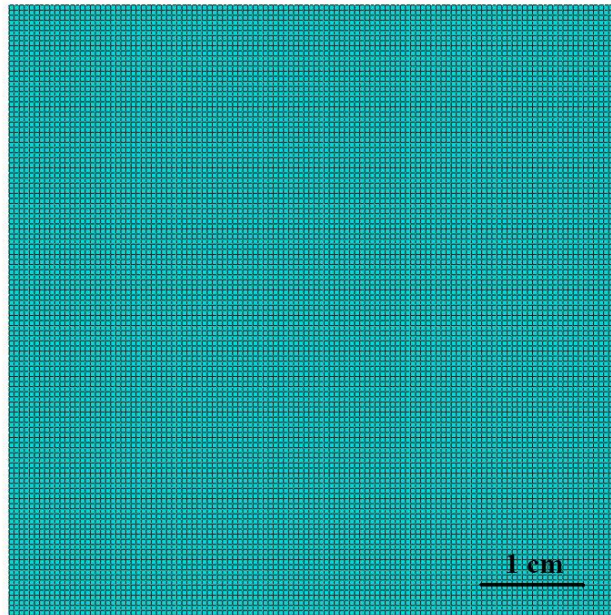
Deforme edilecek sac parça modellenirken yapılan kabuller doğrultusunda sac kabuk eleman (shell) olarak modellenmiştir. Yapılan deneme analizlerinde üç boyutlu ve iki boyutlu modellenen sacların sonuçları birbirleri ile tutarlı çıkmaktadır. Ancak üç boyutlu modellerde analiz süresi önemli derecede arttığından sac parçaların kabuk eleman olarak modellenmesine karar verilmiştir. Sac parça ABAQUS programında deforme edilebilir parça olarak düzlem halde modellenmiştir. Modellenen parçalara ağ örülürken, ağ eleman tipi olarak Shell (S4R) eleman seçilmiştir. Bu eleman tipi düzlem gerilme halini iyi bir şekilde simüle edebilen 4 düğüm noktalı eleman tipidir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yaparken karşılaşılan en büyük sorunlardan bir tanesi de ağ eleman boyutunun belirlenmesidir. Optimum ağ eleman boyutunun belirlenmesi oldukça zahmetli ve zaman alıcı bir süreçtir. Çünkü belirli aralıklardaki eleman boyutları modele uygulanarak her bir eleman boyutu için çözüm yapılır ve elde edilen sonuçların tutarlılığı karşılaştırılır. Bu çalışmada ağ eleman boyutunu belirlemek için en büyük model olan 60x60 mm² boyutlarındaki sac parçaya çeşitli ağ eleman boyutları uygulanmıştır. Uygulanan eleman boyutlarına göre kaydedilen çözüm süreleri Şekil 5.7’de verilmiştir. Buna göre birim yüzey alanına düşen ağ eleman boyutu küçüldükçe çözüm süresinin arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5.7. Ağ eleman boyutunun çözüm zamanına etkisi.

Modellenen sac parçaya uygulanan ağ eleman boyutu çok küçülürse çözüm süresi çok fazla uzamakta ve program çoğu zaman çözüme ulaşamamaktadır. Çok büyük ağ elemanı boyutlarında ise analiz çok hızlı bir şekilde sonuçlanmakta ancak sonuçlar gerçek değerlerden uzaklaşmaktadır. Bu sebeple çalışmalar esnasında yapılan denemelerde optimum ağ eleman boyutunun 0.5 mm olduğuna karar verilmiştir (Şekil 5.8). Çünkü daha ufak eleman boyutlarında sonuçlarda çok ufak değişimler olmasına rağmen çözüm süreleri oldukça artmaktadır.



Şekil 5.8. Sac modelin ağ elemanlarına bölünmüş hali.

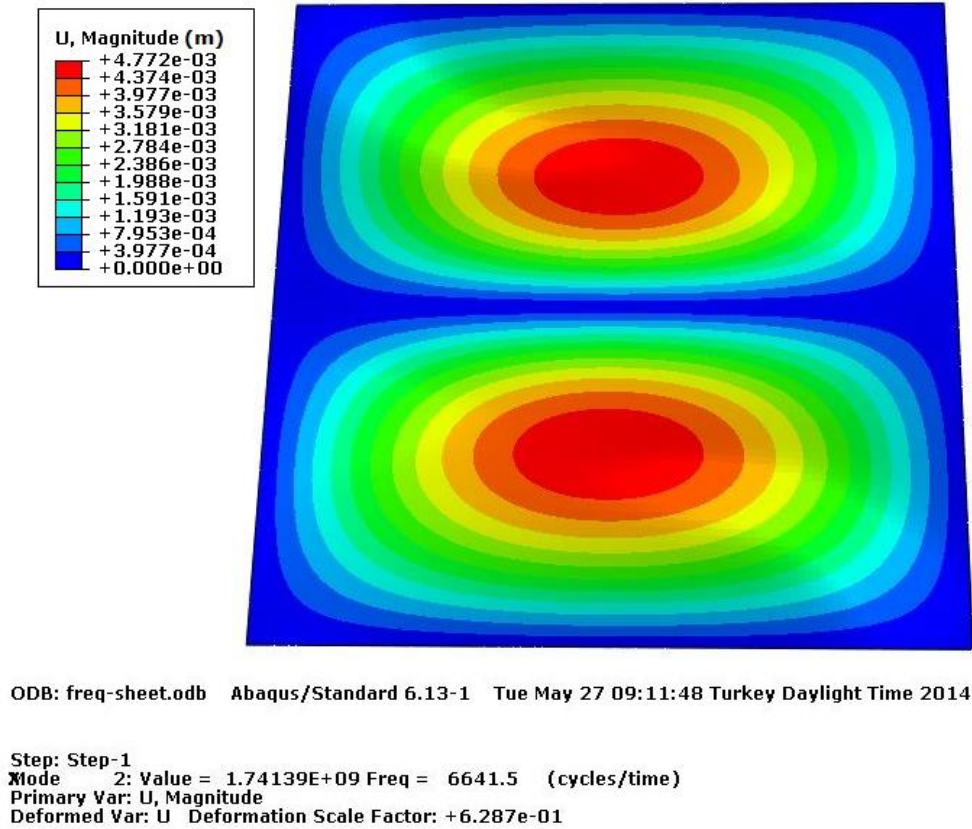
ABAQUS sonlu elemanlar programında daha öncede bahsedildiği gibi temel olarak 2 modül vardır. Bunlardan biri zamandan bağımsız çözüm yapan standart modül, diğeri ise zamana bağlı olarak çözüm yapan explicit modülüdür. Bu çalışmada explicit modül kullanılmıştır. Temas problemleri gibi yüksek oranda lineer olmayan sistemlerin çözümünde explicit metod kullanılmaktadır. Çünkü karmaşık temas problemlerinde standart modül sürekli tekrar eden denklemleri hesaplamak zorunda olduğundan çok fazla hafıza ve zamana ihtiyaç duyar. Ancak explicit modül problemi anlık olarak çözdüğünden dolayı bir önceki durumları ve bundan dolayı oluşacak denklemleri hesaplamaz. Dolayısıyla standart modüle göre daha kısa zamanda sonuç vermektedir. Çizelge 5.3'te standart modül ile explicit modülün karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 5.3. ABAQUS/Standart ve ABAQUS/Explicit modellerinin karşılaştırılması [87].

Unsur	Ortak alan	ABAQUS/Standart	ABAQUS/Explicit
Eleman kütüphanesi	Kapsamlı	Limitsiz	Sadece explicit çözüm için uygun elemanlar
Malzeme modeli	Kapsamlı	Akma modelleri	Akma ve hasar modelleri
Çözüm metodu		Kapalı entegrasyon	Açık entegrasyon
		Çoklu denklem çözümüne ihtiyaç duyar	Adım adım çözer
		K matrisi kullanır	Küçük zaman aralıkları kullanır
		Kararlı	Bazen kararsız
Gerekli hafıza alanı		Tekrarlı hesaplamalar çok fazla hafıza kaplar	Tekrarlı hesaplamalar olmadığından daha az hafıza kaplar
Problem tipi	Lineer	Çözebilir	Çözebilir
	Lineer olmayan	Çözebilir	Yüksek derecede lineer olmayan problemleri çözebilir
	Temas	Eğer basit ise çözebilir	Kompleks ve değişken koşullardaki problemleri çözebilir
	Genel sistemler	Kararlı yüklemeler altında idealdir	Anlık yüklemeler için idealdir (Darbe, atım, patlama gibi)

Explicit modülün dezavantajlarından bir tanesi, çözüm zamanı uygun aralıklarda verilmediği zaman problem sanki statikten (quasi static) darbe (impact)

durumuna geçer ve sonuçlar gerçek değerlerden uzaklaşır. Uygun zaman aralığının belirlenmesi için deforme olacak parçanın doğal frekansının bilinmesi gereklidir. Çünkü deformasyon kuvveti bu frekanstan daha yüksek bir frekansta etki ederse atalet kuvvetleri sisteme etki eder ve sistem darbe durumuna geçer. Başka bir deyişle deformasyon hızının yüksek olmasında dolayı malzeme içerisindeki atomlar yer değiştirmek için yeterli zaman bulamayacağından dolayı sistemde bir kilitlenme oluşur ve deformasyon hızı yeterli ise malzeme delinir. Gerçekte karşılaşılan bu durum sonlu elemanlar yöntemi içinde aynıdır. Deformasyonun gerçekleştiği frekans malzemenin frekansından yüksek olursa sistemde darbe etkisiyle oluşmuş bir deformasyon görülecektir. Bu çalışmada da uygun zaman aralığı sac malzemenin frekansı bulunarak hesaplanmıştır. Şekil 5.9'da dört kenarından 3 eksenle (x-y-z) sabitlenmiş sac modelin doğal frekansı bulunmuştur. Bu frekansta oluşan deplasmanlar metre cinsinden şeklin sol tarafında verilmiştir.

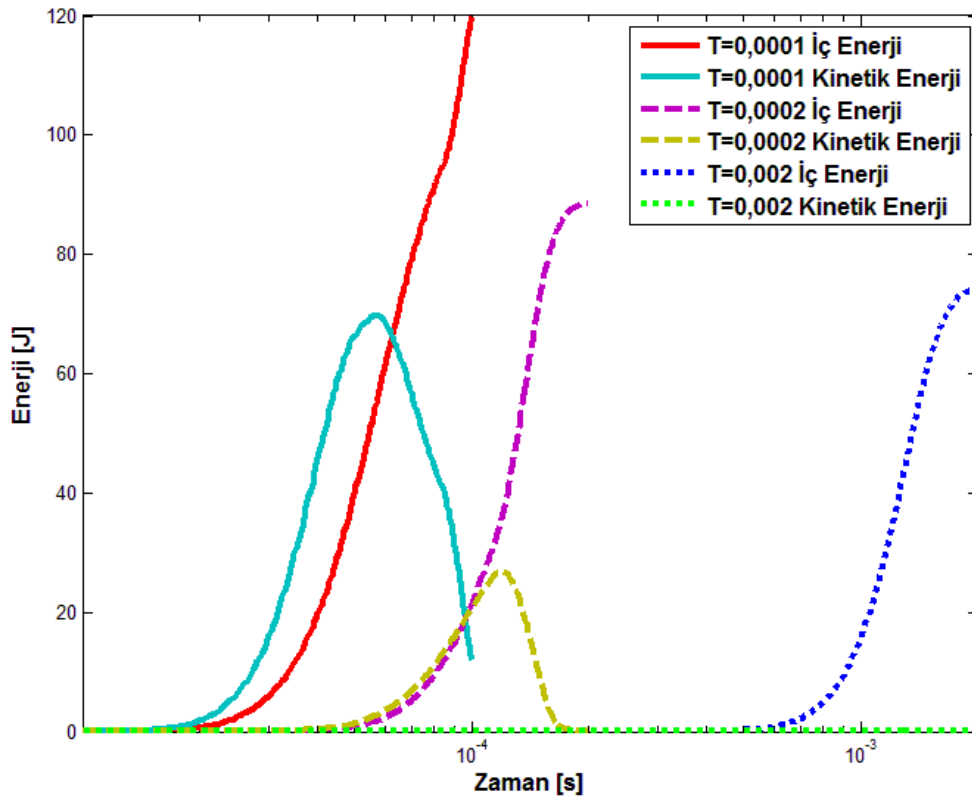


Şekil 5.9. Modelin doğal frekansının bulunması.

Yukarıda bulunan frekans değerine göre adım süresi hesaplanacak olursa;

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{6641,5} = 0,00015 \text{ s} \quad (5.1)$$

olarak bulunur. Ancak bu değer sınır değerdir yani adım süresi bu değerden daha düşük bir değer alınırsa sistemde darbe etkisi oluşacaktır. Pratikte adım süresi hesaplanırken bulunan frekans değerinin 10 ile 50 katı arasında bir değer alınır. Bu bilgiler ışığında bu çalışmada yapılan tüm analizlerde adım süresi 0.002 s olarak alınmıştır. Belirlenen adım süresinin darbe etkisini oluşturup oluşturmadığı ise analiz sonuçlarındaki iç enerji ve kinetik enerji değişimine bakılarak anlaşılabilir. Şekil 5.10'da farklı adım süreleri için iç enerji ve kinetik enerjideki değişimler verilmiştir. Enerji grafikleri doğal frekansın altında, üstünde ve analizlerde kullanılacak ideal adım süreleri uygulanarak elde edilmiştir. Yapılan uygulamalarda kinetik enerjinin iç enerjinin %1'inden daha düşük olduğu durumlarda sistem sanki statik kabul edilmiştir [88]. Grafikten görüleceği üzere daha kısa adım sürelerinde kinetik enerji artmakta buda sistemin darbe etkisinde olduğunu göstermektedir. İdeal adım süresinde ise ($T=0.002$ s) kinetik enerjinin sıfır seviyesine yakın olduğu görülmektedir. Böylece sistem sanki statiktir kabulü ile modellenmiştir.



Şekil 5.10. Farklı adım sürelerinde iç enerji ve kinetik enerjideki değişim.

5.2.2 Derin çekilen desenli sacların ABAQUS programında simülasyonu

Deneysel çalışmalarda dubleks paslanmaz çelik düz sacların yanında çeşitli çaplarda yarı küresel desenlere sahip saclarda Erichsen testi yapılmıştır. Ön deneme çalışmalarında da bu desenli saclar bilgisayar ortamında modellenerek analiz edilmiştir. Ancak yapılan ön denemelerde desenli saclar sadece geometrik olarak desen verilmiştir. Yani gerçekte olduğu gibi desen basımı esnasında sacda oluşan gerilmeler modele yansıtılmamıştır. Bu model gerçek durum ile tam olarak uyuşmamaktadır. Gerçekte düz saclar öncelikle, saclar üzerine basılacak desenlere sahip kalıplar arasına konulmakta ve kalıplar kapatılarak sacın yarı küresel desenlere sahip olması sağlanmaktadır. Ancak bu desen basımı esnasında oluşan deformasyon ile birlikte sacda bir takım gerilmeler oluşmakta, desenlerin bulunduğu bölgelerde sac kalınlığında değişimler olmaktadır. Bu durum desen boyutuna göre sacda yırtılmalara dahi sebep olabilmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminde sacın sadece geometrik olarak modellenmesi sacdaki desen sırasında oluşan gerilme ve deformasyonları dikkate almaz. Daha önce yapılan ön denemelerden farklı olarak bu bölümde, desen basımı esnasında saclar üzerinde oluşan gerilme ve deformasyonlar sonlu elemanlar modeline aktarılmaya çalışılmıştır. Düz sacların Erichsen testi modeli programda oluşturulurken analiz tek adımda yapılmıştır. Desenli saclarda ise bu durum farklı bir hal almaktadır. Desenli saclar için oluşturulacak modeli 3 farklı kısımda incelenebilir. Bunlar;

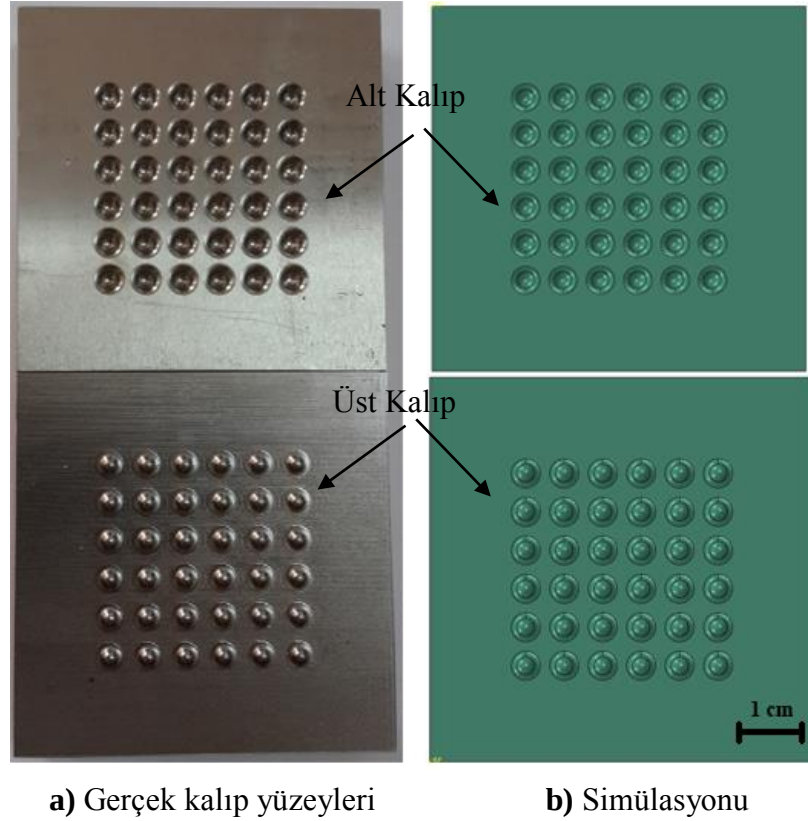
- Desenlerin basılması
- Sacın sıkıştırılması
- Desenli sacın Erichsen testine tabi tutulmasıdır.

Analizi yapılacak model bu şekilde kısımlara ayrılarak basitleştirilmekte ve analiz 3 farklı adımda tamamlanabilmektedir.

5.2.2.1 Sac modellere desenlerin basılması

Desenli sacların ABAQUS programında oluşturulan sonlu elemanlar modelinde ilk adım desenlerin basılmasının gerçekleştirileceği adım olacaktır. Burada desen basımı için gerçekte olduğu gibi farklı desen boyutları için ayrı ayrı kalıplar hazırlanmıştır. Bunun için öncelikle kalıp geometrisi SolidWorks programında yüzey eleman olarak modellenmiş ve daha sonra “Parasolid” formatında ABAQUS programına

aktarılmıştır. Bu iki program aynı üreticinin ürünleri olması sebebi ile birbirleri ile uyumlu bir şekilde çalışmakta, modellerin bir programdan diğerine aktarılması sırasında herhangi bir kayıp yaşanmamaktadır. Kalıp modellerinin başka bir programda oluşturulmasının sebebi, ABAQUS programının tasarım arayüzünün kompleks geometrilerin modellenmesine olanak vermemesidir. Şekil 5.11’de gerçek kalıplar ve ABAQUS programındaki modelleri verilmiştir.

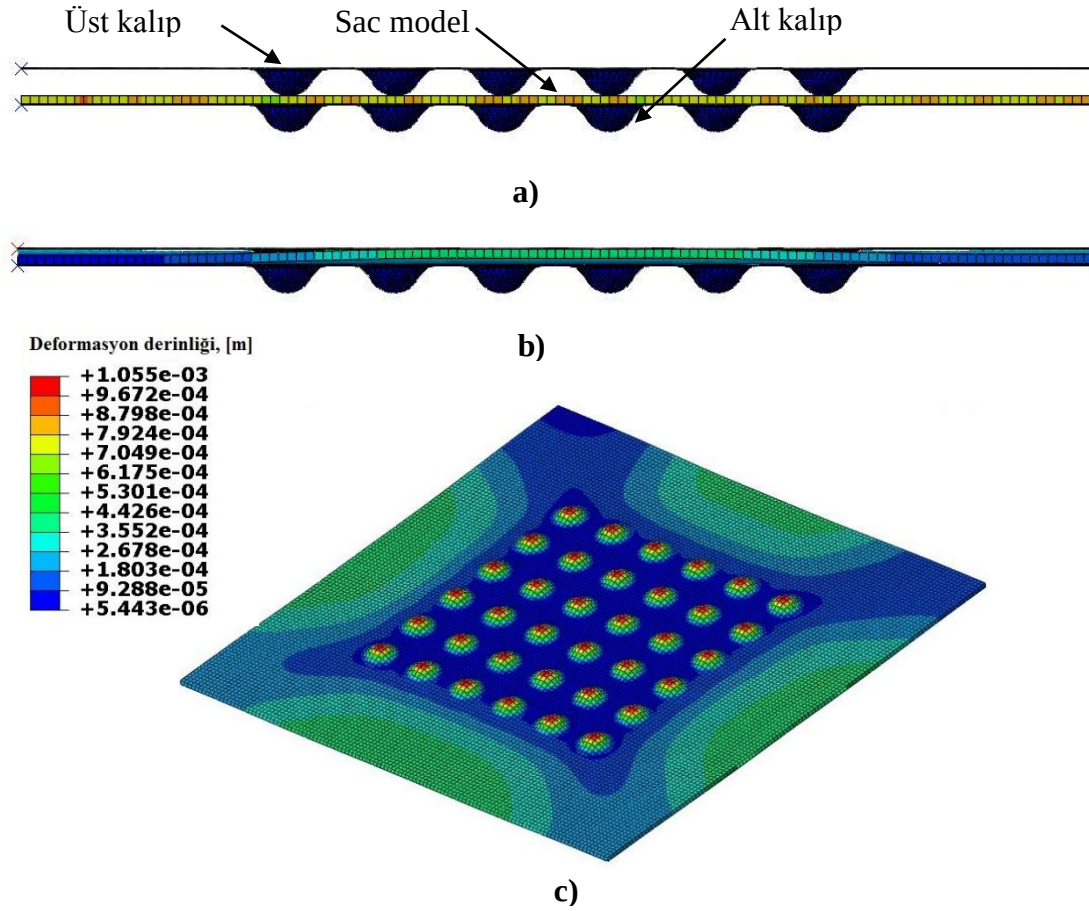


Şekil 5.11. 3 mm çaplı yarı küresel desenlerin basıldığı kalıp geometrisi.

Kalıp modelleri Erichsen test modelinde olduğu gibi rijit elemanlar olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla kalıp modelleri sadece yüzey olarak modellenmiş, herhangi bir kalınlık verilmemiştir. Üst ve alt kalıp ayrı ayrı modellenmesi yerine tek bir modelin kabartmalı tarafı üst kalıp olacak şekilde, diğer oyuntulu tarafı ise alt kalıp olacak şekilde bir model kullanılmıştır.

Analizin bu adımında, üst ile alt kalıplar arasında bulunan sac kalıplar arasında sıkışarak kalıp üzerindeki formu almaktadır. Gerçek durumda oluşan deformasyonu elde etmek için sac üzerine kuvvet uygulamak yerine, kalıplar arasındaki mesafe azaltılarak form verilmiştir. Bunun için öncelikle yarı küresel desenler basılmış sac numuneler üzerinde oluşan desen yüksekliği kumpas yardımı ile ölçülmüştür. Kalıplar,

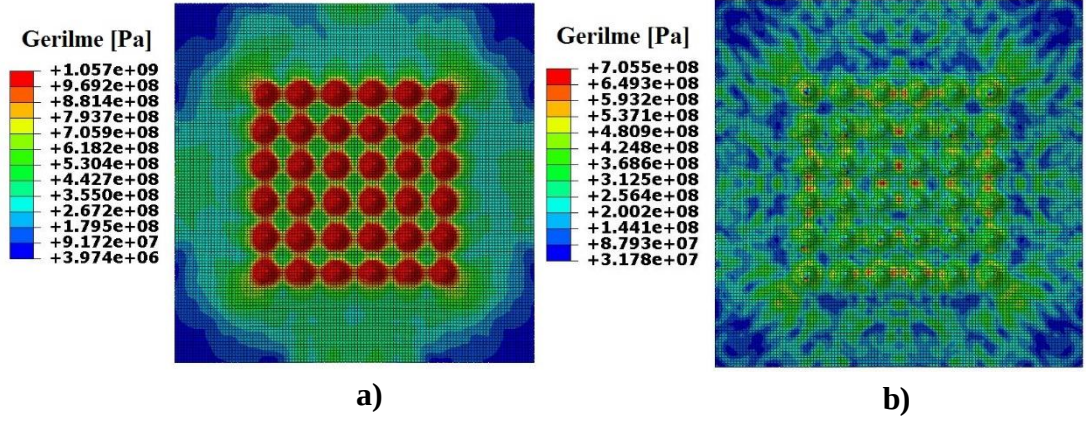
aralarında sac olacak şekilde programda konumlandırılmışlardır. Daha sonra üst kalıp, gerçekte oluşan desen yüksekliği kadar kapanarak sac model üzerine desenlerin basılmasını sağlar (Şekil 5.12). Adım süresi düz saclarda olduğu gibi desenli saclarda da her bir adım için 0.002 s olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.12. Düz sac modellere yarı küresel (3 mm çaplı) desen basılması a) Deformasyon öncesi b) Deformasyon sonrası c) Deformasyon sonrası oluşan desenli sac.

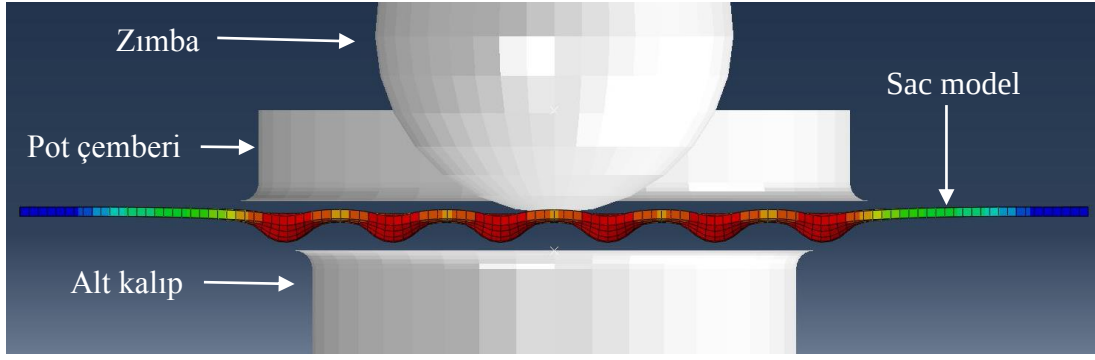
5.2.2.2 Sac modelin kalıp ile pot çemberi arasına sıkıştırılması

Bu adımda üzerine desen basılan sac Erichsen testi modelinde kalıp ile pot çemberi arasına sıkıştırılmaktadır. İlk adımda desen kalıpları ile sac model arasında tanımlanan temas özelliği bu adımda ortadan kaldırılmaktadır. Böylelikle sac model, kalıptan çıkarılmış olur ve üzerindeki kalıbın oluşturduğu gerilme kalkar. Ayrıca bu sırada sac bir miktar geri yaylanır (elastik şekil değiştirmenin kaybolması). Şekil 5.13'te bu durum açıkça görülmektedir. Kalıplar kapalı iken oldukça yüksek olan gerilme değerleri kalıplar açıldığında makul seviyelere düşmektedir.

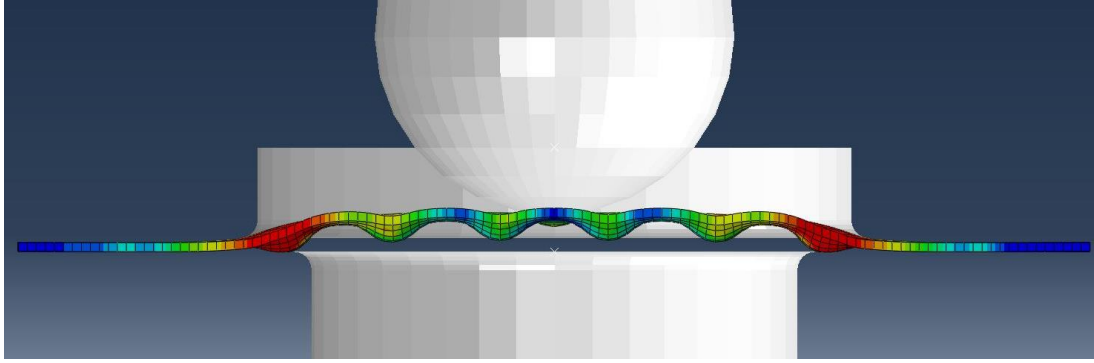


Şekil 5.13. Kalıplar açılmadan önce (a) ve açıldıktan sonra (b) desenli saclarda oluşan gerilme dağılımı.

Oluşturulan modelde desen kalıplarının yanı sıra Erichsen test modeli de bulunmaktadır. Ancak ilk adımda sadece sac ile desen kalıpları arasında temas tanımlanmıştır. İkinci ve üçüncü adımda desenli kalıplar ile sac arasındaki temas kalkmakta, bunun yerine Erichsen test modeli ile sac arasında temas tanımlanmaktadır. Bu noktada eğer fizik kurallarına aykırı bir durum (örneğin sac modelin kalıbın içinden geçmesi) olursa program hata verir. Bunu engellemek için sac model Erichsen test modelindeki alt kalıp ile pot çemberi arasında kalacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu adımda desen kalıpları ile ilişkisi kesilen sac model alt kalıba pot çemberi tarafından bastırılarak sıkıştırılmaktadır. Şekil 5.14a’da sıkıştırma öncesi sac ve Erichsen testi modeli görülmektedir. Bu anda sac modelin desen kalıpları ile olan teması kesilmiş ve Erichsen test modeli ile olan temas sağlanmıştır. Şekil 5.14b’ de ise pot çemberi ile alt kalıp arasındaki mesafe azaltılarak sac modelin sıkışması sağlanmıştır. Böylelikle gerçek pot çemberi sıkıştırma kuvveti uygulanmadan sac modelin osilasyon yapması engellenmiş olur. Gerçek testte uygulanan pot çemberi sıkıştırma kuvveti bir sonraki adımda uygulanacaktır. Burada adım süresi yine 0.002 s olarak alınmıştır.



a)

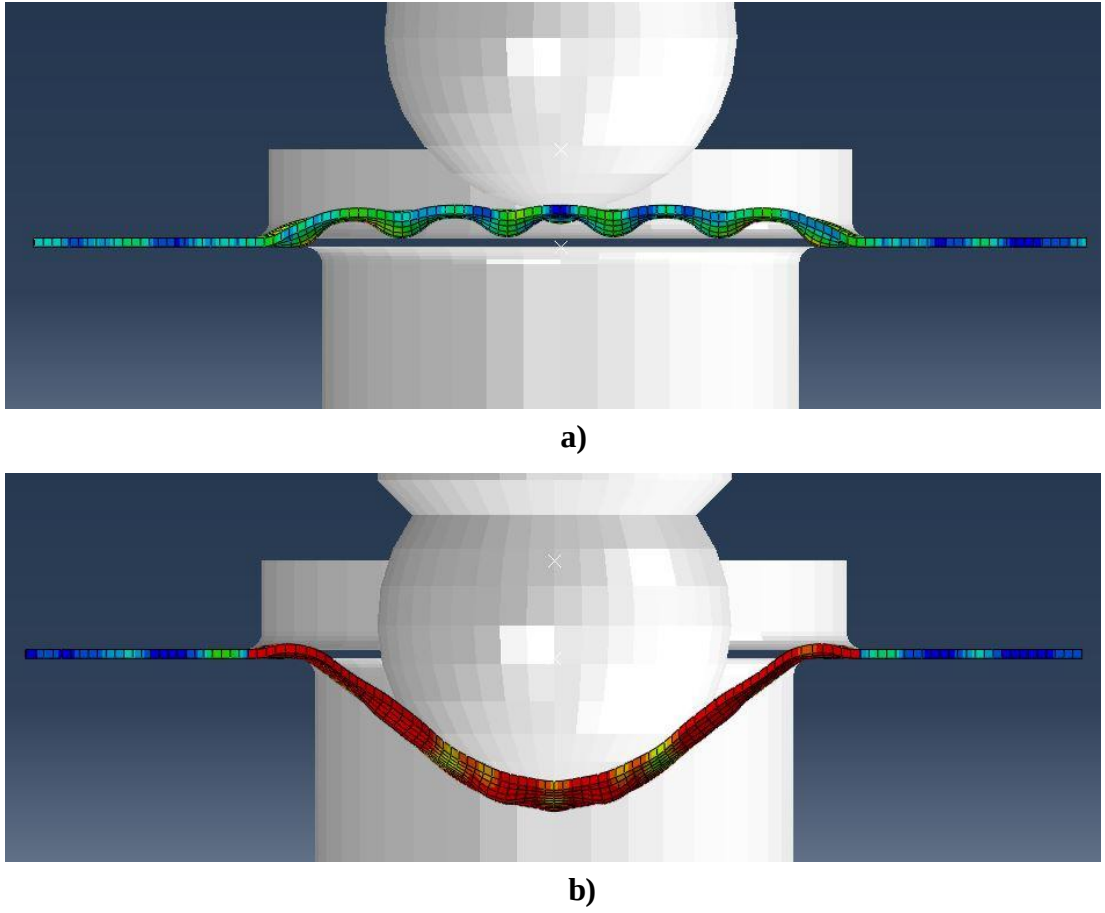


b)

Şekil 5.14. İkinci adım başında (a) ve sonunda (b) sac modelin durumu.

5.2.2.3 Desenli sanal sac modele Erichsen testinin uygulanması

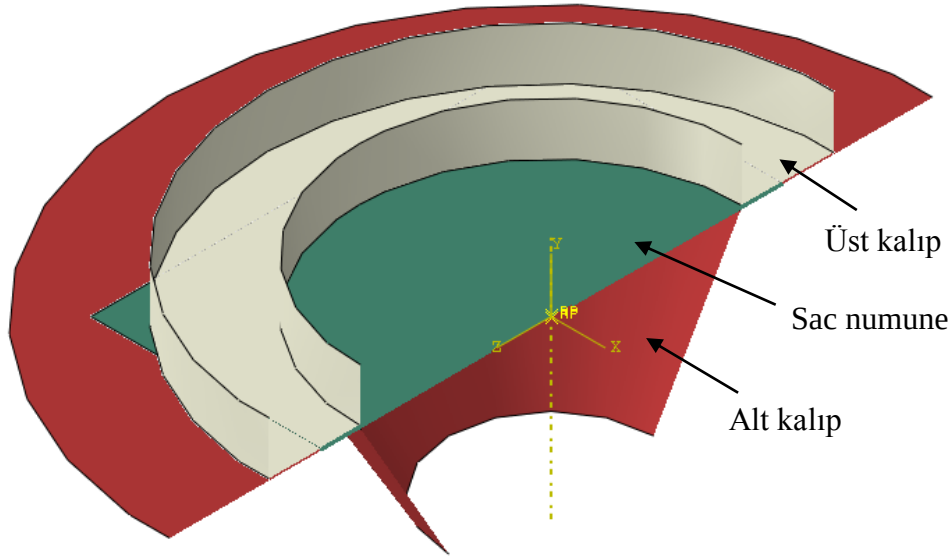
Bu adımda pot çemberi ile alt kalıp arasına sıkıştırılan desenli sac Erichsen testine tabi tutulacaktır. Bir önceki adımda pot çemberi ile alt kalıp arasına sıkıştırılarak sabitlenen desenli saca gerçek pot çemberi kuvveti (Denklem 4.36'da hesaplanan 30000 N'luk kuvvet) ile baskı yapılarak pot çemberi ile alt kalıp arasındaki mesafenin minimuma inmesi sağlanır. Böylelikle malzemenin kalıp içerisine kaymadan çekilmesi sağlanmış olur. Bu kuvvetin uygulanmaması veya az uygulanması durumunda sac malzeme pot çemberi ile kalıp arasından kayarak kalıp içerisine çekilmekte ve testin asıl amacı olan yırtılma hasarı gözlenememektedir. Bu yüzden pot çemberi sıkıştırma kuvvetinin ayarlanması çok önemlidir. Analizde bu adımda sıkıştırma kuvveti adımın başında uygulanır (Şekil 5.15a) ve devamında zimba aşağıya doğru harekete geçerek malzemenin derin çekilmesini sağlar (Şekil 5.15b).



Şekil 5.15. Üçüncü adım başında (a) ve sonunda (b) sac modelin durumu.

5.3 Bulge Testi Analizi

Bu bölümde deneysel olarak yapılan Bulge testi bilgisayar ortamında simüle edilmeye çalışılmıştır. Ek A'da teknik çizimleri verilen hidro şekillendirme kalıpları ölçülerine uygun olarak basitçe ABAQUS programında modellenmiştir (Şekil 5.16). Modelleme esnasında alt kalıp ve üst kalıbın şekil değiştirmeyeceği varsayılarak, bu parçalar rijit olarak modellenmiştir. Alt kalıbın sac ile temas eden yüzeyi gerçek boyutlarından biraz daha geniş büyük çizilmiştir. Çünkü sac yüzeyine uygulanan hidrolik basınç sac köşegenlerinden daha küçük çaplarda oluşturulan kalıpların kenarlarından eğilmektedir. Bunun önüne geçmek için kalıp sac köşegenlerinden daha büyük çizilerek, kalıbın sacı alttan desteklemesi sağlanmıştır. Modelde üst kalıba Erichsen testinde olduğu gibi yaklaşık 30000 N'luk baskı kuvveti uygulanmıştır. Kalıplar arasına sıkıştırılan sac modelin tüm yüzeyine 150 bar hidrolik basınç uygulanarak simülasyon tamamlanmıştır.



Şekil 5.16. Hidro-şekillendirme test düzeneği modeli.

Desenli sacların simülasyonunda ise daha önce Erichsen testinde yapıldığı gibi 3 farklı adım tasarlanmıştır. Erichsen testinde desen basmak için kullanılan kalıp modelleri hidro şekillendirme modeline alınmış ve ilk adımda desenlerin sac üzerine basılması sağlanmıştır. İkinci adımda üzerine desenler basılmış sac alt kalıp ile üst kalıp arasına sıkıştırılmaktadır. Üçüncü adımda ise programa desenli sac üzerine hidrolik basınç uygulaması tarif edilmiştir.

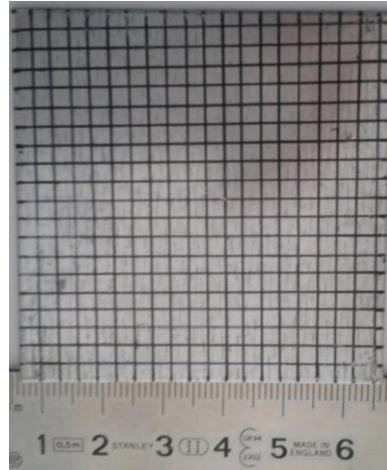
6. DENEYSEL BULGULAR

6.1 Erichsen Testi Ön Deneme Bulguları

Tezin bu kısmında dubleks paslanmaz çelik sacları derin çekmeden önce tecrübe kazanmak için düşük karbonlu düz ve desenli çelik saclara Erichsen testi uygulanmış ve bu saclar için yüzey basıncı-gerçek şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Burada dubleks paslanmaz çelik saclar derin çekilmeden önce yapılan ön deneme çalışmasında, standart düz ve desenli çelik sacların şekil alma kabiliyetleri değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

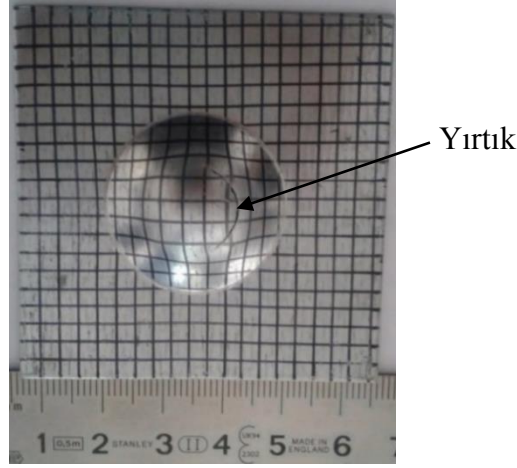
6.1.1 Düz saca ön denemeler

Bölümümüz laboratuvarlarında 60x60x1 mm³ galvanizli düz sac numunelerin bir yüzeyine deney öncesinde ağ (grid) yapısı çizilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Deney öncesi yüzeyi markalanmış galvanizli sac numune.

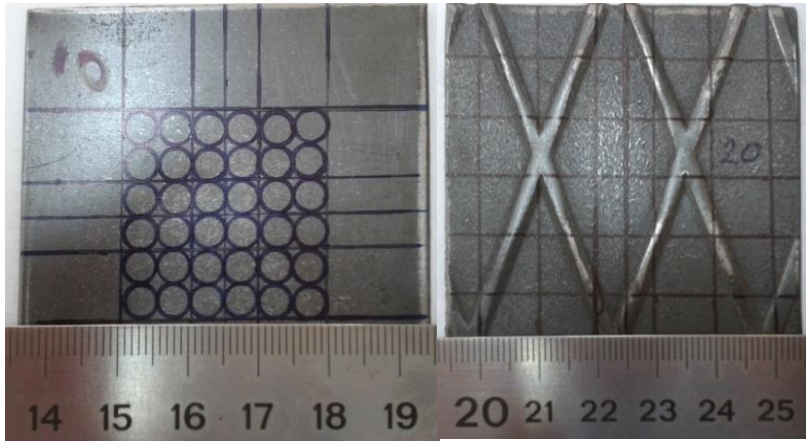
Üzerine ağ yapısı çizilen numunelerin üzerine, ticari ismi “Arap sabunu” olarak bilinen potasyum çözeltisi sürülerek sürtünme kaynaklı hasarlar engellenmeye çalışılmıştır. Erichsen deneyine tabi tutulan numune yaklaşık 11 mm Erichsen deformasyon derinliğinde, 13.5 kN yük altında hasara uğradığı gözlenmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. Deney sonrası galvanizli numune.

6.1.2 Desenli saclar için ön denemeler

Deney numuneleri, 2 mm kalınlıkta baklava dilimi desenli DIN 59220 (ASTM A-786) standardında ve düz DIN 17100 standardında St-37 (S235JR) çelik sac levhalardır. Numuneler, Erichsen deneyi için standart boyutlar olan 60x60 mm² ebatlarında kesilmiştir. Daha sonra sac yüzeyleri, yüzeydeki oksit tabakasını temizlemek ve üretim esnasında oluşmuş ufak pürüzlülükleri gidermek amacıyla ince zımpara ile temizlenmiştir. Böylelikle ilk duruma göre daha pürüzsüz ve temiz bir yüzey elde edilerek numunenin kalıba ve ıstampaya zarar vermesi önlenmiştir. Ayrıca temizlenen yüzeylere, deney esnasında oluşan deformasyonu daha iyi gözlemleyebilmek için düz sac yüzeylerine 5 mm çapında çemberler, desenli saclara ise 10 mm aralıklı olacak şekilde doğrusal çizgiler çizilerek bir ağ (grid) oluşturulmuştur. Sac levhaların merkezleri, deformasyonun yoğun olduğu bu bölgelerin rahatça analiz edilebilmesi için, özellikle daha sık çizgi ve çemberlerle çizilmiştir (Şekil 6.3).

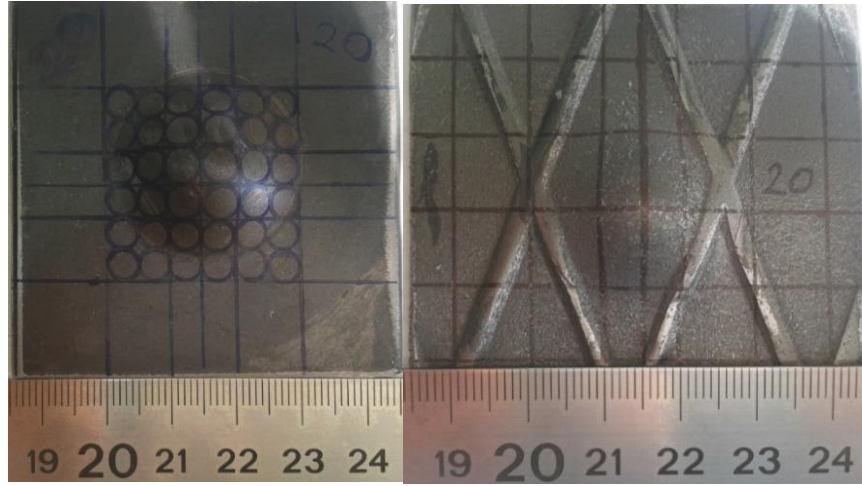


Şekil 6.3. Düz (solda) ve desenli (sağda) sac numuneler.

Üzerine ağ yapısı çizilerek markalanmış bu saclar sırasıyla 5,10, 15 ve 20 kN’luk yükler ile deformasyona uğratılmıştır. Bu yükler altındaki deformasyon derinliği ile yüzey basınç değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. 20 kN yük uygulanmış düz ve desenli sac numuneler Şekil 6.4’te verilmiştir.

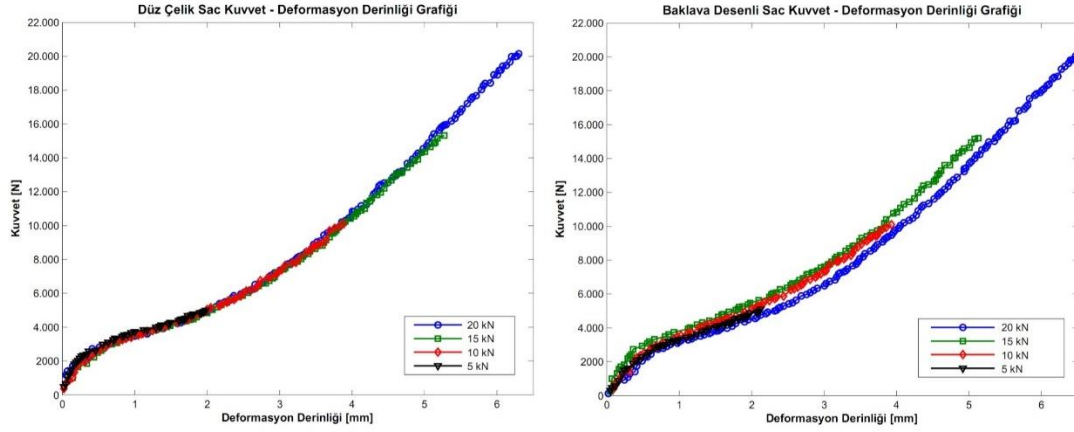
Çizelge 6.1. Düz ve desenli sacların deformasyon derinliği ve yüzey basınçlarının karşılaştırılması.

Kuvvet (kN)	Düz Sac		Desenli Sac	
	s (mm)	P _y (MPa)	s (mm)	P _y (MPa)
5	1.978	40.110	2.124	38.147
10	3.882	41.506	3.931	40.875
15	5.151	46.417	5.029	47.455
20	6.25	50.904	6.47	49.338



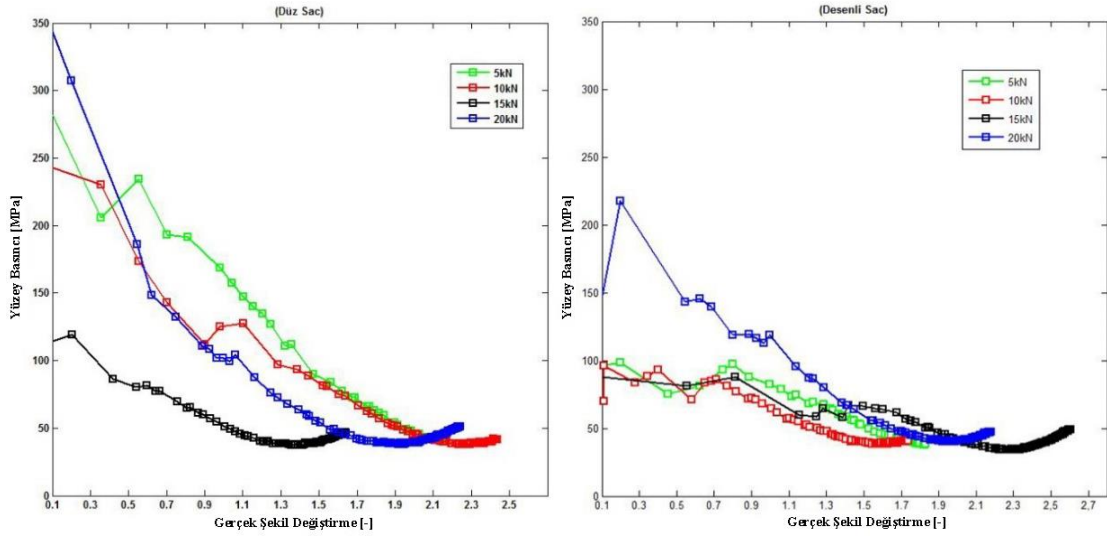
Şekil 6.4. 20 kN yük altında deformasyona uğramış düz (solda) ve desenli (sağda) saclar.

Düz ve desenli sacların deney esnasındaki kuvvet-deformasyon derinliği değişimi Şekil 6.5’te verilmiştir. 5, 10, 15 ve 20 kN’luk yüklemeler sırasında eğrilerin birbiri üzerine çakıştığı görülmektedir.



Şekil 6.5. Düz ve baklava desenli çelik sac numunelerin kuvvet-deformasyon derinliği grafiği [85].

Şekil 6.6, bu deneysel çalışmadaki düz ve desenli sac numunelere ait yüzey basıncı-gerçek şekil değiştirme ilişkisini göstermektedir. Şekil değiştirme (gerinim) değeri sıfıra giderken yüzey basıncı değeri sonsuza gider. Çünkü zımbanın sac yüzeyine ilk temasında sacı elastik deforme edeceği veya ilk temas alanı (A) noktasal olduğu için alan sıfır kabul edilmiştir. Alan sıfır olduğu zaman; $P_y = \frac{F}{A}$ yüzey basıncı değeri sonsuza gider. Bu nedenle, yüzey basıncı-gerçek şekil değiştirme grafiğinin yatay eksenini 0.1 değerinden başlatmak gerekir. Bu deneysel çalışmada, derin çekme işlemindeki bütün yüklemeler için hesaplanan yüzey basıncı değerlerinin sabit kalmadığı görülmektedir. Bunun sebebi, soğuk deformasyon neticesi oluşan pekleşmedir (dislokasyon sayısındaki artış sonucu şekil değiştirmeye karşı gösterilen mukavemet). Şekilde görüldüğü gibi, gerçek şekil değiştirme değeri 1.5'e kadar olan yüzey basıncı değerleri daha geniş bir dağılım aralığına sahiptir. Gerçek şekil değiştirme değeri, 1.5'den 2.5'e kadar yüzey basıncı değerleri birbirine daha yakındır. Desenli sacda ise 1.7 şekil değiştirme değerine kadar yüzey basıncı değeri azalır. 1.7 ile 2.5 arasındaki gerçek şekil değiştirme değerlerinde 2.7'ye kadar sabit bir artış görülür (Şekil 6.6). Ayrıca Şekil 6.6'da, deneyin başlangıcındaki yüzey basıncı değerleri için düz sacın daha yüksek bir yüzey basıncı değerine sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi pot çemberi ile alt kalıp arasına konulan sac levhanın düz olanının desenli olanına göre yüzeye daha sıkı tutunarak baskı kuvvetini daha iyi iletmesidir. Bundan dolayı düz sac desenli saca göre kalıp ile pot çemberi arasında daha sıkı tutulmaktadır.



Şekil 6.6. Düz ve desenli sac için yüzey basıncı-gerçek şekil değiştirme grafikleri (Yatay eksendeki şekil değiştirme sacın yüzey temas alanındaki değişime göre hesaplanmıştır).

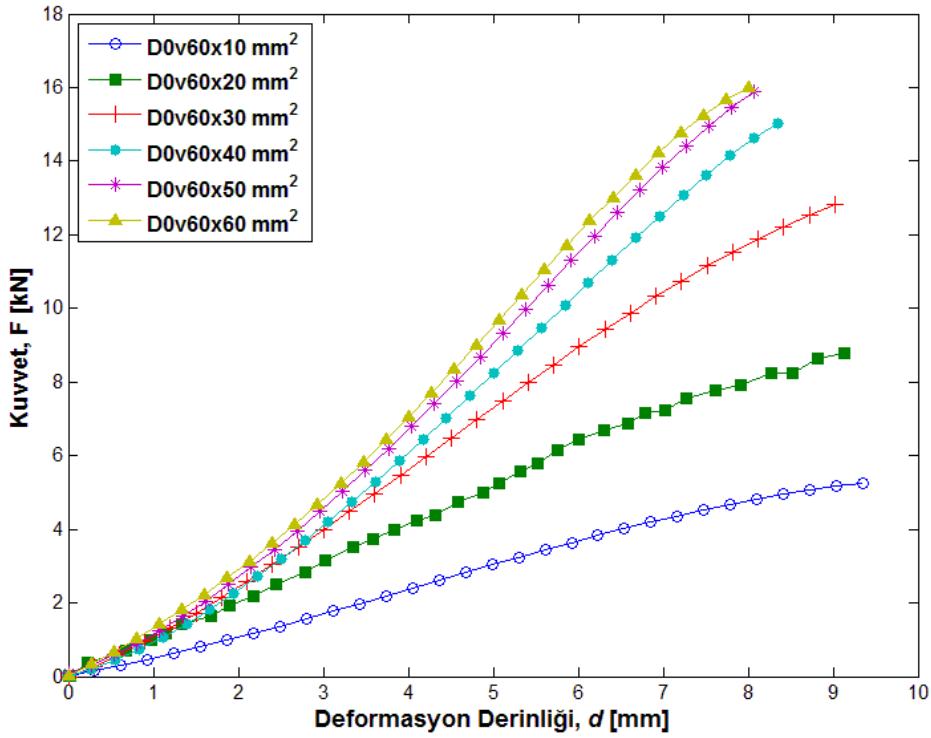
6.2 Erichsen Testi Bulguları

Önceden hazırlanan deney numuneleri Bölümümüz Konstrüksiyon ve İmalat Laboratuvarında bulunan G.U.N.T. WP300.11 Erichsen deney düzeneğinde yırtılınca kadar derin çekilerek soğuk deforme edilmiştir. Deneylerin tutarlılığını tespit edebilmek için numuneye üç kez test yapılmıştır. Deneyler sırasında herhangi bir yağlayıcı kullanılmamıştır. Çünkü yağlayıcı ile yapılan ön denemelerde sürtünme katsayısı azaldığı için sacların herhangi bir yırtılma olmadan, özellikle tek eksenli çekme hali araştırılan sacların ($60 \times 10 \text{ mm}^2$, $60 \times 20 \text{ mm}^2$), kalıp ile pot çemberi arasından kaydığı gözlemlenmiştir. Ayrıca saclara uygulanacak tutucu kuvveti torkmetre ile sıkılan cıvatalar vasıtasıyla saca tatbik edilmiştir.

6.2.1 Kuvvet - deformasyon derinliğinin sac genişliği ile ilişkisi

Sac metallerin şekillendirilebilirliğinin belirlenmesinde kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada aynı sacın 4 farklı çeşidi (düz, 3mm yarı küresel kabartmalı, 6 mm yarı küresel kabartmalı ve 9 mm yarı küresel kabartmalı) Erichsen testine tabi tutulmuştur. Deney esnasında veri toplayıcı ile alınan kuvvet ve deformasyon derinliği değerleri bir grafiğe aktararak şekillendirme esnasındaki kuvvet-deformasyon derinliği değişimleri incelenmiştir. Şekil 6.7’de 0.5 mm kalınlığında düz dubleks paslanmaz çelik sacın kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. Saclar tek eksenli, iki eksenli ve tek eksenliden iki eksenliye geçişteki

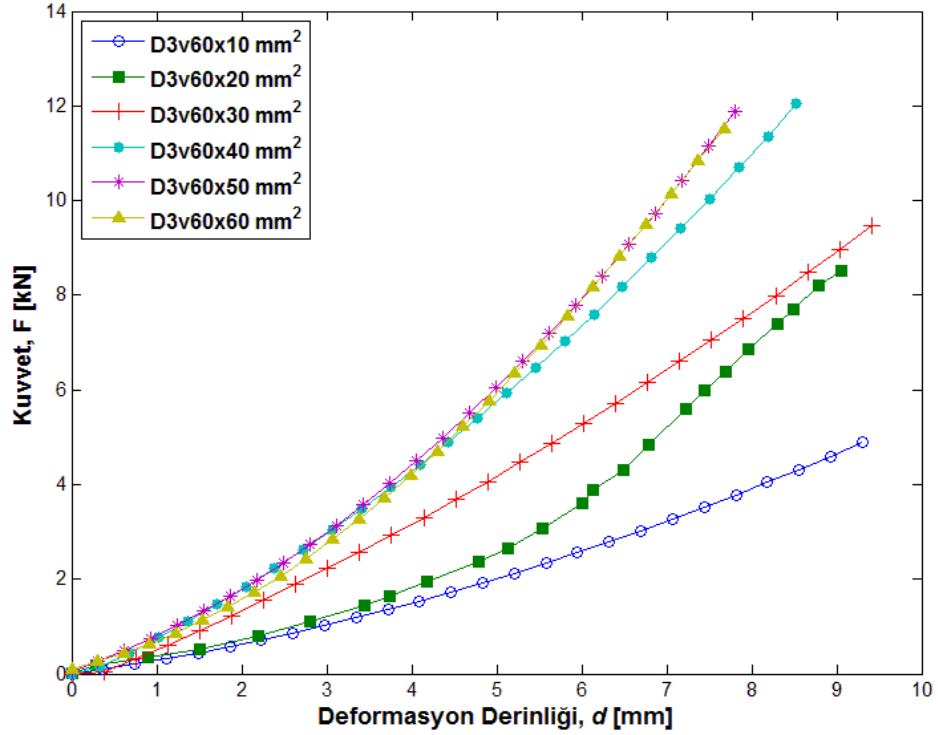
gerilme durumunu inceleyebilmek adına $60 \times 10 \text{ mm}^2$ 'den $60 \times 60 \text{ mm}^2$ 'ye kadar sac genişliği 10'ar mm arttırılarak Erichsen testine tabi tutulmuştur. Grafikte tek eksenli gerilme durumunda ($60 \times 10 \text{ mm}^2$) eğri eğiminin en düşük olduğu ve gerilme hali iki eksenliye doğru gittikçe eğrilerdeki eğimin arttığı görülmektedir. Diğer taraftan ise tek eksenli gerilme durumunda düşük kuvvetler de daha yüksek deformasyon derinliğine ulaşılmasına rağmen (yaklaşık 5.8 kN'da 9.5 mm), iki eksenli gerilme durumunda deformasyon derinliği düşmüş (yaklaşık 8 mm), uygulanan zımba kuvveti ise artmıştır (yaklaşık 16 kN). Grafikten anlaşılabileceği üzere sac genişliği arttırıkça “eğrilerin eğiminin arttığı görülmektedir. Bu durum tek eksenli gerilme halinden iki eksenli gerilme haline geçildikçe şekillendirilebilirliğin zorlaştığını göstermektedir.



Şekil 6.7. Dupleks paslanmaz çelik düz sacların kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.

Şekil 6.8’de 0.5 mm kalınlığındaki ve üzerine 3 mm çapında yarı küresel kabartma desen uygulanmış dupleks paslanmaz çelik sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. Düz saclarda olduğu üzere yarı küresel kabartmalı saclarda da sac genişliği 10’ar mm arttırılarak gerilme durumundaki değişimin sacların şekillendirilmesine olan etkisi incelenmiştir. Grafik incelendiğinde ilk göze çarpan iki eksenli gerilme durumunda maksimum kuvvetteki (yaklaşık 12 kN) düşüştür. Deformasyon derinliğinde ciddi bir değişim olmadan kuvvetteki bu düşüş, sac yüzeyindeki desenlerin şekillendirilebilirliği kolaylaştırdığını göstermektedir. Bunun

sebebi yüzeydeki desenlerin kalıp ile sacın temas alanını düşürerek neredeyse noktasal hale getirmesidir. Ancak pot çemberine uygulanan baskı kuvveti sebebiyle bu desenler ezilmekte ve temas alanı tekrardan artmaktadır. Yine de bu temas alanı düz sacın toplam alanına göre oldukça düşüktür. Temas alanın düşmesi sürtünme kuvvetini değiştirmezken sürtünme kuvvetine karşı yapılan işi azaltmaktadır. Bu da zımba kuvvetindeki düşüşü açıklamaktadır.

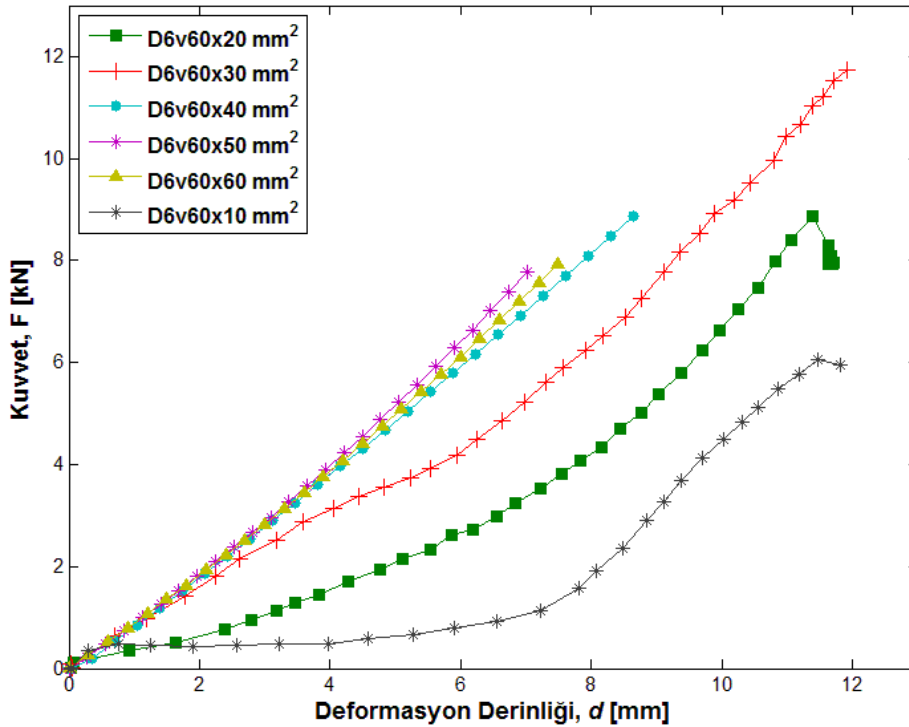


Şekil 6.8. Dupleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.

Şekil 6.9'da 0.5 mm kalınlığındaki ve üzerine 6 mm çapında yarı küresel kabartma desen uygulanmış dupleks paslanmaz çelik sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. Bu grafikte 60x10 mm²'lik saca ait kuvvet-deformasyon derinliği eğrisi verilmemiştir. Çünkü 6 mm ve 9 mm çaplı küresel kabartmalı saclarda 10 mm genişliğindeki saclar kalıp ile pot çemberi arasına düzgün olarak merkezlenememiştir. Bunun sebebi ise 10 mm genişliğindeki saca tek sıra halinde basılan desenlerdir. Yarı küresel desenlerin tepe noktaları kalıp köşe kenarına denk gelerek sacın yüzeye dengeli olarak basmasını engellemiştir. Bu durum zımbanın deformasyon esnasında sacı tam merkezleyemeyerek eğmesine sebep olmuştur. Ayrıca 20 mm genişliğindeki saclarda da zımba sacı merkezlemiş ancak pot çemberinin sac yüzeyindeki desenlerden ötürü sac üzerine baskı kuvvetini üniform

olarak iletememesi sacın kalıbı sıyrmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla bu saclarda herhangi bir yırtılma gözlemlenmemiştir. 30, 40, 50 ve 60 mm genişliğindeki saclarda ise böyle bir durumla karşılaşılmamıştır. Çünkü kalıp ile sac arasındaki temas alanı artarak sacın kalıp yüzeyine düzgün bir şekilde basması sağlanmıştır.

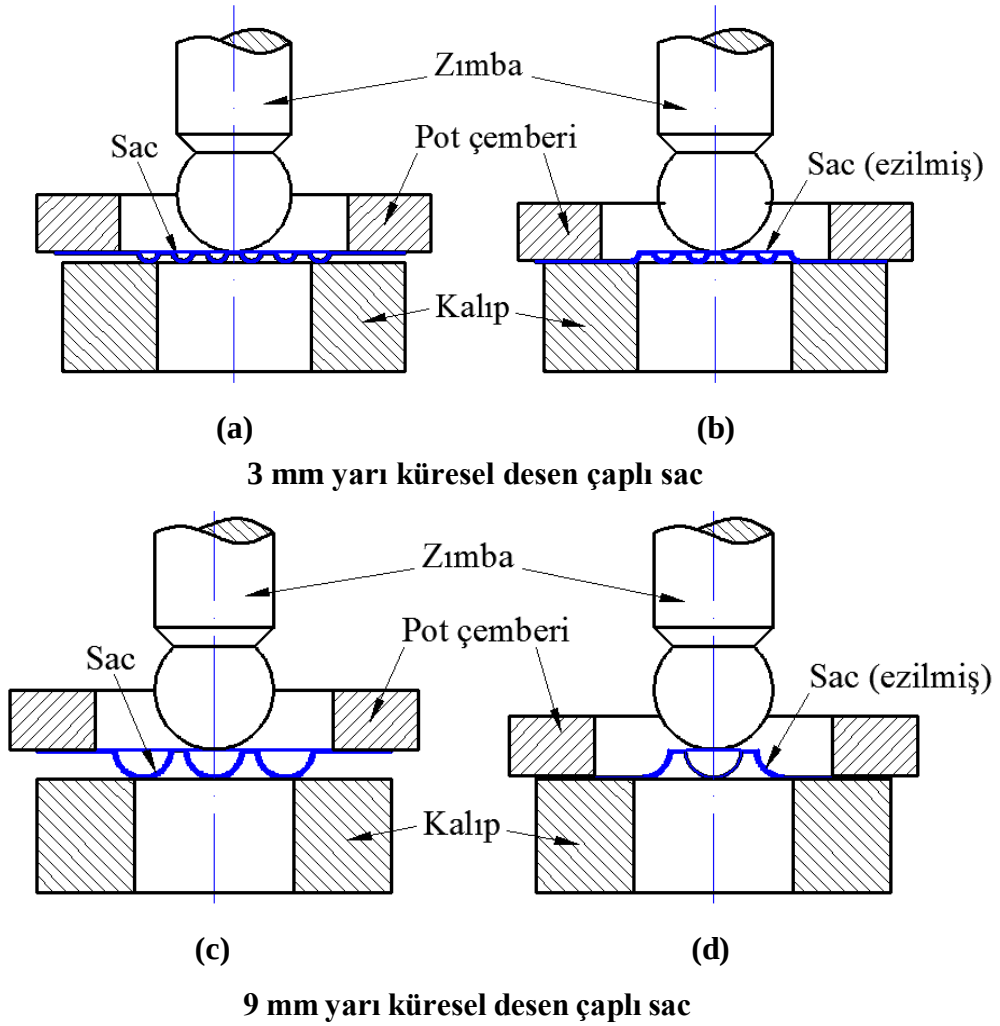
Şekil 6.9’da iki eksenli gerilme durumu için maksimum kuvvetteki düşüş 3 mm çaplı yarı küresel kabartmalı sacdaki gibi devam etmektedir. 6 mm çaplı yarı küresel kabartmalı sacda yaklaşık 8 kN için 7 mm deformasyon derinliği değeri okunmaktadır. Ancak 6 mm çaplı desende 3 mm’e göre deformasyon miktarında bir miktar düşüş görülmektedir. Bu duruma desen çapındaki artış sebep olmaktadır. Çünkü çap arttıkça deformasyon miktarı da artarak sac desenin olduğu bölgelerden incelererek zayıflamaktadır. Bu durum ile düz saclara desen basılırken sıkça karşılaşılmıştır. Hatta bazı saclarda bu desen basımı esnasında yırtılmalar meydana gelmiştir.



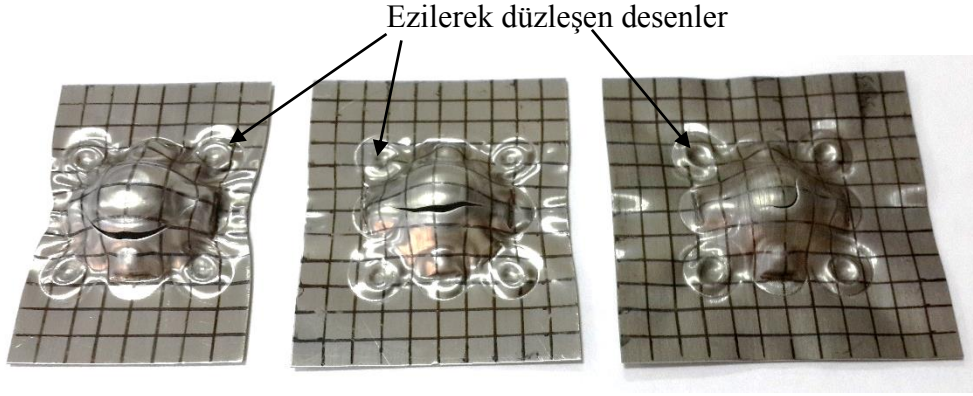
Şekil 6.9. Dupleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sacların kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.

Şekil 5.12’de 0.5 mm kalınlığındaki ve üzerine 9 mm çapında yarı küresel kabartma desen uygulanmış dupleks paslanmaz çelik sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. Grafikte 0’dan yaklaşık 4 mm deformasyon derinliğine kadar eğrilerin eğiminin neredeyse 0° olduğu görülmektedir. Bu duruma desen yüksekliği sebep olmaktadır. Desenli sac kalıp ile pot çemberi arasına ilk olarak

cıvatalar el ile sıkılarak gevşek biçimde bağlanır (Şekil 6.10a ve 6.10c). Zımba saca değdirilerek deformasyon derinliği sıfırlanır ve cıvatalar torkmetre ile sıkılır. Bu esnada pot çemberi ile kalıp arasında kalan desenler ezilerek düzleşir (Şekil 6.10b, 6.10d ve 6.11). Sacın kalıp boşluğunda kalan kısmı, sacın kalıp ile pot çemberi arasında kalan kısmından ilk duruma göre daha yüksekte durmaktadır. Bu kot farkı sacın tüm kısımları (kalıp boşluğu ve kalıp ile pot çemberi arasında kalan alan) aynı seviyeye gelene kadar kuvvetin aynı seviyede kalmasını sağlamaktadır.

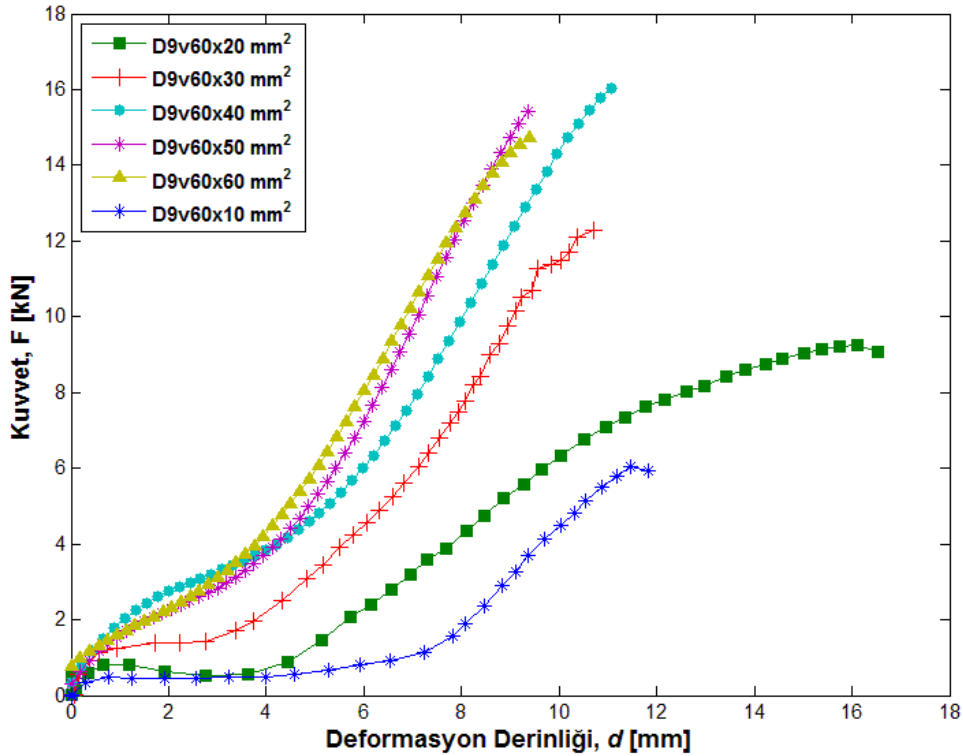


Şekil 6.10. Şematik olarak kalıp ile pot çemberi arasındaki desenli sacın ezilmeden önceki (a-c) ve sonraki (b-d) durumu.



Şekil 6.11. Ezilerek düzleşen (sönen) desenler (9 mm yarı küresel desen).

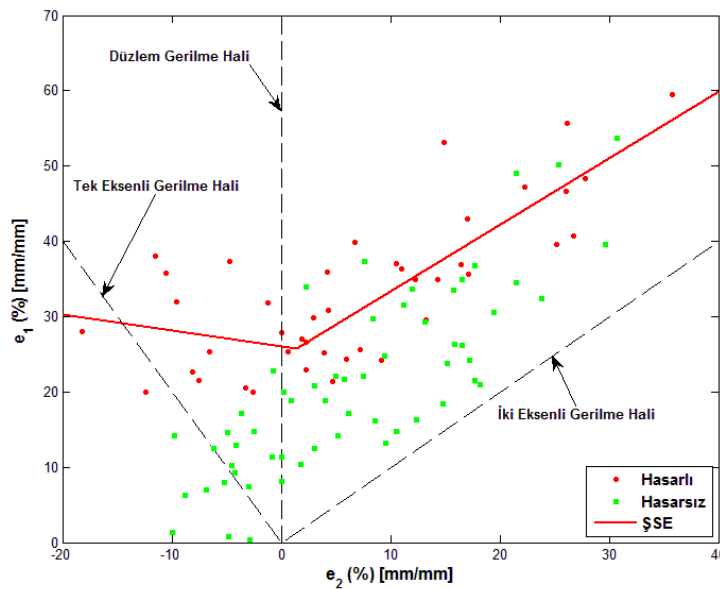
Şekil 6.12’de iki eksenli gerilme durumu için sacın yırtıldığı andaki maksimum zımba kuvveti 14-15 kN aralığına çıkmıştır. Bu değer düz saclar ile yaklaşık olarak aynı değerdedir. Bunun sebebi ise desen çapı büyüdükçe küresel zımbanın yarıçapına (10 mm) yaklaşmaktadır. Zımbanın altına denk gelen küresel desen boşluğu deformasyon esnasında zımbanın şeklini almakta ve artan deformasyon ile birlikte eğrilik yarıçapı artarak düz saca yaklaşmaktadır. Deformasyon esnasında gerçekleşen bu geometrik değişiklik daha büyük desenli sacların düz saclar gibi davranmasını açıklamaktadır.



Şekil 6.12. Dupleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sacların kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.

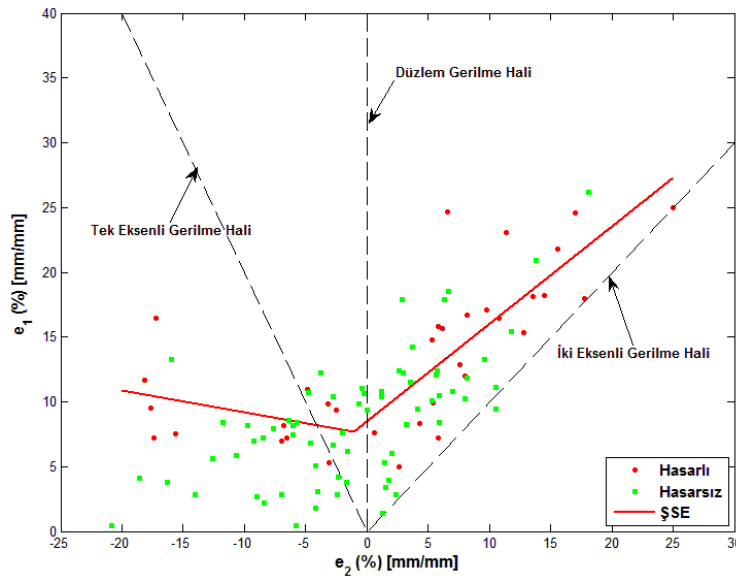
6.2.2 Düz ve desenli sacların şekillendirme sınır diyagramlarının (ŞSD) çizilmesi

Şekil 6.13'te 0.5 mm kalınlığındaki dubleks paslanmaz düz çeliklere uygulanan Erichsen testi sonucu elde edilen verilere göre çizilen şekillendirme sınır diyagramı görülmektedir. Diyagramda görülen kırmızı çizgi şekillendirme sınır eğrisidir (ŞSE). Bu eğrinin altında kalan bölge güvenli bölgedir. Yani şekillendirme esnasında sacda oluşan deformasyon miktarı bu çizginin altında kaldığı sürece sacda herhangi bir yırtılma hasarı meydana gelmeyecektir. Diyagramda görünen kırmızı noktalar Erichsen testi esnasında sacların yırtılan bölgedeki gridlerden alınan deformasyon miktarlarıdır. Yeşil kareler ise sacı yırtılan bölgesine en yakın hasar oluşmayan gridler üzerinden alınan deformasyon miktarlarıdır. Ayrıca diyagramda referans olması amaçlı tek eksenli gerilme hali (basit çekme deneyi), düzlem gerilme hali ve iki eksenli gerilme haline ait sınır eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerden anlaşılacağı üzere diyagramın sol tarafından sağ tarafına doğru gidildikçe sac genişliği artmaktadır. Deneyler esnasında tek eksenli gerilme hali için tasarlanan 60x10 ve 60x20 mm² lik saclar kalıbı sıyırdığı için diyagramın sol tarafı için yeterince ölçüm alınamamıştır. Ölçüm alınan hasarlı değerlere MATLAB programında diyagramın sağ ve sol tarafı için ayrı ayrı lineer regresyon analizi ile doğru uydurularak şekillendirme sınır eğrisi elde edilmiştir. Eğriye göre dubleks paslanmaz çelik düz saclar, düzlem gerilme hali için ($e_2 = 0$) yaklaşık %25 deformasyon oranına kadar herhangi bir hasara uğramadan şekil alabilmektedir.

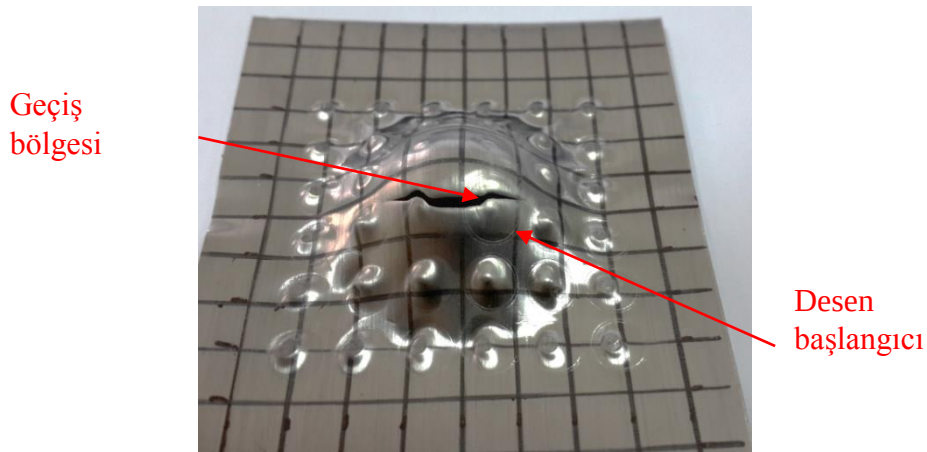


Şekil 6.13. Dubleks paslanmaz düz sacların şekillendirme sınır diyagramı.

Şekil 6.14'te 0.5 mm kalınlığında 3 mm çaplı yarı küresel desenli dubleks paslanmaz çelik sacların şekillendirme sınır diyagramı verilmiştir. Diyagramda 3 mm yarı küresel desene sahip sacın düz saca şekil alma kabiliyetinin yaklaşık %70 oranında düştüğü ($e_2=0$ için) görülmektedir. Küçük çaptaki yarı küresel desenlerde desen baskı kalıbından kaynaklanan geometrik bozukluklar bulunmaktadır. Bu geometrik bozukluklar desen basımından (imalattan) kaynaklanmaktadır. Basılacak olan desen formları kalıp üzerine mükemmel yarı küresel bir şekilde aktarılamamıştır. Yarı küresel desenin alt noktasında tepe noktasına kadar olan geçişlerde bir düzensizlik vardır. Bu düzensizlik Erichsen testi esnasında sac üzerinde çentik etkisi oluşturmakta ve sac bu bölgelerden yırtılmaya başlamaktadır (Şekil 6.15).

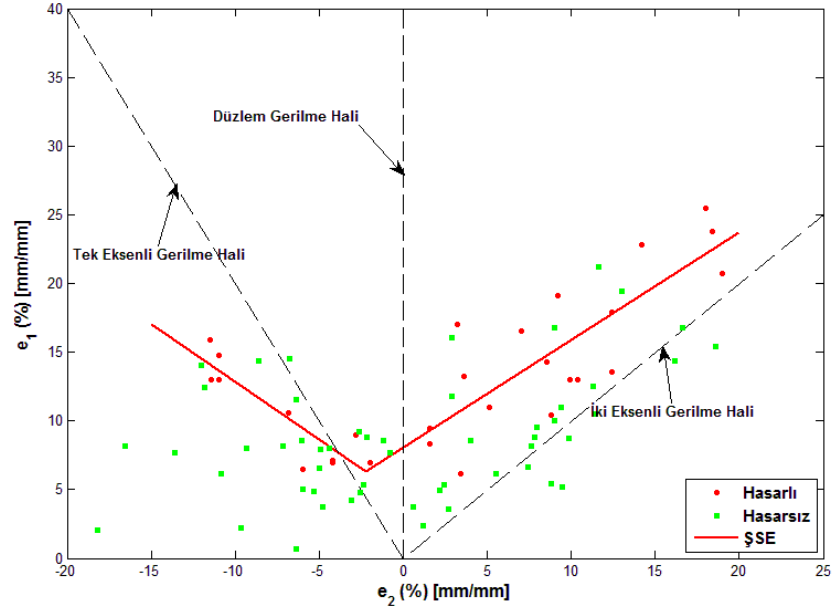


Şekil 6.14. Dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların şekillendirme sınır diyagramı.



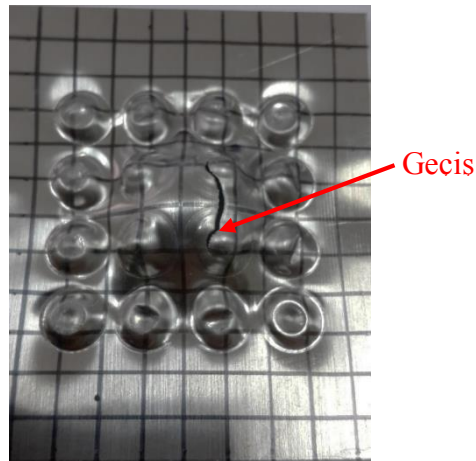
Şekil 6.15. 60x50 mm² lik 3 mm desen çaplı sacda yırtılma hasarı.

Şekil 6.16'da 0.5 mm kalınlığında 6 mm çaplı yarı küresel desenli dubleks paslanmaz çelik saca ait şekillendirme sınır diyagramı verilmiştir. 6 mm çaplı desenli sacın şekil alma kabiliyeti 3 mm desenli sac ile yaklaşık olarak aynıdır. Bu benzer davranışın sebebi yine sacın desenleri üzerindeki kalıptan kaynaklanan yarı küresel desen merkezlerindeki eksenel kaçıklıktır.



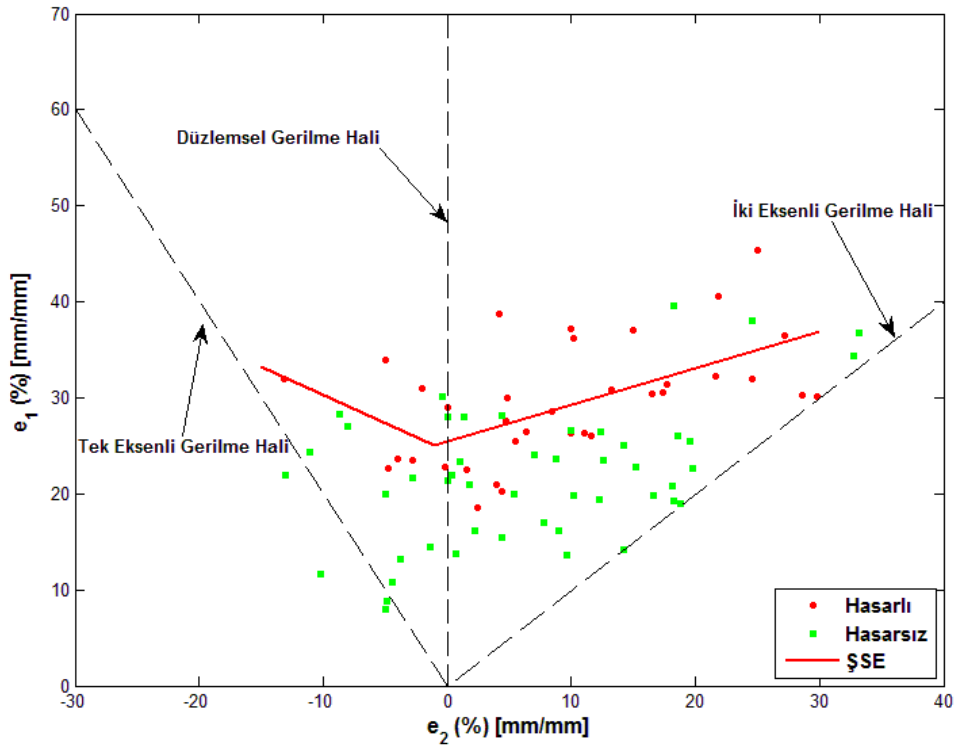
Şekil 6.16. Dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sacların şekillendirme sınır diyagramı.

Şekil 6.17'de 6 mm çaplı desenli 60x50 mm² boyutlarındaki sacda oluşan yırtılma hasarı görülmektedir. Yırtılma oluşan bölge 3 mm çaplı desenli sacda olduğu gibi yarı küresel desen üzerindeki eksenel kaçıklığın olduğu bölgedir. Yırtılma bu bölgeden başlayarak sacın hadde yönüne paralel olarak devam etmiştir.



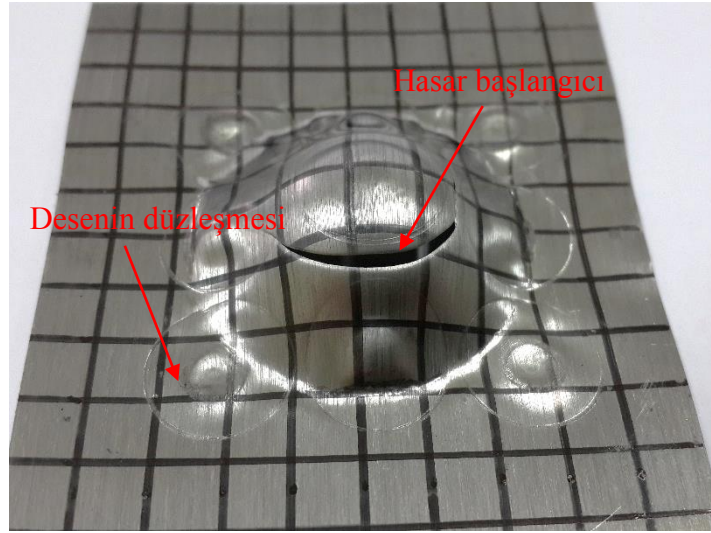
Şekil 6.17. 60x50 mm² lik 6 mm desen çaplı sacda yırtılma hasarı.

Şekil 6.18’de 0.5 mm kalınlığında, 9 mm çaplı yarı küresel desenli dubleks paslanmaz çelik saca ait şekillendirme sınır diyagramı verilmiştir. 3 ve 6 mm çaplı desenli saclardan farklı olarak 9 mm çaplı desenli sacda şekillendirme sınır eğrisinin düz saca benzer olduğu görülmektedir. Bunun sebebi 9 mm çaplı desenli saca desenler basılırken kalıbın tam kapatılmayarak desenlerin üzerinde eksenel kaçıklığa izin verilmemiştir. Böylelikle sac üzerindeki desenler daha yumuşak hatlarda oluşmuş, çentik etkisi oluşma riski ortadan kalkmıştır. Ayrıca sacın orta kısmında bulunan 9 mm çaplı desen Erichsen testi esnasında zımbanın tam altına gelerek zımbayı merkezlemiş ve kuvvetin düzgün olarak iletilmesine sebep olmuştur. Test esnasında genişleyen desenin, deformasyon derinliği arttıkça eğrilik yarıçapı artmış ve düz saca benzer özellik sergilemiştir.



Şekil 6.18. Dupleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sacların şekillendirme sınır diyagramı.

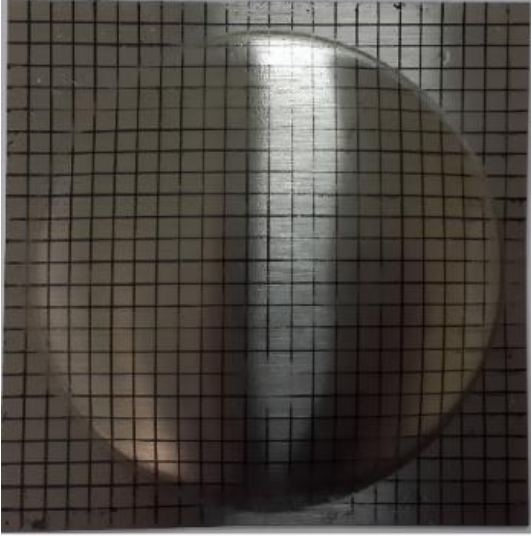
Şekil 6.19’da 0.5 mm kalınlığında 9 mm çaplı desenli 60x50 mm² boyutlarındaki sacda oluşan yırtılma hasarı görülmektedir. Sacın orta kısmında bulunan desen deformasyon esnasında tamamen kaybolarak aynı düz sacdaki gibi bir hal almıştır. Ayrıca bu desen etrafında bulunan diğer desenlerde pot çemberi ile kalıp arasında ezilerek düzlemsel bir hal almışlardır. Bu durum 9 mm çaplı desenli sacın şekil alma kabiliyetinin düz sacın şekil alma kabiliyetine yaklaşmasını açıklamaktadır.



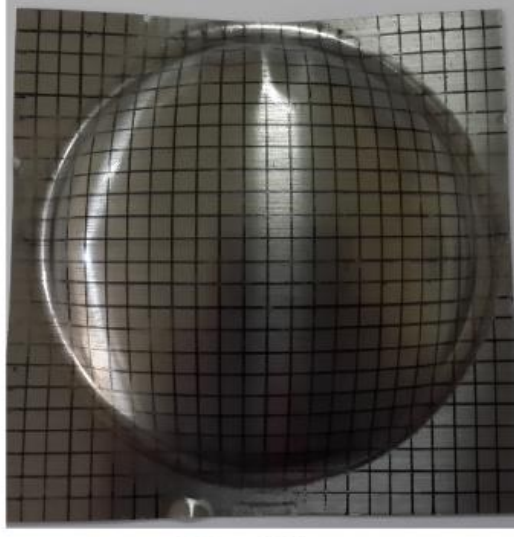
Şekil 6.19. 60x50 mm² lik 9 mm desen çaplı sacda yırtılma hasarı.

6.3 Bulge Testi (Hidro-şekillendirme) Bulguları

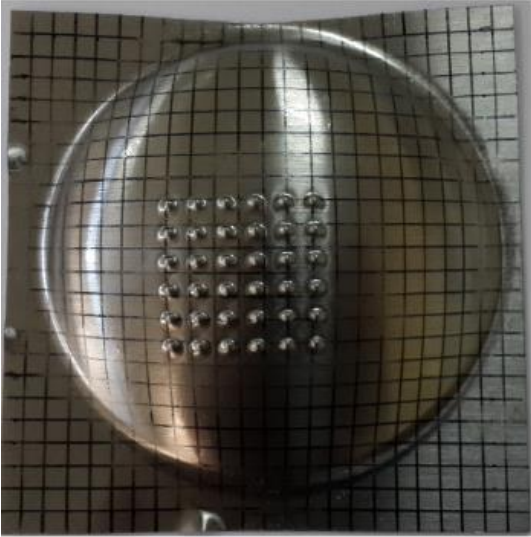
Çalışmanın bu bölümünde, daha önceden hazırlanmış 120x120 mm² boyutlarında 0.5 mm kalınlığında düz ve yarı küresel desenli (3 mm, 6 mm, 9 mm çaplı) dubleks paslanmaz çelikler Bulge testine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda sacın kalıbı sıyırması sebebi ile saclarda herhangi bir yırtılma hasarı oluşmamıştır (Şekil 6.20).



Düz - 32 bar



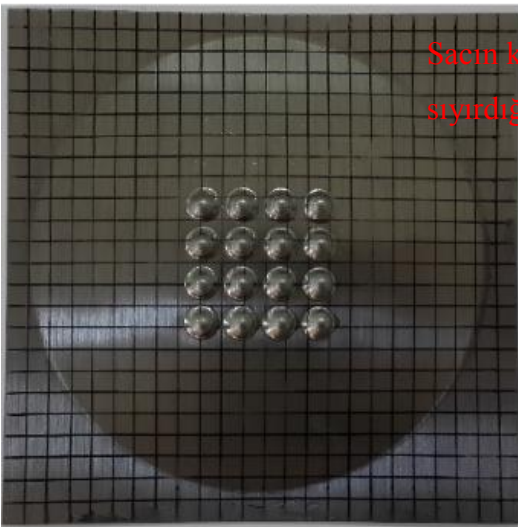
Düz - 41 bar



3 mm desenli - 62 bar



3 mm desenli - 81 bar



6 mm desenli - 30 bar



9 mm desenli - 45 bar

Şekil 6.20. Bulge testi yapılmış numuneler.

Çizelge 6.2’de sac numunelere uygulanan basınçlar ile oluşan deformasyon derinlikleri ve hasar durumları verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere 6 mm çaplı yarı küresel desenli dubleks paslanmaz çelik sac dışında herhangi bir hasara uğrayan sac bulunmamaktadır. 6 mm çaplı desenli sacda oluşan hasar ise desen tepelerine yakın yerlerde oluşan çap geçişlerinden kaynaklanmaktadır. Bu geçiş bölgelerinde incelenerek zayıflayan sac hidrolik basıncın etkisi ile buralardan yırtılmış ve yağ sızdırarak basıncın artmasını engellemiştir. Diğer sac numunelerde ise hasar oluşmamasının sebebi, yaklaşık 50 bar’lık sıkıştırma basıncına rağmen, sacın kalıbı sıyırmasıdır.

Çizelge 6.2. 120x120 mm² saclara uygulanan basınç, deformasyon derinliği ve hasar gözlemi.

Sac	Uygulanan Hidrolik Basınç	Deformasyon Derinliği	Hasar Durumu
Düz-1	32 bar	6.4 mm	Yok
Düz-2	41 bar	15.2 mm	Yok
3 mm desenli-1	62 bar	13.4 mm	Yok
3 mm desenli-2	81 bar	18.25 mm	Yok
6 mm desenli	30 bar	5.15 mm	Var
9 mm desenli	45 bar	13.45 mm	Yok

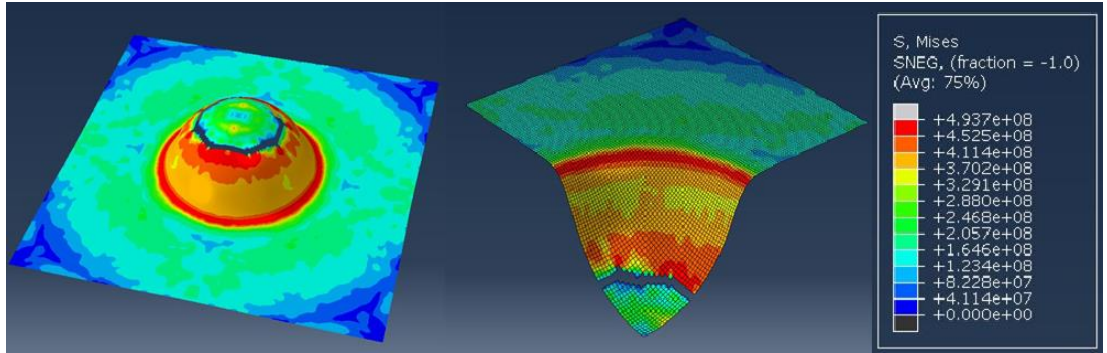
7. ANALİZ SONUÇLARI

7.1 Ön Deneme Çalışmalarının Sonlu Elemanlar Analizi

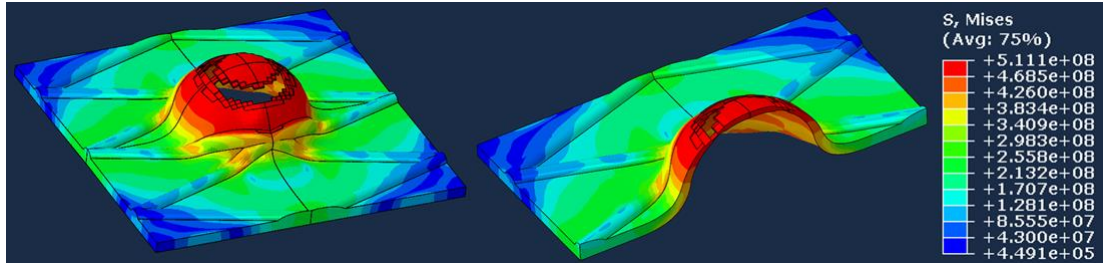
Ön deneme çalışmalarında St-37 düşük karbonlu düz ve baklava dilimi desenli çelik saclara ait simülasyon sonuçları bu kısımda verilmiştir. Çalışmalar modellenirken farklı yöntemler kullanılmış ve elde edilen sonuçlar asıl tez çalışması için önemli öngörüler sağlamıştır. Simülasyon sonuçları genel olarak deneysel veriler ile örtüşmüştür.

7.1.1 Düz ve baklava desenli sacların analizi

Analiz sonucunda düz parçaların yaklaşık 8 mm, desenli parçaların ise yaklaşık 10 mm deformasyon derinliğinde hasara uğradıkları görülmüştür. Ayrıca parçalar tepe noktasına yakın bölgelerden hasara uğrayarak deneysel sonuçlarla benzerlik göstermişlerdir (Şekil 7.1 ve 7.2).



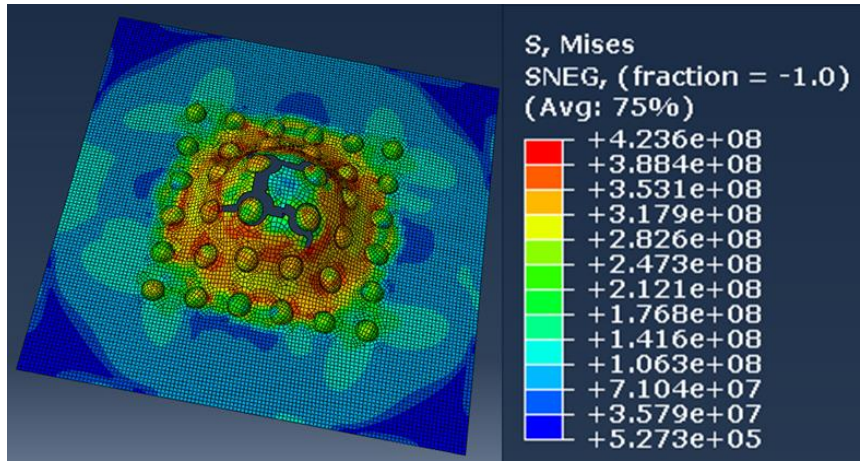
Şekil 7.1. Analiz sonunda hasara uğramış düz sacda gerilme dağılımı (ön deneme).



Şekil 7.2. Analiz sonunda hasara uğramış desenli sacda gerilme dağılımı.

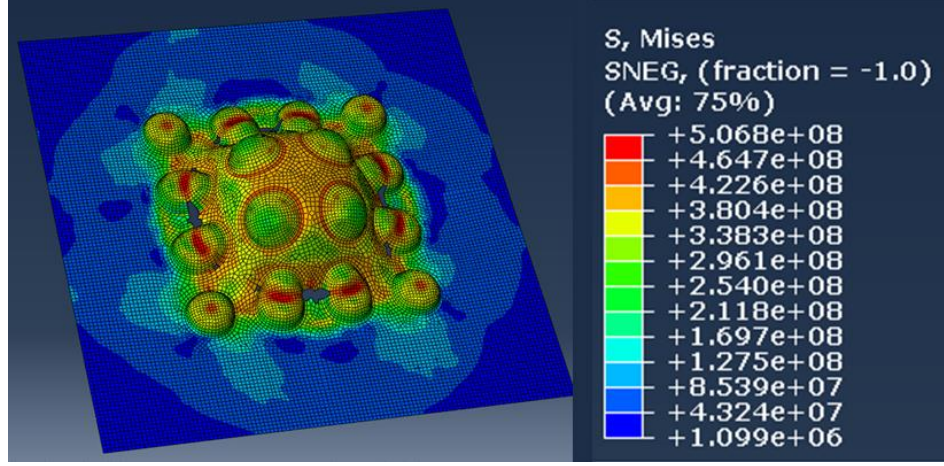
7.1.2 Yarı küresel desenli sacların analizi

Sonlu elemanlar yönteminde temas problemlerinin çözümü zor ve zaman alıcı olduğundan dolayı, bu tür problemleri açık (explicit) yöntem ile çözmek en kolay yoldur. Bu bağlamda modellenen saclar ABAQUS/Explicit modülünde çözülmüştür. Şekil 7.3'te analiz sonucunda hasara uğramış 3 mm çaplı doğrusal dizilimli yarı küresel desenli model görülmektedir. Hasar genel olarak yarı küresel desenlerin boğum noktalarından başlayarak ilerlemiştir. ABAQUS programı diğer sonlu eleman programları gibi birimlerden bağımsız olarak çalıştığından dolayı girilen sayıların birimlerini belirlemek kullanıcının tercihine bırakılmıştır. Burada yapılan tüm çalışmalarda MKS birim sistemi kullanılmıştır. Dolayısıyla analiz sonucunda çıkan Von Mises eşdeğer gerilme değerleri Pascal (Pa) cinsinden verilmektedir.



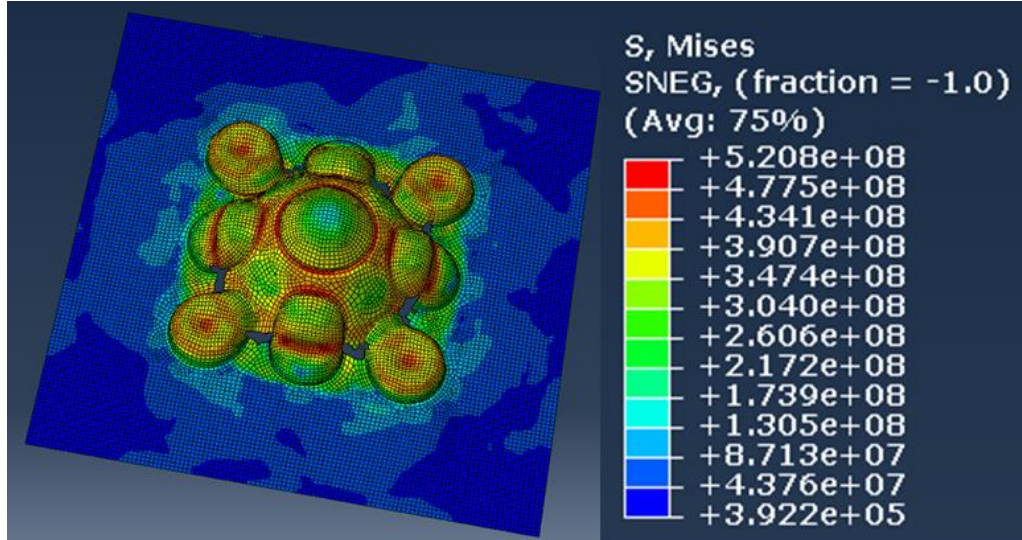
Şekil 7.3. 3 mm çaplı yarı küresel desenli hasara uğramış sacda gerilme dağılımı.

Şekil 7.4'te 6 mm çaplı yarı küresel desenli modelin analiz sonucu görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere model şekillendirme sonucu hasara uğramadan önce pot çemberi ile alt kalıp arasında sıkışmasından dolayı hasara uğramıştır. Pot çemberinin uyguladığı kuvvet ile yarı küresel desenler ezilmiş ve derin çekme esnasında kalıp kavislerinde kırılmışlardır. Bu bölgedeki aşırı şekil değiştirme parçaların yırtılmasına sebep olmuştur. Orta bölgelerdeki yarı küresel desenlerin ise giderek düzleştiği görülmektedir.



Şekil 7.4. 6 mm çaplı yarı küresel desenli hasara uğramış sacda gerilme dağılımı.

Şekil 7.5'te 9 mm çaplı doğrusal diziliimli yarı küresel desenli hasar uğramış model görülmektedir. Bu modelde de 6 mm desen çaplı sacda olduğu gibi pot çemberi ile kalıp arasına sıkışmadan kaynaklı hasar görülmektedir. Ayrıca pot çemberi ile kalıp arasında kalan yarı küresel desenlerin ezildiği de açıkça görülmektedir. Bu modelde orta kısımdaki yarı küresel desenlerin giderek yayvanlaştığı daha net bir şekilde görülmektedir. Çap arttıkça gerilmenin arttığı ancak bu artışın şekillendirme sonucu değil, kalıp ile pot çemberi arasında oluşan sıkışmadan kaynaklandığı belirlenmiştir.



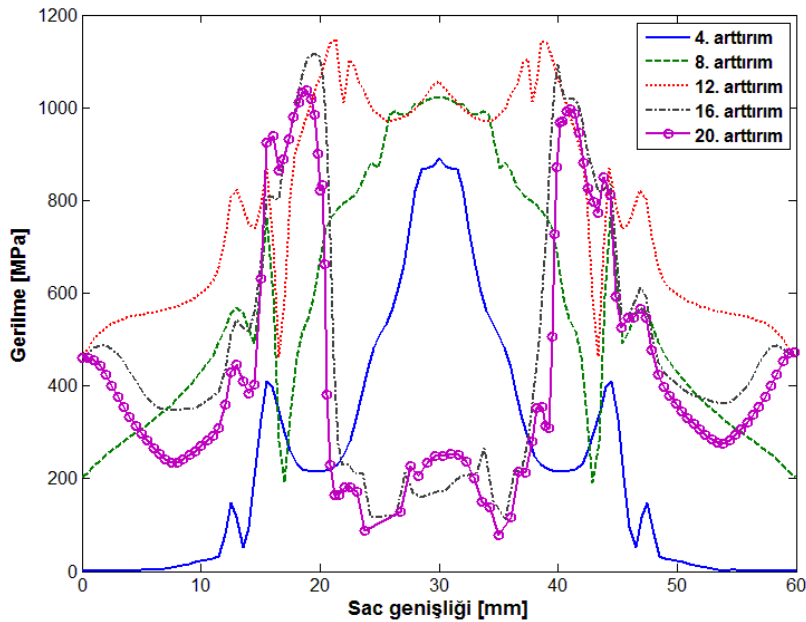
Şekil 7.5. 9 mm çaplı yarı küresel desen hasara uğramış sacda gerilme dağılımı.

7.2 Erichsen Testi Analizi

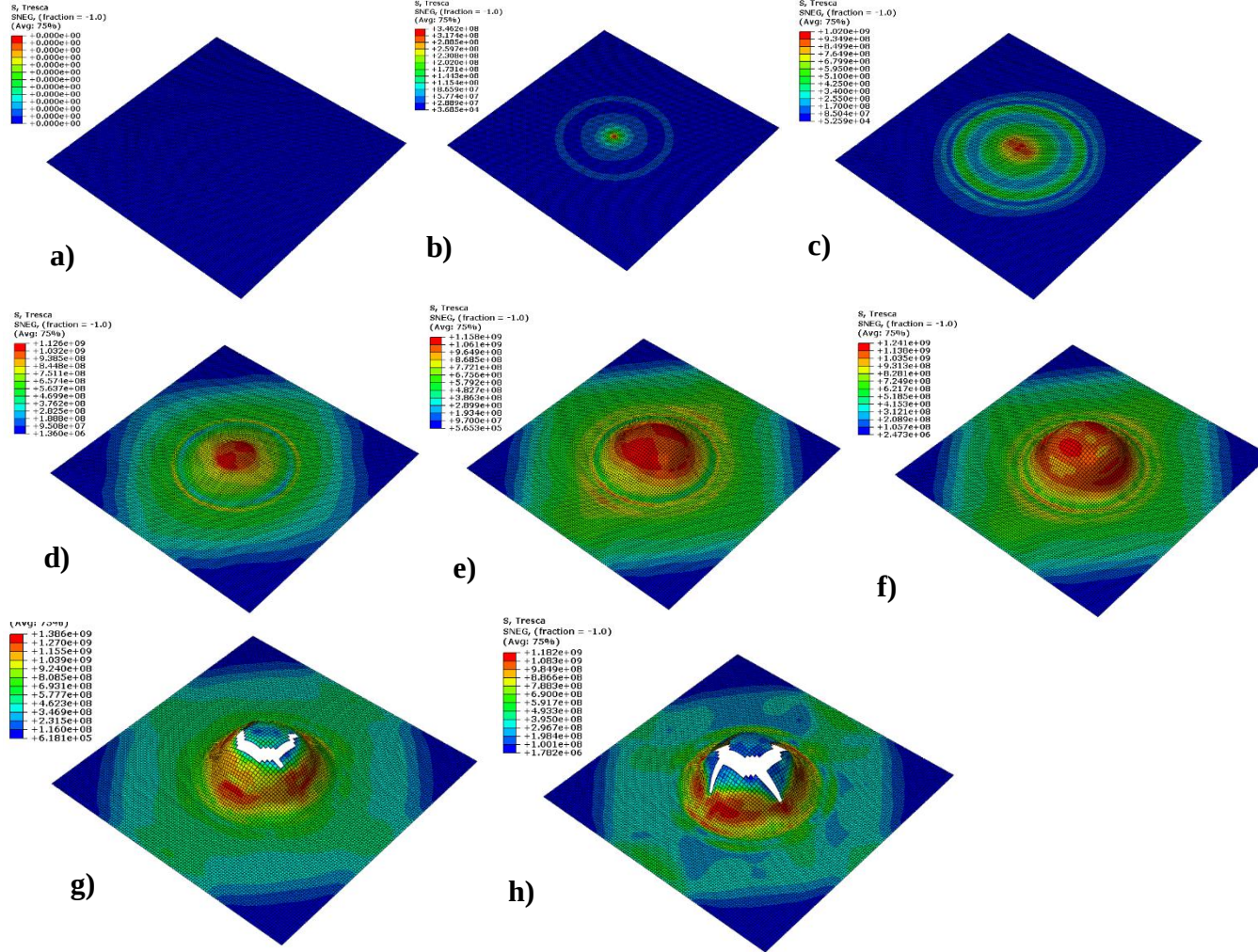
Çalışmanın bu kısmında ABAQUS programında simülasyonu yapılan 60x60 mm² ebatlarındaki sac modellerin simülasyon sırasında bazı anlardaki görüntüleri verilmiştir. Diğer ebatlardaki saclara da aynı simülasyon yapılmasına rağmen bu kısımda yer verilmemiştir. Düz sacların tek adımda simülasyonu tamamlarken, desenli saclarda desen basımı, kalıpların sıkıştırılması ve Erichsen testi olacak şekilde 3 farklı adımda simülasyon tamamlanmaktadır.

7.2.1 Düz sacların Erichsen testi analizi

Şekil 7.6'da düz sacların Erichsen testi sırasında kesit gerilme dağılımı verilmiştir. Gerilme dağılımı grafiği 4 arttırmada 1 gerilme değerleri alınarak oluşturulmuştur. Şekil 7.7'de ise düz sacların Erichsen testi analiz sonuçları verilmiştir. Yaklaşık 4 arttırmada 1 kare olacak şekilde seri tamamlanmıştır. Sac üzerinde oluşan Tresca gerilmeleri ve hasarlar şekil üzerinde görülmektedir. Programa malzeme özellikleri girilirken sacın hadde yönüne bağlı olarak değişkenleri analize yansıtmak için hadde yönüne bağlı gerilme oranları (σ_1/σ_2 oranı vb.) anizotropi katsayıları yardımı ile hesaplanmıştır. Sac modelin yırtılma şekline bakıldığında (Şekil 7.7f ve 7.7g) modelin aynı anda simetrik olarak yırtılmadığı görülmektedir. Daha önce programa girilen gerilme oranları sac model üzerinde yırtılmanın bu şekilde ve hadde yönüne bağlı olarak oluşmasına sebep olmuştur.



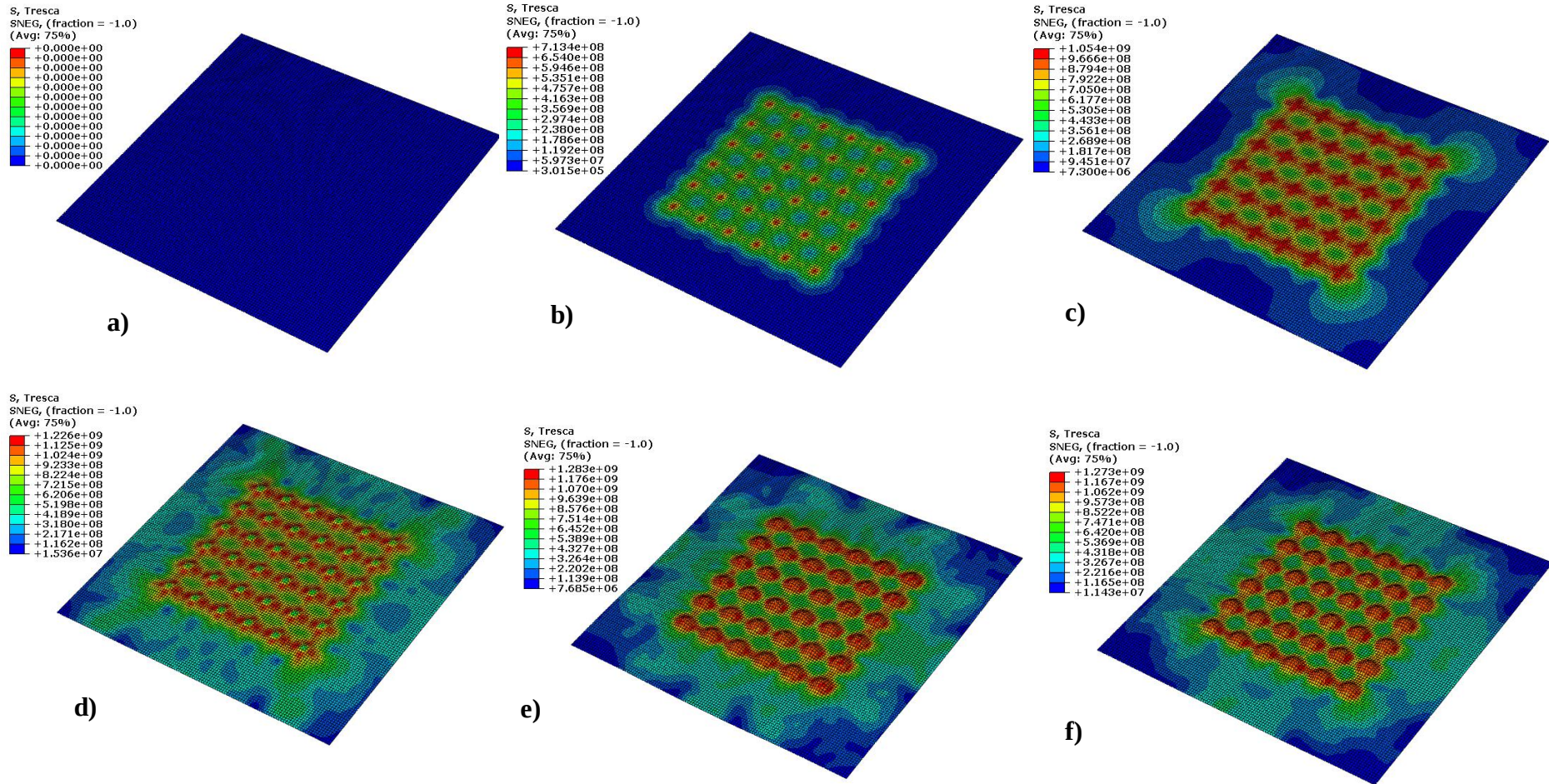
Şekil 7.6. Düz sacların derin çekme sırasındaki kesit gerilme dağılımı.



Şekil 7.7. Düz sacların Erichsen testi sırasında gerilme dağılımı ve hasar oluşumu.

7.2.2 Desenli sacların Erichsen testi analizi

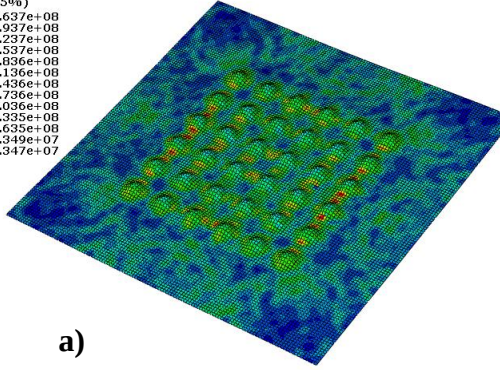
Bu bölümde desenli sac modellerin Erichsen testi analiz sonuçları verilmiştir. Düz sac modellere öncelikle desen basılmış ve ardından alt kalıp ile üst kalıp arasına sıkıştırılan desenli sac model Erichsen testine tabi tutulmuştur. Şekil 7.8, 7.11 ve 7.14 farklı çaplardaki desen basımı esnasında sac üzerinde gerilme dağılımlarını göstermektedir. Ayrıca her bir resmin sol tarafındaki renk sütununda sac üzerindeki o an oluşan Tresca gerilmeleri görülmektedir. Şekil 7.9, 7.12 ve 7.15'te farklı çaplardaki desenli sacların desen basımı sonrası ve alt kalıp ile üst kalıp arasına sıkışma halindeki gerilme durumları verilmiştir. Desen basımı sonrası desen kalıpları açıldığından dolayı sac üzerinde oluşan bası gerilmesi kalkmakta ve sadece desen basımından kaynaklı gerilmeler sac üzerinde kalmaktadır. Bu durum desen basımı ile desen basımı sonrası oluşan gerilme düşüşü ile gözlenmektedir. Yapılan simülasyonlar sayesinde bu artık gerilmeleri görselleştirmek mümkün olmuştur. Şekil 7.10, 7.13 ve 7.16'te ise alt kalıp ile pot çemberi arasına sıkışan sacın yırtıldığı ana kadar Erichsen testine tabi tutulması verilmiştir. Verilen şekillerde alt kalıp ile pot çemberi arasına sıkışan kenarlardaki desenlerin yük altındayken bir miktar ezildiği görülmektedir. Zımbanın ilerlemesi ile birlikte sac incelmekte ve sac merkezine yakın çevredeki iki veya üç noktada ilk yırtıklar meydana gelmektedir.



Şekil 7.8. Düz sac modele 3 mm çaplı yarı küresel desen basımında gerilme dağılımı.

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

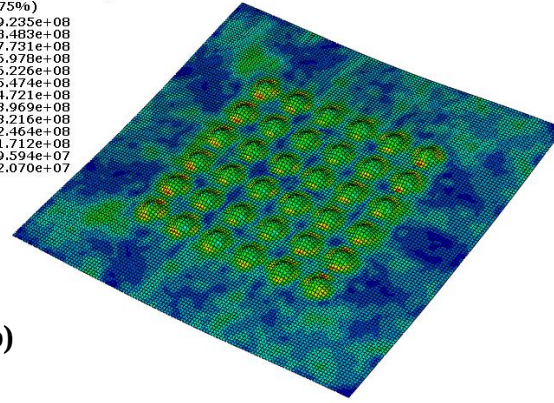
+8.637e+08
+7.937e+08
+7.237e+08
+6.537e+08
+5.836e+08
+5.136e+08
+4.436e+08
+3.736e+08
+3.036e+08
+2.335e+08
+1.635e+08
+9.349e+07
+2.347e+07



a)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

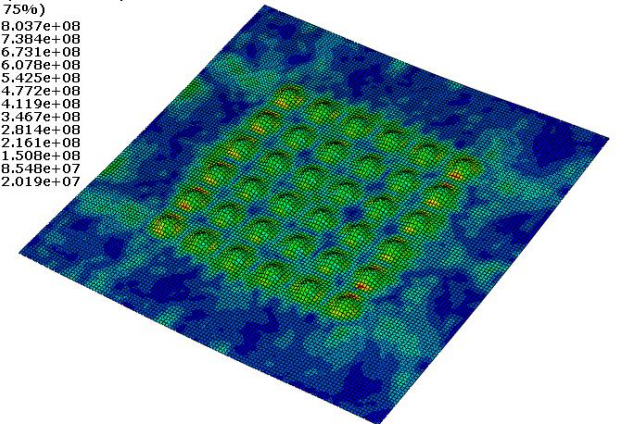
+9.235e+08
+8.483e+08
+7.731e+08
+6.978e+08
+6.226e+08
+5.474e+08
+4.721e+08
+3.969e+08
+3.216e+08
+2.464e+08
+1.712e+08
+9.594e+07
+2.070e+07



b)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

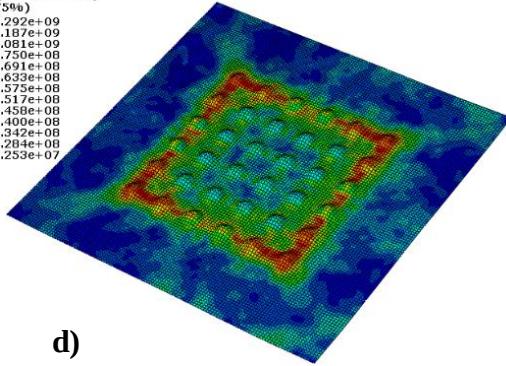
+8.037e+08
+7.384e+08
+6.731e+08
+6.078e+08
+5.425e+08
+4.772e+08
+4.119e+08
+3.467e+08
+2.814e+08
+2.161e+08
+1.508e+08
+8.548e+07
+2.019e+07



c)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

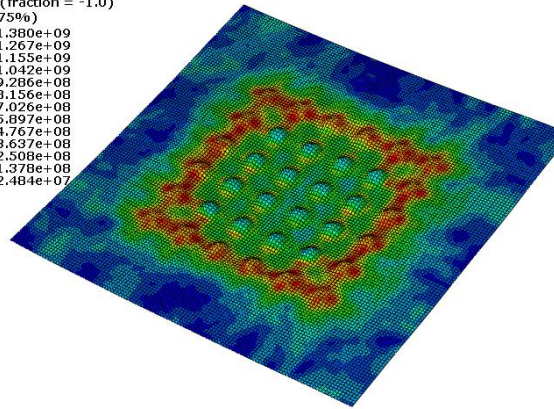
+1.292e+09
+1.187e+09
+1.081e+09
+9.750e+08
+8.691e+08
+7.633e+08
+6.575e+08
+5.517e+08
+4.458e+08
+3.400e+08
+2.342e+08
+1.284e+08
+2.253e+07



d)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

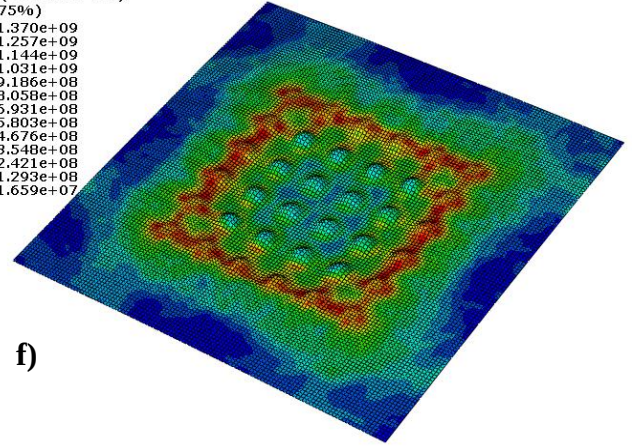
+1.380e+09
+1.267e+09
+1.155e+09
+1.042e+09
+9.286e+08
+8.156e+08
+7.026e+08
+5.897e+08
+4.767e+08
+3.637e+08
+2.508e+08
+1.378e+08
+2.484e+07



e)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

+1.370e+09
+1.257e+09
+1.144e+09
+1.031e+09
+9.186e+08
+8.058e+08
+6.931e+08
+5.803e+08
+4.676e+08
+3.548e+08
+2.421e+08
+1.293e+08
+1.659e+07

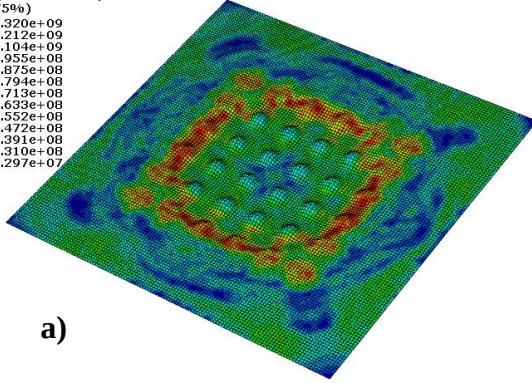


f)

Şekil 7.9. 3 mm çaplı yarı küresel desenli sacın sıkıştırılması ve gerilme dağılımı.

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

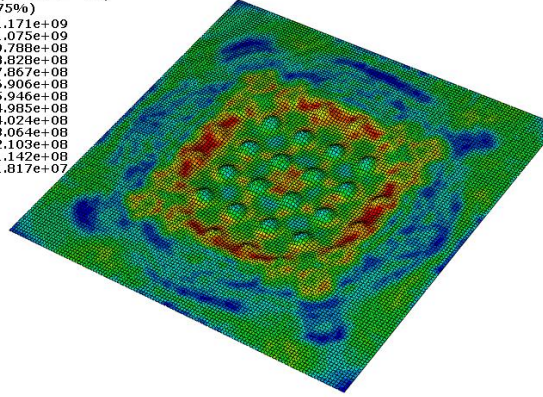
+1.320e+09
+1.212e+09
+1.104e+09
+9.855e+08
+8.875e+08
+7.794e+08
+6.713e+08
+5.633e+08
+4.552e+08
+3.472e+08
+2.391e+08
+1.310e+08
+2.297e+07



a)

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

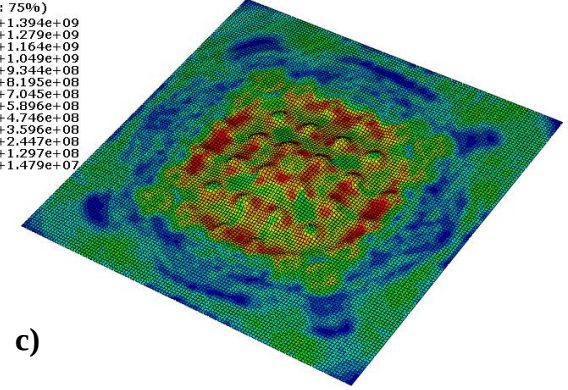
+1.171e+09
+1.075e+09
+9.788e+08
+8.828e+08
+7.867e+08
+6.906e+08
+5.946e+08
+4.985e+08
+4.024e+08
+3.064e+08
+2.103e+08
+1.142e+08
+1.817e+07



b)

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

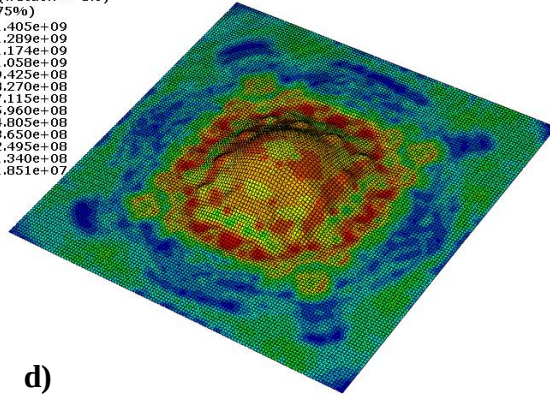
+1.394e+09
+1.279e+09
+1.164e+09
+1.049e+09
+9.344e+08
+8.195e+08
+7.045e+08
+5.896e+08
+4.746e+08
+3.596e+08
+2.447e+08
+1.297e+08
+1.479e+07



c)

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

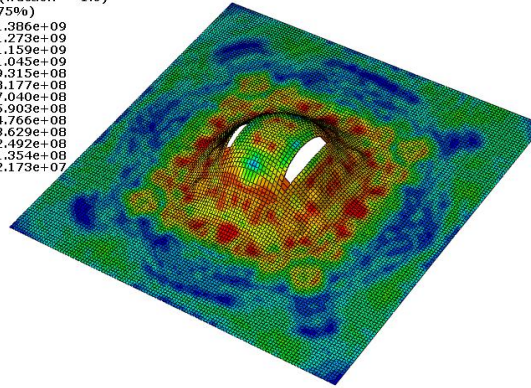
+1.405e+09
+1.289e+09
+1.174e+09
+1.058e+09
+9.425e+08
+8.270e+08
+7.115e+08
+5.960e+08
+4.805e+08
+3.650e+08
+2.495e+08
+1.340e+08
+1.851e+07



d)

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

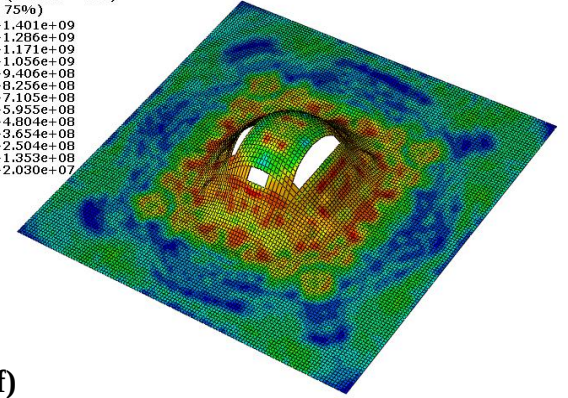
+1.386e+09
+1.273e+09
+1.159e+09
+1.045e+09
+9.315e+08
+8.177e+08
+7.040e+08
+5.903e+08
+4.766e+08
+3.629e+08
+2.492e+08
+1.354e+08
+2.173e+07



e)

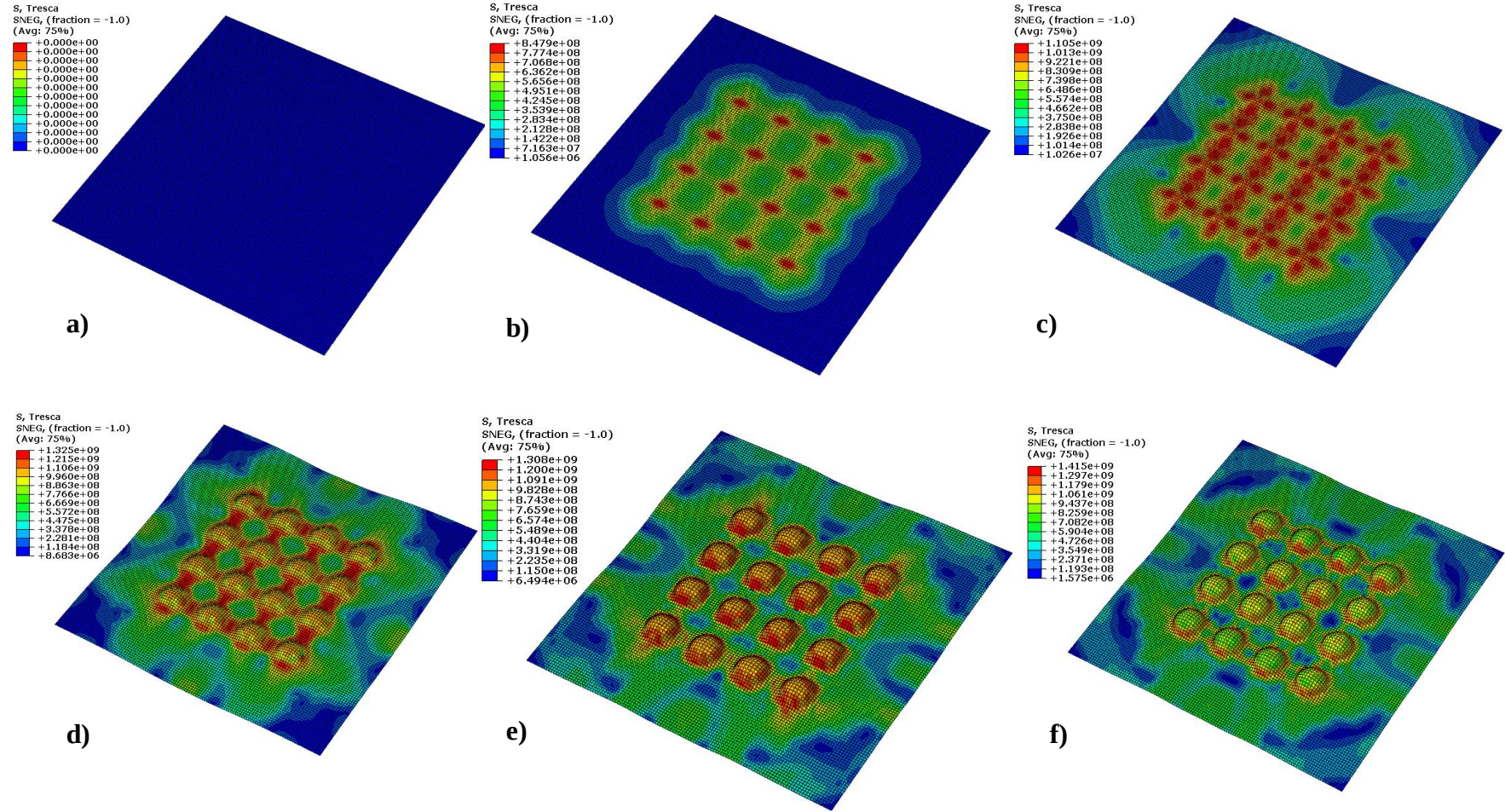
S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

+1.401e+09
+1.286e+09
+1.171e+09
+1.056e+09
+9.406e+08
+8.256e+08
+7.105e+08
+5.955e+08
+4.804e+08
+3.654e+08
+2.504e+08
+1.353e+08
+2.030e+07



f)

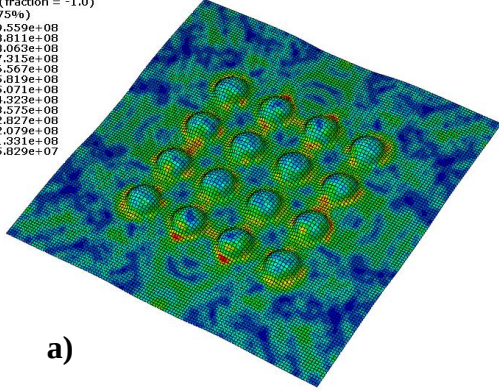
Şekil 7.10. 3 mm çaplı yarı küresel desenli sacın Erichsen testi sırasında gerilme dağılımı ve hasar oluşumu.



Şekil 7.11. Düz sac modele 6 mm çaplı yarı küresel desen basımında gerilme dağılımı.

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

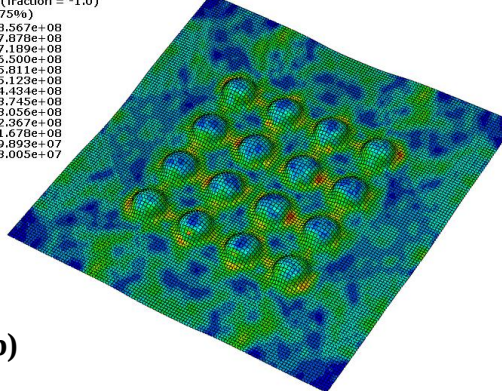
+	9.559e+08
+	8.811e+08
+	8.065e+08
+	7.315e+08
+	6.567e+08
+	5.819e+08
+	5.071e+08
+	4.323e+08
+	3.575e+08
+	2.827e+08
+	2.079e+08
+	1.331e+08
+	5.829e+07



a)

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

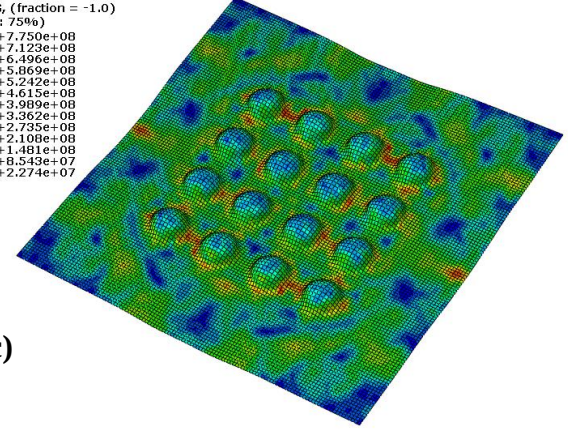
+	8.567e+08
+	7.878e+08
+	7.189e+08
+	6.500e+08
+	5.811e+08
+	5.123e+08
+	4.434e+08
+	3.745e+08
+	3.056e+08
+	2.367e+08
+	1.678e+08
+	9.893e+07
+	3.005e+07



b)

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

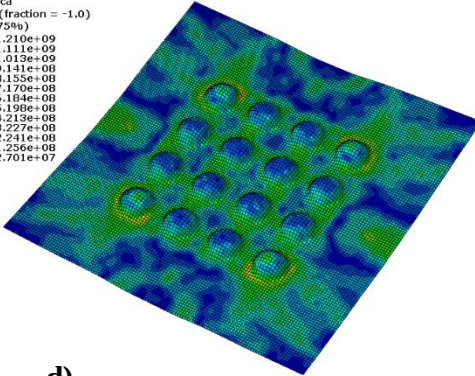
+	7.750e+08
+	7.123e+08
+	6.496e+08
+	5.869e+08
+	5.242e+08
+	4.615e+08
+	3.989e+08
+	3.362e+08
+	2.735e+08
+	2.108e+08
+	1.481e+08
+	8.543e+07
+	2.274e+07



c)

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

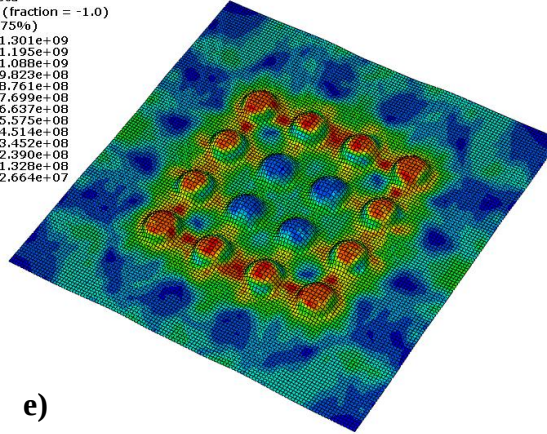
+	1.210e+09
+	1.111e+09
+	1.013e+09
+	9.141e+08
+	8.155e+08
+	7.170e+08
+	6.184e+08
+	5.198e+08
+	4.213e+08
+	3.227e+08
+	2.241e+08
+	1.256e+08
+	2.701e+07



d)

S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

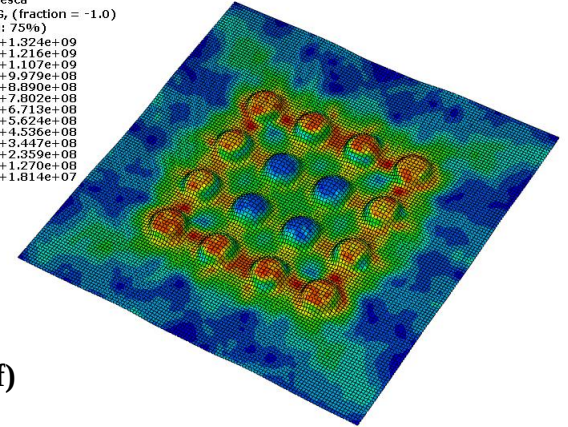
+	1.301e+09
+	1.195e+09
+	1.088e+09
+	9.823e+08
+	8.761e+08
+	7.699e+08
+	6.637e+08
+	5.575e+08
+	4.514e+08
+	3.452e+08
+	2.390e+08
+	1.328e+08
+	2.664e+07



e)

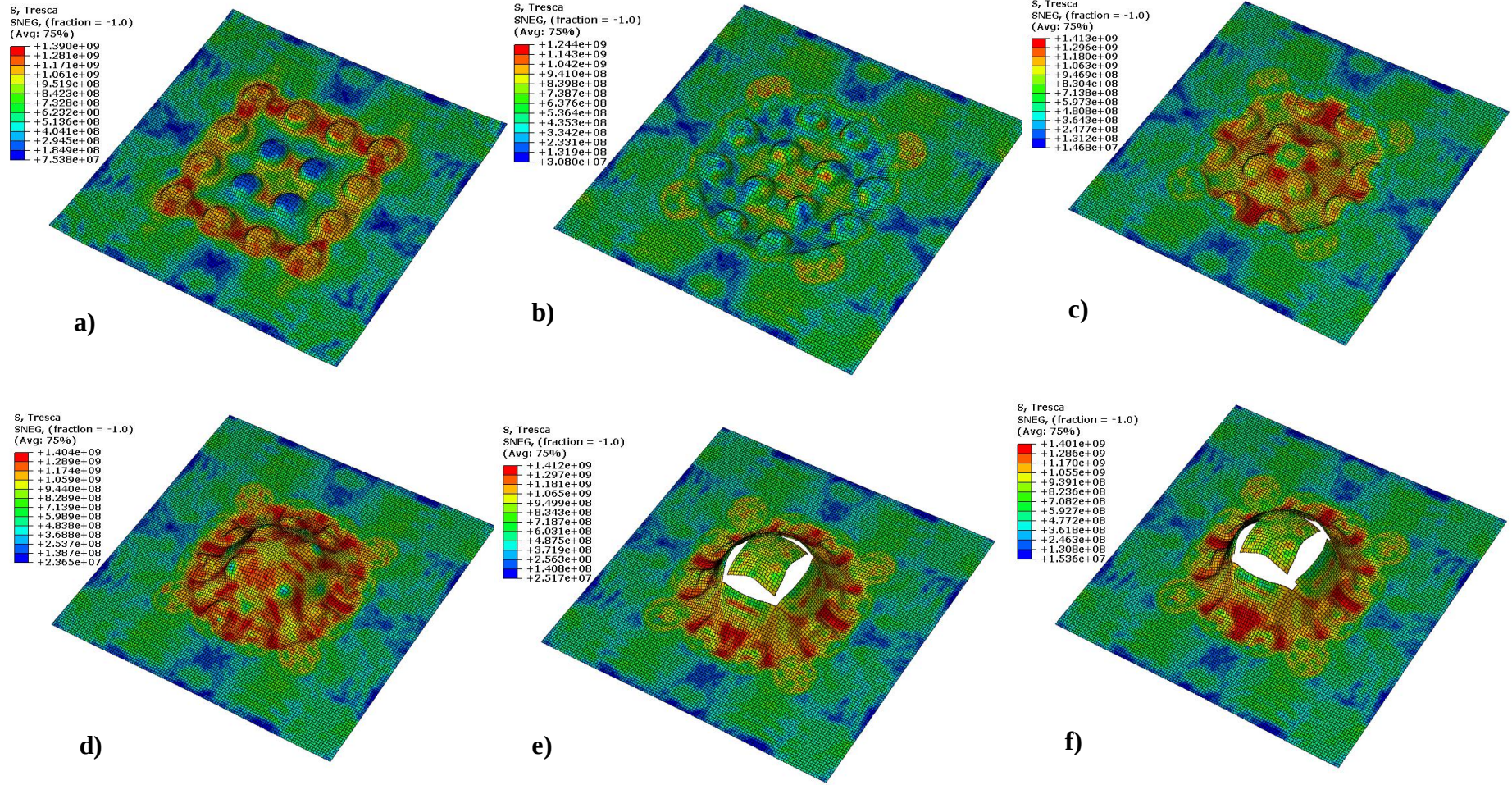
S, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

+	1.324e+09
+	1.216e+09
+	1.107e+09
+	9.979e+08
+	8.890e+08
+	7.802e+08
+	6.713e+08
+	5.624e+08
+	4.536e+08
+	3.447e+08
+	2.359e+08
+	1.270e+08
+	1.814e+07

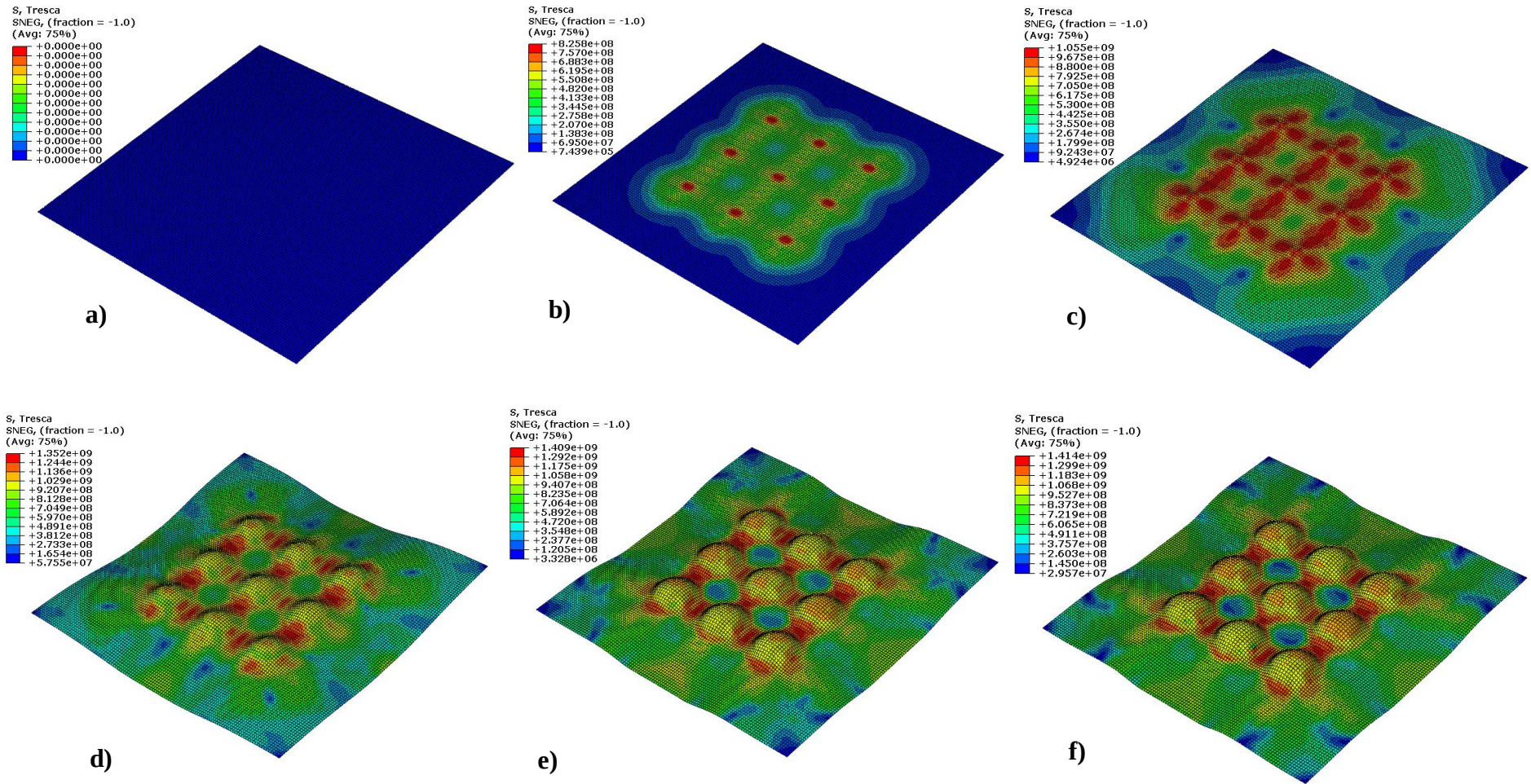


f)

Şekil 7.12. 6 mm çaplı yarı küresel desenli sacın sıkıştırılması ve gerilme dağılımı.



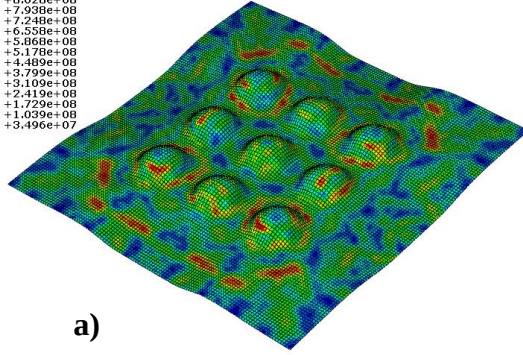
Şekil 7.13. 6 mm çaplı yarı küresel desenli sacın Erichsen testi sırasında gerilme dağılımı ve hasar oluşumu.



Şekil 7.14. Düz sac modele 9 mm çaplı yarı küresel desen basımında gerilme dağılımı.

S_y, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

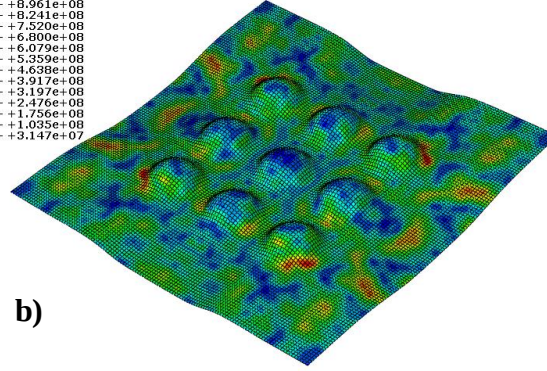
+8.628e+08
+7.938e+08
+7.248e+08
+6.558e+08
+5.868e+08
+5.178e+08
+4.489e+08
+3.799e+08
+3.109e+08
+2.419e+08
+1.729e+08
+1.039e+08
+3.496e+07



a)

S_y, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

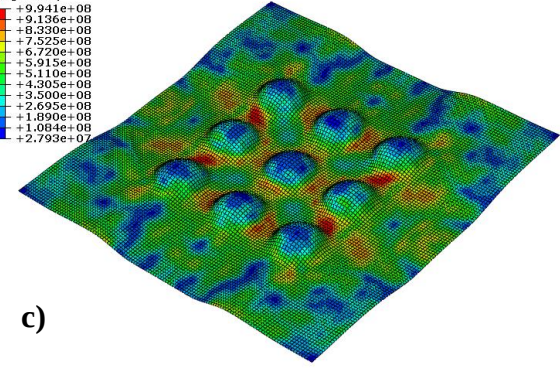
+8.961e+08
+8.241e+08
+7.520e+08
+6.800e+08
+6.079e+08
+5.359e+08
+4.638e+08
+3.917e+08
+3.197e+08
+2.476e+08
+1.756e+08
+1.035e+08
+3.147e+07



b)

S_y, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

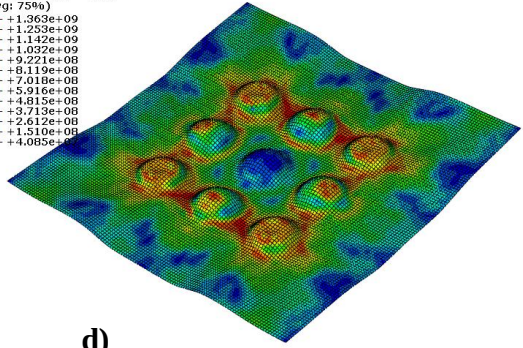
+9.941e+08
+9.136e+08
+8.330e+08
+7.525e+08
+6.720e+08
+5.915e+08
+5.110e+08
+4.305e+08
+3.500e+08
+2.695e+08
+1.890e+08
+1.084e+08
+2.793e+07



c)

S_y, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

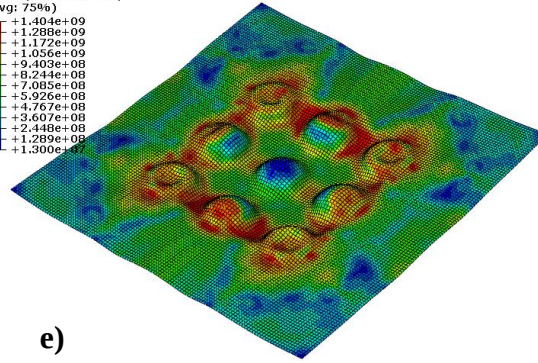
+1.363e+09
+1.253e+09
+1.142e+09
+1.032e+09
+9.221e+08
+8.119e+08
+7.018e+08
+5.916e+08
+4.815e+08
+3.713e+08
+2.612e+08
+1.510e+08
+4.065e+07



d)

S_y, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

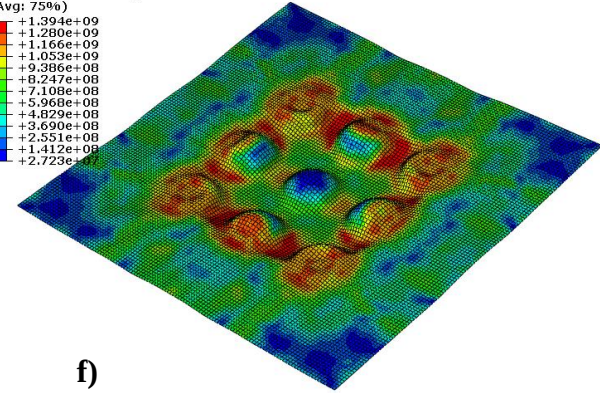
+1.404e+09
+1.288e+09
+1.172e+09
+1.056e+09
+9.403e+08
+8.244e+08
+7.085e+08
+5.926e+08
+4.767e+08
+3.607e+08
+2.448e+08
+1.289e+08
+1.300e+07



e)

S_y, Tresca
SNEG, (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

+1.394e+09
+1.280e+09
+1.166e+09
+1.053e+09
+9.386e+08
+8.247e+08
+7.108e+08
+5.968e+08
+4.829e+08
+3.690e+08
+2.551e+08
+1.412e+08
+2.723e+07

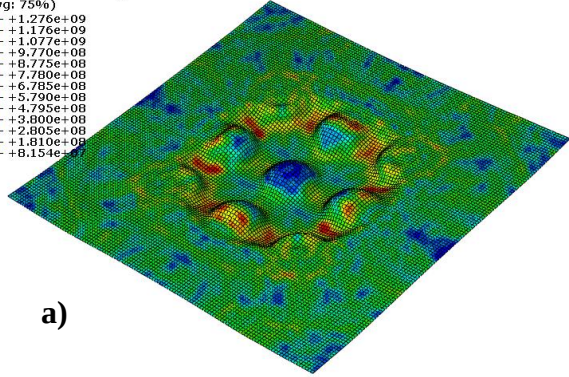


f)

Şekil 7.15. 9 mm çaplı yarı küresel desenli sacın sıkıştırılması ve gerilme dağılımı.

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

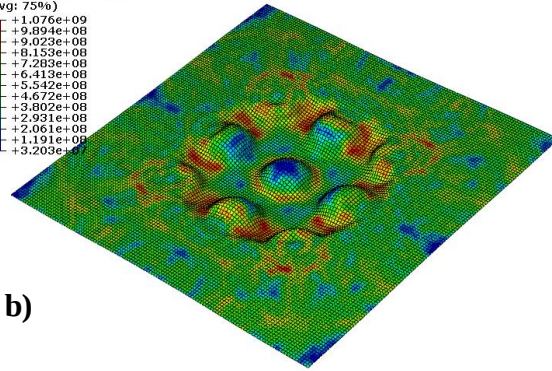
+	1.276e+09
+	1.176e+09
+	1.077e+09
+	9.770e+08
+	8.775e+08
+	7.780e+08
+	6.785e+08
+	5.790e+08
+	4.795e+08
+	3.800e+08
+	2.805e+08
+	1.810e+08
+	8.154e+07



a)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

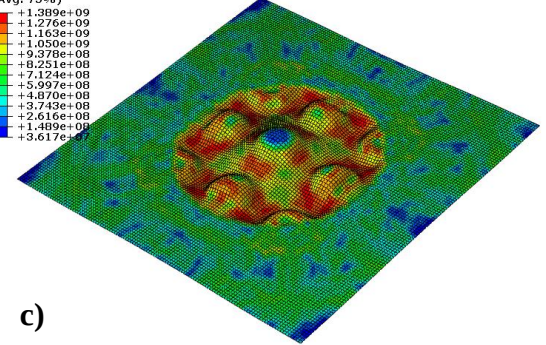
+	1.076e+09
+	9.894e+08
+	9.023e+08
+	8.153e+08
+	7.283e+08
+	6.413e+08
+	5.542e+08
+	4.672e+08
+	3.802e+08
+	2.931e+08
+	2.061e+08
+	1.191e+08
+	3.203e+07



b)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

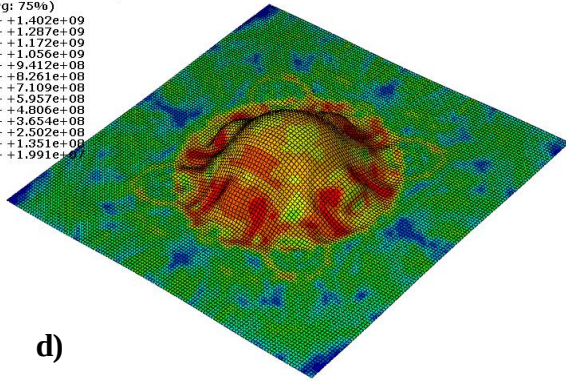
+	1.399e+09
+	1.276e+09
+	1.163e+09
+	1.050e+09
+	9.379e+08
+	8.251e+08
+	7.124e+08
+	5.997e+08
+	4.870e+08
+	3.743e+08
+	2.616e+08
+	1.499e+08
+	3.617e+07



c)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

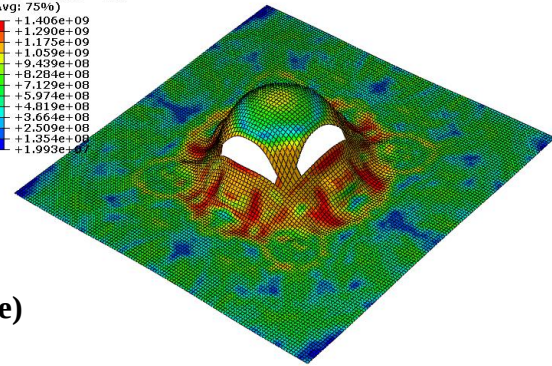
+	1.402e+09
+	1.287e+09
+	1.172e+09
+	1.056e+09
+	9.412e+08
+	8.261e+08
+	7.109e+08
+	5.957e+08
+	4.806e+08
+	3.654e+08
+	2.502e+08
+	1.351e+08
+	1.991e+07



d)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

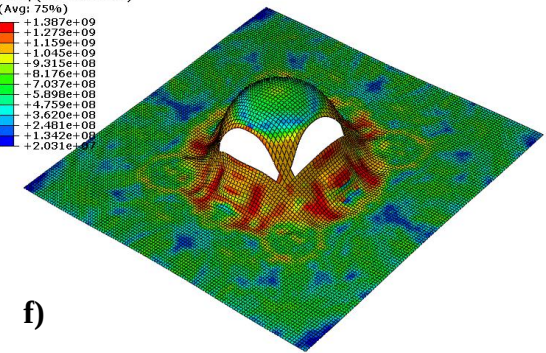
+	1.406e+09
+	1.290e+09
+	1.175e+09
+	1.059e+09
+	9.439e+08
+	8.284e+08
+	7.129e+08
+	5.974e+08
+	4.819e+08
+	3.664e+08
+	2.509e+08
+	1.354e+08
+	1.993e+07



e)

S_y Tresca
SNEG_y (fraction = -1.0)
(Avg: 75%)

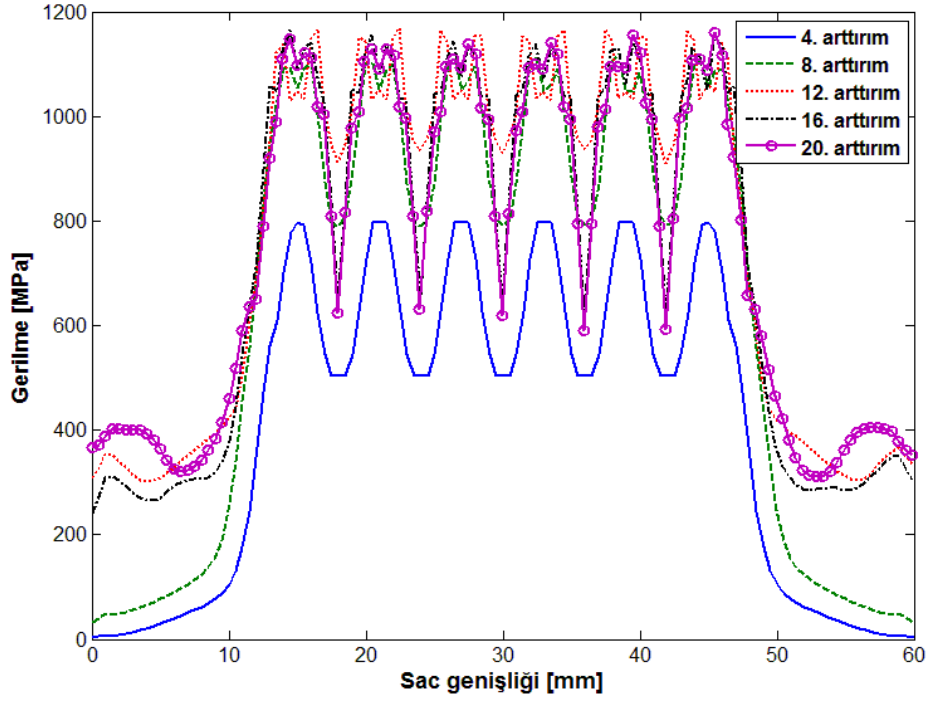
+	1.397e+09
+	1.273e+09
+	1.159e+09
+	1.045e+09
+	9.315e+08
+	8.176e+08
+	7.037e+08
+	5.898e+08
+	4.759e+08
+	3.620e+08
+	2.481e+08
+	1.342e+08
+	2.031e+07



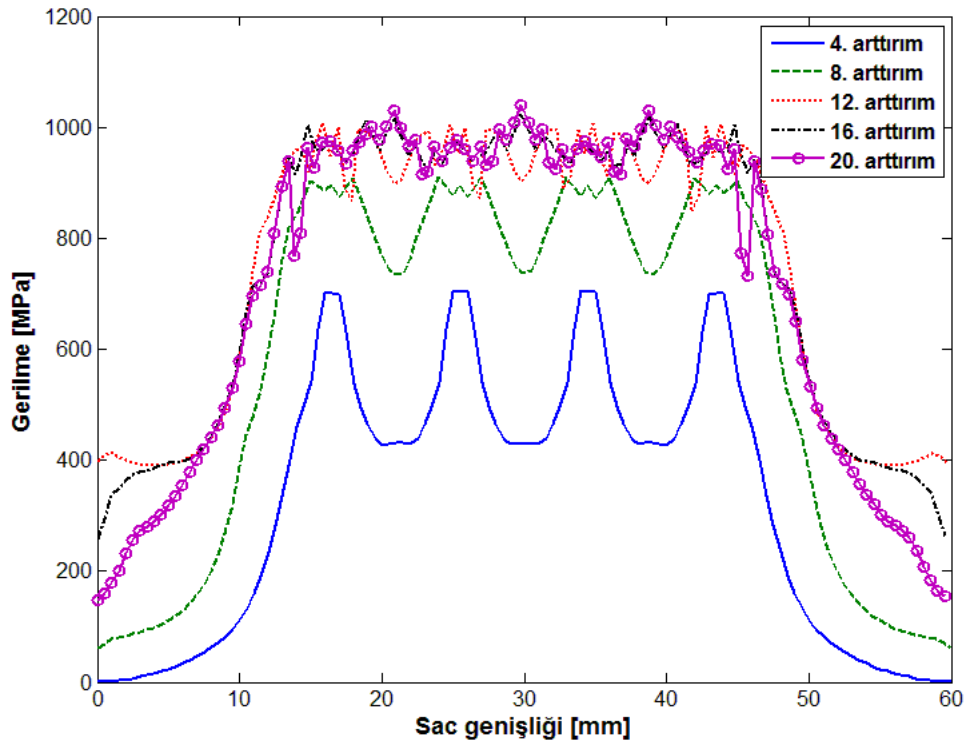
f)

Şekil 7.16. 9 mm çaplı yarı küresel desenli sacın Erichsen testi sırasında gerilme dağılımı ve hasar oluşumu.

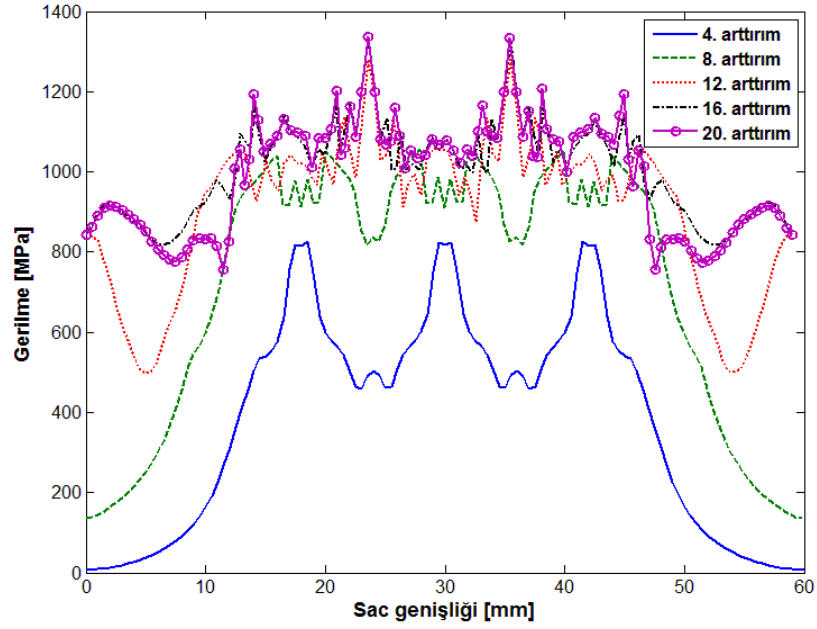
Şekil 7.17, 7.18, 7.19’da dubleks paslanmaz çelik desenli sacların desen basımı esnasında kesit gerilme dağılımları grafiği verilmiştir. Genelde desenlerin olduğu bölgelerde gerilmeler artmakta, desen tepelerinde ise maksimuma ulaşmaktadır.



Şekil 7.17. Dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların desen basımı esnasında kesit gerilme dağılımı.

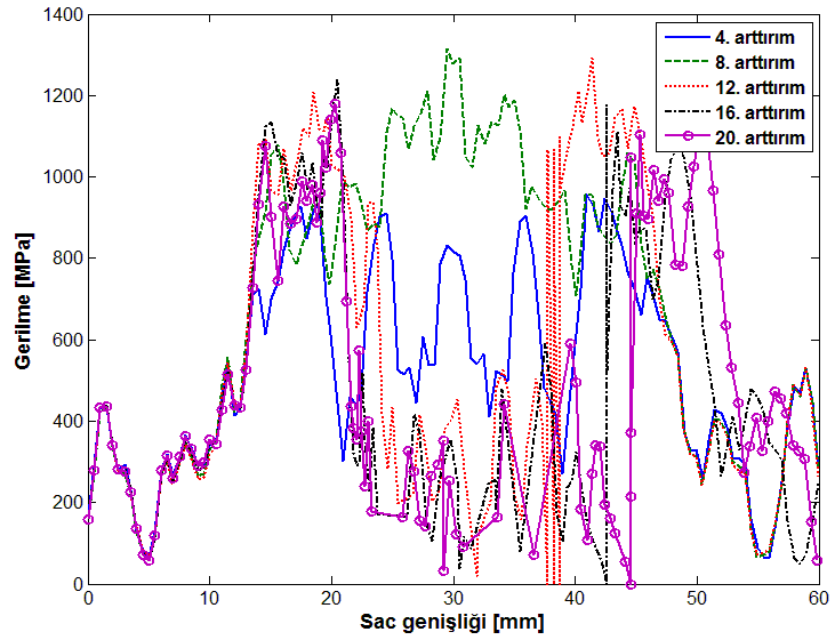


Şekil 7.18. Dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sacların desen basımı esnasında kesit gerilme dağılımı.

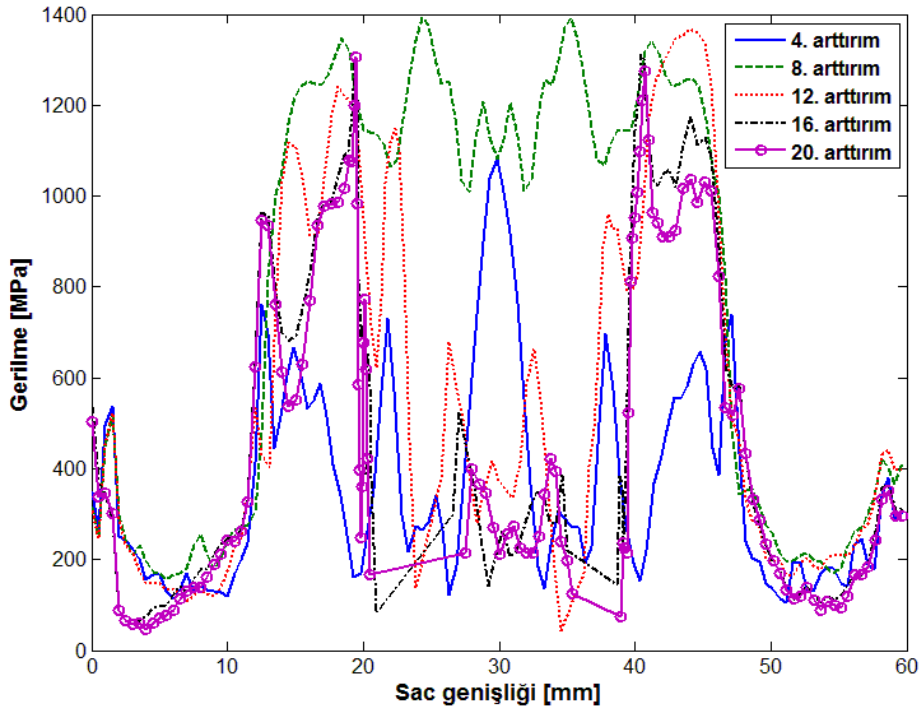


Şekil 7.19. Dupleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sacların desen basımı esnasında kesit gerilme dağılımı.

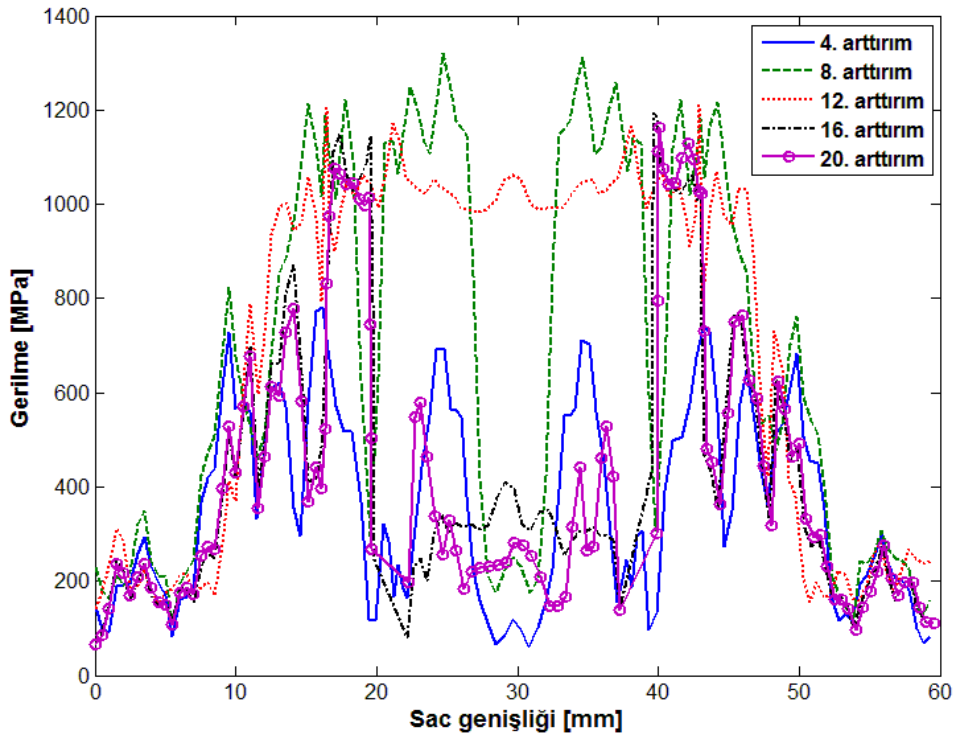
Şekil 7.20, 7.21, 7.22’de dupleks paslanmaz çelik desenli sacların Erichsen testi esnasında kesit gerilme dağılımı grafiği verilmiştir. Grafiklerde sac modellerin orta kısımlarına yakın bölgelerde 8. artırımdan sonra yırtılma başladığı için gerilme değerlerinin azaldığı izlenmiştir. Desen çapı 3, 6 ve 9 mm olan saclarda 8. artırım yaklaşık olarak sırası ile 8.5 mm, 7.5 mm ve 10 mm deformasyon derinliğine denk gelmektedir.



Şekil 7.20. Dupleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların derin çekme esnasında kesit gerilme dağılımı.



Şekil 7.21. Dupleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların derin çekme esnasında kesit gerilme dağılımı.



Şekil 7.22. Dupleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sacların derin çekme esnasında kesit gerilme dağılımı.

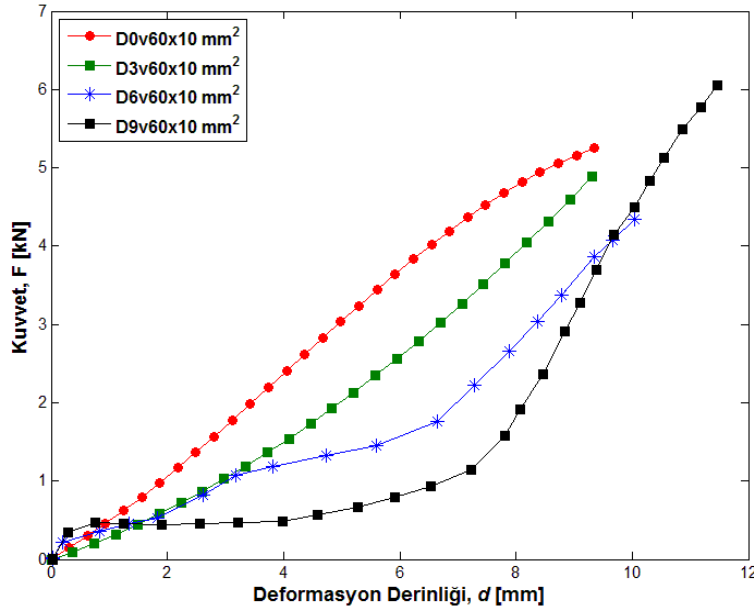
8. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde düz ve desenli saclara ait derin çekme kuvveti-deformasyon derinliği değerleri, şekil alma kabiliyetleri ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca elde edilen analiz verileri deneysel veriler ile karşılaştırılarak elde edilen çıkarımlar sunulmuştur. Deneysel verilerden anlık olarak sağlanamayan sac kalınlığı değerleri analiz sonucunda rahatlıkla elde edilmiş ve deneysel numunelerde oluşan gerçek hasar durumu ile simülasyonlarda izlenen hasar durumu ve anı karşılaştırılmıştır.

8.1 Deneysel Bulgular

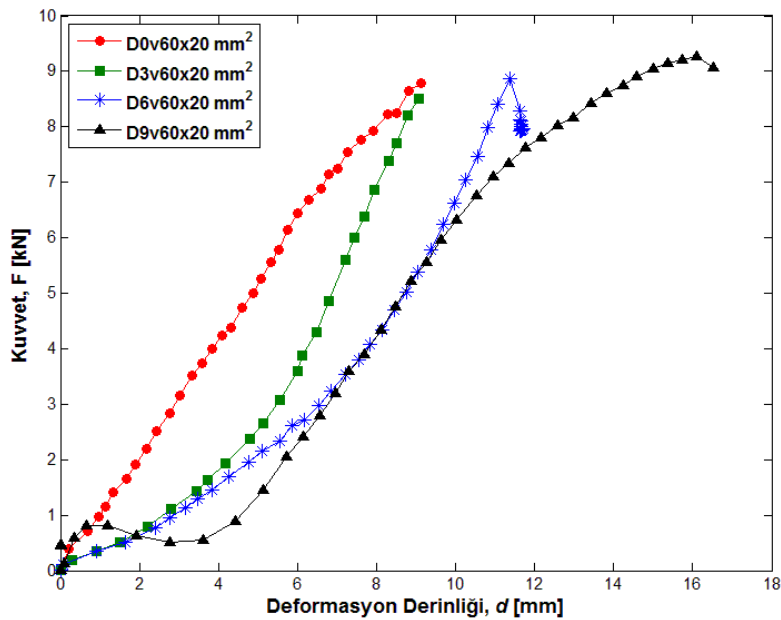
8.1.1 Desen boyutuna göre kuvvet-deformasyon derinliği eğrilerinin karşılaştırılması

Bu çalışmada aynı genişlikteki düz ve desenli sacların kuvvet-deformasyon derinliği değişimi karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekil 8.1’de 60x10 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. Daha öncede anlatıldığı üzere 6 ve 9 mm çaplı yarı küresel kabartmalı 10 mm genişliğindeki saclar kalıbı bazı hallerde sıyırdığından dolayı bu testlerin sonuçlarından anlamlı veriler elde edilememiştir. Grafikte düz sacın desenli saca göre aynı deformasyon derinliği için daha yüksek derin çekme kuvvetine gereksinim duyduğu görülmektedir.

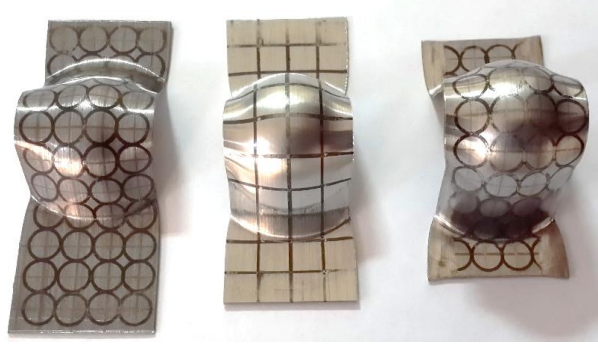


Şekil 8.1. 60x10 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.

Şekil 8.2’de 60x20 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. Grafikte düz ve desenli sacların tümü verilmiştir. Grafikte 9 mm çaplı yarı küresel kabarmalı sacın deformasyon derinliği diğer üç sacın deformasyon derinliğinden çok fazla olduğu görülmektedir. Daha öncede açıklandığı üzere bu deformasyon derinliğinin yaklaşık 4 mm’lik kısmı sacın sıkışarak ezilmesinden kaynaklanan kot farkından gelmektedir. Deneyler esnasında 20 mm genişliğindeki birkaç düz sac numune kalıbı sıyrarak herhangi bir yırtılma hasarına uğratılamamışlardır (Şekil 8.3).

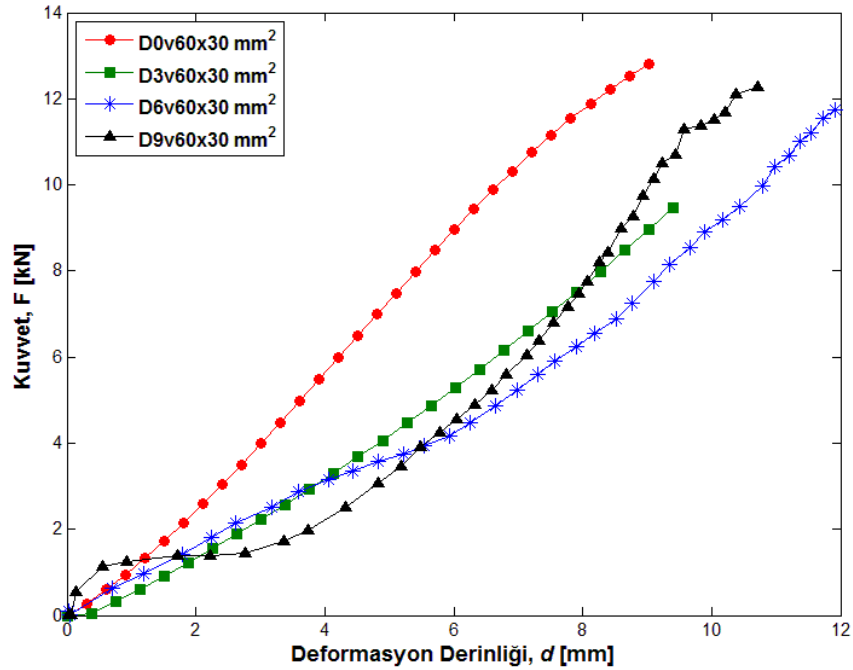


Şekil 8.2. 60x20 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.



Şekil 8.3. 60x20 mm² boyutlarındaki kalıbı sıyıran düz saclar.

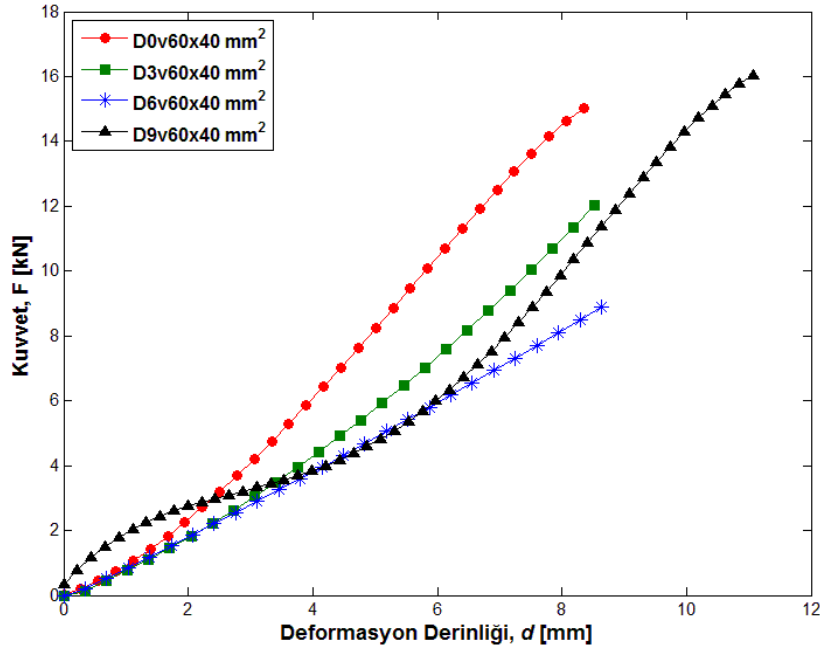
Şekil 8.4'te 60x30 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. Grafikte 9 mm çaplı yarı küresel kabartılı sacın yırtılmaya doğru, düz sacın kuvvet-deformasyon davranışına yaklaştığı görülmektedir. Ayrıca desenli sacların deformasyon derinliklerinin düz saca göre kısmen daha fazladır. Yapılan deneyler sonucunda edinilen tecrübeye dayanarak 30 mm sac genişliğinin bu saclar için, tek eksenli gerilme halinden iki eksenli gerilmeye geçiş bölgesi olduğu söylenebilir.



Şekil 8.4. 60x30 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.

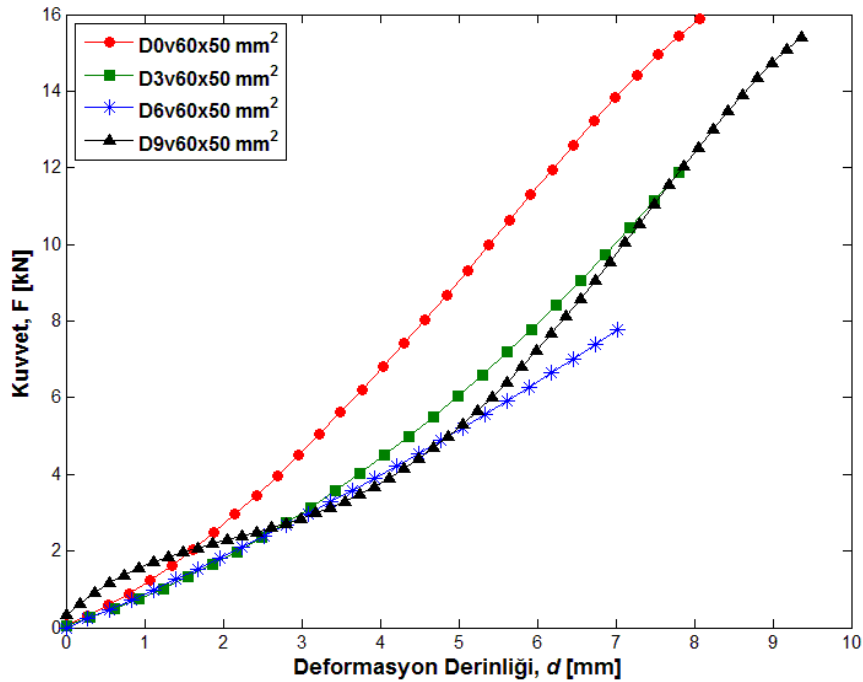
Şekil 8.5'te 60x40 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. Desenli saclarda iki eksenli gerilme haline doğru gidildikçe deformasyon derinliğinin azaldığı dikkat çekmektedir. Yine burada 9 mm çaplı yarı küresel kabartmalı sacdaki 4 mm'lik fazlalık unutulmamalıdır. Ayrıca bu desenli sacın

genişlik arttıkça düz sacın kuvvet-deformasyon derinliği eğrisine yaklaştığı görülmektedir.



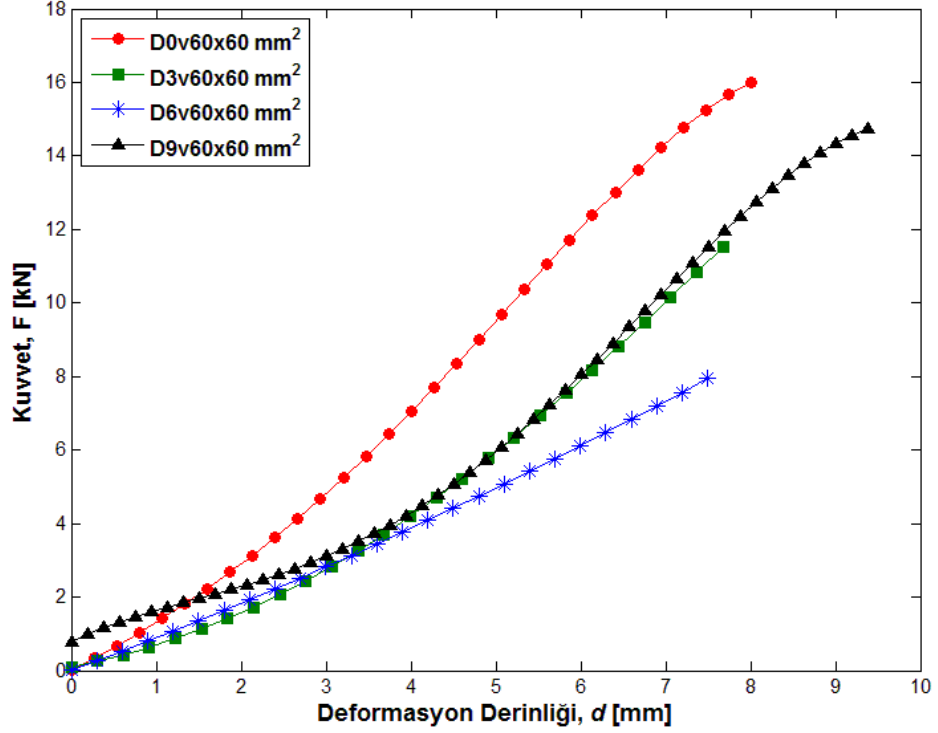
Şekil 8.5. 60x40 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.

Şekil 8.6’da 60x50 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. Kuvvet-deformasyon derinliği arasındaki fark gerilme durumu iki eksenli gerilmeye yaklaştıkça daha belirgin bir biçimde artmaktadır. Sac genişliği arttıkça deformasyon derinliği azalmakta, maksimum kuvvet ise artmaktadır.



Şekil 8.6. 60x50 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.

Şekil 8.7’de 60x60 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir. 9 mm çaplı yarı küresel kabartmalı sacın bu grafikte düz saca daha da yakın olduğu görülmektedir.

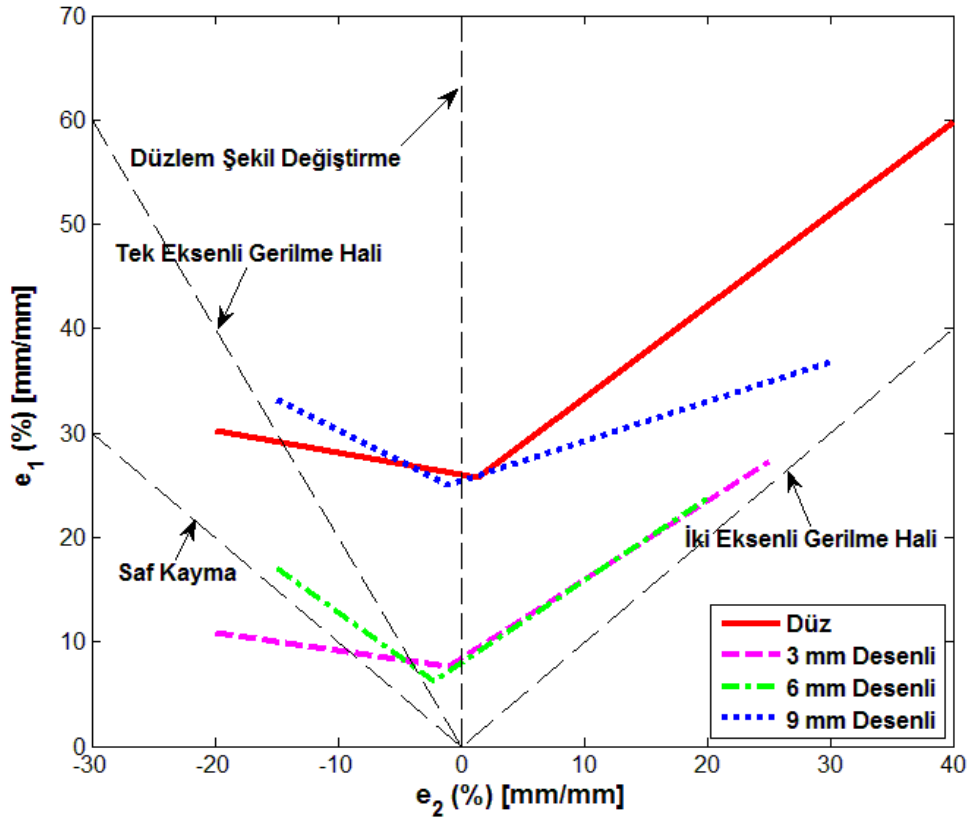


Şekil 8.7. 60x60 mm² boyutlarındaki sacların kuvvet-deformasyon derinliği grafiği.

Şekil 8.1-8.7’deki grafikler birlikte değerlendirildiğinde, bu çalışmadaki sacların ebatları arasındaki fark azaldıkça (sacın yüzey alanı arttıkça), yük ebatlar doğrultusunda iki eksene yayılacağı için sacların yük taşıma kapasitesi artmakta ve 18 kN’a kadar çıkmaktadır. Sac yüzeyinde desenlerin varlığı, derin çekmede, doğru deformasyon derinliğine daha düşük kuvvet ile ulaşılabilirliğini göstermektedir. Bu bir çelişki olarak görülmekle birlikte, desenli saclarda desenin alt kısmında kalan yarı küresel derin boşlukların varlığı ve sayısı ile ilişkili olabilir.

8.1.2 Şekillendirme sınır diyagramlarının karşılaştırılması

Şekil 8.8’de dubleks paslanmaz düz ve desenli saclara ait şekillendirme sınır eğrileri verilmiştir. Diyagramdan düz ve 9 mm çaplı desenli sacların şekil alma kabiliyetlerinin yaklaşık olarak aynı, 3 mm ve 6 mm çaplı desenli sacların ise şekillendirme kabiliyetlerinin daha kötü olduğu görülmektedir.

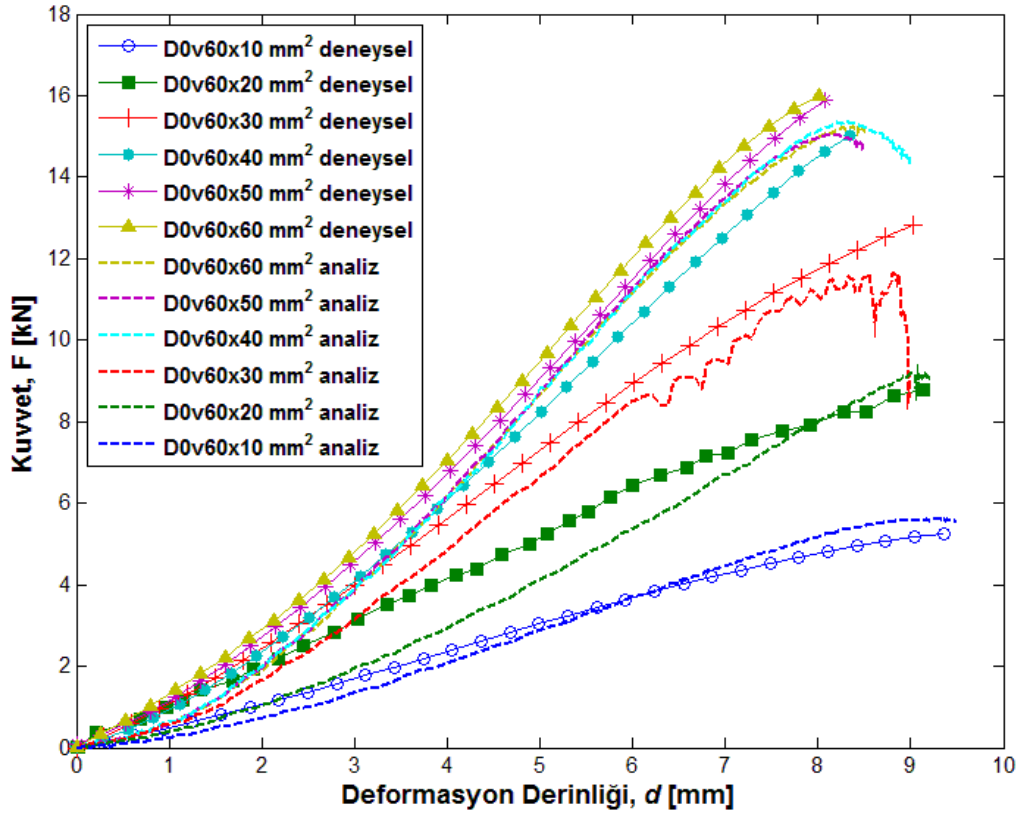


Şekil 8.8. Dupleks paslanmaz düz ve desenli çelik sacların şekillendirme sınır eğrileri.

8.2 Analiz ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

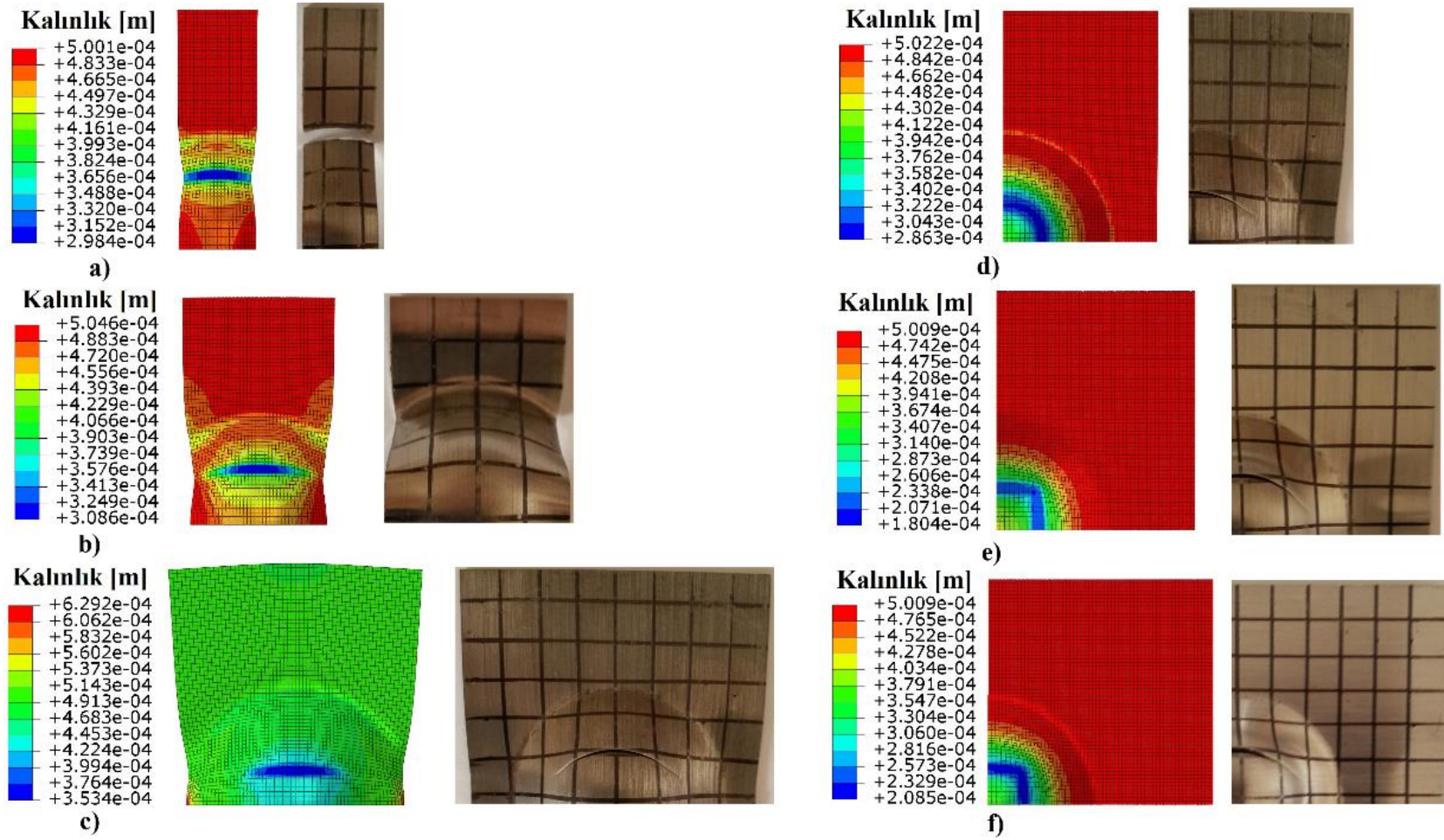
8.2.1 Erichsen testi analiz sonuçları

Yukarıda belirtilen tüm ayarlamalar yapıldıktan sonra analizler deneysel çalışmalarda olduğu gibi 60x60 mm²'den 60x10 mm²'ye kadar sacların genişliği 10'ar mm azaltılarak yapılmıştır. Analiz sonuçlarında elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği grafikleri deneysel grafikler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 8.9). Şekilde markalı eğriler deneysel eğrileri, kesik çizgiler ile verilen eğriler ise analiz sonuçlarından elde edilen eğrileri temsil etmektedir. Grafikte analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile büyük ölçüde uyduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarında 60x30 mm²'lik saclardan sonra sac genişliği arttıkça oluşan kuvvet-deformasyon derinliği eğrilerinde pek fazla değişme olmadığı görülmektedir. Yine deneysel verilerde 30 mm genişlikten sonra sacdaki kuvveti-deformasyon derinliği eğrilerinin birbirine yaklaştığı görülmektedir. Bu da 30 mm genişlik değerinin iki eksenli gerilme için geçiş genişliği olarak kabul edilebilir.



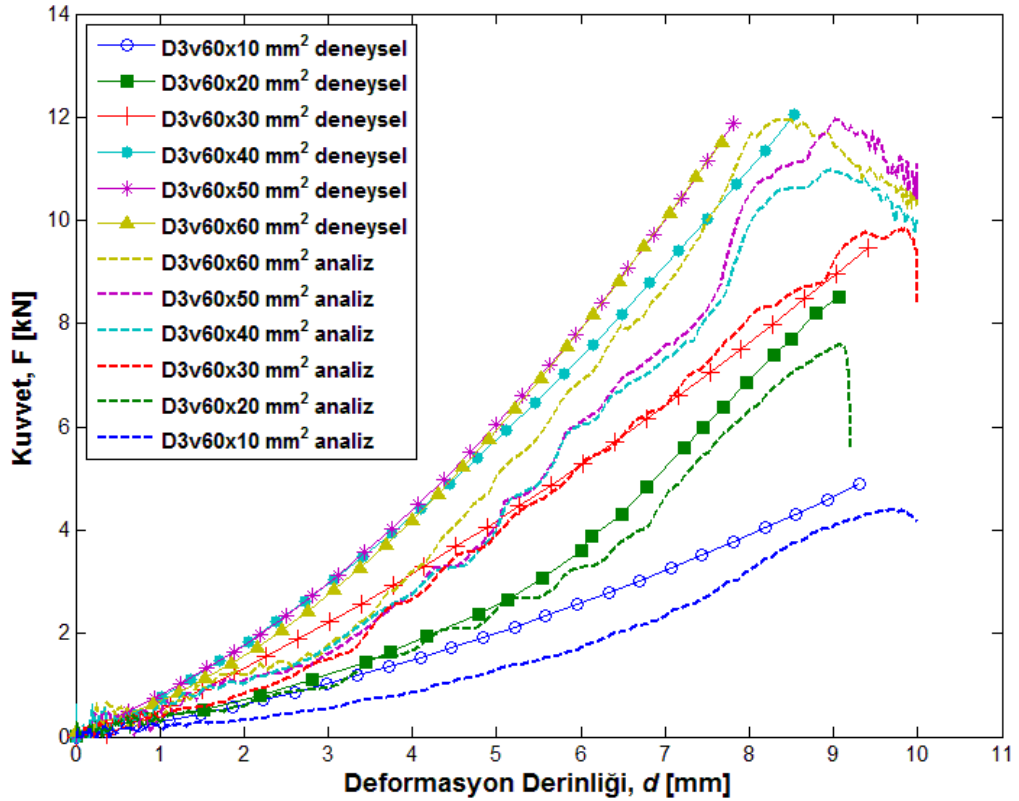
Şekil 8.9. Dupleks paslanmaz çelik düz sacların deneysel ve analizlerden elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği eğrilerinin karşılaştırılması.

Bu tür çalışmalarda analiz yapmanın en büyük avantajı işlem esnasında oluşan tüm durumları anlık olarak takip edebilmektir. Deneysel çalışmalarda bu mümkün olmamaktadır. Örneğin yapılan analizlerde herhangi bir yükleme anında herhangi bir noktanın kalınlığı görülebilmektedir. Deneysel çalışmalarda ise ancak ilk ve son kalınlıklar belirlenebilmektedir. Şekil 8.10'da ABAQUS programında analiz edilmiş Erichsen test numunelerine ait sac kalınlıkları verilmiştir. Ayrıca analiz sonuçlarının yanında deneylerde hasara uğratılmış numunelere ait resimlerde verilmiştir. Görüntülerde 10, 20 ve 30 mm genişliğindeki saclar yarım olarak, 40, 50, 60 mm genişliğindeki saclar ise çeyrek görüntü olarak verilmiştir. Analiz sonuçlarında sacların kalınlığının yaklaşık 0.3 mm altına düştüğünde boyun vererek koptuğu görülmektedir. Ayrıca analiz sonuçlarında oluşan yırtılma hasarı deneysel numunelerdeki hasarlar ile aynı bölgelerde ve aynı geometride oluşmuştur.



Şekil 8.10. Sac genişliğine göre kalınlığın değişimi a) 60x10 mm² ($\frac{1}{2}$), b) 60x20 mm² ($\frac{1}{2}$), c) 60x30 mm² ($\frac{1}{2}$), d) 60x40 mm² ($\frac{1}{4}$), e) 60x50 mm² ($\frac{1}{4}$), f) 60x60 mm² ($\frac{1}{4}$).

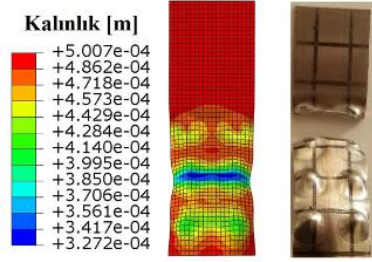
Desenli sacların Erichsen testine tabi tutulması için yukarıda anlatıldığı üzere 3 farklı adım tasarlanmıştır. Tüm bu adımlar 3 mm, 6 mm ve 9 mm çaplı yarı küresel desenli sacların tümünde aynı şekilde uygulanmaktadır. Yapılan analizler sonucunda modele ait kuvvet-deformasyon derinliği grafikleri çizilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 8.11’de 3 mm çaplı yarı küresel desenli dubleks paslanmaz çelik saclara ait deneysel ve analizlerden elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi verilmiştir. Analizlerden elde edilen eğriler (özellikle 10, 20 ve 30 mm genişliğindeki saclarda) deneysel eğriler ile uyumlu çıkmaktadır. Ancak 30 mm sac genişliğinden sonraki sac genişliklerinde analizlerden elde edilen eğrilerin deneysel eğrilerden bir miktar uzaklaştığı görülmektedir. Gerçek durumda gözardı edilen sürtünme katsayısı, kalıp geometrisindeki bozukluklar gibi etmenler bu farklılara sebep olabilmektedir.



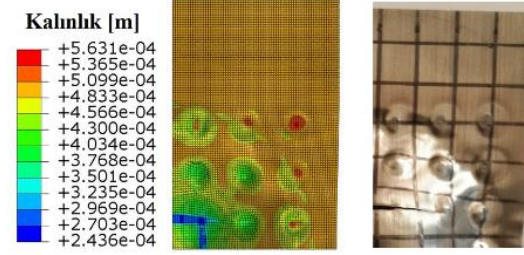
Şekil 8.11. Dubleks paslanmaz çelik desenli (3 mm) sacların deneysel ve analiz sonuçlarında elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.

Şekil 8.12’de 3 mm çaplı dubleks paslanmaz desenli çelik sacların analizden elde edilen kalınlık değişimleri verilmiştir. Analiz sonuçlarında modellerdeki mavi bölgelerde kalınlık yaklaşık 0.3 mm’ye kadar düşmüştür. Bu bölgelerde yırtılma hasarının olduğu bölgelerdir. Ayrıca analiz sonuçlarının yanında deneylerde hasara

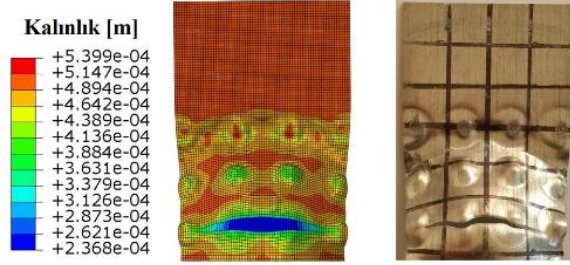
uğratılan numunelerin fotoğrafları verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere analizlerde yırtılmaların oluştuğu bölgeler ile deneysel numuneler üzerinde ki yırtılmaların oluştuğu bölgelerin çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak 30 mm'den sonraki sac genişliklerinde yırtılma hasarının iki eksenli (x-y) oluştuğu görülmektedir. Deneysel numuneler üzerinde ise yırtılmanın genellikle tek eksenli olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmalarda özellikle genişliği az olan saclar kalıp ile pot çemberi arasına sabitlenmesi zor olmaktadır. Aynı zamanda deney düzeneğindeki mekanik boşluklar ve geometrik bozuklarda analiz sonuçları ile deneysel çalışmalar arasında oluşan farka sebep olabilmektedir. Deneysel çalışmaların simülasyonunda modeller mükemmel şekilde modellendiğinden ötürü bu tür hatalar olmamaktadır. Sac model kalıp ile pot çemberi arasına düzgün şekilde sıkıştırılmakta ve zımba sacı tam ortasından merkezlemektedir.



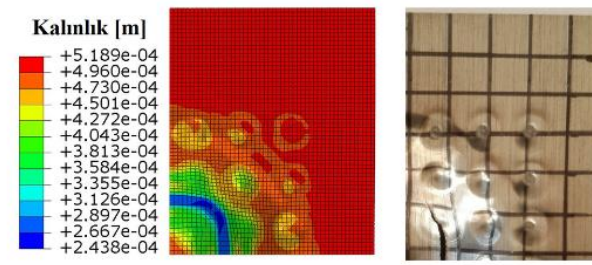
a)



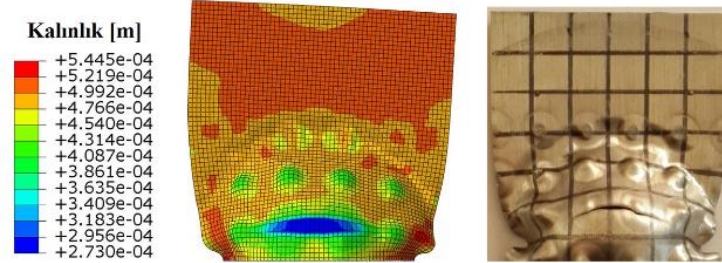
d)



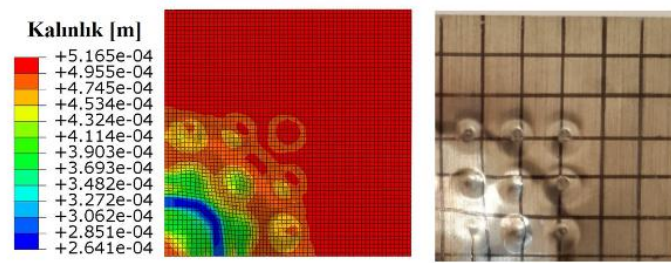
b)



e)



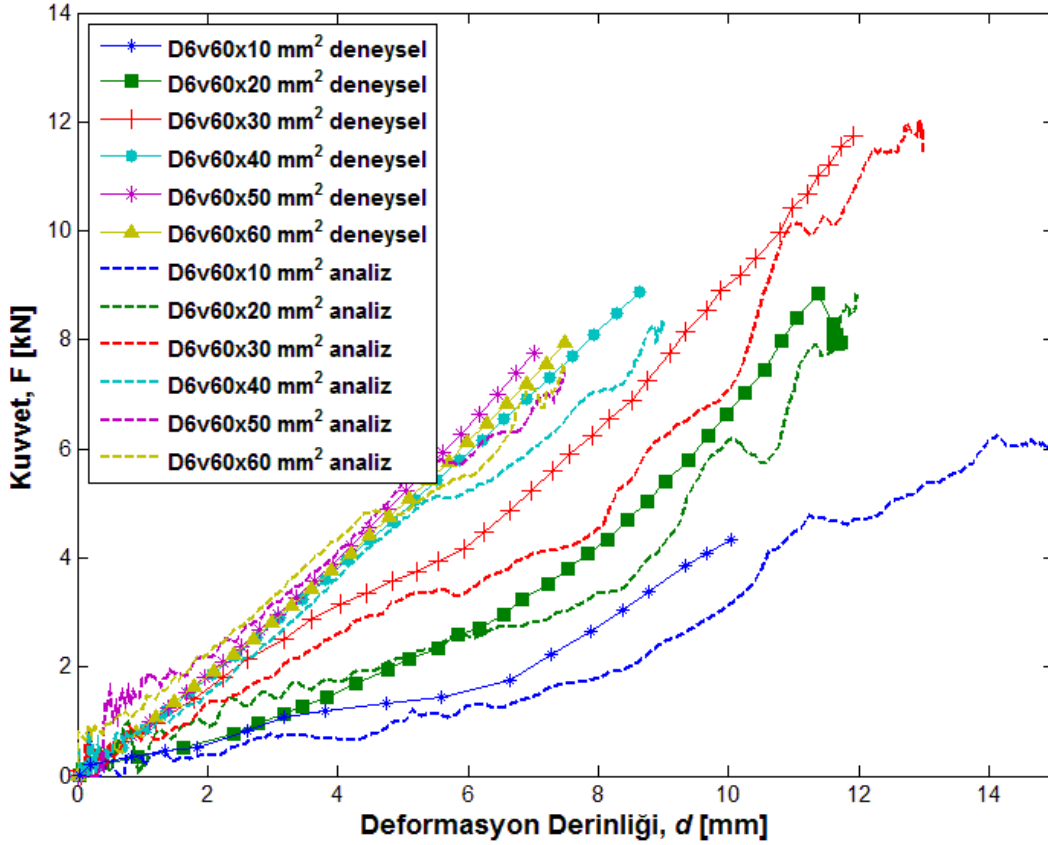
c)



f)

Şekil 8.12. Desenli sacların (3 mm) sac genişliğine göre kalınlığının değişimi a) 60x10 mm² (1/2), b) 60x20 mm² (1/2), c) 60x30 mm² (1/2), d) 60x40 mm² (1/4), e) 60x50 mm² (1/4), f) 60x60 mm² (1/4).

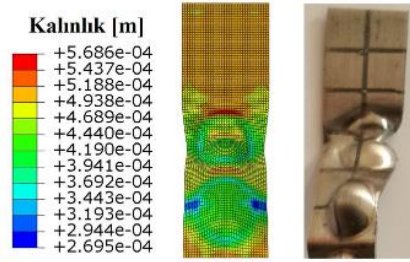
Şekil 8.13'te 6 mm çaplı yarı küresel desenli dubleks paslanmaz çeliklere ait deneysel ve analiz sonuçlarına göre kuvvet-deformasyon grafiği verilmiştir. Analiz sonuçları diğer desenli saclarda olduğu gibi deneysel sonuçlar ile uyumlu çıkmıştır. 10 mm genişliğindeki saclar deneysel olarak teknik sebeplerden ötürü hasara uğratılamamışlardır. 6 mm çaplı yarı küresel desenler 10 mm genişliğindeki saclara tek sıra halinde dizilmiştir. Bu dizilim sacın kalıp üzerinde durmasını güçleştirmektedir. Sac kalıp üzerinde sağa veya sola yatmakta ya da desenlerin bazıları kalıp boşluğunda, bazıları ise kalıp üzerinde kalmaktadır. Dolayısı ile sacı pot çemberi ile kalıp arasına sabitlemek çok zor olmaktadır. Doğru sonuçlar elde etmek için yapılan çeşitli denemelerde aynı sorunlarla karşılaşmıştır. Analizlerde bu tür sorunlar ortadan kalkmaktadır. Dolayısı ile 10 mm genişliğindeki sacın analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği grafiği verilmiştir.



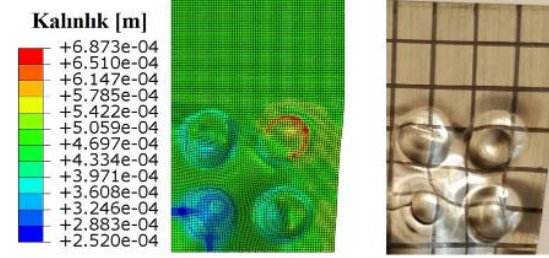
Şekil 8.13. Dubleks paslanmaz çelik desenli (6 mm) sacların deneysel ve analiz sonuçlarında elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.

Şekil 8.14'te 6 mm çapında yarı küresel desenli saclara ait analizlerden elde edilen kalınlık değişimleri ve deneysel saclara ait resimler verilmiştir. 10 mm genişliğindeki deneysel çalışma yapılan sac merkezden kayarak, zımbanın dengesiz

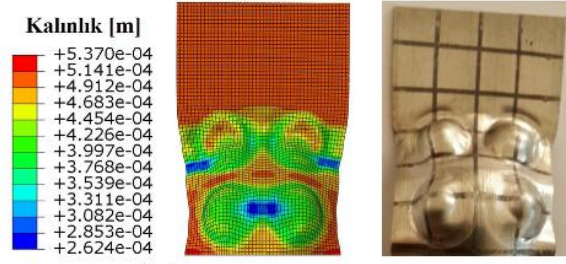
basmasına sebep olmuştur ve sac yamularak yan tarafından yırtılmıştır. Analiz sonucunda ise sac tam merkezlenmiş ve zımba düzgün bir şekilde saca basarak gerçek durumda olması gereken yerden yırtılma başlamıştır. Diğer resimlere bakıldığında deforme olmuş gerçek numuneler ile modellerin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle iki eksenli gerilmelerin olduğu saclarda (Şekil 8.14d-e-f) yırtılmaların genellikle desenler üzerinde olduğu görülmektedir. Deneysel numunelerde desen basımı sırasında desenlerin mükemmel küresel geometriye sahip olmaması bu durumu açıklamaktadır. Modellerde ise yarı küresel geometrinin mükemmel yakın olması gerçekteki yırtılma davranışının oluşumunu engellemektedir. Sanal ortamda yapılan modellemelerde imalattan kaynaklanan hatalar göz ardı edildiği için bu tür hataların olması kaçınılmazdır. Özetlemek gerekirse, hasar analiz görüntüleri gerçektekine çok yakın iken sonlu elemanlar analizi ile gerilme ve şekil değiştirme değerlerine belli bir hata oranı ile tahmin edilmiştir. Bunun nedeni, gerçekte saca yüklemenin mekanik manuel olarak yapılması ve yükleme hızının değişmesinden kaynaklanmaktadır. Derin çekilen sac numuneler için deneysel ölçüm ve analiz sonuçları arasındaki mutlak % hata miktarları Ek C’de; desenli saclarda desen büyüklüğüne göre Ek D, E ve F’de sırası ile listelenmiştir.



a)



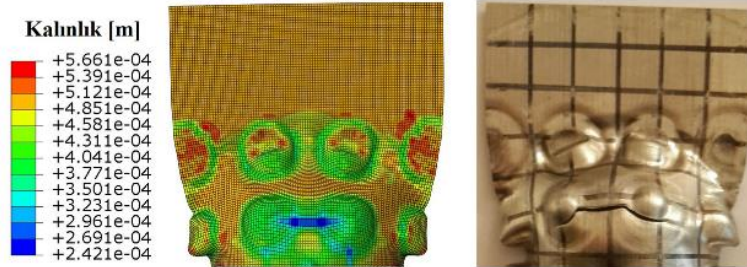
d)



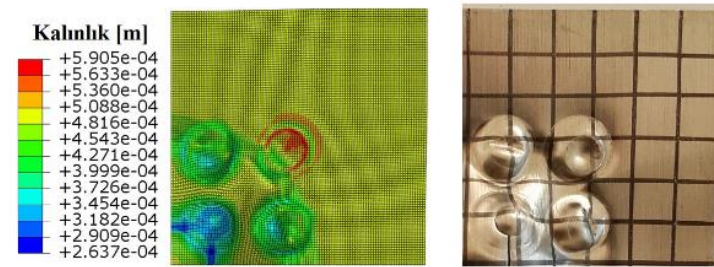
b)



e)



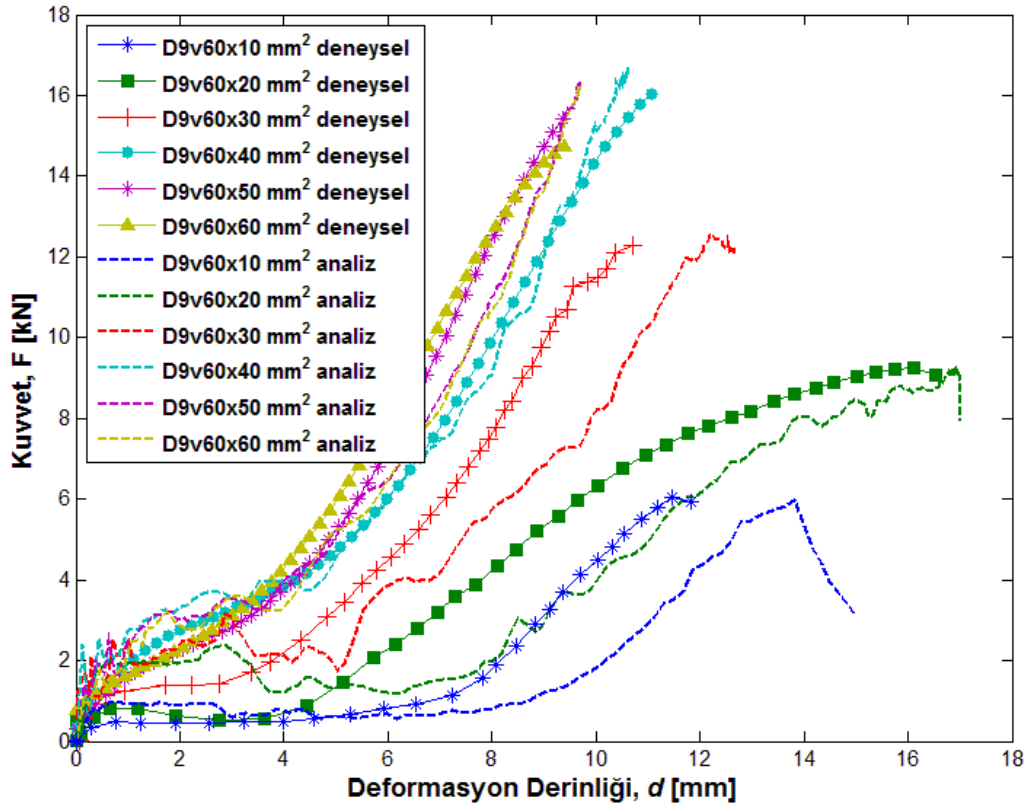
c)



f)

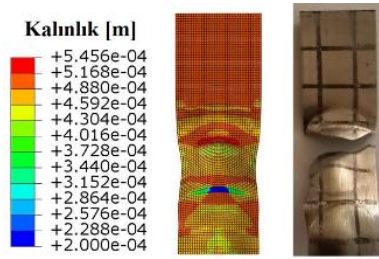
Şekil 8.14. Desenli sacların (6 mm) sac genişliğine göre kalınlığın değişimi a) 60x10 mm² (½), b) 60x20 mm² (½), c) 60x30 mm² (½), d) 60x40 mm² (¼), e) 60x50 mm² (¼), f) 60x60 mm² (¼).

Şekil 8.15'te 9 mm çaplı yarı küresel desenli saclara ait deneysel ve analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deformasyon grafiği verilmiştir. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçların yine uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel eğrilerin başlangıcında görülen ve yatay eksene paralel şekilde devam eden eğim (yaklaşık 0°) analiz sonuçlarında da aynı çıkmıştır. Daha önce bu durumun kalıp ile pot çemberi arasına sıkıştırılan sacın dışarıya doğru şişme yapmasından dolayı oluştuğu tahmin edilmişti. Analiz sonuçlarının bu tahmini doğrular nitelikte çıktığı görülmektedir.

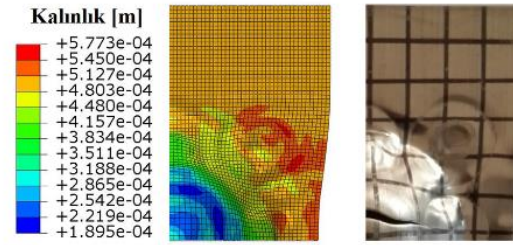


Şekil 8.15. Dupleks paslanmaz çelik desenli (9 mm) sacların deneysel ve analiz sonuçlarında elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği ilişkisi.

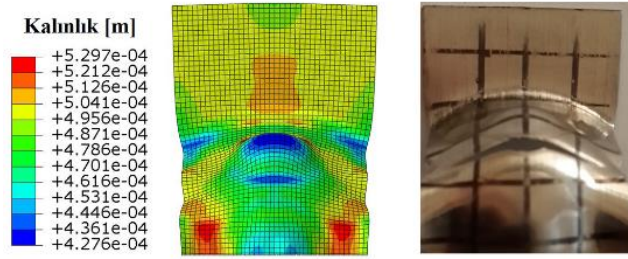
Şekil 8.16'da 9 mm çapında yarı küresel desenli saclara ait analizlerden elde edilen kalınlık değişimleri ve deneysel saclara ait resimler verilmiştir. Kuvvet-deformasyon derinliği eğrilerinin düz saclara yakın değerlerde çıkmasının sebebi burada net bir şekilde görülmektedir. 9 mm çapa sahip yarı küresel desenler zımba ile şekil aldıkça düz sac geometrisine benzemekte ve düz sac ile yaklaşık aynı eğrilik yarıçapına sahip olmaktadır. Bu desen çapının arttıkça desenli sacların düz saclara benzer özellik sergilediğini göstermektedir.



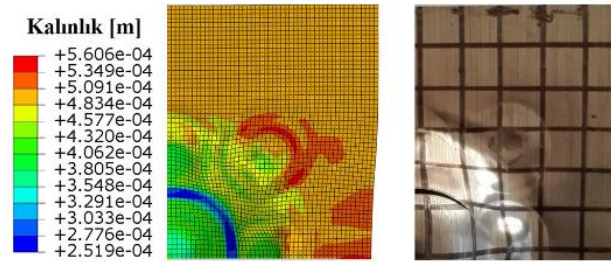
a)



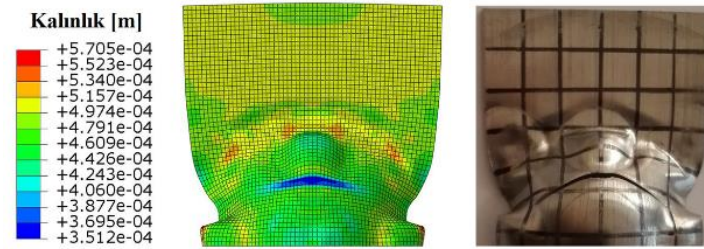
d)



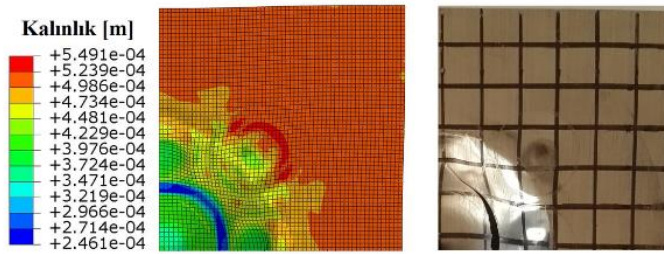
b)



e)



c)

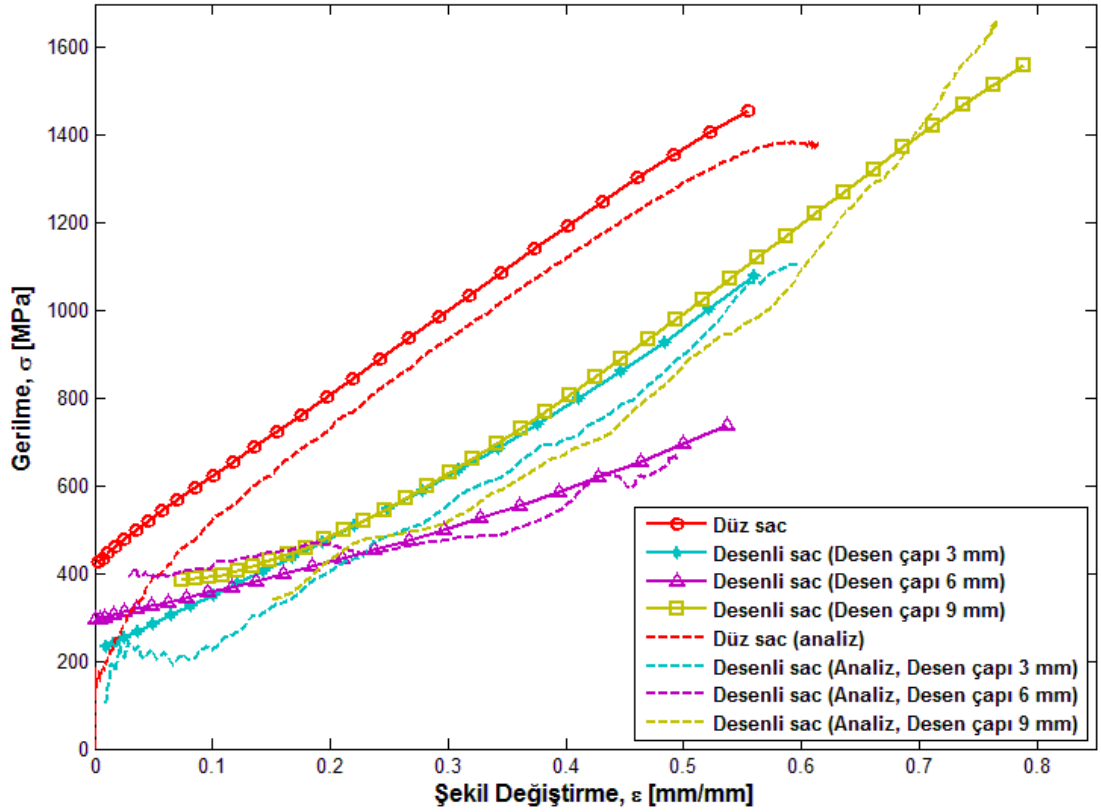


f)

Şekil 8.16. Desenli sacların (9 mm) sac genişliğine göre kalınlığının değişimi a) 60x10 mm² (1/2), b) 60x20 mm² (1/2), c) 60x30 mm² (1/2), d) 60x40 mm² (1/4), e) 60x50 mm² (1/4), f) 60x60 mm² (1/4).

8.2.2 Erichsen testinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Erichsen testlerinden elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği verilerinden yararlanarak düz, ve desenli saclar için gerilme-şekil değiştirme değerleri hesaplanarak Şekil 8.17’teki grafik çizilmiştir. Bu grafikte aynı zamanda analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deformasyon derinliği değeri ile hesaplanan gerilme-şekil değiştirme eğrileri de verilmiştir. Tek eksenli çekme testinden elde edilen veriler ile çizilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden farklı olarak burada gerilme değerlerinin tek eksenli çekmenin yaklaşık 1.5 katı çıktığı görülmektedir. Şekil değiştirme değerlerinde ise yaklaşık 2 kat bir artış görülmektedir. Gerilme ve şekil değiştirme değerlerindeki bu artışa sebep olarak malzemenin şekillendirme esnasında pekleşmesi gösterilebilir.

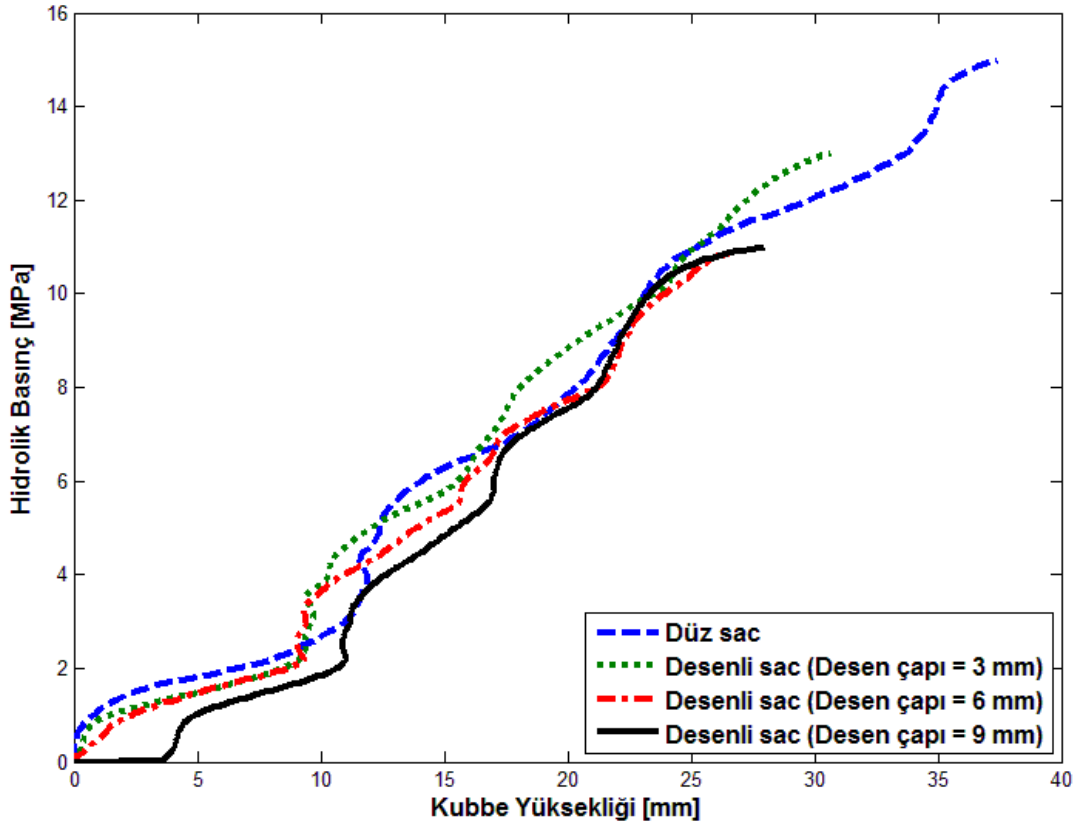


Şekil 8.17. İki eksenli gerilme halinde gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Erichsen testi).

8.2.3 Bulge testi simülasyonu

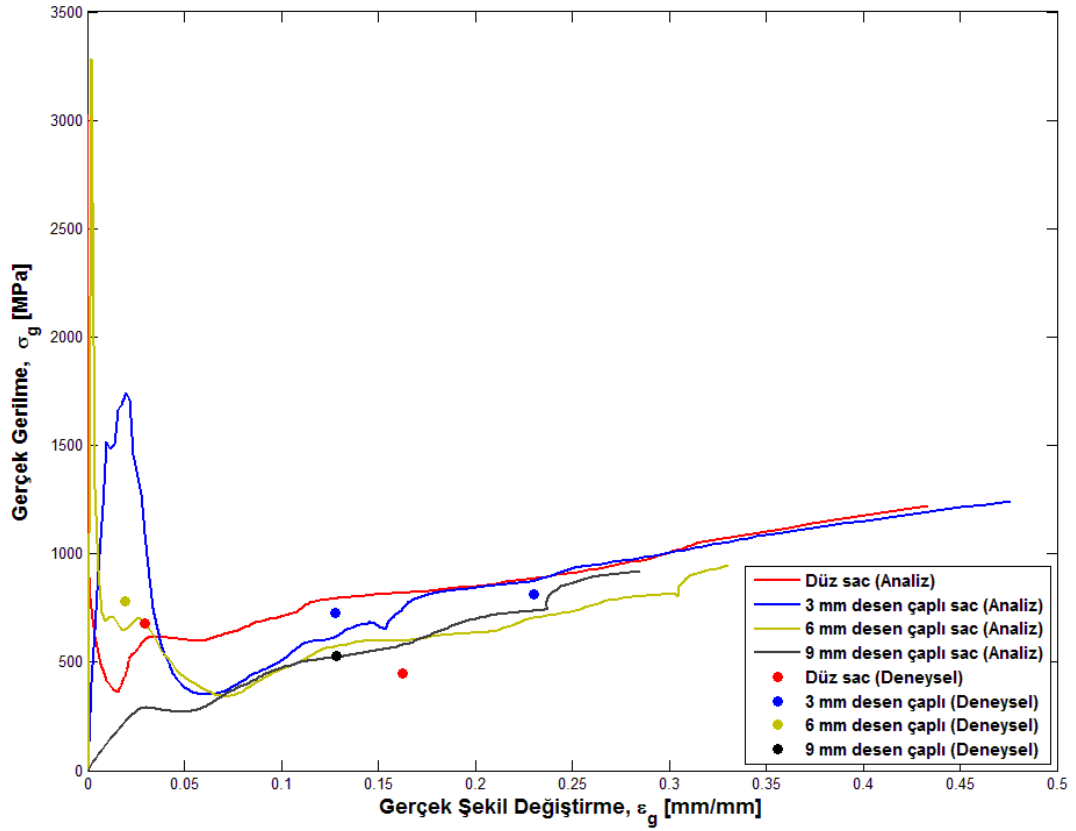
Simülasyonlarda uygulanan hidrolik basınca göre oluşan kubbenin yüksekliği Şekil 8.18’de verilmiştir. Düz saclar yaklaşık 150 bar basınçta 38 mm kubbe yüksekliğine ulaşırken desenli saclarda bu değerin daha aşağılarda olduğu görülmektedir. Ayrıca

düz saclara uygulanan 150 bar'lık basınçta modelin ağ yapısı üzerinde herhangi bir bozulma görülmektedir. Desenli saclarda ise grafikte görülen maksimum hidrolik basınç uygulandığında mesh yapısı bozulmaktadır. Daha yüksek basınçlarda ise sistem kararlı halde uzaklaşmakta ve sonuçlar tutarsızlaşmaktadır.



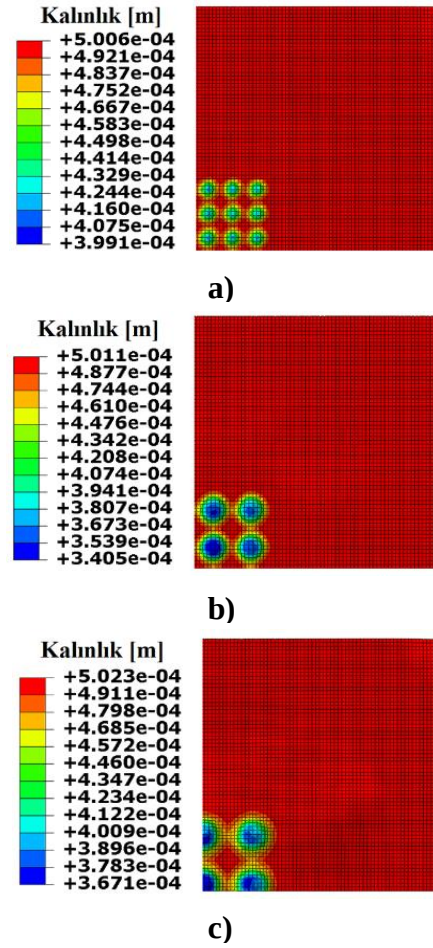
Şekil 8.18. Hidrolik basınç-kubbe derinliği ilişkisi.

Sonlu elemanlar analizi ile simülasyonlardan elde edilen hidrolik basınç, kubbe yüksekliği ve anlık sac kalınlığı ile gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme grafiği çizilmiştir (Şekil 8.19). Deney esnasında ilk anlarda uygulanan düşük hidrolik basınç dolayısı ile kubbe yüksekliği düşük olmakta ve kubbe eğrilik yarıçapı sonsuz uzunlukta olmaktadır. Dolayısı ile yüzey alanının artışı sebebiyle yüzey basıncı Şekil 6.6'dakine benzer karakterde azalmaktadır. Grafikte yaklaşık 0.05 şekil değiştirme oranına kadar bu durumun devam ettiği görülmektedir. Simülasyondan alınan verilere bağlı olarak çizilen gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrilerine ek olarak Bulge testinden alınan verilerde grafiğe aktarılmıştır.



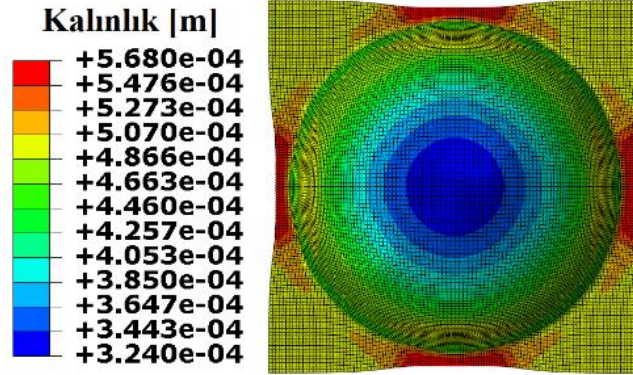
Şekil 8.19. Gerçek gerilme – gerçek şekil değiştirme ilişkisi (Bulge Testi).

Şekil 8.20’de sac numunelerde desen basımından sonra sac kalınlık değişimi görülmektedir. 3 mm desen çapına sahip sacda en düşük kalınlık 0,4 mm olarak görülmektedir. 6 mm ve 9 mm desen çapına sahip saclarda ise kalınlığın 0.35 mm değerlerine kadar düştüğü görülmektedir. Bu düşüş, sacda yaklaşık %30 kalınlık azalmasına tekabül etmektedir. Ayrıca gerilme şekil değiştirme diyagramında 6 mm ve 9 mm çaplı desenli sacların daha düşük şekil değiştirme oranında yırtılmasına sebep olmaktadır.

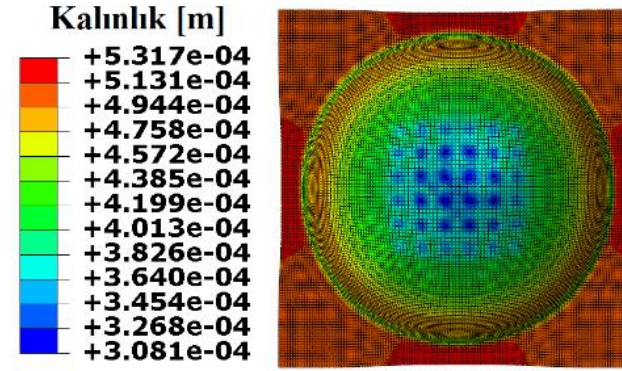


Şekil 8.20. Desen basımından sonra saclardaki kalınlık değişimi. a) Desen çapı 3 mm ($\frac{1}{4}$) b) Desen çapı 6 mm ($\frac{1}{4}$) c) Desen çapı 9 mm ($\frac{1}{4}$).

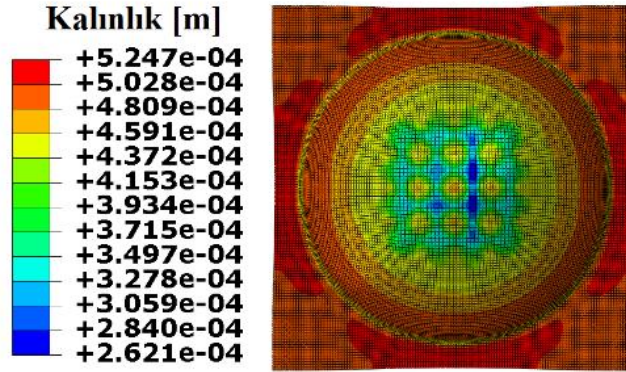
Bulge testi sonunda düz ve desenli saclarda oluşan kalınlık değişimi Şekil 8.21’de verilmiştir. Düz saclarda maksimum 150 bar basınç ile yükleme yapılmasına rağmen sac üzerinde herhangi bir aşırı deformasyon görülmemektedir. Ancak simülasyonda 150 bar üstünde yükleme yapıldığında kalıp geometrisinden dolayı mesh yapısı bozulmakta ve program simülasyonu sonuca yakınsayamamaktadır. Desenli saclarda ise 3 mm desen çapına sahip olan modelde en çok kalınlık azalması desenler üzerinde görülmektedir. 3 mm desen çapına sahip olan sac modele 130 bar’lık bir hidrolik basınç uygulanmıştır. Hidrolik basınç daha fazla arttırıldığında ise düz sacdaki soruna benzer şekilde mesh yapısı bozulmakta ve sonuçları tutarsızlaştırmaktadır. 6 ve 9 mm desen çapına sahip saclarda ise yaklaşık 110 bar’lık hidrolik basınç yüklemesinde sacların yırtılarak hasara uğradığı görülmektedir. 6 mm desen çaplı sacda bu yırtılmanın yarı küresel desenler arasındaki bölgede, 9 mm desen çaplı sacda ise yırtılmanın yarı küresel desenler üzerinde olduğu açıkça görülmektedir.



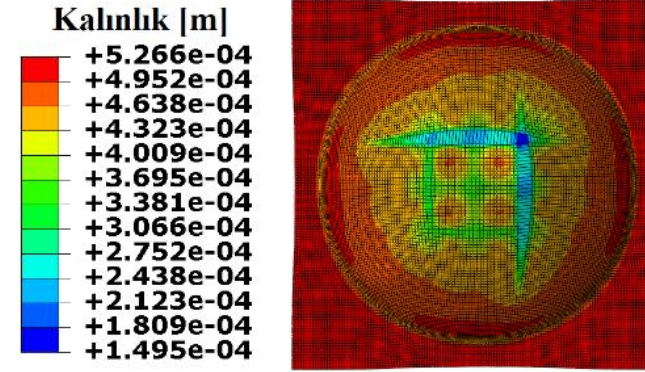
Düz sac (150 bar)



**3 mm desen çaplı sac
(130 bar)**



**6 mm desen çaplı sac
(109 bar)**



**9 mm desen çaplı sac
(110 bar)**

Şekil 8.21. Bulge testi analizinde saclardaki kalınlık değişimi.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 0.5 mm kalınlığındaki dubleks paslanmaz çelik düz ve yarı küresel desen basılmış sacların şekil alma kabiliyetleri incelenmiştir. Düz ve desenli saclar çekme testi, Erichsen testi ve Bulge testine tabi tutulmuşlardır. Ayrıca yapılan çalışmaların sonlu elemanlar modeli oluşturularak analiz sonuçlarının deneysel bulgularla tutarlılığı karşılaştırılmıştır. Desenli saclara 3, 6 ve 9 mm çaplı yarı küresel kabartı geometrili desenler basılmış ve çaplardaki bu lineer artışın şekil alma kabiliyetine olan etkisi incelenmiştir.

- 3 mm çaplı yarı küresel desenli sacların 6 ve 9 mm çaplı modellere göre sıkışmadan kaynaklı herhangi bir hasar olmadan derin çekildiği görülmüştür.
- Daha büyük çaplı (9 mm) yarı küresel desenlerin artan deformasyon derinliği ile birlikte yayılarak söndüğü için ve sac davranışının giderek düz saclara benzediği görülmüştür. Dolayısıyla artan desen boyutunun sacın şekil alma kabiliyetine olan etkisinin azaldığı görülmüştür.
- Yapılan çalışmalarda, yarı küresel desenli modellerde derin çekilen saclarda oluşan yırtığın genellikle yarı küresel desenlerin boğum noktalarından başlayarak ilerlediği görülmüştür.
- Deneysel çalışmalarda desenli saclarda oluşan hasarların genellikle desen basımı esnasında oluşan aşırı kalınlık azalmasının olduğu birkaç ayrı noktada yırtılma şeklinde başladığı gözlenmiştir.
- Desenler pot çemberi boşluğunun dışarısında bırakılmamalıdır. Bu bölgede kalan desenler pot çemberi ve üst kalıp arasında kalarak ezilmektedir.
- Sac kenarlarındaki bazı yarı küresel desenlerin derin çekme esnasında kalıp ile pot çemberi arasına sıkışarak ezildiği gözlenmiştir.
- Desen basımında kalıp geometrisinin düzgün ve mükemmel geometriye yakın olması saclarda oluşan yırtık başlangıcını etkilediği görülmüştür.
- Büyük çaplı desenlerin saca basımı sırasında kalıplar tam kapatıldığında sacın yırtıldığı görülmüştür. Bu sebeple desen çapı arttırıldıkça desen yüksekliğinin azalması gerektiği anlaşılmıştır.

- Özellikle 3 mm çaplı yarı küresel desenli sacların diğer saclar ile aynı oranda sıkıştırılmasına rağmen kalıp ile pot çemberi arasından daha rahat kaydığı ve daha üniform şekil aldığı gözlenmiştir.
- Saclara basılan desenlerin genel olarak sacın eğilme mukavemetini arttırmasına rağmen sacın şekil alma kabiliyetini önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür. Bu sebeple desenli sacların yüksek dayanım gerektiren ve imalatı kolay uygulamalarda (bükme ve eğme yöntemleri ile imal edilebilen basamaklar veya borular, çamaşır makinesi tamburu gibi) kullanılmasının daha uygun olacağı söylenebilir.
- Desenli saclardan 3 ve 6 mm desen çapına sahip sacların şekil alma kabiliyetinin yaklaşık %70 oranında düştüğü ($e_2=0$ için) ancak 9 mm çapa sahip olanların ise tekrar düz sacların şekil alma kabiliyetine yaklaştığı görülmüştür.
- Saclarda oluşan yırtılma hasarlarının genellikle sacın hadde yönüne dik olduğu gözlenmiştir.
- Bu incelikteki bir sacın (0.5 mm) mukavemetini arttırmanın başka yolu olmadığından sacın kesit profili değiştirilerek mukavemet arttırma yoluna gidilmiştir. Böylece sacın pekleşmesi ile sacın esneme ve şekil alma kabiliyeti azaltılmış ancak yüzey alanı ve darbe dayanımı arttırılmıştır.
- Yapılan mekanik derin çekme işleminde desenli saclara sadece desenin arka tarafından ve tek noktadan yayılarak yük uygulanabilmektedir. Ancak hidro-şekillendirme işlemlerinde hidrolik basınç ile saca her noktadan ve sacın her iki tarafından yükleme yapılabilmektedir.
- Simülasyonlarda modellere uygulanan ağ yapısının, eleman tipinin ve eleman sayısının çözüm sonucuna ve çözüm zamanına büyük ölçüde etki ettiği gözlemlenmiştir.
- Deneysel verilerle tutarlı analiz sonuçları elde etmek için programa girilmesi gereken malzeme özelliklerinin uygun deneysel verilerden (tek eksenli çekme deneyi gibi) doğru alınması gerekir.
- Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara benzer sonuçları simülasyonlarda da elde edebilmek için sürtünme katsayısının gerçeğe yakın olarak girilmelidir. Bu çalışmada sürtünme katsayısı desen çapına ve sac ebatına göre değiştirilerek deneysel sonuçlara en yakın sonucu veren efektif bir sürtünme katsayısı ($\mu=0.45$) kullanılmıştır.

- Bu tür temas analizlerinin kapalı (implicit) metotla çözülmesinin çok zor ve zaman alıcı olduğu görülmüştür. Bunun yerine açık (explicit) yöntem kullanılarak problem daha kısa zamanda ve gerçeğe yakın sonuçlarda çözümlenmiştir.
- Dupleks paslanmaz çelik saclar gibi kıymetli metal sacları deforme etmeden önce sonlu elemanlar metodu ile elde edilen sonuçlar gerçekte deneysel çalışmaların gidişatı için iyi bir fikir verici olmuştur.

Tüm bu değerlendirmeler ışığında daha sonraki çalışmalar için şu öneriler yapılabilir:

- Uygun ölçüm sistemleri (3-boyutlu kamera gibi) kullanılarak deney esnasında sacın herhangi bir yerinde oluşan gerilmeler anlık olarak hesaplanabilir.
- Doğrusal dizilimli yarı küresel desenli saclara ek olarak dairesel dizilimli yarı küresel desenli saclarında şekil alma kabiliyeti deneysel olarak araştırılabilir.
- Düz saclara desen basımı mekanik temasla değil hidro-şekillendirme ile yapılarak sac yüzeyine daha homojen bir kalınlık dağılımı sağlanabilir.
- Bulge testi için daha profesyonel bir düzenek kurularak anlık hidrolik basınç değeri ve deformasyon derinliği gibi değerler kayıt edilebilir ve anlık olarak takip edilebilir.
- Saclar incelidikçe sac içerisindeki mikroyapının şekil alabilirliğe olan etkisi artabilir. Buna dupleks paslanmaz çelik saclar iyi bir örnektir. Bu sebeple bu tarz çok ince sacların ($t \leq 0.5$ mm) deformasyon analizinde mikroyapıları da modellenerek daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabilir.
- Simülasyonlarda modeller kabuk eleman yerine katı olarak modellenebilir ve farklı eleman tipi ile ağ yapısı oluşturularak elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Bu çalışmanın dışında kalan desen çapı 3 mm'nin altında olan desenli sacların şekil alma kabiliyetlerinin araştırılması ileriki çalışmaların konusu olabilir. Daha küçük desen çaplarında optimum bir şekil alma kabiliyeti ve mukavemeti araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Aran A., Temel M.A., 2003, *Paslanmaz Çelik Yassı Mamüller*, Sarıtaş Teknik Yayın No:1, 2. Baskı, Acar Matbaacılık A.Ş., İstanbul.
- [2] TS EN 13458-2, 2006, *Ostenitik paslanmaz çelik tankların basınçla dayanımlarının artırılması*, Nisan, T.S.E.
- [3] www.tosundemir.com (Erişim tarihi: 15.01.2014).
- [4] Yilbometal.com (Erişim tarihi: 15.01.2014).
- [5] <http://www.a-ztech.com.tr/ABAQUS.html> (Erişim tarihi: 10.12.2013).
- [6] Şanay B., Kaftanoğlu B., 2011, *Sac metal şekillendirmesinde plastik kararsızlık ve şekillendirme limitlerinin belirlenmesi*, Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, Cilt 13, No. 1.
- [7] Anket O., Koruvatan T., Ay İ., 2011, *Sac malzemelerin şekillendirilmesinde sınır diyagramlarının kullanımı*, Politeknik Dergisi, 14, 1, 39-47.
- [8] Ozturk F., Dilmec M., Turkoz M., Ece R. E., Halkaci H. S., 2009, *Grid marking and measurement methods for sheet metal formability*, 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, 41-49.
- [9] Balod A. O., 2010, *Theoretical determination of forming limit stress diagram for steel 1021 sheet*, Tikrit Journal of Eng. Sciences, Vol. 17, No. 4, 56-66.
- [10] Turkoz M., Yigit O., Dilmec M., Halkaci H. S., 2010, *Construction of forming limit diagrams for AA 5754 and AA 2024 Aluminium Alloys*, Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys, 516-521.
- [11] Slota J., Spisak E., 2008, *Determination of flow stress by the hydraulic bulge test*, METABK47(1), 13-17.

- [12] Yong-na S., Min W., Xiang-dong W., 2012, *Friction coefficient in rubber forming process of Ti-15-3 alloy*, Trans. Nonferrous Met. Soc. 22, 2952-2959.
- [13] Sobotka J., Solfronk P., Doubek P., Zuzanek L., 2012, *The stress state influence on the true stress-strain curves of deep-drawing material DC05*, Metal 2012, Brno, Czech Republic.
- [14] Li G.Y., Tan M.J., Liew K.M., 2004, *Three-dimensional modeling and simulation of superplastic forming*, Journal of Materials Processing Technology 150, 76-83.
- [15] Campos H. B., Butuc M. C., Gracio J. J., Rocha J. E., Duarte J. M. F., 2006, *Theoretical and experimental determination of the forming limit diagram for the AISI 304 stainless steel*, Journal of Materials Processing Technology 179, 56-60.
- [16] Hwang Y., Lin Y., Chuang H., 2009, *Forming limit diagram of tubular materials by bulge tests*, Journal of Materials Processing Technology 209, 5024-5034.
- [17] Ziaeiipoor H., Jamshidifard S., Moosavi H., Khademizadeh H., 2010, *Numerical analysis of wrinkling phenomenon in hydroforming deep drawing with hemispherical punch*, 9th Wseas International Conference on System Science and Simulation Engineering, 96-102.
- [18] Safari M., Hosseinipour S. J., Azodi H. D., 2011, *Experimental and numerical analysis of forming limit diagram (FLD) and forming limit stress diagram (FLSD)*, Materials Science and Applications, No. 2, 497-503.
- [19] Yoon B. B., Rao R. S., Kikuchi N., 1989, *Sheet stretching: A theoretical-experimental comparison*, International Journal of Mechanical Science, Vol. 31, No. 8, 579-590.
- [20] Panich S., Uthaisangsuk V., Juntaratin J., Suranuntchai S., 2011, *Determination of forming limit stress diagram for formability prediction of SPCE 270 steel sheet*, Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol. 21, No. 1, 19-27.

- [21] Maier C., 2013, *Failure prediction in sheet metal forming using FEA of Nakazima test*, Machines, Technologies, Materials, 9-12.
- [22] Gavrus A., Banu M., Ragneau E., Maier C., Olesik V., 2008, *An inverse analysis approach of the Erichsen test starting from a finite element model*, Int. J. Mater. Form., Suppl. 1, 5-8.
- [23] Oleksik V., Gavrus A., Paunoiu V., Bologa O., 2009, *Experimental and finite element analysis of erichsen test. Application to identification of sheet metallic material behaviour*, The Annals of “Dunarea De Jos” University of Galati Fascicle V, ISSN 1221-4566.
- [24] Fan J.P., Tang C.Y., Tsui C.P., Chan, L.C., Lee T.C., 2006, *3D finite element simulation of deep drawing with damage development*, International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application 46, 1035-1044.
- [25] Ku T. W., Ha B.K., Song W.J., Kang B.S., S. M. Hwang, 2002, *Finite element analysis of multi-stage deep drawing process for high-precision rectangular case with extreme aspect ratio*, Journal of Materials Processing Technology 130-131, 128-134.
- [26] Takuda H., Yoshii T., Hatta N., 1999, *Finite-element analysis of the formability of a magnesium-based alloy AZ31 sheet*, Journal of Materials Processing Technology 89-90, 135-140.
- [27] Bong H. J., Barlat F., Lee M., Ahn D. C., 2012, *The forming limit diagram of ferritic stainless steel sheets: Experiments and modeling*, International Journal of Mechanical Sciences 64, 1-10.
- [28] Panich S., Barlat F., Uthaisangsuk V., Suranuntchai S., Jirathearanat S., 2013, *Experimental and theoretical formability analysis using strain and stress based forming limit diagram for advanced high strength steels*, Materials and Design 51, 756-766.
- [29] Gürün H., 2008, *Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 708.3.028.

- [30] Başıpınar M., 2011, Modelling and simulation of friction in deep drawing, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [31] Ulu D., 2008, Derin çekme prosesi ile üretilen alüminyum sac metal parçalarına ait veri tabanı oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 914.1.012.
- [32] Yalçın S., 2010, Analysis and modelling of plastic wrinkling in deep drawing, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [33] Gao E., Li H., Kou H., Chang H., Li J., Zhou L., 2009, *Influences of material parameters on deep drawing of thin-walled hemispheric surface part*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 19, 433-437.
- [34] Özçelik G., 2008, Derin çekme işleminin simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [35] Zimniak Z., 2000, *Implementation of the forming limit stress diagram in FEM simulations*, Journal of Materials Processing Technology 106, 261-266.
- [36] Moverare J. J., Oden M., 2002, *Deformation behaviour of a prestrained duplex stainless steel*, Materials Science and Engineering A 337, 25-38.
- [37] Maji K., Pratihar D. K., Nath A. K., 2014, *Laser forming of a dome shaped surface: Experimental investigations, statistical analysis and neural network modeling*, Optics and Lasers in Engineering, No. 53, 31-42.
- [38] Zaba K., Muzykiewicz W., Nowak S., 2008, *Analysis of the perforation process of steel strips used in automotive industry*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. VII, No. 3, 145-154.
- [39] Ike H., 1996, *Properties of metals sheets with 3-D designed surface microgeometry prepared by special rolls*, Journal of Materials Processing Technology 60, 363-368.
- [40] Alparslan Y. E., 2008, Merkezi delikli taslak malzemelerin derin çekme özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.

- [41] Yıldızlı K., Dengiz C. G., 2014, *Ostenitik ve Dupleks Paslanmaz Çelik Sacların Şekil Alma Kabiliyetlerinin Karşılaştırılması*, 15th International Materials Symposium.
- [42] http://www.kahyaoglupaslanmaz.net/index.php?route=product/product&product_id=73 (Erişim tarihi: 04.01.2014).
- [43] <http://www.milkomak.com.tr/temsilcilikler/mbs-borulu-isi-degistiriciler/> (Erişim tarihi: 04.01.2014).
- [44] <http://www.teknedergisi.com/tag/saft-kovan-pervane/> (Erişim tarihi: 04.01.2014).
- [45] <http://www.kfupm.edu.sa/deanships/dsr/en/Pages/NSTIPResearchPrograms.aspx> (Erişim tarihi: 04.01.2014).
- [46] <http://steelfinder.outokumpu.com/> (Erişim tarihi: 15.01.2014).
- [47] SMR, All Stainless Steel Products, Janurary 2013
<http://reports.outokumpu.com/en/2012/business/our-operating-environment/market-review/> (Erişim tarihi: 15.01.2014).
- [48] Çapan L., 2003, *Metallere Plastik Şekil Verme*, Çağlayan Kitabevi, Dördüncü baskı.
- [49] <http://www.rayhaber.com/2013/demiryollari-sektorunde-gelisen-yan-sanayiler/> (Erişim tarihi: 02.12.2013).
- [50] <http://www.mvmmarin.com/page/37> (Erişim tarihi: 02.12.2013).
- [51] <http://www.erayonline.com/bosch-yedek-parca-1612001034-bosch-biyel-kolu-p-2034.html> (Erişim tarihi: 02.12.2013).
- [52] Gülsöz A.,2011, *İmal Usulleri Ders Notları*, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- [53] http://sebench.com/wpcontent/uploads/2013/04/iStock_000006824612_Large.jpg (Erişim tarihi: 02.12.2013).
- [54] <http://www.ayla-aluminyum.com.tr/aluminyum-ekstruzyon-profil-ozellikleri> (Erişim tarihi: 03.12.2013).

- [55] <http://www.gercekmuhendislik.com/urundetay.asp?tan=Tel%20%C3%87ekme%20Haddeleri&id=6> (Erişim tarihi: 03.12.2013).
- [56] <http://www.yuzeymuhendislikkaplama.com/urunler/tel-cekme-sektoru/> (Erişim tarihi: 03.12.2013).
- [57] <http://www.madirli.com.tr/celik-tencereler/100/> (Erişim tarihi: 03.12.2013).
- [58] <http://www.gencmetal.com/urunlerimiz.php?grup=43> (Erişim tarihi: 05.12.2013).
- [59] <http://www.youtube.com/watch?v=argrghONsWY> (Erişim tarihi:05.12.2013).
- [60] http://www.herturmetal.com/urun_resim_ust_sayfa.asp?urunresim=261&altkat1=261&menugor=124 (Erişim tarihi: 05.12.2013).
- [61] Halkacı S., *Sac Hidrolik Ėekillendirme Deney Ünitesi Gerçekleştirildi*, Mühendis ve Makine, 52, 615, 37-40.
- [62] <http://forum2.magnetofon.de/board2-tonbandger%C3%A4te/board16-alles-andere/12422-deutschland-rundreise-2011/index5.html#post131501> (Erişim tarihi: 05.12.2013).
- [63] Ay İ., *İmalat Yöntemleri II Ders Notları*, Balıkesir Üniversitesi.
- [64] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/ger/default.asp?catid=175&pageid=2144416783> (Erişim tarihi: 07.12.2013).
- [65] <http://www.globalspec.com/reference/70327/203279/chapter-18-formability-tests> (Erişim tarihi: 10.12.2013).
- [66] Çetinoluk R.Y., 2013, Paslanmaz çelik ve alüminyum üzerinde hidroform şekillendirmenin incelenmesi, Bitirme Projesi, Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kayseri.
- [67] Söylemez M. T., Ekim 2003, *SimuX Raylı Sistem Simülatörü*, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [68] <http://www.ema-eda.com/Solutions/MCAD/Simulation.aspx> (Erişim tarihi: 10.12.2013).

- [69] <https://www.esi-group.com/company/about/customer-successes/tecnalia-labein-successfully-use-pam-stamp-2g-optimize-process> (Erişim tarihi: 10.12.2013).
- [70] Getting Started with ABAQUS: Interactive Edition, ABAQUS 6.13.
- [71] Kalpakjian S., Schmid S., 2012, *Manufacturing Processes For Engineering Materials*, Fifth Edition, Prentice Hall, Illinois.
- [72] Kayalı S., Ensari C., 1986, *Metallere Plastik şekil Verme İlke ve Uygulamaları*, İ.T.Ü. Metalurji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- [73] ERC/ NSM, 2001, How to draw round cups deeper, Stamping Journal® March/April 1999, January 15.
- [74] Altan T., 2003, Using binder force control, force modulation, to improve part quality, stamping efficiency, Stamping Journal July/August.
- [75] Yıldızlı K., 2011, *Çekme/Eğme Deney Föyü*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Samsun.
- [76] Sheet Metal Marking Instrument Model 190 Technical Description, www.erichsen.de. (Erişim tarihi: 15 Ocak 2014)
- [77] GUNT WP 300.11 technical description, Deep Drawing Module, Technical Catalogue http://www.gunt.de/static/s4133_1.php?p1=&p2=&pN=;
- [78] şener B., 2012, Otomotiv sektöründe kullanılan derin çekme saclarının şekillendirilebilirlik analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [79] <http://deformasyonbolgesi.blogspot.com/> (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2013).
- [80] <http://www.imasan.com.tr/tr/makale/1/hamit-bilkent.html> (Erişim tarihi: 16.01.2014).
- [81] http://news.thomasnet.com/company_detail.html?cid=597239&sa=30 (Erişim tarihi: 16.01.2014).
- [82] Aran A., Demirkol M., 1995, *Plastik şekil Verme ve Teknolojisi*, İmal Usulleri Ders Notları, İTÜ Makina Fakóltesi, İstanbul.
- [83] Koç E., 2010, *Makina Elemanları Cilt 1*, 4. Baskı, Nobel Kitabevi, Adana.

- [84] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hardness-testing-part-1-074/> (Ziyaret tarihi: 13 Aralık 2013).
- [85] Dengiz C.G., Yıldızlı K., Altınordu B., 2013, *Desenli sacların şekil alma kabiliyetlerinin araştırılması*, Makine İmalat Teknolojileri Kongresi, 06-07 Aralık, Bursa, 164-173.
- [86] Gutscher G., Wu H., Ngaile G., Altan T., 2004, *Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test*, Journal of Materials Processing Technology 146, 1-7.
- [87] <http://en.wikipedia.org/wiki/ABAQUS> (Erişim tarihi: 22.03.2014).
- [88] ABAQUS Example Problems Guide, ABAQUS 6.13.

EKLER

EK A : Erichsen deney düzeneği detaylı teknik çizimi.

EK B : Hidro-şekillendirme kalıplarına ait teknik çizimleri.

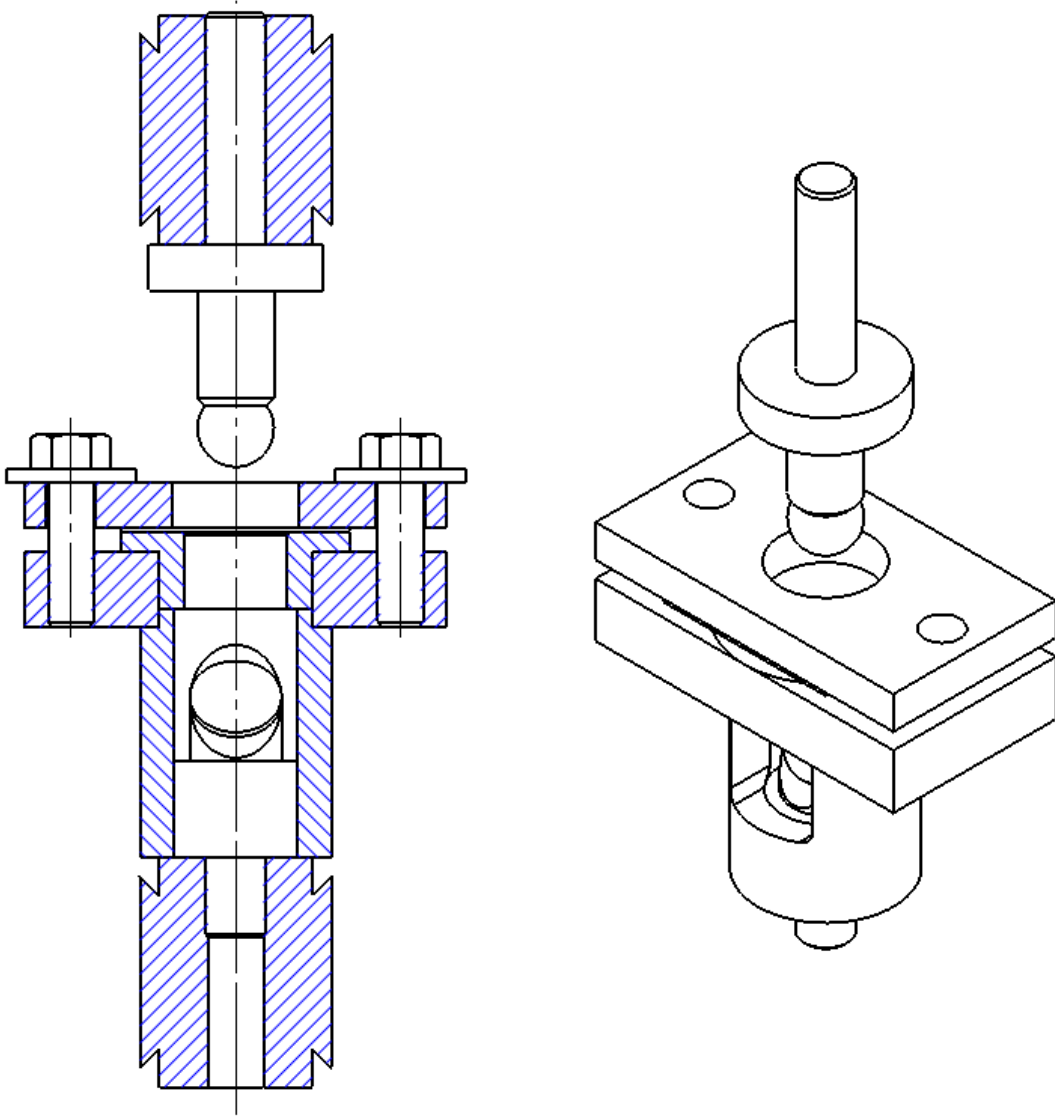
EK C : Dubleks paslanmaz çelik düz sacların Erichsen deneyi ve analizi sonuçlarının mutlak yüzde hata oranları.

EK D : 3 mm desen çaplı dubleks paslanmaz çelik desenli sacların Erichsen deneyi ve analizi sonuçlarının mutlak yüzde hata oranları.

EK E : 6 mm desen çaplı dubleks paslanmaz çelik desenli sacların Erichsen deneyi ve analizi sonuçlarının mutlak yüzde hata oranları.

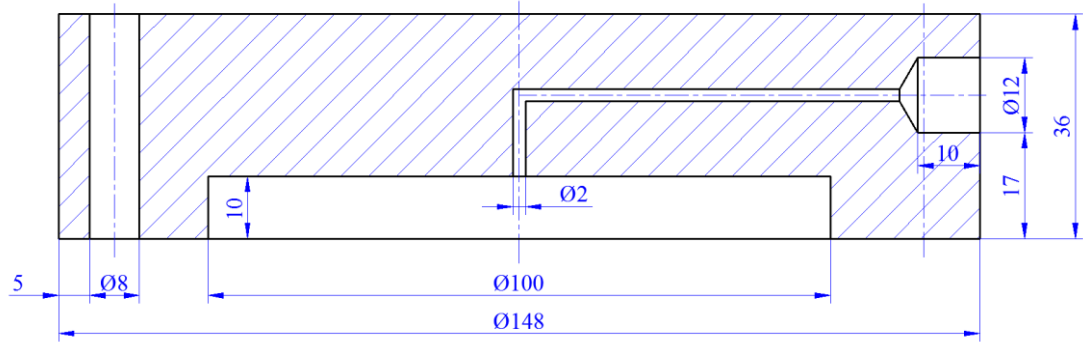
EK F : 9 mm desen çaplı dubleks paslanmaz çelik desenli sacların Erichsen deneyi ve analizi sonuçlarının mutlak yüzde hata oranları.

EK A

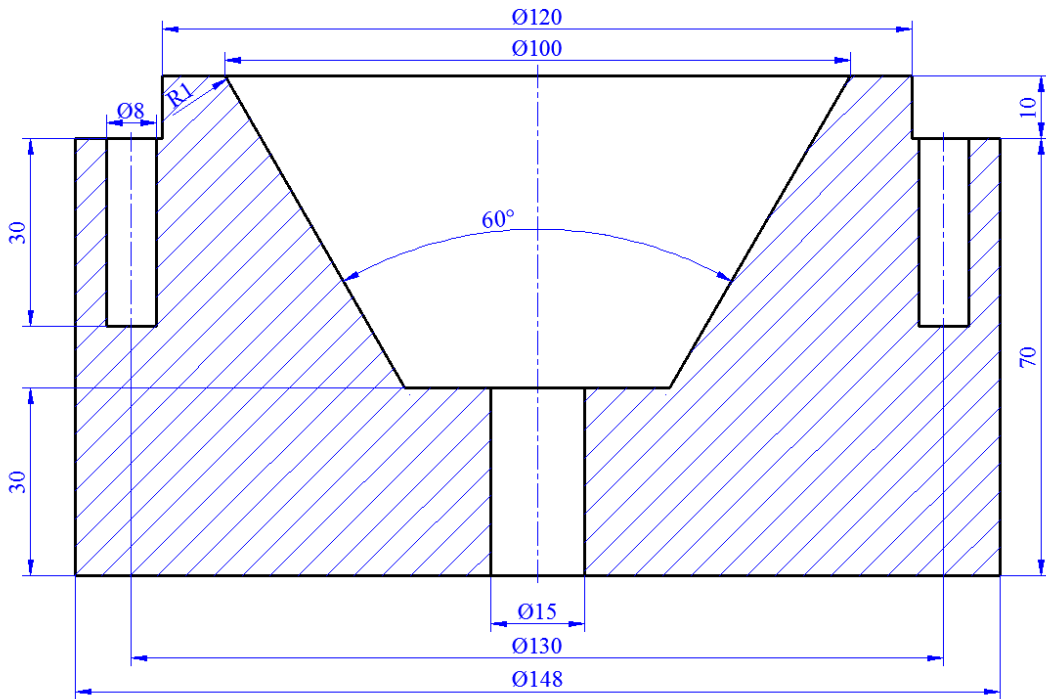


Şekil A.1. Erichsen deney düzeneği detaylı teknik çizimi.

EK B



Şekil B.1. Hidro-şekillendirme üst kalıbı [66].



Şekil B.2. Hidro-şekillendirme alt kalıbı [66].

EK C

Çizelge C.1. 60x10 mm² dubleks paslanmaz çelik düz sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.049	0.048	0.02512	47.65171
0.195	0.105	0.03945	62.42266
0.415	0.163	0.07317	55.10545
0.684	0.278	0.13333	52.03829
0.928	0.383	0.20492	46.49527
1.074	0.451	0.25510	43.43626
1.294	0.585	0.34057	41.78232
1.538	0.700	0.44849	35.92986
1.709	0.834	0.53186	36.22725
1.953	0.959	0.66116	31.05678
2.148	1.074	0.77267	28.05604
2.295	1.198	0.86122	28.11109
2.515	1.294	1.00047	22.68346
2.686	1.448	1.11389	23.07389
2.930	1.601	1.28287	19.87011
3.101	1.716	1.40588	18.07210
3.296	1.860	1.55028	16.65150
3.516	2.004	1.71790	14.27604
3.711	2.138	1.87013	12.52874
3.809	2.215	1.94777	12.06423
3.979	2.349	2.08404	11.27966
4.199	2.474	2.26290	8.532426
4.346	2.617	2.38370	8.914724
4.541	2.752	2.54511	7.517532
4.761	2.915	2.72829	6.405048
4.858	2.991	2.80924	6.076671
4.980	3.106	2.91110	6.274792
5.151	3.269	3.05373	6.584918
5.298	3.375	3.17600	5.896036
5.493	3.490	3.33734	4.374084
5.664	3.643	3.47767	4.538188
5.786	3.739	3.57694	4.334084
5.981	3.912	3.73384	4.554078

Çizelge C.1.Devamı. 60x10 mm² dubleks paslanmaz çelik düz sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
6.641	4.429	4.24271	4.205935
6.836	4.564	4.38464	3.929694
6.958	4.64	4.47108	3.640336
7.08	4.717	4.55557	3.422223
7.251	4.88	4.67047	4.293446
7.373	4.909	4.74979	3.243117

Çizelge C.2. 60x20 mm² dubleks paslanmaz çelik düz sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.000	0.019	0.02060	8.42105
0.024	0.019	0.02500	31.62280
0.220	0.383	0.06860	82.08643
0.684	0.719	0.22376	68.87837
0.977	0.978	0.35730	63.46557
1.147	1.160	0.44670	61.49119
1.343	1.409	0.56010	60.24346
1.685	1.649	0.78356	52.48218
1.904	1.917	0.94268	50.82484
2.173	2.196	1.15424	47.43882
2.441	2.512	1.38161	44.99932
2.783	2.828	1.69406	40.09676
3.027	3.164	1.93107	38.96738
3.345	3.519	2.25600	35.89065
3.589	3.739	2.51657	32.69399
3.833	3.998	2.78596	30.31602
4.102	4.238	3.09218	27.03676
4.321	4.381	3.34786	23.58222
4.590	4.736	3.66879	22.53392
4.883	5.005	4.02573	19.56575
5.078	5.254	4.26685	18.78849
5.322	5.561	4.57181	17.78795
5.518	5.791	4.81886	16.78699
5.762	6.136	5.12830	16.42263
6.006	6.433	5.43905	15.45080
6.299	6.682	5.81272	13.00923
6.592	6.884	6.18558	10.14542
6.787	7.143	6.43257	9.94576
7.031	7.238	6.73954	6.88661
7.275	7.545	7.04342	6.64781
7.617	7.766	7.46252	3.90777
7.910	7.919	7.81365	1.33029
8.276	8.226	8.23965	0.16602
8.521	8.245	8.51568	3.28299
8.813	8.648	8.83371	2.14747
9.131	8.792	9.16490	4.24146
9.399	9.060	9.43042	4.08858
9.668	9.338	9.68322	3.69695
9.937	9.520	9.92114	4.21374
10.254	9.817	10.18090	3.70689

Çizelge C.2.Devamı. 60x20 mm² dubleks paslanmaz çelik düz sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
10.449	9.856	10.32885	4.79759
10.669	10.211	10.48429	2.67639
10.962	10.450	10.67137	2.11838
11.255	10.652	10.83435	1.71189
11.475	10.815	10.94000	1.15577
11.646	10.891	11.01176	1.10880
11.987	11.332	11.12659	1.81264
12.183	11.390	11.17483	1.88915
12.500	11.745	11.22404	4.43561
12.744	11.975	11.23667	6.16559
12.939	12.147	11.23035	7.54632
13.306	12.406	11.17728	9.90421
13.599	12.368	11.09472	10.2949
13.770	12.703	11.02940	13.17487
14.038	12.847	10.90078	15.14922
14.258	13.077	10.77057	17.63733
14.526	13.231	10.58098	20.02890
14.771	13.326	10.37700	22.12963
15.015	13.566	10.14389	25.22563
15.308	13.681	9.82324	28.19794
15.503	13.480	9.58453	28.89811
15.747	13.605	9.25660	31.96177
15.820	12.751	9.15205	28.22478
15.845	13.001	9.11556	29.88566
15.869	12.838	9.08020	29.27090
15.869	12.684	9.08020	28.41216
15.869	12.646	9.08020	28.19705
15.869	12.617	9.08020	28.03201

Çizelge C.3. 60x30 mm² dubleks paslanmaz çelik düz sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.6014	0.59105	0.19587	66.86050
0.9021	0.94589	0.34942	63.05868
1.2028	1.32472	0.57555	56.55313
1.5035	1.72547	0.86764	49.71565
1.8042	2.14605	1.21908	43.19403
2.1049	2.58441	1.62328	37.18942
2.4056	3.03846	2.07362	31.75427
2.7063	3.50614	2.56349	26.88559
3.0070	3.98537	3.08629	22.55942
3.3077	4.47408	3.63541	18.74501
3.6084	4.97021	4.20425	15.41092
3.9091	5.47167	4.78619	12.52767
4.2098	5.97640	5.37464	10.0689
4.5105	6.48232	5.96298	8.01169
4.8112	6.98737	6.54460	6.33667
5.1119	7.48947	7.11290	5.02788
5.4126	7.98654	7.661284	4.07265
5.7133	8.47653	8.18312	3.46142
6.0140	8.95735	8.67182	3.18767
6.3147	9.42693	9.12077	3.24777
6.6154	9.88321	9.52336	3.64100
6.9161	10.32411	9.87299	4.36952
7.2168	10.74755	10.16305	5.43843
7.5175	11.15147	10.38694	6.85592
7.8182	11.53380	10.53803	8.63343
8.1189	11.89246	10.60974	10.78595
8.4196	12.22537	10.59545	13.33230
8.7203	12.53048	10.48855	16.29568
9.0210	12.80571	10.28245	19.70420

Çizelge C.4. 60x40 mm² dubleks paslanmaz çelik düz sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
1.3915	1.41792	0.86490	39.00209
1.6698	1.81901	1.24472	31.57128
1.9481	2.24978	1.68895	24.92809
2.2264	2.70666	2.19112	19.04733
2.5047	3.18669	2.74478	13.86756
2.7830	3.68736	3.34347	9.32603
3.0613	4.20655	3.98075	5.36787
3.3396	4.74251	4.65016	1.94716
3.6179	5.29367	5.34525	0.97427
3.8962	5.85868	6.05956	3.42872
4.1745	6.43623	6.78664	5.44431
4.4528	7.02503	7.52003	7.04632
4.7311	7.62370	8.25329	8.25836
5.0094	8.23072	8.97996	9.10305
5.2877	8.84430	9.69359	9.60265
5.5660	9.46236	10.3877	9.77929
5.8443	10.08242	11.05590	9.65522
6.1226	10.70148	11.69167	9.25280
6.4009	11.31604	12.28859	8.59445
6.6792	11.92190	12.84019	7.70254
6.9575	12.51419	13.34003	6.59922
7.2358	13.08722	13.78165	5.30623
7.5141	13.63440	14.15860	3.84472
7.7924	14.14822	14.46443	2.23502
8.0707	14.62009	14.69268	0.49652
8.3490	15.04032	14.83689	1.35255

Çizelge C.5. 60x50 mm² dubleks paslanmaz çelik düz sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
2.1528	2.96473	2.13935	27.84002
2.4219	3.45593	2.65938	23.04879
2.6910	3.96792	3.22027	18.84219
2.9601	4.49932	3.81667	15.17229
3.2292	5.04901	4.44322	11.9982
3.4983	5.61598	5.09456	9.28455
3.7674	6.19929	5.76535	6.99987
4.0365	6.79796	6.45022	5.11534
4.3056	7.41089	7.14382	3.60374
4.5747	8.03680	7.84080	2.43874
4.8438	8.67410	8.53580	1.59436
5.1129	9.32084	9.22347	1.04470
5.3820	9.97463	9.89844	0.76380
5.6511	10.63253	10.55538	0.72554
5.9202	11.29095	11.18892	0.90371
6.1893	11.94564	11.79370	1.27200
6.4584	12.59153	12.36437	1.80412
6.7275	13.22268	12.89558	2.47380
6.9966	13.83217	13.38196	3.25477
7.2657	14.41206	13.81818	4.12070
7.5348	14.95326	14.19887	5.04499
7.8039	15.44547	14.51867	6.00045
8.0730	15.87708	14.77223	6.95877

Çizelge C.6. 60x60 mm² dubleks paslanmaz çelik düz sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.2669	0.34347	0.08697	74.67718
0.5338	0.67947	0.19143	71.82539
0.8008	1.03503	0.36591	64.64731
1.0677	1.41113	0.60581	57.06854
1.3346	1.80867	0.90658	49.87582
1.6016	2.22847	1.26362	43.29610
1.8685	2.67118	1.67238	37.39171
2.1354	3.13730	2.12826	32.16269
2.4024	3.62712	2.62669	27.58188
2.6693	4.14070	3.16310	23.60945
2.9362	4.67782	3.73291	20.19973
3.2032	5.23797	4.33155	17.30483
3.4701	5.82030	4.95443	14.87672
3.7370	6.42360	5.59699	12.86840
4.0040	7.04626	6.254644	11.23461
4.2709	7.68623	6.92281	9.93227
4.5378	8.34101	7.59693	8.92074
4.8048	9.00759	8.27241	8.16176
5.0717	9.68244	8.94468	7.61955
5.3386	10.36148	9.60917	7.26061
5.6056	11.04001	10.26130	7.05354
5.8725	11.71273	10.89649	6.96880
6.1394	12.37366	11.51017	6.97845
6.4064	13.01614	12.09775	7.05573
6.6733	13.63278	12.65467	7.17469
6.9402	14.21545	13.17635	7.30967
7.2072	14.75522	13.65821	7.43472
7.4741	15.24233	14.09568	7.52281
7.7410	15.66617	14.48417	7.54492
8.0080	16.01526	14.81912	7.46877

EK D

Çizelge D.1. 60x10 mm² dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
1.1162	0.319589	0.11336	64.52952
1.488267	0.44509	0.15668	64.79804
1.860333	0.578426	0.219121	62.11769
2.2324	0.719597	0.299724	58.34836
2.604467	0.868603	0.397531	54.23332
2.976533	1.025445	0.511584	50.11103
3.3486	1.190122	0.640925	46.14627
3.720667	1.362635	0.784597	42.42062
4.092733	1.542983	0.94164	38.97274
4.4648	1.731166	1.111098	35.81796
4.836867	1.927185	1.292011	32.95862
5.208934	2.131038	1.483423	30.38968
5.581	2.342728	1.684374	28.102
5.953067	2.562252	1.893908	26.08426
6.325134	2.789612	2.111065	24.32406
6.6972	3.024807	2.334889	22.80869
7.069267	3.267838	2.56442	21.52549
7.441334	3.518704	2.798701	20.46216
7.8134	3.777405	3.036774	19.60688
8.185467	4.043942	3.277681	18.94837
8.557534	4.318314	3.520464	18.47597
8.9296	4.600521	3.764164	18.17962
9.301667	4.890564	4.007824	18.04985

Çizelge D.2. 60x20 mm² dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.903	0.345	0.18900	45.21544
1.514	0.518	0.32056	38.11457
2.197	0.796	0.57669	27.55142
2.808	1.112	0.89479	19.5329
3.442	1.438	1.30503	9.24685
3.735	1.630	1.51982	6.75948
4.175	1.937	1.86978	3.47009
4.785	2.368	2.40449	1.54125
5.127	2.665	2.72688	2.32208
5.542	3.078	3.13743	1.93109
6.006	3.605	3.61876	0.38171
6.128	3.873	3.74881	3.20645
6.494	4.305	4.14674	3.67600
6.787	4.851	4.47285	7.79516
7.227	5.609	4.97315	11.33615
7.446	6.002	5.22611	12.92704
7.690	6.376	5.51047	13.57479
7.959	6.865	5.82645	15.12818
8.301	7.392	6.23093	15.70707
8.496	7.699	6.46245	16.06106
8.789	8.207	6.81089	17.01117
9.058	8.504	7.13071	16.14866

Çizelge D.3. 60x30 mm² dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
4.5175	3.67762	3.38564	7.93950
4.8939	4.06568	3.88161	4.52739
5.2704	4.46332	4.38916	1.66159
5.6469	4.87054	4.90322	0.67093
6.0233	5.28734	5.41873	2.48507
6.3998	5.71372	5.93065	3.79661
6.7762	6.14968	6.43390	4.62173
7.1527	6.59522	6.92344	4.97660
7.5292	7.05034	7.39420	4.87718
7.9056	7.51504	7.84113	4.33909
8.2821	7.98932	8.25916	3.37750
8.6585	8.47319	8.64325	2.00710
9.0350	8.96663	8.98833	0.24206
9.4115	9.46965	9.28935	1.90399

Çizelge D.4. 60x40 mm² dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.68229	0.44809	0.17010	62.03780
1.02344	0.77101	0.18740	75.69404
1.36459	1.11041	0.28420	74.40581
1.70574	1.46629	0.45428	69.01802
2.04688	1.83865	0.69144	62.39415
2.38803	2.22749	0.98944	55.58024
2.72918	2.63281	1.34208	49.02460
3.07033	3.05460	1.74314	42.93407
3.41148	3.49288	2.18639	37.40436
3.75262	3.94764	2.66562	32.47543
4.09377	4.41887	3.17462	28.15766
4.43492	4.90659	3.70716	24.44517
4.77607	5.41078	4.25704	21.32313
5.11722	5.93146	4.81802	18.77181
5.45836	6.46862	5.38389	16.76900
5.79951	7.02225	5.94844	15.29149
6.14066	7.59236	6.50545	14.31586
6.48181	8.17896	7.04870	13.81909
6.82296	8.78203	7.57197	13.77881
7.16410	9.40159	8.06905	14.17352
7.50525	10.03762	8.53371	14.98268
7.84640	10.69014	8.95975	16.18672
8.18755	11.35913	9.34094	17.76710
8.52870	12.04460	9.67106	19.70623

Çizelge D.5. 60x50 mm² dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.9372	0.74678	0.68222	8.64498
1.2496	1.02322	0.82002	19.85921
1.5620	1.32151	0.93704	29.09273
1.8744	1.64163	1.04885	36.10949
2.1868	1.98360	1.16922	41.05583
2.4992	2.34741	1.31018	44.18607
2.8116	2.73306	1.48201	45.7747
3.1240	3.14055	1.69321	46.08555
3.4364	3.56989	1.95053	45.36144
3.7488	4.02106	2.25897	43.82163
4.0612	4.49408	2.62174	41.66239
4.3736	4.98894	3.04032	39.05885
4.6860	5.50564	3.51441	36.16711
4.9984	6.04418	4.04196	33.12637
5.3108	6.60456	4.61917	30.06097
5.6232	7.18679	5.24045	27.08217
5.9356	7.79085	5.89848	24.28972
6.2480	8.41676	6.58416	21.77326
6.5604	9.06451	7.28664	19.61354
6.8728	9.73410	7.99331	17.88346
7.1852	10.42554	8.68979	16.64898
7.4976	11.13881	9.35995	15.96989
7.8100	11.87393	9.98590	15.90056

Çizelge D.6. 60x60 mm² dubleks paslanmaz çelik 3 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.61392	0.43202	0.45780	5.96680
0.92088	0.63560	0.60860	4.24842
1.22784	0.86655	0.74581	13.93295
1.53480	1.12521	0.88297	21.52804
1.84176	1.41180	1.03204	26.89932
2.14872	1.72643	1.20339	30.29600
2.45568	2.06906	1.40584	32.05416
2.76264	2.43952	1.64661	32.50287
3.0696	2.83754	1.93135	31.93566
3.37656	3.26268	2.26414	30.60491
3.68352	3.71442	2.64748	28.72422
3.99048	4.19208	3.08229	26.47338
4.29744	4.69485	3.56791	24.00360
4.60440	5.22181	4.10212	21.44255
4.91136	5.77191	4.68110	18.89854
5.21832	6.34395	5.29947	16.46428
5.52528	6.93664	5.95026	14.21986
5.83224	7.54853	6.62494	12.23535
6.13920	8.17805	7.31339	10.57294
6.44616	8.82351	8.00392	9.28873
6.75312	9.48309	8.68326	8.43429
7.06008	10.15484	9.33656	8.05798
7.36704	10.83667	9.94740	8.20608
7.67400	11.52638	10.49779	8.92385

EK E

Çizelge E.1. 60x10 mm² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.024	0.010	0.00687	31.29529
0.024	0.019	0.00687	63.83963
0.195	0.211	0.08458	59.91327
0.830	0.364	0.30896	15.12004
1.343	0.451	0.43090	4.45564
1.831	0.527	0.51164	2.91316
2.612	0.825	0.59718	27.6138
3.174	1.074	0.64499	39.94443
3.809	1.189	0.70382	40.80534
4.736	1.323	0.83074	37.20727
5.591	1.457	1.02150	29.88992
6.641	1.754	1.38568	20.99868
7.275	2.224	1.68422	24.27067
7.886	2.665	2.03009	23.82372
8.374	3.039	2.34668	22.78095
8.789	3.375	2.64284	21.69360
9.351	3.864	3.08038	20.27987
9.668	4.075	3.34392	17.94045
10.034	4.343	3.66132	15.69590
10.596	4.151	4.17130	0.48916
11.011	3.595	4.56082	26.86580

Çizelge E.2. 60x20 mm² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
5.103	2.148	2.10865	1.83152
5.542	2.339	2.26240	3.27473
5.859	2.608	2.38344	8.61010
6.177	2.713	2.51523	7.28966
6.543	2.972	2.68195	9.75941
6.836	3.241	2.82868	12.72200
7.227	3.528	3.04533	13.68113
7.544	3.806	3.24044	14.85958
7.837	4.075	3.43786	15.63522
8.154	4.343	3.67151	15.46143
8.447	4.707	3.90742	16.98700
8.765	5.024	4.18674	16.66513
9.033	5.388	4.44218	17.55420
9.375	5.791	4.79646	17.17387
9.692	6.251	5.15490	17.53477
9.961	6.625	5.48303	17.23722
10.254	7.037	5.86675	16.62990
10.547	7.459	6.27919	15.81714
10.815	7.986	6.68273	16.31934
11.060	8.408	7.07450	15.85981
11.377	8.859	7.61511	14.04087
11.621	8.293	8.05810	2.83240
11.621	8.130	8.05810	0.88427
11.621	7.929	8.05810	1.62831
11.646	8.005	8.10485	1.24737
11.646	7.929	8.10485	2.21783
11.670	8.101	8.14996	0.60443
11.670	8.044	8.14996	1.31732
11.670	7.967	8.14996	2.29654
11.670	7.938	8.14996	2.67026
11.694	7.938	8.19531	3.24155
11.719	7.967	8.24280	3.46184

Çizelge E.3. 60x30 mm² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
1.782	1.419	1.39625	1.60324
2.246	1.802	1.61807	10.20654
2.612	2.138	1.77001	17.21155
3.174	2.521	1.98173	21.39098
3.589	2.867	2.13348	25.58489
4.053	3.145	2.31030	26.54027
4.443	3.365	2.47224	26.53048
4.834	3.567	2.65270	25.63197
5.225	3.749	2.85608	23.81740
5.542	3.931	3.04061	22.65024
5.933	4.171	3.29535	20.99369
6.250	4.487	3.52563	21.42566
6.641	4.870	3.84073	21.13480
6.982	5.225	4.14459	20.67759
7.300	5.609	4.45283	20.61276
7.568	5.896	4.73130	19.75401
7.910	6.241	5.11128	18.10150
8.179	6.539	5.42915	16.97267
8.521	6.893	5.85658	15.03582
8.765	7.258	6.17674	14.89745
9.106	7.766	6.64403	14.44713
9.351	8.159	6.99299	14.29104
9.668	8.542	7.45922	12.67589
9.888	8.916	7.79145	12.61267
10.181	9.175	8.24328	10.15496
10.425	9.511	8.62624	9.30239
10.791	9.961	9.20885	7.55090
10.986	10.422	9.52170	8.63841
11.206	10.680	9.87535	7.53411
11.377	11.026	10.14996	7.94524
11.548	11.208	10.42361	6.99844
11.719	11.534	10.69567	7.26838
11.914	11.745	11.00306	6.31710

Çizelge E.4. 60x40 mm² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
1.03608	0.85176	0.76780	9.85680
1.38144	1.18519	1.05010	11.39836
1.72680	1.52162	1.33512	12.25716
2.07216	1.86107	1.62308	12.78787
2.41752	2.20352	1.91420	13.12974
2.76288	2.54897	2.20872	13.34843
3.10824	2.89743	2.50689	13.47876
3.45360	3.24890	2.80897	13.54081
3.79896	3.60337	3.11522	13.54687
4.14432	3.96084	3.42594	13.50476
4.48968	4.32133	3.74142	13.41967
4.83504	4.68482	4.06197	13.29505
5.18040	5.05131	4.38791	13.13326
5.52576	5.42081	4.71958	12.93590
5.87112	5.79332	5.05733	12.70402
6.21648	6.16883	5.40153	12.43831
6.56184	6.54734	5.75255	12.13916
6.90720	6.92887	6.11079	11.80676
7.25256	7.31339	6.47666	11.44114
7.59792	7.70093	6.85058	11.04220
7.94328	8.09147	7.23298	10.60974
8.28864	8.48501	7.62434	10.14350
8.63400	8.88156	8.02510	9.64312

Çizelge E.5. 60x50 mm² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
2.24608	2.08587	2.61588	25.4096
2.52684	2.37366	2.88780	21.6605
2.80760	2.66725	3.15174	18.1642
3.08836	2.96665	3.40866	14.8993
3.36912	3.27184	3.65955	11.8498
3.64988	3.58284	3.90539	9.0027
3.93064	3.89964	4.14718	6.3477
4.21140	4.22224	4.38588	3.8756
4.49216	4.55064	4.62248	1.5787
4.77292	4.88485	4.85797	0.5501
5.05368	5.22485	5.09333	2.5172
5.33444	5.57066	5.32954	4.3284
5.61520	5.92227	5.56758	5.9891
5.89596	6.27968	5.80843	7.5043
6.17672	6.64289	6.05308	8.8787
6.45748	7.01190	6.30252	10.1168
6.73824	7.38672	6.55771	11.2229
7.01900	7.76734	6.81965	12.2008

Çizelge E.6. 60x60 mm² dubleks paslanmaz çelik 6 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
2.99812	2.82458	3.28004	16.12490
3.29793	3.13264	3.52584	12.55180
3.59774	3.44545	3.76783	9.35686
3.89755	3.76300	4.00788	6.50758
4.19736	4.08530	4.24786	3.97922
4.49718	4.41235	4.48966	1.75212
4.79699	4.74414	4.73513	0.18978
5.09680	5.08068	4.98617	1.86002
5.39661	5.42196	5.24465	3.27020
5.69642	5.76799	5.51244	4.43048
5.99624	6.11877	5.79142	5.34990
6.29605	6.47429	6.08346	6.03662
6.59586	6.83456	6.39044	6.49808
6.89567	7.19957	6.71424	6.74112
7.19548	7.56933	7.05673	6.77212
7.49530	7.943841	7.41978	6.59701

EK F

Çizelge F.1. 60x10 mm² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
6.055	0.652	0.88946	36.42050
6.519	1.026	1.00058	2.47714
6.885	1.409	1.09805	22.06824
7.349	1.841	1.23433	32.95318
7.812	2.253	1.38474	38.53783
8.301	2.723	1.55958	42.72560
8.667	3.173	1.70139	46.37905
9.058	3.499	1.86343	46.74390
9.302	3.845	1.97014	48.76086
9.717	4.094	2.16166	47.19917

Çizelge F.2. 60x20 mm² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
11.353	7.344	5.26381	28.32497
11.768	7.622	5.75997	24.42959
12.158	7.814	6.23489	20.20870
12.598	8.034	6.77240	15.70321
12.988	8.168	7.24232	11.33293
13.428	8.427	7.75480	7.97665
13.818	8.609	8.18377	4.93926
14.233	8.753	8.60324	1.71093
14.575	8.907	8.91187	0.05477
15.015	9.041	9.24734	2.28228
15.381	9.156	9.46274	3.35016
15.747	9.213	9.60974	4.30631
16.113	9.261	9.67786	4.50130
16.528	9.070	9.64577	6.34813

Çizelge F.3. 60x30 mm² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneyssel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.562	1.141	1.66647	46.05400
0.928	1.256	1.93055	53.70650
1.709	1.390	2.25359	62.12920
2.222	1.390	2.34512	68.71370
2.759	1.438	2.38643	65.95490
3.369	1.726	2.41236	39.76620
3.735	1.975	2.43605	23.34480
4.321	2.512	2.51233	0.013310
4.834	3.068	2.63769	14.02546
5.176	3.451	2.75980	20.02875
5.493	3.902	2.90413	25.57324
5.786	4.247	3.06603	27.80701
6.055	4.573	3.23982	29.15320
6.323	4.899	3.43747	29.83312
6.592	5.235	3.66069	30.07277
6.812	5.609	3.86167	31.15217
7.129	6.059	4.17995	31.01248
7.324	6.385	4.39211	31.21202
7.544	6.797	4.64586	31.64827
7.764	7.181	4.91420	31.56656
7.935	7.478	5.13231	31.36786
8.081	7.756	5.32475	31.34665
8.252	8.207	5.55698	32.28964
8.398	8.427	5.76071	31.63982
8.594	9.003	6.04138	32.89588
8.789	9.281	6.32788	31.81896
8.936	9.741	6.54799	32.77901
9.106	10.153	6.80627	32.96293
9.229	10.498	6.99520	33.36636
9.448	10.700	7.33473	31.45110
9.570	11.284	7.52503	33.31235
9.839	11.390	7.94545	30.24182
10.034	11.505	8.24908	28.29999
10.205	11.697	8.51309	27.21983
10.376	12.099	8.77378	27.48340
10.718	12.272	9.28025	24.37866

Çizelge F.4. 60x40 mm² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneyisel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
1.99287	2.74390	3.30240	20.3542
2.21430	2.87120	3.40264	18.5091
2.43573	2.98853	3.48831	16.7233
2.65716	3.09991	3.56365	14.9596
2.87859	3.20914	3.63266	13.1974
3.10002	3.31973	3.69914	11.4289
3.32145	3.43493	3.76662	9.65637
3.54288	3.55772	3.83842	7.88985
3.76431	3.69083	3.91764	6.14508
3.98574	3.83671	4.00712	4.44150
4.20717	3.99755	4.10949	2.80032
4.42860	4.17526	4.22715	1.24270
4.65003	4.37152	4.36225	0.21186
4.87146	4.58770	4.51674	1.54671
5.09289	4.82494	4.69232	2.74882
5.31432	5.08411	4.89044	3.80921
5.53575	5.36579	5.11237	4.72289
5.75718	5.67032	5.35910	5.48854
5.97861	5.99776	5.63141	6.10800
6.20004	6.34791	5.92986	6.58562
6.42147	6.72031	6.25476	6.92754
6.64290	7.11423	6.60619	7.14113
6.86433	7.52866	6.98402	7.23433
7.08576	7.96236	7.38786	7.21522
7.30719	8.41379	7.81711	7.09165
7.52862	8.88116	8.27094	6.87091
7.75005	9.36240	8.74827	6.55954
7.97148	9.85521	9.24782	6.16319
8.19291	10.35699	9.76804	5.68650
8.41434	10.86489	10.30719	5.13305
8.63577	11.37578	10.86326	4.50534
8.85720	11.88628	11.43404	3.80471
9.07863	12.39274	12.01708	3.03134
9.30006	12.89125	12.60969	2.18416
9.52149	13.37762	13.20895	1.26084
9.74292	13.84742	13.81174	0.25767
9.96435	14.29591	14.41466	0.83061
10.18578	14.71814	15.01411	2.01092
10.40721	15.10885	15.60626	3.29216
10.62864	15.46254	16.18704	4.68549
10.85007	15.77344	16.75215	6.20479
11.07150	16.03550	17.29706	7.86727

Çizelge F.5. 60x50 mm² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	DeneySEL	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.1872	0.64068	1.26194	96.9667
0.3745	0.91670	1.55574	69.7114
0.5617	1.15615	1.81579	57.0539
0.749	1.36386	2.04544	49.9739
0.9362	1.54443	2.24797	45.5534
1.1235	1.70224	2.42652	42.5489
1.3107	1.84147	2.58415	40.3302
1.4980	1.96611	2.72377	38.5360
1.6852	2.07991	2.84823	36.9399
1.8725	2.18642	2.96023	35.3913
2.0597	2.28899	3.06237	33.7870
2.2470	2.39076	3.15717	32.0575
2.4342	2.49464	3.24701	30.1595
2.6215	2.60335	3.33416	28.0718
2.8087	2.71940	3.42080	25.7921
2.9960	2.84509	3.50898	23.3346
3.1832	2.98250	3.60066	20.7264
3.3705	3.13350	3.69769	18.0048
3.5577	3.29978	3.80179	15.2134
3.7450	3.48277	3.91458	12.3984
3.9322	3.68375	4.03760	9.6057
4.1195	3.90373	4.17223	6.8779
4.3067	4.14355	4.31977	4.2528
4.4940	4.40384	4.48143	1.7617
4.6812	4.68501	4.65826	0.5708
4.8685	4.98724	4.85125	2.7268
5.0557	5.31055	5.06124	4.6944
5.2430	5.65470	5.28900	6.4671
5.4302	6.01928	5.53517	8.0426
5.6175	6.40364	5.80027	9.4222
5.8047	6.80694	6.08473	10.6090
5.9920	7.22812	6.38886	11.6110
6.1792	7.66592	6.71287	12.4323
6.3665	8.11887	7.05686	13.0807
6.5537	8.58528	7.42081	13.5635
6.7410	9.06325	7.80460	13.8874
6.9282	9.55069	8.2080	14.0586
7.1155	10.04529	8.63066	14.0824
7.3027	10.54451	9.07214	13.9633
7.4900	11.04562	9.53187	13.7044
7.6772	11.54570	10.00920	13.3079
7.8645	12.04158	10.50334	12.7743
8.0517	12.52990	11.01340	12.1030
8.2390	13.00711	11.53839	11.2916
8.4262	13.46941	12.07721	10.3360
8.6135	13.91282	12.62863	9.2302
8.8007	14.33314	13.19134	7.9661
8.9880	14.72597	13.76391	6.5331
9.1752	15.08669	14.34478	4.9176
9.3625	15.41046	14.93232	3.1027

Çizelge F.6. 60x60 mm² dubleks paslanmaz çelik 9 mm desen çaplı sac.

Deformasyon derinliği (s)	Deneysel	Analiz	Mutlak % hata oranı
	Kuvvet (F)	Kuvvet (F)	
[mm]	[kN]	[kN]	
0.0000	0.78680	0.63980	18.6832
0.1877	0.98232	0.99049	0.8312
0.3755	1.15756	1.30220	12.4950
0.5632	1.31595	1.57851	19.9518
0.7510	1.46077	1.82290	24.7898
0.9387	1.59513	2.03872	27.8089
1.1265	1.72196	2.22923	29.4584
1.3142	1.84405	2.39756	30.0162
1.5020	1.96400	2.54676	29.6725
1.6897	2.08424	2.67974	28.5715
1.8775	2.20706	2.7993	26.8344
2.0652	2.33456	2.90818	24.5707
2.2530	2.46868	3.00893	21.8840
2.4407	2.61119	3.10404	18.8743
2.6285	2.76370	3.19588	15.6376
2.8162	2.92765	3.28671	12.2645
3.0040	3.10430	3.37868	8.83875
3.1917	3.29476	3.47383	5.43485
3.3795	3.49998	3.57408	2.11732
3.5672	3.72071	3.68126	1.0603
3.7550	3.95757	3.79707	4.0555
3.9427	4.21098	3.92310	6.8364
4.1305	4.48123	4.06085	9.3809
4.3182	4.76840	4.21168	11.6751
4.5060	5.07245	4.37688	13.7126
4.6937	5.39312	4.55758	15.4927
4.8815	5.73004	4.75484	17.0190
5.0692	6.08263	4.96960	18.2984
5.2570	6.45015	5.20266	19.3404
5.4447	6.83171	5.45476	20.1552
5.6325	7.22625	5.72650	20.7542
5.8202	7.63252	6.01836	21.1485
6.0080	8.04914	6.33073	21.3489
6.1957	8.47452	6.66387	21.3656
6.3835	8.90694	7.01798	21.2076
6.5712	9.34450	7.39308	20.8830
6.7590	9.78512	7.78912	20.3982
6.9467	10.22657	8.20598	19.7586
7.1345	10.66645	8.64322	18.9679
7.3222	11.10219	9.10069	18.0283
7.5100	11.53105	9.57766	16.9402
7.6977	11.95012	10.07367	15.7024
7.8855	12.35635	10.58794	14.3117
8.0732	12.74648	11.11967	12.7628
8.2610	13.11712	11.66789	11.0483
8.4487	13.46469	12.23157	9.1582
8.6365	13.78546	12.80953	7.0794
8.8242	14.07552	13.40052	4.7955
9.0120	14.33079	14.00314	2.2863
9.1997	14.54705	14.61590	0.4733
9.3875	14.71987	15.23720	3.5145

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Cengiz Görkem DENGİZ
Doğum Yeri ve Tarihi	: 02.11.1989 - Menemen
Adres	: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü SAMSUN
E-Posta	: gorkem.dengiz@omu.edu.tr
Lisans	: Pamukkale Üniversitesi, 2011
Mesleki Deneyim ve Ödüller	: Pamukkale Üniversitesi 2011 Yılı Mühendislik Fakültesi Üçüncüsü, Makina Mühendisliği Bölüm Birincisi, Ekonomik Enerji Danışmanlığı (2011), ISIGER (2012), GERMETAL (2012),

Yayın ve Patent Listesi :

- Dengiz C.G., Yıldızlı K., Altınordu B., 2013, Desenli saçların şekil alma kabiliyetlerinin araştırılması, Makine İmalat Teknolojileri Kongresi, 06-07 Aralık, Bursa
- Dengiz C.G., Yıldızlı K., Altınordu B., Mart 2014, Desenli saçların şekil alma kabiliyetlerinin araştırılması, Mühendis ve Makina, Sayı: 650

