



**TAM OTOMASYONLU ERİCHSEN ŞİŞİRME TESTİ DONANIMININ
TASARIMI, İMALATI VE FARKLI KOŞULLAR İÇİN DENENMESİ**

Yılmaz ÇAKIŞ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Yılmaz ÇAKIŞ

24/08/2022

TAM OTOMASYONLU ERİCHSEN ŞİŞİRME TESTİ DONANIMININ TASARIMI, İMALATI VE FARKLI KOŞULLAR İÇİN DENENMESİ

(Doktora Tezi)

Yılmaz ÇAKIŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2022

ÖZET

Bu çalışmada; tam otomasyonlu Erichsen şişirme donanımının tasarımı ve imalatı yapıp Erichsen testinde etkili olan parametreler deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde Al 1050 (%99,53 saf alüminyum), Al 5754 alüminyum, Ck75 (SAE 1074) ve DP600 çelik sac malzemeler tercih edilmiştir. Deneyler; tasarımı ve imalatı tez kapsamında gerçekleştirilen tam otomatik Erichsen donanımında; 5 mm/dak, 6,25 mm/dak ve 8 mm/dak farklı çekme hızlarında, ISO 20482 (TS EN ISO 20482) standardına uygun olarak 8 mm, 15 mm ve 20 mm küresel uçlu zımbalar ile yapılmıştır. Baskı plakası kuvveti ve zımba kuvveti 0,00 ve Erichsen Sabiti (ES) servomotor ve servoredüktör üzerinden 0,0000 hassasiyetinde ölçülmüştür. Deneylerde anlık yük, ortalama en büyük yük, numune genişliği, numune kesiti, zımba küre çapları, zımba hızlarının birbirleri ile ve Erichsen Sabiti ile ilişkileri elde edilmiş ve değerlendirilmiştir. Erichsen şişirme testlerinde; numune kesiti ve numune genişliğinin artmasıyla ve zımba çapının 1,5 katından sonra Erichsen Sabiti'nin artmaya başladığı, malzeme genişliği zımba çapına eşit olduğunda ise zımba yükünün düştüğü tespit edilmiştir. Tasarımı, imalatı ve ortaya konan deneysel bulguları itibarıyla gelecek bilimsel çalışmalar için 0,1 mm hassasiyette ve güvenilir Erichsen Sabiti değerlerini tespit edecek nitelikte bir donanım elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 91406
Anahtar Kelimeler : Erichsen şişirme testi, Erichsen Sabiti, Ortalama en büyük yük, zımba çapı, Zımba hızı
Sayfa Adedi : 266
Danışman : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

DESIGN, MANUFACTURING AND TESTING OF FULLY AUTOMATED ERICHSEN
CUPPING TEST EQUIPMENT FOR DIFFERENT CONDITIONS

(Ph. D. Thesis)

Yılmaz ÇAKIŞ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2022

ABSTRACT

In these study; the fully automated Erichsen cupping equipment was designed and manufactured and the effective parameters in the Erichsen test were experimentally investigated. Al 1050 (99.53% pure aluminum), Al 5754 aluminum, Ck75 (SAE 1074) and DP600 steel sheet materials were preferred in the experiments. The tests were carried out based on 8 mm, 15 mm and 20 mm ball point punches according to the ISO 20482 (TS EN ISO 20482) standard at the different drawing speeds (5 mm/min, 6.25 mm/min and 8 mm/min). Experiments were carried out on fully automatic Erichsen equipment, which was designed and manufactured within the scope of the thesis. The blank holder force and the punch force were measured at 0.00 and Erichsen Constant (ES) with an accuracy of 0.0000 over servomotor and servoreducer. In the experimental study, the relationships between instantaneous load, average maximum load, sample width, sample cross-section, punch sphere diameters, punch speeds with each other and with Erichsen Constant were obtained and evaluated. In the Erichsen cupping tests, it was determined that the Erichsen Constant began to increase with the increase of the sample cross section and sample width and after 1.5 times the punch diameter. It has been determined that the CK75 steel sheet material should not be less than 1.5 times the diameter of the punch and that the punch load decreased when the sample width was equal to the punch diameter. The test equipment has been successfully produced in the respect to the unique design, the precise manufacturing and the reliable test results for future scientific studies.

Science Code : 91406
Key Words : Erichsen cupping test, Erichsen Constant, Average maximum load,
Punch diameter, Punch speed
Page Number : 266
Supervisor : Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda yönlendirmeleriyle büyük katkılarını gördüğüm danışmanım Sayın Prof. Dr. Ahmet ÖZDEMİR'e teşekkür ederim. Tezin planlı takibi süresince yapılan Tez İzleme Komisyonu toplantılarında engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Ulvi ŞEKER ve Sayın Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ'ye minnettarım. Çekme deneylerinde yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Hakan GÜRÜN'e ve tez çalışmam boyunca manevi desteğini gördüğüm Sayın Prof. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Erichsen test cihazının mekanik ve elektronik donanımının imalatında makine, alet, teçhizat ile katkılarından dolayı ÖZ-ER CNC firması sahibi Sayın Özgür KABASAKAL ve ekibine, donanımın yazılımına katkılarından dolayı HM Otomasyon Firması sahibi Sayın Mahmut USLU'ya ve Hitit Üniversitesi Çorum Meslek Yüksekokulu Öğretim Görevlisi Sayın Hilmi Baki YANMAZ'a teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xvii
RESİMLERİN LİSTESİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Erichsen Şişirme Testinde, Seçilen Numune Malzemeler Açısından Yapılan Çalışmalar ve Deneysel Yaklaşımlar.....	6
2.2. Küresel Uçlu Zimba Çapına Göre Yapılan İlgili Çalışmalar ve Deneysel Yaklaşımlar.....	21
2.3. Yağlayıcı Kullanarak Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	22
2.4. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi	35
3. KAVRAMSAL BİLGİLER VE KURAMSAL TEMELLER.....	39
3.1. Klasik Kalıplama Yöntemi ile Çekme İşlemleri	41
3.2. Baskı Plakalı Çekme Kalıplama.....	42
3.3. Baskı Plakasız Çekme Kalıplama	45
3.4. Ters Çevirme ve Yeniden Derin Çekme	46
3.5. Hidromekanik Yolla Derin Çekme İşlemi	48
3.6. İlkel Parça Boyutlarının Belirlenmesi	49
3.7. Çekme İşleminin Parametreleri.....	49
3.7.1. Çekme derinliği.....	49

	Sayfa
3.7.2. Kalıp ve zımba kavis yarıçapları.....	51
3.7.3. Çekme hızı	53
3.7.4. Kalıp boşluğu	54
3.7.5. Çekme kuvveti	56
3.7.6. Baskı plakası kuvveti	56
3.8. Derin Çekme Kusurları	58
3.9. Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)	60
3.10. Erichsen Şişirme Testi.....	63
4. MATERYAL VE METOT	67
4.1. Erichsen Şişirme Test Donanımının Mekanik Tasarımı ve Üretimi.....	67
4.1.1. Bilgisayar destekli tasarım (CAD).....	71
4.2. Tasarım ve İmalat Aşamalarında Donanımda Yapılan Değişiklikler ve Nedenleri	72
4.2.1. Servoredüktörler.....	72
4.2.2. Plakalar.....	74
4.2.3. Yük hücresi	76
4.3. Kalıpların Profilleri	77
4.3.1. İlk tasarımda imalatı yapılan test kalıpları-zımbaları ve teknik özellikleri	77
4.3.2. Son tasarımda imalatı yapılan deney kalıpları-zımbaları ve teknik özellikleri	79
4.3.3. Bilyalı vidalı mil sayısı ve yerleşimi.....	81
4.3.4. Zımba bağlantısı.....	82
4.3.5. Yayların iptali.....	83
4.4. Test Donanımının Diğer Test Cihazlarından Farklılıkları	83
4.5. İmalat ve Montaj	84
4.6. Test Donanımının Teknik Özellikleri	90

	Sayfa
4.7. Elektronik Kontrol ve Veri Okuma Sistemi	92
4.8. Kuvvet Ölçümleri ve Yük Hücresinin Çalışması	93
4.9. Test Donanımının Kalibrasyonu	94
4.9.1. Zımba taşıyıcının ön kalibrasyon	95
4.9.2. Deformasyon zımbası grubunun Newton biriminden ön kalibrasyon işlemi.....	97
4.9.3. Zımbanın ilerleme oranının kalibrasyon işlemi	98
4.9.4. Baskı plakası ön kalibrasyonu.....	99
4.9.5. Nihai kalibrasyon	100
4.10. Baskı Plakasının Kalibrasyonu	104
4.11. Kalıp Plakası (Dişi Kalıp) Delik Kenarı Kavis Yarıçapının Kontrolü.....	107
4.12. Zımba Salgı Kontrolü.....	107
4.13. Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) ile Tasarım Doğrulama	109
4.14. Kritik Parçaların Bilgisayar Destekli Dayanım Analizi.....	110
4.15. Erichsen Şişirme Testleri İçin Zımba Hızlarının Belirlenmesi	112
4.16. Deneysel Çalışmalar.....	113
4.17. Deney Malzemesi Bilgileri ve Özellikleri.....	113
4.17.1. %99,53 saf alüminyum (Al 1050).....	113
4.18. Isıl İşlem Uygulanamayan Alüminyum Alaşımları	114
4.19. Deney Malzemesinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	115
4.20. Al 1050 (%99,53 saf alüminyum) Numune Malzemenin Çekme Deneyleri	115
4.21. Erichsen Şişirme Testi İçin Deneysel Çalışma Parametreleri.....	116
4.22. Numune Malzemenin Boyutları, Zımba Çaplarına Göre Adetleri.....	117
4.23. Erichsen Deneylerinde Sabit Alınan Parametreler.....	122
4.23.1. Kalıp deliği kenar kavis yarıçapı.....	122
4.23.2. Baskı plakası kuvveti	122
4.23.3. Baskı plakası yüzey pürüzlülüğü	122

	Sayfa
4.23.4. Yağlama sıvısı	122
4.24. Kayıt Altına Alınan ve Beyan Edilen Bilgiler ve Grafikler	123
4.24.1. Yük değişimi–Erichsen sabiti, ES, değerleri ve ilişkisi	123
4.24.2. Yük değişimi-numune genişlik değişimi değerleri ve ilişkisi.....	123
4.24.3. Erichsen sabiti–numune genişlik değişimi değerleri ve ilişkisi	123
4.24.4. Şekillendirme Sınır Diyagramı değerleri ve grafiği.....	123
4.25. İlave Deneyler	125
4.25.1. Deney malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	125
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	129
5.1. Al 1050 Sac Malzeme Çekme Deneyleri	129
5.2. Erichsen Testlerinin Sonuçları	132
5.2.1. Zımba çapı ve hızı değişimi için EBO yük-Erichsen sabiti değişimi	132
5.2.2. Zımba hızı ile ortalama en büyük yük değişim ilişkisinin incelenmesi	163
5.2.3. Zımba çapına ve zımba hızına bağlı gerilim değişiminin incelenmesi	164
5.2.4. Zımba çapı ve hızına göre EBO yük–numune genişliği ilişkisinin incelenmesi	166
5.2.5. Tekrarlanabilirlik değerlendirmesi.....	171
5.2.6. Zımba çaplarına göre OEB yük – Erichsen Sabiti ilişkisinin incelenmesi	171
5.2.7. Zımba çapı ve hızına göre ES ile numune genişliği arasındaki ilişkinin incelenmesi	173
5.2.8. Erichsen şişirme testinde numune kesitine bağlı olarak zımba hızı ile gerilme değişimindeki ilişkinin incelenmesi	177
5.2.9. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika alındığında OEB yük - Erichsen Sabiti ilişkisinin incelenmesi	178
5.2.10. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika için EBO yük – Numune genişliği ilişkisinin incelenmesi	181
5.2.11. Numune genişlik değişimi ile Erichsen Sabiti arasında oluşan ilişkinin incelenmesi	182

Sayfa

5.2.12. Ck75 numune malzemenin, zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika için numune genişlik değişimi - Erichsen sabiti (ES) ilişkisinin incelenmesi.....	183
5.2.13. DP600 çelik sac numune malzemeye yapılan Erichsen testi ve deneylerinin sonuçları.....	187
5.2.14. Al 5754 numune malzemeye yapılan deneyde zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika, parametrelerinde anlık yük değişimi - Erichsen Sabiti ilişkisi	188
5.2.15. Zımba çapı 20 mm ve zımba hızı 6,25 mm/dakika ile yapılan testte ortalama en büyük yük – numune genişlik değişimi ilişkisi.....	192
5.2.16. Zımba çapı 20 mm ve zımba hızı 6,25 mm/dakika ile uygulanan testte numune genişlik değişimi – Erichsen Sabiti, ES ilişkisinin incelenmesi	194
5.3. Şekillendirme Sınır Diyagramları, (SSD)	195
5.3.1. Al 1050 (%99,53) Şekillendirme Sınır Diyagramı ve deneylerinin sonuçları.....	196
5.3.2. Al 5754 Şekillendirme Sınır Diyagramı ve deneylerinin sonuçları	198
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	199
KAYNAKLAR	201
EKLER.....	211
ÖZGEÇMİŞ	266

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yükseklik ölçer ve DIC ile ölçülen yırtılmış şişme yüksekliği.....	11
Çizelge 2.2. Erichsen Şişirme testinde testinde numunelerin ölçüm sonuçları.....	11
Çizelge 2.3. Al 6061'in kimyasal bileşimi	18
Çizelge 2.4. Erichsen test numunelerinin kesitlerinde kubbe kalınlıklarındaki değişme.....	23
Çizelge 2.5. Her iki test için kullanılan numunelerin boyutları	32
Çizelge 2.6. Dört yapının Erichsen Sabiti	35
Çizelge 3.1. Sac kalınlığı ve zımba çapı yüzde oranına göre önerilen kalıp kavisi yarıçap değerleri.....	52
Çizelge 3.2. Sac malzeme kalınlığına göre kalıp kavisi yarıçapı için önerilen değerler.....	53
Çizelge 3.3. Çekme hızları	54
Çizelge 3.4. Sac kalınlığına göre çekme (kalıp) boşluğu değerleri.....	55
Çizelge 3.5. Erichsen şişirme testinde örneklerin ölçüm sonuçları.....	66
Çizelge 4.1. Şekil 4.1'deki donanımın elemanları	69
Çizelge 4.2. Zımba küre çaplarına göre dişi kalıp ve baskı plakası delik ölçüleri	79
Çizelge 4.3. Tam otomatik Erichsen şişirme test donanımının teknik özellikleri.....	92
Çizelge 4.4. Test donanımında kullanılan yük hücresi teknik özellikleri	94
Çizelge 4.5. Kg.f cinsinden zımba kuvveti ön kalibrasyonunda elde edilen veriler	96
Çizelge 4.6. Kalibrasyon aparatında kullanılan 6 adet Ø32x16x51 mm 4S sarı renkteki kalıp yayları, uygulanan kuvvet ve 'k' sabiti katalog değerleri .	101
Çizelge 4.7. Donanım gösterge ekranı ile bununla eş zamanlı bası miktarını gösteren komparatörden alınan değerler.....	103
Çizelge 4.8. Yay sıkışma miktarına göre dişi kalıp plakasında oluşan kuvvet değerleri.....	106
Çizelge 4.9. Ç1040 Çeliğin kimyasal ve fiziksel özellikleri	109
Çizelge 4.10. Ç4140 Çeliğin kimyasal ve fiziksel özellikleri	110

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.11. Ç1060 Çeliğin fiziksel ve kimyasal özellikleri	110
Çizelge 4.12. Zımba hızları için Standart sayılar tablosu.....	113
Çizelge 4.13. Deneysel çalışma parametreleri	116
Çizelge 4.14. Deney grup ve sayıları.....	121
Çizelge 4.15. Numune malzemelerle ilgili parametreler	125
Çizelge 4.16. DP600 çelik sac malzemenin kimyasal ve mekaniksel özellikleri.....	126
Çizelge 4.17. Al 5754 alüminyum malzemenin kimyasal ve mekaniksel bileşenleri	127
Çizelge 4.18. Ck75 Çelik sac malzemenin kimyasal bileşimi.....	127
Çizelge 4.19. Ck75 Çelik sac malzemenin mekaniksel özellikleri	127
Çizelge 5.1. Hadde yönlerine göre numunelerin çekme testi verileri	129
Çizelge 5.2. 8 mm zımba çapında elde edilen EBO yük-Erichsen Sabiti değerleri	133
Çizelge 5.3. 15 mm zımba çapında elde edilen EBO yük-Erichsen sabiti değerleri....	134
Çizelge 5.4. 20 mm zımba çapında elde edilen EBO yük-Erichsen sabiti değerleri....	135
Çizelge 5.5. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x4 mm olan deneylerden elde edilen veriler.....	136
Çizelge 5.6. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x8 mm olan deneylerden elde edilen veriler.....	137
Çizelge 5.7. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x16 mm olan deneylerde elde edilen veriler	138
Çizelge 5.8. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x7,5 mm olan deneylerde elde edilen veriler	139
Çizelge 5.9. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x15 mm olan deneylerde elde edilen veriler	140
Çizelge 5.10. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x30 mm olan deneylerde elde edilen veriler	141
Çizelge 5.11. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x10 mm olan deneylerde elde edilen veriler	142
Çizelge 5.12. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x20 mm olan deneylerde elde edilen veriler	143

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.13. Zimba çapı 20 mm, zimba hızı 5 mm/dakika, 90x40 mm olan deneylerde elde edilen veriler	144
Çizelge 5.14. Zimba çapı 8 mm, zimba hızı 6,25 mm/dakika, 90x4 mm olan deneylerde elde edilen veriler	145
Çizelge 5.15. Zimba çapı 8 mm, zimba hızı 6,25 mm/dakika, 90x8 mm olan deneylerde elde edilen veriler	146
Çizelge 5.16. Zimba çapı 8 mm, zimba hızı 6,25 mm/dakika, 90x16 mm deneylerde elde edilen veriler	147
Çizelge 5.17. Zimba çapı 15 mm, zimba hızı 6,25 mm/dakika, 90x7,5 mm olan deneylerde elde edilen veriler	148
Çizelge 5.18. Zimba çapı 15 mm, Zimba hızı 6,25 mm/dakika, 90x15 mm olan deneylerde elde edilen veriler	149
Çizelge 5.19. Zimba çapı 15 mm, Zimba hızı 6,25 mm/dakika, 90x30 mm olan deneylerde elde edilen veriler	150
Çizelge 5.20. Zimba çapı 20 mm, Zimba hızı 6,25 mm/dakika, 90x10 mm olan deneylerde elde edilen veriler	151
Çizelge 5.21. Zimba çapı 20 mm, Zimba hızı 6,25 mm/dakika, 90x20 mm deneylerde elde edilen veriler	152
Çizelge 5.22. Zimba çapı 20 mm, zimba hızı 6,25 mm/dakika, 90x40 mm olan deneylerde elde edilen veriler	153
Çizelge 5.23. Zimba çapı 8 mm, zimba hızı 8 mm/dakika, 90x4 mm deneylerde elde edilen veriler.....	154
Çizelge 5.24. Zimba çapı 8 mm, zimba hızı 8 mm/dakika, 90x8 mm olan deneylerde elde edilen veriler	155
Çizelge 5.25. Zimba çapı 8 mm, zimba hızı 8 mm/dakika, 90x16 mm deneylerde elde edilen veriler.....	156
Çizelge 5.26. Zimba çapı 15 mm, zimba hızı 8 mm/dakika, 90x7,5 mm deneylerde elde edilen veriler	157
Çizelge 5.27. Zimba çapı 15 mm, zimba hızı 8 mm/dakika, 90x15 mm deneylerde elde edilen veriler.....	158
Çizelge 5.28. Zimba çapı 15 mm, zimba hızı 8 mm/dakika, 90x30 mm deneylerde elde edilen veriler.....	159
Çizelge 5.29. Zimba çapı 20 mm, zimba hızı 8 mm/dakika, 90x10 mm olan deneylerde elde edilen veriler	160

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.30. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x20 mm olan deneylerde elde edilen veriler	161
Çizelge 5.31. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x40 mm olan deneylerde elde edilen veriler	162
Çizelge 5.32. Zımba çapına bağlı olarak zımba hızı ile ortalama en büyük yük ilişkisi verileri	163
Çizelge 5.33. Zımba çaplarına göre zımba hızına bağlı olarak numune kesiti ile gerilme değişimi verileri	165
Çizelge 5.34. Numunelerin kesit alan ölçüleri	166
Çizelge 5.35. Belirlenen hızlarda zımba çapı 8 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi verileri.....	167
Çizelge 5.36. Belirlenen hızlarda zımba çapı 15 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi verileri.....	168
Çizelge 5.37. Belirlenen hızlarda zımba çapı 20 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi verileri.....	169
Çizelge 5.38. 8 mm zımba çapına göre ortalama en büyük yük-Erichsen Sabiti ilişkisi verileri	171
Çizelge 5.39. 15 mm zımba çapına göre ortalama en büyük yük-Erichsen Sabiti ilişkisi verileri	172
Çizelge 5.40. 20 mm zımba çapına göre ortalama en büyük yük-Erichsen Sabiti ilişkisi	172
Çizelge 5.41. Zımba çapı 8 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune genişlik değişimi ve Erichsen Sabiti verileri.....	173
Çizelge 5.42. Zımba çapı 15 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune genişlik değişimi ile Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi	174
Çizelge 5.43. Zımba çapı 20 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune genişlik değişimi ile Erichsen Sabiti değişimi arasındaki ilişki	176
Çizelge 5.44. 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika zımba hızlarında kesit değerlerine bağlı olarak oluşan gerilme değerleri	177
Çizelge 5.45. 20 mm zımba çapında uygulanan Erichsen testlerinde elde edilen yük-Erichsen Sabiti değerleri	179

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.46. Zımba Çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika parametrelerinde yapılan deneyde EBO yük – Erichsen Sabiti verileri.....	180
Çizelge 5.47. 20 mm zımba çapında, 6,25 mm/dakika zımba hızında deney sonucu genişlik değişimine bağlı olarak Erichsen Sabiti verileri.....	182
Çizelge 5.48. Ck75 çelik sac malzemenin Erichsen testi ile elde edilen yük- Erichsen Sabiti verileri	184
Çizelge 5.49. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune genişliği 40 mm deneyde elde edilen anlık yük ve Erichsen Sabiti verileri	185
Çizelge 5.50. Al 5754 Erichsen Şişirme Testin de elde edilen veriler	189
Çizelge 5.51. Al 5754 numunenin Erichsen Testinde anlık yük ve Erichsen Sabiti verileri	189
Çizelge 5.52. Al 5754 numunenin Erichsen testinde anlık yük ve Erichsen Sabiti verileri	190
Çizelge 5.53. Al 5754 numunenin Erichsen testinde anlık yük ve Erichsen Sabiti verileri	191
Çizelge 5.54. 20 mm zımba çapında ve 6,25 mm/dakika hızda ortalama en büyük yük-numune genişlik değişimi verileri	193
Çizelge 5.55. Ortalama en büyük yük-numune genişlik değişimi verileri	194
Çizelge 5.56. Al 1050 numunelerinin ŞSD ve büyük-küçük birim uzama değerleri (ϵ_1 ve ϵ_2 verileri).....	197
Çizelge 5.57. Al5754 numunelerinin ŞSD ve büyük-küçük birim uzama değerleri (ϵ_1 ve ϵ_2 verileri)	198

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Erichsen şişirme testi AA6082-O sac numunenin test edilmesi	2
Şekil 2.1. Erichsen deney düzeneği.....	8
Şekil 2.2. Sac kalınlığı ve Erichsen Sabiti değişimi.....	13
Şekil 2.3. Sıcaklık ve Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	13
Şekil 2.4. EBSD analizi.....	14
Şekil 2.5. Erichsen şişirme testinde meydana gelen yük-yer değiştirme eğrileri; a) Saf magnezyum, b) Magnezyum alaşımları.....	16
Şekil 2.6. Oda sıcaklığında yapılan Erichsen testi tipik yük ve yer değiştirme eğrileri	17
Şekil 2.7. Erichsen testi yapılan numunenin kubbe serbest yüzeyi ve kesit değişimi..	22
Şekil 2.8. Düzlem dışı a) Erichsen b) ve silindirik derin çekme deneylerinin c) deneysel kurulumu.....	25
Şekil 2.9. Erichsen şişirme testine benzer soğuk şekillendirme Ni-Ti şekil hafızalı alaşım levha: a) deneyin şematik kurulumu b) FEA için rotasyon simetrik modeli.....	29
Şekil 2.10. Deney ve FEA ile elde edilen Ni-Ti şekil hafızalı alaşımın kalıp geometrisine kıyasla profili.....	29
Şekil 2.11. ASTM E8 Standardına göre çekme testi numunesi boyutları.....	31
Şekil 2.12. Erichsen şişirme testinde 3D DIC ile belirlenen ve ES=60 mm yüzey gerinim haritasının temsili resmi.....	33
Şekil 2.13. ES artışıyla kubbenin deneysel kesit profillerinin değişmesi	33
Şekil 2.14. a) Büyük boyutlu b) Küçük boyutlu Erichsen testinin zımba ve kalıbı	34
Şekil 2.15. Test parçasındaki yırtılma yeri.....	36
Şekil 3.1. Sığ çekme	40
Şekil 3.2. Derin çekme ve analizi.....	40
Şekil 3.3. a) Silindirik çanak şekilli bir parçanın çekimi	41
Şekil 3.4. Çekme işleminin oluşumu, a) Şematik, b) Perspektif.....	42
Şekil 3.5. Derin çekme sırasında oluşan katlanmış dikdörtgenler ve üçgenler.....	43

Şekil	Sayfa
Şekil 3.6. Derin çekme sırasında ilkel malzemenin gerilme durumu.....	44
Şekil 3.7. Baskı plakalı çekme işleminin aşamaları	45
Şekil 3.8. Baskı plakasız çekme kalıbı].....	45
Şekil 3.9. Ters yeniden çekilen iş parçası, a) Çekme öncesinde, b) çekme sırasında, c) Ters yeniden çekmeden sonra	47
Şekil 3.10. Yeniden derin çekme	47
Şekil 3.11. Hidromekanik derin çekme işlem aşamaları	48
Şekil 3.12. İlkel malzeme yarıçapı R_0 ve kalınlığı t_0 olan bir diskin silindirik olarak h derinliğinde çekilmiş bir kap hali.....	49
Şekil 3.13. Derin çekilmiş bir kabın ileriye doğru yeniden çekilmesi	50
Şekil 3.14. Zimba ucu kavisi ve dişi kalıp kavisi.....	51
Şekil 3.15. Çekme boşluğu, C	54
Şekil 3.16. Baskı plakası kuvveti ve derinlik ilişkisinin şematik gösterimi.....	57
Şekil 3.17. Derin çekilen sacda kalınlık değişimi	58
Şekil 3.18. Derin çekmede genel hatalar a) Flanş alanında kırışıklık, b) Çekilen kabın duvarında kırışıklık, c) Yırtılma, d) Kulaklanma, e) Yüzey çizikleri	60
Şekil 3.19. Bir sac tabakanın üzerine markalanan dairelerin görünümü.....	61
Şekil 3.20. Şekillendirme sınır diyagramı grafiği	61
Şekil 3.21. Sac numunede uzama miktarlarının ŞSD üzerinde temsil bölgeleri.....	62
Şekil 3.22. Erichsen şişirme testi ve elemanlar	65
Şekil 4.1. Tam otomatik Erichsen şişirme test donanımının CAD ortamında yapılan ilk modeli	68
Şekil 4.2. Otomatik Erichsen Şişirme Test Donanımının CAD ortamında hazırlanan üç boyutlu nihai modeli.....	70
Şekil 4.3. Erichsen Test donanımının şişirme mekanik kısmının ISO 20482'ye göre hazırlanan kesit görüntüsü	74
Şekil 4.4. İmalatı yapılan baskı plakası teknik resmi	77
Şekil 4.5. İlk tasarımda donanıma yerleştirilen yay grubu.....	83
Şekil 4.6. Mavin marka S tipi yük hücresi	94

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Ön kalibrasyonda ağırlık-yük değişimi	97
Şekil 4.8. Yay esaslı kalibrasyon aparatı; a) Teknik resmi, b) CAD görünümü	100
Şekil 4.9. 12 adet ölçüm 6 adet yay için zımbaya uygulanan kuvvet-yay kapanma eğrisi	102
Şekil 4.10. Yay kapanma miktarı ile dişi kalıp plakasına uygulanan kuvvet ilişkisi	106
Şekil 4.11. Ç 4140 malzemenin Solidworks malzeme listesindeki mekanik özellikleri	109
Şekil 4.12. Zimba plakası gerilme analizi ekran görüntüsü	111
Şekil 4.13. Baskı plakası gerilme analizi ekran görüntüsü	111
Şekil 4.14. 8 mm çaplı küresel uçlu zimba gerilme analizi ekran görüntüsü	112
Şekil 4.15. ISO 6892 standardının, çekme testi numune ölçüleri	115
Şekil 4.16. Teste girmemiş numunelerin bilgisayar destekli ızgara çizimi	117
Şekil 4.17. a) Küre çapı 8 mm olan zimba ile Erichsen şişirme testi uygulanacak numunelerin boyut değişimi, b) Çapı 8 mm olan küresel uçlu zimba	118
Şekil 4.18. a) Küre çapı 15 mm olan zimba ile Erichsen şişirme testi uygulanacak numunelerin boyut değişimi, b) Çapı 15 mm olan küresel uçlu zimba	119
Şekil 4.19. a) Küre çapı 20 mm olan zimba ile Erichsen şişirme testi uygulanacak numunelerin boyut değişimi, b) Çapı 20 mm olan küresel uçlu zimba	120
Şekil 5.1. Hadde doğrultuları farklı numune malzemenin karşılaştırmalı çekme testi grafiği	130
Şekil 5.2. Hadde yönünün açısal değişimine göre en büyük ortalama çekme yükü değerleri	131
Şekil 5.3. Hadde yönüne 90 ⁰ açıda numunenin çıkartılması sonunda en büyük ortalama çekme yükü ve açısal değişim ilişkisi	132
Şekil 5.4. Zimba çapı 8 mm, zimba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x4 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi	136
Şekil 5.5. Zimba çapı 8 mm, zimba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x8 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi	137
Şekil 5.6. Zimba çapı 8 mm, zimba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x16 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi	138
Şekil 5.7. Zimba çapı 15 mm, zimba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x7,5 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi	139

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x15 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	140
Şekil 5.9. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x30 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	141
Şekil 5.10. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x10 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	142
Şekil 5.11. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x20 mm olan testleri yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	143
Şekil 5.12. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x40 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	144
Şekil 5.13. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x4 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	145
Şekil 5.14. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x8 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	146
Şekil 5.15. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x16 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	147
Şekil 5.16. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x7,5 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	148
Şekil 5.17. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x15 mm olan testlerin yük- Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	149
Şekil 5.18. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x30 mm olan testlerin yük- Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	150
Şekil 5.19. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x10 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	151
Şekil 5.20. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x20 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	152
Şekil 5.21. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x40 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	153
Şekil 5.22. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x4 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	154
Şekil 5.23. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x8 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	155
Şekil 5.24. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x16 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	156

Şekil	Sayfa
Şekil 5.25. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x7,5 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	157
Şekil 5.26. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x15 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	158
Şekil 5.27. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x30 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	159
Şekil 5.28. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x10 mm olan testlerin yük - Erichsen sabiti değişimi ilişkisi	160
Şekil 5.29. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x20 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	161
Şekil 5.30. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x40 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi.....	162
Şekil 5.31. Zımba çapına bağlı olarak zımba hızı ile ortalama en büyük yük ilişkisi....	164
Şekil 5.32. Zımba çaplarına ve zımba hızı değişimine göre gerilme değişimi ilişkisi...	165
Şekil 5.33. 8 mm küre çaplı zımba ile belirli hızlarda ve belirli genişlikteki numuneler ile yapılan Erichsen şişirme testinde elde edilen değerlerin grafikleri	167
Şekil 5.34. Belirlenen hızlarda zımba çapı 15 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi	169
Şekil 5.35. Belirlenen hızlarda zımba çapı 20 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi	170
Şekil 5.36. 8 mm zımba çapında ve belirli zımba hızlarında yapılan deneyde numune genişliği ile Erichsen Sabiti ilişkisi	174
Şekil 5.37. 15 mm zımba çapında ve belirli zımba hızlarında yapılan deneyde numune genişliği ile Erichsen Sabiti ilişkisi.....	175
Şekil 5.38. 20 mm zımba çapında ve belirli zımba hızlarında yapılan deneyde numune genişliği ile Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi	177
Şekil 5.39. Zımba hızı ile gerilme arasındaki ilişki grafiği.....	178
Şekil 5.40. 20 mm zımba çapında 6,25 mm/dakika zımba hızında deney sonucu numunelerin genişlik değişimine bağlı olarak ortalama en büyük yük değişimi ile Erichsen Sabiti (ES) değişimi ilişkisi.....	181
Şekil 5.41. Numune genişliği ile ortalama en büyük yük ilişkisi.....	181
Şekil 5.42. Numune genişlikleri ile Erichsen Sabiti arasındaki ilişki	182
Şekil 5.43. Numune genişlik değişimi ile Erichsen Sabiti arasındaki ilişki.....	185

Şekil	Sayfa
Şekil 5.44. Numune genişliği 40 mm Ck75 çelik sac numunenin Erichsen Sabiti ile anlık yük değişimi ilişkisi	186
Şekil 5.45. Al 5754 numunenin zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune genişliği 10 mm parametrelerinde anlık yük - Erichsen Sabiti ilişkisi	190
Şekil 5.46. Al 5754 numunenin zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune genişliği 20 mm parametrelerinde anlık yük - Erichsen Sabiti ilişkisi	191
Şekil 5.47. Al 5754 numunenin zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune genişliği 40 mm parametrelerinde anlık yük - Erichsen Sabiti ilişkisi	192
Şekil 5.48. Al 5754 numunenin zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika parametrelerinde numune genişliği ile ortalama en büyük yük arasındaki ilişki.....	193
Şekil 5.49. Al 5754 numunenin Zımba çapı 20 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dakika parametrelerinde numune genişliği ile Erichsen Sabiti arasındaki ilişki grafiği	194
Şekil 5.50. Al1050 numune malzemenin ŞSD ve büyük - küçük birim uzama değerleri ve Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD).....	197
Şekil 5.51. Al 5754 numune malzemenin ŞSD ve büyük - küçük birim uzama değerleri ve Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)	198

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Mekanik Erichsen şişirme test makinesi	6
Resim 2.2. a), b) Erichsen şişirme testinden sonra kaynak örneği	20
Resim 2.3. a) Çekme testi makinesi, b) Zımba kuvvetine karşı zımba hareketi grafiği, c) Ayna projeksiyonundan elde edilen deforme olmuş bölge görüntüsü...	30
Resim 2.4. Erichsen şişirme testine tabi tutulan dikdörtgen numuneler	32
Resim 2.5. Şişme sırasında çanak görüntüleri ve yükseklikleri [mm]	36
Resim 4.1. Servoredüktör çeşitleri	72
Resim 4.2. Zımbayı tahrik eden servomotor/servoredüktörü konumlandıran 1 nolu plaka	75
Resim 4.3. Baskı plakasını tahrik eden servomotor/servoredüktörü taşıyan 5 nolu plaka	76
Resim 4.4. “S” tipi yük hücresi	77
Resim 4.5. Dişi kalıp ve baskı plakası resimleri	78
Resim 4.6. Son tasarımda imal edilen Baskı plakası grubu. a) Baskı plakası alt parçası, b) Baskı plakası üst parçası.....	79
Resim 4.7. Alt ve üst yüzeyleri R285 mm radyüslü baskı plakası yatağı ve baskı plakası	80
Resim 4.8. a) $r=0,2$ mm uç kavis yarıçaplı kesici takım, b) 0,2 mm/devir ilerleme ile işlenmiş kalıp plakası yüzeyi	81
Resim 4.9. a) Baskı plakasını, b) Zımbayı tahrik eden bilyalı vida somun çifti	82
Resim 4.10. Zımba bağlantısı.....	82
Resim 4.11. Mekanik sistemi üstünde taşıyan ve kumanda kısmının yerleştirildiği kasa.....	85
Resim 4.12. Plakaların üretimi	85
Resim 4.13. Servomotor, servoredüktör ve sinyal kabloları (hazır)	85
Resim 4.14. Servomotor ve sinyal kabloları (hazır).....	85
Resim 4.15. Servoredüktör ve sinyal kabloları (hazır).....	85

Resim	Sayfa
Resim 4.16. Plakalar ve burçların imalatı	86
Resim 4.17. Test donanımının montajı-1	86
Resim 4.18. Test donanımının montajı-2.....	86
Resim 4.19. PLC Kumanda grubunun montajı	86
Resim 4.20. Baskı plakasının montajı.....	86
Resim 4.21. PLC Dijital ekranın montajı.....	86
Resim 4.22. Zimba plakası ünitesinin montajı.....	87
Resim 4.23. Yük hücresinin montajı	87
Resim 4.24. Hareketli kalıp plakası ve bilyeli vidalı milinin montajı.....	87
Resim 4.25. Çaplarına göre modüler bağlanabilen küresel uçlu zimbalar	88
Resim 4.26. Baskı plakası ve zimba kurs boylarını sınırlayan anahtarların montajı	89
Resim 4.27. Test donanımında a) Şişirilen ilk numune, b) Dijital ekran	90
Resim 4.28. Tam otomatik Erichsen şişirme test donanımı ve elemanları	91
Resim 4.29. Deney bitiminde elde edilen değerler	93
Resim 4.30. Yük hücresine zımbanın bağlanmış hali	93
Resim 4.31. Kalibrasyon aparatı yükleme kefeleri	95
Resim 4.32. Ağırlıklar (Toplam 100 kg.f)	95
Resim 4.33. Aparatın test donanımına montajı ve PLC kumandası ekranı değerleri	96
Resim 4.34. Toplamı 980,66 N olan ağırlıklar ve taşıyıcı kafes	98
Resim 4.35. Sütun üzerinde 20 mm mesafe	98
Resim 4.36. 20 mm/dakika zimba hareketinin 60 saniye içinde a) Başlama, b) Bitiş anı.....	99
Resim 4.37. 40 mm/dakika zimba hareketinin 60 saniye içinde a) Başlama, b) Bitiş anı.....	99
Resim 4.38. Servomotor tahrikli tahrik edilen zımbanın 3,94 mm'lik hareketi.....	101
Resim 4.39. Komparatörün ve PLC kumandanın okunan göstergeleri	103
Resim 4.40. Servomotorun ürettiği döndürme momentine göre oluşan değerler	105

Resim	Sayfa
Resim 4.41. Servomotorun ürettiği döndürme momentine göre oluşan değer.....	105
Resim 4.42. Kesici uç profili $r = 0,75$ mm olarak özel üretilmiş kesici kenarlı şablon ..	107
Resim 4.43. Kalıp deliği radyüsünün kesici şablonla kontrolü.....	107
Resim 4.44. 8 mm küre çaplı zımba salgı kontrolü.....	108
Resim 4.45. 15 mm küre çaplı zımba salgı kontrolü.....	108
Resim 4.46. 20 mm küre çaplı zımba salgı kontrolü.....	108
Resim 4.47. Hadde yönüne göre farklı açılarda hazırlanan numuneler	116
Resim 4.48. Teste girmemiş numunelerin fotoğrafı.....	117
Resim 4.49. Çapı 8 mm olan şekillendirme zımbasına ait kalıp plakası ve baskı plakası	119
Resim 4.50. Baskı plakası ve Kalıp plakası	120
Resim 4.51. Kalıp plakası ve baskı plakası.....	121
Resim 4.52. Optik mikroskop aracılığı ile deformasyona uğramış desenlerin görüntüsü.....	125
Resim 5.1. Numune malzemenin tespit edilen hadde yönü	129
Resim 5.2. Zımba küre çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve 90x6x0,5 mm boyutlu numunenin testi esnasında 3. deneyin video kaydı ekran görüntüsü	170
Resim 5.3. Ck75 çelik sac numunelerden kalıp deliği içine akan örnekleri	183
Resim 5.4. 35 mm genişlik ve 0,5 mm kalınlıktaki Ck75 çelik sac numune	183
Resim 5.5. Genişliği 40 mm olan Ck75 numune malzemeye Erichsen testi uygulanmış durumu.....	184
Resim 5.6. Kalınlık 1 mm, genişlik 35 mm DP 600 sac numunelerden kalıp deliği içine akan örnekler	187
Resim 5.7. Genişlik ölçüsü 48 mm olan DP600 sac numunenin Erichsen testi.....	188
Resim 5.8. Al 1050 numunelerin yüzey gridleri ve Erichsen Şişirme Testinin uygulanmış durumu.....	195
Resim 5.9. Al5754 numunelerin yüzey gridleri ve Erichsen Şişirme Testinin uygulanmış durumu.....	196

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_0	Çekme işleminden önceki kesit alanı, mm^2
A_2	Çekme işleminden sonraki kesit alanı, mm^2
A_g	Antigen
Al	Alüminyum
C	Zımba- Kalıp Arasındaki Boşluk, mm
c	Sabit sayı, 2-3 arası
Ca	Kalsiyum
D	Sacın Çekilmeden Önceki Çapı, mm
d_1	İlk Çekmede Zımba Çapı, mm
d_2	İkinci Çekmede Zımba Çapı, mm
D_p	Zımba Çapı, mm
e	Birim şekil değiştirme, mm
E	Elastikiyet modülü, N/mm^2
$\dot{e}$	Mühendislik deformasyon hızı, mm/s
e_1	En büyük mühendislik uzaması değeri, mm
e_2	En küçük mühendislik uzaması değeri, mm
F	Çekme Kuvveti, kgf
F_{bp}	Sac malzemeye uygulanan BPK, N
F_h	Baskı Plakası Kuvveti, kgf
F_v	Tek çekme işleminde çekme kuvveti, N
G	Güç, Watt
G	Kayma elastisite modülü
h	Çekme derinliği, mm
K	Mukavemet katsayısı, N/mm^2
K	Uzama sertleşme katsayısı
l	Malzemenin sonraki boyu, mm
l_0	Malzemenin önceki boyu, mm

Simgeler**Açıklamalar**

Li	Lityum)
L_n	Çekme işleminde uzunluklar, mm
m	Deformasyon hızı duyarlılığı üssü
Mg	Magnezyum
mm²	milimetrekare
Mn	Manganez
n	Uzama sertleşme üsteli
p	Baskı plakası basıncı, N/mm ²
Pb	Kurşun
r	Anizotropi katsayısı
R_d	Kalıp Köşe Yarıçapı, mm
R_p	Zımba Köşe Yarıçapı, mm
Sn	Kalay
t	Sac kalınlığı, mm
t₁	Zaman, s
v	Çekme Hızı, mm/sn
Y	Yittrium
Zn	Çinko
α	Bükme açısı (°)
β	Çekme oranı
β₁	Birinci çekmede çekme oranı
β₂	İkinci çekmede çekme oranı
β₃	Üçüncü çekmede çekme oranı
β_{actual}	Gerçek çekme oranı (ilk çekme)
β_n	n sayıda çekmede çekme oranı
γ	Kaymada şekil değiştirme
ΔL	Toplam uzama değişimi, mm
ε	Gerçek deformasyon hızı, mm/s
ε	Yüzde uzama, gerçek birim şekil değiştirme.
ε_{max}	En büyük gerçek uzama, mm
ε_{min}	En küçük gerçek uzama, mm
η	Akışkan viskozitesi, Pas

Simgeler**Açıklamalar**

σ	Normal Gerilme, N/mm ²
σ_d	Baskı Plakası Sıkıştırma Gerilimi, N/mm ²
σ_g	Gerçek gerilme, N/mm ²
σ_m	Çekme gerilmesi, N/mm ²
σ_{max}	Çekme gerilmesi, N/mm ²
σ_r	Radyal Gerilim, N/mm ²
σ_t	Teğetsel Sıkıştırma Gerilimi, N/mm ²
σ_u	Kopma gerilmesi, N/mm ²
σ_y	Akma gerilmesi, N/mm ²
τ_{kr}	Kritik kayma gerilmesi, N/mm ²
τ_{max}	Kayma gerilmesi, N/mm ²
τ_r	Kayma yönündeki gerilme bileşeni, N/mm ²

Kısaltmalar**Açıklamalar**

%SSD	Yüzde Soğuk Şekil Değiştirme
Δ	LN-IE arasındaki oran
APD	Aşırı Plastik Deformasyon
BPK	Baskı Plakası Kuvveti
CPFEM	Kristal Plastisite Sonlu Eleman Yöntemi
DIC	Dijital Görüntü Korelasyonu Tekniği
DP	Çift Fazlı
EBSD	Elektron Geri Saçılma Difraksiyonu Tekniği
ECT	Erichsen Şişirme Testi
ES	Erichsen Sabiti
FEM	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FLC	Şekillendirilebilme Sınır Eğrileri
HET	Delik genişletme testi
HFQ	Sıcak Şekillendirme Ve Su Verme
HMK	Hacim Merkezli Kübik Kristal yapı
IE	Erichsen İndeksi
KAM	Çekirdek Ortalama Hatalı Dizimi

Kısaltmalar**Açıklamalar**

LDH	Sınırlı Şişme Yüksekliği
LN	Bölgesel Boyunlanma
LN-ES	Boyun atma anındaki Erichsen Sabiti
MPa	Mega Paskal
OEBY	Ortalama En Büyük Yük
PLC	Programlanabilir Mantık Kontrolü
PS	Zımba Darbeleri
PTFE	Polite Tra Floro Etilen, Teflon
RT	Oda Sıcaklığı
SÇO	Sınır Çekme Oranı
SHT	Isıtılmış Tabaka Çözelti Isıl İşlemi
SPH	Sıkı Paket Hekzagonal Kristal yapı
ŞSD	Şekillendirme Sınır Diyagramı
Tyk	Malzemenin Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı, °C
YMK	Yüzey Merkezli Kübik Kristal yapı
ϵ_{xx} ve ϵ_{yy}	Düzlemsel Şekil Değiştirme Bileşenleri

1. GİRİŞ

Üretimde pratik ve ekonomik oluşun ön plana çıktığı imalat teknolojisinde; sac metallere üretilen parçalar, bunlara göre daha maliyetli olan talaşlı imalat, dövme ve döküm yoluyla üretilen parçalara tercih edilmektedir. Kalıplamayla üretilen parçaların ucuz olması, estetik olması ve kalıplama teknik ve estetik parametrelerinin kolay kontrol edilebilir olması bu tercihin sebepleri arasındadır. Günümüzde metallerin önemli bir kısmı modern haddehanelerde, düşük maliyetle, yüksek kalitede soğuk ve/veya sıcak haddeleme yoluyla sac malzeme olarak üretilmektedir. Saclar daha sonra havacılık endüstrisinde uçaklarda, İHA ve SİHA’larda, otomobillerde, ev eşyalarında, gıda sektöründe ve diğer birçok alanda kullanılmak için uygun ara ürün veya nihai ürün haline getirilmektedir. Sac metal malzemeden üretilen parçaların önemli özellikleri, sertliği yanında, ağırlığına nazaran yüksek mukavemete, elastiklik modülüne ve akma mukavemetine sahip olmasıdır. Bu nedenle başta otomotiv sanayi olmak üzere gemi havacılık endüstrilerini mutfak eşyaları üreticileri ile birlikte, makine parçaları imalatçıları ve sanayinin birçok dalını yakından ilgilendiren sac metal malzemelerin şekillendirilmesinin önemi, her geçen gün daha fazla artmakta ve sac metal ürün şekillendirme üzerine araştırmalar sürekli artan ivme kazanmaktadır. Yapılan araştırma, inceleme ve uygulamaların, karşılaşılan güçlüklerle odak olduğu görülmektedir. Kalıplamada seçilen pres operasyonları için istenen karakteristik özelliklere sahip sac malzemeler seçilsede, şekillendirme esnasında muhtemel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların en önemlisi, sac malzemenin mekanik özelliklerindeki düzensizliklerdir. Sac metal malzemelerin kalıplamasında, karakteristik yapılarına ve sünekliliğine bağlı olarak biçimlendirilebilme kabiliyetlerinin önceden bilinmesi tasarım ve imalat açısından önem arz etmektedir. Bu amaçla sac malzemeler çeşitli testlere tabi tutulmaktadır. Bu testlerden başlıcaları şunlardır:

ISO 6892-1 ve ASTM E 8 standartlarına göre gerçekleştirilen çekme testleri,

ISO 6506-1 (Brinell yöntemi), ISO 6507-1 (Vickers yöntemi),

ISO 6508-1 (Rockwell yöntemi) kullanılarak yapılan sertlik ölçme testleri,

ISO 148-1 standardında ve ASTM E 23’te tanımlandığı ve belirtildiği gibi yapılan Charpy darbe testi,

anını tespit ederek zımba ilerlemesini durduran niteliklerde bir bütünleşik donanım tasarımı, imalatı, montajı hedefe uygun olarak imal edilmiştir.

Çalışmada tasarım açısından donanımın mevcutlarından önemli farkı; şişirme küresinin ve baskı plakasının tahrik elemanı olarak bilyalı vida somun çiftlerinin kullanılmış olmasıdır. Diğer fark ise tam otomatik çalışan bir prototip test donanımı imalatıdır. Mekanik tahrik olan hareketli parçaların elektrik enerjisiyle sürülmesinde servomotorların ve kumanda devrelerinin yerleştirilmesi önemli bir fark olarak planlanmıştır. Sac metal numunelerin yırtılma başlangıcını tespit etmek ve küresel uçlu zımbanın o anda ilerlemesini durdurmak için yük hücresi ile anlık kuvvet değişimi izlenmiştir. Cihaz, numunenin yırtılma başlangıcı öncesindeki ani yük azalmasını müteakip zımbanın durmasını sağlayacak donanım–yazılım imkânlarıyla donatılmıştır.

Donanımın; mevcut hali ve özellikleri itibarıyla gelecekteki akademik ve ticari testlere cevap verecek ve DIN EN ISO 20482 standardının tüm şartlarına uygun deneylerin yapılmasına imkân verecek niteliklerde üretildiği, farklı koşullar altında yapılan testlerle ispat edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Üretimde kalite ve güvence, son yıllarda daha çok önem kazanmaya başlamıştır. Yaklaşık yüz yıldır sac metal endüstrisinde sac malzemenin kalite seviyesini ve karakteristik özelliklerini belirlemede bir prosedür olarak Abraham M. Erichsen tarafından geliştirilen numune sac malzemeler için şişirme test yöntemi yaygınlaşmıştır. Şişirme test yöntemi Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO) tarafından kabul edilmiş bir testtir ve sac metal tasarım ve imalatında dünya çapında geçerli olmuştur. Erichsen 1932 yılında derin çekme şişirme testi için referans bir donanım geliştirmiştir, numune sac levhayı bir çukurluğa doğru iterek şekillendirmek için küresel bir zımbayı sabit bir hızda ilerletmiştir. Numune sacın şişme derinliği ölçülerek şekillendirilebilirlik kalitesi açısından büyük önem taşıyan bir ölçüt elde edilmiştir. Yıllar içerisinde sac metal özelliklerini belirleyen başka test yöntemleri de bulunsa da hızlı, tekrarlanabilir ve güvenilir malzeme karakterizasyonu açısından Erichsen testi önemini korumaya devam etmiştir.

Otomotiv, savunma ve uzay sanayilerince etkin olarak tercih edilen sac metal parçaların pratik ve kalıcı derin çekilebilirliklerinin standart göstergesi olarak kabul edilen Erichsen Sabitinin tespiti deneysel olarak yapılabilmektedir [5, 6]. Mekanik kumandalı, hidrolik tahrikli veya elektromekanik tahrikli imal edilebilen ve ticari olarak yurt dışından temin edilen bu donanımların [7, 8] hem yurt içi pazarda imalatçısı bulunmamakta hem de yüksek maliyetlerle tedarik edilebilmektedir.

Bu donanımlar üzerinde son yıllarda yaygınlaşan en önemli özellik ve çalışma alanı, sacın en yüksek çekme dayanımını aşmasını müteakip ve henüz yırtılma ve malzemede dayanım zayıflığına yol açan moleküler çözümler başlamadan önce küresel şişirme ucunun durdurulması ve bu noktaya tekabül eden sacın Erichsen Sabiti olarak tanımlanan dalma derinliğinin ölçülmesidir [9, 10]. Bu amaçla literatürde sacın yırtılma başlangıcı öncesini tespit eden görsel teknolojiler [11- 12] bilgisayarda sonlu elemanlar yöntemi [12-13] ve klasik optik yöntemler [14, 15] olmak üzere farklı yöntemlerin, tespit amaçlı çalışıldığı görülmektedir.

2.1. Erichsen Şişirme Testinde, Seçilen Numune Malzemeler Açısından Yapılan Çalışmalar ve Deneysel Yaklaşımlar

Talapatra vd. tarafından yapılan tahribatsız muayene yöntemleri ve Erichsen şişirme testiyle farklı sac metallerin biçimlendirilebilirlik karakteristikleri isimli çalışmada; belirli bir sac metal şekillendirme prosesi için en iyi biçimlendirilebilirliğe sahip sac metal malzemeyi bulabilmeyi hedeflemişlerdir. Bu deney için iki farklı kalınlıkta galvanizli sac, (0,64 mm-0,28 mm), ince teneke sac ve alüminyum levhaları kullanmışlardır. Sac malzemenin şişirerek biçimlendirilebildiğinde deformasyon testi olarak kabul gören Erichsen şişirme testi dikkate alınmıştır. Dişi plaka ve baskı plakası arasında baskı altında tutulan sac metal parça küresel veya yarı küresel uçlu zımba ile dişi kalıbın içine doğru belirli hızda ve baskıyla şişirilmiştir. Şişirilen sac metal parçanın yırtılma başlangıcının kamera kaydı ile gözlemlenebildiği bir düzeneikle çalışma yapılmıştır (Resim 2.1). Deneysel çalışmalarda Erichsen şişirme test makinası (Model ET-20, En düşük 0,01 mm kalınlığı şişirebilen) kullanıldığı, şişirilecek numunelerin 1000 ± 100 kg.f baskı ile sıkıştırıldığı ve makinanın elle ve 4,8 devir/dakika ile tahrik edilerek işlem yapıldığı tespit edilmiştir [4].



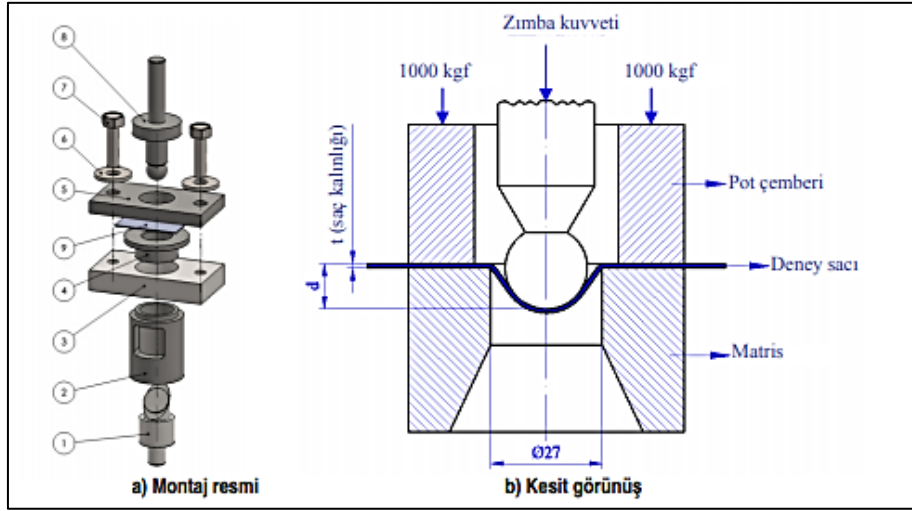
Resim 2.1. Mekanik Erichsen şişirme test makinesi [4]

Şişirme işleminin sac metal numune üzerinde ilk yırtılma başlangıcı görülünceye kadar devam ettirildiği, bu başlangıcın görülmesi için kamera desteğinden faydalandığı, sıvı girinim testi ile kesin bir tahribatsız muayene yapılabildiği, küresel zımbanın sac metal numuneye temas etmesinden ve yırtılmanın başlangıcına kadar doğrusal ilerleyen zımbanın derinliğinin, Erichsen Sabiti (ES) olarak sac metal parçaların şekillendirilebilirliğinin göstergesi anlamında dikkate alınabileceği tespit edilmiştir [4].

Çelik ve arkadaşlarının, havacılık sanayisinde yoğun tercih edilen AA2024 Alüminyum Alaşımı için Şekillendirilebilme Sınır Diyagramlarını Etkileyen Parametrelerin incelenmesi çalışmasında; Erichsen şişirme testi ile AA2024 alüminyum alaşımı malzemenin sınır gerinmelerinin Şekillendirilebilme Sınır Eğrileri (ŞSE), üzerinden değerlendirildiği ve yağlayıcı uygulandığı durumlarda gerinmelerin arttığı gözlenmiştir. Yağlayıcılar arasında parafin yağlama ile şekillendirme sınır eğrilerinin en yüksek değere ulaştığı tespit edilmiştir. Buna karşılık PTFE (politetrafloroetilen) yani teflon'un en yüksek sürtünme katsayısını verdiği görülmüştür. Şekillendirilme hızı arttıkça, şekillendirilebilme sınırının da artmakta olduğu gözlemlenmiştir [16].

Çavuşoğlu ve Gürün; çift fazlı yüksek mukavemetli sacların, ürün imalatında öne çıkmasında, özellikle otomotiv sektöründe, çift fazlı (DP) olarak adlandırılan gelişmiş yüksek mukavemetli sacların tercih edilmesindeki artıştan hareketle, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan DP600 ve DP780 sac malzemelerin derin çekme işleminde deformasyon hızının etkilerini incelemişlerdir. Farklı deformasyon hızlarında tek eksenli çekme testleri yapılarak malzemenin mekanik özelliklerinin belirlendiği ve sonlu elemanlar yöntemiyle sac malzemelerin farklı deformasyon hızlarında derin çekme analizlerinin gerçekleştirildiği görülmüştür. Yaptıkları analizler sonucunda, deformasyon hızındaki artışın, ürünün üst kısımlarında et kalınlığında, incelmeleri artırdığı, etek kısımlarda kalınlık artışına yol açtığı, geri esneme miktarı ve kalıplama kuvvetini artırdığını tespit etmişlerdir [17].

Dengiz vd. tarafından yapılan çalışmada; metalik yassı mamullerin yüzeylerine baklava dilimi, gözyaşı damlası gibi standart tiplerde geometrik desenler basılmıştır. Mamullerin soğuk deformasyona uğratılmasından yüzeylerde pekleşme oluşmasından ve desenli çelik sacların asansör, yürüyen merdiven, römork, karoser, damper imalatında taban döşeme ve basamak yapı malzemesi olarak sıkça tercih edilmesinden hareketle, düz ve desenli çelik sacların farklı yüklemelerde şekil alma kabiliyetinin karşılaştırıldığı görülmektedir (Şekil 2.1). Çalışmanın sonucunda gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme grafiklerinin çizildiği, desenli çelik sacların, aynı kalınlıktaki (2 mm) düz çelik saclara göre daha zor şekil aldığı deneyssel olarak doğrulandığı görülmektedir [18].



Şekil 2.1. Erichsen deney düzeneği [18]

Anket vd. ilk defa Keeler ve Goodwin tarafından ortaya atılan bir kavram olan ve sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmede önemli rol oynayan Şekillendirme Sınır Diyagramını (ŞSD) referans alarak çalışmalarını yapmışlardır. Çalışmalarında, farklı test yöntemleri (Erichsen testi, Olsen testi) ile farklı yükler altında sac malzemelerde meydana gelen uzama durumlarını bir diyagram üzerinde göstermişler ve Şekillendirme Sınır Diyagramını (ŞSD) elde etmişlerdir. Bu diyagrama göre sac malzemelerde şekil değişiminin derin çekme ve gererek şekil değiştirmede olduğunu tespit etmişlerdir. Erichsen testinin ülkemizde yaygın olarak tercih edildiğini de tespit etmişlerdir. Şekil değiştirme ölçümlerinin hassas yapılmasının, numuneye ait Şekillendirme Sınır diyagramının çiziminin daha kolaylaştırdığını beyan etmişlerdir [19].

Çetin vd., Süper plastik Zn-22Al Alaşımında Ultra İnce Tane Oluşumunun Oda Sıcaklığında Şekillendirilebilirliğe Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi isimli çalışmalarında; ilk olarak Zn-22Al alaşımının uygulanan aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemi ile ultra-ince tane yapılı hale getirildiği, sonra oluşturulan bu yapının tek ve iki eksenli gerilme altındaki şekillendirilebilirlik davranışını deneysel ve sayısal olarak analiz etmişlerdir [20]. İki eksenli gerilme altında analiz için küçültülmüş Erichsen testinin ve sayısal analiz için ise Ls-Dyna sonlu elemanlar yazılım paketinin dikkate alındığı anlaşılmaktadır. Çalışmanın sonuçları olarak; tek eksenli çekme testi sonrası yüksek deformasyon hızlarında (10^{-1} m/s⁻¹) yaklaşık %340 kopma uzaması ve 225 MPa'lık akma gerilmesinin ve söz konusu deformasyon hızında yaklaşık 5,30 mm'lik bir Erichsen Sabitinin (ES) elde edildiği, süperplastik Zn-22Al alaşımı için bütün deformasyon hızlarında

tek eksenli ve iki eksenli şekillendirilebilirlik açısından iyi bir uyumun görüldüğü beyan edilmiştir. 10^{-2} m/s deformasyon hızı için yapılan sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçların uyumlu çıktığı, oda sıcaklığında ve yüksek deformasyon hızlarında büyük miktarda uzama, düşük akma noktası ve yüksek şekillendirilebilirlik kabiliyeti olan süperplastik Zn-22Al alaşımının, mikro şekillendirilebilirlik açısından model bir malzeme adayı olabileceği tespit edilmiştir [20].

Köksal vd., Çift fazlı bölgede tavllanmış Erdemir 6114 sacının biçimlendirilebilirlik parametrelerinin belirlenmesi için yaptıkları çalışmada; 740 ile 850 °C arasında ısıtılan ve hadde yönünde ve hadde yönüne dik hazırlanan numunelere çekme deneyi ve Erichsen şişirme testi uygulamışlardır. Çalışmada, normalizasyon tavlama yapılmış malzemenin derin çekme değerinin (R) düştüğü yani izotrop yapıya yaklaştığı gözlemlenmiştir. 770 °C de Erichsen Sabiti değerinin (ES) daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Hadde yönünde seçilen ve tavlama işlemi uygulanan sac malzemede 770 °C sıcaklıktan sonra akma ve çekme dayanımlarında bir azalma görülmüştür. Netice olarak sac malzemenin akma sınırı ve çekme gerilmesinde sıcaklığa bağlı olarak değişiklik görülmüştür [21].

Kanca ve arkadaşının çalışmasında; Erichsen şişirme deneyi sonuçları kullanılarak soğuk haddelenmiş ve ardından galvanizlenmiş düşük karbonlu St22 çelik sacın derin çekilebilirliğinin tespiti incelenmiştir. Sac kalınlığı ve mekanik özellikleri (akma ve çekme gerilmesi, % uzama) ile soğuk haddeleme ezme oranının derin çekilebilirliğe etkileri Varyans Analizi (ANOVA) aracılığıyla tespit edilmiştir. Malzemenin derin çekilebilirlik özelliğinin tespitinde Erichsen Şişirme Test sonuçları dikkate alınmıştır. Sonuçta, haddeleme ve işlenmesindeki ezme oranının derin çekilebilirlikte etkin parametre olduğu tespit edilmiştir. İstatiksel olarak da malzemenin şişme miktarı üzerinde, en etkili faktörün ezme oranı (soğuk haddeleme) olduğu gözlenmiştir [22].

Adamus vd; 1., 2., 3., ve 4. kalitede sertleştirilmiş ince titanyum tabakalar üzerinde, PamStamp 2G simülasyon programı yoluyla sayısal analizlerini yapmışlar ve Erichsen Şişirme testi de uygulanan levhalarda, çekilen parçalardaki tabaka inceltme ve geri esneme değerleri üzerinde araştırma yapmışlardır. Çalışmada, sertleştiricilerle ince titanyum panellerin oluşturulması incelenmiştir. Analiz sonucunda, ince titanyum evhaların şekillendirme işleminin birçok faktöre bağlı olduğu, özellikle deforme olmuş levhanın kimyasal bileşimine bağlı olan Akma gerilimi/Çekme gerilimi (R_e/R_m) oranının, sac

levhanın çekilebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, 1. sınıf saf titanyum levhanın en yüksek çekilebilirliğe sahip ve en düşük çekme dayanımı gösterdiği gözlemlenmiştir. 3. Sınıf saf titanyum levha en yüksek geri esnemeyi gösterirken 1. Sınıf titanyum levhanın en düşük geri esnemeye sahip olduğu tespit edilmiştir [23].

Hamada A. S. ve arkadaşları üç yüksek Mn TWIP çeliğinin sünekliğini ve şekillenebilirlik özelliklerini yarı-statik ve yüksek hızlı deformasyon koşulları altında incelemişlerdir. Süneklik, konvansiyonel ve Hopkinson çekme testleri ile değerlendirilirken, gerilme şekillendirilebilirliği, yaklaşık 1000 s^{-1} hızda çalışan elektro-hidrolik tahrikli Erichsen test cihazı aracılığıyla elde edilen testler sayesinde değerlendirilmiştir. Bu çalışmada 0.6C-22Mn ve 0.2C-21Mn-0.23N çeliklerinin hem düşük hem de yüksek zorlanma oranlarında iyi uzama ve büyük bir Erichsen Sabiti verdiği tespit edilmiştir [24]. Yüksek Manganlı TWIP çeliklerinin şekillendirilebilirliği, çift eksenli gerilme koşulları altında gerilerek şekillendirilebilirliğin belirlenmesinde iyi kanıtlanmış bir standart yöntem olan Erichsen test tekniği uygulanarak incelenmiştir. Yüksek hızda 6C22Mn ve 2C21Mn2N çelikleri, 21Mn3Al3Si çeliğinden 12,8-12,5 mm daha yüksek ES değerleri sergilemişlerdir. Bunun sonucu olarak, 21Mn3Al3Si çeliğinin gerilerek şekillenebilmesi ve sünekliği, 2C21Mn2N ve 6C22Mn çeliklerinin deformasyon hızındaki artışla karşılaştırıldığında azaldığı beyan edilmiştir [24].

Aydın M. vd. çalışmalarında; malzeme davranışını anlamak için mekanik testlerde yaygın olarak tercih edilen Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) tekniğinin, Erichsen testine de uygulandığı görülmektedir. Çalışmada sac malzemenin yırtılma yüksekliğini (Erichsen Sabiti değerini) ölçmek ve geleneksel ölçüm teknikleri üzerindeki üstünlüklerini göstermek amacıyla Erichsen Şişirme Testi (ECT) ile 3D DIC tekniği birleştirilmiştir. Deneylerde çeşitli kalınlıktaki Ck75 sac malzemeler üzerinde, 20 mm çaplı küresel çelik bilya başlı zımba ile 0,01 mm hassasiyetli ölçümle deformasyon testi yapılmıştır. Bu deneyler yüksek çözünürlüklü kameralarla kayıt edilmiştir. Elde edilen bulgular hem DIC hem de yükseklik ölçer, Erichsen Sabiti ve yırtılan kap yüksekliği ölçümlerinin, levha kalınlığının artırılmasıyla arttığını göstermektedir. DIC ve dijital yükseklik ölçer ölçümlerinin karşılaştırmasına göre, dijital yükseklik ölçer ölçümlerinin DIC'den biraz daha yüksek olduğu ve iki ölçüm yöntemi arasındaki farkın her bir deney için 0,05192 mm ila 0,05697 mm arasında değiştiği görülmektedir (Çizelge 2.1). Çalışmada, Erichsen Sabitini deneysel

olarak belirlemek için DIC tekniğinin geleneksel Erichsen Şişirme Testine uyarlanması başarılı bir örneğini sunmuş ve kolay ve esnek bir değerlendirme olduğu kanıtlanmıştır [25].

Çizelge 2.1. Yükseklik ölçer ve DIC ile ölçülen yırtılmış şişme yüksekliği [25]

Numune Kalınlığı, mm	Deney No	Yükseklik ölçer ile ölçülen, mm	DIC Şişme yüksekliği, mm	DIC Ortalama yükseklik, mm
0,40	1	4,41	4,35668	4,35491
	2	4,41	4,35303	
	3	4,41	4,35303	
0,50	1	4,78	4,72719	4,72607
	2	4,78	4,72406	
	3	4,78	4,72697	
0,60	1	5,04	4,98543	4,98618
	2	5,04	4,98808	
	3	5,04	4,98503	

Genellikle sac malzemenin yırtılmasından önce gerçekleşen sac malzemedeki bölgesel boyunlanmayı tespit amacıyla Kocanda ve arkadaşları tarafından bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntemle ilave bir parametre olan kaptaki bölgesel boyunlanma-Erichsen Sabitini belirlemek için Erichsen şişirme deneyine dahil edilmiştir. Bu amaçla, lazer benek olgusu esaslı bölgesel boyunlanma tespit yöntemi geliştirilmiştir. Otomotiv sektöründe önemli bir yer tutan üç farklı kalitede sac malzeme (5754 H22 alüminyum alaşımı, DC04 derin çekme çeliği ve Docol 800DP yüksek dayanımlı çelik) için Erichsen Sabiti sonuçları belirlenmiştir (Çizelge 2.2). Önerilen yöntemin, Lazer Benek (Laser Speckle) yöntemi esasına göre bölgesel boyunlanma ve yırtılmanın tespitinde kullanılabileceği ve Erichsen şişirme deneyinde ölçümlerin otomasyonunu sağlayabileceği görülmüştür [26].

Çizelge 2.2. Erichsen Şişirme testinde testinde numunelerin ölçüm sonuçları [26]

	AA 5754 H22 t = 0,8 mm	DC 04 t = 0,8 mm	DC 04 t = 1 mm	DC 04 t = 2 mm	Docol 800DP t = 0,8 mm
Bölgesel Boyunverme, LN-IE, mm	7,54	10,21	10,43	11,91	-
Yırtılma IE, mm	8,02	11,10	11,35	12,95	9,23
Δ , mm	0,48	0,89	0,92	1,04	0
Δ , %	5,99	7,99	8,10	8,03	0
LN-IE (Local Boyun verme) Standart Sapma, mm	0,12	0,07	0,08	0,16	-
IE Standart Sapma, mm	0,03	0,06	0,11	0,11	0,27
Δ Standart Sapma, mm	0,10	0,12	0,14	0,09	-

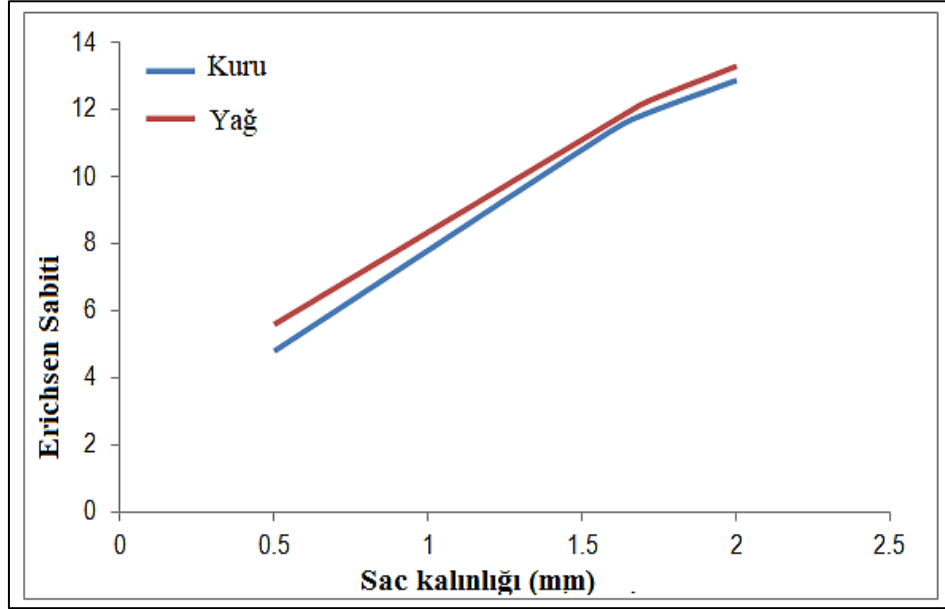
Ayrıca, Erichsen şişirme deneyi esnasında malzemede görülen karmaşık bir deformasyon durumunda gerçekleşen bölgesel boyunlanma ve yırtılma oluşumu arasındaki yükseklik farklılıklarının gözlemlenmesinin mümkün olduğu, yapılan deneylerden görülmüştür. Deneye tabi tutulan numunelerin bölgesel boyunlanması ve yırtılması anındaki şişme yükseklikleri arasındaki farklılıklar %0–8 arasında değiştiği görülmüştür [26].

Giuliano, sac şekillendirme işlemlerini doğru bir şekilde analiz etmek için, yaygın olarak tercih edilen sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile Erichsen Testinin deneysel sonuçlarını kullanarak sac şekillendirme için Coulomb Sürtünme Katsayısını incelemiştir. Deneylerde DC05 çelik sac ve Erichsen Testinde test için paslanmaz çelik zımba yer almıştır. Erichsen Testleri, numuneler hem yağlanmadan ve hem de Gres LB4 ile yağlanarak yapılmıştır. Özellikle Gres LB4 yağı ile işlem yapıldığında sayısal-deneysel karşılaştırmanın, iyi bir uyum içinde kaldığı görülmüştür. Bu nedenle, sayısal-deneysel karşılaştırmanın, özellikle Gres LB4 kullanıldığında, iyi bir uyum içinde olduğu düşünülebilir fikrini ileri sürmüştür [27].

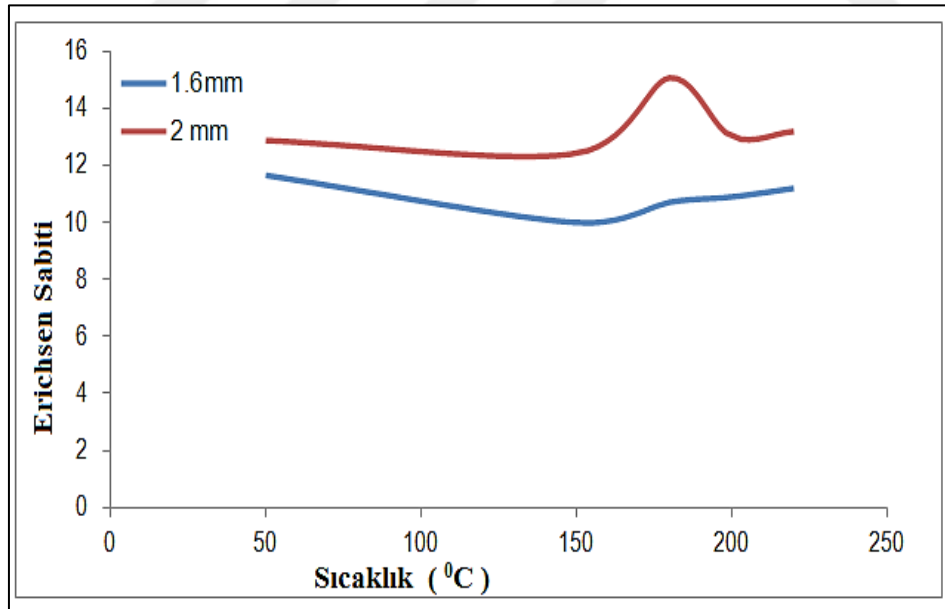
Giuliano, G. ve arkadaşı, 1 mm kalınlıkta AA2017 Al-Cu ve AA5083 Al-Mg alüminyum alaşımlı sac numunelere uyguladıkları Erichsen testi ile, sürtünmenin şekillendirilebilirlik üzerindeki etkisini araştırmışlar ve zımbanın yük-yer değiştirme eğrisi açısından, sac malzeme ile kalıp yüzeyleri arasındaki sürtünmenin etkisinin analizini yapmışlardır. Numuneler hem yağlanmamış durumda ve hem de iki farklı katı yağlayıcı ile test edilmişlerdir. Yağlamanın, yük-yer değiştirme eğrisini önemli ölçüde etkilemediği, yırtılma bölgesinde, kalınlıkta bir azalma görüldüğünü gözlemlemişlerdir. Genel olarak, yağlamanın çift eksenli germe koşulu altında şekillenebilirliği arttırdığı beyan edilmiştir [28].

Singh ve arkadaşları tarafından; daha iyi şekillendirilebilirlik için, 0,5-2 mm kalınlıkta numune olarak seçilmiş uygun tavlama ve kimyasal bileşime sahip AA1200 alüminyum alaşım levhaların, şekillendirme davranışları Erichsen Şişirme test yöntemi ile araştırmışlardır. 50-200 °C tavlandığında AA1200 alüminyum alaşımının davranışı hakkında temel bilgileri çalışmaya dahil etmişlerdir. Numune sac yüzeye yağlama uygulandığında sac metalin şekillendirilebilirliği arttığını (Şekil 2.2), ısıtılma sıcaklığı 50 °C'den 200 °C'ye çıkarıldığında sertliğin azaldığını, Erichsen sabitinin arttığını beyan etmişlerdir (Şekil 2.3). Erichsen Sabitinin sac metalin kalınlığındaki artışla arttığı sonucuna

varmışlardır. İnce tabakanın şekillendirilmesinin kalın tabakaya göre daha zor olduğunu da ileri sürmüşlerdir [29].



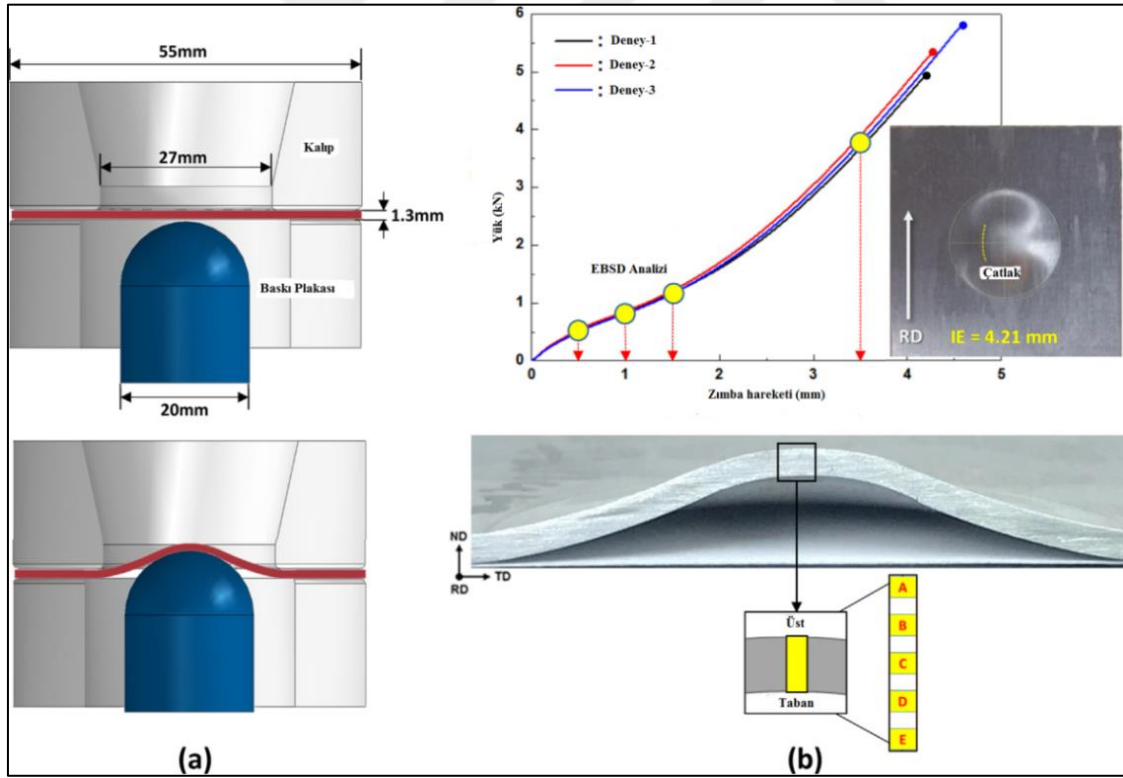
Şekil 2.2. Sac kalınlığı ve Erichsen Sabiti değişimi [29]



Şekil 2.3. Sıcaklık ve Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi [29]

Singh, J. vd. çalışmasında E-form Mg alaşımlı levhalarda hem deformasyon hem de ikizlenmenin kalınlık boyunca farklı davranışları, oda sıcaklığında zımba çapı 20 mm olan geleneksel Erichsen şişirme testi ile incelenmiştir. Farklı zımba darbeleriyle (PS) deforme

edilmiş E-form Mg alaşımlı levhaların mikro-dokusunun, ikizlerin ve Çekirdek Ortalama Hatalı Dizimi (KAM) gelişimi, Elektron Geri Dağılık Kırınım (EBSD) tekniği ile analiz edilmiştir. Erichsen testi sırasında E-form Mg alaşımlı levhaların gerinim/gerilme durumlarının farklılığını simüle etmek için rastgele bir eşleme şemasına dayanan bir Kristal Plastisite Sonlu Elemanlar Yöntemi (CPFEM) kullanılmıştır. Erichsen testi sırasında E-form Mg alaşımlı levhalarda gelişen gerinim/gerilim gelişimi, farklı zımba kursları altında, kalınlık yönünde, farklı bölgeler için analiz edilmiştir. EBSD analizi, gerilim, basma ve çift ikizlerin, üst kısımlardaki ana deformasyon mekanizmaları olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma sonucunda, düzlemsel şekil değiştirme artışlarındaki değişiklik ve numunelerin alt kısımlarındaki gerilim, Erichsen testi sırasında 1,0 mm'lik bir zımba kursu (PS) sonrasında numunelerin alt kısımlarında ana deformasyon mekanizması olan ikizlenme deformasyonunun gözlemlendiği beyan edilmiştir. Şekil 2.4'de EBSD analizi görülmektedir [30].



Şekil 2.4. EBSD analizi [30]

Reddy, M., vd. sanayinin rutin olarak kullanabildiği en önemli biçimlenebilirlik testi olan Erichsen testi, modifiye edilmiş Erichsen test cihazı ile, sacların biçimlenebilirlik sabitleri, çeşitli bileşenlerin üretimi için gelen sacların sınıflandırılması, seçilmesi ve türlerine göre

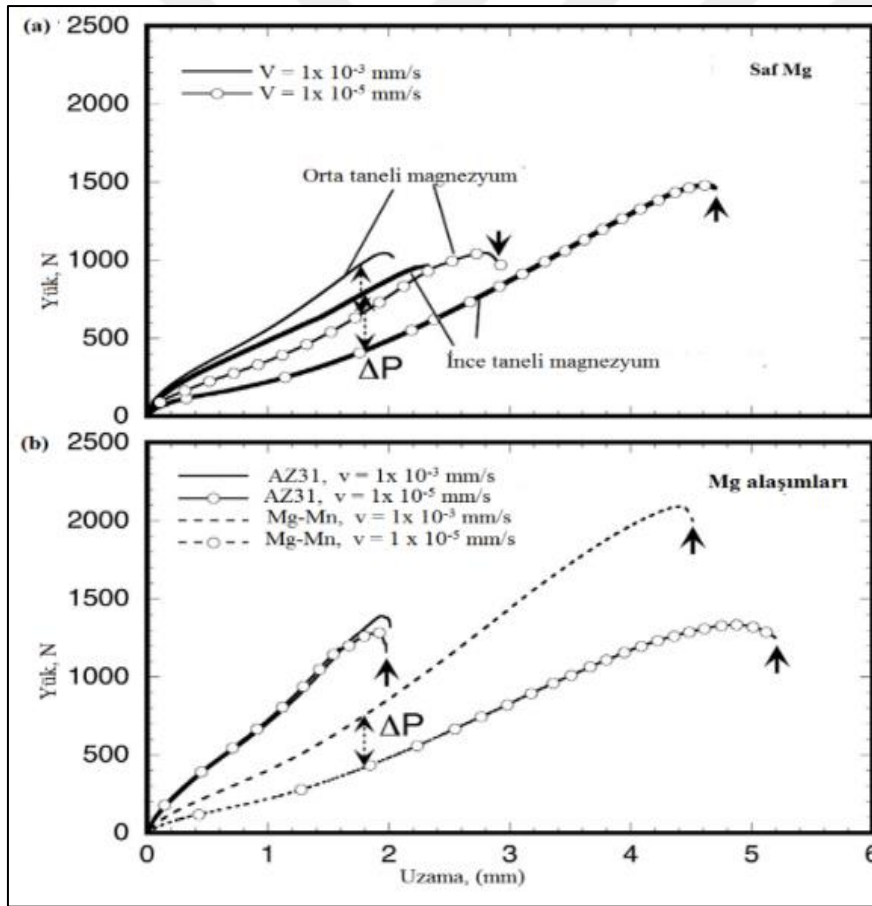
ayrılması konusunda çalışmışlardır. Bunun için farklı yağlayıcıları deneyerek paslanmaz çelik, bakır, pirinç ve alüminyum sac plakaların Erichsen şişirme testlerini yapmışlardır. Sonuç olarak mevcut deneylerden, genel olarak Erichsen Sabitinin kayganlaştırıcı tipinden etkilendiği gözlemlenmiştir. Lanthax gres uygulandığında 1,0 mm sac kalınlığına karşılık gelen en büyük ve en küçük Erichsen Sabiti değerleri arasında 0,64'lük bir fark ile iyi bir tutarlılık gösterdiğini tespit etmişlerdir. Erichsen şişirme testinden elde edilen sabit değer, mevcut çalışmada test edilen tüm metaller için metal levha kalınlığındaki artışla arttığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen veriler ile ince tabakaların kalın tabakalara göre daha zor biçimlendirilme özelliği gösterdiğini tespit etmişlerdir [31].

Akrout ve arkadaşlarının çalışmasında; sonuçlar için sonlu elemanlar yazılımı COSMOS/M'yi kullanarak farklı kalınlıkta ve farklı sac metal malzemelerin biçimlenebilirlik kabiliyetlerini test etmek için yağlı ve yağsız olarak Erichsen şişirme testi uygulamışlar ve sonuçlar arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. Sonuç olarak aynı gruptaki malzemeler için, şişme derinliği ile genişlemeye karşı kabiliyeti tanımlayan sertleştirme katsayısı “n” arasında bir ilişki bulunduğunu gözlemlemişlerdir. Sac malzemelerde şişirme işleminin karmaşıklığı ve yüksek maliyeti nedeniyle, deneysel testler, malzeme ve teknolojik sınırlamalar olmadan yürütülemeyeceğini, bu nedenle bu tekniği yönetmek ve sac malzeme şişirme süreçlerini kontrol etmek için bilgisayar yazılımının gerekli olduğunu tespit etmişlerdir. COSMOS/M yazılımının sürecin kontrolü ile uyum gösterdiğini belirtmişlerdir [32].

Singh, J., vd. Erichsen şişirme testi ile oda sıcaklığında, AZ31 ve E-form Mg alaşımlı sac metal levhaların şekillenebilirliğini incelemişlerdir. Bu çalışmada, Elektron Geri Dağınık Kırınım (EBSD) tekniği yöntemiyle Mg alaşımlı tabakaların başlangıçtaki dokuları ve tane büyüklüklerindeki farkın rolü, Erichsen testi sırasında Mg alaşımlarında oluşan deformasyon ve kırılma mekanizmaları, Mg alaşımlarının mikroyapısının ve mikro dokusunun geçirdiği deformasyonu incelemişlerdir. Erichsen testi sırasında Mg alaşımlarının mikromekanik deformasyon davranışını tahmin etmek için Kristal Plastisite Sonlu Elemanlar Yöntemi (CPFEM) tercih edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, CPFEM, AZ31 ve E-form Mg alaşımlarının Erichsen testi altında deformasyon ve bozulma davranışları başarıyla yakalanmış ve etkili gerinim ve gerilme dağılımlarının doğru tahmin edilebildiğini göstermişlerdir. Doku gelişimi aynı zamanda mikroyapı bazlı CPFEM ile başarılı bir şekilde yakalanmıştır. Daha zayıf bir bazal yapıya sahip olan E-form Mg alaşımları, daha güçlü bir

bazal yapıya sahip AZ31 Mg alaşımıyla karşılaştırıldığında daha yüksek ES gösterdiğini tespit etmişlerdir [33].

Somekawa, H. ve arkadaşlarının çalışmasında bir kayganlaştırıcı olmadan, dövülerek hazırlanmış saf magnezyum ve bazal bir yapıya sahip alaşımlar (Mg-Al-Zn ve Mg-Mn alaşımları) kullanılmıştır. Oda sıcaklığında sac metal malzemelerin biçimlendirilebilirliğin artırılmasında, kontrollü zımba hızının biçimlendirilebilmeye etkisi araştırılmıştır. Bu araştırmada, Erichsen testlerinde yük-yer değiştirme eğrilerinde, Mg-Al-Zn alaşımının şekillendirme hızından etkilenmediğini; bununla birlikte, ince taneli saf magnezyum ve Mg-Mn alaşımının biçimlendirme hızından çok fazla etkilenme eğilimi gösterdiğini tespit etmişlerdir (Şekil 2.5) [34].

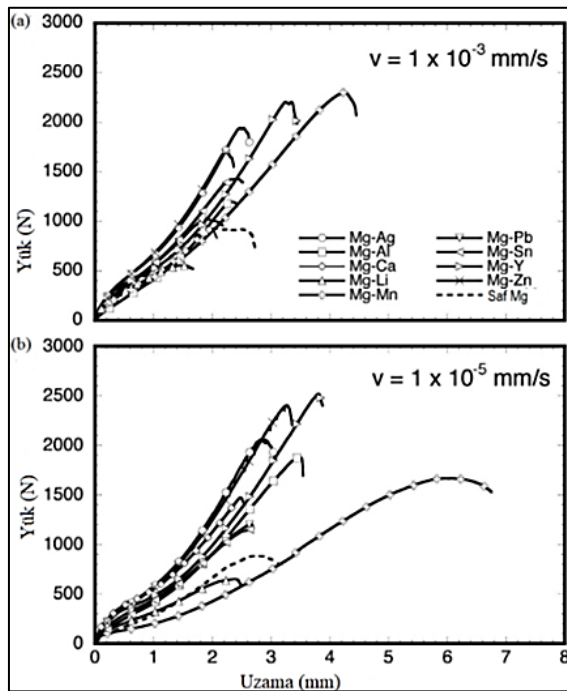


Şekil 2.5. Erichsen şişirme testinde meydana gelen yük-yer değiştirme eğrileri; a) Saf magnezyum, b) Magnezyum alaşımları [34]

Oleksik ve arkadaşları; Erichsen testi ile elde edilen deney sonuçlarını sonlu elemanlar simülasyonu yoluyla, çelik sac metal malzemenin deformasyonunda malzeme davranışının

incelenmesi üzerinde çalışmışlardır. Malzemenin tüm parametrelerini tanımlamak için ters analize dayalı bir yöntem uygulamışlardır. Malzemelerin anizotropisini tanımlamak, malzemedeki plastik gerilmeleri ve sac metal kalınlığının değişimi ölçmek için optik bir sisteme dayalı yeni bir deney tekniği kullanılmıştır. Bu teknikle gelecekte gerilme testleri ile Erichsen testlerini birleştirerek, anizotropinin matematiksel tanımını geliştirmeyi amaçlamışlardır. Ters analizle de en aza indirilmesi gereken fonksiyon, aynı anda yükleri ve kalınlık azalmasını içerecek çalışmalar yapmayı amaçlamışlardır. Ters analizle, aynı anda, yüklerde azalmayı sağlayacak ve numune malzeme kalınlığında da azalmayı önleyecek bir işlevi geliştirmeyi ileri sürmüşlerdir [35]

Somekawa, H. ve arkadaşlarının çalışmasında, sırasıyla Ag, Al, Ca, Li, Mn, Pb, Sn, Y ve Zn alaşım elementlerinin Erichsen testi ile, oda sıcaklığında gerilebilir biçimlendirilebilirlik ve deformasyon modu üzerindeki etkisi, benzer bir ortalama tane boyutuna sahip saf magnezyum ve magnezyum ikili alaşımları kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda; alaşım elementleri sadece mekanik özellikleri değil aynı zamanda oda sıcaklığında gerilebilir şekillendirmeyi de etkilemiş, alaşımların çoğu sınırlı bir Erichsen Sabiti ($\sim 2,5-3,0$); sergilemiş, bununla birlikte, manganez veya nadir toprak elementlerinin eklenmesi gerilebilir şekillendirilebilirlikte bir artışa neden olmuştur. Şekil 2.6'da çeşitli malzemelerin oda sıcaklığında yapılmış Erichsen şişirme testi değerleri gösterilmiştir [36].



Şekil 2.6. Oda sıcaklığında yapılan Erichsen testi tipik yük ve yer değiştirme eğrileri [36]

Somekawa vd. çalışmalarında; tane boyutunun, şekillendirme hızının ve oda sıcaklığının, sac metal malzemenin biçimlendirilebilirliği üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, farklı tanecik boyutlarında Mg-Mn ikili alaşımını ideal oda sıcaklığında incelemişlerdir. İki farklı taneli Mg-Mn alaşımı kullanılarak, yarı-statik ve düşük şekillendirme hızları altında Erichsen testi ile esneme şekillenebilirliği araştırılmıştır. Erichsen testlerinden sonra deforme olmuş mikroyapısal gözlemler, deformasyon ikizlemesinin varlığını ortaya koyduğunu; bununla birlikte, mikroyapısal özelliğinin alan/hacim oranının deformasyon mekanizmasını etkilemede çok küçük bir rol oynadığı görülmüştür. Bu mikroyapısal sonuçlar, deformasyon ikizlemesinin, orta ve ince taneli alaşımlar için Erichsen testi sırasında deformasyona katkıda bulunma ihtimalinin de olmadığını göstermiştir. Bunun yanında Erichsen testlerinde, Sınırlı Şişme Yüksekliğinin (Limited Dome Height) (LDH) bu faktörlerden açıkça etkilendiğini, daha ince tanecik ebadı ve/veya düşük şekillendirme hızı ile LDH'lerin arttığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak; Erichsen testlerinin sonuçları, tane inceltme ve düşük şekillendirme hızının sınırlı şişme yüksekliğinde (LDH) bir artışa, yani oda sıcaklığında şekillendirilebilirliğin artmasına yol açtığını göstermiştir [37].

Kim, J. H., vd. çalışmalarında, soğuk kalıplama işlemi ile kalıplanarak otomotiv parçalarının üretiminde haddelenmiş alüminyum saclardan (Tailor Rolled Blanks) (TRB) olan Al6061'in şekillendirilebilirliğini (Çizelge 2.3) ve boyutsal doğruluğunu geliştirmek için bütünleşik bir sıcak şekillendirme ve ısıtıl işlem süreci önermişlerdir. Bu işlemde, ısıtılmış tabaka çözelti ısıtıl işleminden (Solution Heat Treatment) (SHT) hemen sonra biçimlendirilmiş ve peşinden soğuk kalıplar içinde hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Daha sonra Al6061 TRB'nin levha oluşturabilme uygunluğu Erichsen ve V-bükme testleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmada kimyasal bileşimi lazer ablasyon mikroskop sistemi ile ölçülmüştür [38].

Çizelge 2.3. Al 6061'in kimyasal bileşimi [38]

Malzeme	Kimyasal bileşimler (Ağırlıkça %)						
	Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Al
	0,31	1,03	0,74	0,8	0,19	0,18	Bal.

Sıcak şekillendirme ve Dişi Kalıpta Isıl İşleme Şekillendirme (Heat Treatment Forming in-Die Quenching-HFQ) işlemi uygulanmış özel haddelenmiş Al 6061 malzeme (Kesilerek Haddelenmiş Şerit-TRB), geleneksel şekillendirme yöntemi için Erichsen testleri uygulanarak karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçları ileri sürmüşlerdir;

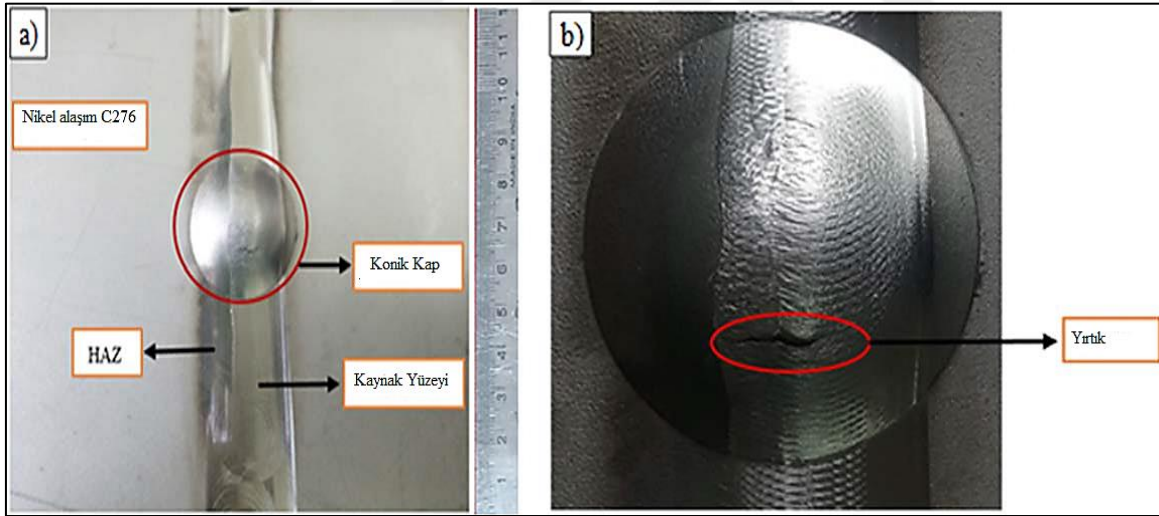
1. Kalınlık değişimi nedeniyle deformasyon yoğunluğundan dolayı bütün koşullarda daha ince tarafta boyunlanma oluşmuştur.
2. Sıcak şekillendirme işleminin şekillendirilebilirliği artırdığı ve şekillendirme yükünü azalttığı görülmüştür. Bu da HFQ işleminin şekillendirilebilirlik ve yük oluşturma için uygulanabilirliğini gösterdiğini tespit etmişlerdir.
3. HFQ işlemi, ek ısı işlem gerektirmeden yüksek biçimlenebilirlik, üstün boyutsal hassasiyet ve düzgün mekanik özellikler sağlayabildiğini, bu nedenle, HFQ işlemi, alüminyum TRB kullanılarak çok dayanıklı bir parçanın imalatında mümkün olduğunu bulmuşlardır [38].

Ghorbel vd. çalışmasında; karışık, doğrusal olmayan kinematik/izotropik sertleşme ile termodinamik esaslı anizotropik elasto-plastik modeli, süreklilik hasarı teorisine dayalı, tamamen bütünleşik bölgesel bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilmiş anizotropik elastoplastik hasar modelinin davranışı ve doğruluğu, Erichsen Şişirme Testinde değerlendirilmiş, DD13 sac metal malzemenin parametrelerini tanımlamak için çekme ve Erichsen testlerine dayanan birleşik deneysel ve sayısal çalışmalar, yapılmıştır. Sayısal ve deneysel Erichsen testlerinin hasar ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri açısından karşılaştırılması değerlendirilmiştir. DD13 sac metalin anizotropik katsayıları, sertleştirme parametreleri ve hasarı tanımlanmış, değerlendirilmiş ve onaylanmıştır. Elde edilen sonuçlar, biçimlendirme işlemine maruz kaldığında DD13 sac metal malzemenin gerçekçi davranışını ve sünek hasar oluşma etkisini tahmin etmede, numune parçanın yeteneğinin geliştiğini göstermiştir. Bu çalışmanın gelecekteki yolu, sac şekillendirme sürecinde malzeme davranışının daha doğru bir şekilde tahmin edilmesi için ilişkisel olmayan bir akış kuralının kullanılmasına odaklanacağını ileri sürmüşlerdir [39].

Sekban ve diğerleri, Sürtünme Karıştırma İşlemi (FSP) ile işlenen düşük karbonlu bir çeliğin gerilerek şekillendirilebilme özelliğini, minyatür bir Erichsen testini esas alarak çift eksenli yükleme koşulu altında şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Ayrıca, şekillenebilirlik davranışındaki değişikliklerin arkasındaki mekanizmaları netleştirmek için mikroyapısal ve

mekanik özelliklerindeki değişiklikler de incelenmiştir. Sonuç olarak; FSP, çeliğin tek eksenli yükleme koşullarında süneklik giderindeki mukavemet değerlerinde önemli bir artışa neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Hem verim hem de çekme dayanımı değerleri artmış fakat yüzde uzamasının çok az azaldığı da görülmüştür [40].

Subramanian, R., vd. bu çalışmalarında, Hastelloy C276 kaynaklı bağlantıların gerilme dayanımını tahmin etmek için, Robotik Metal Inert Gaz (MIG) kaynak işlemi kullanarak yeni bir ampirik ilişki kurmayı amaçlamışlardır. MIG kaynaklı sac metalin plastik deformasyon altındaki sünekliğini ve sağlamlığını değerlendirmek için bükme testi ve Erichsen şişirme testi esas alınmıştır. Test, şekillendirilebilirliği incelemek için kaynaklı derz üzerinde gerçekleştirildi ve kaynaklı birleştirmenin iyi şekillendirilebilirliğe ve sünekliğe sahip olduğunu gözlemlediler. Bu testte, çatlak görünene kadar kaynaklanmış numuneler küresel bir zımba ile şişirilmiştir (Resim 2.2). Ölçülen şişme derinliği, kaynaklı birleştirmenin kalitesi ve sağlamlığı açısından olumlu sonuç göstermiştir [41].



Resim 2.2. a), b) Erichsen şişirme testinden sonra kaynak örneği [41]

Guo, T. ve diğerleri, çekme öncesi numune büyüklüğünün, endüstriyel üretimde en yaygın kullanılan %55Al, 43.4%Zn, %1.6Si alaşımlı kaplama Galvalume (GL), çelik sacın performansı üzerindeki etkilerini elektrokimya, nötr tuz spreyi, bükme ve Erichsen şişirme testi ve elektrostatik toz püskürtme testleri ile incelemişlerdir. Çalışmada, Standard GB/T 4156'ya göre yapılan Erichsen şişirme testinden sonra 7 mm'lik baskı derinliğinde durdurulan zımbadan dolayı oluşan, kaplama deformasyon bölgelerinde farklı derecelerde çatlaklar meydana geldiği görülmüştür [42].

Wang ve arkadaşları, enine doğrultu (TD) boyunca %5.38 gerilme seviyesi olan, 1 mm kalınlığındaki AZ31 magnezyum alaşımlı levhaya oda sıcaklığında baskı öncesi deformasyon testi uygulamışlardır. Bu gerilim şekillendirilebilirliğini küresel uçlu Erichsen testi ile gerçekleştirmişlerdir. Test sırasında gres yağı kullanılmıştır. Tavlama ile beraber tane büyümesi nedeniyle, ön sıkıştırma ve tavllanmış tabakaların hem akma dayanımı hem de sünekliği azalırken, gerilme şekillendirilebilirliği geliştiği görülmüştür. Ayrıca PCA300 ve PCA400 Mg alaşım levhalarında, Erishen testinden sonra mikroyapılarda ikizlenme oluştuğu görülmüştür [43].

2.2. Küresel Uçlu Zimba Çapına Göre Yapılan İlgili Çalışmalar ve Deneysel Yaklaşımlar

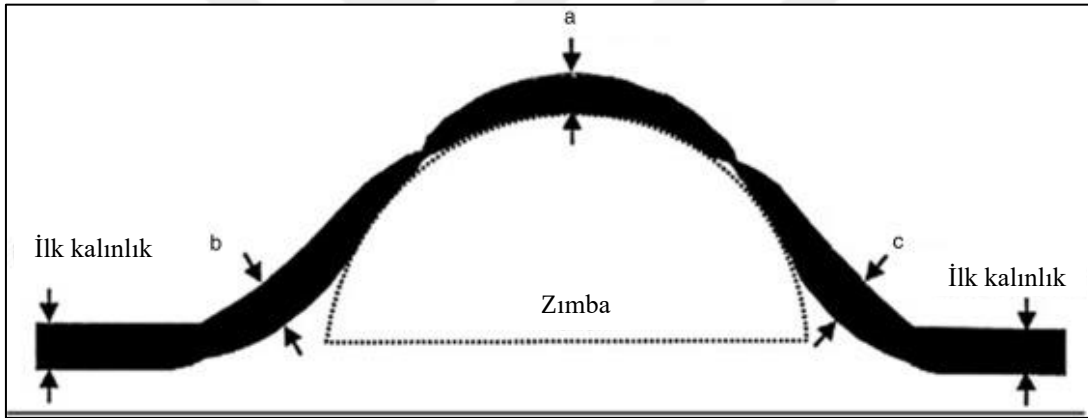
Gavrus vd.; günümüzde otomotiv havacılık sanayiinin sac şekillendirilebilme özellikleri için çok önemli olan ve teknolojik testler arasında, Erichsen şişirme deneyinin, gerçekte üretilen sac metal malzemenin davranışlarının sınırına en yakın malzeme davranışını verdiğini belirtmişlerdir. Sac metal alaşımları için mevcut yapısal denklerin reolojik tanımlanmasında 20 mm çaplı küresel zımbalı Erichsen testinin ters sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Bu çalışmada Erichsen testinin sayısal bir simülasyonundan yararlanılarak yapısal parametrelerin tanımlanması için güvenilir bir optimizasyon geliştirilmiştir. Gerçek deney ile beraber sayısal doğrulamalar ve ciddi çalışmalar ile birleştirilen ters analizler, önerilen algoritmalarla elde edilen sonuçları doğruladığını teyit etmişlerdir [44].

Hyun C. S. ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, özellikle Erichsen testi, Mg alaşımlı levhaların gerilebilir şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için en yaygın kullanılan yöntem olduğu iddia edilmiş ve bu çalışmada saf bir magnezyum (Mg) tekli kristalinin eşleştirme davranışı ve deformasyon hareketleri, Oda Sıcaklığında (RT) Erichsen testi ile incelenmiştir. Bunun için oda sıcaklığında kayganlaştırıcı tercih edilerek 20 mm çaplı küresel zimba ile 5 mm/dk'lık bir hızda Erichsen testi yapılmıştır. Erichsen testi ile deforme olmuş bir numunenin konumuna göre benzersiz ikizleme davranışları oluşturmak için, deforme olmuş bir numunenin iki kesitinde Elektron Geri Saçılma Difraksiyonu (kırınım) (EBSD) tekniği ile mikro dokusunun analizleri yapılmıştır. Hem kristalografik kayma hem de deformasyon ikizlemesine ilişkin Kristal Plastisite Sonlu Eleman Yöntemi (CPFEM), oda sıcaklığındaki Erichsen testi sırasında deforme olmuş örnek malzeme üzerinde ikiz bantların heterojen evrimini açıklamak için esas alınmıştır. CPFEM sonuçları, deforme olmuş Mg tek

kristal numunesinde üretilen düzlemsel şekil değiştirme bileşenlerinin, numunenin merkezine göre asimetrik olarak dağıldığını ve merkez bölgedeki deformasyon davranışının, çift eksenli deformasyon olarak anlamlı bir sapma gösterdiğini ortaya koymuşlardır [45].

2.3. Yağlayıcı Kullanarak Yapılan Deneysel Çalışmalar

Masoumi, M. ve arkadaşlarının, kontrollü haddeleme işleminden geçirilmiş SAE 970X çeliğinin mikroyapısal özelliklerini kontrol altında tutarak, çekme özelliklerini ve şekillendirilebilirliği geliştirmek amacıyla yaptıkları çalışmalarında, mekanik davranışı tanımlamak ve şekillendirilebilirliği ISO 20482 standardına göre değerlendirmek için, haddeleme düzleminde kesilerek hazırlanan numunelere, oda sıcaklığında Erichsen testleri yapılmıştır (Şekil 2.7). Testlerde 4 cm çaplı zımba ve yağlamak için gres kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Erichsen testi yapılan numunenin kubbe serbest yüzeyi ve kesit değişimi [46]

Yırtılma, tüm numunelerde benzer olup hilal şeklinde kendini göstermiştir. Her ne kadar bazı çalışmalar tane büyüklüğü ile portakal kabuğu benzeri deformasyon etkisi arasında bir ilişki olduğunu öne sürmesine rağmen, bu çalışmada kanıt bulunamamıştır. Sonuç olarak, Erichsen testi sırasında oluşan kubbenin merkez çizgisi boyunca kubbe yüksekliği ve kalınlığındaki değişiklikler (Çizelge 2.4), kristalografik yönelimler ile biçimlenebilirlik sınırı arasında bir korelasyon kurulmasına yardımcı olabileceğini göstermiştir.

Kristalografik dokunun, şekillendirilebilirliğin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığı gözlenmiştir [46].

Çizelge 2.4. Erichsen test numunelerinin kesitlerinde kubbe kalınlıklarındaki değişme [46]

Numune	Kubbe yüksekliği, mm	İlk kalınlık, mm	a		b		c	
			Kalınlık, mm	Gerinim, %	Kalınlık, mm	Gerinim, %	Kalınlık, mm	Gerinim, %
Normal	14,87	5,00	4,23	16,63	4,09	20,14	4,02	21,94
Numune A	15,22		4,31	16,63	3,87	25,64	3,94	23,77
Numune B	17,56		4,02	14,92	3,58	33,49	3,36	39,81
Numune C	20,07		4,31	21,94	3,07	48,91	3,14	46,55
Numune D	18,46		4,23	16,63	3,55	34,25	3,75	28,77
Numune E	21,88		3,58	33,49	3,29	42,01	2,99	51,32

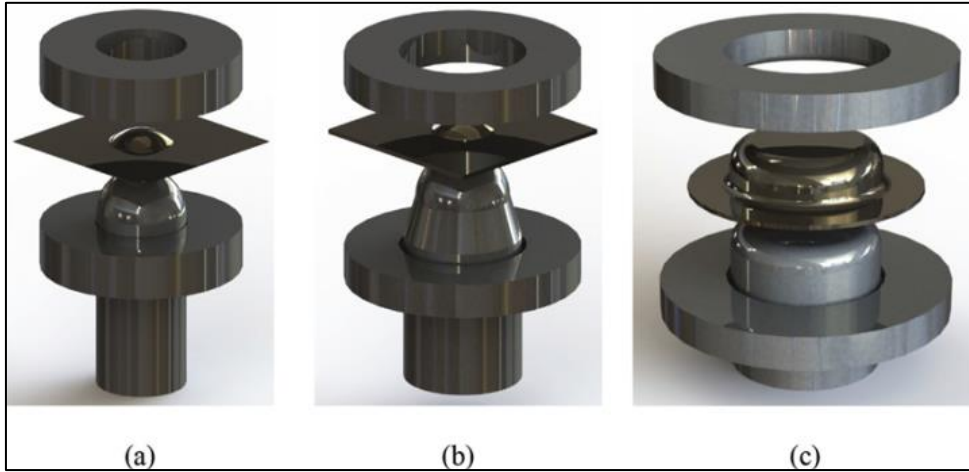
Kalkan ve arkadaşlarının, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yüzey karakterizasyonunun belirlenmesinde yardımcı olması amacıyla yapılan Erichsen şişirme testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri, çekme derinliği arttıkça az da olsa bir artış göstermiştir. Yağlayıcı olarak kullanılan parafin, sürtünme katsayısının düşmesinde önemli rol almıştır. Radyal çekme bölgesinde oda sıcaklığında kuru ve grafit yağlayıcı kullanımında, deformasyonun artışına bağlı olarak sürtünme katsayısının az da olsa düştüğü görülmüştür. Yağlama olmadan kuru durumda 300 °C de yapılan çekme testlerinde elde edilen sürtünme katsayı sonuçlarının oda sıcaklığına göre düştüğü görülmüştür. Buradan hem gerdirme bölgesi hem de radyal çekme bölgesi olmak üzere her iki bölge için yapılan sürtünme katsayısı değerleri benzer aralıkta oldukları görülmüştür [47].

Yüksek sünekliğe sahip, ferritik yapıdaki sıcak haddelenmiş DD13 metal çelik levhalar birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Ghorbel vd., izotropik sünek hasar ile güçlü bir şekilde birleştirilen gelişmiş bir anizotropik elasto-plastik model olarak tanımladıkları DD13 sac metalin mekanik davranışını incelemişlerdir. DD13'ün mekanik özelliklerinin deneysel bir veritabanı; anizotropik katsayılar, sertleşme ve hasar parametreleri elde edilecek şekilde tek eksenli çekme testleri sonuçlarından oluşmuştur. Doğrulama amacıyla sayısal sonuçların Erichsen şişirme testi ile karşılaştırıldığı görülmüştür. Bütünleşik deneysel ve sayısal çalışma; DD13 malzemesinin hasarlı anizotropik davranışını açıklayan ve önerilen Hill'48 modelinin yeteneğini kabul edilebilir doğrulukta kanıtlamıştır. Erichsen şişirme testi ISO 20482:2003 standartlarına göre ve numune malzeme yüzeyleri yağlanarak gerçekleştirilmiştir.

Literatürde DD13 metal sünekliği, anizotropi ve sac metal şekillendirmedeki hasar hakkında sınırlı malzeme veritabanı mevcut olduğunu ileri sürmüşler ve bu çalışma ile sürekli hasar teorisine dayanan, gerçekçi DD13 davranışını ve şekillendirme işlemine tabi tutulduğunda sünek hasar oluşum etkisini tahmin etme kabiliyeti olan yerel bir yaklaşım modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışma ile gelecekte, sac metal şekillendirme işleminde malzeme davranışının daha doğru bir şekilde tahmin edilmesi için ilişkisel olmayan bir akış kuralının kullanımına odaklanmak olduğunu açıklamışlardır [48].

Magnezyum alaşımlarının zayıf mekanik özelliklerini geliştirmenin en önemli metodlarından birinin alaşım elementlerini ve malzemedeki konsantrasyonlarını iyi hale getirmek olduğunu belirtilerek, Esmailpour, H. vd tarafından, Mg-Gd-Y-Zn-Zr alaşımı, yeniden kristalleşme mekanizması ve doku gelişimi, 300–500 °C sıcaklık aralığında, termomekanik işlem sırasında incelenmiştir. Sonuçların, sürekli dinamik yeniden kristalizasyonun meydana gelmesi nedeniyle alaşımın işlenebilirliğinin önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, gerilerek şekillendirilebilirlik özelliklerinin de dikkate alındığı ve burada bir artış elde edildiğini belirtmişlerdir. 400 °C’de mükemmel bir esneklikle başarılı bir şekillendirilebilirlik elde etmişlerdir. İyi bir Erichsen Sabiti’nin elde edilmesini, doku zayıflaması ile ilgili olduğunu ileri sürmüşlerdir [49].

Timurkutluk, B. vd. farklı kalınlıklardaki Crofer 22 APU levhaların genel şekillendirilebilirlik özellikleri, katı oksit yakıt pilleri için olası bir uygulama için çekme, düzlem dışı Erichsen şişirme, geri esneme testleri ile deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel gerilme-gerinme eğrileri için Holloman denklemini, malzemenin anizotropik davranışında da Lankford parametreleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Düzlem dışı, Erichsen ve silindirik derin çekme (şişirme) testleri yapılmıştır (Şekil 2.8). Elde edilen sonuçlara göre Crofer 22 APU levha malzeme üzerinde katı yakıt hücrelerine (SOFC) benzer gaz kanallarının kalıplanmasının mümkün olabileceği hususunda umut vermiştir. Üretilen geometriler ve bükülme açıları ile birlikte farklı kalınlıkların, farklı çalışma sıcaklıklarında levha malzemelerin oksidasyon davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması gerektiği ve bu aynı zamanda gelecekteki çalışmalarda önemli konulardan biri olacağı vurgulanmıştır [50].



Şekil 2.8. Düzlem dışı a) Erichsen b) ve silindirik derin çekme deneylerinin c) deneysel kurulumu [50]

Rao B.V.S., patlama metoduyla birbirine kaynak yapılmış, değişik ebatlarda hazırlanmış 1 mm kalınlıktaki Al-Cu numune sac levhalarına, derin çekme işleminde karakteristik davranışlarını tespit etmek için Erichsen şişirme deneyi uygulamıştır. Bunun için kimyasal aşındırma ile numune malzeme yüzeyine ızgara desenleri oluşturmuştur. Çalışmada; Al-Cu bimetalik levhanın akma mukavemetinin, bimetalik levhalar üzerinde yapılan çekme testi sonucunda mukavemetin, tek tek Al veya Cu levhalardan daha yüksek olduğu bulmuştur. Araştırmacı tarafından Erichsen şişirme testinden sonra hem alüminyum hem de bakır taraf için bimetalik levhanın Şekillendirme Limit Şeması çizilmiştir. Erichsen şişirme test sonuçlarına göre, tekli malzemelerin şekillendirilebilirliğinin bimetal levhalara göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, çift metal levhaların şekillendirilebilirliğinin soğuk haddeleme işlemi sırasında artık gerilmeden etkilenmesi olabildiğini dikkate sunmuştur. İki temel malzemenin süneklik farkından dolayı alüminyum tarafta daha yüksek plastik deformasyon meydana geldiğini gözlemlemiştir [51].

Sandwich malzemeler çoğunlukla hafif ancak güçlü malzemeler gerektiren uygulamalar için tercih edilirler. K. Logesh vd. kaplama malzemesi olarak AA8011 ve AA1100 içeren kumlu malzeme ve rulo birleştirme işlemi kullanılarak polipropilen hazırlamışlar ve hadde yönüne göre 0° , 45° ve 90° kesilmiş numuneler üzerine çekme ve Erichsen şişirme testleri gerçekleştirmişlerdir. 0° hadde yönünde hazırlanmış sandwich levhanın daha sünek bir davranış gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Numunelerin nispeten iyi yük kapasitesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Erichsen testinde düşük hızlı darbe yüklerine dayanım gösterdiğini gözlemlemiştir [52].

Jasinski C. vd. DC04 derin çekme sacları için şekillendirilebilirlik değerlendirme sonuçlarını, geleneksel olarak gerçekleştirilen Erichsen şişirme testi ile elde edilmiş ve görme analizine dayalı iki gelişmiş yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçları şu şekilde açıklamışlardır: Erichsen şişirme testinin her iki gelişmiş analiz yöntemi, yani stokastik ızgara analizi ve lazer benek analizi, bu test sırasında elde edilen bilgi aralığının genişletilmesine izin vermiştir. Bu analizler, Erichsen Sabitinin belirlenmesinin yanında, çatlağın oluşumundan hemen önceki malzeme deformasyon aşamalarının izlenmesine de izin vermiştir. Yer değiştirmelerin ve deformasyonların ölçümü hem çatlama hem de bölgesel kriterlerinin geliştirilmesine yol vermiştir [53].

Jasinski C. vd. lazer beneklerine dayalı görsel olarak Erichsen şişirme testi analizi yapmışlardır. Bunun için DC04 ve DC01 sac malzeme kullanmışlardır. Çalışmada sadece standart Erichsen Sabitini belirlemeye değil, aynı zamanda çatlağın oluşumundan hemen önceki malzeme deformasyon aşamalarını takip etmeye izin veren karmaşık bir metodoloji ve deneysel prosedür sunulmuştur. Sac şekillendirmede, bu özelliklerin doğru bilinmesi özellikle otomotiv endüstrisi için önemli bir uygulama olacağını ileri sürmüşlerdir. Sac metal şekillendirme karmaşık bir imalat süreci olup başarısı birçok faktöre bağlı olması nedeniyle Erichsen Sabitinin daha iyi anlaşılması gerektiğini savunmuşlardır. Çalışmalarında sunulan deney düzeneği, Erichsen şişirme test cihazında şişirme sırasında numune yüzeyinin gözlemlenmesini sağlamıştır. Deforme olmuş numunenin dijital görüntüleri, numunede çatlama meydana gelene kadar sürekli olarak kaydedilmiştir. Numunenin pürüzlü yüzeyinden yansıyan koherent lazer ışığı ışınları birbirini etkilemiş ve sözde lazer benek görüntülerini oluşturmuştur. Benek görüntülerindeki değişiklikler, yalnızca bir oluk veya çatlak şeklindeki açıkça görülebilen kusurların anını değil, aynı zamanda onlardan önce gelen deformasyon geçmişini de algılamayı mümkün kılmıştır. Genişletilmiş şişirme test sonuçlarına göre çelik sacın kalitesinin ve sadece Erichsen Sabitinin belirlenmesinin, şekillendirilebilirliğin sayısal değerlendirmesi için yeterli olmadığını ispat etmişlerdir [54].

Basaeri A. vd. tarafından yüksek mukavemetli, düşük alaşımlı (HSLA) bir çelik olan E335D ve gelişmiş bir yüksek mukavemetli çelik olan (AHSS) DP600 çelik sac için şekillendirilebilirlik davranışının deneysel ve sayısal analizleri yapılmıştır. Başlangıçta tek eksenli çekme ve Erichsen şişirme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra deneysel ve sayısal yaklaşımla sonlu elemanlar modellemesi aracılığıyla Şekillendirme Sınır Diyagramı

(SSD) belirlenmiştir. Test edilen çeliklerin mikro yapısında ve özellikle kırılma yüzeyinde gözlenen benzerliğe rağmen, bunların şekillendirme davranışları ve özelliklerinin endüstriyel uygulamalarda dikkate alınması gereken önemli ölçüde farklı olduğu bulunmuştur. Buna göre; DP600 çeliği ferritik-martenzitik bir mikro yapı sergilerken, E335D çelik saclarda ferritik-perlitik mikro yapı olduğu tespit edilmiştir. Çekme testinde, DP600 çeliği ile ilgili olarak daha yüksek bir akma ve çekme mukavemeti, uzama ve iş sertleştirme üssünün, muadiline göre daha düşük anizotropi katsayısının işareti olduğu gözlemlenmiştir. Mikroyapısında bir martenzit fazının varlığı sebebiyle, DP600 çelik sacların diğerine göre daha yüksek sertlik gösterdiği görülmüştür. DP600 çeliğinin Erichsen şişirme testinde, Erichsen Sabiti daha düşükken, zımba kuvveti emsallerine göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Şekillendirme Sınır Diyagramları belirlenmiş ve aralarında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. E335D çeliğinin kırılma yüzeyi, sünek yırtılma özelliği olan tipik bir çukur morfolojisi sergilemiştir. Ayrıca, DP600 çeliğine ilişkin olarak, kayma problemlerine işaret eden yarılma bölgeleri ile birlikte bir çukur ağı gözlemlenmiştir [55].

Choubey, A., K. vd. kalınlıkları 1,5 mm olan soğuk haddelenmiş alüminyum alaşımı (AA1100) ve paslanmaz çelik (SS304) sac numuneler, Erichsen şişirme testi ve Vickers sertlik testleri yapılarak, malzemelerin baskı plakasız bir kalıp tasarımı ile silindirik ve konik derin çekme de kalıp ve zımba geometrisi, kabın kalınlık dağılımı, yarım koni açısı, kalıp ve zımba radyüs yarıçapı ve çekme yükünün etkilerinin deneysel ve matematiksel analizini gerçekleştirmişlerdir. Derin çekmenin başarıyla gerçekleştiğini, simülasyon sonuçlarının hem deneysel sonuçlar ile hem de matematiksel model ile eşleşerek iyi bir uyum gösterdiğini ve hatanın minimum seviyede olduğunu ortaya koymuşlardır. Numunelerin mikro yapısında, gerilmelerin, kabın duvar bölgesinde etkili olduğunu tespit etmişlerdir [56].

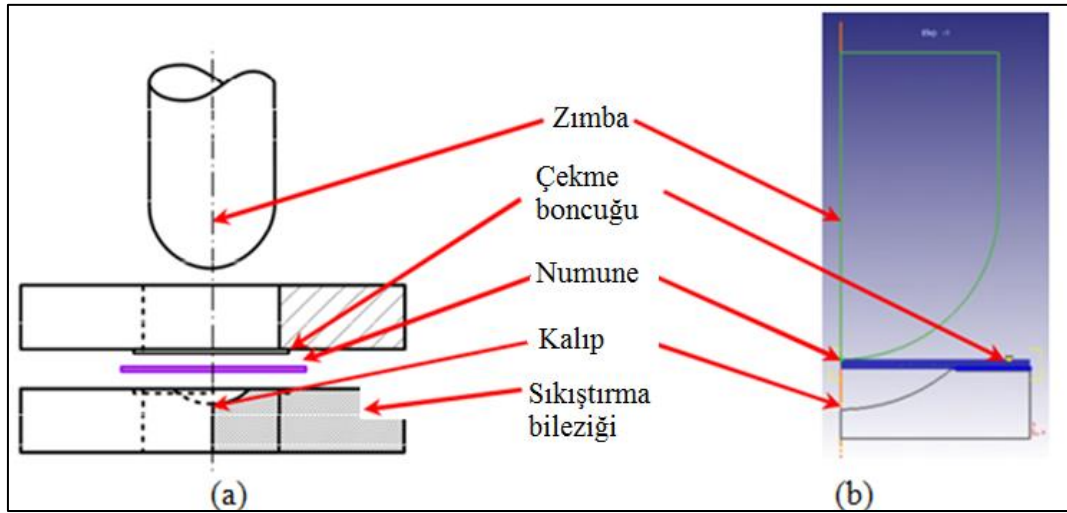
Jiandi D. vd. cep telefonlarına ve bataryalı otomobillere talebin artmasıyla beraber yüksek güçlü lityum iyon pil kabuklarına ihtiyacı da beraberinde getirdiğini belirtmişlerdir. Lityum pillerin minyatürleşmesi ihtiyacına karşılık, geleneksel olarak kullanılan 3003 Alüminyum alaşımı bu ihtiyacı karşılayamadığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, mekanik özellikleri ve şekillendirilebilirliği daha da geliştirmek için Al-Cu-Mn-Mg-Fe alaşımlarına CeLa eklenmiş ve alaşımların mikroyapısı, elektriksel iletkenliği ve mekanik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınımı, Girdap Akımı iletkenlik test cihazı, çekme testi ve Erichsen şişirme testi ile incelenmiştir. CeLa içeriğinin artmasıyla alaşımların elektriksel iletkenliğinin azaldığı, gerilme mukavemetini $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ila $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişen

sıcaklıklarda büyük ölçüde artırabildiği tespit edilmiştir. CeLa ilavesindeki artışa bağlı olarak şişme yüksekliğinin çok az değiştiği görülmüştür [57].

Kamikawa A. vd. zımba ve sac kalınlığının yük-uzama eğrilerini nasıl etkilediğini sistematik bir şekilde araştırmak üzere düşük karbonlu çelik sac malzemeye Erichsen şişirme testi uygulamışlardır. Elde ettikleri eğrileri sayısal olarak analiz etmişlerdir. " $E_{total} = E_{uniform} + E_{Post-uniform}$ " denklemi ile, analiz için toplam uzamayı, düzenli ve düzenli olmayan yer değiştirme olarak sınıflandırmışlardır. Başlangıçtan en büyük yüke kadar olan kısmı düzenli, çatlağın oluşumuna kadar olan kısmı da düzenli olmayan yer değiştirme olarak adlandırmışlardır. Araştırmacılar en büyük yükün zımba çapı ve sac kalınlığı ile orantılı olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Numune sac malzemenin ebatlarının yük-uzama eğrisini etkilemediğini açıklamışlardır. Sabit yer değiştirme, zımba çapı ile doğru orantılı arttığı ancak kalınlığından bağımsız olduğu görülmüştür. Diğer taraftan zımba çapından daha az etkilendiğini tespit etmişlerdir. Test sırasında zımba yükünü tahmin etmek için deneysel bir formül geliştirmişler. Geliştirdikleri denklemin, elde ettikleri yük-uzama eğrilerini makul bir şekilde açıklayabildiğini ispat etmeye çalışmışlardır. Erichsen Sabitini, zımba çapına bölerek, sac malzeme kalınlığı ile zımba çapı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu kanıtlamak istemişler ve bu şekilde Erichsen Sabitini normalleştirmeyi önermişlerdir [58].

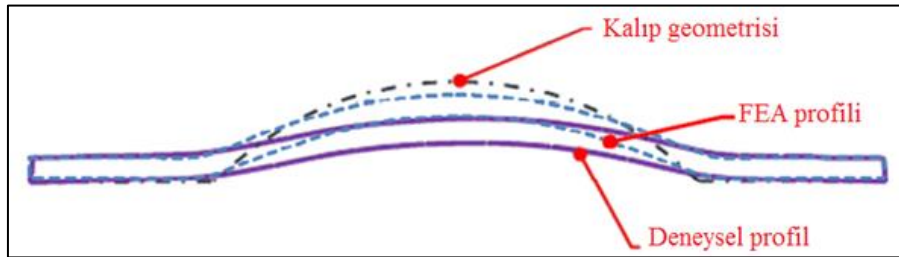
Fann, K. J., vd. endüstriyel alanda belirli yerlerde kullanılan N-Ti şekil hafızalı alaşım numune sac malzemelere, oda sıcaklığında Erichsen şişirme testine benzer bir metodla çekme gerilmesi uygulamışlardır (Şekil 2.9). Alaşım levhanın deformasyonunu analiz etmek üzere DEFORM 3D yoluyla elastik-plastik bir sonlu eleman oluşturulmuştur [59].

Gerçekleştirilen şişirme testinde 4,1 mm gibi düşük bir Erichsen benzeri bir sabit değer elde etmişlerdir. Oluşturulan şişmenin tepe noktasının, Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) tarafından elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında nispeten düz ve geri esneme ile daha düşük değerde olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.10).



Şekil 2.9. Erichsen şişirme testine benzer soğuk şekillendirme Ni-Ti şekil hafızalı alaşım levha: a) deneyin şematik kurulumu b) FEA için rotasyon simetrik modeli [59]

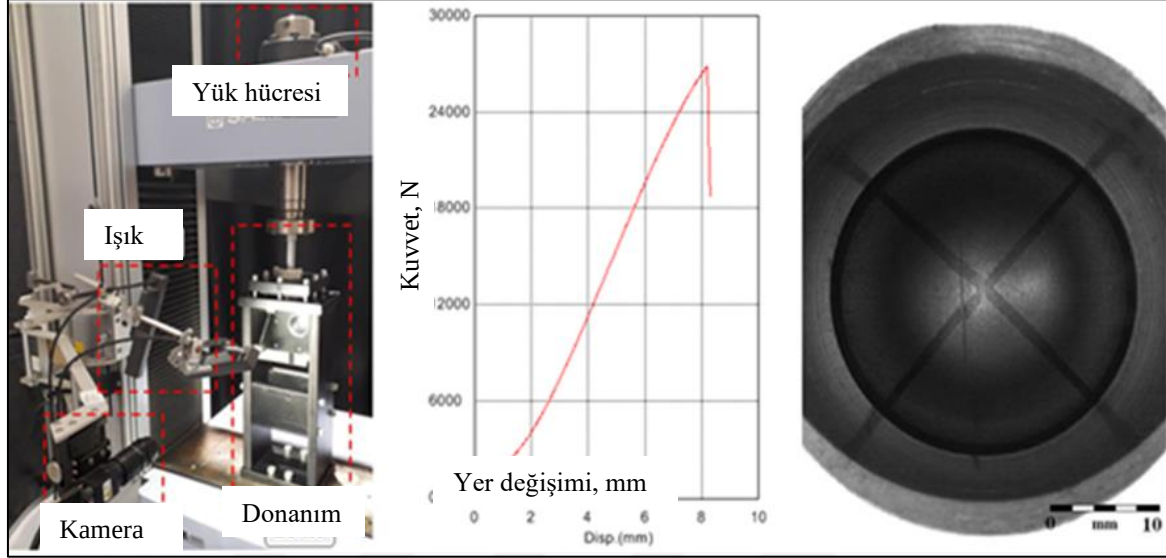
Sonuç olarak hem deney hem de analiz, Ni-Ti şekil hafızalı alaşım levha için soğuk şekillendirmenin pratik olmayabileceğini göstermektedir, çünkü geri esneme, çift eksenli çekme gerilimi durumunda maksimum ulaşılabilir bir deformasyon için hala çok yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [59].



Şekil 2.10. Deney ve FEA ile elde edilen Ni-Ti şekil hafızalı alaşımın kalıp geometrisine kıyasla profili [59]

Santos R., O., vd. yaptıkları bu çalışmayla, universal bir test makinesi kullanarak Delik genişletme testi (HET) ve Erichsen şişirme testi (ECT) testlerini gerçekleştirebilen düşük maliyetli bir mekanik cihaz geliştirmişlerdir (Resim 2.3). Cihaz tasarımında ekipmanların, ISO 16630 (HET) ve ISO 20482 (ECT) standartları tarafından belirlenen test parametrelerini karşılayacak şekilde göz önünde tuttuklarını açıklamışlardır. Cihazın işlevsellik ve doğruluk testlerini, çift fazlı DP600 ve DP780 çelik sac malzemeler ile yapmışlardır. Delik genişleme oranı ve Erichsen indeksi için belirlenen, karşılık gelen değerler, önerilen test cihazının

doğruluğu ve tekrarlanabilirliği açısından güvenilir sonuçlar sağladığını gözlemlemişlerdir [60].

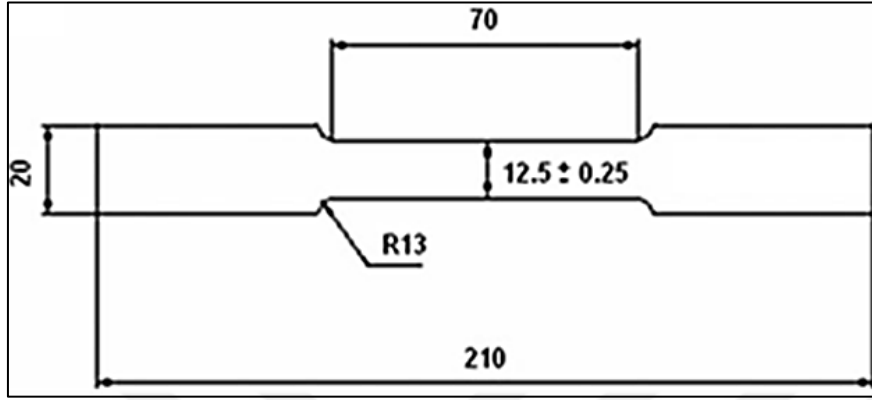


Resim 2.3. a) Çekme testi makinesi, b) Zımba kuvvetine karşı zımba hareketi grafiği, c) Ayna projeksiyonundan elde edilen deforme olmuş bölge görüntüsü [60]

Yapılan çalışma, ince saclar için delik genişletme ve Erichsen şişirme testi işlemlerini yapabilecek basit, düşük maliyetli ve evrensel bir cihaz tasarlama amacı taşımaktadır. Cihaz, yaklaşık 186x130x500 mm boyutunda imal edilmiştir. Test cihazının tasarımında en önemli husus, cihazının, delik genişletme oranı ve Erichsen sabiti için pratik değerleri ortaya koymasındır. Test masasına uyarlanabilen ve bir aparat olarak AISI 1045 çeliğinden yapılan cihazın azami zımba kurs boyu 50 mm olarak imal edilmiştir. Zımba ise AISI D2 çeliğinden yapılmıştır [60].

Otomobil üreticilerinin gövde üretiminde yaygın olarak kullandıkları TWIP 900 CR çeliğin şekillendirilebilirliğini araştırmak için, Kılıç, S. vd. kapsamlı bir analizini amaçlamışlardır. Bu nedenle TWIP 900 CR çeliğinin çekme, bükme, Erichsen şişirme ve silindirik kaplar için derin çekme testleri dahil olmak üzere kapsamlı deformasyon analizi yapılmıştır. Şekil 2.11’de çekme deneyi için hazırlanmış numunenin boyutları gösterilmiştir. Ayrıca malzemenin değişik modellerde performanslarını görebilmek için U ve V bükme analizleri, sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlardan, malzemenin Erichsen sabiti ve derin çekme performansının oldukça yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. TWIP çeliğinin mekanik özellikleri itibarıyla iyi durumda olduğu fakat geri esneme

özelliğinin yüksek olması bir dezavantaj teşkil ettiğini açıklamışlardır. Geri esneme tahmini için tercih ettikleri Yld2000-2d malzeme modelinin Hill48 modelinden daha iyi olduğunu da vurgulamışlardır



Şekil 2.11. ASTM E8 Standardına göre çekme testi numunesi boyutları [61]

Ancak elde edilen mevcut bulguların üzerinde fikir birliği sağlanamaması sebebiyle henüz evrensel olarak kabul görmediğini açıklamışlardır; bu nedenle, çeliğin çeşitli deformasyon modları altında detaylı analizinin ele alınması gerektiğini dikkate sunmuşlardır [61].

Sekhar, R., A. çalışmasında Şekillendirme Sınır Diyagramının (ŞSD), sac metallerin şekillendirilebilirliğinde en güvenli bölgeyi öğrenmenin kolay ve verimli yolu olduğunu belirtmiştir. 1 mm kalınlıkta AA5052 H32 levhanın ŞSD'nı incelemiştir. Literatüre uygun çeşitli ölçülerde (Çizelge 2.5) hazırlanan malzemelere tek eksenli çekme testi ve Erichsen şişirme testi uygulamıştır. Aynı testleri 345 °C tavllanmış numuneler üzerinde de denemiştir. Hem normal koşulda hem de tavllanmış numunelerin ŞSD'ları Sekhar, R., A. tarafından çizilmiştir. Tavllanmış numunelerin, normal numunelere göre daha iyi şekillendirilebilirlik gösterdiği, ŞSD ile belirtilmiştir. Numune malzemelerin genişliği azaldıkça yırtılmanın merkezden kenarlara kaydığı gözlemlenmiştir (Resim 2.4). Genişlik azaldıkça, yırtılma Erichsen test numunelerinin merkezi yerine kenarların yakınında yoğunlaştığını, anılan malzemenin tavllanması durumunda daha iyi şekillendirilebilirlik elde edildiğini açıklamıştır [62].

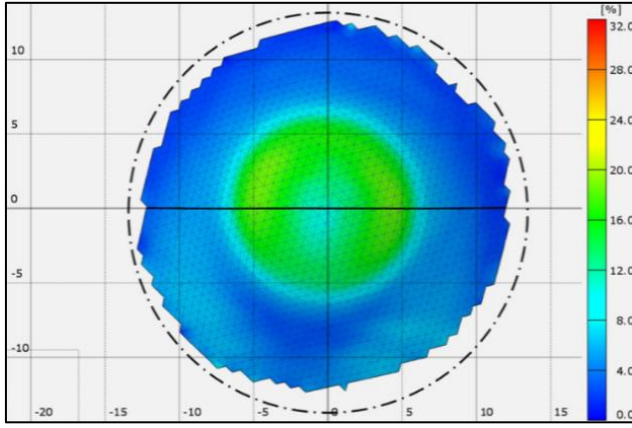
Çizelge 2.5. Her iki test için kullanılan numunelerin boyutları [62]

Numune Tipi	Numune Genişliği, W, mm	Numune Uzunluğu, L, mm	Çentik Yarıçapı, r, mm	Çentik Uzunluğu, L ₁ , mm
Çentikli Numune (Tek eksenli gerilim testi)	a) 50 b) 50	a) 150 b) 150	a) 10 b) 12	a) 70 b) 70
Dikdörtgen Numune (Erichsen Şişirme Testi)	a) 60 b) 40 c) 25 d) 10	a) 90 b) 90 c) 90 d) 90	Çentik yok	



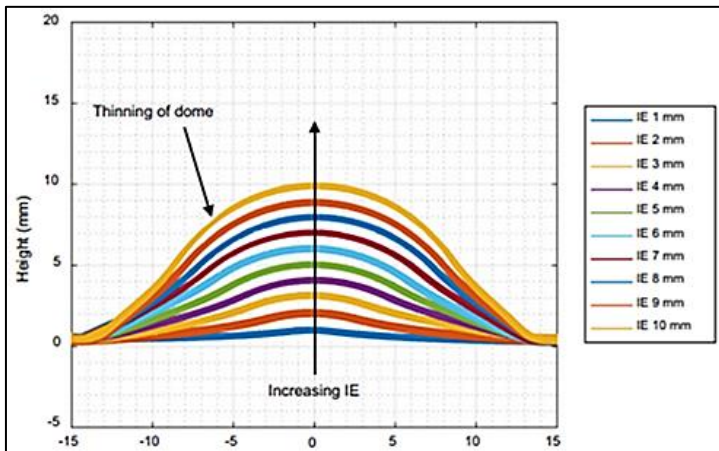
Resim 2.4. Erichsen şişirme testine tabi tutulan dikdörtgen numuneler [62]

Sorce, F., S. vd. bugüne kadar, Erichsen testinin, kaplamaların yırtılma üzerindeki etkilerini anlamak için kullanılmadığını ileri sürmüşlerdir. Mevcut çalışma, Erichsen Sabitine (ES) karşı en yüksek şekillendirilebilmeye sahip bir ana eğri oluşturmak için sonlu elemanlar modeli üzerinden Erichsen şişirme testindeki yüzey gerilmelerini ölçmeyi amaçlamıştır (Şekil 2.12). Erichsen şişirme testi ile bir kaplamanın davranışını anlamak, polimerin şekillendirilebilirliği, malzeme özellikleri ve kimyasal yapısının daha yakından bağlanmasına imkân tanıyacak ve daha iyi kaplamaların geliştirilmesini sağlayacağını belirterek, kaplamaların davranışlarını nicel olarak incelemişlerdir. Bu çalışma için yaklaşık 0.6x150x250 mm ebatlarında kaplamalı çelik paneller hazırlanmıştır. Polyester kaplama malzemesi olarak 80:20 oranında bir reçine ve bir çapraz bağlayıcı tercih edilmiştir [63].



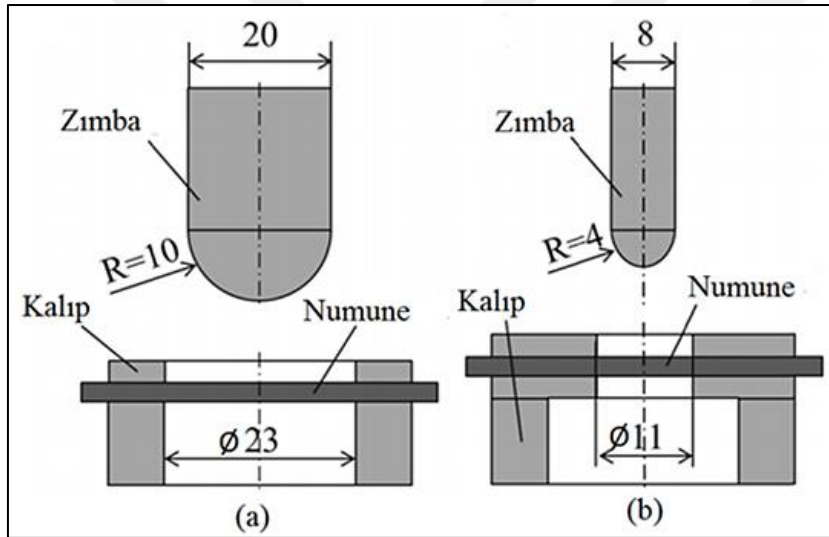
Şekil 2.12. Erichsen şişirme testinde 3D DIC ile belirlenen ve ES=60 mm yüzey gerinim haritasının temsili resmi [63]

Şişirme sırasında herhangi bir çatlama yüksekliğinde kaplama yüzey gerinimlerini hesaplamak için sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve dijital görüntü korelasyon (DIC) yardımıyla şişme sırasında elde edilen görüntü ve değerler kullanılarak sonuçları doğrulama yoluna gitmişlerdir. Bu yeni uygulama, bobin endüstrisinde kullanılan kaplamaların performansını analiz etmek için asırlık bir tekniği yeniden geliştiren nicel bir yöntem sağlayacağını iddia etmişler; kaplamadaki en büyük gerilme ile Erichsen Sabiti arasında basit ve sağlam bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Kaplamanın yırtılma geriliminin ilk kez Erichsen testinden elde edilmesini sağlamışlar, aynı zamanda nitel bir testi nicel bir teste dönüştürdüklerini ispatladıklarını belirtmişlerdir. Şekil 2.13'te Erichsen Sabitinin (ES) artmasıyla kubbenin deneysel kesit profillerinin ilerlemesi gösterilmiştir [63].



Şekil 2.13. ES artışıyla kubbenin deneysel kesit profillerinin değişmesi [63]

Uriya, Y. vd. termoset reçine ve sürekli liflerden oluşan karbon fiberle güçlendirilmiş plastik (CFRP) in özgül gücünün gelişmiş yüksek mukavemetli çelikten yaklaşık 20 kat daha fazla olduğunu ileri sürmüşlerdir. CFRP levhalar, uçaklar, otomobiller ve binalar gibi yapılarda gün geçtikçe daha yaygın kullanılmakta olduğunu belirtmişlerdir. (CFRP) levhaların şekillendirilebilirlik deformasyonunu, oda sıcaklığında ve 100 °C ısıtmak olmak üzere iki ortamda gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmayla, CFRP levhaların Erichsen Sabiti ve yapılarının, gererek şekillendirilebilirliğini incelemek olduğunu dile getirmişlerdir. Numune levhalara Erichsen şişirme testi uygulamışlardır (Şekil 2.14). Deformasyon için ISO standartlarında 20 mm ve 8 mm küresel uçlu zımba ve kalıp boşluğu 27 mm ve 11 mm kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 2.14. a) Büyük boyutlu b) Küçük boyutlu Erichsen testinin zımba ve kalıbı [64]

Numune malzemeleri sabitlemek için cam elyafı plastikten (GFRP) yapılmış levhalar tercih edilmiştir. Bu şekillendirme testleri metaller için yapılmasına rağmen, CFRP levhalara da uygulanabileceğini iddia etmişlerdir. Erichsen şişirme testine referans olarak CFRP numune levhalar için uygun germe testi geliştirmişler, test sırasında ortaya çıkan bazı problemleri numunenin her iki yüzüne yapıştırılan GFRP tırnakları ile malzemenin kalıp boşluğu içine kaymasını engellemişlerdir. Bu şekilde test doğru ölçüldüğünü açıklamışlardır. Lif yapılarına göre 4 sınıfta inceledikleri numunelerin Erichsen sabitleri Çizelge 2.6'da gösterilmiştir [64].

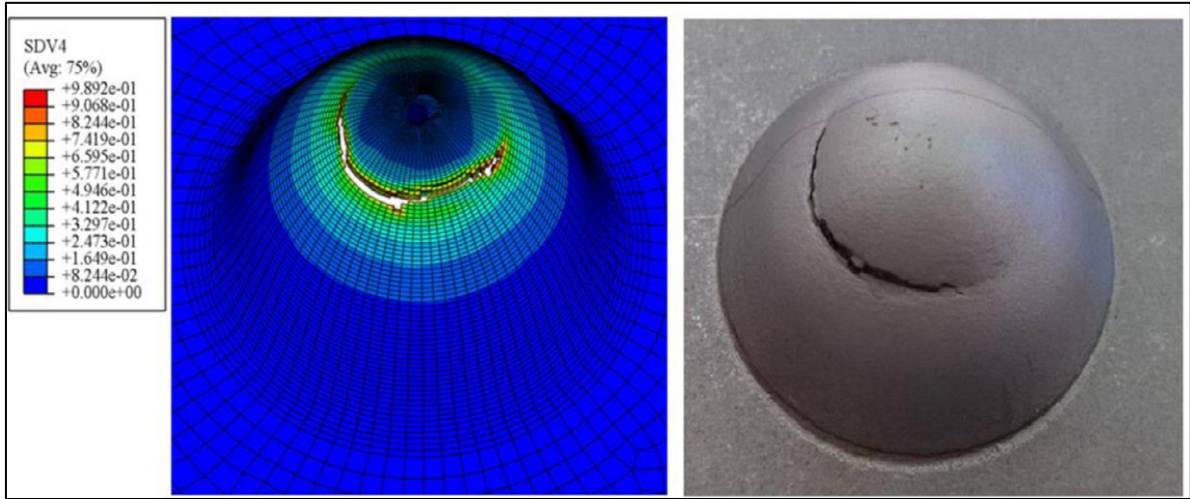
Çizelge 2.6. Dört yapının Erichsen Sabiti [64]

Yapı	Oda sıcaklığı				100 °C 'de şekillendirme			
	ES, mm	Yük, kN	Uzama, %	Gerilim, GPa	ES, mm	Yük, kN	Uzama, %	Gerilim, GPa
A: [0/0/0/0/0/0]	2.81	0.924	15.14	0.098	1.98	0.667	8.32	0.198
B: [0/90/0/0/90/0]	2.25	1.498	10.22	0.158	4.62	2.355	38.42	0.020
C: [0/90/TW/90/0]	2.31	1.524	10.68	0.150	3.09	1.742	18.12	0.076
D: [0/90/0/TW/0/90/0]	2.32	1.700	10.76	0.149	2.69	2.027	13.97	0.108

2.4. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

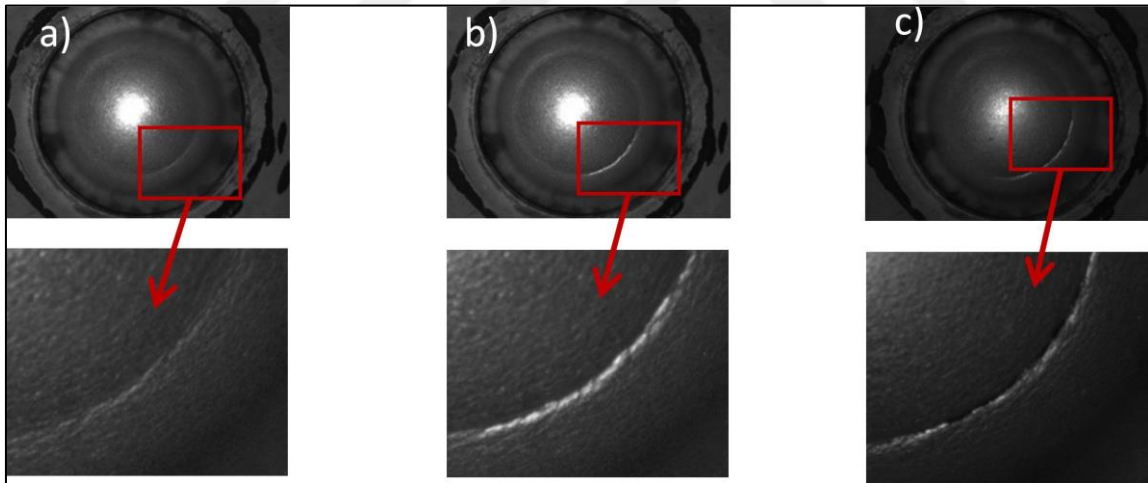
Erichsen Şişirme testi, değişik ortamlarda sac metal ve metal olmayan parçaların derin biçimlendirme öncesinde malzemenin şekillendirilebilme karakteristiğinin analizi açısından önemli bir yer tutmaktadır. Sadece tek malzemedan hazırlanan sac metal numunelere değil aynı zamanda laserle, gaz altı yöntemlerle ve elektrotla kaynak işlemleri yapılan sac metal aynı ve farklı malzemelerden oluşan birleştirmelerin kaynak kalitesinin bir göstergesi olarak da Erichsen testinin, son yıllarda akademik araştırmalarda artan bir ilgi çektiği söylenebilir. Bu gibi çalışmalara örnek teşkil edecek araştırmalar yapıldığı görülmeye rağmen, bu çalışmanın amacı bakımından bu çalışmaların özetlerine burada yer verilmemiştir.

Literatürde yapılan araştırmalar, çeşitli ortam ve şartlarda Erichsen Şişirme deneyleri ile ilgili birçok ülkede birçok araştırmacının çalışmalar yaptığını göstermiştir. Ayrıca bu çalışmaların artarak devam ettiği de görülmektedir. Erichsen şişirme deney yönteminin uygulanmasında zımba küre çapının, sac malzemenin genişliğinin, kalınlığının, yağlamanın, sıcaklığın, zımba kuvvetine ve ES'ne etkisinin büyük olduğunu göstermiştir. Erichsen şişirme deneylerinin analizi için değişik sayısal çözümleme programları ve teknikleri kullanıldığı da görülmüştür. Ls-Dyna sonlu elemanlar yazılım paketi, Deform 3D, Kristal Plastisite Sonlu Eleman Yöntemi (CPFEM), Abaqus, Elektron Geri Dağınık Kırınım (EBSD) tekniği bu program ve tekniklerden başlıcalarıdır. ES, kuvvet ve zaman arasındaki ilişkiyi analiz etmek için matematiksel modellemeler ve simülasyon programları da kullanılmıştır (Şekil 2.15). Analiz sonuçlarına göre çekme parametrelerinin etkileri, numune sac malzemenin ES'i, şişirme esnasında oluşan anlık kuvvet ve deformasyon kuvvetlerindeki değişimler, boyun verme bölgesi, şişirme hızı, ortam sıcaklığının etkileri, yağlama durumunda oluşan parametrik değişimler araştırılmıştır.



Şekil 2.15. Test parçasındaki yırtılma yeri [48]

Literatür araştırmalarında, şişirme testi uygulanan sac metal numunelerde boyun verme ve yırtılmanın çoğunlukla tepe noktasından ziyade tepe noktasına yakın çevrede meydana geldiği görülmüştür (Resim 2.5).



Resim 2.5. Şişme sırasında çanak görüntüleri ve yükseklikleri [mm]: a) Boyun verme, b) Çatlama aşaması, c) Sac ayırma, d) Yükseklik ölçüm sonuçları [53]

Literatür araştırmalarından; sac/şerit malzeme şekillendirilebilirlik testleri arasında Erichsen şişirme testinin, gerçek üretim sürecinin sınırına yakın davranışı tespit ettiği ve bu nedenle çok tercih edildiği tespit edilmiştir. Literatürde yapılmış çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, farklı bir Erichsen şişirme testi donanımının tasarımı ve imalatı yapılmış; literatürde üzerinde çalışılmamış AA1050 %99,53 saf alüminyum sac malzemenin şişme davranışı; 3 farklı zımba hızında ve 3 farklı zımba çapında ayrı ayrı incelenmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalarda faydalanılan ve ticari bir marka altında hazır temin edilebilecek Erichsen Testi donanımlarının ya tamamen mekanik ve manuel kullanılabilir olduğu veya hidro-mekanik tahrikli yapıda imal edildiği görülmüştür. Bu tez çalışmasında; literatürde yer almayan DC servo motor ve redüktörler üzerinden ihtiyaç duyulan şişirme şekillendirme kuvvetleri sağlanmış ve bilyalı vida somun çiftleriyle hem hassas konum kontrolü elde edilmiş hem de donanımın çok sayıda test için tekrarlanabilirlik niteliği en üst değere yükseltilmiştir.





3. KAVRAMSAL BİLGİLER VE KURAMSAL TEMELLER

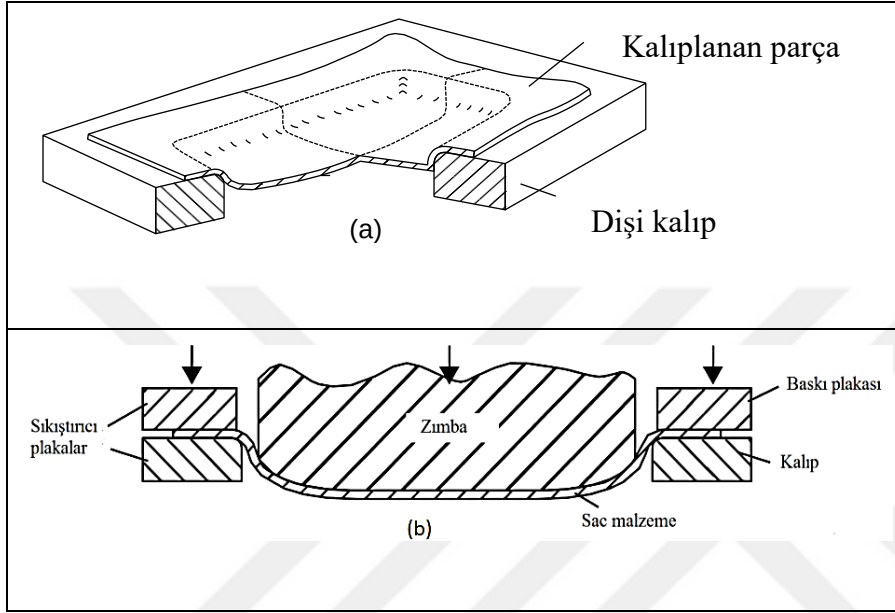
Günümüzde pek çok uygulama alanı bulan sac şekillendirme, büyük önem taşımaktadır. Sac malzemeler, şekillendirilebilmelerine karşı hassas davranmaktadırlar. Bu nedenle seçim yapılabilmesi için sac malzemelerin şekil alabilir özelliklerinin iyi tanınması gerekir. Sac metal levhaların şekillendirme işlemlerinde genel olarak kesme-delme, bükme ve çekme olmak üzere üç farklı yöntem yaygınlaşmıştır. Delme-Kesme kalıplama, pres kalıpcılığında en çok kullanılanıdır. Kesme kalıplarının sınıflandırılması, kesmenin tanımı ile belirlenebilir. O halde kesme, levha halindeki metal veya metaldışı yarı mamülün bir hat boyunca veya planlanan biçimde birbirinden ayırma işlemine kesme denir. Kalıp imalatçısının iyi bir kalıp planı yapabilmesi için kesme esnasında meydana gelen olayları gayet iyi bilmesi gerekir [65].

Bükme, sıcak veya soğuk olarak, tarafsız eksen etrafında bir malzemenin, talaş kaldırmadan, kuvvet uygulayarak, yüzey doğrultularının yönlerini değiştirme işlemi olarak tanımlanır. Bükme işlemi, malzemenin plastik deformasyona uğramış halidir denebilir. Düz bir çizgi boyunca bükme, tüm sac şekillendirme işlemlerinin en yaygın olanıdır; bir kalıptaki tüm kıvrım boyunca şekillendirme veya özel makinelerde silme, katlama veya kıvrıma veya tabakayı bir kalıptaki bir yarıçap üzerinde kaydırmak gibi çeşitli şekillerde yapılabilir [66].

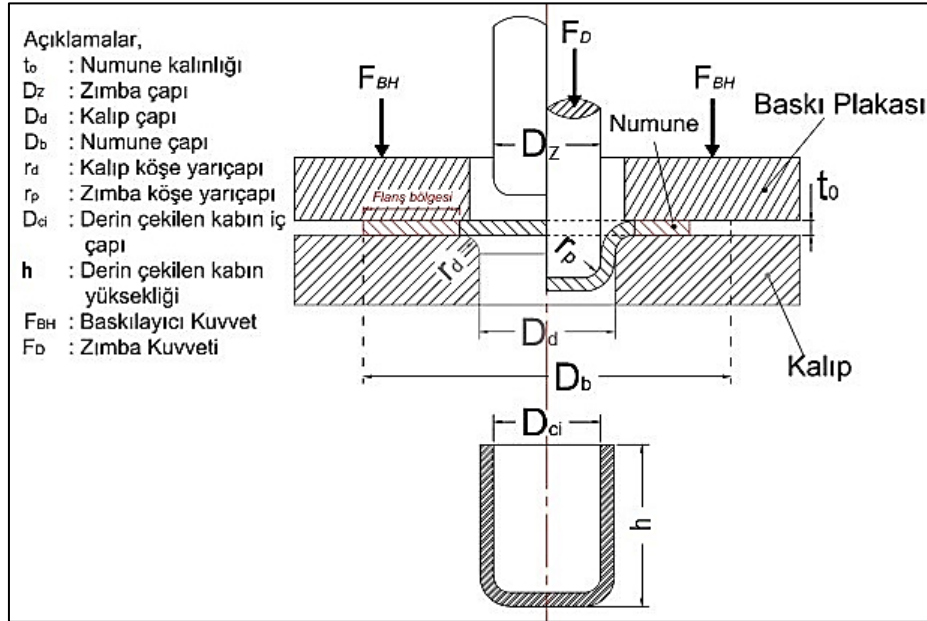
Düz plakaların kalıplar aracılığıyla ve pres altında çöktürülerek belirli derinlik ve profillerde istenilen kap şekline sokulması işlemine “çekme” adı verilmektedir. Çekme işlemi, sac biçimlendirme metotlarında en önemli yeri teşkil eder ve bir grup biçimlendirme işleminden meydana gelir. Çekilen parçaya istenilen şekil, kompleks bir eğme ve bükme işleminin sonucunda verilmiş olur. Kapalı şekilde silindirik, dikdörtgen veya benzer şekilli parçaların çekilerek üretilmesi en çok kullanılan ve en önemli imalat yöntemlerinden biridir [67]. Bu işlem tek seferde yapılıyorsa “sığ çekme” olarak adlandırılmaktadır.

Derinliği fazla olan kapların çekme işleminde farklı bir yol izlenir. Bu kaplar birkaç defa çekme işleminden geçirilerek elde edilir. Yapılan çekme işlemi, “derin çekme” olarak isimlendirilmektedir [65, 69].

Gerçekte derin çekme, metalik düz levhadan üç boyutlu bir kap elde etmek olarak ta tanımlanabilir. Derin çekme, sac levhalardan silindirik veya köşegen kaplar elde etmek için kullanılan yöntemlerin en önemlisidir. Şekil 3.1’de sığ çekme, Şekil 3.2’de derin çekme görüntüsü kesit resmi verilmiştir.



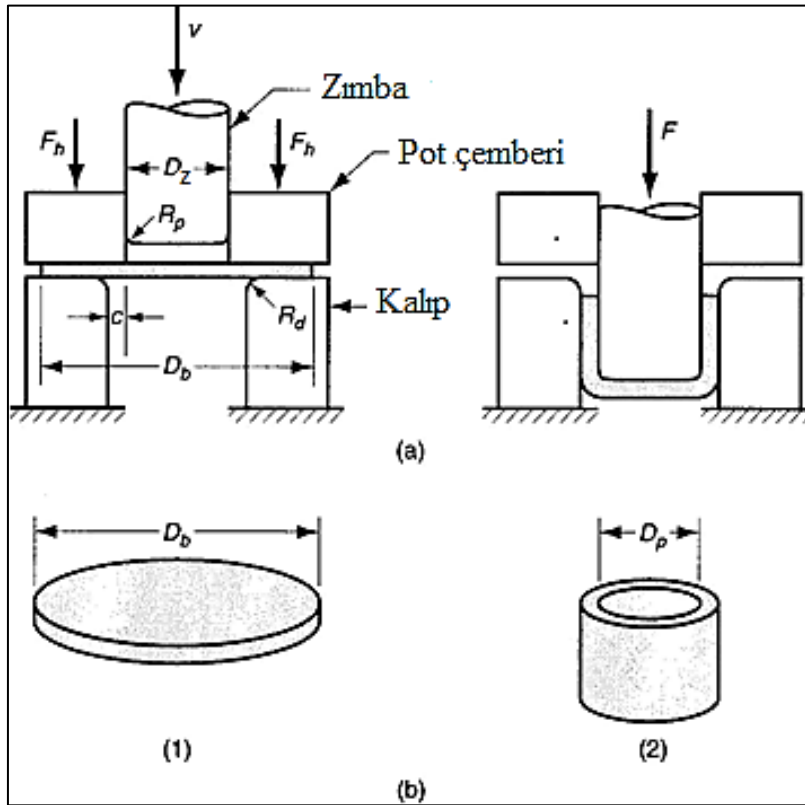
Şekil 3.1. Sığ çekme [66]



Şekil 3.2. Derin çekme ve analizi [68]

3.1. Klasik Kalıplama Yöntemi ile Çekme İşlemleri

Fincan şekilli, kutu şekilli veya başka bir kompleks-kıvrımlı ve oymalı bir parça yapmak için kullanılan bir sac metal oluşturma işlemidir. Düz sac tabakaların kalıplar aracılığı ile pres altında çökertilerek belirli bir derinlik ve profillerde kap şekline sokulması işlemine “çekme” ismi verilmektedir [65]. Şekil 3.3’te olduğu gibi sac metal, bir zımba ile kalıp boşluğuna itilir. Sac malzeme genellikle kalıp boşluğuna karşı düz tutulmalıdır. Genel olarak çekme ile yapılan imalatlar, içecek kutuları, mühimmat mermileri, lavabolar, mutfak eşyaları, otomobil ve havacılık endüstrisinde gövde panellerini içerir [70].

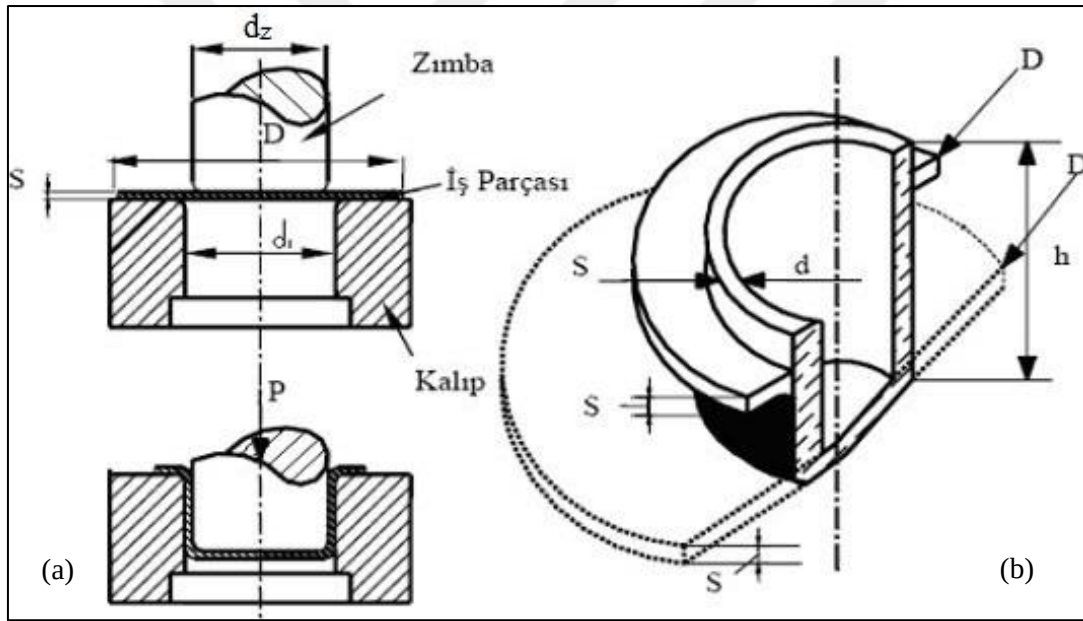


Şekil 3.3. a) Silindirik çanak şekilli bir parçanın çekimi: 1) zımba temaslarından önce çalışmaya başlama ve 2) strok sonuna yakın ve b) karşılık gelen çalışma bölümü: 1. sac malzemenin ilk hali ve 2. sac malzemenin çekilmiş hali. Semboller c: Zımba- kalıp arasındaki boşluk, D_b: Sac malzemenin çekilmeden önceki çapı, D_z: Zımba çapı, R_d: Kalıp köşe radyüsü, R_p: Zımba köşe yarıçapı, F: Çekme kuvveti, F_h: Baskı plakası kuvveti [70]

Şekil 3.4’te çekme işleminin oluşumunun şematik ve perspektif görüntüsü verilmiştir. Klasik çekme kalıplama yoluyla sac metal malzemeye şekil verme işlemi, çok yaygın bir üretim şeklidir. Klasik bir kalıplama işleminde, çekilecek parçanın şekline ve malzeme cinsine göre

çeşitli kalıplama yöntemleri kullanılmaktadır. Klasik kalıplama ile çekme işlemleri; baskı plakalı çekme, baskı plakasız çekme ve ters çevirme çekme olmak üzere temelde üç ana gruba ayrılmıştır [72].

Yapılan araştırmalar sonucu, klasik kalıplama yöntemiyle sac çekme işlemi konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu konu üzerinde deneysel ve teorik olarak çok sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda temel olarak, daha iyi çekme oranı elde etmek ve farklı geometrilerin çekme ile şekillendirilebilirliğini sağlamak amaçlanmıştır. Bu amacı gerçekleştirmek için, baskı plakası kuvveti ve şekli, zımba profili, kalıp boşluğu, çekme kuvveti, zımba kavisi ve malzemenin etkisi gibi değişkenlerin, çekme yüksekliği, kırışıklık oluşumu ve et kalınlığı değişimine etkileri incelenmiştir [73-74].



Şekil 3.4. Çekme işleminin oluşumu, a) Şematik, b) Perspektif [71]

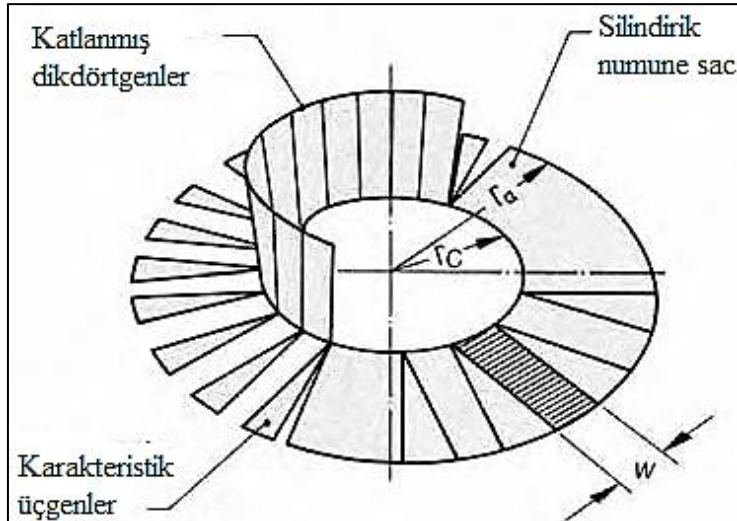
3.2. Baskı Plakalı Çekme Kalıplama

Sac malzeme kalınlığının az olduğu veya çekme yüksekliğinin büyük olduğu durumlarda kırışıklıkları önlemek amacıyla baskı plakasının kullanıldığı çekme işlemidir. Baskı plakası çekme esnasında sac malzemenin akmasını sınırlamakta ve kontrol etmektedir. Bunun sonucu olarak da kırışıklık oluşumu engellenmektedir [72]. Bu tür çekme işlemi, işlenmemiş ilkel boyutta sac malzeme, çekme zımbası, çekme kalıbı ve baskı plakasından oluşan takım grubu ve malzemedir. Gerekli ölçülerde hazırlanmış ve “pot” da denilen işlenmemiş

sac, bir dişi kalıp üzerine yerleştirilmekte ve bir erkek zimba tarafından kuvvet uygulanarak kap haline getirilmektedir. Kap haline getirilen sac daha dar kalıplardan tekrar geçirilmek suretiyle çok kademeli şekillendirme yapılabilmektedir. Birinci kademe şekillendirme sırasında sacın dış çapı daralmaya zorlanması nedeniyle flanş bölgesinde katlanmaya zorlanmaktadır [75]. Bu katlanmanın engellenmesi ve sacın düzgün bir şekilde kalıp içerisine doğru itilebilmesi için bir bastırıcı plaka kullanılmaktadır. Bu plakayla saca uygulanan kuvvet sacın geriye doğru akarak şekil almasını sağlamaktadır. Bastırıcı plakanın uyguladığı kuvvete bağlı olarak kapta yırtılma ya da kırılmalar görülebilmektedir.

Derin çekilmiş içi boş kap tekrar eski dairesel haline dönüştürülmüş olsa, Rc yarıçaplı kabın tabanı değişmeden kalır. şekil 3.5'te görüldüğü gibi kabın flanş kısmında oluşan katlanmalar dikdörtgen ve üçgenlerin oluşmasına neden olur. ekilmiş kabın duvarları da genişliği w ve $r_a - r_c = a$ olan biri dizi dikdörtgenden oluştuğu görölür. Üçgen alanlar, dörtgenler arasında “karakteristik üçgenler” olarak kalır [78].

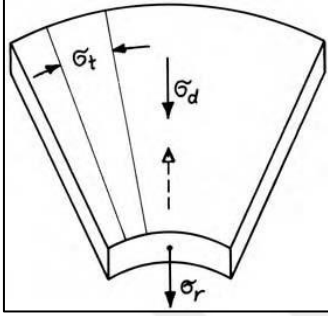
Derin ekme sırasında katlanmış dikdörtgenler, çekilmiş parçanın duvarlarını oluşturur. Flanş kısmında, dikdörtgenler arasında karakteristik üçgenler oluşur [78].



şekil 3.5. Derin ekme sırasında oluşan katlanmış dikdörtgenler ve üçgenler [78]

İmalat sanayisinde pratik ve ucuz olması açısından pot baskısı sabit tutulmuştur ve bunun için pot çemberi olarak adlandırılan baskı plakasının konumu sabitlenmiştir. Ancak, özellikle anizotropik malzemelerin derin çekilmesinde kulaklaşma problemi yaşanabilmektedir [76-77].

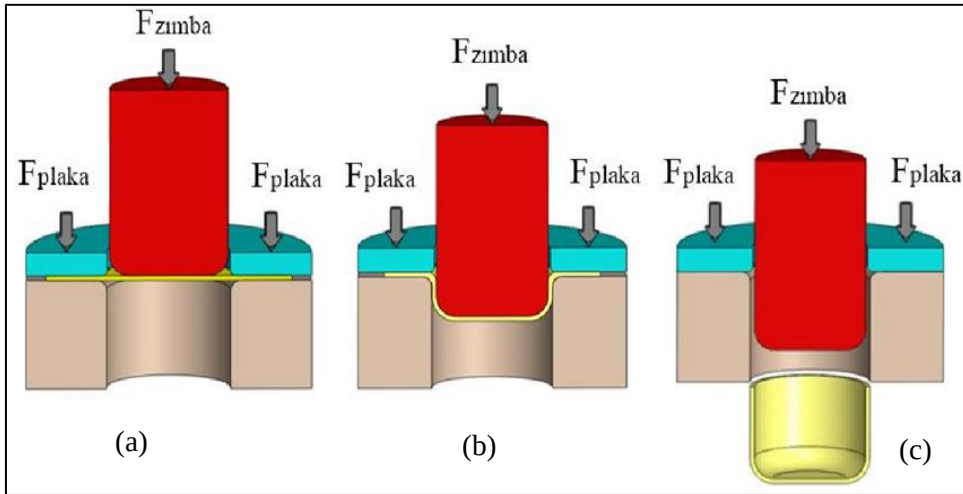
Sac malzeme, zımba ve kalıp arasındaki boşluğa çekildiğinde çekme kuvveti nedeniyle radyal çekme gerilmesi σ_r oluşur. Sac malzeme daha küçük çaplara zorlandıkça teğetsel sıkıştırma gerilmesi σ_t oluşur. Baskı plakası kuvveti nedeniyle malzeme basınca maruz kalır ve sıkıştırma gerilimi σ_d oluşur. Ayrıca, sac malzeme, kalıbın yarıçapı üzerinde büküldüğünde bükme gerilimi σ_b meydana gelir (Şekil 3.6) [78].



Şekil 3.6. Derin çekme sırasında ilkel malzemenin gerilme durumu [78]

Baskı plakası tarafından uygulanan kuvvet kritik bir faktör olduğu görülmektedir. Çok küçükse, buruşma meydana gelir. Çok büyükse, metalin kalıp boşluğuna doğru akmasını önler, bu da sac metalin gerilmesine ve yırtılmasına neden olur. Uygun baskı kuvvetinin belirlenmesi, bu karşıt faktörler arasında hassas bir dengeyi içerir [70].

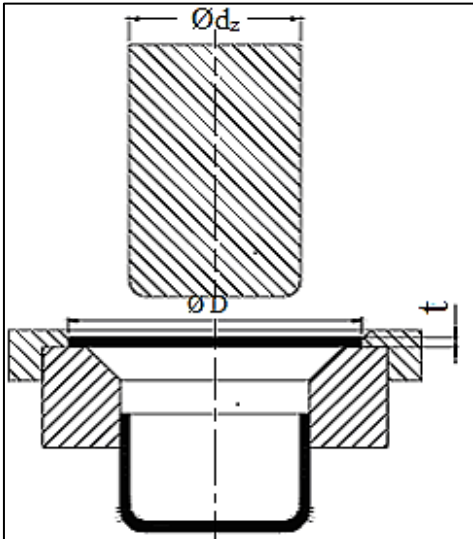
Çekme esnasında sacın dış çapı, zımba çapına doğru daraltılmaya zorlandıkça malzeme yığılması artmaktadır. Oluşmaya başlayan kırışmaların önlenmesi için daha yüksek pot baskılarına ihtiyaç duyulmaktadır [79]. Şekil 3.7’de baskı plakalı çekme işleminin aşamaları görülmektedir.



Şekil 3.7. Baskı plakalı çekme işleminin aşamaları a) Sac malzemenin yerleştirilmesi ve baskı plakası yoluyla baskı kuvvetinin uygulanması, b) Çekme kalıplama işleminin başlaması, c) Çekme kalıplama işleminin sonu [80]

3.3. Baskı Plakasız Çekme Kalıplama

Baskı plakasız çekme kalıplama yöntemi özellikle sac kalınlığı 4 mm'den fazla olan kalıplama işlemlerinde tercih edilir. Baskı plakası olmadan derin çekme yaparken, baskı plakası kullanılmadığından kalıp konstrüksiyonu daha basittir (Şekil 3.8). Ayrıca, bu yöntemle herhangi bir parça tek kademedede çekilebilir.



Şekil 3.8. Baskı plakasız çekme kalıbı [72]

Çekme kalıbı, bir çekme zımbası ve dişi kalıptan oluşmaktadır. Zımba, dişi kalıp üzerine yerleştirilen ilkel çaptaki sac malzemesi (sarı) ile birlikte aşağıya doğru hareket etmektedir. Zımba, sac malzemesi ile birlikte aşağıya doğru hareket etmektedir. Sac malzemesi, dişi kalıp (mavi) tarafından baskı kuvvetiyle (F_{plaka}) uygulanmaktadır. Zımba, sac malzemesi ile birlikte aşağıya doğru hareket etmektedir. Sac malzemesi, dişi kalıp (mavi) tarafından baskı kuvvetiyle (F_{plaka}) uygulanmaktadır. Zımba, sac malzemesi ile birlikte aşağıya doğru hareket etmektedir.

deformasyon işlemini gerçekleştirir. Bu kalıplama işleminde baskı plakası kuvveti uygulanmadığından malzemede kırılma ve buruşma oluşmamaktadır. Baskı plakasız çekme işleminin yapılabilmesi için;

$$t \leq 0,017 \cdot D \text{ ve } \frac{dz_1}{D} \leq 0,55 \quad (3.1)$$

olmalıdır [69].

Çekilmiş olan kabın çapının küçültülmesi amacıyla tekrar çekilmesi istendiğinde baskı plakasız çekme işleminin yapılabilmesi için;

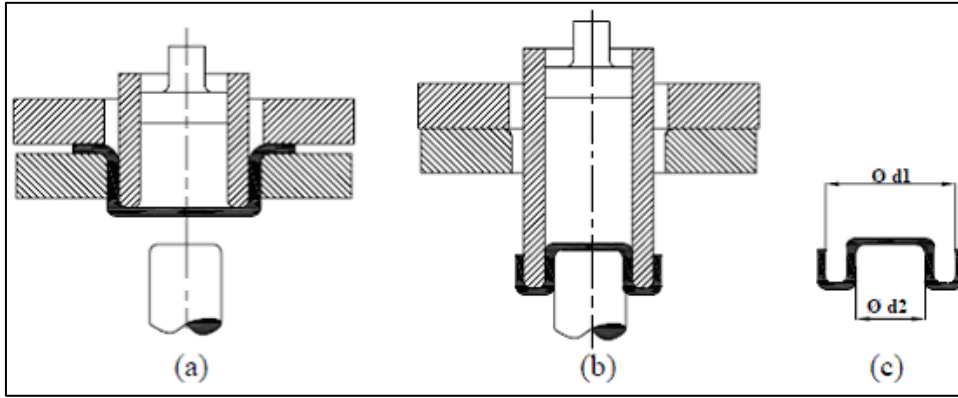
$$t \leq 0,015 \cdot D \text{ ve } \frac{dz_1}{dz_2} \leq 0,78 \quad (3.2)$$

olmalıdır [69].

Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2’de; t : Çekilecek olan sac malzeme kalınlığı, mm; D : Malzeme ilkel çapı, mm; dz_1 : Birinci çekmede zımba çapı, mm; dz_2 : İkinci çekmede zımba çapını, mm; olarak tanımlanmıştır [69].

3.4. Ters Çevirme ve Yeniden Derin Çekme

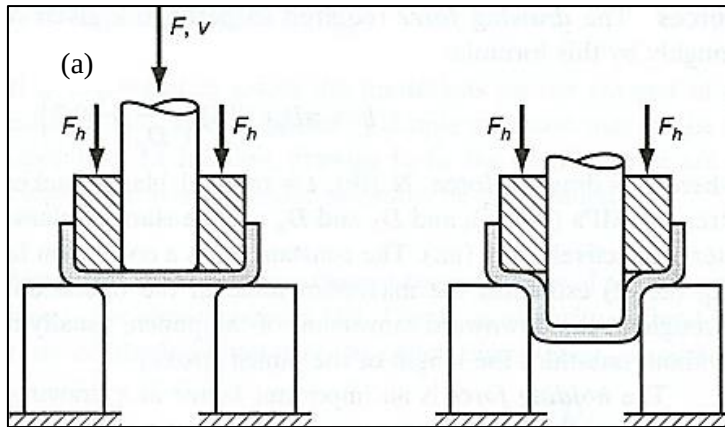
Geleneksel bir ikinci çekme yerine, ters (içten dışa) yeniden çekme de kullanılabilir. Ters yeniden çekmede, önceden oluşturulmuş kap (Şekil 3.9), içten dışa çevrilerek bir sonraki çapa küçültmeye indirilir. Yeniden çekildikten sonra, çekilmiş kabın iç duvarları dış duvarlar haline gelir [78].



Şekil 3.9. Ters yeniden çekilen iş parçası, a) Çekme öncesinde, b) çekme sırasında, c) Ters yeniden çekmeden sonra [70]

Ters çekme yöntemiyle çekme işleminde, bir pres kursu ile iki çekme operasyonu birlikte yapılabilmektedir. Ters çekme yönteminde iki adet çekme zımbası bulunmaktadır. Parça çapını veren zımba kalıbın alt tarafında ve sabit konumludur. İlk çekme çapını verecek olan zımba ise pres başlığına (koçuna) bağlanmıştır. Üst konumdaki zımba, ilk çekme işlemini yaptıktan sonra ilk zımbanın aşağıya inmesiyle alt zımba devreye girerek parçayı ikinci kez çeker. Çevirme çekme yöntemi özellikle küresel, konik ve parabolik parçaların imalatı için uygundur [69, 81].

Ters çekmenin yeniden derin çekmekten (Şekil 3.10) daha ciddi bir deformasyon ürettiği görülse de aslında ters çekme sac metalin şekillendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Bunun nedeni, sacın, ters çekme sırasında kalıbın dış ve iç köşelerinde aynı yönde bükülmesidir. Yeniden çekerken metal iki köşede zıt yönlerde bükülür.



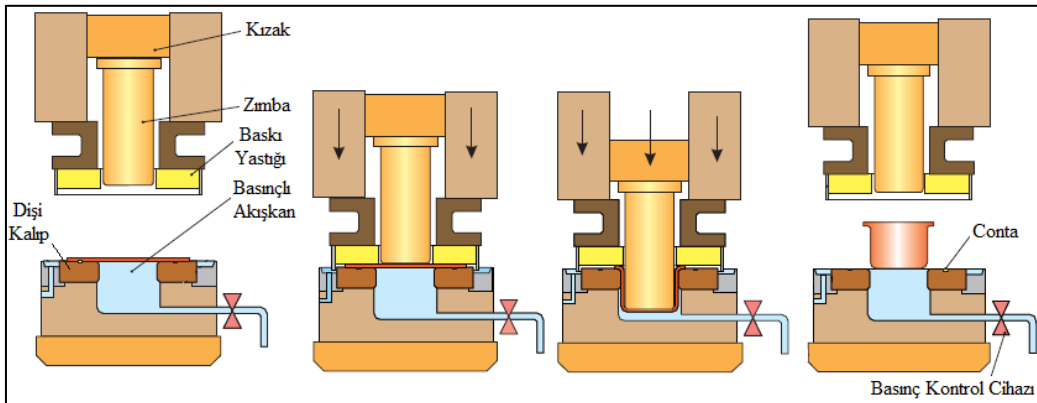
Şekil 3.10. Yeniden derin çekme [70]

Bu farktan dolayı, metal ters çekme işleminde daha az gerilme sertleşmesi yaşar ve çekme kuvveti daha düşüktür [70].

3.5. Hidromekanik Yolla Derin Çekme İşlemi

Hidromekanik derin çekme, sadece mekanik derin çekme işlemine göre; yırtılma faktörünü daha yüksek tutar, bu ise daha fazla derinlikte sac şekillendirme yapmamıza imkân verir. Gittikçe incelmesi istenilen ince cidarlı parçanın kolayca elde edilmesi sağlar [82]. Sıvı basıncıyla şekillendirme teknolojisinin bir alt işlemi olan hidromekanik derin çekme işlemi, sıvı basıncıyla şekillendirme ve konvansiyonel derin çekme yöntemlerinin özelliklerinin karışımı olan bir kalıplama yöntemidir. Bu yöntemde, saca şeklini vermek için, şekillendirme zımbası kontrollü olarak yüksek basınçlı sıvı bir akışkan kütleye doğru hareket eder (Şekil 3.11). Çekme zımbasının sıvı dolu hazneye girmeye başlamasıyla akışkanın basıncı artmaya başlar. Deformasyon esnasında sac malzeme çekme zımbasına doğru preslenmektedir.

Çekme zımbasının basınçlı akışkan içerisine girerek aktifleştirdiği basıncın çok yönlü etkisi vardır. Basıncın etkisiyle sac malzeme zımbayı çepeçevre sarmaya zorlanmaktadır. Zorlanmadan dolayı zımba ile sac arasındaki sürtünme giderek artmaktadır. Bu nedenle kalıp içerisinde oluşan basıncın etkisiyle çekme kuvvetleri klasik derin çekme işleminde oluşan kuvvetten daha yüksek bir seviyeye çıkartabilmektedir [72].



Şekil 3.11. Hidromekanik derin çekme işlem aşamaları [83]

3.6. İlkel Parça Boyutlarının Belirlenmesi

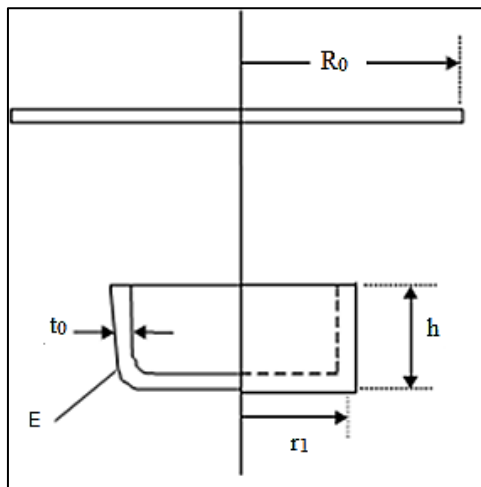
Çekme işleminde, ilk önce çekilecek kap malzemenin ilkel çapı hesaplanır. Çekme işlemi süresince, sac malzeme eğilme, basılma ve çekilme gerilimlerine uğrar. Sadece tabanı düz olan kapların sadece taban kısmı eğilme, basılma veya çekilme gerilimlerine uğramaz. Her plastik şekil verme işlemlerinde olduğu gibi çekme işlemine kabın şekillenmeden önceki alanı, sonraki alanına eşitlenir [84]. İlkel parça boyunun hesaplanması, alan yöntemi, çizim yöntemi, uzunluk ve ağırlık merkezi yöntemi ile yapılır [84].

3.7. Çekme İşleminin Parametreleri

Çekme işlemini başarılı kılan ve işlemin verimliliğini etkileyen çok çeşitli ve farklı parametreler vardır. Bunlardan en önemlileri aşağıda kısa kısa açıklanmıştır.

3.7.1. Çekme derinliği

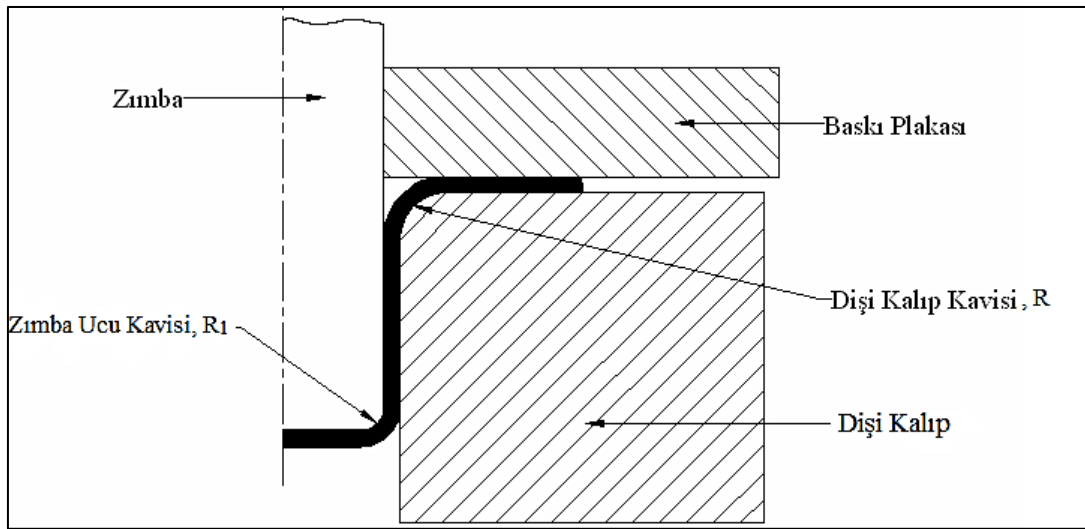
İlkel çapta bir silindirik sac malzeme çekilirse, kap duvarının yüksekliği esas olarak malzemenin ilkel çapına göre belirlenir. Flanşın çekilmesi sırasında, dış bölge kalınlaşma eğilimi gösterecektir ve kabın üst kısmı, Şekil 3.12'de gösterildiği gibi, başlangıçtaki sac malzeme kalınlığından daha büyük olabilir. Çekilen sac malzemenin en ince bölgesi, sac levhanın, zımbanın köşe yarıçapı üzerinde büküldüğü ve açılmadığı E noktasında tabana yakın yerde olacaktır.



Şekil 3.12. İlkel malzeme yarıçapı R_0 ve kalınlığı t_0 olan bir diskin silindirik olarak h derinliğinde çekilmiş bir kap hali [66]

3.7.2. Kalıp ve zımba kavis yarıçapları

Çekilecek kap malzemenin kalıp içerisindeki akmasını (ilerlemesini) kolaylaştıran parametreler kalıp ve zımba kavisleridir (Şekil 3.14). Çekilen kabın yırtılmasını önlemek için dişi kalıp ağzı ve zımba ucu kavis yarıçaplarının malzemeye ve kalınlığına göre uygun değerde tespiti oldukça önemlidir. Kalıp ağız formunun gereğinden büyük olması, baskı plakası kuvvetini küçülteceğinden kap ağzında kırışıklıklara sebep olur. Gereğinden küçük kalıp ağız formları ise daha çekme başlangıcında parçayı kopmaya uğratacaktır [86].



Şekil 3.14. Zımba ucu kavis ve dişi kalıp kavis [69]

Çekme işleminin kolay olması ve malzemenin en yüksek çekme dayanımı sınırını aşarak yırtılmasını önlemek için çekme kalıp halkası (Dişi kalıp) ağzı ile çekme zımbası uç kavis yarıçapları olabildiğince büyük; fakat sac kalınlığının 20 katını aşmayacak kadar, yani R ve $R1 < 20$ olmalıdır [85].

Dişi çekme kalıp deliği çapı ve kalıp kavis yarıçapının en uygun değeri;

$D < \frac{R}{R_1} < \frac{D-d}{2}$ sınırları arasında değişir. Ancak malzeme cinsine göre:

Çelik saclarda;

$$R = 0,8 \sqrt{D - d}. t \quad (3.4)$$

Alüminyum ve alaşımlarında;

$$R = 0,9 \sqrt{D - d}. t \quad (3.5)$$

Kademeli çekmelerde;

$$R_n = (d_{z_1} - d_{z_2}) \quad (3.6)$$

esas alınmalıdır [84].

Zimba uç kavisleri de çekme olayını oldukça etkileyen bir etkidir. Zimba uç kavisleri sac malzeme kalınlığının 3-5 katı olmalıdır. Keskin köşelere ise ancak birkaç işlemten sonra ulaşılabilir [85]. Kalıp kavislerinin belirlenmesi için farklı yöntemler de literatürde yer almaktadır. Çizelge 3.1’de sac kalınlığı ile zimba çapı arasındaki yüzde oran (t/d_z) değerine göre önerilen değerler verilmiştir [72].

Colgan ve Monaghan araştırmalarında sacın deformasyonu esnasında kalıp kavis yarıçapı küçüldükçe zimba kuvvetinin azaldığını tespit etmişlerdir [87].

Çizelge 3.1. Sac kalınlığı ve zimba çapı yüzde oranına göre önerilen kalıp kavis yarıçap değerleri [72]

Çekme İşleminin Tipi	t/d_z (%)		
	2,0 -1,0	1,0 – 0,3	0,3 – 0,1
Silindirik çekme	(5-8).t	(8-10).t	(10-15).t
Flanşlı çekme	(10-15).t	(15-20).t	(20-30).t
Kademeli (eşikli) çekme	(4-6).t	(6-8).t	(8-10).t

Sac malzemenin kalınlığına bağlı olarak önerilen kalıp kavis yarıçapı değerleri de bulunmaktadır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Sac malzeme kalınlığına göre kalıp kavisi yarıçapı için önerilen değerler [72]

Sac malzeme kalınlığı, t , mm	Kalıp kavisi, R , mm
0,4	1,6
0,8	3,2
1,2	4,8
1,5	6
1,6	6,4
2	9,5
2,4	11
2,6	11,6
3,2	14
5	20

Bu tez çalışması kapsamında dişi kalıbın kavis yarıçapı DIN ISO 20482 standardında önerildiği gibi 0,75 mm, zımba uçları küresel formda ve 8 mm, 15 mm, 20 mm çaplarında alınmıştır. Şişirme testine tabi tutulan numunelerin kalınlığı ise Al 1050 için 0,5 mm; Al 5754 için 1 mm ve Ck75 malzeme için 0,5 mm alınmıştır.

3.7.3. Çekme hızı

Çekme hızı, çekilen kabın kusursuz veya en az kusurlu çekilmesinde önemli etkisi vardır. Çekme hızı, çekilen kabın sac kalınlığı, malzeme cinsi, zımba ve dişi kalıp köşe kavis yarıçapları ile doğrudan ilgilidir. Kalıp yağlanması da çekme hızında olumlu etkisi bulunmaktadır. Krank milli preslerde çekme hızı ve kuvveti değişken olurken, hidrolik preslerde bu değerler sabit tutulabilmektedir. Çekme hızı, çekilen sac malzemenin fiziksel özelliklerini ve şekil değiştirmesini önemli ölçüde etkilemektedir [69]. Çekme hızı değerleri, genellikle deneysel çalışmalar neticesinde belirlenmektedir. Çekme işleminde, malzemeye şekil değiştirmesi için yeterli zaman verilmelidir. Aksi takdirde sac malzeme üzerinde yırtılmalar oluşmaktadır [88]. Sıvı basıncı ile şekillendirmede, çekme hızının düşük olması nedeniyle işlem süresinin uzun olması, düşük çekme hızlarında şekillendirme yapılması olumsuzluklar olarak beyan edilmiştir [89, 91].

Klasik kalıplama işleminde çekme hızları için kesin kurallar konmamıştır. Ancak ortalama çekme hızlarına (Çizelge 3.3) yönelik farklı kaynaklarda çeşitli değerler malzeme cinslerine bağlı olarak önerilmiştir [88, 93].

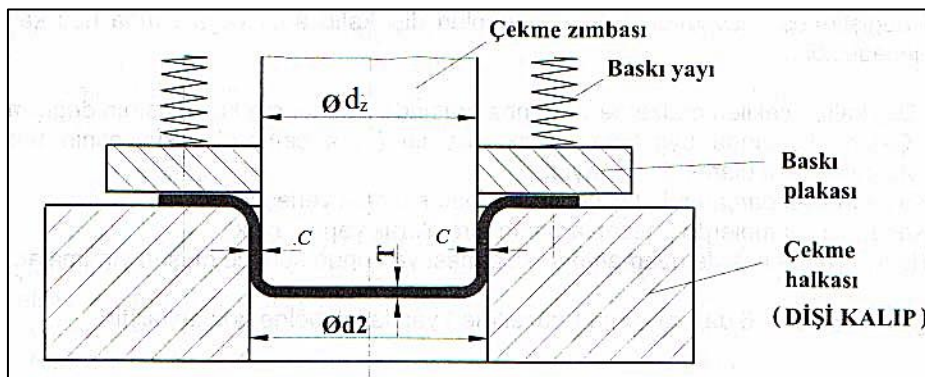
Çizelge 3.3. Çekme hızları [88, 93]

Malzeme	Çekme Hızı, V, m/s	
	Tek Etkili	Çift Etkili
Alüminyum	175	100
Pirinç	200	100
Bakır	150	85
Çelik	55	35-55
Paslanmaz Çelik	..	20-30
Çinko	150	40

Tez kapsamında; literatürde yapılan yoğun çalışmalarda yer alan zımba hızlarının tespitinde standart sayılar tablosunda [105] önerilen sayı aralıkları dikkate alınmıştır. Erichsen testleri 5 mm/dak (83,3 m/s), 6,25 mm/dak (104,1 m/s) ve 8 mm/dak (133,3 m/s) olmak üzere üç farklı hızlarda yapılmıştır.

3.7.4. Kalıp boşluğu

Çekme kalıplarında dişi kalıp ile zımba arasında sac kalınlığından biraz daha fazla boşluk bırakılmalıdır (Şekil 3.15). Bu boşluk sac malzemenin akmasını rahatlatarak çekme işlemini kolaylaştırır. Boşluğun gereğinden fazla bırakılması veya az bırakılması çekilen kabın yüzeylerinde çeşitli bozukluklara sebep olmaktadır. Farklı bir tanıma göre çekme boşluğu, zımba küre çapı ile dişi kalıp delik çapı arasındaki farkın yarısı olarak ifade edilmiştir [49].



Şekil 3.15. Çekme boşluğu, C [85]

Çekme boşluğunun gereğinden küçük olması durumunda, sac ile kalıp arasında aşırı sürtünme meydana gelmektedir. Bu durum, malzeme kalınlığında incelmelere ve taban yırtılması olarak adlandırılan olumsuzluklara yol açmaktadır. Çekme boşluğunun gereğinden büyük olması durumunda ise istenilen parça ölçülerini gerçekleştirmek zor

olmakta ve parçada kırışıklıklar oluşmaktadır [65, 72]. Sac kalınlığına bağlı olarak önerilen çekme boşluğu değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Sac kalınlığına göre çekme (kalıp) boşluğu değerleri [85]

Sac kalınlığı, t, (mm)	Çekme sayısı		
	1.Çekme, C, mm	2.Çekme, C, mm	3.Çekme, C, mm
0,50	(1,07-1,09)t	(1,08 -1,10)t	1,04 - 1,05)t
0,50 – 1,25	(1,09 – 1,10)t	(1,09 – 1,12)t	(1,05 -1,06)t
1,25 – 3,25	(1,10 -1,12)t	(1,12 – 1,14)t	(1,07 – 1,09)t
3,25 ve üstü	(1,12 – 1,14)t	(1,15 – 1,20)t	(1,08 – 1,10)t

Çekme boşluğunun hesaplanması ile ilgili literatürden elde edilen eşitlikler aşağıda verilmiştir [65, 78, 85, 93].

En düşük teorik çekme boşluğu (C)

$$C = \frac{d_2 - d_1}{2} \quad (3.7)$$

olur. Çelik malzemeler için;

$$C = t + 0,07. \sqrt{10}. t \quad (3.8)$$

eşitliğinden, alüminyum malzemeler için;

$$C = t + 0,02. \sqrt{10}. t \quad (3.9)$$

eşitliğinden ve diğer malzemeler için;

$$C = t + 0,04. \sqrt{10}. t \quad (3.10)$$

eşitliğinden faydalanılabilir. Burada; C : Dişi kalıp ile zımba arasındaki boşluk, mm; t: Sac malzeme kalınlığı, mm; d_z : Zımba çapı, mm; d_1 : 1. kademe çekmede dişi kalıp boşluk çapı, mm; d_2 : 2. kademe çekmede dişi kalıp boşluk çapı, mm ve d_{z1} : 1. kademe çekmede zımba çapı, mm olarak dikkate alınmalıdır [65, 78, 85, 93].

Tez çalışmasında; DIN EN ISO 20482 standardına göre üç farklı zımba çapı ve bu zımba çapları ile ilişkili üç farklı kalıp çekme boşluğu ve baskı plakası boşluğu seçilmiştir. 8 mm küre çaplı zımba ile Erichsen testinde kalıp boşluğu 1,5 mm, 15 mm küre çaplı zımba ile testte kalıp boşluğu 3 mm, 20 mm küre başlı zımba ile testte kalıp boşluğu 3,5 mm dikkate alınmıştır.

3.7.5. Çekme kuvveti

Literatür taraması sonucu çekme kalıplama işleminde çekme kuvvetini sac malzemenin çekilen çapları, sac malzeme kalınlığı, çekme hızı, dişi kalıp ve zımba kavis yarıçapları, baskı plakasının uyguladığı baskı kuvveti, kalıp çekme boşluğu ve yağlama etkilemektedir. Çekme kuvveti, istenilen parçayı meydana getirmek için malzeme üzerine uygulanması gereken kuvvet veya çekme işlemi esnasında parçanın gösterdiği direnç olarak tanımlanmıştır. Hidromekanik derin çekme işlemlerinde çekme kuvveti, sac malzeme çekme kuvvetine, çekilen ve ilkel parça çaplarına, sac malzeme kalınlığına ve malzeme cinsine bağlıdır. Ayrıca, baskı plakasının uyguladığı basınç, çekme hızı, kalıp ve zımba kavisleri, çekme boşluğu ve yağlama da çekme kuvvetine etki etmektedir [69]. Çekme kuvvetinin hesap ile elde edilmesine dair yapılan literatür aramasında değişik eşitliklerin uygulandığı ancak, genelde eşitliklerin sonuçlarının çok farklı olmadığı görülmüştür.

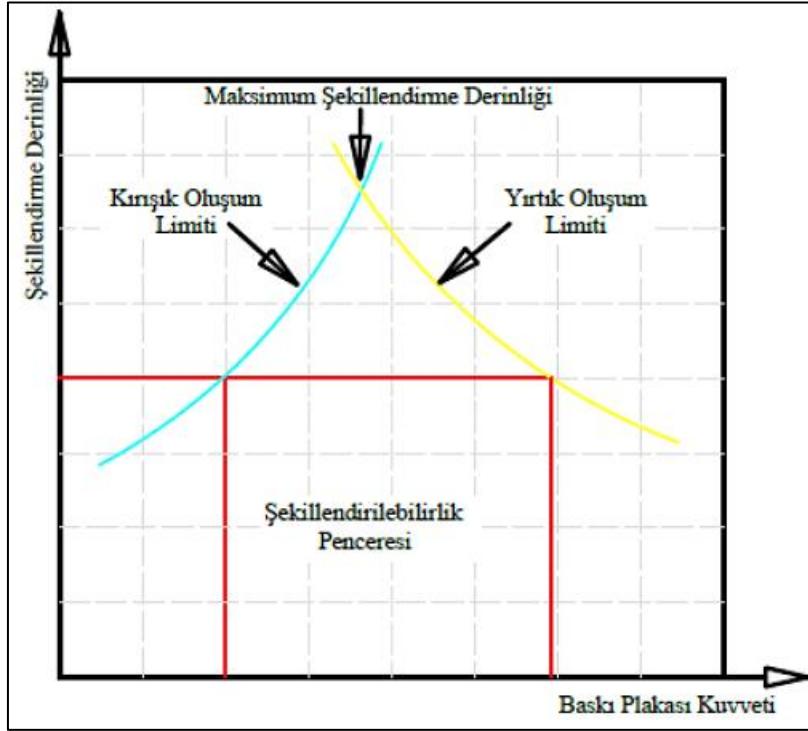
Baskı plakasına uygulanan kuvvet ile çekme kuvveti de artar. Eğer parçaya çoklu çekme işlemi uygulanacaksa, en büyük çaplı zımba esas alınır. Köşe radyüsleri çok küçük olmamak kaydıyla kare, elips, dikdörtgen ve benzer şekiller için çekme kuvveti benzer yolla hesaplanabilir [67]. Baskı plakalı çekme kalıplarında çekme kuvvetine baskı plâkası kuvveti hesaplanıp çekme kuvvetine eklenir. Bu aynı zamanda presin uygulayacağı kuvvet olur.

Tez çalışması kapsamında zımbanın her ilerleme derinliği için yük hücresinden anlık kuvvet ölçümü sağlanmış olup donanımın PLC kumanda panelinden 1/10 N hassasiyetinde okunmuştur.

3.7.6. Baskı plakası kuvveti

Bir sac metal kalıplama işleminin uygun tasarımı; çekme oranı, yağlama koşulları, zımba ve kalıp geometrisi ve son olarak da en önemlisi, baskı plakası kuvveti (BPK) gibi bir dizi

şekillendirme parametresinin en uygun seçiminin yapılmasını da gerektirir (Şekil 3.16). Baskı plakası kuvveti, sürtünme yoluyla malzeme akışını kalıp boşluğuna doğru kontrol ettiği için derin çekme işlemi mekaniğinde temel bir rol oynar [94].



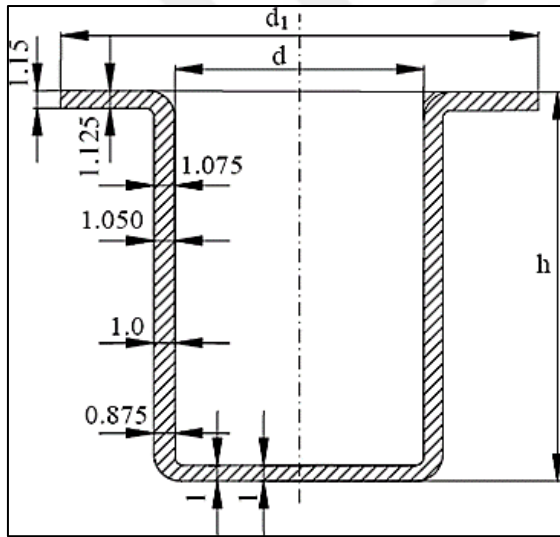
Şekil 3.16. Baskı plakası kuvveti ve derinlik ilişkisinin şematik gösterimi [95]

Derin çekme işleminde pot olarak isimlendirilen işlenmemiş sac bir dişi kalıp üzerine yerleştirilmekte ve bir erkek zımba tarafından kuvvet uygulanarak kap haline getirilmektedir. Kap haline getirilen sac daha dar kalıplardan tekrar geçirilmek suretiyle çok kademeli şekillendirme yapılabilmektedir. Birinci kademe şekillendirme esnasında sacın dış çapı daralmaya zorlandığından flanş bölgesinde katlanmaya zorlanmaktadır [75].

Şekil 3.16'da BPK'nin derin çekme işlemindeki etkisini göstermektedir. BPK çok yüksekse, çekme işlemi sırasında, kabın yan duvarı yırtılmadan önce az miktarda gerilebilir. Bu da çekmeyi zorlaştırıp sacın kopmasına neden olur [95-96]. Bu nedenlerden dolayı baskı plakası kuvveti mutlaka hesaplanmalıdır.

3.8. Derin Çekme Kusurları

Çekilen sac malzemenin alt taban kısmında oluşan deformasyon çok azdır. Sac malzeme üzerindeki eksenel çizgilerde çok fazla değişim gözlenmez. Çekme işlemi boyunca, sac malzeme zımba üzerinde hareket eder. Bu esnada sac malzeme üzerindeki eksenel çizgiler, birbirine paralel hale gelmeye başlar. Malzeme akışı sebebi ile sac malzeme üzerinde, kavis bölgelerinde ve yan duvarlarında incelme, ürünün yan duvarlarının uçlarında ise kalınlaşma oluşur (Şekil 3.17). Et kalınlığındaki bu değişim genellikle zımba ve kalıp arasına verilen çekme boşluğu ile ilgilidir. Çekilen üründe meydana gelen hatalar, çekme işlemi süresince metal malzemenin kalıp içerisinde düzgün olmayan plastik şekil değişimine uğramasıdır [69].



Şekil 3.17. Derin çekilen sacda kalınlık değişimi [75]

Çekilmiş bir üründe, çok sayıda beklenmedik kusur meydana gelebilir (Şekil 3.18).

Flanşta kırışma

Çekilmiş bir parçadaki buruşma, sıkıştırıcı burkulma nedeniyle iş parçasının çekilmemiş flanşında radyal olarak oluşan bir dizi çıkıntıdan oluşur (Şekil 3.18.a).

Çekilen duvarda kırışma

Zımba ile kalıp köşe radyüslerinin uygun olmaması, ilkel sac malzemeyi baskılayan pot çemberinin kuvvetinin yeterli olmaması veya zımba-kalıp arasındaki çekme boşluğunun gereğinden fazla olması, derin çekilen sac malzemenin çekilen duvarlarının kırışmasına yol açan sebepler olarak sayılabilir. Buruşuk flanş kalıbın içine doğru çekildiğinde, bu çıkıntılar dikey duvarda belirir (Şekil 3.18.b).

Yırtılma

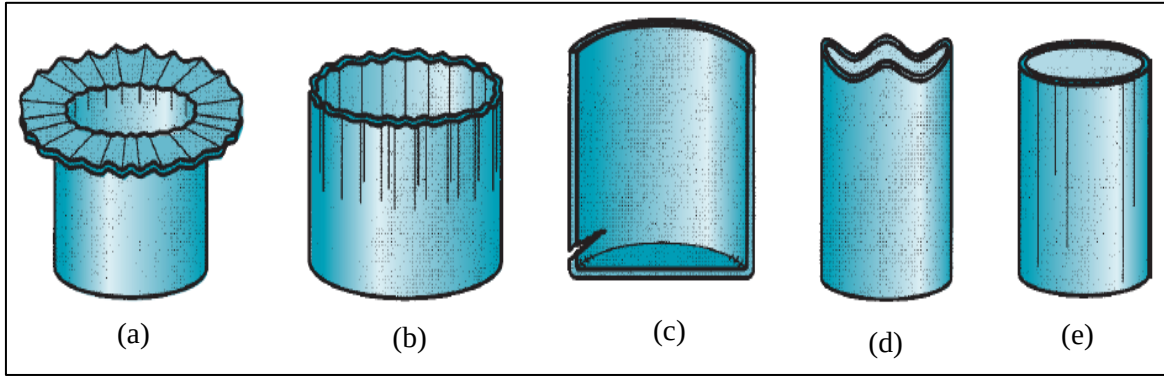
Yırtılma, olduğu yerde konumda metalin incelmesine ve bozulmasına neden olan yüksek çekme gerilmelerine bağlı olarak, genellikle çekilen kabın tabanına yakın olan ve dikey duvarda oluşan bir çatlaktır. Bu tür bir arıza, ham numune çok düşük kavisli dışı kalıp radyüsü üzerinden çekildiğinde meydana gelme ihtimali oldukça yüksektir (Şekil 3.18.c).

Kulaklanma

Derin çekilmiş bir kabın üst kenarında, sac metaldeki anizotropinin neden olduğu düzensizliklerin (kulak veya marullanma adı verilen) oluşumudur. Sac malzeme tamamen izotropik ise kulaklar oluşmaz (Şekil 3.18.d).

Yüzey çizikleri

Zımba ve kalıp pürüzsüz değilse veya yağlama yetersizse, çekilen parçada yüzey çizikleri oluşabilir (Şekil 3.18.e) [70, 78, 84].

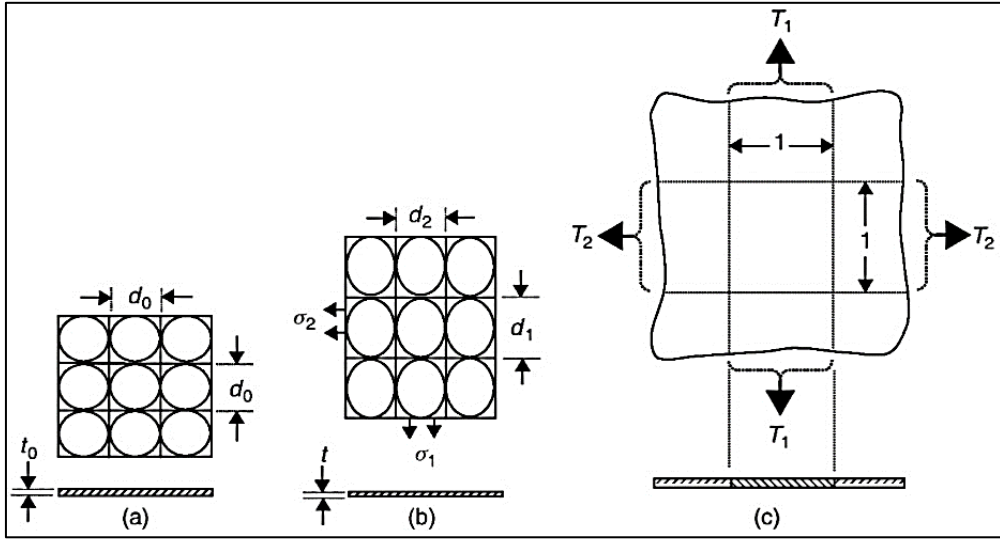


Şekil 3.18. Derin çekmede genel hatalar a) Flanş alanında kırışıklık, b) Çekilen kabın duvarında kırışıklık, c) Yırtılma, d) Kulaklanma, e) Yüzey çizikleri [70]

3.9. Şekillendirme Sınır Diyagramı (SSD)

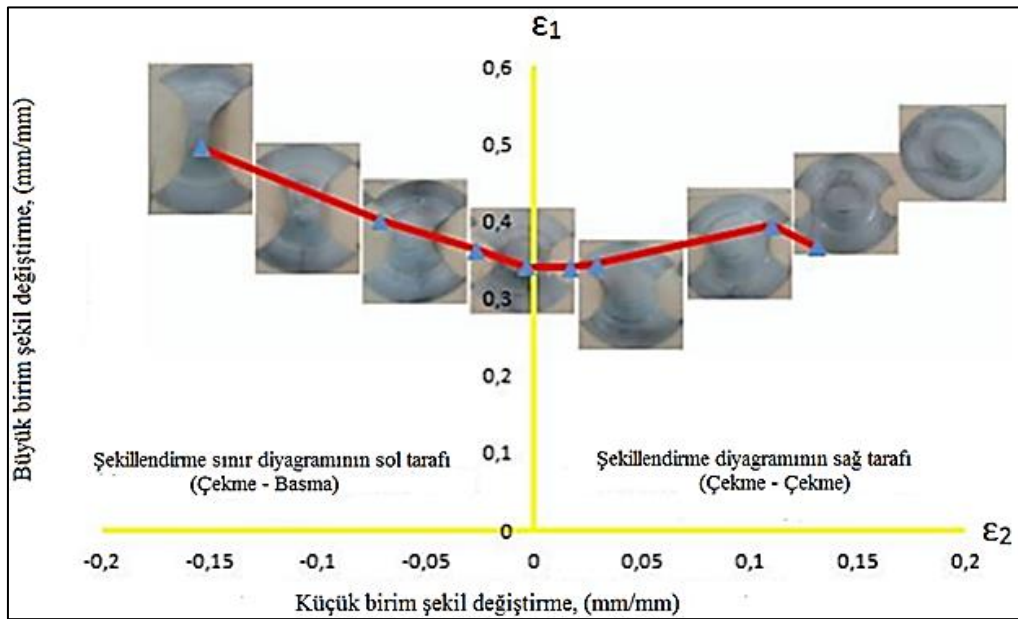
Şekillendirme Sınır Diyagramı, sac malzemelerin derin çekme ve gererek şekillendirme şartlarında göstermiş olduğu davranışların gösterildiği bir diyagramdır. Şekillendirme Sınır Diyagramı ile, iki boyutta, çekme ve basma testleri uygulanan sac malzemelerin davranışları analiz edilebilir. Kullanılacak sac malzeme seçimi ile uğraşan imalat mühendislerinin, üretimde doğru malzemeyi tercih edebilmelerinde malzemelerin şekillendirilebilirlik ve plastik şekil değiştirme özellikleri yol gösterici olmaktadır [98]. Başlangıç kalınlığı t_0 olan deforme olmamış sac tabaka, Şekil 3.19. a'da gösterildiği gibi d_0 çapındaki dairelerin bir ızgarası veya d_0 adımında kare bir ağıyla işaretlenirse, düzgün bir şekil değiştirme sırasında, daireler sırasıyla d_1 ve d_2 , büyük ve küçük eksenli elipslere dönüşerek deforme olacaktır (Şekil 3.19.b).

SSD sac malzemelerde farklı asal BŞD oranları için hasarın meydana geldiği küçük BŞD (ϵ_2) değerlerine karşılık gelen büyük BŞD'leri (ϵ_1) gösterir. Şekillendirilebilirliği belirlemede ve şekillendirme işleminin analizinde çokça kullanılan SSD'leri, şekillendirme işleminin başından sonuna kadar asal gerilmelerin oranının sabit olduğu orantılı yükleme durumunda, malzemelerin şekillendirilme sınırı hakkında doğru tahminler yapar [4]. Daire ızgara ana yönlerle hizalanmışsa, Şekil 3.19.b'de gösterildiği gibi elips olacaktır. Deformasyon sonrası ise kalınlık t olarak ölçülecektir. Şekil 3.19.b'de gösterilen anda, deformasyon gerilmeleri σ_1 ve σ_2 'dir [66].



Şekil 3.19. Bir sac tabakanının üzerine markalanan dairelerin görünümü. a) Kare ızgaralar üstüne markalanmış daireler ve deforme olmamış durum b) Izgara çemberlerin büyük çapı d_1 ve küçük çapı d_2 ölçüsünde elips şeklinde deforme olmuş yapısı. c) Birim genişlik başına iletilen çekmeler, T , veya kuvvetler [66].

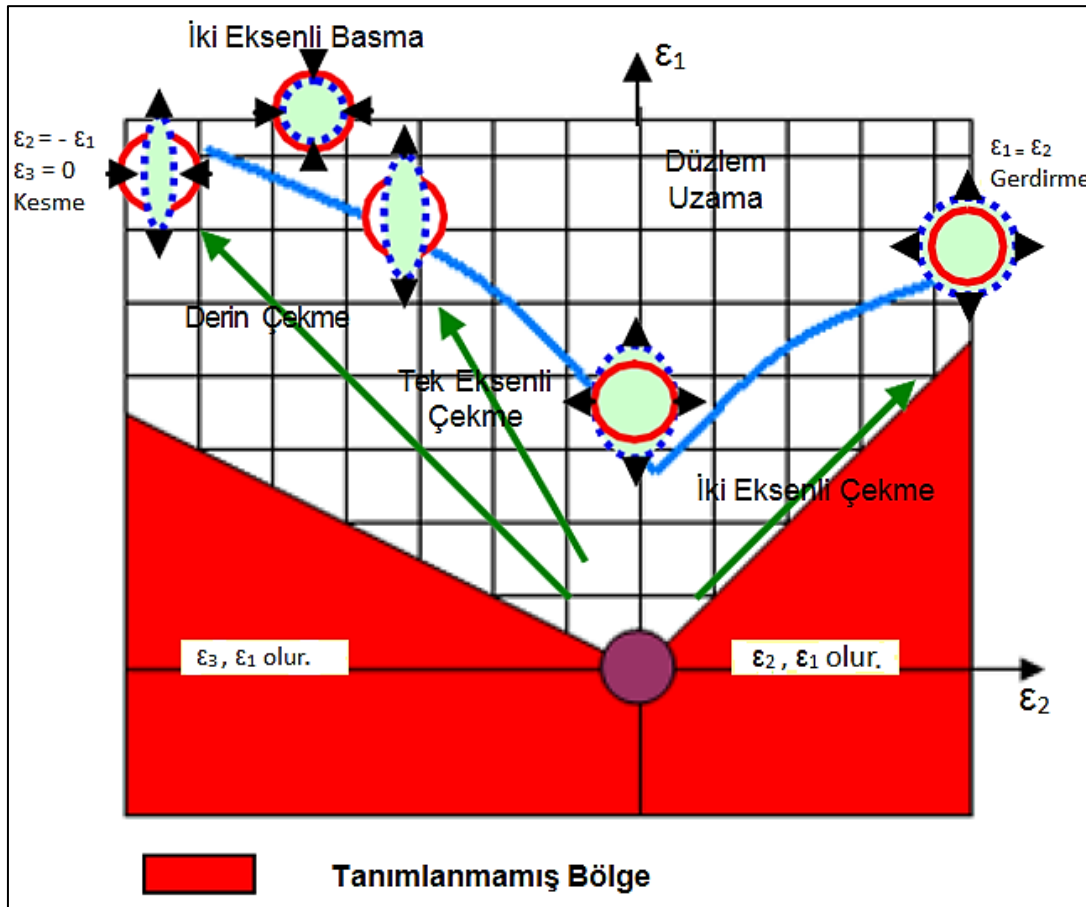
Örnek olarak, Şekil 3.20'deki 1,2 mm ve 1,5 mm kalınlıklarındaki HC300LA (Erdemir 7128) ve HC420LA (Erdemir 7140) sac malzemelerinin ŞSD incelendiğinde; eğrinin altında kalan bölge güvenli bölgeyi, üstte kalan alan bölge de şekillendirmede başarısız olunan bölgeyi ifade etmektedir. İki eksenli çekme-basma bölgesinde, sac malzemenin yırtılmadan önce büyük uzamanın 0,5 mm şekillendirilebildiği gözlemlenmektedir.



Şekil 3.20. Şekillendirme sınır diyagramı grafiği [99]

Tek eksenli çekme bölgesinde de sac malzemenin yaklaşık 0,35 mm şekillendirilebildiği tespit edilmiştir. İki eksenli çekme-çekme bölgesinde ise sac malzemenin 0,3-0,4 mm aralıklarında şekillenebildiği gözlemlenmiştir [99].

Şekil 3.21’de çekme deneyi numunesi, Erichsen deney numunesi ve çentikli çekme deneyi numunesi gibi numunelerin şekil değiştirmelerinin ölçülmesinden elde edilen büyük ve küçük uzama miktarları diyagram üzerine yerleştirilerek ŞSD oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Sac numunede uzama miktarlarının ŞSD üzerinde temsil bölgeleri [100]

Şekil değiştirmiş dairenin en büyük eksenini “ d_1 ” ile, en küçük eksenini “ d_2 ” ölçülerek, en büyük “ e_1 ”;

$$e_1 = \frac{(d_1 - d_0)}{d_0} \quad (3.14)$$

ve en küçük “ e_2 ”;

$$e_2 = \frac{(d_2 - d_0)}{d_0} \quad (3.15)$$

birim şekil değiştirme uzamaları bulunur. “ e_1 ” ve “ e_2 ” değerleri mühendislik uzaması değerleridir.

Literatürde gerçek uzama değerleri kullanılır. Gerçek uzama ise;

$$\varepsilon_{\max} = \ln(d_1 / d_0), \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_{\min} = \ln(d_2 - d_0), \quad (3.17)$$

eşitlikleri ile bulunur [19].

Sac tabakaya uygulanan kuvvetlerin sonucu malzemede deformasyon meydana gelir. Sac tabaka kalınlığı “ t ” ile uygulanan kuvvetler sonucu oluşan gerilim “ σ ” ile ve kuvvetler de “ F ” sembolleri ile gösterilirse;

$$F = \sigma \cdot t \quad (3.18)$$

olur.

3.10. Erichsen Şişirme Testi

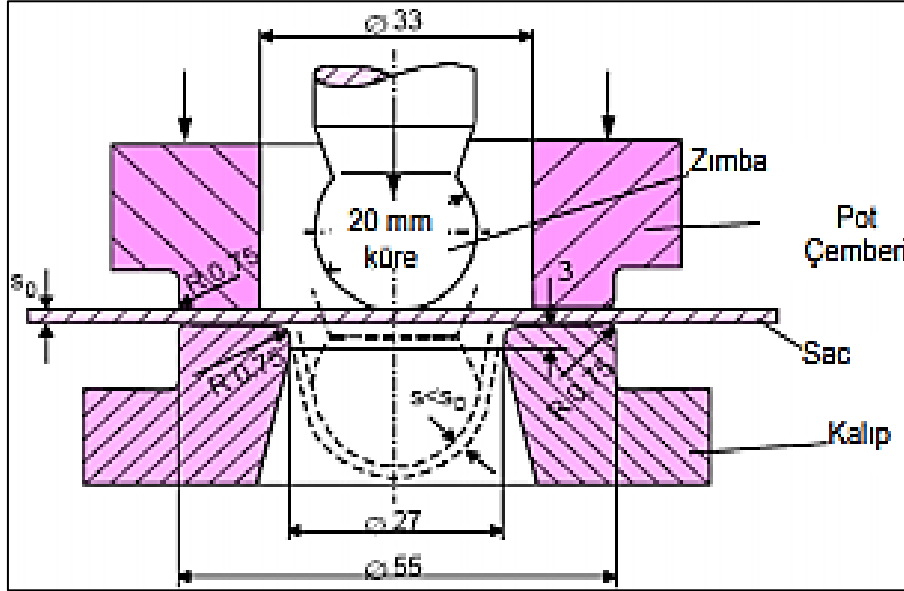
Kalite kontrol ve güvence, son on yıllarda giderek daha fazla önem kazanmıştır ve endüstriyel üretimin tüm alanlarında en önemli görevlerden biri durumundadır. Yaklaşık 100 yıldır sac metalin kalite seviyesini belirlemek için bir test yöntemi mevcuttur. Abraham M. Erichsen, şişirme testinin mucidi olarak kabul edilir ve 20. Yüzyılın başlarında bu test yönteminin patentini almıştır. Bu arada, şişirme testi Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO) tarafından benimsenmiştir. Bu nedenle tüm sac metal endüstriyel uygulamalarda dünya çapında geçerlidir. Erichsen tarafından, 1932’de derin çekme şişirme testi için özel bir alet geliştirildi. Bu test prosedürü, sacdan yapılmış içi boş gövdelerin seri üretiminin gelişmesinde çok büyük yararı olmuştur. Testin yöntemi; sac levha veya şeritin, küresel uçlu bir zımba yoluyla, bir çekme kalıbı ve baskı plakası arasına sıkıştırılarak çanak şeklinde şişirilmesidir. Yıllar içinde, gelişen malzeme özellikleri ve karmaşılaşan üretim süreçleri

test yöntemlerini de zorlaştırmıştır. Bu nedenle sac metal şekillendirme endüstrisinde sacın şekillendirilebilirliği ile ilgili kalite özelliği büyük önem taşımaktadır. Buna bağlı olarak, hızlı, tekrarlanabilir ve güvenilir bir sac metal malzeme testi için, günümüzde de Erichsen şişirme testi güncelliğini korumaktadır. Erichsen (ISO 20482)'e göre şişirme testi, sac malzemelerin şeritlerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için kullanılır ve diğerleri arasında DIN EN ISO 20482, JIS Z-224 ve ASTM E 643-84'e göre standardize edilmiştir.

Bu deformasyon testindeki biçimlendirme işlemi, esas olarak numune sac malzemenin uzatılabilirliğini, doğrudan şişirme işlemi yaparak kıyaslanabilir şekilde kayıt altına alır. Numune sac malzemenin kenar bölgeleri baskı ile yerinde tutulur ve bu nedenle deformasyona uğramaz veya çok az uğrar. Numune malzeme, tüm kalınlığı boyunca uzanan ve ışığın uzunluğunun bir kısmından geçmesi için yeterince geniş olan çatlak görünene kadar çekilir. Erichsen şişirme testi, zımbanın şişirme derinliği ve yırtılma anındaki kuvveti tespit eder. Bu işlem Erichsen testi olarak adlandırılır.

Çatlak oluşumuna kadar zımbanın aldığı yola karşılık gelen ölçüm derinliği, testin sonucudur. Bu işlem Erichsen Sabiti (ES) olarak adlandırılır. Sonuç için en az üç test yapılır ve ortalama ES değeri milimetre olarak verilir. "ES" ne kadar büyükse malzemenin şekillendirilebilirliği de o kadar büyüktür. Bu da sac malzemenin süneklik özelliğini ortaya koyar. Erichsen testi yardımıyla deney numunesinde hem derin çekme hem de gererek şekillendirme gerçekleştirilebildiğinden, Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)'nin hemen hemen her bölgesine ait veri elde etmek mümkün olmaktadır. Literatürde Avrupa standartlarında test, 20 mm çaplı küresel zımba ve 10 kN baskı plakası kuvveti kullanılarak yaygın olarak yapılmaktadır. Şekil 3.25'de ISO 20482/ ASTM E643-84'e göre Erichsen şişirme testi temel elemanları gösterilmiştir. Numune sac malzeme, pot çemberi ve kalıp tarafından tutulur. Küresel uçlu zımba, bir çatlak görünene kadar numuneyi deforme eder. Avrupa orijinli çalışmalarda, Erichsen testinde Ø20 mm'lik küre, Ø27 mm'lik kalıp ve kalıp deliği kenarında 0,75 mm'lik radyüs tercih edilmiştir. Baskı plakası deliği Ø33 mm'dir. Numune sac malzemeyi tutma kuvveti 10 kN olarak uygulanmaktadır. Şekil 3.22'de görülen Erichsen şişirme testinde, kalıpla baskı plakası arasında 10 kN ile sıkıştırılan numune sac malzeme 20 mm çapında çelik bilya ile yırtılınca kadar şişirilir. Şişirme işlemi genellikle yağlamanın olmadığı ortamda gerçekleştirilir. İnce bir yağlama tabakası test sonuçlarının dağılımını azaltır ve simüle edilmiş şartlar ile gerçek şartları birbirine yaklaştırır. Yağlama yapılması kırılmadaki uzama germesini çok eksenli yapar. Birçok hatanın düzlem gerilme

şartlarında meydana gelmesi sebebi ile yağlama, üretim simülasyonlarında istenmemektedir [19].



Şekil 3.22. Erichsen şişirme testi ve elemanlar [19]

Erichsen şişirme testinin sac malzemelerin karakteristik özelliklerinin tespit edilmesine bir örnek teşkil etmesi bakımından Çizelge 3.5'in değerlendirilmesi uygun olacaktır. Çizelgede otomotiv endüstrisinde yaygın olarak bilinen üç farklı sac metalin Erichsen testi ile elde edilen sonuçlarını gösteren değerler verilmiştir. İlki, kalınlığı 0,8 mm olan AA5754 H22 alüminyum alaşımı sac tabakadır. Bu tip sac, otomobil gövde panellerinde ağırlığı azaltmak amacıyla kullanılır. İkincisi, çok yaygın kullanım alanı olan, 0,8 mm, 1 mm ve 2 mm kalınlıklarında DC04 derin çekme çelik saclardır. Son malzeme, 0,8 mm kalınlıkta yüksek mukavemetli doğal DP800 çelik sacdır.

Yüksek mukavemetli çelik sac, otomobil gövdesinde yapısal ve emniyet bileşeni olarak tercih edilir. Dolayısıyla, otomobil endüstrisinde daha emniyetli ve daha hafif sac metal parçalar üretilebilmiştir [26]. Erichsen testi her bir sac için en az beş kez tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir. Şişme yüksekliklerinin ortalama ölçüm sonuçları Çizelge 3.5'de verilmiştir. Bu çizelge, lokalize LN-ES boyun atma anındaki şişme yüksekliğini, ES yırtılma anı ile ES ve LN-ES arasındaki Δ yüksekliklerindeki farkı karşılaştırmaktadır. Ayrıca, yükseklik ölçümlerinde oldukça iyi doğruluk gösteren standart sapmalar verilmiştir [26].

Çizelge 3.5. Erichsen şişirme testinde örneklerin ölçüm sonuçları [26]

	AA5754 H22 t= 0,8 mm	DC04 t= 0,8 mm	DC04 t = 1mm	DC04 t = 2 mm	Doğal DP800 t = 0,8 mm
Bölgesel boyun verme, LN-ES, mm	7,54	10,21	10,43	11,91	-
Yırtılma anındaki ES, mm	8,02	11,10	11,35	12,95	9,23
Δ , mm	0,48	0,89	0,92	1,04	0
Δ , %	5,99	7,99	8,10	8,03	0
LN-IE standart sapma, mm	0,12	0,07	0,08	0,16	
ES standart sapma, mm	0,03	0,06	0,11	0,11	0,27
Δ standart sapma, mm	0,10	0,12	0,14	0,09	-

Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirliklerinin değerlendirilmesinde etkin bir gösterge olan Erichsen Sabitinin elde edilmesine yönelik yapılan tez çalışması kapsamında yukarıda detayları verilen parametrelerden bazıları sabit tutulmuş ve ilgili parametre açıklaması sonunda verilen beyanlar itibarıyla bazı parametrelerin etkisi ihmal edilmiş, bazı parametrelerin ise alınan değerleri hem bu bölüm içinde hem de sonraki bölüm içerisinde verilmiştir.

4. MATERYAL VE METOT

Küresel uçlu bir zımba ile gerdirilmiş numune sac malzemeye tek yönlü bir itme kuvveti uygulayarak malzemenin kopma sınırı ve şişirme derinliğinin tespit edildiği yöntemle Erichsen testi adı verildiği ve ISO 20482 standardına uygun olarak test prosedürünün nasıl yapıldığı bir önceki bölümde açıklanmıştı.

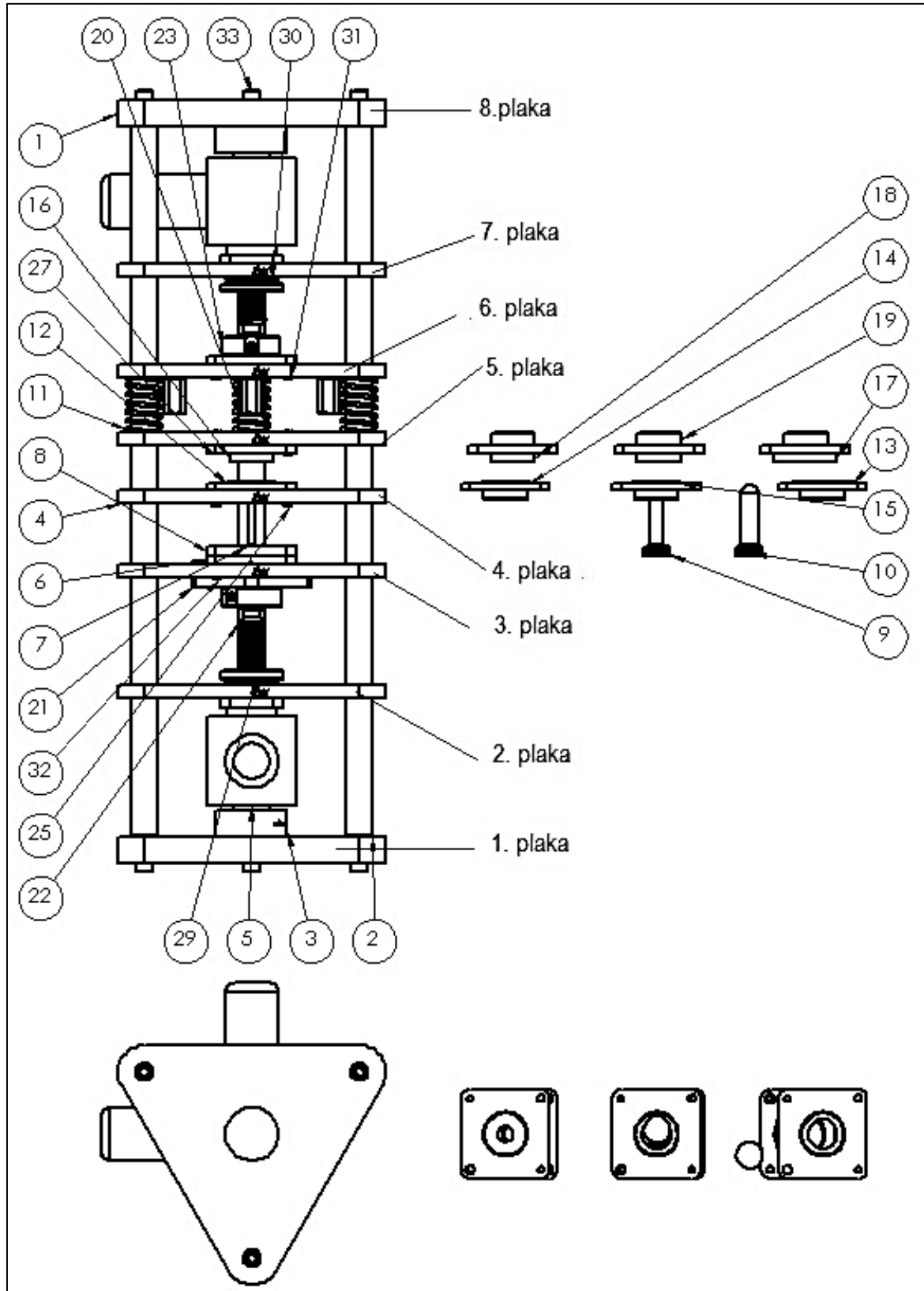
Bu tez çalışmasında DC servomotorların ve bilyalı vida-somun çiftlerinin yer aldığı Erichsen Test Donanımı; mevcut haliyle hem ticari ortamlarda yer alan hem de akademik çalışmalarda dikkate alınan donanımlardan önemli farklara sahip olarak tasarlanmış ve prototip imalat yapılmıştır.

Donanımının önemli bir özelliği, sac metal malzemenin derin şekillendirme sırasında tam boyun verme (yırtılma) anında oluşan kuvvetin tespit edilebilmesidir. Test donanımında, numune sac metal malzemenin sıkılması ve küresel uçlu zımbanın tahriki, DC servomotorlar ve bilyalı vida-somun çiftlerinin hareket ve kuvvet aktarımı ile yapılmıştır.

4.1. Erichsen Şişirme Test Donanımının Mekanik Tasarımı ve Üretimi

Tam Otomatik Erichsen Şişirme Test Makinesi tasarımı ve üretimi; bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında modellenmiş, bilgisayar destekli dayanım analizi (CAE) ile donanımın kritik parçalarının doğrulanması yapılmış, donanımda yer alan standart olmayan makine elemanlarının imalat teknik resimleri hazırlanmış, imalatını müteakip donanımın montajı yapılmıştır. Standart makine elemanları ticari olarak satın alınarak temin edilmiştir.

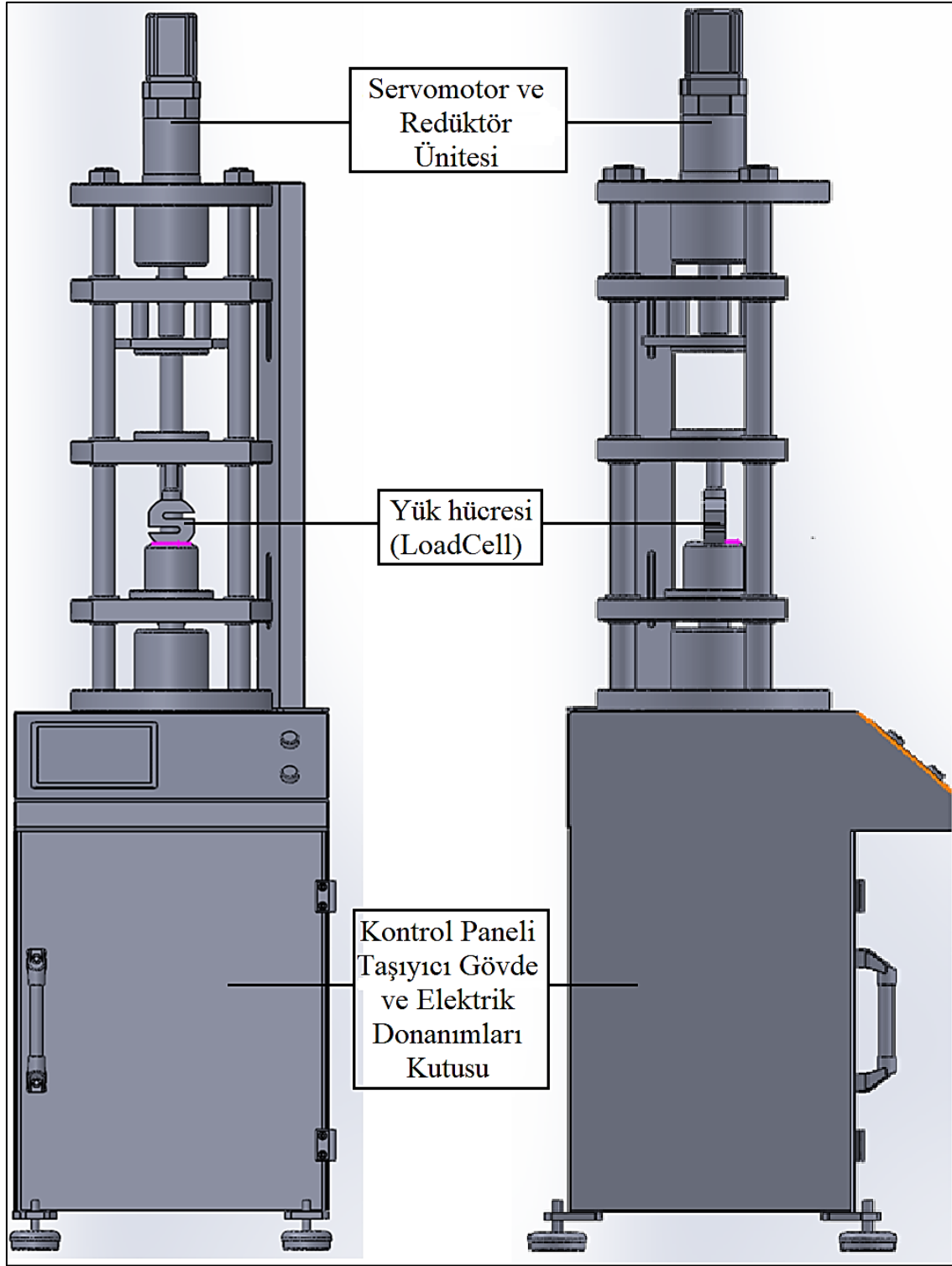
Toplam 47 adet parçadan oluşan montaj edilmiş donanımın, 29 adet parçası imal edilmiş, 18 parçası ticari olarak hazır temin edilmiştir. Şekil 4.1’de imalatı yapılacak donanımın ilk tasarımının Solidworks ortamında çizimi, Çizelge 4.1’de ise bu tasarımda donanımın elemanlarının listesi verilmiştir. Şekil 4.2’de ise tez kapsamında tasarımı ve imalatı hedeflenen donanımın nihai görünüşleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Tam otomatik Erichsen şişirme test donanımının CAD ortamında yapılan ilk modeli

Çizelge 4.1. Şekil 4.1'deki donanımın elemanları

Parça No	Parça Adı	Açıklama	Adet
1	Alt Tabla		2
2	Taşıyıcı Mil		3
3	Yük Hücresi		2
4	Motor Bağlantı Plakası		6
5	Servomotor ve Hız Kutusu		2
6	Zımba Dayama Plakası		1
7	Zımba- Çap 8 mm		1
8	Zımba Bağlama Plakası		1
9	Zımba-Çap 15 mm		1
10	Zımba-Çap 20 mm		1
11	Yay-34x4x60		3
12	Baskı Plakası-Çaplar 10 mm ve 55 mm		1
13	Baskı Plakası-Çaplar 33 mm ve 70 mm		1
14	Baskı Plakası-Çaplar 18 mm ve 55 mm		1
15	Baskı Plakası-Çaplar 33 mm ve 55 mm		1
16	Dişi Plakalar-Çaplar 11 mm ve 55 mm		1
17	Dişi Plakalar-Çaplar 40 mm ve 70 mm		1
18	Dişi Plakalar-Çaplar 21 mm ve 55 mm		1
19	Dişi Plakalar-Çaplar 27 mm ve 55 mm		1
20	Dayama 40 mm		3
21	Küresel Yuvalı Plaka		2
22	Bilyeli Vida		2
23	Küresel Yuvalı Kapak		2
24	ISO 2338-6m 6x50-St		2
25	ISO 2338-8m 6x26-St		4
26	ISO 2338-8m 6x35-St		1
27	ISO 2338-10m 6x26-St		4
28	ISO 2338-10m 6x35-St		1
29	Bilyeli Vida Somunu		2
30	ISO 104-704560-8,38, DE, NC, 38-68		2
31	ISO 4762 M6x20-20N		8
32	ISO 4762 M6x30-30N		2
33	ISO 4762 M12x30-30C		6



Şekil 4.2. Otomatik Erichsen Şişirme Test Donanımının CAD ortamında hazırlanan üç boyutlu nihai modeli

4.1.1. Bilgisayar destekli tasarım (CAD)

Otomatik test donanımının 3 boyutlu modelleme ve analiz işlemleri, bilgisayar ortamında Solidworks 2016 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2). Erichsen test donanımının CAD ortamında 3 boyutlu model görüntüleri verilmiştir. Tam otomatik Erichsen şişirme test donanımı, derin çekme ile şekillendirme esas alınarak tasarlanmıştır. Donanım esas itibarıyla küresel uçlu zımba, baskı plakası ve şekillendirme kalıbından oluşmaktadır. Baskı plakasının baskı kuvveti ve hızı ile küresel uçlu zımbanın tahrik hızı donanımın kumanda panelindeki dijital ekrandan ayarlanabilmektedir. Baskı plakası, dış üstü çapı 40 mm ve adımı 5 mm olan bilyalı vidalı mil ile hareket ettirilmektedir. Bilyalı vidalı milin dönel hareketini, devir sayısı 3000 devir/dakika, gücü 0,4 kW ve moment değeri 1,27 N.m olan bir servomotor sağlamaktadır. Baskı plakası kuvveti doğrudan, servomotor tarafından tahrik edilen, 1/50 tahrik oranlı servoredüktörün ürettiği momentden sağlanmıştır. Kuvvet, ekran da ilgili kısma % N.m cinsinden ve baskı plakasının tahrik motorunun gücünün % oranı ile kontrol edilmektedir.

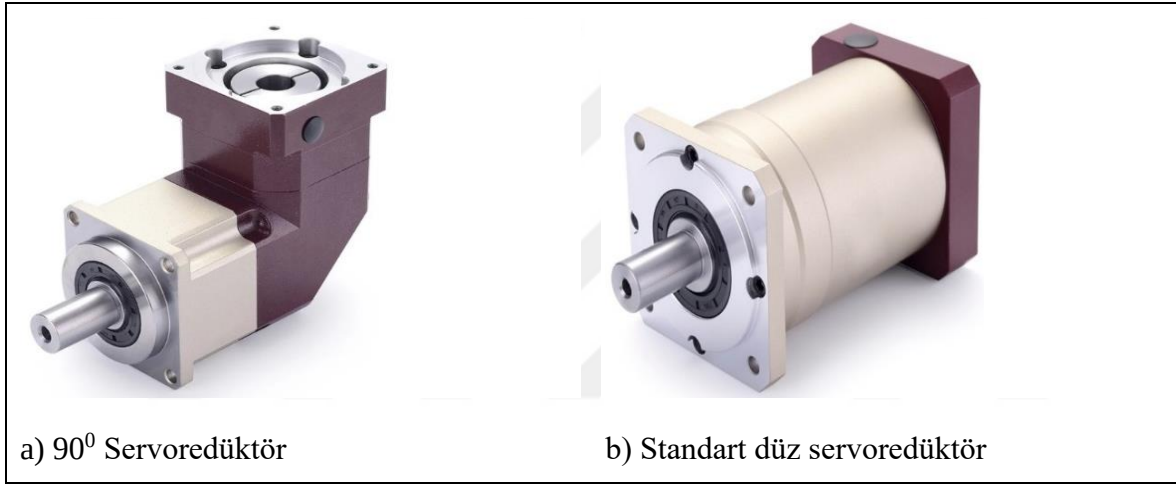
Benzeri test donanımlarının ticari modellerinin incelenmesinde; tahrik mekanizması olarak, manuel veya hidrolik gücün işlem yaptığı görülmüştür. Akademik bazı çalışmalarda ise başlıbaşına bir Erichsen test donanımının yapılmadığı, çalışmalar için amaçsal olarak üretilen veya hidrolik pres gibi kuvvet makinelerine adapte edilerek işlem yapabilen cihazların var olduğu da tespit edilmiştir. Donanımın hem ticari hem de akademik çalışmalarda yer bulabilme amacı güdülerek Şekil 4.1’de görülen ilk model oluşturulmuştur. Montajı oluşturan her bir parçanın imalat imkânları, donanımda bulunma zorunluluğu, donanımın genel ebatlarıyla, genel cihaz fiziki görünümüne etkisi ve imalat maliyeti kriterleri de göz önüne alınarak Resim 4.2’ de görülen son tasarıma ulaşılmıştır.

Donanımın tasarım, üretim ve maliyetinde herhangi bir yer, kuruluş veya firmadan destek alınmamıştır. Standart olmayan makine elemanlarının üretimleri için gerekli takım, tezgah ve avadanlıklara ulaşma imkanına sahip olunamaması nedeniyle CNC makinelere sahip bir imalat atölyesinde, imalatın her aşaması doğrudan takip edilmiş ve zaman zaman imalat işlemlerine araştırmacı bedenen ve fikren katkı sağlamıştır.

4.2. Tasarım ve İmalat Aşamalarında Donanımda Yapılan Değişiklikler ve Nedenleri

4.2.1. Servoredüktörler

İlk tasarımda bulunan 90° servoredüktörler değiştirilmiş, standart düz servoredüktörler tercih edilmiştir (Resim 4.1). Donanımın alt ve üst yan taraflarında gereksiz bir alan işgal etmesine neden olması yanında donanımın fiziki görüntüsünü olumsuz etkilemesi, imalat aşamasında bilyalı vida-somun çitlerinin doğrusal hareket alanının çok kısıtlanmasına yol açması bu değişikliğin sebepleri olmuştur.



Resim 4.1. Servoredüktör çeşitleri [101]

Servomotorların itme kuvvetlerini artırabilmek için donanımda, 1/50 çevrim oranına sahip düz servoredüktörler seçilmiştir. Baskı plakasını tahrik eden servomotorun ürettiği döndürme momenti 1,27 N.m'dir. Zimba plakasını tahrik eden servomotorun ürettiği döndürme momenti ise 2,4 N.m'dir.

Her iki servomotor ile çalışan servoredüktörlerin tahrik ettikleri bilyalı millerin çapları 40 mm, vida adımı 5 mm'dir. Her iki servoredüktörün çevirme oranı 1/50'dir. Baskı kuvveti için üretilen itme kuvveti 1436 N'dur. Redüktör çevrim oranı 1/50 ve redüktör verimi %97'dir. Servomotorun ürettiği en büyük itme gücü; $F_{\max}=69,646$ kN'dur. Erichsen şişirme testi için uygulanan en büyük standart baskı kuvveti 20 kN'dur.

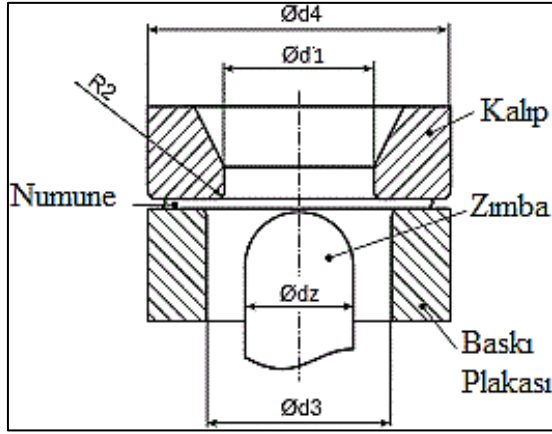
Zimba kuvveti için üretilen itme kuvveti 2703 N'dur. Redüktör çevrim oranı 1/50 ve redüktör verimi %97'dir. Servomotorun ürettiği en büyük itme gücü; $F_{\max}=131,097$ kN'dur.

Bu değerler incelendiğinde, üretilen kuvvetin 1 mm kalınlığındaki paslanmaz elik sac malzemelerin dahi donanımında teste tabi tutulabileceği öngörülmüştür. Servomotor ve servoredüktörler ticari ortamlardan hazır temin edilmişlerdir.

Mil apı 40 mm, vida adımı 5 mm, vidalı mil uzunluğu 250 mm, servoredüktör çevrim oranı 1/50 ve servomotor tork gücü 1,27 Nm alındığında servomotorun baskı plakasına uygulayabildiği en büyük kuvvet; 69.660 N’dur.

Dijital ekranda baskı plakasına uygulanacak kuvvetin karşılığı, % cinsinden N olarak yazılmaktadır; örneğin 20 kN uygulanacak kuvvet için yüzde değeri; $69.662 \times X = 100 \times 20.000$ eşitliğinden, $X = 100 \times 20.000 / 69.660 = \%28,71$: olarak çekilmekte ve, $X = 28,71 \approx \%29$: yuvarlatılmış oran ile en büyük kuvvetin çarpımıyla baskı plakasının yükü, $0,29 \times 69.660 = 20.200 \text{ N} = 20,2 \text{ kN}$; olarak elde edilmektedir.

Küresel uçlu zımbanın doğrusal hareketini de 0,75 kW ve moment değeri 2,4 N.m olan bir servomotor sağlamaktadır. Zımbaya itme kuvveti, servoredüktör ve bilyalı vidalı mil grubu üzerinden geçerek ulaşmaktadır. Zımbanın hareketini sağlayan plakanın üzerinde ve zimba nitesi taşıyan “S” tipi yaklaşık 50 kN yük kapasiteli yk hücresi bulunmaktadır. Zimba bu yük hücresine vidalanarak monte edilecek şekilde modellenmiş ve imal edilmiştir. Zimba ve baskı plakası baskı kuvvetleri, donanım üzerindeki digital ekrandan okunmaktadır. Baskı plakasının hızı ve basıncı, zimba hızı ve baskı kuvveti ekran üzerinden ayarlanabilmektedir. Yük hücresi ve servomotorlardan alınan veriler veri okuma ve kontrol kartları ile elde edilmekte ve bu tez çalışması kapsamında hazırlatılan takip ve kontrol yazılımı ile, yırtılmaya kadar olan şişirme süreci kontrol edilmektedir. şekil 4.3’de donanımın numune şişirme mekanik kısmının kesit grntş verilmiştir.

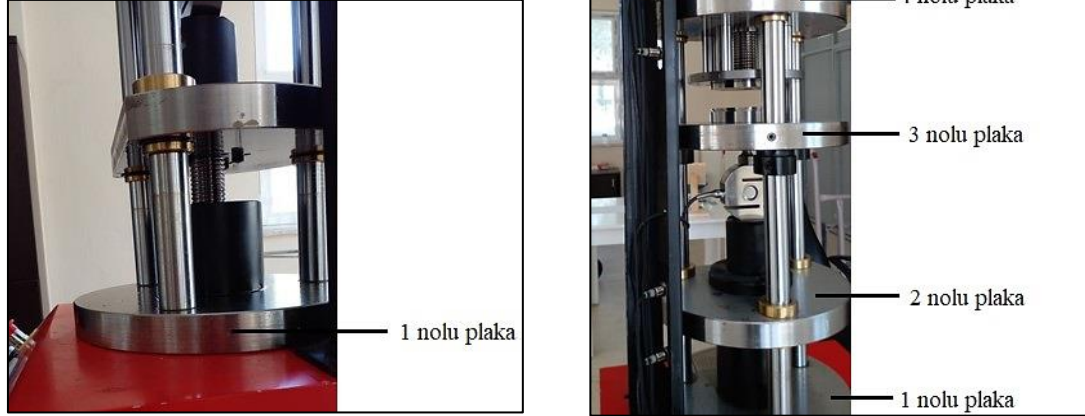


Şekil 4.3. Erichsen Test donanımının şişirme mekanik kısmının ISO 20482'ye göre hazırlanan kesit görüntüsü [1]

4.2.2. Plakalar

İlk tasarımda yerleştirilen 8 adet plaka, son tasarımda 5 adet plakaya düşürülmüştür. Düz servomotorların ve bunlarla beraber çalışacak servoredüktörlerin konumlandırma durumları yeniden gözden geçirilmiş ve bazı elemanlara ihtiyaç olmadığı görülmüş ve nihai tasarım buna göre yapılmıştır.

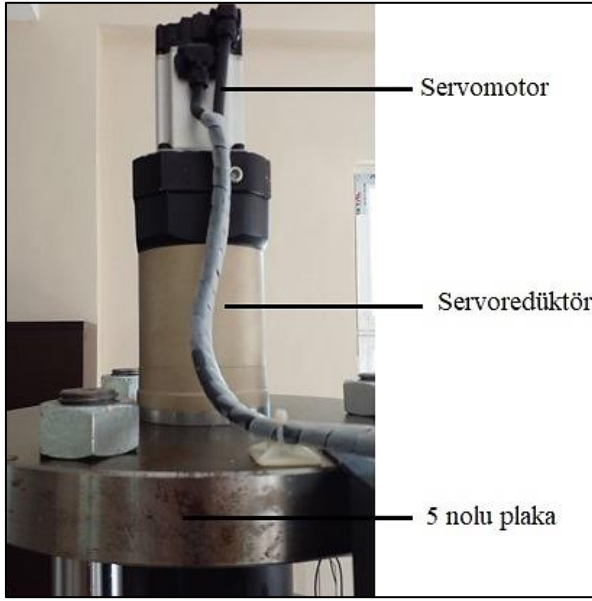
Zimba plakası ve grubunu tahrik eden servomotor ve servoredüktörün yerleşimi 1 nolu plakanın alt kısmına yerleştirilmiştir. Servoredüktörün konumunu muhafaza eden 2 nolu plakaya ihtiyaç kalmamıştır. Son tasarımda zimba grubunun dik doğrusal alternatif hareketinde, konumunun korunması için tek plaka monte edilmesi yeterli görülmüştür (Resim 4.2). Baskı plakası ve grubunu tahrik eden servomotor ve servoredüktörün 8 nolu plakanın üzerine monte edilmesi ile bilyeli mil ve somunun konumunu destekleyen 7 nolu plakanın işlevi sona ermiştir. Bu görevi 6 nolu plaka yapmaktadır. 6 nolu plaka hem bilyalı mil ve somunu doğrusal dik tahrik hareketinde merkezleme konumunu sağlamakta, hem de 5 nolu plaka yerine yeniden tasarlanan dişi kalıp yatağını taşımakta olduğundan son tasarımda 5 nolu plaka iptal edilmiştir.



Resim 4.2. Zımbayı tahrik eden servomotor/servoredüktörü konumlandıran 1 nolu plaka

İmalatları, ölçülendirilmesi ve monte edilebilmeleri daha pratik ve basit olması nedeniyle, ilk tasarımda prizmatik olarak tasarlanan baskı plakası ve dişi kalıp grupları, son tasarımda silindirik profilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Baskı kuvvetinin ölçülmesi, kontrolünün daha zor olması ve hatalara sebep olacağı düşünülerek ilk tasarımda kullanılan 4 adet yay iptal edilerek, yerine 4 adet silindirik mil tasarlanmış ve imal edilmiştir. Dişi kalıbın bağlandığı yatak bu millerin alt kısmına monte edilerek donanım sadeleştirilmiştir. Son tasarımla donanım mümkün olduğu kadar sadeleştirilmiş, gereksiz görülen elemanlar donanımdan çıkarılmıştır. Resim 4.3'te servomotor ve servoredüktörü taşıyan 5 nolu plaka görülmektedir. Donanımın imalatı, hazırlanan son tasarıma göre yapılmıştır.

Yukarıda beyan edilen tespit ve değişikliklerin sonucu olarak; ilk tasarımda toplam 33 adet parçadan oluşan montaj, 7 parça azaltılmasıyla alt taşıyıcı ünite hariç, toplam 26 adet münferit parça ile donanım son haline dönüştürülmüştür.



Resim 4.3. Baskı plakasını tahrik eden servomotor/servoredüktörü taşıyan 5 nolu plaka

4.2.3. Yük hücresi

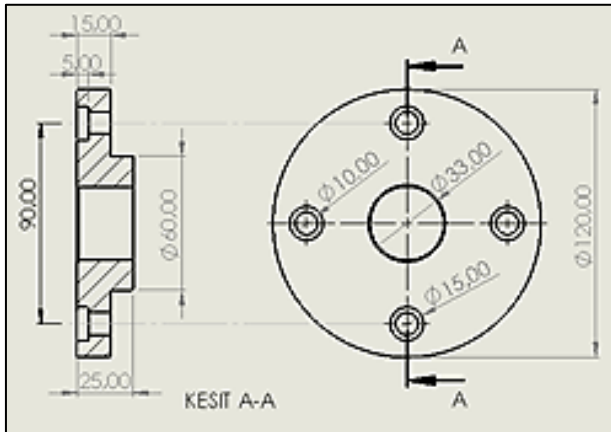
Donanımın maliyeti de göz önüne alınarak, sac malzemeye uygulanan baskı kuvvetinin, servoredüktörün moment değerinin üzerinden ölçmek yeterli olacağı düşünülerek son tasarımda baskı kuvvetini ölçme amaçlı planlanan yük hücresi kaldırılmıştır. Resim 4.4’de gösterilen zımba yük hücresi, doğrudan bilyalı somun üstüne monte edilmiş, değiştirilebilir küresel uçlu zımbalar, doğrudan yük hücresi üstüne monte edilmesiyle ilk tasarımda, arada kullanılan diğer elemanlar iptal edilmiştir. Bilyalı millerin doğrusal hareket alanlarının sınırlı olması ile birlikte bilyalı millerin donanıma montesinin zorluğu açısından ilk tasarımda yerleştirilen “basma-çekme” tipi yük hücreleri değiştirilmiş, yerine donanıma yerleştirilmesi ve ilgili elemanların üretimi daha kolay olması nedeniyle “S” tipi yük hücresi tercih edilmiştir. Yük hücresi ticari ortamdan hazır temin edilmiştir.



Resim 4.4. “S” tipi yük hücresi

4.3. Kalıpların Profilleri

Test donanımının önemli bir aparatı olan baskı plakası ve dişi kalıbın ilk tasarımlarının imalatı yapılmış, daha sonra baskı plakası (Şekil 4.4) ve kalıplarda bazı önemli değişikliklere gidilerek son tasarımı yapılmış ve üretilmiştir.

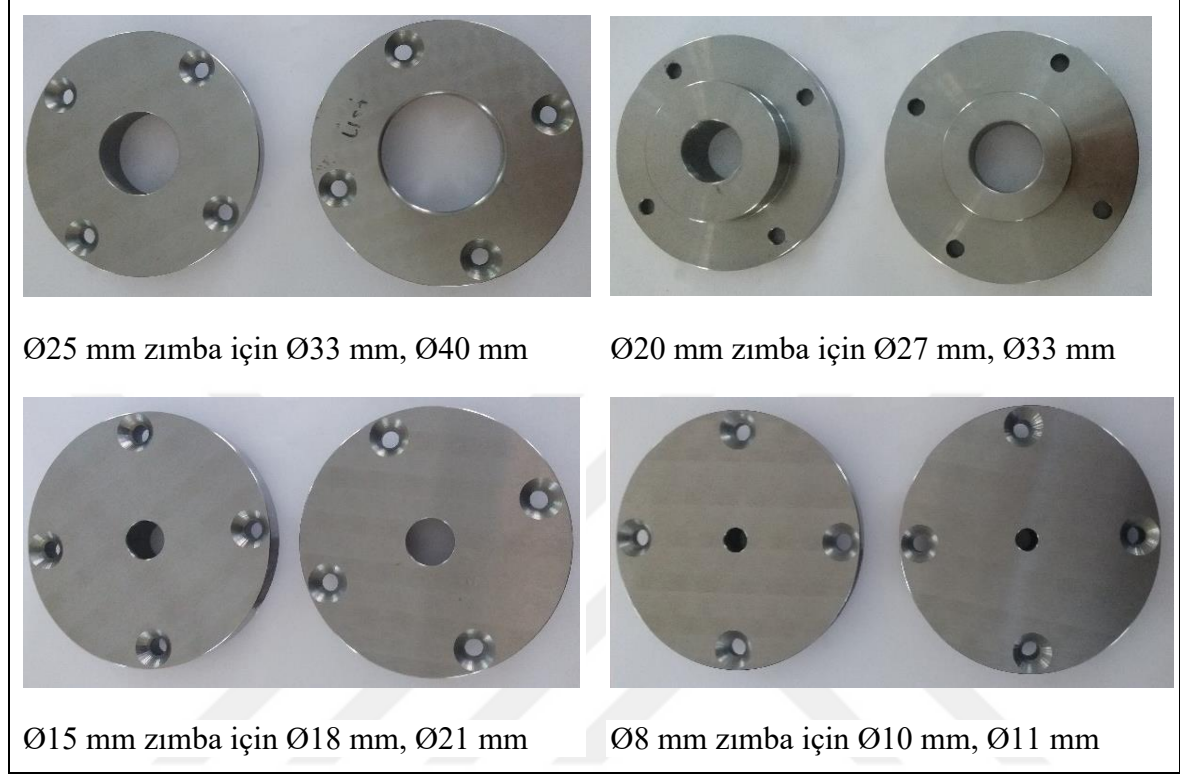


Şekil 4.4. İmalatı yapılan baskı plakası teknik resmi

4.3.1. İlk tasarımda imalatı yapılan test kalıpları-zımbaları ve teknik özellikleri

ISO 20482 Standardı kapsamındaki tüm deneyleri kapsayacak şekilde, baskı plakası ve küresel uçlu zımbalar tasarlanıp imal edilmiştir. Literatür taramasında da tespit edilen, ürün geometrisi için ayrı ayrı 4 takım kalıp, baskı plakası ve zımba grubu kurgulanmıştır. Kalıp ve baskı plakası delik geometrisinde yer alan ve malzeme akışını kolaylaştıran kalıp

radyüslerinde 0,75 mm yarıçaplı kavis değeri uygulanmıştır. Küresel uçlu zımbalar her kalıp-baskı plakası grubu için ayrı üretilmiştir (Resim 4.5).



Resim 4.5. Dişi kalıp ve baskı plakası resimleri

Kalıp ve baskı plakası malzemeleri ve bunları taşıyan diğer plakalar için, Ç1040 malzeme kullanılmış ve CNC takım tezgâhında imalat yapılmıştır. 4 adet küresel uçlu zımba, 4 adet baskı plakası ve 4 adet kalıp plakası olmak üzere 4adet kalıp seti oluşturulmuştur.

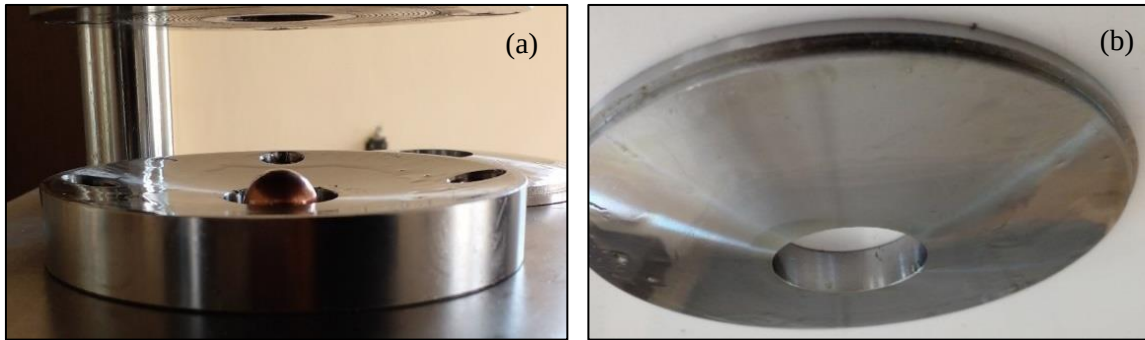
Çizelge 4.2’de, ISO 20482 standardı kapsamında beyan edilen tüm zımba çaplarına uygun olan ve buna bağlı önerilen kalıp ve baskı plakalarının ölçüleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Zimba küre çaplarına göre dişi kalıp ve baskı plakası delik ölçüleri

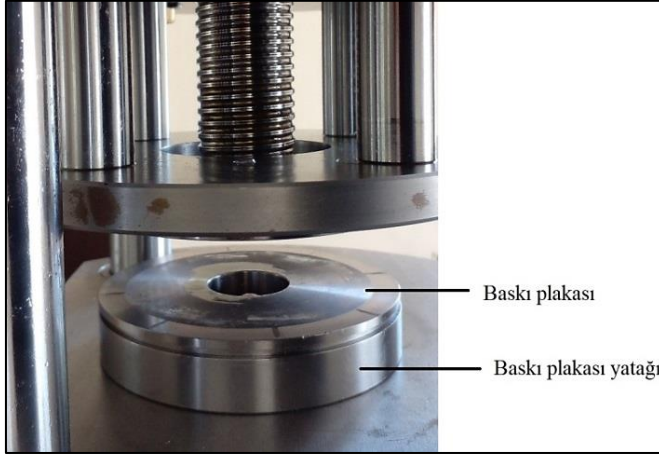
Zimba küre çaplarına göre dişi kalıp ve baskı plakası delik ölçüleri		
Zimba küre çapı, mm	Dişi kalıp deliği çapı, mm	Baskı plakası delik çapı, mm
25	33	40
20	27	33
15	18	21
8	10	11

4.3.2. Son tasarımda imalatı yapılan deney kalıpları-zımbaları ve teknik özellikleri

Prizmatik şekilde tasarlanmış baskı kalıbı ve dişi kalıp, tasarımı, donanıma monte edilmesi ve imalatı daha pratik, daha ekonomik ve görünümü daha uygun olduğu için son tasarımda kalınlıkları artırılarak silindirik profilde tasarlanmışlardır. İlk tasarımda, baskı plakası ile dişi kalıp, donanımdaki yerlerine cıvatalarla sabitlenirken, son tasarımda, baskı kuvvetinin, numune sac malzemenin bütün yüzeyine eşit dağılmasını sağlamak için, baskı plakası yüzeyine R285 mm yarıçaplı radyüs verilerek üretilmiştir (Resim 4.6). Bunun üzerine yerleştirilmek üzere ve alt yüzeyinde R285 mm yarıçaplı bir radyüs bulunan ikinci bir parça oluşturulmuştur (Resim 4.7).



Resim 4.6. Son tasarımda imal edilen Baskı plakası grubu. a) Baskı plakası alt parçası, b) Baskı plakası üst parçası



Resim 4.7. Alt ve üst yüzeyleri R285 mm radyüslü baskı plakası yatağı ve baskı plakası

Üst yüzeyi düz olan bu parçanın alt bombesi, sabit parçanın iç bombesi içinde oynak bir zemin oluşturarak, zımba plakası tarafından uygulanan kuvvetin homojen dağılmasına neden olmaktadır. İki plaka arasında homojen sıkılan numune sac malzemenin Erichsen Sabiti değeri daha sağlıklı tespit edilmesi neticesini vermektedir. Kalıpların baskı plakası ve dişi kalıp delik çapları ISO 20482 standardının gereklerine göre işlenmiştir.

İlk tasarımda kalıp ve baskı plakalarının, numune sac plakayı tutan yüzeyleri Ra 3,2 μm yüzey pürüzlülüğüyle işlenmişti. Literatürde baskı plakasının numuneye basan yüzeyinin pürüzlülüğü ve işleme izleri hususunda herhangi bir kısıtlayıcı öneri bulunamamasına rağmen numune malzemenin delik içine kolay kaymasını önlemek amacıyla dişi plaka ve baskı plakası yüzeylerinde Ra 6,3 μm yüzey pürüzlülüğü ve spiral işleme izleri oluşacak şekilde işleme yapılmıştır.

Kalıp ve baskı plakaları yüzey pürüzlülüğü hesabı; Ra : Ortalama yüzey pürüzlülüğü 6,2 μm alınmış ve önce Rt : En büyük pürüzlülük değeri (μm) bulunmuştur.

$$R_t = 4 \cdot R_a \quad (4.1)$$

$R_t = 4 \cdot 6,2 = 24,8 \mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir.

Kesicinin uç kavis yarıçapı r : ISO'ya göre 0,2 mm / 0,4 mm / 0,6 mm ...vb. sırada standart olarak önerilmektedir. Tornalamada kesici uç yarıçapına ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı ilerlemenin deneysel eşitliği;

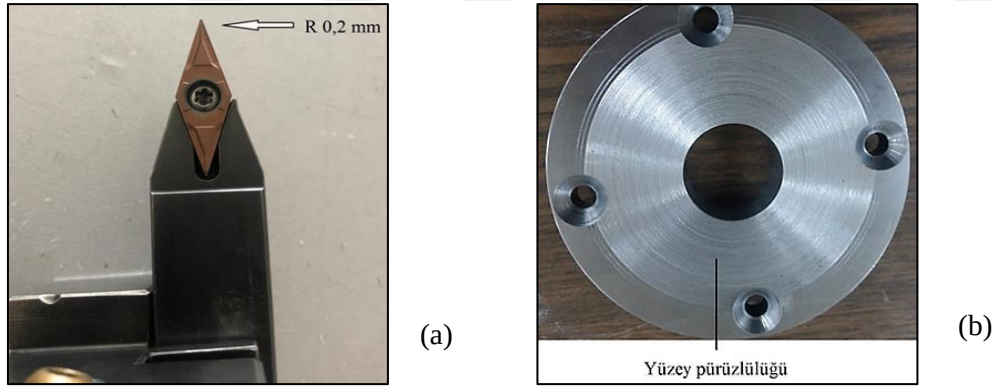
$$F = \sqrt{(8 \cdot R_t \cdot r)} \quad (4.2)$$

alınır ve bu eşitlikte bilinenler yerine konursa;

$$F = \sqrt{\left(\frac{8 \cdot 24,8}{1000}\right)} \cdot 0,2$$

$F = 0,199 \cong 0,2$ mm/devir olarak elde edilir.

Uç yarıçapı $r = 0,2$ mm olan kesici ile 0,2 mm/devir ilerlemede alın tornalama işlemi, sac metal numunelere basan dişi ve baskı plakalarının yüzeyleri işlenmiştir. Bu durumda yaklaşık olarak $R_a = 6,3$ μm ortalama yüzey pürüzlülüğü baskı plakasının yüzeyinde elde edilmiştir. ISO 20482 standardı baskı plakasında olması gereken yüzey pürüzlülüğü değeri ve işleme izi motifi için herhangi bir öneride bulunmamaktadır. Sac metal numunelerin kayma olmaksızın şişirilebilmeleri bakımından ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ve işleme izlerinin spiral motifte olması uygun görülmüştür (Resim 4.8).

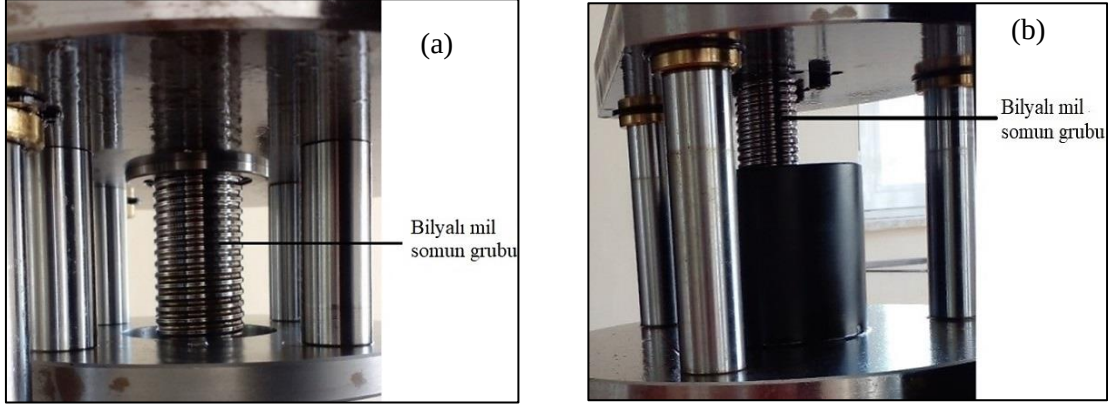


Resim 4.8. a) $r = 0,2$ mm uç kavis yarıçaplı kesici takım, b) 0,2 mm/devir ilerleme ile işlenmiş kalıp plakası yüzeyi

4.3.3. Bilyalı vidalı mil sayısı ve yerleşimi

Baskı plakası grubunu ve zımba grubunu tahrik eden olmak üzere ilk tasarımda belirlenen iki adet bilyalı vida-somun çiftlerinin kesin yerleşimi son tasarımda yapılmış ve boyutlandırılması üretim sırasında belirlenmiştir. Bilyalı vidalı millerin boyları ve çapları, bilyalı somunların çalışma konumları, servoredüktörlerin ölçüleri ve kuvvet değerleri göz

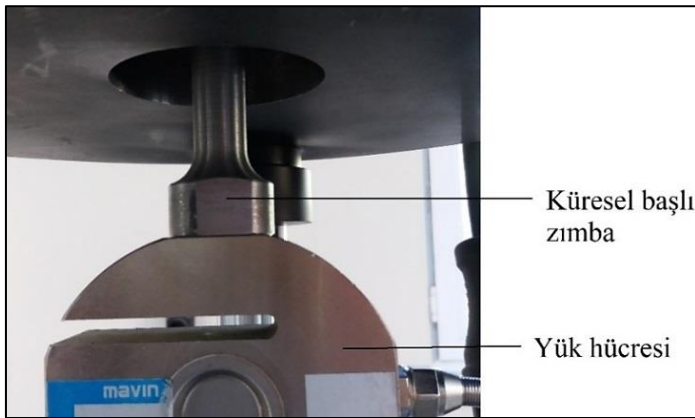
önüne alınarak, nihai revizyon üretim sırasında yapılmıştır. Bilyalı vidalı miller, bilyalı somunlar hazır temin edilmişlerdir (Resim 4.9).



Resim 4.9. a) Baskı plakasını, b) Zımbayı tahrik eden bilyalı vida somun çifti

4.3.4. Zımba bağlantısı

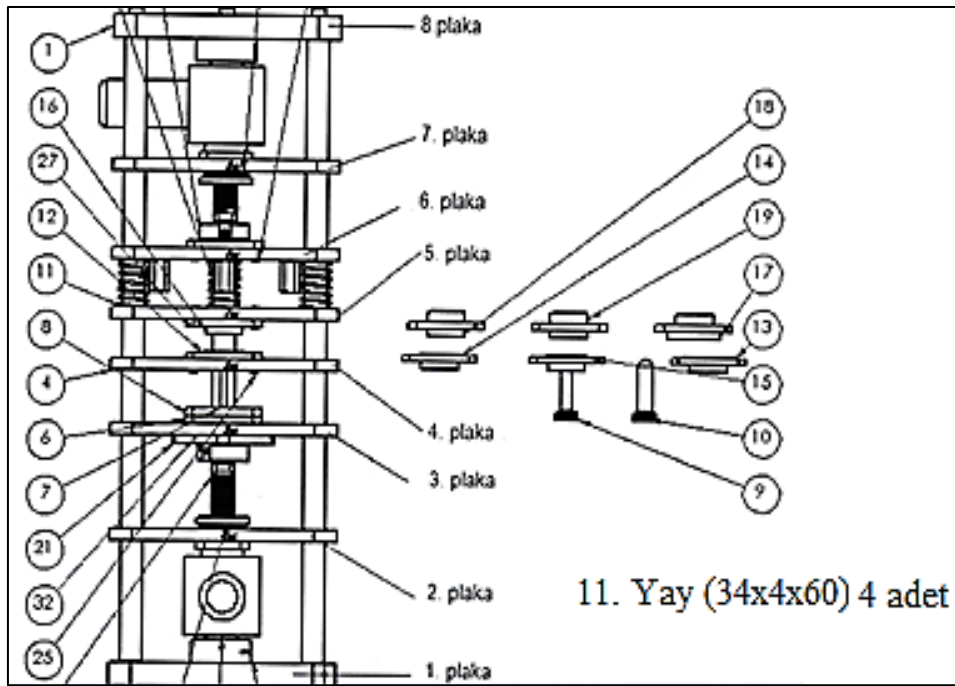
ISO 20482 standardına göre, çapları 8 mm, 15 mm, 20 mm ve 25 mm olan dört adet küresel uçlu zımba üretilmiştir. İlk tasarımdaki taşıyıcı ve konumlandırıcı plaka sayısı 5 adet olarak revize edilince, zımbayı hem konumlandıran hem de bilyalı vida somun çifti yoluyla donanımın dikey eksenli boyunca hareket eden tek plaka üretilmiştir. Zımba herhangi bir ara elemana ihtiyaç olmadan doğrudan yük hücresi üzerine bağlanmıştır (Resim 4.10).



Resim 4.10. Zımba bağlantısı

4.3.5. Yayların iptali

İlk tasarımda numune sac malzemeyi tutma kuvvetini uygulayacak olan 4 adet yayın uygulayacağı kuvveti hesaplamak ve kontrol etmek kontrol problemleri üretecek olması nedeniyle iptal edilmiştir. İptal edilen yay grubu Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Numune malzemeyi tutma kuvvetini, baskı plakasını kontrol eden servo redüktörün ürettiği moment değerinden türetilmiştir. Bunun için tasarlanan bir kalibrasyon aparatı ile baskı kuvvetinin doğruluğu onaylanmıştır. Kalibrasyon aparatı 4. Bölümde gösterilmiştir.



Şekil 4.5. İlk tasarımda donanıma yerleştirilen yay grubu

4.4. Test Donanımının Diğer Test Cihazlarından Farklılıkları

Yapılan literatür taramasında akademik çalışmalarda üretilen Erichsen test cihazlarının basit bir aparat düzeyinde kaldığı, sac numunelerin şişirilmesi ve deformasyonu sürecinde hidrolik ve/veya mekanik pres makinelerinden yararlanıldığı görülmüştür. Çoğu donanımlarda baskı kuvveti ve zımba kuvveti elde etmek için el kumandası tercih edilmiştir. Bu cihazlarla test esnasında numune sac malzemenin tam yırtılma anının tespiti ve cihazın sac numunenin yırtılma deformasyonu anındaki kontrolü oldukça zor, hatta imkânsız olmaktadır. Endüstriyel üretilen bazı Erichsen test cihazlarında Erichsen sabiti değerinin tespiti mümkün olmakta ancak sac numuneye uygulanan baskı kuvveti için, maliyeti yüksek

hidrolik sistemden faydalanılmıştır. Üretilen Erichsen şişirme test donanımının tüm tasarım ve imalatı, araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiş, tasarım ve imalatı yapılan donanımın, diğer cihazlardan farklılıklara sahip olmasına özen gösterilmiştir. Donanımda, diğerlerinden farklı ve aynı zamanda bir ilk olarak, numune sac malzemeyi tutma kuvveti ve zımba kuvveti için servomotorlar ve servoredüktörler kullanılmıştır. Servomotorların döndürme kuvvetinden doğan doğrusal kuvvet 1/50 oranlı servoredüktörler yoluyla artırılmıştır. Test cihazının sahip olduğu yazılımla, zımba ilerleme hızı da baskı plakası hızı da 0-100 mm/s arasında donanım ekranından ayarlanabilmektedir. Bu cihaz ile sac malzemenin yırtılma anı deformasyonu müteakip hemen tespit edilebilmektedir. Erichsen Sabiti, 0,001 mm hassasiyetle ölçülebilmektedir. Üretilen bu donanım sayesinde daha güvenilir ve hassas test sonucu elde edilebilmektedir.

4.5. İmalat ve Montaj

Üç boyutlu tasarım ve mühendislik analizleri ile tasarımın doğrulanması aşamalarından sonra test donanımının imalatı ve montajı aşamasına geçilmiştir. Elektrik ve elektronik kontrol ünitesi ile yazılım programının kurulması ve çalıştırılmasında hizmet alımı yapılmıştır. Test donanımında; baskı plakası kuvveti, zımba kuvveti, şişirme hızı ve parametreleri donanım üstüne monte edilen dijital ekrandan kontrol edilebilmesi önemle dikkate alınmıştır. Donanımın üzerinde taşınması ve rijit bir konumda kalması için sac metal gövdeden kaynaklı imalat yoluyla oluşturulan kaide yaptırılmıştır (Resim 4.11). Kaidenin iç kısmından elektrik/elektronik tesisatı elemanlarının yerleştirilme ortamı olarak faydalanılmıştır.

İmalat aşamasında, öncelikli olarak mekanik parçaların imalat teknik resmi çizilmiş ve daha sonra ticari olarak ham malzeme temini gerçekleştirilmiştir. Mekanik parçaların imalatının tamamlanması ile test donanımının montajı aşamasına geçilmiştir. Resim 4. 11 ila 4. 24'de; test donanımının imalat aşaması sürecine yönelik imal edilen parçalara ve alt montaj birimlerine dair fotoğraflar verilmiştir.



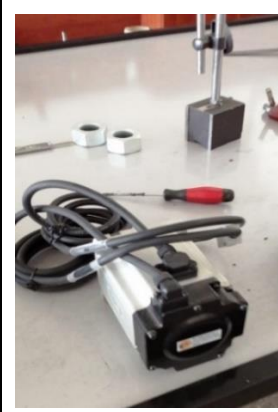
Resim 4.11. Mekanik sistemi üstünde taşıyan ve kumanda kısmının yerleştirildiği kasa



Resim 4.12. Plakaların üretimi



Resim 4.13. Servomotor, servoredüktör ve sinyal kabloları (hazır)



Resim 4.14. Servomotor ve sinyal kabloları (hazır)



Resim 4.15. Servoredüktör ve sinyal kabloları (hazır)



Resim 4.16. Plakalar ve burçların imalatı



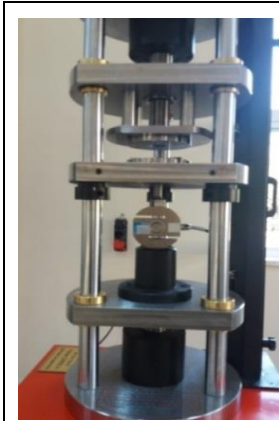
Resim 4.17. Test donanımının montajı-1



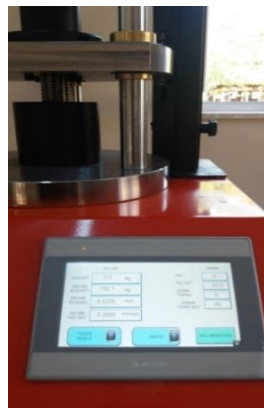
Resim 4.18. Test donanımının montajı-2



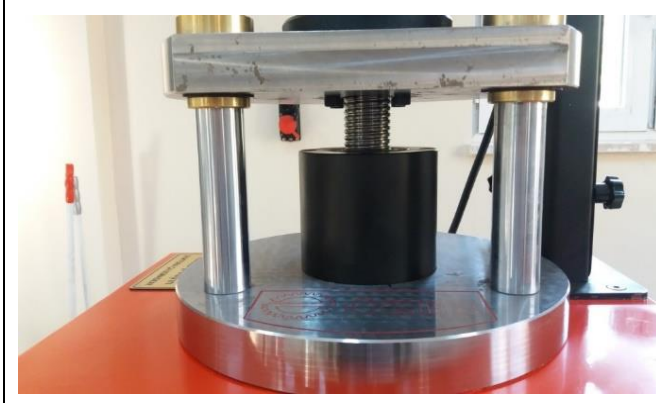
Resim 4.19. PLC Kumanda grubunun montajı



Resim 4.20. Baskı plakasının montajı



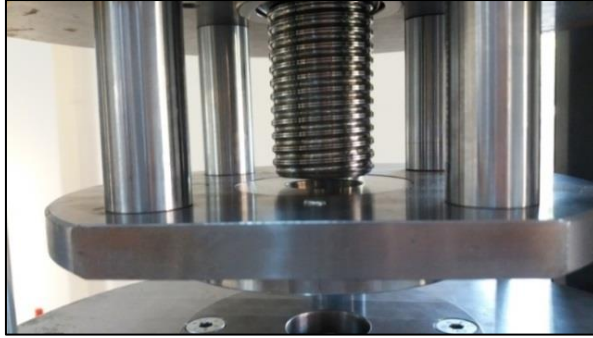
Resim 4.21. PLC Dijital ekranın montajı



Resim 4.22. Zimba plakası ünitesinin montajı

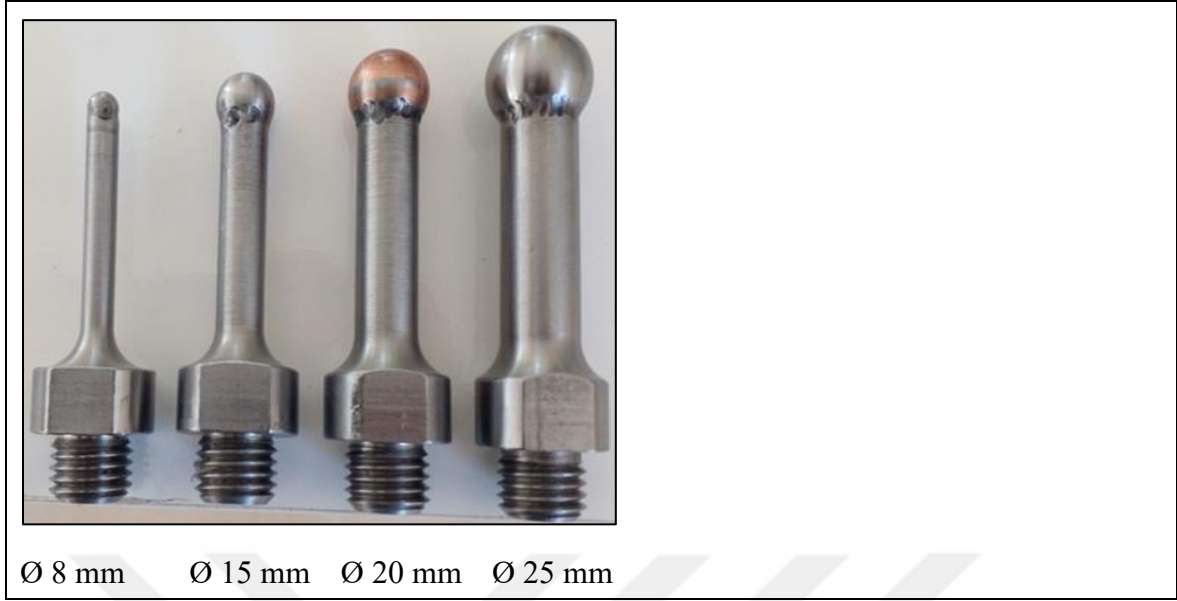


Resim 4.23. Yük hücresinin montajı



Resim 4.24. Hareketli kalıp plakası ve bilyalı vidalı milin montajı

Bu donanım, Erichsen şişirme testi olarak literatürde DIN EN ISO 20482, JIS Z-224, ASTM E643-84 ve TS EN ISO 20482 standartlarının kapsamında kalmaktadır. Erichsen testinde şişirme işlemi için Avrupa orijinli çalışmalarda küre çapı 20 mm olan zimba ağırlıklı olarak testlerde tercih edilmektedir. Bunun yanında, ISO 20482’de beyan edilen Ø 25 mm, Ø 15 mm, Ø 8 mm ölçülerindeki ilave zimba ve kalıplarıyla aynı donanımda test yapılabilmesi için modüler tasarım ve imalat esas alınmıştır. Resim 4.25’de numune sac malzemeyi şişirmek için imal edilen modüler küresel uçlu zimbalar gösterilmiştir.



Resim 4.25. Çaplarına göre modüler bağlanabilen küresel uçlu zımbalar

Donanımın emniyeti açısından baskı plakasını ve zımbayı tahrik eden bilyalı vidalı millerin kurs boyunun kontrolü önem arz etmektedir. Bu nedenle donanımda baskı plakası ve zımba kurs boylarının sınırlandırılmasını sağlayan sınır anahtarları kullanılmıştır. Baskı plakası ve zımba, sınır anahtarları ile ayarlanan aralıkta çalışma özelliğine sahiptir. Resim 4.26’da baskı plakasının çalışma alanını sınırlayan anahtarlar “üst sınır anahtarı”, zımba kurs boyunun hareketini sınırlayan anahtarlar “alt sınır anahtarı olarak tanımlanmıştır.

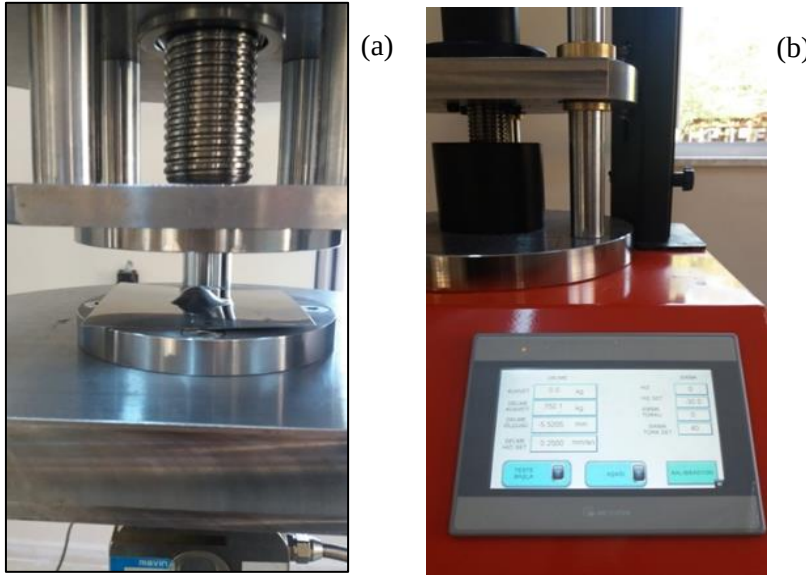
Erichsen testi esas alınarak yapılan şişirme testinde; sac numunede yırtılma deformasyonunun başladığı anda oluşan doğrusal derinlik belirlenmekte ve bu derinlik sac metal numunenin malzemesinin çekilebilirlik kriteri olarak yorumlanmaktadır.



Resim 4.26. Baskı plakası ve zımba kurs boylarını sınırlayan anahtarların montajı

Tez çalışması kapsamında sadece hassas doğrusal derinlik ölçme işlemi dikkate alınmamış, aynı zamanda zımbanın her anlık derinlikte karşılaştığı yük değişimi de yük hücresi vasıtasıyla elde edilmiştir. Numune üzerinde oluşan yırtılma tipi deformasyon anına kadar zımba hareketinin doğrusal hareket mesafesinin ölçümü testin sonucudur ve bu değer Erichsen Sabiti (ES) olarak adlandırılmaktadır. Her numune için en az üç test yapılması ve ortalama ES değerinin hesaplanarak milimetre olarak beyanı standardın gereğidir.

Test donanımının mekanik montajının yapılmasından sonra tüm konstrüksiyonun elemanları arasında çalışma uyumunun kontrolü gerçekleştirilmiştir. Elektrik- Elektronik kontrol veri okuma yazılım sisteminin tamamlanmasıyla test cihazının imalat safhası bitmiştir. Resim 4.27’de ilk deneysel çalışma ortamını temsil eden resimler verilmiştir.



Resim 4.27. Test donanımında a) Şişirilen ilk numune, b) Dijital ekran

4.6. Test Donanımının Teknik Özellikleri

Test cihazı genel olarak, mekanik konstrüksiyon, servomotorlar, servoredüktörler ve PLC tabanlı kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Resim 4.28’de tez çalışması kapsamında tasarımı ve imalatı yapılan tam otomatik Erichsen şişirme test donanımının elemanları detaylı olarak tanıtılmıştır. Erichsen şişirme testi, numune sac malzemeyi gerdirmek suretiyle ve şişirme tipi şekillendirme esnasında sac malzemede meydana gelen plastik deformasyona yatkınlığı tespit etmek için, standart bir deney yöntemini içermektedir. Bu test yöntemiyle sac metal malzemelerin plastik deformasyon yeterliliği tespit edilir. Bu esasa uygun prototip imalatı yapılan donanımın teknik özellikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

“Erichsen Sabiti” (ES) veya “Erichsen İndeksi” (EI) olarak adlandırılan numune sac malzemedeki şişme derinliği, çok sayıda imalat sektöründeki şase ve gövde yapımında kullanılan sac metal parçaların doğru ve verimli biçimlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu test cihazında da küresel uçlu zımba ve kalıp grubu ile numune sac malzeme kontrollü şişirilmektedir. Cihazda aynı teknik özelliklerde iki adet servomotor tercih edilmiştir. Servomotorların kuvvet ve hareket iletiminde iki adet servoredüktör kullanılmıştır. Servoredüktörler servomotor devrini 1/50 oranında küçülterek hem eksenel ilerleme hızını azaltmakta hem de iş gören kuvveti artırmaktadır. Küresel uçlu zımbada oluşan kuvvet, S tipi yük hücresi üzerinden alınan değerler yoluyla anlık olarak görülebilmektedir.



Eleman no	Ad ve açıklaması
1	Üst servomotor
2	Üst servoredüktör
3	Üst sabit plaka
4	Üst servoredüktör bilyalı mil somunu
5	3 adet mil sütunlar
6	40x5x250 mm bilyalı vidalı mil
7	Baskı plakası grubunu taşıyan hareketli plaka
8	Dişi kalıp
9	Baskı plakası
10	Baskı plakası grubunu taşıyan sabit plaka
11	Yük hücresi (LoadCell)
12	Sabit plakayı mil üzerine sabitleme bilezikleri
13	Bilyalı vidalı mil konumlama yatağı
14	Küresel uçlu zımba ünitesini taşıyan hareketli plaka
15	Alt servoredüktör bilyalı mil somunu
16	Alt sabit plaka
17	Mekanik sistemi ve kumanda panosunu taşıyan kaide
18	Digital ekran
19	Üst servomotora kumanda eden anahtar
20	Acil buton anahtarı
21	Hareketli baskı plakası ve zımba kurs boyunu sınırlama anahtarları
22	Kumanda odası

Resim 4.28. Tam otomatik Erichsen şişirme test donanımı ve elemanları

Çizelge 4.3. Tam otomatik Erichsen şişirme test donanımının teknik özellikleri

Servomotorlar	Devir sayısı	3000 RPM
	Akım tipi	AC
	Giriş değeri	3φAC 121V 2,4 A
	Çıkış değeri	0,4 kW
	Nominal frekans	250Hz
	Tork	1,27 N.m
	Çalışma sıklığı	S1
Servoredüktörler	Oran	1/50
Bilyeli vidalı Mil	Diş üstü çapı	40 mm
	Adım	5 mm
	Vida uzunluğu	250 mm
	Malzeme	CK425
Yük hücresi	Tipi	S Çelik alaşım
	Kapasite	50 kN
Küresel uçlu zımba çap ölçüleri	1. zımba	Ø8 mm
	2. zımba	Ø15 mm
	3. zımba	Ø20 mm
	4. zımba	Ø25 mm
	Malzeme	Ç 4140
Kalıp delik ölçüleri	1. grup	Kalıp : Ø10 mm
		Pot çemberi : Ø11 mm
	2. grup	Kalıp : Ø18 mm
		Pot çemberi : Ø21 mm
	3. grup	Kalıp : Ø 27 mm
		Pot çemberi : Ø33 mm
	4. grup	Kalıp : Ø 27 mm
		Pot çemberi : Ø53 mm
	Malzeme	Ç1040

4.7. Elektronik Kontrol ve Veri Okuma Sistemi

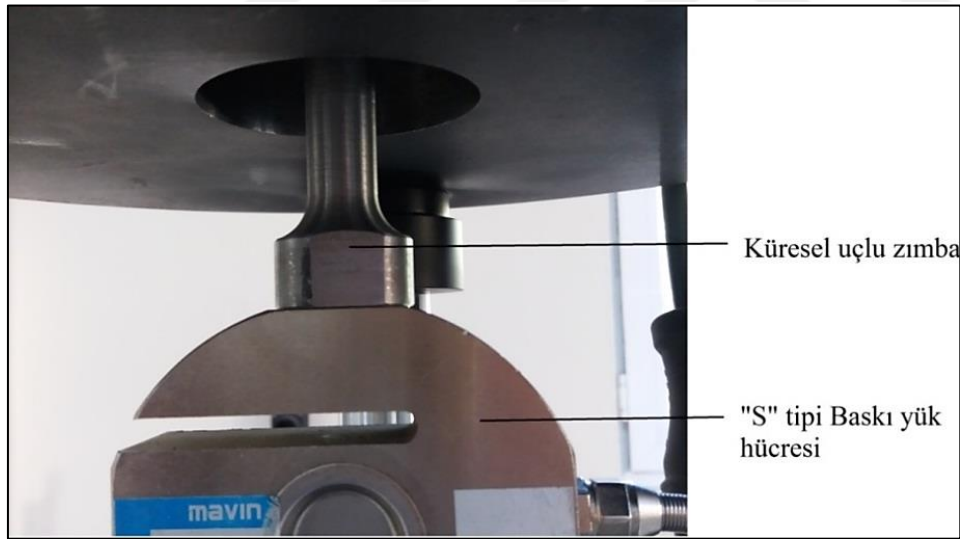
Test donanımında elektronik kontrol ve veri okuma işlemi, National Instrument veri toplama ve değerlendirme kartı ile EasyView yazılım üzerinden gerçekleştirilecek şekilde hizmet alınmasıyla yaptırılmıştır. Yazılım ile test cihazı Programlanabilir Mantık Kontrolü (PLC) tabanlı hazırlanan arayüz yardımıyla kontrol edilebilmekte veya isteğe bağlı elle de kumanda edilebilmektedir. Dokunmatik ekrandan girilen (Resim 4.29) tercihler sonucu oluşturulan kontrol ve tahrik prosedürüne uygun olarak, servo sürücü ile doğrudan haberleşme yapılabilmektedir. Deney süresince ve deney sonrası elde edilen değerler ekrandan okunabilmektedir. Deneysel çalışma sırasında yük hücresi endikatöründen 100 adet/s veri okunabilme imkânı da mevcuttur.



Resim 4.29. Deney bitiminde elde edilen değerler

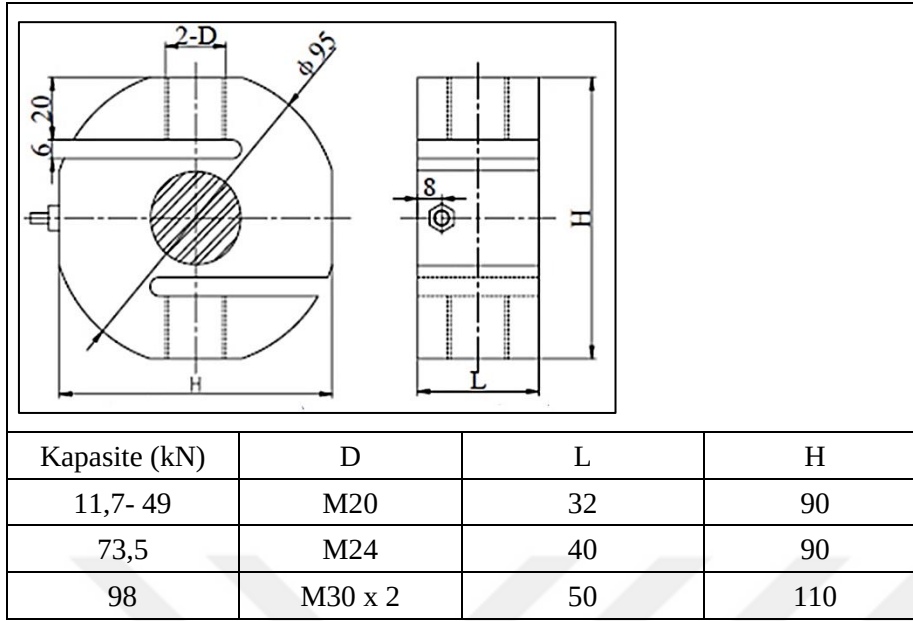
4.8. Kuvvet Ölçümleri ve Yük Hücresinin Çalışması

“S” tipi yük hücresinden alınan veriler kullanılarak zımba kuvveti anlık belirlenmektedir. Resim 4.30’da yük hücresinin zımba düzeneğine bağlantısı gösterilmiştir.



Resim 4.30. Yük hücresine zımbanın bağlanmış hali

Donanımın tasarımında tercih edilen Mavin NS18 marka “S” tipi yük hücresinin kapasitesi 0–49 kN’dur. Seçilen yük hücresi, uygulanan kuvvetle orantılı olarak 2.0000 mV/V gerilim üretmektedir. Hiçbir yük uygulanmaması durumunda 0 mV, 49 kN yük uygulandığında ise 20 mV gerilim üretmektedir. Üretilen bu gerilim, transmitterler ile 0–10 V arası gerilim değerine dönüştürülmektedir. Donanım için seçilen yük hücresinin genel ölçüleri Şekil 4.6’da, teknik özellikleri ise Çizelge 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.6. Mavin marka S tipi yük hücresi [102]

Çizelge 4.4. Test donanımında kullanılan yük hücresi teknik özellikleri [102]

Kapasite	N	49
Çıktı oranı	mV/V	2.0
Hassasiyet sınıfı	-	C3
Giriş Empedans	Ω	385
Çıktı empedans	Ω	350
Çalışma sıcaklık aralığı	$^{\circ}\text{C}$	-20 + 60
Yük hücresi malzemesi	-	Çelik alaşım

4.9. Test Donanımının Kalibrasyonu

Test donanımının; tasarım, üretim ve montaj aşamalarının tamamlanması sonrasında kalibrasyon aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada; donanımda kullanılan yük hücresinin istenilen şekilde doğru veri aktarımını yapıp yapmadığı kontrol edilmiştir. Kalibrasyon işlemi zımba tahrik organları ve baskı plakası tahrik organları için ayrı ayrı yapılmıştır. Zımba kuvveti ve baskı plakası kuvveti için ön kalibrasyon ve nihai kalibrasyon olarak iki ayrı kalibrasyon yapılmıştır. Ön kalibrasyonda kuvvet olarak kgf kuvvet birimi dikkate alınmış, nihai kalibrasyonda kuvvet N cinsinden yapılmıştır. Her iki kuvvet cinsi ile yapılan kalibrasyonlarda değerlerin birbirlerini doğruladığı tespit edilmiştir.

4.9.1. Zimba taşıyıcının ön kalibrasyon

Kalibrasyon, bir ölçme cihazının gösterdiği değerlerin büyüklüğünün gerçek değerinden sapmasını belirleme ve belgelendirme amacını taşımasından hareketle tasarımı ve imalatı yapılan test donanımının ön kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Tasarımı ve imalatı araştırmacı tarafından gerçekleştirilen taşıyıcı kafes (Resim 4.31), zımbanın yük hücresine zimba montajı yapılmış gibi sabitlenmiştir.



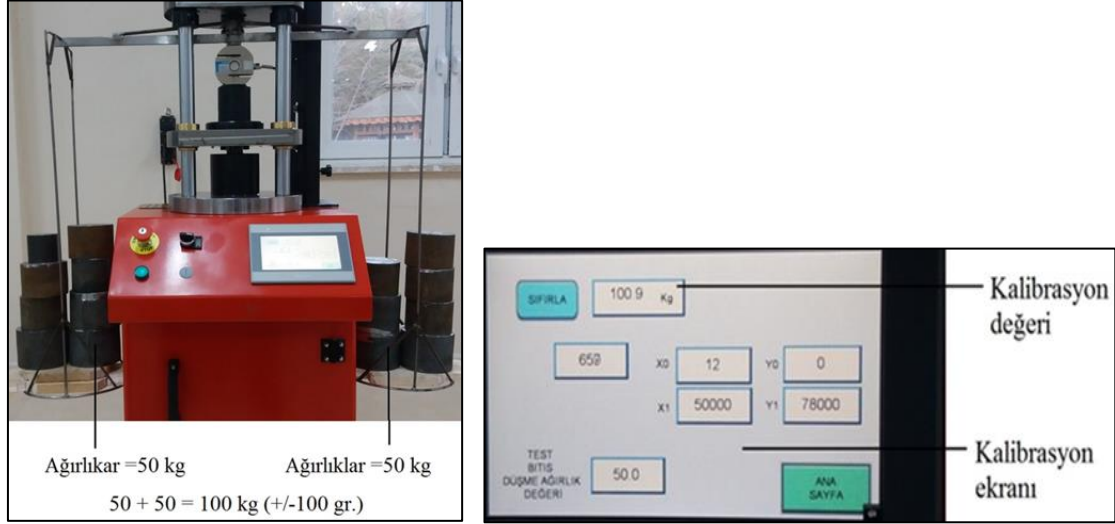
Resim 4.31. Kalibrasyon aparatı yükleme kefeleri

Bir tarafı yük hücresine vidalanan vidalı mil ve diğer tarafı kademeli silindirik hazırlanmış mil üzerine, her iki tarafına terazi kefesi şeklinde imal edilmiş kefelere yerleştirilmiştir. (Resim 4.31). Bu kefelere içine, daha önceden $\pm 0,01$ kg hassasiyetinde iki farklı tartıda kontrolleri yapılan belirli ağırlıklar sırasıyla yüklenecek şekilde üretim yapılmıştır (Resim 4.32). Kalibrasyon işleminde kalibrasyon aparatının ağırlığı özellikle dikkate alınarak işlem yapılmıştır.



Resim 4.32. Ağırlıklar (Toplam 100 kg.f)

Ön kalibrasyon aparatının test donanımına montajını müteakip PLC kumandasının ekranındaki okunan değer görülmüş ve kefelere konan ağırlıklar sıralı ve dengeli biçimde arttırılmıştır (Resim 4.33).



Resim 4.33. Aparatın test donanımına montajı ve PLC kumandası ekranı değerleri

Çizelge 4.5'te zımba ön kalibrasyonunda yüklenen ağırlıklar verilmiştir.

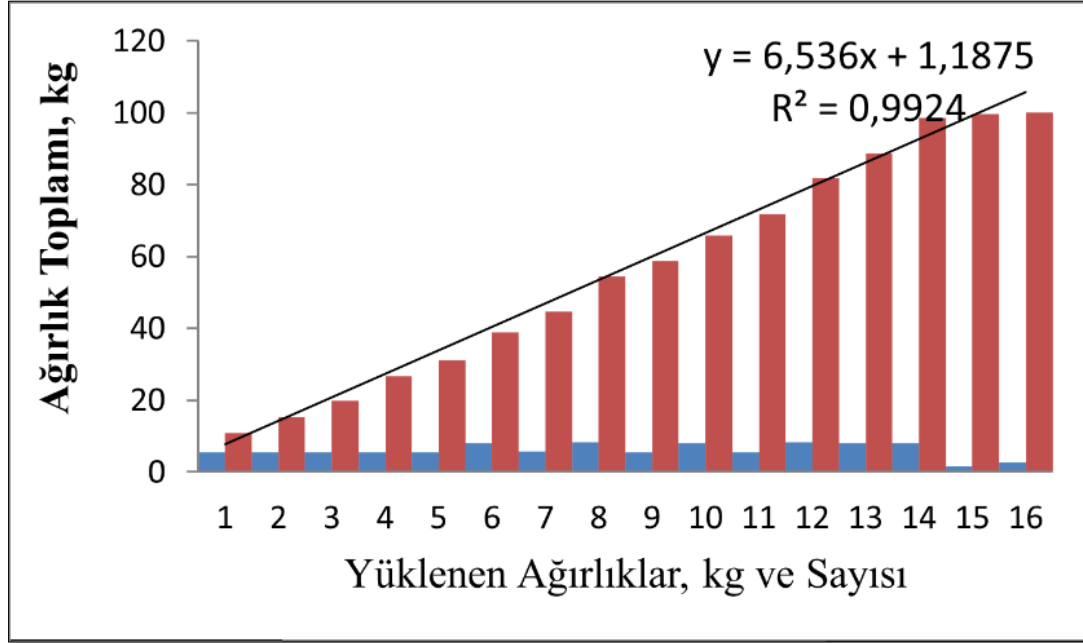
Kademeli ve dengeli olarak arttırılan kefe yüklerine karşılık PLC kumanda panelinden okunan ağırlıklar ve toplam ağırlık Çizelge 4.5'de verildiği gibi kaydedilmiştir.

Çizelge 4.5. Kg.f cinsinden zımba kuvveti ön kalibrasyonunda elde edilen veriler

Deney No	Ağırlık, kgf	Toplam Ağırlık, kgf	Deney No	Ağırlık, kgf	Toplam Ağırlık, kgf
1	5,6	10,9	9	5,6	58,9
2	5,6	15,4	10	8	65,8
3	5,6	19,9	11	5,6	71,9
4	5,6	26,8	12	8,3	81,9
5	5,6	31,2	13	8	88,7
6	8,2	38,9	14	8,2	98,9
7	5,7	44,6	15	1,6	99,7
8	8,4	54,6	16	2,7	100,1

Toplam ağırlık değerleri dijital ekrandaki kalibrasyon sayfasından her yükleme sonrası kayıt altına alınmıştır. Kalibrasyonun her adımında uygulanan yükün ve toplam yük değişiminin

grafığı Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekil 4.7’deki ön kalibrasyon eğrisinin R^2 değerinin 0,992 olması hem kalibrasyon işleminin doğruluğunu hem de yük hücresinin ölçmesinin güvenilirliğini temsil etmektedir.



Şekil 4.7. Ön kalibrasyonda ağırlık–yük değişimi

4.9.2. Deformasyon zımbası grubunun Newton biriminden ön kalibrasyon işlemi

PLC kumandasının devreye alınmasında hizmet alımı yapılan HM Otomasyon firmasına kumanda ekranından okunan yük değerinin Newton birimine dönüştürülmesi istenmiş ve yukarıda aktarılan ön kalibrasyon işlemi Newton biriminde tekrarlanmıştır. Öncelikle deformasyon zımbası ile zımbaya hareket veren bilyalı vidalı milin arasına yerleştirilmiş olan yük hücresinin okuduğu değerler test edilmiştir. Bu işlem için, daha önce iki ayrı artı/eksi 0,981 N hassasiyetli iki ayrı tartı aletlerinde tartılarak doğruluğu test edilen 980,66 N ağırlık hazırlanmıştır (Resim 4.34). Daha sonra, bu ağırlıklar ve taşıyıcı kafesin toplam ağırlığı, yük hücresi üzerine monte edilen bir aparat yardımıyla cihazın yük hücresine uygulanmıştır.

Kalibrasyon esnasında taşıyıcı kafesin ağırlığı da dikkate alınmış ilk ağırlığın kafesin ağırlığını da içine alacak şekilde 980,66 N değerinde olması sağlanmıştır. Dijital ekrandan kalibrasyon işlemi yapılmış, yük hücresine yüklenen ağırlığın artı/eksi 4,95 N hassasiyetle 980,66 N'a eşitlenerek sıfırlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra eşit ve artan

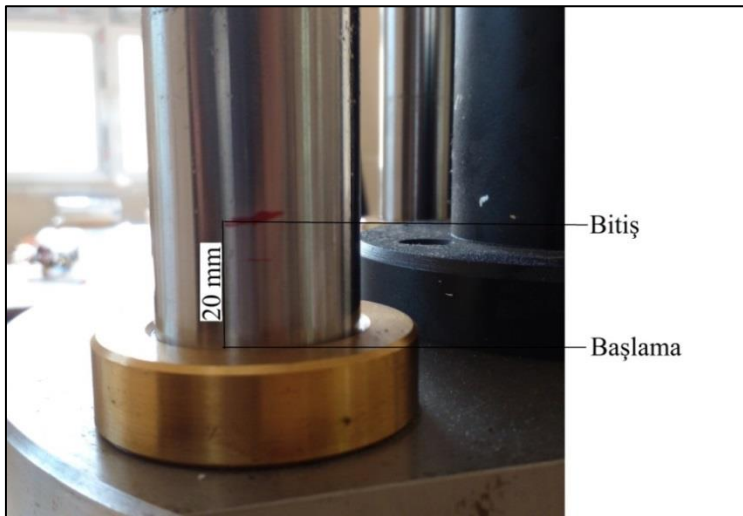
ağırlıklarla yükleme işlemine devam edilmiş, gerekli kayıtlar alınarak kalibrasyon işlemi tamamlanmıştır.



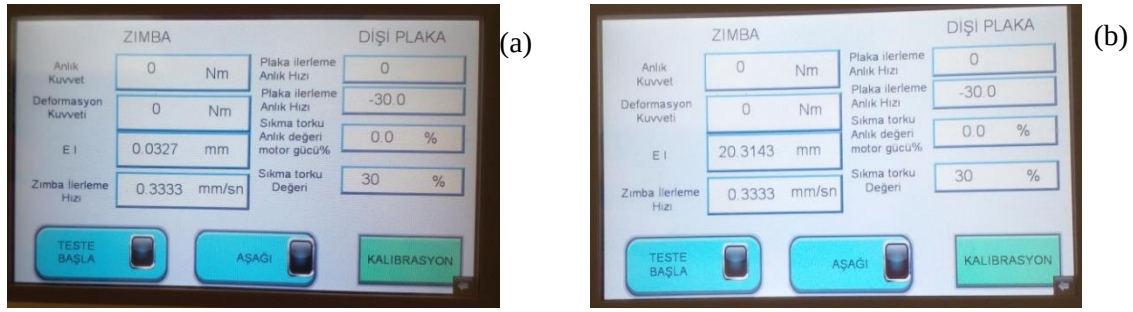
Resim 4.34. Toplamı 980,66 N olan ağırlıklar ve taşıyıcı kafes

4.9.3. Zımbanın ilerleme oranının kalibrasyon işlemi

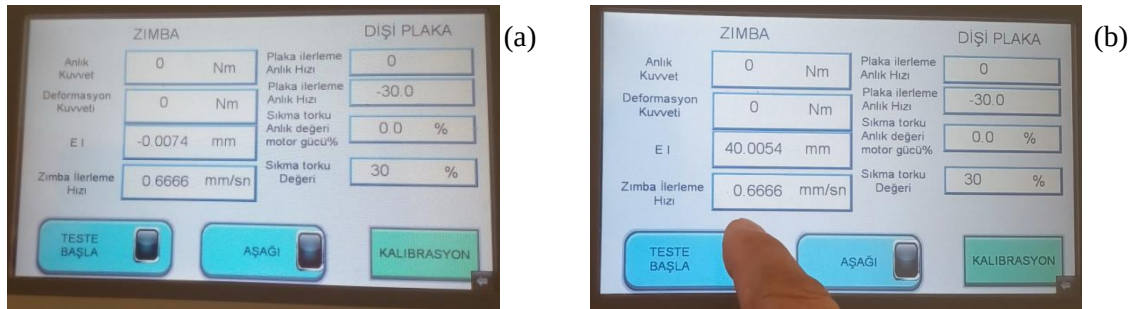
Zımba hızı, doğrudan servoredüktörden tahrik edilmektedir. Hız 0–100 mm/dakika arasında olacak şekilde takip ve kontrol sistemi hizmet alımıyla yaptırılmıştır. Zımba hızının 20 mm/dakika, 40 mm/dakika ve 60 mm/dakika ayar değerlerinde doğru olarak ilerleyip ilerlemediği bir kamera aracılığıyla da kumanda üzerinde bulunan gösterge panelinden okunarak tespit edilmiş (Resim 4.35), (Resim 4.36), (Resim 4.37) ve doğrulanmıştır.



Resim 4.35. Sütun üzerinde 20 mm mesafe



Resim 4.36. 20 mm/dakika zımba hareketinin 60 saniye içinde a) Başlama, b) Bitiş anı



Resim 4.37. 40 mm/dakika zımba hareketinin 60 saniye içinde a) Başlama, b) Bitiş anı

4.9.4. Baskı plakası ön kalibrasyonu

Baskı plakası kalibrasyonunda 1,27 N.m döndürme momentine sahip servomotorun 1/50 döndürme oranlı servo redüktörün ürettiği baskı kuvveti dikkate alınmış ve baskı plakası yükü kalibre edilmiştir. Yapılan hesaplamalar neticesinde ve daha önce de belirtildiği gibi, baskı plakasının uyguladığı en büyük kuvvet 69.662 N'dur. Donanımın ekranından ilgili yerinde sistemin ürettiği döndürme kuvvetinin % değerinin elle girildiği ilgili buton yer almaktadır. Buton şekline dokunularak ilgili pencereye döndürme kuvvetinin % değeri yazıldığında, baskı plakası grubu döndürme kuvveti olarak 69.662 N değerinin yazılan % kısmını baskı yükü olarak dikkate almakta ve servomotora bu değeri yakalayacak akım ve gerilimi kaynaktan sağlamaktadır. Örneğin, ilgili satıra %30 değeri girildiğinde, donanım, servomotorun dolayısıyla servoredüktörün ürettiği 69.662 N kuvvetin %30'unu uygulamaktadır. Bu uygulama aşağıdaki hesaplamayla açıklanmıştır.

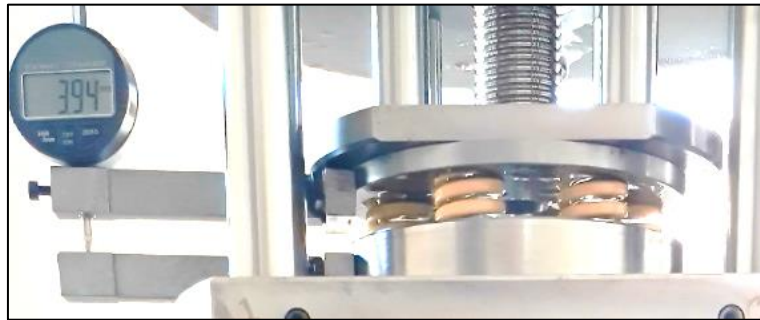
$69.662 \text{ N} \times 0,30 = 20.898 \text{ N}$; uygulanan baskı plakası kuvveti, ISO 20482 standardında beyan edilen 10 kN baskı yükünü yaklaşık olarak sağlamaktadır. Diğer taraftan, kumanda panelindeki % oran rakamı değiştirilerek daha fazla baskı yükü gerektiren sac metal

eğilme mukavemetini artırmak için, donanımın 1 ve 2 numaralı plakalarının arasının en büyük aralığı göz önüne alınmış ve yay taşıyıcı plakaların kalınlığı 26 mm olarak imal edilmiştir. Bu plakaların arasına çevrede eşit aralıklarda 6 adet olmak üzere Ø32x51mm 4S kalıp yayları (Çizelge 4.6) yerleştirilmiştir. Yayların konumlarını korumaları için alt ve üst kalibrasyon plakalarının yüzeylerine, aynı merkezi çapta, aynı derinlikte, aynı açısal aralıklarda yay oturma yuvaları açılmıştır.

Çizelge 4.6. Kalibrasyon aparatında kullanılan 6 adet Ø32x16x51 mm 4S sarı renkteki kalıp yayları, uygulanan kuvvet ve ‘k’ sabiti katalog değerleri [103]

Sipariş	D	d	L ₀	R	XLL 17% Uzun Ömür İçin Kapanma Oranı		Max 25% Maksimum Kapanma Oranı	
Ürün Kodu	Diş Çap mm	İç Çap mm	Serbest Uzunluk mm	Yük N/mm	Kapanma Miktarı S ₁ mm	Ağırlık (Newton) F ₁ N	Kapanma Miktarı S ₂ mm	Ağırlık (Newton) F ₂ N
• Tel Kesiti : 7,3 x 5,6								
4S32038			38	528,2	6,5	3412	9,5	5018
4S32045			44	424,4	7,5	3175	11,0	4668
4S32050			51	353,0	8,7	3061	12,8	4501
4S32065			64	269,2	10,9	2929	16,0	4307
4S32075			76	218,5	12,9	2823	19,0	4152
4S32090			89	180,3	15,1	2728	22,3	4012
4S32101	32	16	102	155,0	17,3	2688	25,5	3953

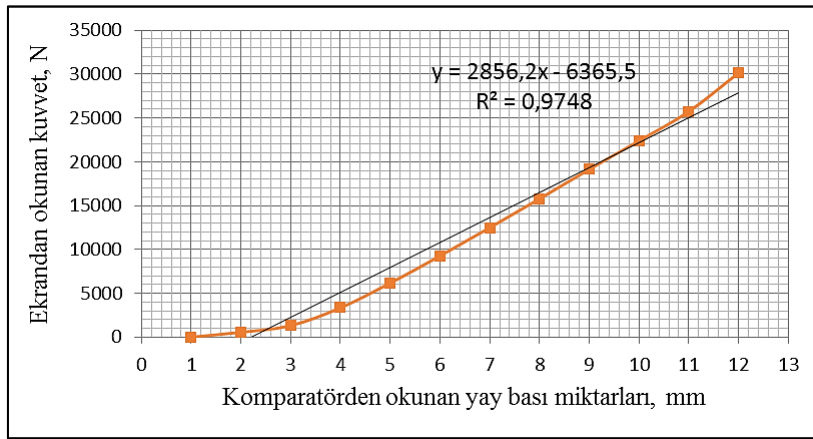
Her iki plaka üzerine sabitlenen çubuklar arasına 0,01 mm hassasiyetli ve 12,7 mm ölçüm aralığı olan bir komparatör tespit edilmiştir. Kalibrasyon aparatı plakalarının eksenel hareketi doğrudan komparatörden okunabilmektedir (Resim 4.38).



Resim 4.38. Servomotor tahrikli tahrik edilen zımbanın 3,94 mm’lik hareketi

Zımba kuvvetinin kalibrasyonu için alttan yük hücreesine tespit edilen düz başlı zımbanın itmesi ile yaylar kapanmaya başlamış, kapanma miktarı komparatör ekranından ve aynı anda donanımın dijital göstergesinden o andaki yük N değerinde okunmuştur. Uygulanan kuvvet

karşısında yayın kapanma miktarı ile katalog değerleri karşılaştırıldığında önemli bir farkın oluşmadığı ve değerlerin çok yakın olduğu görülmüştür (Çizelge 4.7). Ayrıca yük-yay kapanma ilişkisinin 45°'lik doğrusal bir çizgi oluşturduğu, benzeştirilen çizginin R^2 değerinin elde edilen kalibrasyon sonuçlarının güvenilirliğini ortaya koyduğu görülmüştür (Şekil 4.9). Yayların ilk sıkışma anındaki ve yayların son sıkışma anındaki deformasyon kararsızlığı dikkate alınarak; ilk 2 okunan ve son okunan değerlerin ihmal edilmesi halinde R^2 değerinin oldukça yüksek bir rakama ulaşacağı tahmin edilmiştir.



Şekil 4.9. 12 adet ölçüm 6 adet yay için zimbaya uygulanan kuvvet-yay kapanma eğrisi

Nihai kalibrasyon aparatının yay sabitinin hesabı

Bir yayın yay sabiti (k), yaya yüklenen yük (F) ve yayın yer değiştirme miktarı (x) ile çarpımının değişmez değeridir.

$$K = F \cdot X \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte; k: yay sabiti, N/mm, F: Uygulanan kuvvet, N, x: Yayın basılma miktarı, mm'dir. Yayın ticari ortamdan satın alma yoluyla tedarik edileceğinden yayın katalog bilgisi itibariyle yay sabiti 353 N/mm olarak beyan edilmiştir. 6 adet paralel yay kullanımı dolayısıyla aparatın eşdeğer yay sabiti;

$$k_{eş} = k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 = 353 \times 6 = 2.118 \text{ N/mm olmaktadır.}$$

Diğer taraftan; katalogdan 4S32050 ürün kodlu yay için verilen kapanma miktarı ve bu miktarı sağlayan ağırlık sırasıyla 8,7 mm ve 3.061 N olarak verilmiştir. Katalogdan seçilen

4S32050 ürün kodlu bir yayın teorik yay sabiti $k = 3.061/8,7 = 351,839 \text{ N/mm}$ 'dir. Aparatta kullanılan 6 adet yay dikkate alındığında, paralel 6 adet yay için aparatın teorik yay sabiti yaklaşık 18.366 N olarak elde edilmektedir. Bir başka ifadeyle aparatın alt ve üst plakalarının 8,7 mm kadar yayları sıkıştırması halinde oluşan teorik kuvvet 18.366 kN'dur. Bu prosedür gereği; Resim 4.39'da gösterildiği gibi, komparatör saati, yayın sıkışma değeri olarak 8,01 mm'yi gösterdiğinde, donanımın ekranındaki zımba anlık kuvveti dijital göstergeden 19.088 N olarak okunmuştur. Rastgele alınan 12 ölçüm değerleri ve buna karşılık gelen yay kuvvetlerinin toplamı 146.397 N ve komparatörden okunan toplam bası miktarı 65,53 mm olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7. Donanım gösterge ekranı ile bununla eş zamanlı bası miktarını gösteren komparatörden alınan değerler

Sıra No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Toplam
Zımba Kuvveti, N	4	566	1318	3348	6174	9269	12486	15786	19088	22407	25737	30155	146397
Yay Bası Miktarı, mm	0	1,01	2,01	3,01	4	5,01	6	7,01	8,01	9,01	10,01	10,45	65,53



Resim 4.39. Komparatörün ve PLC kumandanın okunan göstergeleri

Bu veriler ışığında, toplam deneysel k sabiti; $k_{top} = 146.397 \text{ N}$ ve yer değiştirme $X_{top} = 65,53 \text{ mm}$ için; $k_{top} = 146.397/65,53 = 2.234,04 \text{ N/mm}$ olarak 6 yay için hesaplanmıştır. Yay başına düşen yay sabiti ise $2.234,04 / 6 = 372,34 \text{ N/mm}$ olmuştur. Bu yay sabiti deneysel olarak elde edilen yay sabiti olup teorik yay sabiti olan 352 N/mm değerinden oldukça farklılık göstermiştir. Yay tedarikçisinin vermiş olduğu bilgilere dayalı yay sabiti yerine, kalibrasyon işlemlerinde deneysel çalışmadan elde edilen $372,34 \text{ N/mm}$ değerinin dikkate alınması uygun bulunmuştur.

4.10. Baskı Plakasının Kalibrasyonu

Baskı plakasının uyguladığı kuvvetin ölçümü servo motorun döndürme kuvveti değeri kriter olarak alınmıştır. Üzerlerine uygulanan yüke karşı yaylardaki kapanma miktarı, dişi kalıp baskısından doğan kuvvet ile zımbanın baskısından doğan kuvvet aynı olacağından, tasarımı ve imalatı tez kapsamında yapılan aynı kalibrasyon aparatı kullanılmıştır. Kalibrasyonda yay kapanma miktarı ile elde edilen kuvvet değerlerine göre motor döndürme momentinden doğan döndürme kuvvetinin %'si alınarak tespit edilmiştir. Erichsen test donanımında; baskı plakası olarak dişi kalıp plakası görev yapacak şekilde tasarım oluşturulmuştur. Bir diğer ifadeyle, sac metal numuneler küresel oynar plaka ile dişi plaka arasında sıkıştırıldıktan sonra zımba ilerlemesiyle şişirilmektedir.

Yaylara uygulanan itme kuvveti gerçekte zımba deformasyon kuvvetidir. Sac malzemeyi tutma kuvveti doğrudan servoredüktörün döndürme momentinden alındığı için, üzerine yük uygulanan aynı yaylar olduğuna göre, daha önce elde edilen yay kapanma miktarı ile ilişkili kuvvet kullanılarak, sac malzeme tutma kuvveti tespit edilmiştir. Buna göre; yük–yay kapanma ilişkisi 45^0 doğrusal bir çizgi olması yük-yay arasında doğrusal bir orantının olduğunu gösteriyor. Bu açıdan; örnek olarak, üst servomotorun döndürme momentinin %32'sinden doğan itme kuvveti $10,035 \text{ kN}$ olmuştur. Erichsen şişirme test cihazında literatürde numune tutma kuvveti 10 kN olarak beyan edilmiştir. Dijital ekranda ilgili yere baskı plakası itme kuvveti %32 olarak girildiğinde, yay kapanma miktarının $5,25 \text{ mm}$ ve baskı kuvvetinin $10,035 \text{ kN}$ olduğu tespit edilmiştir (Resim 4.40).



Yay sıkışma miktarı : 5,25 mm
 Motor döndürme kuvveti : %32
 Meydana gelen kuvvet : 10035 N

Resim 4.40. Servomotorun ürettiği döndürme momentine göre oluşan değerler

Diğer bir örnek; dijital gösterge ekranında dişi kalıp baskısı için motor döndürme kuvvetinin %25'i olarak ayarlandığında, komparatör saatinde yay sıkışma miktarı 3,03 mm görülmüştür. O andaki kuvvetin 3385 N olduğu tespit edilmiştir (Resim 4. 41). Bu ölçüm örnekler çoğaltılarak, ayarlanan %'ye göre yük ve yay sıkışma değerleri sıralaması yapılabilmesi mümkündür.

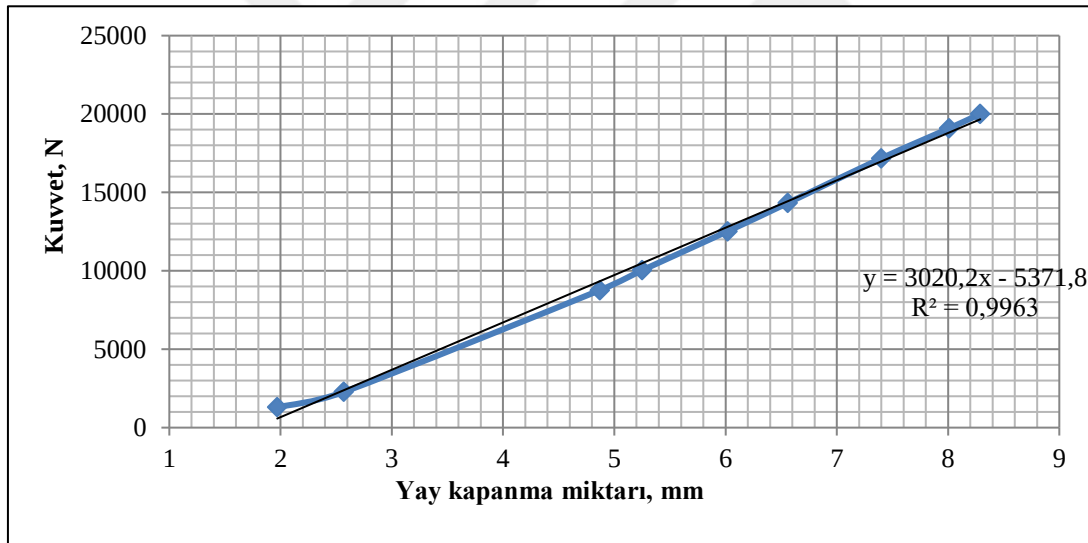


Resim 4.41. Servomotorun ürettiği döndürme momentine göre oluşan değer

Bu değerlerle ilgili bazı ölçüm sonuçları Çizelge 4.8’de ve bunlara bağlı olarak uygulanan kuvvet ile yay sıkışması arasındaki ilişki Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Yay sıkışma miktarına göre dişi kalıp plakasında oluşan kuvvet değerleri

Sıra No	Yay sıkışma miktarı, mm	Döndürme kuvveti, %'si	Uygulanan kuvvet, N
1	1,97	20%	1297
2	2,57	25%	2280
3	4,87	30%	8765
4	5,25	32%	10035
5	6,02	35%	12525
6	6,56	40%	14328
7	7,4	45%	17176
8	8,01	50%	19088
9	8,29	51%	20011



Şekil 4.10. Yay kapanma miktarı ile dişi kalıp plakasına uygulanan kuvvet ilişkisi

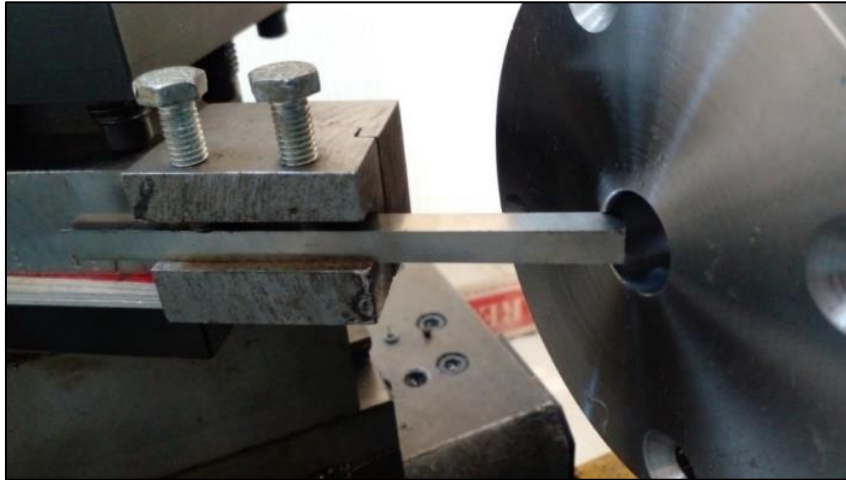
PLC kumandasının panelinden uygulanan servomotor ve servoredüktörce üretilen torkun % değişimine ve geliştirilen çok yaylı kalibrasyon aparatının komparatöründen okunarak sağlanan kuvvet değerleri ilişkisi (Şekil 4.10) incelendiğinde; oluşan benzetim eğrisinin doğrusala çok yakın olduğu ve R^2 değerinin yüksek güvenilirliği ıspat ettiği görülmüştür.

4.11. Kalıp Plakası (Dişi Kalıp) Delik Kenarı Kavis Yarıçapının Kontrolü

ISO 20482 standardında dişi kalıbın sac malzemeye temaslı keskin köşesinin kenar radyüsü 0,75 mm olarak önerilmiştir. Radyüs profilinin standartta önerilen değerde üretilip üretilmediğinin kontrolü için ticari bir firmada CNC telerozyon yoluyla üretilen profil kesicisi şablon olarak referans alınmıştır (Resim 4.42). 0,75 mm radyüslü kesici kenar ile kalıp kavisi kontrol edilmiş, dişi kalıp kenar yarıçapının kesici şablonla uyduğu görülmüştür (Resim 4.43).



Resim 4.42. Kesici uç profili $r = 0,75$ mm olarak özel üretilmiş kesici kenarlı şablon



Resim 4.43. Kalıp deliği radyüsünün kesici şablonla kontrolü

4.12. Zimba Salgı Kontrolü

Test esnasında zimbalar Z eksenı boyunca doğruşal ilerleme yaptığından, yapılan zimba salgı kontrolü ile, zımbanın ilerleme sırasında bir açıdan yataya dikliğı kontrol edilmiş oldu. Küre çapları 8 mm, 15 mm, 20 mm olan zimbaların salgı kontrolları ünıversal torna tezgahında yapılmış ve zimbaların vidalı kısımlarına ara sıkma parçası takılarak torna aynasına bağlanan zimbaların salgı miktarı ölçülmüştür. Öncelikle aynanın salgı kontrolü

yapılmış ve ortalama 0,03 mm salgı tespit edilmiştir. Ayna salgı miktarı da dikkate alındığında zımba küre çaplarında ki salgı miktarları 8 mm küre çaplı zımbada yaklaşık 0,08 mm, 15 mm küre çaplı zımbada yaklaşık 0,08 mm ve 20 mm küre çaplı zımbada yaklaşık 0,04 mm olarak elde edilmiştir (Resim 4.44, Resim 4.45 ve Resim 4.46).



Resim 4.44. 8 mm küre çaplı zımba salgı kontrolü



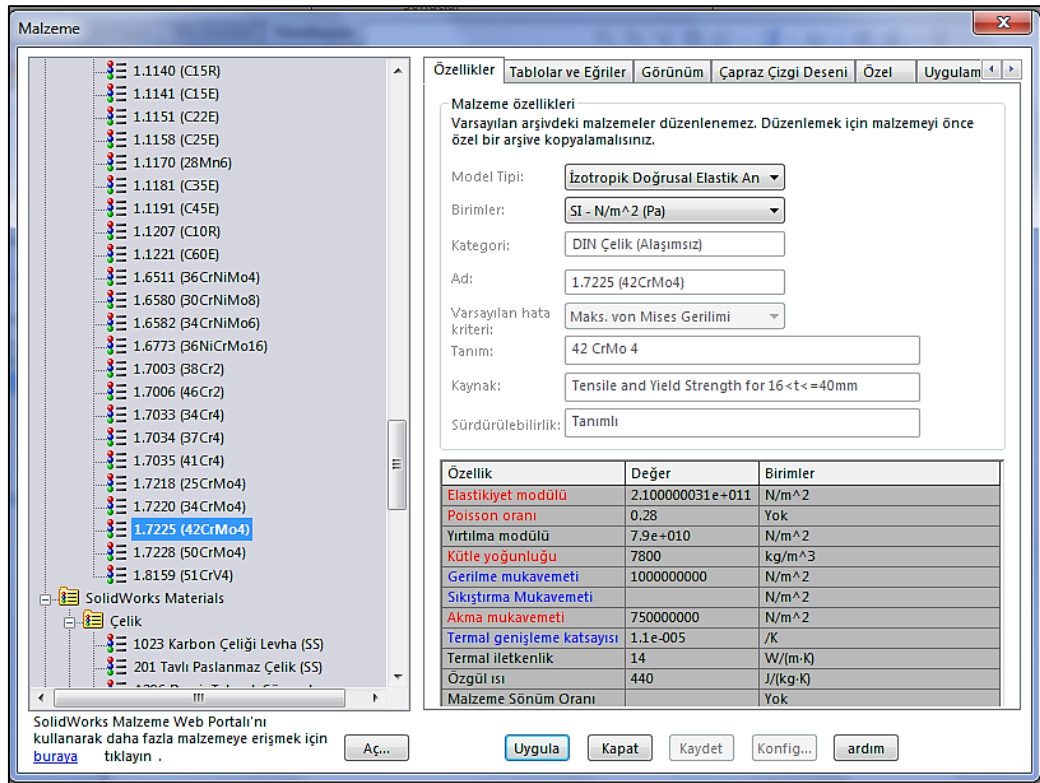
Resim 4.45. 15 mm küre çaplı zımba salgı kontrolü



Resim 4.46. 20 mm küre çaplı zımba salgı kontrolü

4.13. Bilgisayar Destekli Mühendislik (CAE) ile Tasarım Doğrulama

Bilgisayar ortamında üç boyutlu tasarımı yapılan test donanımı, Solidworks yazılımının bir alt modülü olan Cosmosworks kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Donanımın imalatında kritik parçalarından küresel uçlu zımbaların malzemesi Ç4140, plakaların malzemesi Ç1040 ve millerin malzemesi Ck55 Semente edilmiş 62+ HRC olarak seçilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Ç 4140 malzemenin Solidwork malzeme listesindeki mekanik özellikleri

Analiz çalışmasında donanımda bulunan ve kritik parçalardan olan baskı plakasının, deformasyon zımbasının ve üç adet mil sütunların statik dayanım analizleri yapılmıştır. Analiz, baskı plakası grubuna 20 kN kuvvet uygulanmış ve emniyet katsayısı 2 alınarak sonlu elemanlar yöntemiyle bilgisayar destekli tasarım ortamında yapılmıştır. Aynı şekilde zımba plakası grubunda da emniyet katsayısı 2 alınarak ve 57 kN kuvvet etki ettirilerek statik dayanım analizi yapılmıştır. Bilgisayar ortamında yapılan analizlerde parçalara atanan malzeme türü Ç1040, Ç4140 ve Ck55 (Ç1060) olarak belirlenmiştir. Bu malzemeler için MKE Çelik türleri Katalog’unda kayıtlı bulunan özellikler Çizelge 4.9, Çizelge 4.10 Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.9. Ç1040 Çeliğin kimyasal ve fiziksel özellikleri [104]

Ç 1040 İMALAT ÇELİĞİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ (%)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	N
0,35 0,44	0,60 0,90	0,10 0,30	0,040 en çok	0,050 en çok	-	-	-
Ç 1040 İMALAT ÇELİĞİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ							
Kopma Dayanımı		Akma Sınırı		Kopma Uzaması		Çentik Direnci	
60-80 kg/mm ²		33-42 kg/mm ²		%16 – 20 (5 d ⁰)		6 mkg/sm ²	

Çizelge 4.10. Ç4140 Çeliğin kimyasal ve fiziksel özellikleri [104]

Ç 4140 ÇELİĞİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ (%)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	N
0,35 0,44	0,60 ,90	0,15 0,35	0,00 0,040	0,00 0,040	0,80 1,10	0,15 0,25	-
Ç 4140 İMALAT ÇELİĞİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ							
Kopma Dayanımı		Akma Sınırı		Kopma Uzaması		Çentik Direnci	
80-130 kg/mm ²		55-90 kg/mm ²		%10-14 (5 d ⁰)		-	

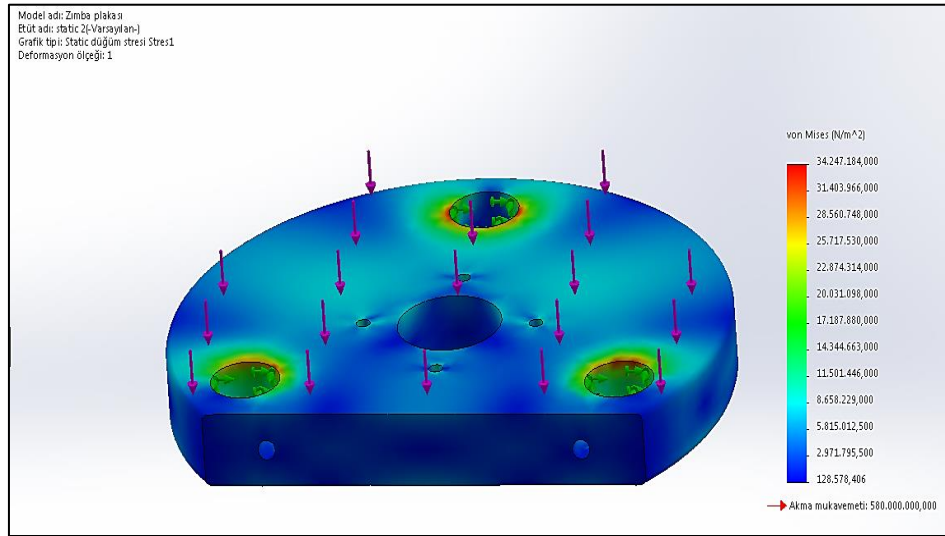
Çizelge 4.11. Ç1060 Çeliğin fiziksel ve kimyasal özellikleri [104]

Ç1060 ÇELİĞİNİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ (%)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni
0,55 0,64	0,60 0,90	0,10 0,30	0,040 en çok	0,050 en çok	-	-	-
Ç 1060 İMALAT ÇELİĞİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ							
Kopma Dayanımı		Akma Sınırı		Kopma Uzaması		Çentik Direnci	
70-105 kg/mm ²		44-57 kg/mm ²		%15-12 (5 d ⁰)		-	

4.14. Kritik Parçaların Bilgisayar Destekli Dayanım Analizi

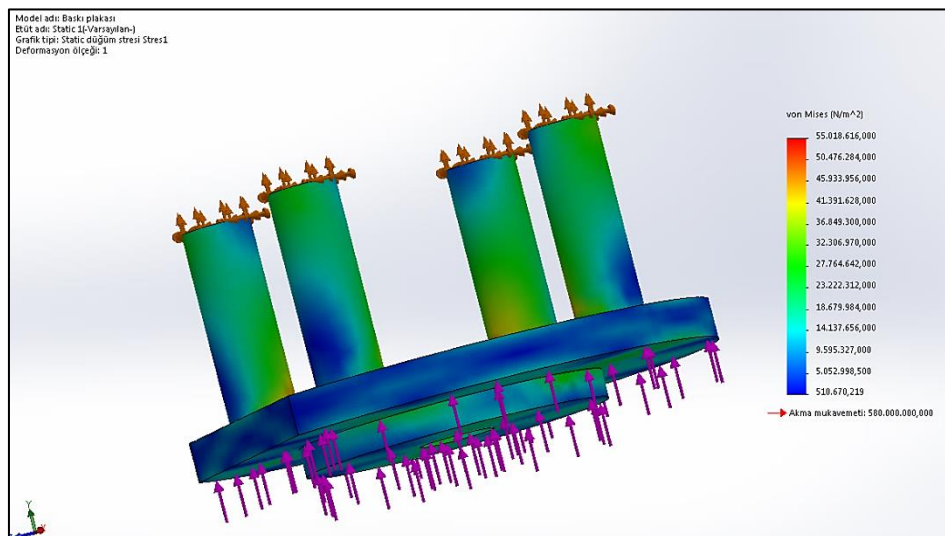
Test donanımının yüke maruz olan zımba plakası, baskı plakası ve 8 mm çaplı zımbanın statik dayanım analizi yapılmıştır. Analiz zımba plakası ve zımba için EKS 2 alınarak sırasıyla 57 kN uygulanarak yapılmıştır. Baskı plakası için EKS 2 alınarak 20 kN uygulanarak dayanım analizi yapılmıştır. Yapılan dayanım analizleri Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de gösterilmiştir.

Zimba plakasının dayanım analizi incelendiğinde (Şekil 4.12), malzemenin elastik sınırının, akma gerilmesinin oldukça altında görülmektedir. Sütunlardaki eğilme kuvvetlerini, zimba ve baskı plakalarının kuvvetlerini üzerinde taşıyan plakanın yaklaşık 170 kat güvenle çalışabildiği tespit edilmiştir.



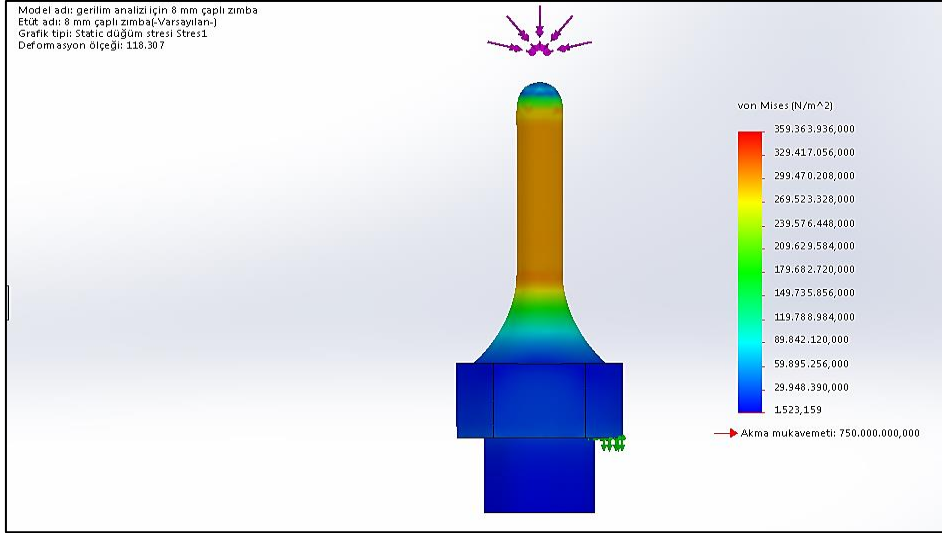
Şekil 4.12. Zimba plakası gerilme analizi ekran görüntüsü

Kalıp plakası ve destek millerinin gerilim analizi incelendiğinde (Şekil 4.13), malzemenin elastik sınırının, akma gerilmesinin oldukça altında görülmektedir. Kalıp plakası ve onu taşıyan 4 adet destek millerinin yaklaşık 10 kat güvenle çalışabildikleri tespit edilmiştir.



Şekil 4.13. Baskı plakası gerilme analizi ekran görüntüsü

8 mm küre çaplı zımbanın gerilim analizi incelendiğinde (Şekil 4.14), malzemenin elastik sınırının, akma gerilmesinin altında görülmektedir. En küçük çaplı olan ve literatürde de çok fazla kullanılmayan 8 mm küre çaplı zımbanın 2 kat güvenle çalışabildiği tespit edilmiştir. Bu tespit, aynı şartlar altında, literatürde Avrupa standartlarında kullanılan 20 mm küre çaplı zımbanın daha güvenli çalışabileceğini ispat etmektedir.



Şekil 4.14. 8 mm çaplı küresel uçlu zımba gerilme analizi ekran görüntüsü

4.15. Erichsen Şişirme Testleri İçin Zımba Hızlarının Belirlenmesi

Erichsen şişirme testi, hazırlanan numune malzemelere, Ø8 mm, Ø15 mm ve Ø20 mm çaplarında küresel uçlu zımbalar ile Çizelge 4.12'deki R10 değeri referans alınarak ok işaretli katsayılar ile R değerinin çarpımından elde edilen hızlar (5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika), belirlenerek uygulanmıştır. Testlerde zımba hızları dijital dokunmatik ekran vasıtasıyla değiştirilebilmektedir. Test esnasında gerçekleşen zımba hızı, Erichsen sabiti, zımba deformasyon kuvveti ve zımba anlık kuvvet değerleri, cihazın gösterge ekranından okunmaktadır.

Çizelge 4.12. Zimba hızları için Standart sayılar tablosu [105]

Temel Sıralar				Tam değer	Sıra numarası				Pratiğe göre yuvarlatılmış değerler							Yakın değerler
R5	R10	R20	R40						R'5	R''5	R'10	R''10	R'20	R''20	R'40	
1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000	-80	-40	0	40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
			1,06	1,0593	-79	-39	1	41							1,05	
		1,12	1,12	1,1220	-78	-38	2	42					1,10	1,10	1,10	
			1,18	1,1885	-77	-37	3	43							1,20	
1,25	1,25	1,25	1,25	1,2589	-76	-36	4	44			1,25	1,20	1,25	1,20	1,25	$\sqrt{2}$
			1,32	1,3335	-75	-35	5	45							1,30	
		1,40	1,40	1,4125	-74	-34	6	46					1,40	1,40	1,40	$\sqrt{2}$
			1,50	1,4962	-73	-33	7	47							1,50	
1,60	1,60	1,60	1,60	1,5849	-72	-32	8	48	1,60	1,50	1,60	1,50	1,60	1,60	1,60	$\sqrt{4}$
			1,70	1,6788	-71	-31	9	49							1,70	

4.16. Deneyisel Çalışmalar

Deneyisel çalışmalarda 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika olmak üzere 3 farklı hızı sac metal numunede uygulanmıştır. Hız değişiminin etkisi, her bir malzeme türü ve deformasyon zımbası küre çapına göre gruplandırılarak ayrı ayrı yorumlanmıştır. Deneyisel çalışma sonuçları; işlem parametrelerinin yük değişimi ile Erichsen Sabiti (ES) ilişkisi, yük değişimi ile numune malzeme genişliğinin ilişkisi, numune genişliği ile Erichsen sabiti ilişkisi açısından hazırlanmıştır.

4.17. Deney Malzemesi Bilgileri ve Özellikleri

4.17.1. %99,53 saf alüminyum (Al 1050)

Alüminyum, yeryüzünde en çok bulunan elementlerden olmasına rağmen endüstriyel alanda üretilmesi 1886 yılında elektroliz yöntemiyle olmuştur. Günümüzde de bu yöntem devam edilmektedir. Demir çelikten sonra dünyada en çok kullanılan metal olarak kabul edilmektedir. Erichsen şişirme testi uygulamak için seçilmiş olan 1050 kodlu saf alüminyum, çoğunlukla elektrik ve kimya endüstrisinin yanında ambalaj malzemesi ve folyo, çatı kaplama, zırhlama, düşük mukavemetli korozyona dirençli kazan ve depolama tankları yapımında da tercih edilmektedir [106].

Numune malzeme 1xxx serisinde yer alan alüminyum alaşımıdır. %99,53 alüminyum oranına sahiptir. Korozyon direnci, elektrik ve ısı iletkenliği çok iyi olarak, mekanik özellikleri

düşük olarak ve dolayısıyla şekillendirilebilme özelliği yetersiz olarak nitelendirilmektedir. Gerinim sertleştirilmesi ile mukavemette küçük artışlar elde edilebilmektedir. Bu tür ürünler elektrik ve kimya endüstrisinde daha çok tercih edilmektedir. Kaynak yapılabilir [107].

Malzeme ticari saflıkta olup ($>99\text{Al}$) ısıtıl işlem uygulamak mümkün değildir. Yaşlandırma imkânı da yoktur. Numune malzemenin alaşımları: 1050, 1060, 1100, 1145, 1200, 1230, 1350 kodlarıyla gösterilmektedir.

Test donanımının farklı saha şartları açısından da test edilebilmesi ve literatürde yer alan çalışmalardan elde edilen bulguların bu çalışma bulguları ile mukayese edilebilmesi açısından Al5754, Ck75, DP600 ticari adlı ve kodlu numunelerle de sınırlı sayıda ilave deneyler yapılmıştır. Deney için seçilen alüminyum sac malzemenin kimyasal analizi (Spektral analizi), Samsun Akredite Uluslararası Metal Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarı A.Ş.'de yaptırılmıştır (EK- 1). $99,53\text{ Al1050}$ serisi saf alüminyum sınıfı bir malzeme olduğu belgelenmiştir (EK- 2).

4.18. Isıl İşlem Uygulanamayan Alüminyum Alaşımları

Simgesi “Al”, Atom numarası 13 olan alüminyumun görünüşü gümüş rengidir. Atom ağırlığı $26,981\text{ gr/mol}$, yoğunluğu $2,70\text{ gr/cm}^3$ ve ergime sıcaklığı 933 K , $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve kaynama sıcaklığı ise $2519\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Alüminyum, yumuşak ve hafif bir metal olup mat bir görünümü vardır. Bu renk, havaya maruz kaldığı zaman üzerinde oluşan ince oksit tabakasından ileri gelir. Doğada genellikle boksit cevheri halinde bulunur ve oksidasyona karşı üstün direnci ile bilinir. Bu direncin temelinde “pasivasyon” özelliği vardır. Alüminyum zehirleyicidir ve manyetik özelliği yoktur. Kıvılcım çıkarmaz. Saf alüminyumun çekme mukavemeti $105\text{-}145\text{ MPa}$ arasında değişmektedir [108].

Alaşımlaştırıldığında bu değer 70 MPa 'a kadar çıkar. Rahat dövülebilir, talaş kaldırarak işlenebilir, döküm işlemine tutulabilir. Endüstrinin pek çok kolunda milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmakta olan alüminyumun dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri olduğu bir gerçektir. Gemi, uçak, savunma, otomotiv, kalıp-makine, tanker sanayileri gibi bir çok endüstride milyonlarca farklı ürünün yapımında önemli yer teşkil etmektedir. Hafiflik ve yüksek dayanım özellikleri sayesinde, alüminyumdan üretilmiş yapısal bileşenler, başta uzay ve havacılık sanayii olmak üzere taşımacılık ve inşaat sanayiinde geniş

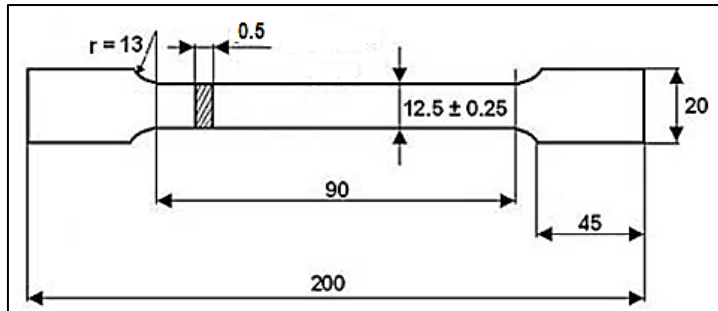
kullanım alanı mevcuttur [109]. Karakteristik özellik bakımından değerlendirildiğinde, atmosferik korozyona çok dayanıklı ve çok iyi şekil alabilir. Elektrik ve ısı iletkenliği yüksek, görünümü güzel, dekoratif kaplamalar için uygun, kaynak yeteneği yüksek, mekanik özellikleri düşüktür [107].

4.19. Deney Malzemesinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

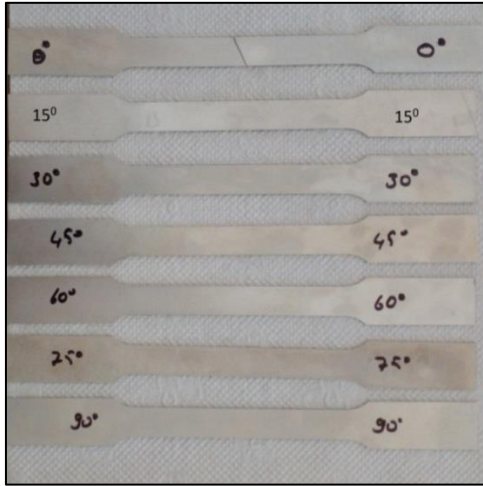
Alüminyum sac malzeme, atmosferik korozyona çok dayanıklı oldukları gibi çok iyi de şekil alabilirler. Dekoratif kaplamalar için uygundur. İnce Alüminyum levhalar daha çok reklam sektörü, gıda sektörü, otomotiv sektörü, makine sektörü gibi alanlarda kullanılırken kalın levhalar daha çok kalıp sanayi, makine parçaları üretimi ve çeşitli sektörlerde tercih edilmektedir. Uluslararası Alüminyum Standartları esas alınarak temin edilen ilave kimyasal kompozisyon verileri, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve ETİBANK tedarikçisinden numune alüminyum malzemenin analiz raporu Ek 3’de verilmiştir.

4.20. Al 1050 (%99,53 saf alüminyum) Numune Malzemenin Çekme Deneyleri

Numune alüminyum sac malzeme Şekil 4.15’de görülen boyutlarda CNC tel erozyon tezgahında, hadde yönüne 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° olmak üzere herbirinden 4’er adet kesilerek çekme deneyleri için hazırlanmıştır (Resim 4.47). Çekme testleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Malzeme ve Mekanik Test Laboratuvarında, bilgisayar destekli çekme cihazında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.15. ISO 6892 standardının, çekme testi numune ölçüleri [97]



Resim 4.47. Hadde yönüne göre farklı açılarda hazırlanan numuneler

Her hadde yönüne farklı açıda numuneler için çekme testi 3 defa tekrar edilmiştir. Ayrıca, karşılaştırmalı bir değerlendirme yapabilmek için her gruptan 1'er adet numuneye ilave çekme testi uygulanmıştır. Çekme test değerleri EK-3'te verilmiştir.

4.21. Erichsen Şişirme Testi İçin Deneysel Çalışma Parametreleri

Test donanımının tasarım ve imalatının tamamlanmasından sonra Çizelge 4. 13'de verilen parametrelere göre deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.13. Deneysel çalışma parametreleri

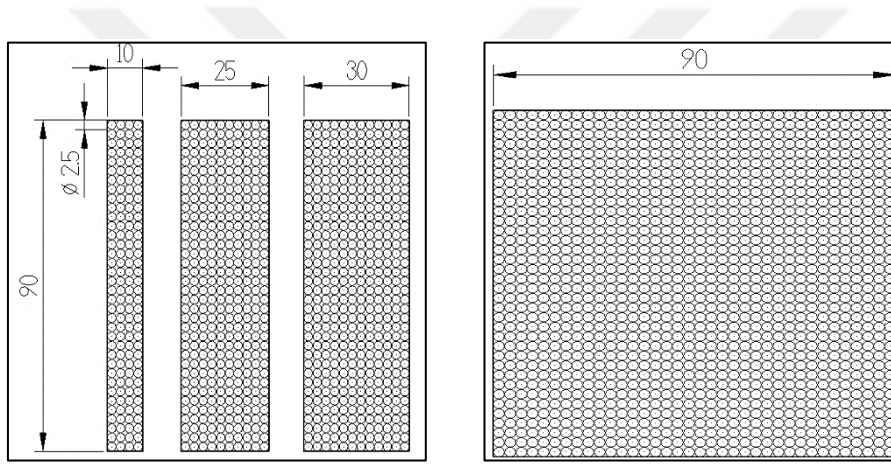
Sac Malzeme Türleri	Al 1050 saf alüminyum levha
Sac Malzeme Kalınlığı, mm	0,5 (Ticari beyan edilen) (0,48 mm, ölçülen)
Kalıp Delik Kenarı Kavis Yarıçapı, mm	0,75
Baskı Plakası Delik Kenarı Kavis Yarıçapı, mm	0,75
Baskı Kuvveti, N (E.K. =2)	10 kN
Zimba Hızı, mm/dakika	5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika
Zimba Çapları, mm	8 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm
Deney Sac Malzeme Ölçüleri, mm	Her zimba küre çapı/2 mm'den başlayarak 2xküre çapı aralığında sabit adımda artan genişliklerde

Deneysel çalışmalarda, numune boyu 90 mm sabit olmak üzere daha önce belirlenen ve verilen muhtelif genişlik ölçülerinde giyotin makasla kesilen sac metal test numuneleri

hazırlanmış ve her bir deney 3 defa tekrar edilecek sayıda numune üretilmiştir. Giyotin makasla kesilen sac metal numunelerde genişlik ölçüsünün doğruluğu kumpas ile kontrol edilmiş, uygun olmayan numuneler tekrar kesilmiş, numuneler deney öncesi çapak temizleme işlemine tabi tutulmuştur.

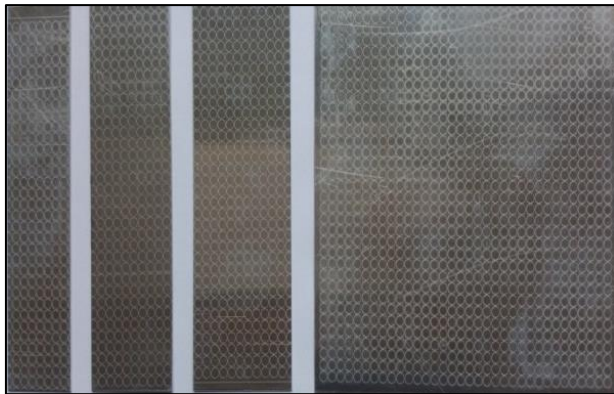
4.22. Numune Malzemenin Boyutları, Zımba Çaplarına Göre Adetleri

Numune sac malzemelerin bir yüzeyinde, Şekillendirme Sınır Diyagramlarını oluşturmak amacıyla, test uygulamasına geçilmeden önce lazerle 3-4 mikro milimetre derinliğine sahip ve çapı 2,5 mm olan dairesel desenli ızgaralar çizdirilmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Teste girmemiş numunelerin bilgisayar destekli ızgara çizimi

Yapılan ön çalışmalarda oluşturulan ızgaraların deney sonuçlarına olumsuz bir etkisi görülmemiştir (Resim 4.48).

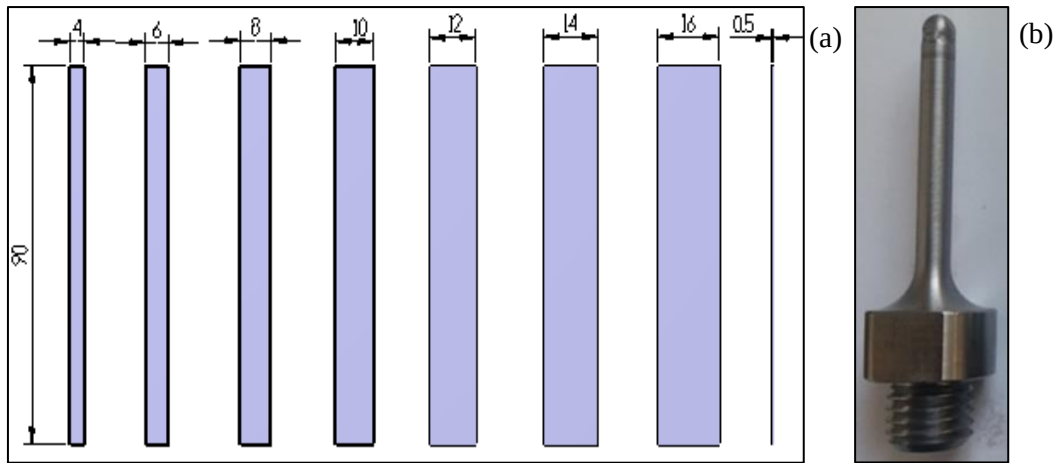


Resim 4.48. Teste girmemiş numunelerin fotoğrafı

Erichsen Şişirme testlerinde, Avrupa standartlarında Ø20 mm olan küresel uçlu zımba yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca pek tercih edilmese de, Erichsen şişirme deneylerinde Ø8 mm, Ø15 mm ve Ø25 mm küresel uçlu zimbalar da dikkate alınmak suretiyle de deneyler yapılabilmektedir. Tasarımı ve imalatı yapılan test donanımının fonksiyonelliğinin tespiti bakımından Ø8 mm, Ø15 mm ve Ø20 mm olan üç ayrı küresel uçlu zimbaların hepsi deneylerde yer almıştır.

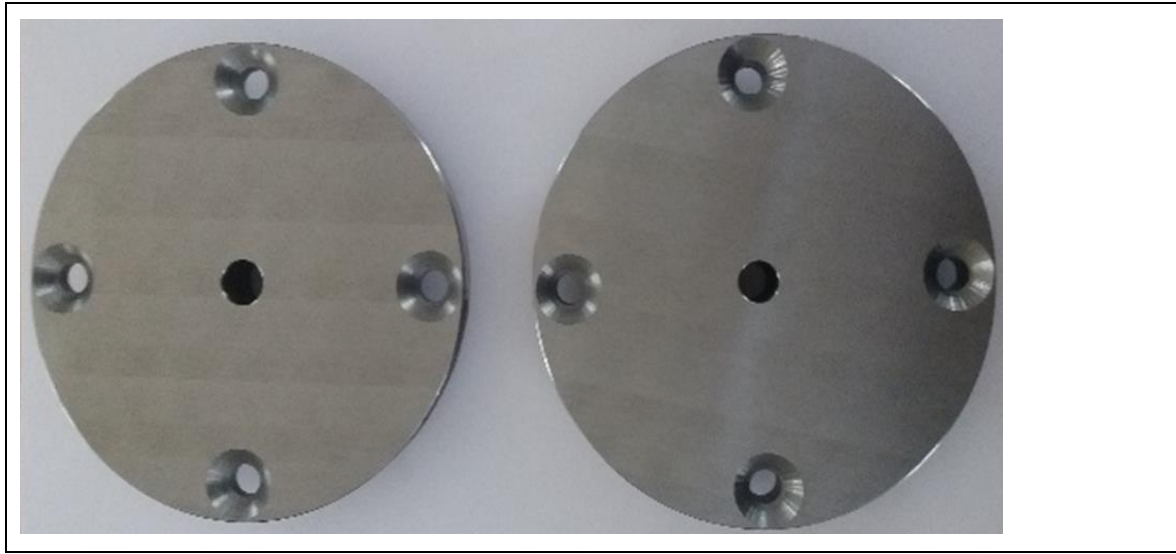
Ø8 mm olan küresel uçlu zımba ile deneyde;

Kalınlığı 0,5 mm alüminyum numune malzeme ölçüleri, boyu 90 mm sabit olmak üzere genişlikleri sırasıyla; 4 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm ve 16 mm olacak şekilde giyotin makasta kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. a) Küre çapı 8 mm olan zımba ile Erichsen şişirme testi uygulanacak numunelerin boyut değişimi, b) Çapı 8 mm olan küresel uçlu zımba

Şekil 4.17’de boyutları verilen numunelerin testleri, ISO 20482 standardına uygun hazırlanan, zımba çapı 8 mm, baskı plakası delik çapı 10 mm, Kalıp plakası delik çapı 11 mm olan kalıp seti (Resim 4.49) donanımına bağlanarak yapılmıştır.



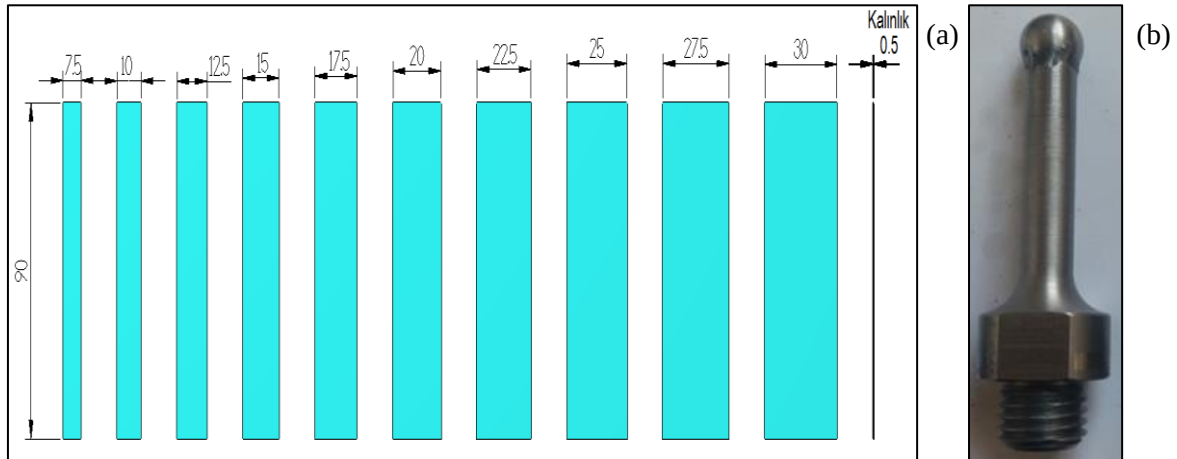
a) Kalıp plakası delik çapı: 11 mm

b) Baskı plakası delik çapı: 10 mm

Resim 4.49. Çapı 8 mm olan şekillendirme zımbasına ait kalıp plakası ve baskı plakası

Ø15 mm olan küresel uçlu zımba ile deneyde;

Kalınlığı 0,5 mm numune malzeme ölçüleri, boyu 90 mm sabit olmak üzere genişlikleri sırasıyla; 7,5 mm, 10 mm, 12,5 mm, 15 mm, 17,5 mm, 20 mm, 22,5 mm, 25 mm, 27,5 mm ve 30 mm olacak şekilde giyotin makasta kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. a) Küre çapı 15 mm olan zımba ile Erichsen şişirme testi uygulanacak numunelerin boyut değişimi, b) Çapı 15 mm olan küresel uçlu zımba

Şekil 4.18’de boyutları verilen numunelerin testleri, ISO 20482 standardına uygun hazırlanan, zımba çapı 15 mm, baskı plakası delik çapı 18 mm, Kalıp plakası delik çapı 21 mm olan kalıp seti (Resim 4.50) donanımına bağlanarak yapılmıştır.

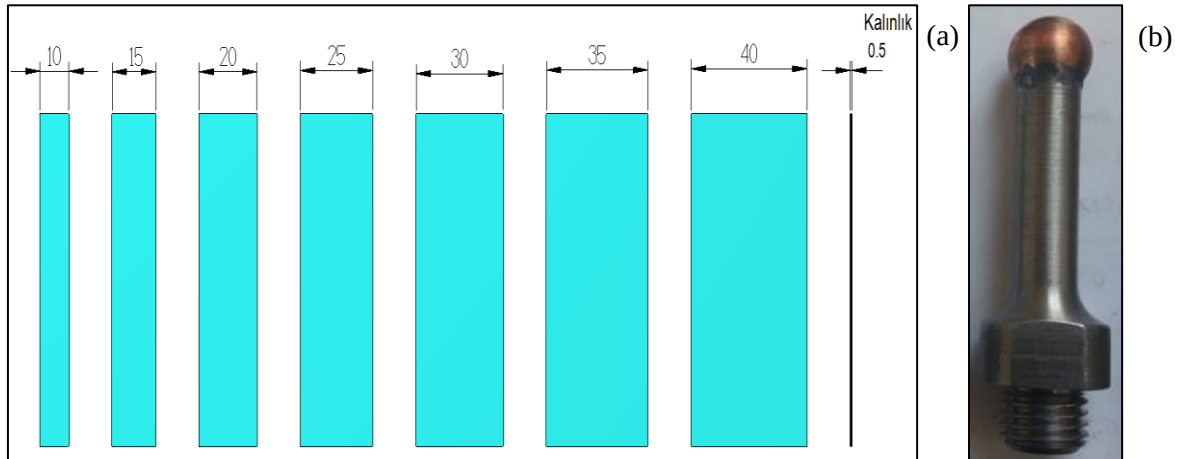


a) Baskı plakası delik çapı:18 mm b) Kalıp plakası delik çapı:21 mm

Resim 4.50. Baskı plakası ve Kalıp plakası

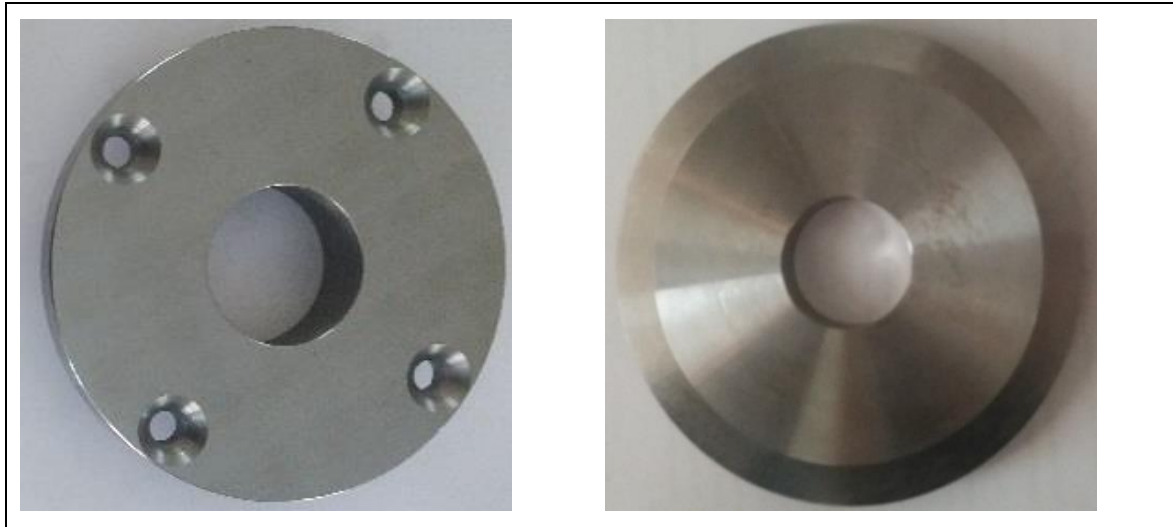
Ø20 mm olan küresel uçlu zımba ile deneyde;

Kalınlığı 0,5 mm numune malzeme ölçüleri, boyu 90 mm sabit olmak üzere genişlikleri sırasıyla; 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm ve 40 mm olacak şekilde giyotin makasta kesilerek hazırlanmıştır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. a) Küre çapı 20 mm olan zımba ile Erichsen şişirme testi uygulanacak numunelerin boyut değişimi, b) Çapı 20 mm olan küresel uçlu zımba

Şekil 4.19’da boyutları verilen numunelerin testleri, ISO 20482 standardına uygun hazırlanan, zımba çapı Ø20 mm, baskı plakası delik çapı 33 mm, kalıp plakası delik çapı 27 mm olan kalıp seti (Resim 4.51) donanımına bağlanarak yapılmıştır.



a) Kalıp plakası delik çapı:27 mm

b) Baskı plakası delik çapı:33 mm

Resim 4.51. Kalıp plakası ve baskı plakası

Baskı plakaları ve kalıp plakaları Ç1040 çelik malzemeden talaşlı imalat yöntemleriyle imal edilmiş ve herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır. Çizelge 4.14’de Erichsen testi için hazırlanan numunelerin zımba çapına göre gruplandırılmış sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.14. Deney grup ve sayıları

1. Grup deney için;		2. Grup deney için;		3. Grup deney için;	
Küresel başlı zımba	Ø8 mm	Küresel başlı zımba	Ø15 mm	Küresel başlı zımba	Ø20 mm
Numune ölçüleri	Tekrar sayısı	Numune ölçüleri	Tekrar sayısı	Numune ölçüleri	Tekrar sayısı
4 x 90 mm	3	7,5 x 90 mm	3	10 x 90 mm	3
6 x 90 mm	3	10 x 90 mm	3	15 x 90 mm	3
8 x 90 mm	3	12,5 x 90 mm	3	20 x 90 mm	3
10 x 90 mm	3	15 x 90 mm	3	25 x 90 mm	3
12 x 90 mm	3	17,5 x 90 mm	3	30 x 90 mm	3
14 x 90 mm	3	20 x 90 mm	3	35 x 90 mm	3
16 x 90 mm	3	22,5 x 90 mm	3	40 x 90 mm	3
Gruptaki deney sayısı	21	25 x 90 mm	3	Gruptaki deney sayısı	21
		27,5 x 90 mm	3		
		30 x 90 mm	3		
		Gruptaki deney sayısı	30		

Toplam deney sayısı: 21 + 30 + 21 = 72 x 3=216 adet

4.23. Erichsen Deneylerinde Sabit Alınan Parametreler

Bu çalışma kapsamında numune malzemelere uygulanan Erichsen şişirme testinde aşağıdaki parametreler sabit tutularak deneyler gerçekleştirilmiştir.

4.23.1. Kalıp deliği kenar kavis yarıçapı

Erichsen şişirme testinde literatüre göre deneylerde, kalıp deliği kenarının kavis yarıçapı $r = 0,75 \text{ mm}$ 'dir. Bu çalışma için üretilen kalıplarda, kalıp deliği kenarı kavis yarıçapı $r = 0,75 \text{ mm}$ olarak CNC tezgâh aracılığıyla işlenmiştir.

4.23.2. Baskı plakası kuvveti

İstenilen baskı kuvvetine ayarlanabilen donanım cihazında, baskı plakasının (pot çemberi) numune sac malzeme yüzeyine uyguladığı baskı kuvveti, literatüre uygun olarak 10 kN esas alınarak uygulanmıştır. Tasarımı ve imalatı yapılan test donanımının servo kontrol ayarları bakımından baskı plakası yükünün 10,2 kN olarak sabit uygulanması sağlanmıştır.

4.23.3. Baskı plakası yüzey pürüzlülüğü

Numune sac malzemeye temas eden baskı plakası ve kalıp plakası yüzeyleri için yüzey işleme toleranslarına ilişkin literatürde herhangi bir parametre bulunamamıştır. Baskı plakası yüzeyi yüzey pürüzlülüğü $R_a = 6,2 \text{ }\mu\text{m}$ olarak dikkate alınmıştır. Bu değere dayalı hesaplama sonucu kesici uç kavis yarıçapı 0,2 mm olan kesici için yaklaşık ilerleme $= 0,2 \text{ mm/devir}$ elde edilmiştir. İşleme sonrasında yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile yüzeylerin ortalama pürüzlülüğü $R_a = 6,7 \text{ }\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Plaka yüzeyinden oluşturulan izlere dik yönde dört farklı yerden yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmış ve ortalaması alınarak yuvarlatma uygulanmıştır. Testlerde baskı plakasının ve dişi plakanın yüzey pürüzlülüğü $R_a = 6,7 \text{ }\mu\text{m}$ olarak gerçekleşen değer olarak beyan edilmiştir.

4.23.4. Yağlama sıvısı

Bu çalışmada yağlama sıvısı kullanarak deneysel çalışma yapılmamıştır. ISO 20482 standardı, yağlama sıvısının kullanımını ihtiyari olarak değerlendirmiştir. Literatürde

yapılan çalışmalar incelendiğinde testlerin kuru olarak yapıldığının yaygın olduğu görülmüştür.

4.24. Kayıt Altına Alınan ve Beyan Edilen Bilgiler ve Grafikler

Bu çalışma boyunca Erichsen şişirme testine tabi tutulan numune malzemelerin; yük–zımba batma miktarı (Erichsen Sabiti-ES), yük–numune eni değişimi, zımba çapı–Erichsen Sabiti değişimi, ES–numune eni değişimi ilişkileri incelenmiş ve elde edilen bulgular tartışılmıştır.

4.24.1. Yük değişimi–Erichsen sabiti, ES, değerleri ve ilişkisi

Deneylerin her birinde PLC kumanda panelini kaydedecek şekilde kamera çekimi yapılmıştır. Deneylerin bitiminden sonra kamera kayıtları tekrar incelenmiş ve PLC kumanda panelinde anlık olarak değişen her zımba derinliğine karşılık gelen yük miktarları Excel ortamına elle ve hata oluşmasına izin verilmeyecek şekilde aktarılmıştır. EXCEL ortamına aktarılan her deneyin üç farklı grafiği elde edilmiş, değerlendirme sonunda tek bir grafik deneyi temsilen tercih edilmiştir.

4.24.2. Yük değişimi-numune genişlik değişimi değerleri ve ilişkisi

Deneylerde kullanılan numunelerin genişlik değişimi ile cihazın ekranından kayıt altına alınan yük değişimi arasındaki ilişki değerlendirilmek amacıyla EXCEL ortamında grafiklendirilmiştir.

4.24.3. Erichsen sabiti–numune genişlik değişimi değerleri ve ilişkisi

Deneylerde kullanılan numunelerin genişlik değişimi ile cihazın ekranından kayıt altına alınan Erichsen Sabiti değerleri arasındaki ilişki değerlendirilmek amacıyla EXCEL ortamında grafiklendirilmiştir.

4.24.4. Şekillendirme Sınır Diyagramı değerleri ve grafiği

Her deney malzemesinde, markalanmış ve şekil değiştirmiş dairedeki gerçek uzama değerleri elde edilmiştir. Malzemeye ait Şekillendirme Sınır Diyagramlarının (ŞSD)

grafiksel oluşturulması ve kayıt altına alınması aşağıdaki aşağıdaki bağıntılar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil değiştirmiş olan dairenin en büyük eksenini “ d_1 ” ile, en küçük eksenini “ d_2 ” ölçüler ve en büyük “ e_1 ”;

$$e_1 = \frac{(d_1 - d_0)}{d_0}$$

ve en küçük “ e_2 ”;

$$e_2 = \frac{(d_2 - d_0)}{d_0}$$

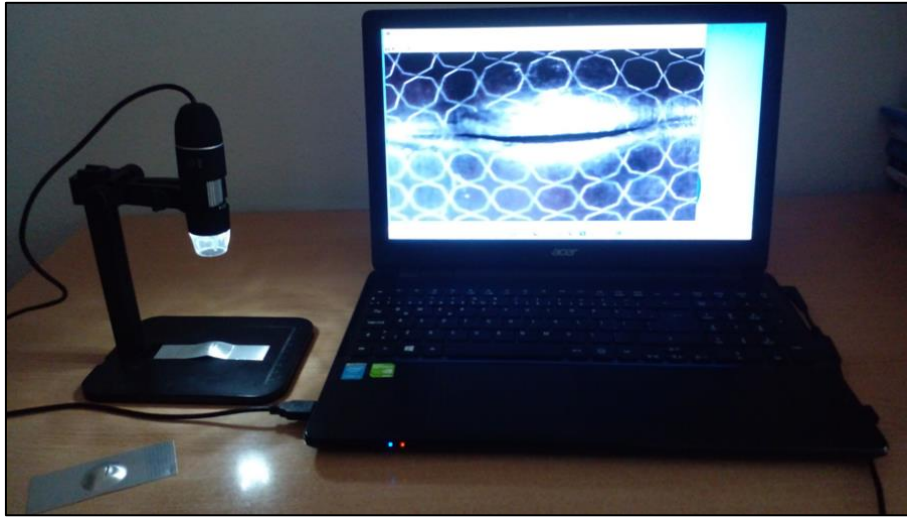
birim şekil değiştirme uzamaları tespit edilir. “ e_1 ” ve “ e_2 ” değerleri mühendislik uzaması değerleridir. Literatürde çoğunlukla gerçek uzama değerleri kullanılır. Gerçek uzama ise;

$$\epsilon_{\max} = \ln(d_1 / d_0),$$

$$\epsilon_{\min} = \ln(d_2 - d_0),$$

eşitlikleriyle hesaplanmıştır.

Temel bilgiler dahilinde, Erichsen şişirme deneyinde dairelerde elde edilen çekilme ve uzama, buna bağlı olarak malzemedeki uzama oranı tespit edilmiştir. Bunun için Resim 4.52’de gösterilen düzenek kurulmuştur. Görüntü büyütme oranı 1/1000 olan optik mikroskop aracılığı ile optik cihazın programı bilgisayara kurulmuş ve Erichsen testinden geçen numune malzemede meydana gelen yırtılma ve uzamalar 1/1000 oranında büyütülerek, eliptik biçim alan ızgara üzerinden mikrometre ile boyut ölçümleri görüntülenmiştir. Elde edilen görüntünün bilgisayar çıktısı alınarak 0,01 mm hassasiyetli mikrometre ile şekil değişikliğine uğrayan ızgaralar üzerinden boyut ölçümleri yapılmış, eliptik şekle dönen desenlerden elde edilen uzama ve buna bağlı olarak malzemedeki uzama oranını tespit etmek amacıyla grafiksel olarak Şekillendirme Sınır Diyagramları oluşturulmuş, sonuçlar yorumlanmıştır.



Resim 4.52. Optik mikroskop aracılığı ile deformasyona uğramış desenlerin görüntüsü

4.25. İlave Deneyler

4.25.1. Deney malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Aynı koşullarda, kalınlık 1 mm DP 600 paslanmaz çelik, kalınlık 1 mm Al5754 alüminyum ve kalınlık 0,5 mm Ck75 çelik levha olmak üzere 3 farklı türde malzemeye Erichsen Şişirme testi uygulanmıştır. Malzeme seçiminde, bu malzemelerin endüstride sıklıkla kullanılıyor olması göz önünde bulundurulmuştur. Çizelge 4.15’de numune malzemelerin Erichsen deneyi için gerekli parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Numune malzemelerle ilgili parametreler

Sac Malzeme Türleri	1. Deney
Sac Malzeme Kalınlığı, mm	DP 600 çelik sac malzeme- 1 mm Ck75 (SAE1074) çelik sac malzeme- 0,5 mm Al 5757 sac malzeme -1 mm
Deney Sac Malzeme Ölçüleri, mm	10 x 90 mm 15 x 90 mm 20 x 90 mm 25 x 90 mm 30 x 90 mm 35 x 90 mm 40 x 90 mm boyutlarında numune malzeme kullanılmıştır. Her deney 3 defa tekrarlanmıştır.
Zimba Şekli	Ø20 mm küresel uçlu

Özellikle otomotiv sektöründe, çift fazlı (DP) olarak adlandırılan gelişmiş yüksek mukavemetli saclar, araç ağırlıklarını azaltarak yakın tüketimini düşürmekte ve dolayısıyla egzoz gazı emisyonunun azalmasına katkı sağlamaktadır.

Ayrıca, yüksek mukavemet sağlaması ve yolcu güvenliğini arttırdığı için otomotiv endüstrisi tarafından tercih edilmektedir [110, 111]. Çift fazlı çelikler, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler ile karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemete, pekleşme oranına, enerji absorbe edebilme yeteneğine ve daha düşük akma dayanımına sahip olması dolayısıyla kolay şekil alabilmektedirler [112]. Bu nedenle DP 600 çelik saclar otomotiv sektöründe gövde, panel ve kaporta parçaları üretiminde öncelikle tercih edilmektedir. DP 600 çelik sac malzemenin mekaniksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.16’da gösterilmiştir.

Alüminyum sac malzeme, çok iyi şekil alabildiği gibi atmosferik korozyona da dayanıklı bir malzemedir. Dekoratif kaplamalar için uygundur. Alüminyum alaşımlar genellikle uçak ve uzay araçları başta olmak üzere taşıtlarda ve inşaat sektöründe kullanılmaktadır.

Al 5754 alaşımlar, zırhlama, kazan ana yapı levhaları, güçlü yapı elemanları, yapısal elemanları, kazanlar ve depolama tankları, otomobil, tren vagonu, mimari işlerde tercih edilmektedir [106].

Çizelge 4.16. DP600 çelik sac malzemenin kimyasal ve mekaniksel özellikleri [17].

DP600 Sac Malzemenin Kimyasal Bileşimi (Ağırlık %)					
Çelik Kalitesi	C	Mn	Mo	Cr	Si
DP600	0,1	1,523	0,196	0,197	0,157
DP 600 Sac Malzemenin Mekaniksel Özellikleri					
Malzeme	Deformasyon Hızı, (mm/dak.)	Akma Dayanımı, (Mpa)	Çekme Dayanımı, (Mpa)	Uzama, (%)	
DP600	7,5	409,77	734,75	15,3	
	7,5	417,98	749,58	15,15	
	225	418,12	755,63	15,7	
	450	420,66	778,53	17,4	

Bunun yanında otomotiv, gemi, uçak ve savunma sanayiinde çok yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Çizelge 4.17’de 5754 alüminyum sac malzemenin kimyasal ve mekaniksel bileşenleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.17. Al 5754 alüminyum malzemenin kimyasal ve mekaniksel bileşenleri [112]

5754 Alüminyum malzemenin kimyasal bileşimleri.								
Element	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ti	Cr	Zn
EN-AW 5754	0,093	0,191	0,164	2,774	0,003	0,007	0,004	0,007
5754 Alüminyum Malzemenin Mekanik Özellikleri								
Malzeme	Çekme (Mpa)	Akma (Mpa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)				
EN-AW 5754	198,4	108,6	25	52				

USA standartlarında SAE 1074 olarak bilinen Ck75 çeliği, [13] geniş bir kullanım alanına sahiptir. Düşük veya orta karbon alaşımlı çeliklerdir. Adı geçen numune sac malzemenin Çizelge 4.18 ve Çizelge 4.19’da literatürden elde edilen kimyasal ve mekaniksel özellikleri verilmiştir

Çizelge 4.18. Ck75 Çelik Sac Malzemenin Kimyasal Bileşimi [25]

Ck75 çelik sac malzemenin kimyasal özellikleri									
C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Cr %	Mo %	Cu %	Ni %
0,761	0,241	0,608	0,009	0,001	0,033	0,161	0,004	0,034	0,042

Çizelge 4.19. Ck75 Çelik sac malzemenin mekaniksel özellikleri [25]

Ck75 çelik sac malzemenin mekaniksel özellikleri					
Örnek Yönler	p (kg/m ³)	E (GPa)	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	n (-)
Hadde yönüne 0°	7,85	205	399	576	0,149
Hadde yönüne 45°	7,85	205	413	590	0,15
Hadde yönüne 90°	7,85	205	409	593	0,156

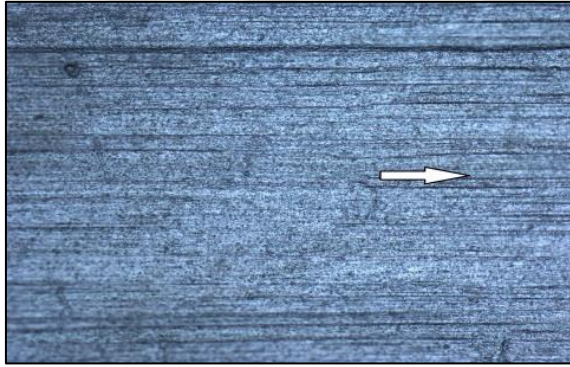
CK75 çelik malzemelerin kullanım alanları çok yaygın olmakla birlikte en bilindik kullanım alanı yay imalat sanayisidir. Ck75 çeliklerin aşınmaya karşı dayanımları yüksektir. Sac malzemeler, deney için giyotin makasta 90x90 mm ölçülerinde kare şeklinde kesilerek hazırlandı.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Al 1050 Sac Malzeme Çekme Deneyleri

Çalışma kapsamında prototip imalatı yapılan tam otomatik Erichsen Test Donanımının muhtelif şartlar için denenmesi öncesi, deneylerin yapılacağı Al 1050 sac malzemenin hadde yönüne farklı açılarda hazırlanan numunelere çekme deneyleri uygulanmıştır (Çizelge 5.1). Daha önce numune malzemenin hadde yönü Samsun Uluslararası Akredite Metal Metroloji ve Kalibrasyon Laboratuvarı (SamLab)’nda kontrol edilmiş ve doğrulanmıştır (Resim 5.1). Çekme testi sonuçlarının detayları EK-3’te verilmiştir.



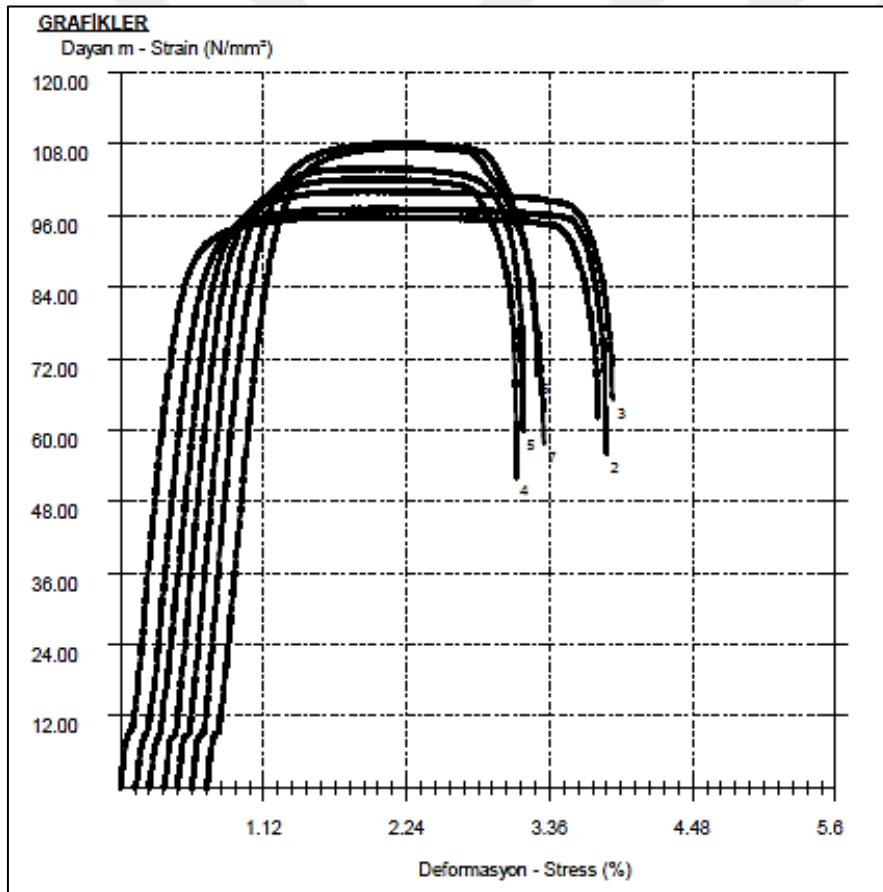
Resim 5.1. Numune malzemenin tespit edilen hadde yönü

Çizelge 5.1. Hadde yönlerine göre numunelerin çekme testi verileri

TEST SONUÇLARI														
No.	Geniçlik (mm)	Kalınlık (mm)	İlk boy (mm)	Malzeme Tanı.	Deformasyon (mm)	Son boy (mm)	Uzama oran (%)	Max. yük (N)	Gerilme day. (N/mm ²)	Akma day. (N/mm ²)	Akma day.%0.2 (N/mm ²)	E modülü (MPa)	Kopma day. (N/mm ²)	Kopma yükü (N)
1	12.50	0.50	90.00		3.36	93.36	3.73	599.00	95.84	63.68	90.56	23.05	62.24	389.00
2	12.50	0.50	90.00		3.33	93.33	3.70	608.00	97.28	63.36	92.00	21.98	56.16	351.00
3	12.50	0.50	90.00		3.27	93.27	3.63	626.00	100.16	65.60	95.04	21.17	65.12	407.00
4	12.50	0.50	90.00		2.49	92.49	2.77	638.00	102.08	66.88	96.96	23.16	52.16	325.00
5	12.50	0.50	90.00		2.44	92.44	2.71	650.00	104.00	68.64	98.56	23.79	60.00	375.00
6	12.50	0.50	90.00		2.44	92.44	2.71	675.00	108.00	70.72	100.32	23.92	69.44	434.00
7	12.50	0.50	90.00		2.38	92.38	2.64	672.00	107.52	70.08	101.28	23.76	57.76	361.00

ISO 6892 standardında belirtilen ölçülere uygun olarak ve her deney 3 numuneye uygulanan çekme deneyleri sonunda; haddeleme yönüne paralel (0°) hazırlanan numunelerde ortalama en büyük yük 613,5 N ve ortalama en büyük çekme gerilmesi 98,16 N/mm²; haddeleme doğrultusuna (30°) açı yapacak şekilde hazırlanan numunelerde ortalama en büyük yük

623,33 N ve ortalama en büyük çekme gerilmesi 99,73 N/mm²; haddeleme doğrultusuna (45⁰) açı yapacak şekilde hazırlanan numunelerde ortalama en büyük yük 649 N ve ortalama en büyük çekme gerilmesi 103,84 N/mm²; haddeleme doğrultusuna (60⁰) açı yapacak şekilde hazırlanan numunelerde ortalama en büyük yük 657 N ve ortalama en büyük çekme gerilmesi 105,12 N/mm²; haddeleme yönüne (75⁰) açı yapacak şekilde hazırlanan numunelerde ortalama en büyük yük 677 N ve ortalama en büyük çekme gerilmesi 108,32 N/mm²; haddeleme doğrultusuna (90⁰) açı yapacak şekilde hazırlanan numunelerde ortalama en büyük yük 662 N ve ortalama en büyük çekme gerilmesi 105,97 N/mm² olmuştur (Şekil 5.1).

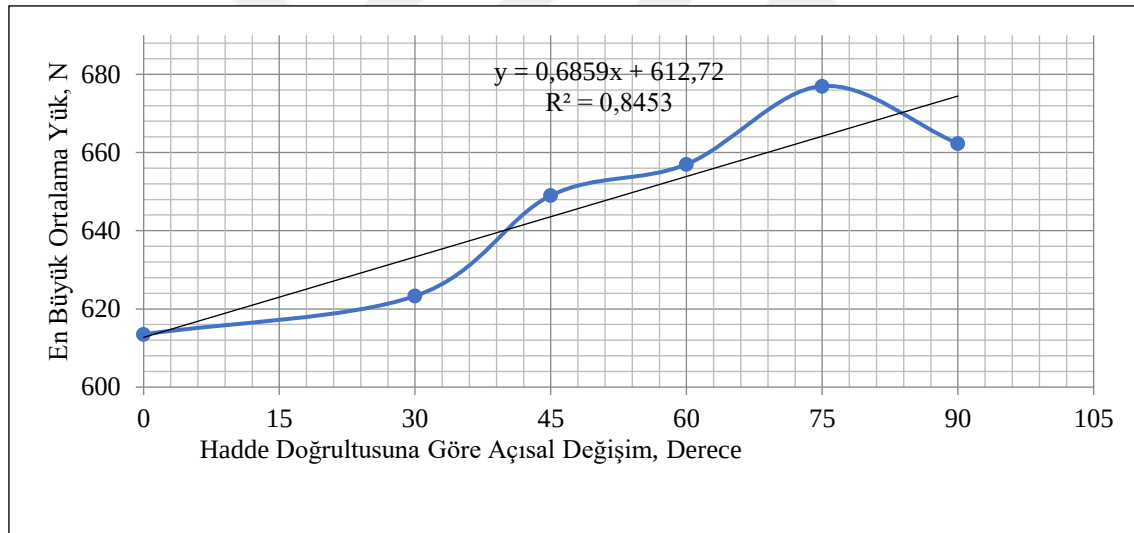


Şekil 5.1. Hadde doğrultuları farklı numune malzemenin karşılaştırmalı çekme testi grafiği

Hadde doğrultusuna 90⁰ açı ile yapılan testte en büyük ortalama (EBO) yükün ve ortalama çekme mukavemetinin düştüğü görülmüştür. Ortalama yüzde uzama değerlerinin; 0⁰ de 3,55; 30⁰ de 3,16; 45⁰ de 3,33; 60⁰ de 2,76; 75⁰ de 2,80 ve 90⁰ de 2,75 olarak gerçekleştiği tespit

edilmiştir. Haddeme doğrultusuna 15^0 'de hazırlanan çekme testi numuneleriyle yapılan çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar, kabul edilemez biçimde aykırılık gösterdiğinden grafik sunumda dikkate alınmaması uygun görülmüştür (Şekil 5.2).

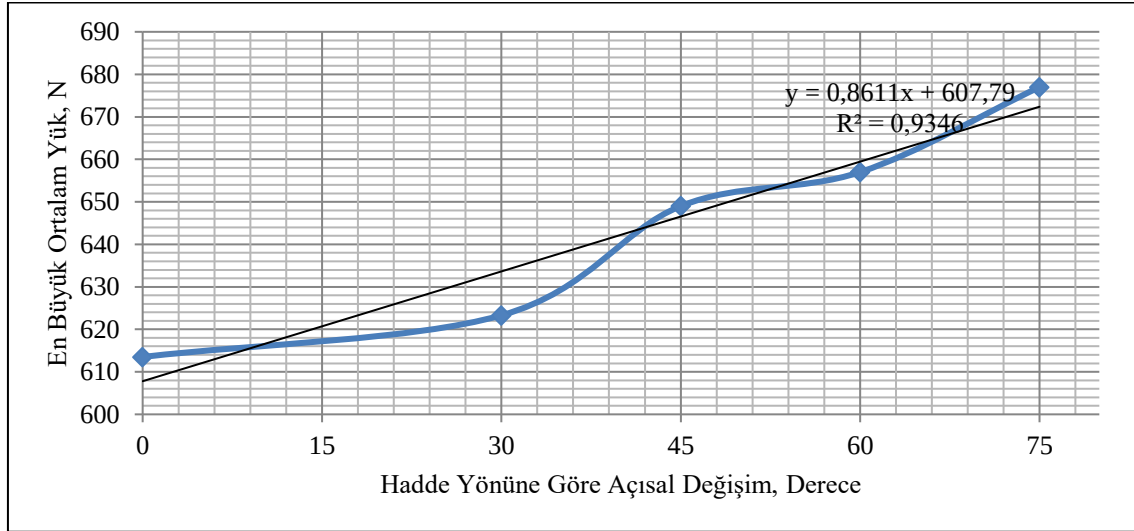
Çekme testlerinde ortalama en büyük yükün, malzemenin haddeme doğrultusuna paralel olandan dik olana doğru en büyük ortalama yükler artarak yükselen değişiklik göstermiştir. Haddeme doğrultusu referans alınarak yapılan %99,53 (Al 1051) saf alüminyum sac malzemenin çekme testinde, haddeme yönüne göre, açı değeri arttıkça en büyük ortalama yük ve çekme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Haddeme doğrultusuna 90^0 açı ile yapılan testte en büyük yükün ve gerilme mukavemetinin düştüğü görülmüştür. Haddeme doğrultusuna 15^0 açıda hazırlanan numunelerin çekme deneyleri sonucundaki aykırılığın, deney esnasında yapılan sıfırlama hatasına dayalı olduğu intibai oluşmuştur.



Şekil 5.2. Haddeme yönünün açısal değişimine göre en büyük ortalama çekme yükü değerleri

Çalışmanın amacı bakımından sonuçları pratiğe aktarılamayan numunelerin bir kısıtlayıcı etkisi bulunamamıştır. Haddeme doğrultusuna göre 0^0 , 30^0 , 45^0 , 60^0 , 75^0 , 90^0 açılarda uygulanan çekme testinde en büyük ortalama yük ile haddeme doğrultusunun açısal değişimi arasında düzenli ve artan bir değişim görülmektedir. Ayrıca haddeme doğrultusunun açısal değişimine karşılık, en büyük ortalama kuvvet arasındaki sapma oranı (R^2), kabul edilebilir sınırlar içinde bulunmaktadır. Yalnız haddeme doğrultusuna göre 90^0 açılı numunede bir sapma görülmektedir. Haddeme doğrultusunun çekme yönüne dik olması halinde çekme kuvvetinde bir düşüş olması olağan bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla haddeme

doğrultusuna 90^0 açıda hazırlanan numunelerin ortalama en büyük yük değeri pratik gösterimden çıkartılması halinde elde edilen değişim daha güvenilir bir ilişkiyi ortaya koymuştur (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Hadde yönüne 90^0 açıdaki numunenin çıkartılması sonunda en büyük ortalama çekme yükü ve açısal değişim ilişkisi

5.2. Erichsen Testlerinin Sonuçları

Erichsen testleri, Al 1050 (%99,53), Al 5754, Ck 75 (SAE 1074), DP600 sac numunelere uygulanmıştır. Şişirme deneyinde elde edilen veriler Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te gösterildiği gibi 8 mm, 15 mm ve 20 mm zımba küre çapları için ayrı ayrı hazırlanmıştır. Al 1050 (%99,53) numune malzemeye ayrıca bir deney daha uygulanmış ve elde edilen veriler Çizelge 5.45'te gösterilmiştir. Bu testler, numune malzeme kalınlığı 0,5 mm, zımba küre çapı 20 mm ve zımba hızı 6,25 mm/dakika parametreleri esas alınarak yapılmıştır.

5.2.1. Zımba çapı ve hızı değişimi için EBO yük-Erichsen sabiti değişimi

Üç ayrı zımba çapında ve üç ayrı zımba hızında numune malzemeye uygulanan Erichsen şişirme testinde cihazın dijital ekranından okunan deformasyon yükü, Erichsen Sabiti ve bu değerlerden elde edilen ortalama en büyük ve ortalama Erichsen Sabitini gösteren çizelgeler, Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. 15 mm zımba çapında elde edilen EBO yük-Erichsen sabiti değerleri

Zımba çapı 15 mm, hız 5 mm/dk											
Numune boyutları : 90 x 7,5 mm		Numune boyutları : 90 x 10 mm		Numune boyutları : 90 x 12,5 mm		Numune boyutları : 90 x 15 mm		Numune boyutları : 90 x 17,5 mm		Numune boyutları : 90 x 20 mm	
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N
1,5812	185	2,8325	342	3,1756	431	3,081	447	3,1376	489	3,3146	605
2,0736	206	3,1436	371	3,1479	420	2,9729	439	2,9312	478	3,0606	551
1,7233	189	3,0032	371	3,2516	443	3,1729	459	2,981	482	3,2564	574
Ort. Yük: 193,33 N		Ort. Yük: 361,33 N		Ort. Yük: 431,33 N		Ort. Yük: 448,33 N		Ort. Yük: 483 N		Ort. Yük: 576,66 N	
Ort. ES: 1,7927 mm		Ort. ES: 2,9931 mm		Ort. ES: 3,1917 mm		Ort. ES: 3,0756 mm		Ort. ES: 3,0166 mm		Ort. ES: 3,2105 mm	
Zımba çapı 15 mm, hız 6,25 mm/dk											
Numune boyutları : 90 x 7,5 mm		Numune boyutları : 90 x 10 mm		Numune boyutları : 90 x 12,5 mm		Numune boyutları : 90 x 15 mm		Numune boyutları : 90 x 17,5 mm		Numune boyutları : 90 x 20 mm	
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N
1,7909	189	2,7161	338	3,1049	420	2,9938	439	3,044	492	3,3264	625
2,2219	219	2,6474	322	3,0038	424	3,011	442	3,0169	472	3,1384	552
1,9436	206	2,4927	301	3,109	412	3,077	451	3,0826	508	3,5498	672
Ort. Yük: 204,66 N		Ort. Yük: 320,33 N		Ort. Yük: 418,66 N		Ort. Yük: 444 N		Ort. Yük: 490,66 N		Ort. Yük: 616,33 N	
Ort. ES: 1,9854 mm		Ort. ES: 2,6187 mm		Ort. ES: 3,0725 mm		Ort. ES: 3,0272 mm		Ort. ES: 3,0478 mm		Ort. ES: 3,3382 mm	
Zımba çapı 15 mm, hız 8 mm/dk											
Numune boyutları : 90 x 7,5 mm		Numune boyutları : 90 x 10 mm		Numune boyutları : 90 x 12,5 mm		Numune boyutları : 90 x 15 mm		Numune boyutları : 90 x 17,5 mm		Numune boyutları : 90 x 20 mm	
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N
2,0846	229	2,8399	369	3,3156	419	2,2088	369	2,7303	478	3,1331	587
2,019	224	2,9662	358	3,4531	441	2,8335	447	2,5613	461	3,1785	589
1,856	206	3,3327	372	3,3891	424	2,5614	404	2,7313	473	3,3349	638
Ort. Yük: 219,66 N		Ort. Yük: 366,33 N		Ort. Yük: 428 N		Ort. Yük: 406,66 N		Ort. Yük: 470,66 N		Ort. Yük: 604,66 N	
Ort. ES: 1,9865 mm		Ort. ES: 3,0462 mm		Ort. ES: 3,3859 mm		Ort. ES: 2,5345 mm		Ort. ES: 2,6749 mm		Ort. ES: 3,2155 mm	
Zımba çapı 15 mm, hız 5 mm/dk											
Numune boyutları : 90 x 7,5 mm		Numune boyutları : 90 x 10 mm		Numune boyutları : 90 x 12,5 mm		Numune boyutları : 90 x 15 mm		Numune boyutları : 90 x 17,5 mm		Numune boyutları : 90 x 20 mm	
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N
4,1316	1026	4,4595	1088	4,294	936	4,294	936	3,555	742	3,1331	587
4,0302	1007	4,1573	1020	4,31	906	4,31	906	4,6198	732	3,1785	589
4,0119	1007	4,165	1026	4,1077	903	4,1077	903	4,4347	770	3,3349	638
Ort. Yük: 1013,33 N		Ort. Yük: 1044,66 N		Ort. Yük: 915 N		Ort. Yük: 915 N		Ort. Yük: 748 N		Ort. Yük: 604,66 N	
Ort. ES: 4,0579 mm		Ort. ES: 4,2606 mm		Ort. ES: 4,2372 mm		Ort. ES: 4,2372 mm		Ort. ES: 4,2031 mm		Ort. ES: 3,2155 mm	
Zımba çapı 15 mm, hız 6,25 mm/dk											
Numune boyutları : 90 x 7,5 mm		Numune boyutları : 90 x 10 mm		Numune boyutları : 90 x 12,5 mm		Numune boyutları : 90 x 15 mm		Numune boyutları : 90 x 17,5 mm		Numune boyutları : 90 x 20 mm	
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N
4,5262	1039	4,2636	1035	4,2296	992	4,2296	992	4,182	867	3,3264	625
4,4569	1020	4,026	983	4,0123	944	4,0123	944	3,7474	786	3,1384	552
4,3113	1066	4,1615	1028	3,9822	941	3,9822	941	3,6697	772	3,5498	672
Ort. Yük: 1041,66 N		Ort. Yük: 1015,33 N		Ort. Yük: 959 N		Ort. Yük: 959 N		Ort. Yük: 808,33 N		Ort. Yük: 616,33 N	
Ort. ES: 4,4314 mm		Ort. ES: 4,1503 mm		Ort. ES: 4,0747 mm		Ort. ES: 4,0747 mm		Ort. ES: 3,8663 mm		Ort. ES: 3,3382 mm	
Zımba çapı 15 mm, hız 8 mm/dk											
Numune boyutları : 90 x 7,5 mm		Numune boyutları : 90 x 10 mm		Numune boyutları : 90 x 12,5 mm		Numune boyutları : 90 x 15 mm		Numune boyutları : 90 x 17,5 mm		Numune boyutları : 90 x 20 mm	
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N
4,1316	1026	4,4595	1088	4,294	936	4,294	936	3,555	742	3,1331	587
4,0302	1007	4,1573	1020	4,31	906	4,31	906	4,6198	732	3,1785	589
4,0119	1007	4,165	1026	4,1077	903	4,1077	903	4,4347	770	3,3349	638
Ort. Yük: 1013,33 N		Ort. Yük: 1044,66 N		Ort. Yük: 915 N		Ort. Yük: 915 N		Ort. Yük: 748 N		Ort. Yük: 604,66 N	
Ort. ES: 4,0579 mm		Ort. ES: 4,2606 mm		Ort. ES: 4,2372 mm		Ort. ES: 4,2372 mm		Ort. ES: 4,2031 mm		Ort. ES: 3,2155 mm	

Çizelge 5.4. 20 mm zımba çapında elde edilen EBO yük-Erichsen sabiti değerleri

Zımba çapı 20 mm, hız 5 mm/dak											
Numune boyutları : 90 x 10 mm			Numune boyutları : 90 x 15 mm			Numune boyutları : 90 x 20 mm			Numune boyutları : 90 x 25 mm		
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	
2,8205	277		3,6638	461		3,5883	514		3,618	631	
2,5796	260		3,5689	459		3,5452	528		3,4856	606	
2,7853	284		3,7213	475		3,3448	496		3,5316	606	
Ort. Yük: 273,66 N			Ort. Yük: 465 N			Ort. Yük: 512,66 N			Ort. Yük: 614,33 N		
Ort. ES: 2,7284 mm			Ort. ES: 3,6513 mm			Ort. ES: 3,4927 mm			Ort. ES: 3,5450 mm		
Numune boyutları : 90 x 35 mm			Numune boyutları : 90 x 30 mm			Numune boyutları : 90 x 40 mm			Numune boyutları : 90 x 45 mm		
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	
4,7405	1118		4,2785	922		4,7405	1118		4,2785	922	
4,7233	1119		4,2659	927		4,7233	1119		4,2659	927	
4,8716	1153		4,3475	934		4,8716	1153		4,3475	934	
Ort. Yük: 1130 N			Ort. Yük: 927,66 N			Ort. Yük: 1130 N			Ort. Yük: 927,66 N		
Ort. ES: 4,7784 mm			Ort. ES: 4,2973 mm			Ort. ES: 4,7784 mm			Ort. ES: 4,2973 mm		
Zımba çapı 20 mm, hız 6,25 mm/dak											
Numune boyutları : 90 x 10 mm			Numune boyutları : 90 x 15 mm			Numune boyutları : 90 x 20 mm			Numune boyutları : 90 x 25 mm		
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	
2,6064	271		3,6898	470		3,3811	494		3,6644	635	
2,6448	276		3,6484	470		3,3251	492		3,4581	594	
2,6999	281		3,7744	488		3,7068	540		3,6078	628	
Ort. Yük: 276 N			Ort. Yük: 476 N			Ort. Yük: 508,66 N			Ort. Yük: 619 N		
Ort. ES: 2,6503 mm			Ort. ES: 3,7042 mm			Ort. ES: 3,471 mm			Ort. ES: 3,5767 mm		
Numune boyutları : 90 x 35 mm			Numune boyutları : 90 x 30 mm			Numune boyutları : 90 x 40 mm			Numune boyutları : 90 x 45 mm		
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	
4,7856	1171		4,2343	908		4,7856	1171		4,2343	908	
4,8189	1122		4,1424	884		4,8189	1122		4,1424	884	
4,8068	1138		4,3739	938		4,8068	1138		4,3739	938	
Ort. Yük: 1143,66 N			Ort. Yük: 910 N			Ort. Yük: 1143,66 N			Ort. Yük: 910 N		
Ort. ES: 4,8037 mm			Ort. ES: 4,2502 mm			Ort. ES: 4,8037 mm			Ort. ES: 4,2502 mm		
Zımba çapı 20 mm, hız 8 mm/dak											
Numune boyutları : 90 x 10 mm			Numune boyutları : 90 x 15 mm			Numune boyutları : 90 x 20 mm			Numune boyutları : 90 x 25 mm		
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	
2,5336	290		3,2562	430		2,5816	445		3,0945	527	
2,9491	323		3,1835	412		2,7514	453		3,2346	552	
2,7055	314		3,1053	412		2,6948	456		3,2628	573	
Ort. Yük: 309 N			Ort. Yük: 418 N			Ort. Yük: 451,33 N			Ort. Yük: 550,66 N		
Ort. ES: 2,7294 mm			Ort. ES: 3,1816 mm			Ort. ES: 2,6759 mm			Ort. ES: 3,1973 mm		
Numune boyutları : 90 x 35 mm			Numune boyutları : 90 x 30 mm			Numune boyutları : 90 x 40 mm			Numune boyutları : 90 x 45 mm		
Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N		Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	
4,3301	1093		4,0051	882		4,3301	1093		4,0051	882	
3,9802	1006		3,9239	860		3,9802	1006		3,9239	860	
4,996	1228		4,1743	925		4,996	1228		4,1743	925	
Ort. Yük: 1109 N			Ort. Yük: 889 N			Ort. Yük: 1109 N			Ort. Yük: 889 N		
Ort. ES: 4,4354 mm			Ort. ES: 4,0344 mm			Ort. ES: 4,4354 mm			Ort. ES: 4,0344 mm		

Küre çapı 8 mm, 15 mm ve 20 mm zımbalarla, zımba ilerleme hızı 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika ile yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen deneysel verilerin sadece, numune eni = küre çapı / 2; numune eni = küre çapı ve numune eni = 2 x küre çapı olanları burada verilmiş, diğer ara deneylerin sonuçları EK-4'te sunulmuştur.

5 mm/dakika zımba hızında, üç farklı zımba çapında, yük-Erichsen Sabiti ilişkileri ve değerlendirmeleri (Çizelge 5.5 ila Çizelge 5.22 ve Şekil 5.4 ila Şekil 5.21 arasında verilmiştir.

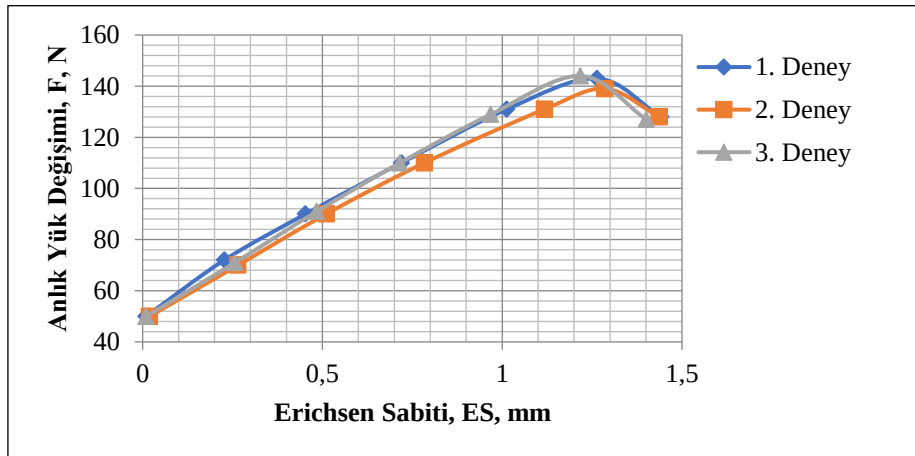
Çizelge 5.5. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x4 mm olan deneylerden elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0094	50	0,0196	50	0,0095	50
0,2271	72	0,2651	70	0,2565	71
0,4531	90	0,5107	90	0,4842	91
0,7195	110	0,7836	110	0,7156	110
1,0131	131	1,1178	131	0,9686	129
1,2634	143	1,2863	139	1,2175	144
1,4415	128	1,4366	128	1,4009	127

Ortalama En Büyük Yük, $F=142$ N

Ortalama Erichsen Sabiti; $ES_{11}=1,2557$ mm

Gerek Çizelge 5.5 değerleri ve gerekse Şekil 5.4'te verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 1,2 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 142,00 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 5 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen sabitinin ortalama 1,25 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.4. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x4 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

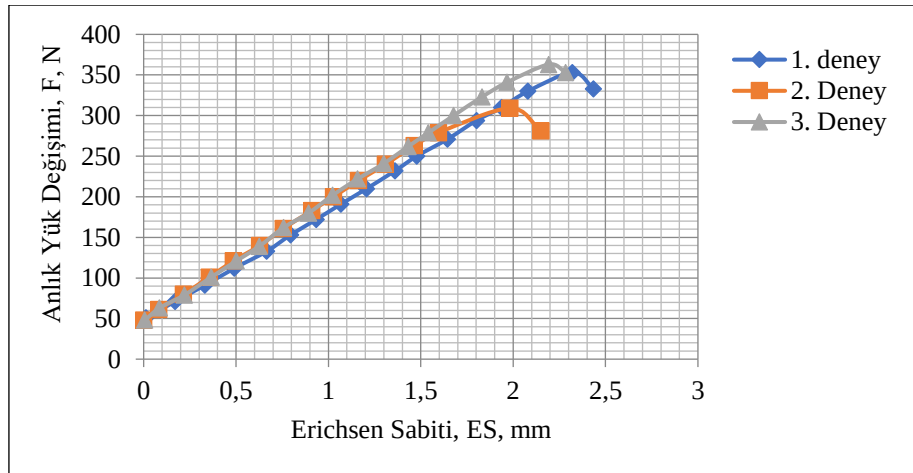
Çizelge 5.6. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x8 mm olan deneylerden elde edilen veriler

Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	1. Deney	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N				
0,0132	51	0,0009	48	0,0063	48
0,3312	91	0,2164	80	0,2207	79
0,667	133	0,4866	121	0,5017	121
0,9343	172	0,6284	140	0,7574	162
1,2069	210	0,7571	161	1,0238	202
1,4781	250	0,9106	183	1,3001	241
1,8021	294	1,0276	200	1,5419	279
1,9379	310	1,3097	240	1,6774	300
2,0801	330	1,5959	279	1,8313	323
2,3215	353	1,9829	309	1,9674	341
2,4343	333	2,1508	281	2,1933	363

En Büyük Ortalama Yük, $F=341,66$ N

En Büyük Ortalama Erichsen Sabiti; $ES_{11}=2,1659$ mm

Gerek Çizelge 5.6 değerleri ve gerekse Şekil 5.5'te verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 1,9 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 341,66 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 5 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,1 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x8 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

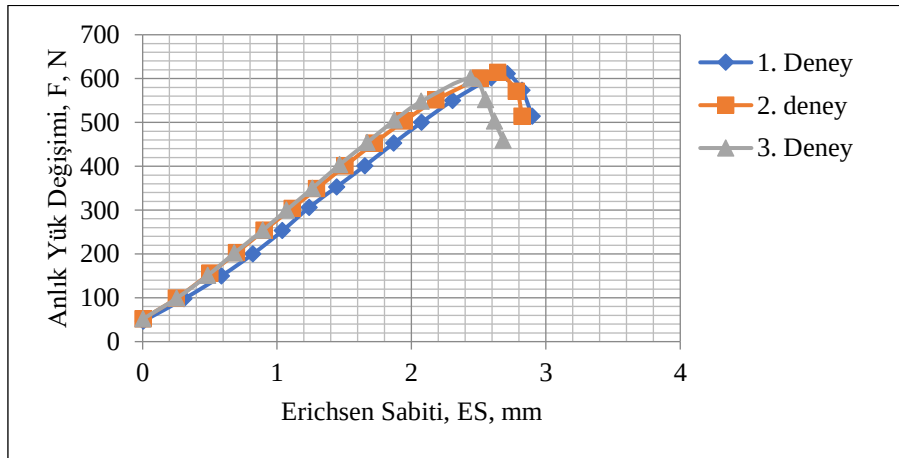
Çizelge 5.7. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x16 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0059	47	0,0039	52	0,0042	52
0,3096	98	0,2521	99	0,2527	99
0,5867	150	0,5017	156	0,484	151
0,8204	200	0,6994	203	0,6822	202
1,0403	253	0,9042	254	0,8942	254
1,2389	306	1,1127	304	1,0703	300
1,444	353	1,2955	349	1,2635	350
1,653	401	1,5065	401	1,4669	404
1,8693	453	1,7227	453	1,6697	454
2,0752	500	1,9459	503	1,8739	505
2,3064	550	2,182	551	2,074	548
2,5959	602	2,5111	601	2,4396	601
2,7131	611	2,6425	614	2,5523	552
2,8232	573	2,7806	571	2,6179	503
2,8992	514	2,8238	514	2,6838	459

Ortalama En Büyük Yük, $F=608,66$ N

En Büyük Ortalama Erichsen Sabiti; $ES_{11}=2,5984$ mm

Gerek Çizelge 5.7 değerleri ve gerekse Şekil 5.6’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2,4 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 608,6 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 5 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,59 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x16 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

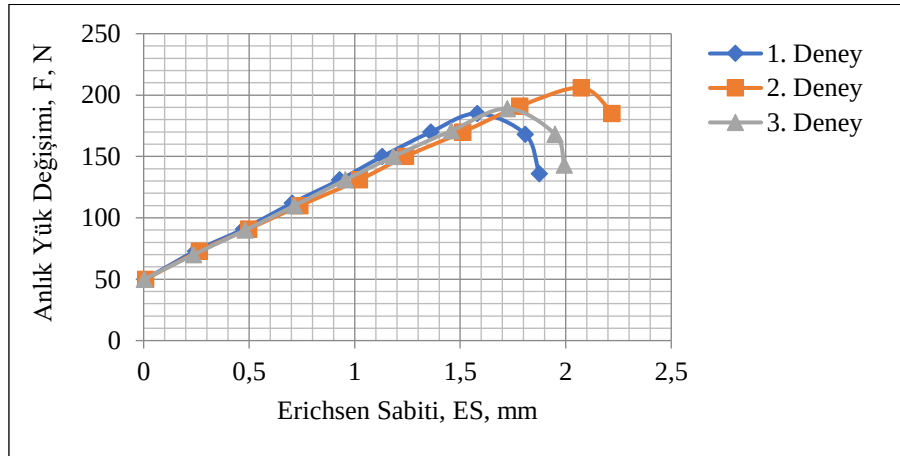
Çizelge 5.8. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x7,5 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0073	50	0,0093	50	0,0033	50
0,2458	73	0,2643	73	0,2368	70
0,4739	91	0,4985	91	0,4815	90
0,7041	112	0,7412	110	0,7153	110
0,9293	131	1,0224	131	0,9568	131
1,1307	150	1,2417	150	1,1845	150
1,3618	170	1,5137	170	1,4584	171
1,5812	185	1,7824	191	1,7233	189
1,8088	168	2,0736	206	1,9497	168
1,8749	136	2,2201	185	1,9938	143

Ort. En Büyük Yük, $F=193,33$ N

En Büyük Ortalama Erichsen Sabiti; $ES_{21}=1,7927$ mm

Gerek Çizelge 5.8 değerleri ve gerekse Şekil 5.7’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 1,5 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 193,33 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 5 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 1,79 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.7. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x7,5 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

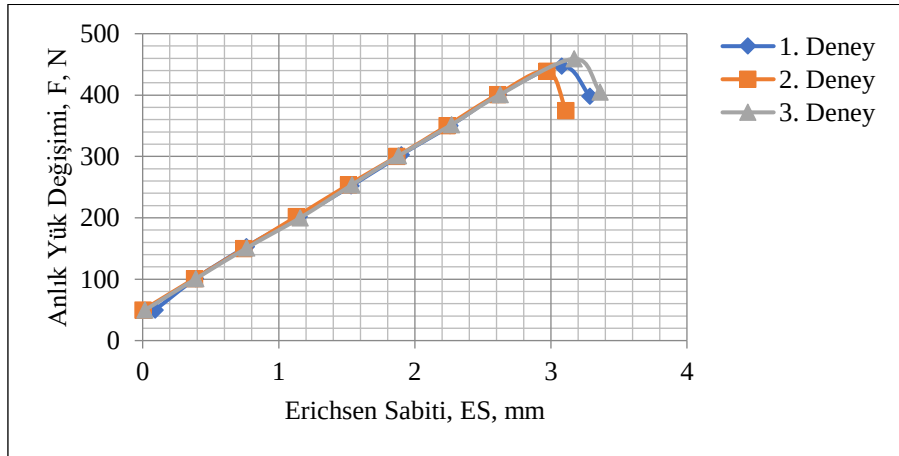
Çizelge 5.9. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x15 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0919	50	0,004	50	0,0186	50
0,3892	101	0,3816	101	0,3927	101
0,7623	153	0,7448	150	0,7655	151
1,1527	202	1,1302	202	1,1575	200
1,5335	252	1,5133	254	1,5394	254
1,9015	303	1,8689	300	1,8803	301
2,2606	350	2,2374	350	2,272	352
2,6176	401	2,6095	401	2,6278	401
3,081	447	2,9729	439	3,1729	459
3,2886	398	3,1121	375	3,3623	405

Ortalama En Büyük Yük, $F=448,33$ N

En Büyük Ortalama Erichsen Sabiti; $ES_{21}=3,075$ mm

Gerek Çizelge 5.9 değerleri ve gerekse Şekil 5.8’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2,97 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 448,3 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 5 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 3,07 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.8. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x15 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

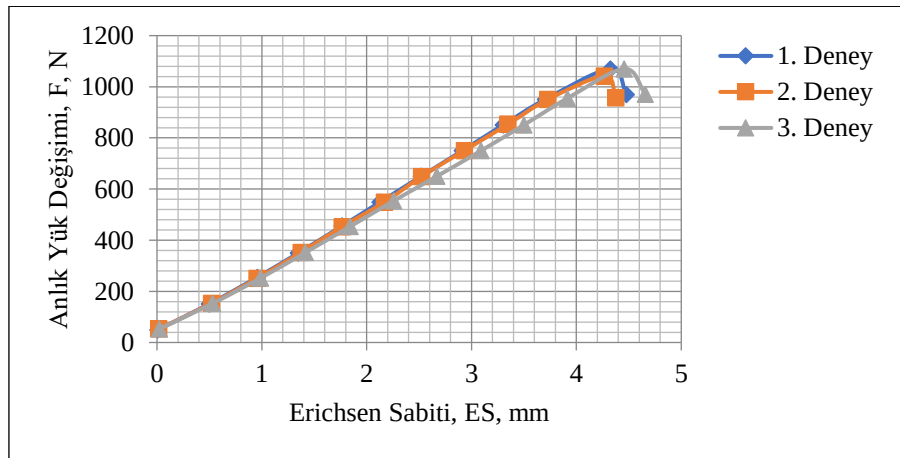
Çizelge 5.10. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x30 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0084	50	0,0191	53	0,0225	53
0,5008	151	0,5224	154	0,5312	153
0,9568	255	0,9546	251	0,9876	252
1,348	350	1,375	353	1,4163	352
1,7664	456	1,7658	453	1,8441	454
2,1265	549	2,1702	549	2,2574	554
2,5204	650	2,5233	649	2,6694	650
2,9113	750	2,9332	751	3,0906	750
3,3029	851	3,3498	854	3,5002	851
3,7051	951	3,7297	951	3,9148	955
4,3256	1070	4,2668	1042	4,4568	1070
4,4768	969	4,3761	957	4,6585	971

Ortalama En Büyük Yük, $F=1061,33$ N

En Büyük Ortalama Erichsen Sabiti; $ES_{21}=4,349$ mm

Gerek Çizelge 5.10 değerleri ve gerekse Şekil 5.9’da verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 4 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 1061,3 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 5 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 4,34 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.9. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x30 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

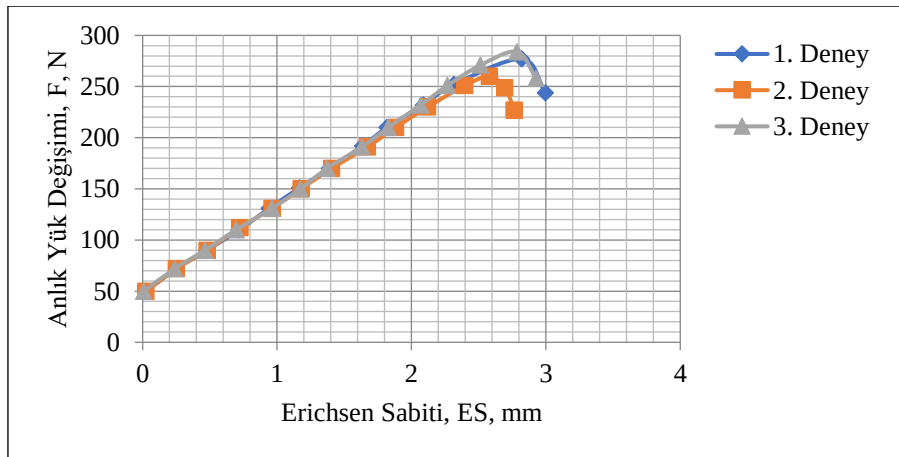
Çizelge 5.11. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x10 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0256	50	0,0249	50	0,0083	50
0,2517	72	0,2525	72	0,2391	72
0,4786	90	0,4802	90	0,4643	90
0,7191	110	0,7255	112	0,696	110
0,9429	131	0,9628	131	0,9626	131
1,1674	151	1,1791	150	1,174	150
1,3894	170	1,4064	170	1,3722	170
1,6377	192	1,6726	191	1,6316	191
1,8178	210	1,8816	210	1,8272	210
2,0891	232	2,1215	230	2,07	232
2,3166	252	2,3961	251	2,2682	251
2,8205	277	2,5796	260	2,5147	271
2,9968	244	2,696	249	2,7853	284

Ortalama En Büyük Yük, $F=273,6$ N

En Büyük Ortalama Erichsen Sabiti; $ES_{27}=2,72$ mm

Gerek Çizelge 5.11 değerleri ve gerekse Şekil 5.10’da verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2,50 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 273,6 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 5 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,72 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.10. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x10 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

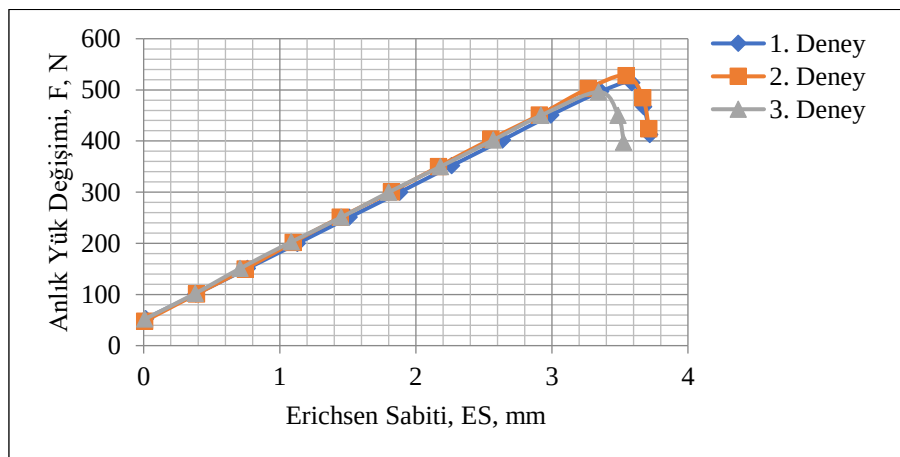
Çizelge 5.12. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x20 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0164	53	0,009	48	0,0091	52
0,3857	101	0,3898	101	0,3791	102
0,7639	151	0,7466	150	0,7097	151
1,1314	200	1,0987	202	1,0861	203
1,5126	251	1,4449	251	1,4533	251
1,8826	300	1,8224	301	1,8019	300
2,2654	352	2,1669	350	2,1817	350
2,6384	402	2,5542	404	2,5694	402
2,9944	451	2,9087	451	2,9211	450
3,3616	497	3,2679	503	3,3448	496
3,5883	514	3,5452	528	3,4873	450
3,6754	467	3,6692	485	3,5279	398
3,7199	413	3,7126	424		

Ortalama En Büyük Yük, $F=512,66$ N

En Büyük Ortalama Erichsen Sabiti; $ES_{27}=3,49$ mm

Gerek Çizelge 5.12 değerleri ve gerekse Şekil 5.11’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 3,00 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 512,6 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 5 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 3,48 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.11. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x20 mm olan testleri yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

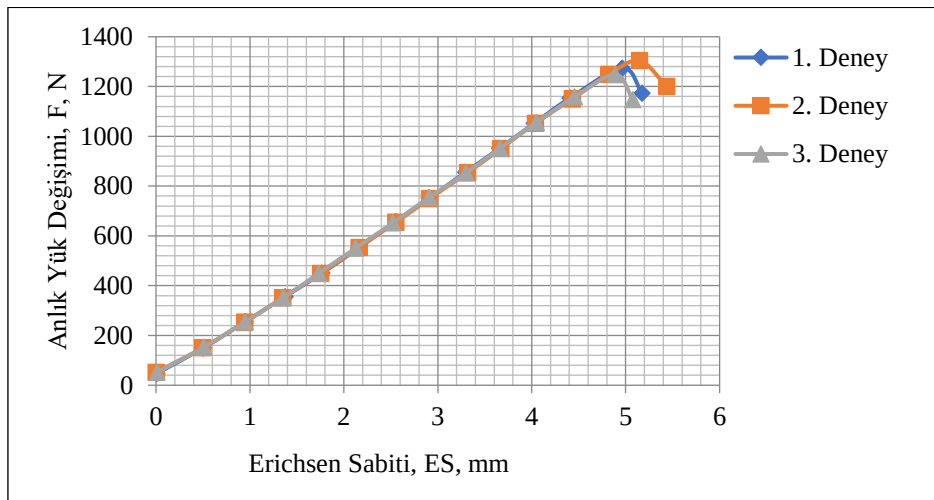
Çizelge 5.13. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika, 90x40 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0093	48	0,0027	52	0,0126	52
0,5048	150	0,5008	151	0,5106	153
0,9499	255	0,9456	254	0,9514	255
1,3746	356	1,3527	352	1,356	352
1,7686	451	1,7553	450	1,734	450
2,1594	552	2,1618	554	2,1253	551
2,5508	658	2,5553	655	2,5227	652
2,9108	753	2,9128	750	2,9099	755
3,298	856	3,3182	854	3,3022	853
3,6577	952	3,6745	951	3,6626	952
4,0264	1052	4,0412	1053	4,0506	1056
4,4085	1154	4,4322	1150	4,4581	1159
4,9642	1274	4,8204	1249	4,8906	1248
5,1766	1173	5,1488	1304	5,0768	1148

Ortalama En Büyük Yük, $F=1275,33$ N

En Büyük Ortalama Erichsen Sabiti; $ES_{27}=5,0012$ mm

Gerek Çizelge 5.13 değerleri ve gerekse Şekil 5.12’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 4,50 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 1275,3 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 5 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 5,00 mm olduğu tespit edilmiştir.



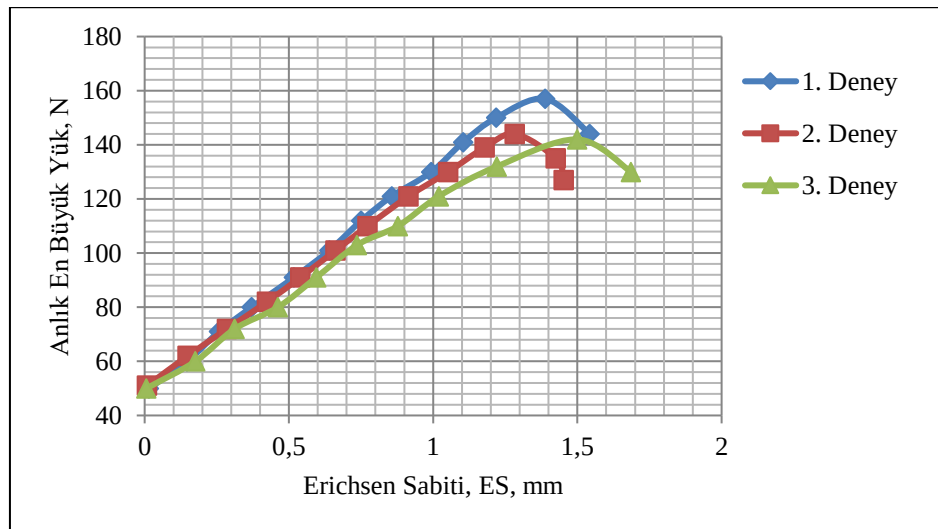
Şekil 5.12. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 5 mm/dakika ve numune boyutu 90x40 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

arklı zımba çaplarında ve 5 mm/dakika, zımba ilerleme hızında yapılan Erichsen testlerinin grafik sonuçları; tasarımı ve imalatı yapılan donanımın güvenilirliğinin yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Şekillerde grafik değerleri verilen yük değişimlerinin oluşturduğu eğrilerin birbirine çok yakın eğimde eğriler türetmesi ve eğimlerinin birbirlerine çok yakın değerler taşıması bu kararı güçlendirecek bulgular olarak yorumlanmıştır. 5 mm/dakika zımba hızında, üç farklı zımba çapında, yük-Erichsen Sabiti ilişkileri ve değerlendirmeleri verilen deneyler tamamlandıktan sonra cihazın dijital panelinden, zımba hızı 6,25 mm/dakika değerine ayarlanmış ve aynı numunelerle ve aynı zımba çaplarında Erichsen testleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.14 ila Çizelge 5.22 ve Şekil 5.13 ila Şekil 5.21).

Çizelge 5.14. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika, 90x4 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0151	50	0,0085	51	0,0059	50
0,2576	71	0,286	72	0,3123	72
0,5179	91	0,5396	91	0,5951	91
0,7511	112	0,7725	110	0,8783	110
0,9942	130	1,0521	130	1,2208	132
1,1044	141	1,1786	139	1,4999	142
1,2187	150	1,2837	144	1,6859	130
1,3885	157	1,4258	135		

Ortalama En Büyük Yük, $F=147,66$ N
Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{11}=1,3907$ mm



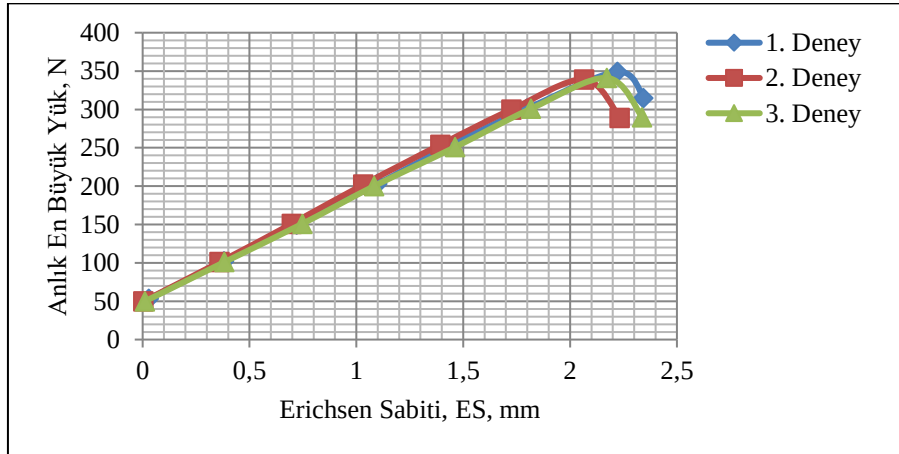
Şekil 5.13. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x4 mm olan testlerin yük - Erichsen sabiti değişimi ilişkisi

Gerek Çizelge 5.14 değerleri ve gerekse Şekil 5.13’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 1 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 147,6 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 1,3 mm olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.15. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika, 90x8 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0285	53	0,0039	50	0,0116	50
0,3818	102	0,3608	101	0,3825	101
0,7217	150	0,6981	151	0,7478	151
1,0992	203	1,0326	202	1,083	200
1,4335	252	1,393	254	1,4632	251
1,7981	301	1,7268	300	1,8175	301
2,2219	349	2,0664	339	2,1731	341
2,344	315	2,2328	289	2,3372	290

Ortalama En Büyük Yük, $F=343$ N
Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{11}=2,1538$ mm



Şekil 5.14. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x8 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Gerek Çizelge 5.15 değerleri ve gerekse Şekil 5.14’te verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 343 N olarak en büyük ortalama

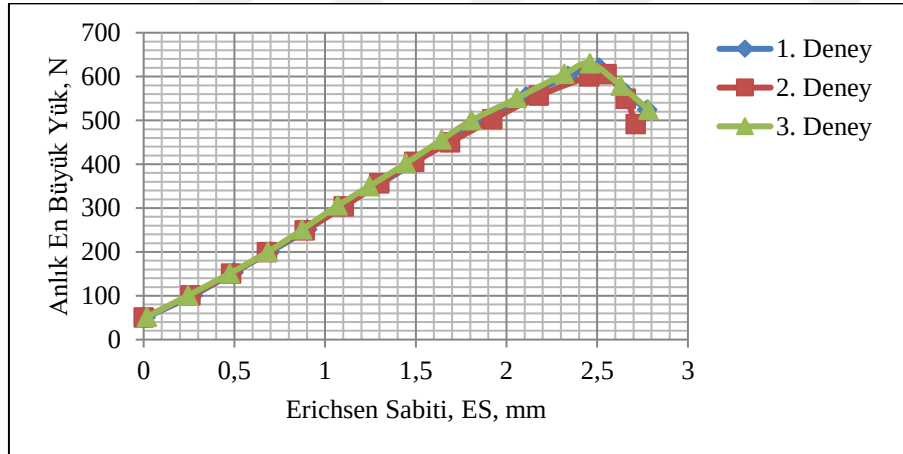
yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,15 mm olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.16. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika, 90x16 mm deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0114	50	0,0016	50	0,0186	52
0,4961	153	0,4821	150	0,4747	151
0,6969	200	0,6794	199	0,6847	200
1,095	303	1,1044	304	1,0709	306
1,486	402	1,4917	405	1,446	402
1,8882	503	1,9222	502	1,807	500
2,3382	601	2,4564	600	2,3188	606
2,5118	620	2,5517	605	2,4603	630
2,6538	563	2,6578	549	2,6296	579

Ortalama En Büyük Yük, $F = 618,33$ N

Ortalama Erichsen sabiti, $ES_{11} = 2,5079$ mm



Şekil 5.15. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x16 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

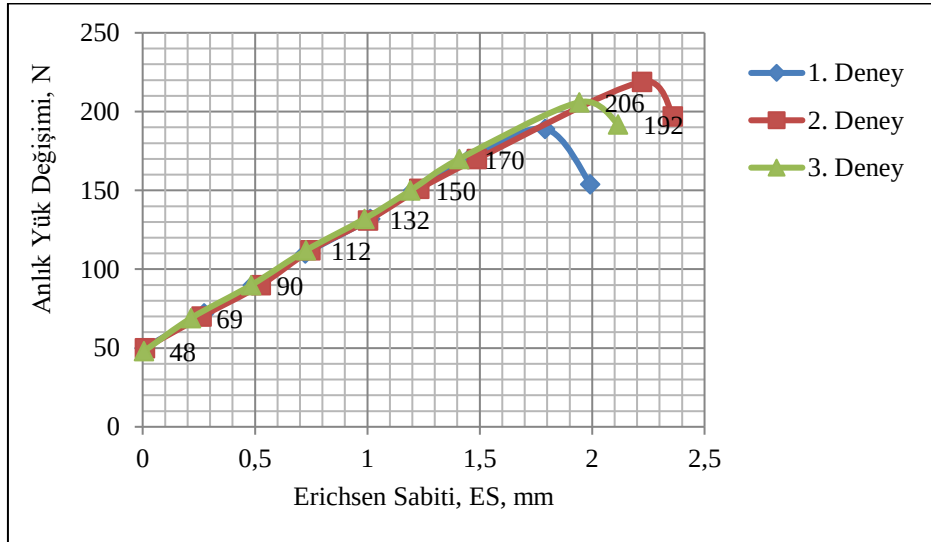
Gerek Çizelge 5.16 değerleri ve gerekse Şekil 5.15'te verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 618,3 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,50 mm olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.17. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika, 90x7,5 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0089	50	0,0108	50	0,0064	48
0,2741	72	0,2629	70	0,2158	69
0,4901	90	0,5258	90	0,4841	90
0,7244	110	0,7474	112	0,7268	112
1,0129	132	1,0037	131	0,9871	132
1,2047	150	1,2316	151	1,192	150
1,4514	170	1,4876	170	1,4091	170
1,7909	189	2,2219	219	1,9436	206
1,9923	154	2,359	197	2,1161	192

Ortalama En Büyük Yük, $F = 204,66$ N
Ortalama Erichsen sabiti, $ES_{21} = 1,98$ mm

Gerek Çizelge 5.17 değerleri ve gerekse Şekil 5.16’da verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 1,5 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 204,6 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 1,98 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.16. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x7,5 mm olan testlerin yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

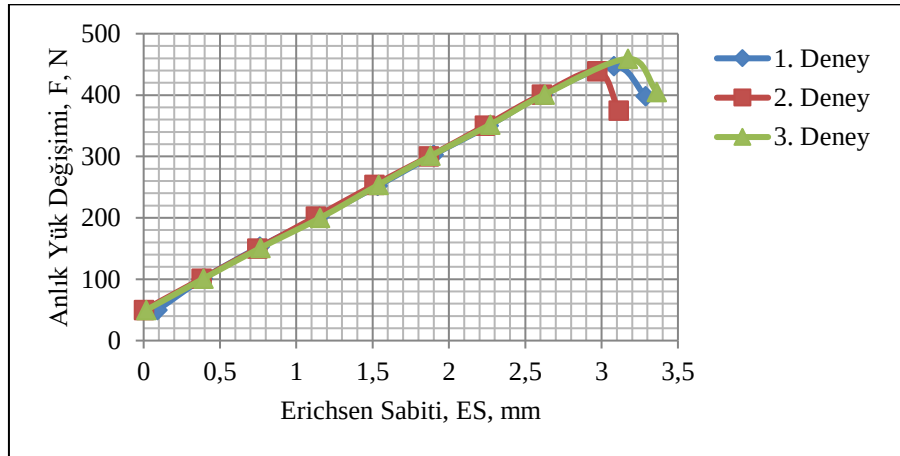
Çizelge 5.18. Zımba çapı 15 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dakika, 90x15 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0919	50	0,004	50	0,0186	50
0,3892	101	0,3816	101	0,3927	101
0,7623	153	0,7448	150	0,7655	151
1,1527	202	1,1302	202	1,1575	200
1,5335	252	1,5133	254	1,5394	254
1,9015	303	1,8689	300	1,8803	301
2,2606	350	2,2374	350	2,272	352
2,6176	401	2,6095	401	2,6278	401
3,081	447	2,9729	439	3,1729	459
3,2886	398	3,1121	375	3,3623	405

Ortalama En Büyük Yük, $F = 444$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{21} = 3,02$ mm

Gerek Çizelge 5.18 değerleri ve gerekse Şekil 5.17’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2,5 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 444 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 3,02 mm olduğu tespit edilmiştir.



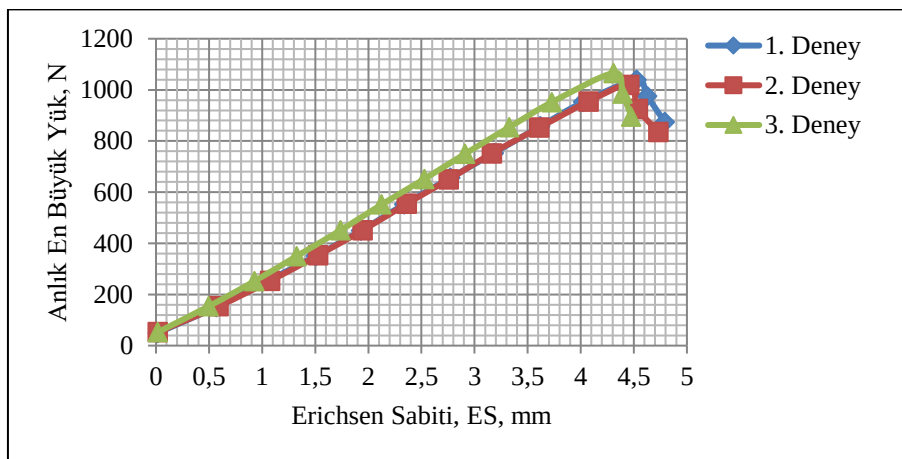
Şekil 5.17. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x15 mm olan testlerin yük- Erichsen sabiti değişimi ilişkisi

Çizelge 5.19. Zımba çapı 15 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dakika, 90x30 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0189	50	0,0181	53	0,0186	53
0,5678	151	0,5894	154	0,4979	154
1,0529	254	1,0745	253	0,9273	252
1,5066	351	1,5276	354	1,3257	350
1,9325	450	1,948	451	1,7377	451
2,3395	553	2,3621	555	2,1257	552
2,7728	656	2,7582	650	2,5284	652
3,1815	753	3,1641	752	2,9108	750
3,6203	858	3,6121	853	3,3269	854
4,0252	953	4,0746	955	3,7289	952
4,5262	1039	4,4569	1020	4,3113	1066
4,6256	976	4,5386	926	4,3947	986
4,7914	874	4,7308	835	4,4772	895

Ortalama En Büyük Yük, $F=1041,66$ N
Ortalama Erichsen sabiti, $ES_{21}=4,4314$ mm

Gerek Çizelge 5.19 değerleri ve gerekse Şekil 5.18’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 4 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 1041,6 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 4,4 mm olduğu tespit edilmiştir.



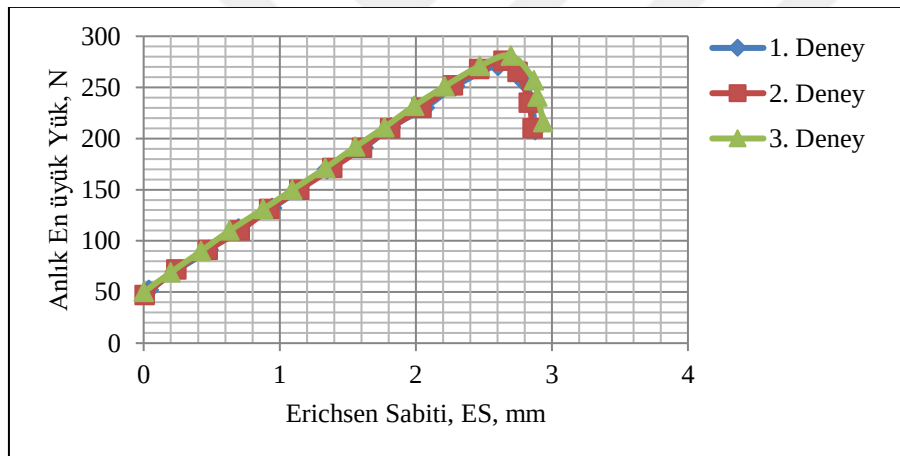
Şekil 5.18. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x30 mm olan testlerin yük- Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Çizelge 5.20. Zımba çapı 20 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dakika, 90x10 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0386	52	0,0084	47	0,0021	50
0,479	91	0,4711	91	0,4228	90
0,944	132	0,924	131	0,8788	131
1,3503	170	1,3862	171	1,3348	171
1,8163	211	1,8118	210	1,7695	211
2,29	251	2,2728	252	2,2122	251
2,6064	271	2,4659	268	2,4716	271
2,7989	255	2,6448	276	2,6999	281
2,8542	233	2,7499	265	2,8689	257

Ortalama En Büyük Yük, $F=276$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27}=2,6503$ mm



Şekil 5.19. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x10 mm olan testlerin yük- Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Gerek Çizelge 5.20 değerleri ve gerekse Şekil 5.19'de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 276 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,65 mm olduğu tespit edilmiştir.

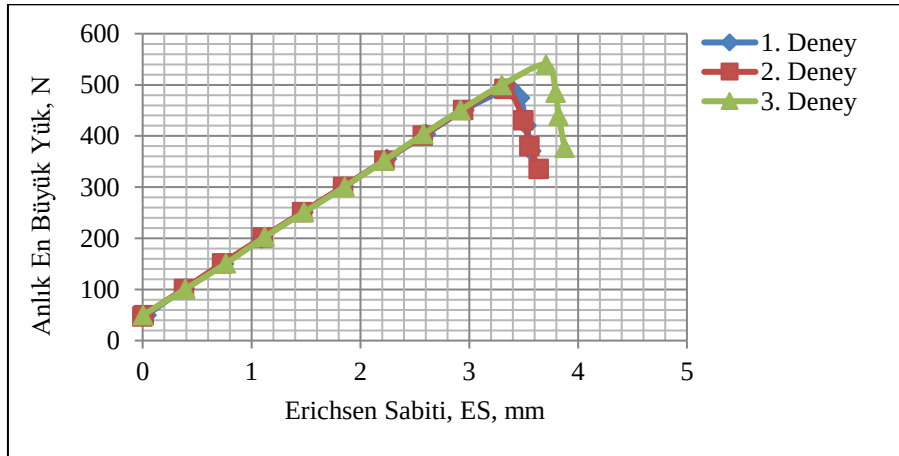
Çizelge 5.21. Zımba çapı 20 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dakika, 90x20 mm deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0372	50	0	47	0,005	50
0,7494	150	0,3805	101	0,7665	151
1,0935	200	0,7298	151	1,123	203
1,4783	251	1,1042	202	1,4846	251
1,8492	301	1,4665	251	1,8571	301
2,956	451	2,5751	401	2,9224	451
3,3811	494	2,9455	451	3,3001	500
3,4673	475	3,3251	492	3,7068	540
3,5264	421	3,4983	431	3,7936	485
3,5716	371	3,5536	380	3,8212	439

Ortalama En Büyük Yük, $F=508,66$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27}=3,471$ mm

Gerek Çizelge 5.21 değerleri ve gerekse Şekil 5.20’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 3 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 508 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 3,47 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.20. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x20 mm olan testlerin yük-Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

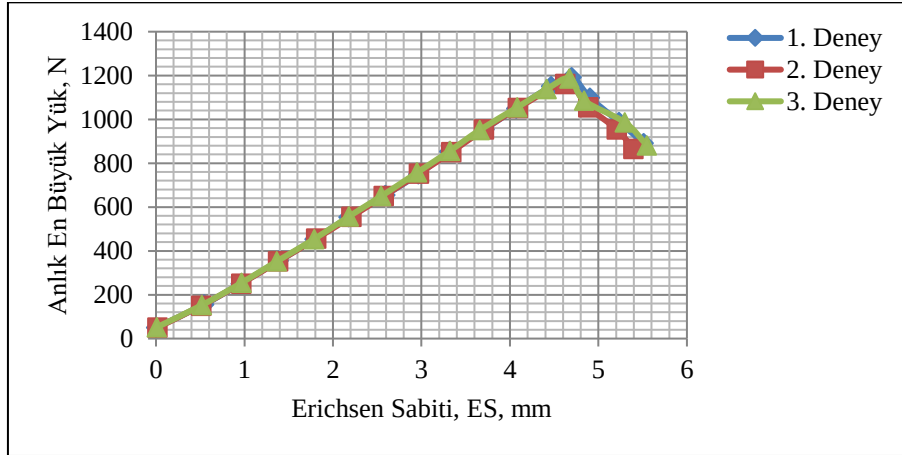
Çizelge 5.22. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika, 90x40 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0015	50	0,017	50	0,0098	52
1,7954	454	1,8117	456	1,7883	454
2,176	554	2,2087	556	2,1801	557
2,5923	655	2,5744	650	2,5471	650
3,7127	955	3,7056	954	3,6606	952
4,0709	1050	4,092	1052	4,0834	1055
4,4658	1151	4,6262	1162	4,4162	1138
4,6983	1192	4,8863	1055	4,6731	1187
4,9039	1099	5,2078	954	4,8383	1086

Ortalama En Büyük Yük, $F=1180,33$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27}=4,6658$ mm

Gerek Çizelge 5.22 değerleri ve gerekse Şekil 5.21’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 4 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 1180 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 4,66 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.21. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune boyutu 90x40 mm olan testlerin yük-Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

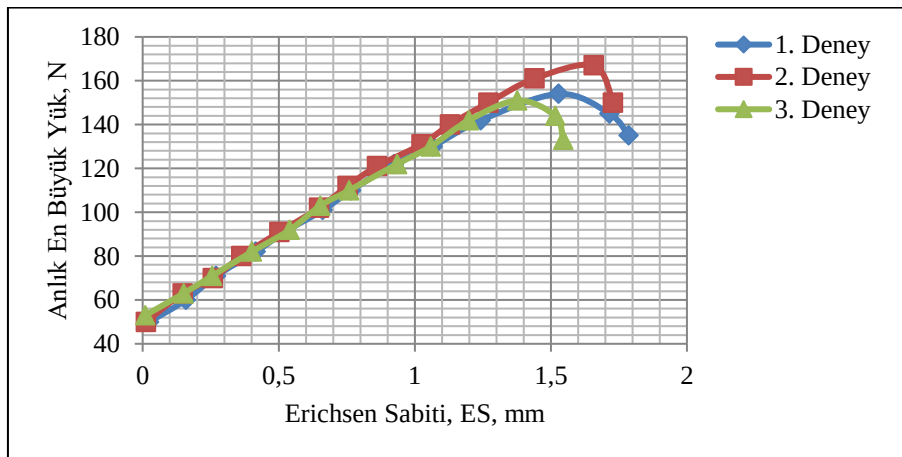
Farklı zımba çaplarında ve 6,25 mm/dakika, zımba ilerleme hızında yapılan Erichsen testlerinin grafik sonuçları; tasarımı ve imalatı yapılan donanımın güvenilirliğinin yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Şekillerde grafik değerleri verilen yük değişimlerinin oluşturduğu eğrilerin birbirine çok yakın eğimde eğriler türetmesi ve eğimlerinin birbirlerine

çok yakın değerler taşıması bu kararı güçlendirecek bulgular olarak yorumlanmıştır. 6,25 mm/dakika zımba hızında, üç farklı zımba çapında, yük-Erichsen Sabiti ilişkileri ve değerlendirmeleri verilen deneyler tamamlandıktan sonra cihazın dijital panelinden, zımba hızı 8 mm/dakika değerine ayarlanmış ve aynı numunelerle ve aynı zımba çaplarında Erichsen testleri gerçekleştirilmiştir (Çizelge 5.23 ila Çizelge 5.32 ve Şekil 5.22 ila Şekil 5.31).

Çizelge 5.23. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x4 mm deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0247	50	0,0121	50	0,0099	53
0,2701	71	0,2582	70	0,2555	71
0,5221	91	0,503	91	0,5407	92
0,7669	110	0,7534	112	0,7588	110
1,0658	130	1,0247	131	1,059	130
1,5289	154	1,2706	150	1,3768	151
1,7155	145	1,4402	161	1,5162	144
1,786	135	1,6581	167	1,5464	133

Ortalama En Büyük Yük, $F=157,33$ N
Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{11}=1,5212$ mm



Şekil 5.22. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x4 mm olan testlerin yük- Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Gerek Çizelge 5.23 değerleri ve gerekse Şekil 5.22'de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 1 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 157,3 N olarak en büyük

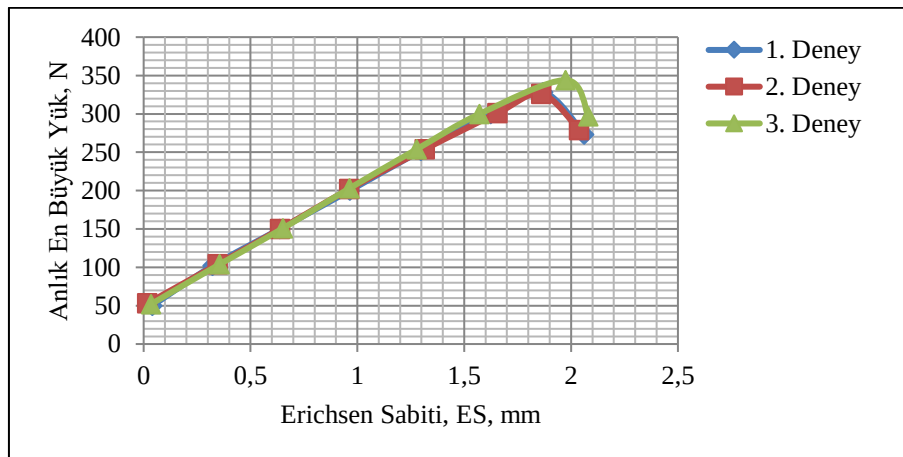
ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 8 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 1,52 mm olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.24. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x8 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,041	50	0,0174	53	0,0347	52
0,3225	102	0,3461	104	0,3557	104
0,6373	150	0,6387	150	0,6529	151
0,9651	200	0,962	202	0,9634	203
1,2981	252	1,3165	254	1,2783	254
1,6242	300	1,6555	301	1,5725	300
1,87	328	1,8613	326	1,9748	344
2,0621	273	2,0374	279	2,0808	297

Ortalama En Büyük Yük, $F=332,66$ N
Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{11}=1,9020$ mm

Gerek Çizelge 5.24 değerleri ve gerekse Şekil 5.23'te verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 1,5 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 332,6 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 8 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 1,90 mm olduğu tespit edilmiştir.

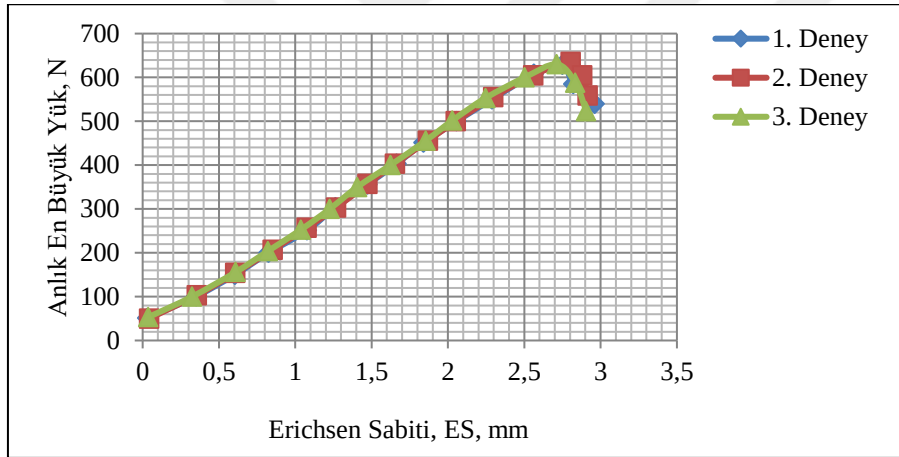


Şekil 5.23. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x8 mm olan testlerin yük-Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Çizelge 5.25. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x16 mm deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0295	51	0,0421	50	0,036	53
0,604	150	0,6079	154	0,6098	156
1,0769	251	1,0757	257	1,0379	253
1,4727	356	1,4727	357	1,4057	350
1,8392	451	1,8699	456	1,8556	456
2,2884	550	2,2973	555	2,2462	553
2,5642	608	2,5591	605	2,5021	600
2,7503	629	2,8046	635	2,7122	630
2,8211	585	2,881	605	2,8344	588
2,9629	540	2,9157	559	2,9057	523

Ortalama En Büyük Yük, $F = 631,33$ N
Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{11} = 2,7557$ mm



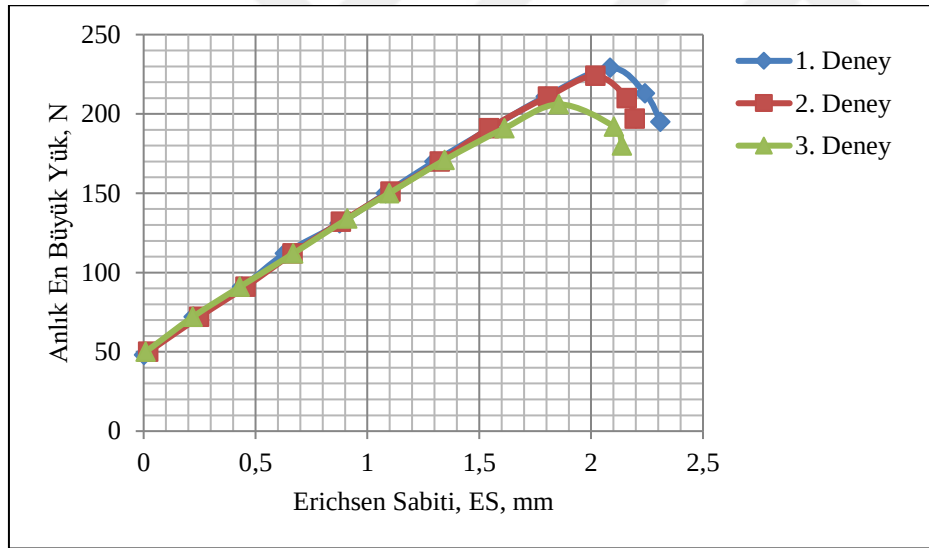
Şekil 5.24. Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x16 mm olan testlerin yük-Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Gerek Çizelge 5.25 değerleri ve gerekse Şekil 5.24'te verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2,5 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 631,3 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 8 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,75 mm olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.26. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x7,5 mm deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0023	48	0,0213	50	0,0093	50
0,2239	72	0,2487	72	0,2198	72
0,4404	91	0,4558	91	0,4305	91
0,6318	112	0,6666	112	0,6691	112
0,877	131	0,8817	132	0,911	134
1,0821	150	1,1031	151	1,0976	150
1,3002	170	1,3243	170	1,3458	171
1,5499	191	1,545	191	1,6136	191
1,7982	211	1,8074	211	1,856	206
2,0846	229	2,019	224	2,1021	192
2,2408	213	2,1599	210	2,1376	180

Ortalama En Büyük Yük, $F=219,66$ N
Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{21}=1,9865$ mm



Şekil 5.25. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x7,5 mm olan testlerin yük-Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Gerek Çizelge 5.26 değerleri ve gerekse Şekil 5.25'te verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 1,5 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 219,6 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 8 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 1,98 mm olduğu tespit edilmiştir.

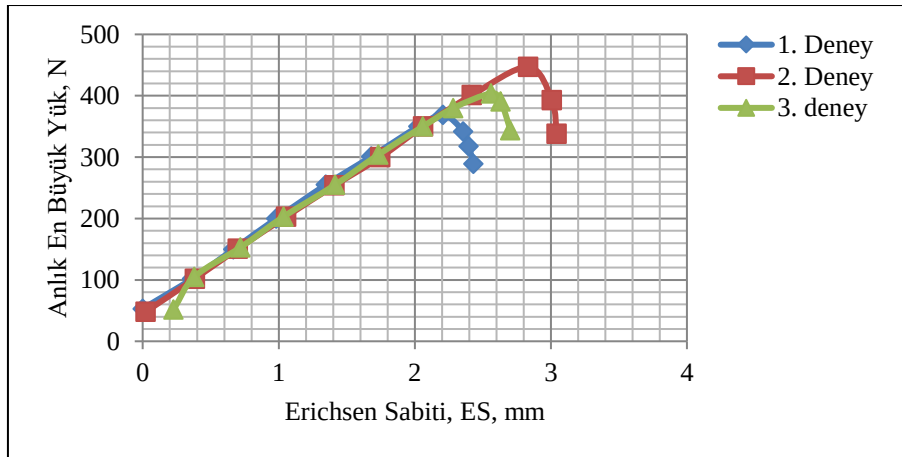
Çizelge 5.27. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x15 mm deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0007	53	0,0221	48	0,228	52
0,3645	102	0,3836	102	0,3809	105
0,6679	150	0,7009	151	0,7189	153
0,9833	200	1,0542	203	1,0358	203
1,3466	255	1,4106	254	1,4149	255
1,681	301	1,7478	300	1,7319	304
2,0276	350	2,0613	350	2,0602	350
2,2088	369	2,4195	401	2,2821	380
2,3551	342	2,8335	447	2,5614	404
2,396	318	3,0069	393	2,6315	391
2,4312	289	3,0423	338	2,7028	344

Ortalama En Büyük Yük, $F=406,66$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{21}=2,5345$ mm

Gerek Çizelge 5.27 değerleri ve gerekse Şekil 5.26’da verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2,00 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 406,6 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 8 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,53 mm olduğu tespit edilmiştir.



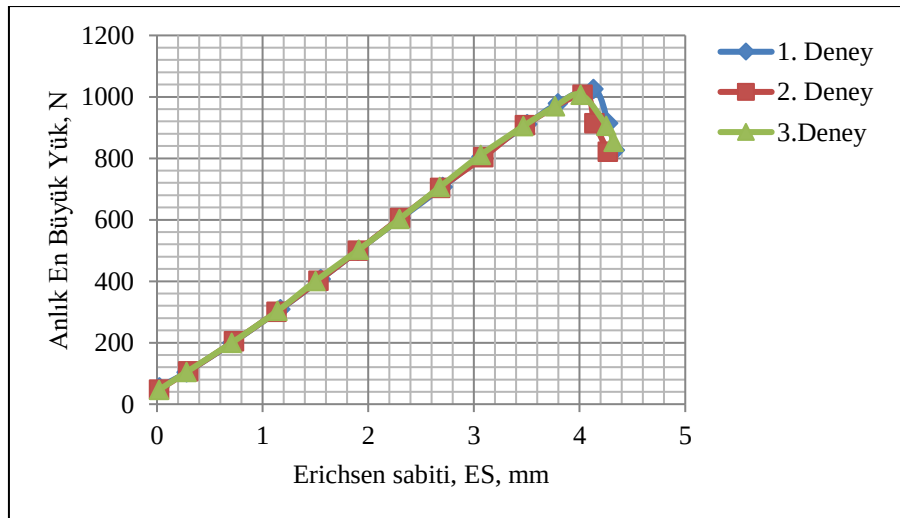
Şekil 5.26. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x15 mm olan testlerin yük-Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Çizelge 5.28. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x30 mm deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0229	55	0,0201	48	0,0211	47
0,2801	104	0,2967	107	0,2801	105
0,7144	200	0,7311	205	0,7079	200
1,1692	309	1,1327	301	1,1428	304
1,5511	407	1,5298	402	1,501	401
1,9028	500	1,9028	500	1,9108	503
2,3075	605	2,3007	606	2,296	603
2,7047	707	2,6803	704	2,6774	707
3,0714	805	3,0897	804	3,0644	811
3,5034	911	3,4845	908	3,4682	905
3,7945	979	4,0302	1007	3,7671	969
4,1316	1026	4,1419	914	4,0119	1007
4,2704	914	4,2691	822	4,253	906

Ortalama En Büyük Yük, $F=1013,33$ N
Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27}=4,0579$ mm

Gerek Çizelge 5.28 değerleri ve gerekse Şekil 5.27’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 4,00 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 1013,3 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 8 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 4,05 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.27. Zımba çapı 15 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x30 mm olan testlerin yük-Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

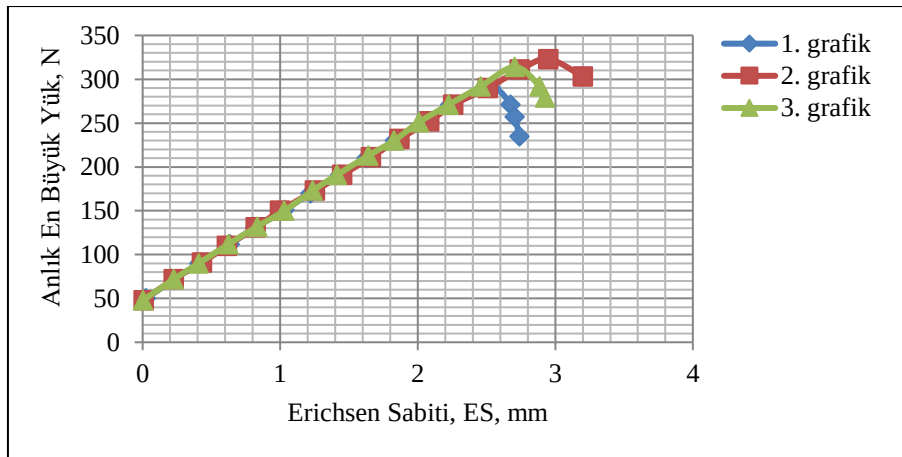
Çizelge 5.29. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x10 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0242	50	0,0081	48	0,0041	48
0,4121	90	0,4323	91	0,4075	90
0,8208	131	0,8229	131	0,8335	132
1,0332	151	0,9998	150	1,03	150
1,4364	191	1,4507	191	1,4138	191
1,629	210	1,6607	211	1,6409	213
1,8357	230	1,8671	232	1,8273	230
2,0574	252	2,0842	252	2,0084	251
2,2371	271	2,259	271	2,2257	271
2,5336	290	2,5109	290	2,4589	292
2,6751	271	2,7431	311	2,7055	314
2,7053	257	2,9491	323	2,886	292
2,7399	235	3,2017	303	2,9269	279

Ortalama En Büyük Yük, $F=309$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27}=2,7294$ mm

Gerek Çizelge 5.29 değerleri ve gerekse Şekil 5.28’de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2,00 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 309 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 8 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,72 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.28. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x10 mm olan testlerin yük-Erichsen sabiti değişimi ilişkisi

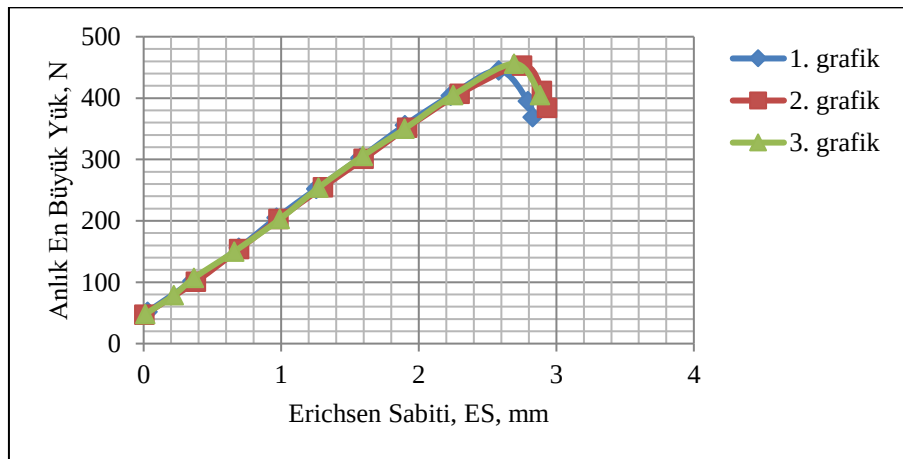
Çizelge 5.30. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x20 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2.Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,029	52	0,0051	47	0,0133	48
0,3561	102	0,38	101	0,2206	79
0,693	156	0,6951	154	0,3671	107
0,9675	205	0,9818	203	0,6592	150
1,2552	252	1,3036	255	0,9914	203
1,5766	303	1,6005	301	1,2715	254
1,9006	356	1,9174	352	1,595	306
2,233	404	2,2981	407	1,8982	350
2,5816	445	2,7514	453	2,2512	405
2,7943	395	2,8972	412	2,6948	456
2,8296	369	2,9325	384	2,8823	405

Ortalama En Büyük Yük, $F=451,333$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27}=2,6759$ mm

Gerek Çizelge 5.30 değerleri ve gerekse Şekil 5.29’da verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2,50 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 451,3 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 8 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 2,67 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.29. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x20 mm olan testlerin yük-Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

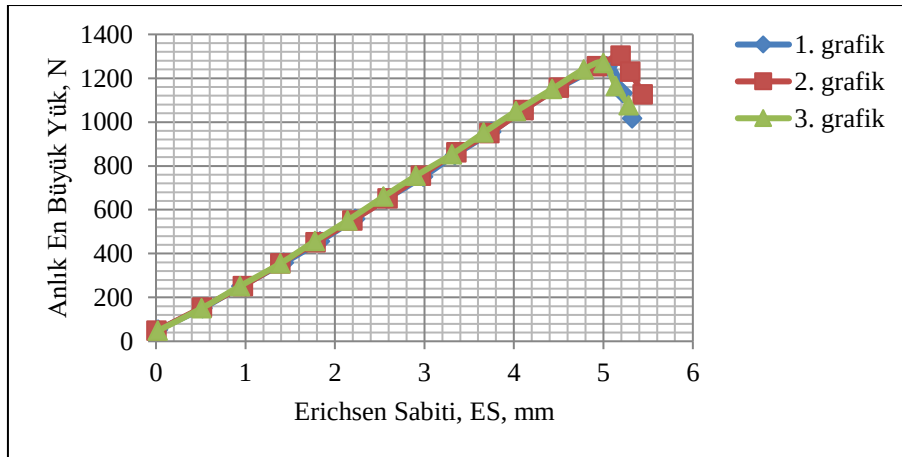
Çizelge 5.31. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika, 90x40 mm olan deneylerde elde edilen veriler

1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Zımba Dalma Derinliği, h_1 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_1 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_2 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_2 , N	Zımba Dalma Derinliği, h_3 , mm	Anlık Yük Değişimi, F_3 , N
0,0252	53	0,007	48	0,0213	48
0,9563	252	0,9712	252	0,9404	252
1,4311	358	1,3922	355	1,3896	355
1,8356	456	1,7851	451	1,7779	458
2,9871	751	2,9625	756	2,9056	755
3,7501	955	3,7274	949	3,6644	952
4,107	1055	4,109	1055	4,024	1050
4,4991	1154	4,5032	1157	4,4294	1151
5,048	1254	4,9288	1255	4,7822	1241
5,2186	1133	5,1954	1303	5,0002	1269
5,3227	1017	5,3009	1230	5,1396	1164

Ortalama En Büyük Yük, $F=1275,3$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27}=5,08$ mm

Gerek Çizelge 5.31 değerleri ve gerekse Şekil 5.30’da verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 5,00 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 1275,3 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 8 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 5,08 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.30. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve numune boyutu 90x40 mm olan testlerin yük-Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Farklı zımba çaplarında ve 5 mm/dakika, 6,25 mm /dakika ve 8 mm/dakika, zımba ilerleme hızında yapılan Erichsen testlerinin grafik sonuçları; tasarımı ve imalatı yapılan donanımın güvenilirliğinin ve tekrarlanabilirlik kabiliyetinin yüksek olduğunu ispat etmiştir.

Her üç değişik zımba çaplarında ve zımba hızlarında uygulanan Erichsen deneylerinde elde edilen verilerden oluşturulan şekillerde, grafik değerleri verilen yük değişimlerinin oluşturduğu eğrilerin birbirine çok yakın eğimde eğriler türetmesi ve eğimlerinin birbirlerine çok yakın değerler taşıması bu kararı güçlendirecek bulgular olarak yorumlanmıştır. Diğer taraftan literatürde yapılan çoğu çalışmada [25, 28, 30]; yük – zımba derinliği (ES) değişimlerinin, zımba ilerleme miktarı arttıkça yük değerinin de arttığı, numune malzemesinin en büyük çekme dayanımı sınırı aşılar aşılmaz deneyin bitirildiğini gösteren benzer grafiklerin elde edilmiş olduğu tespit edilmiştir.

5.2.2. Zımba hızı ile ortalama en büyük yük değişim ilişkisinin incelenmesi

Çizelge 5.32'deki veriler ve Şekil 5.31'de verilen grafik incelendiğinde, 8 mm küre çaplı zımba ile 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında, Çizelge 5.34'te genişlik ölçüleri verilmiş olan numunelerin testlerinden elde edilen ortalama en büyük yük, 413 N iken, aynı genişlikte olan numunelere 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızında uygulanan testlerde bu değer 1 N artışla 414 N olmuş ve yine aynı genişlikteki numuneler için 8 mm/dakika zımba ilerleme hızında ise en düşük zımba ilerleme hızından elde edilen değere nazaran 11 N azalma göstererek ortalama en büyük 402 N olmuştur.

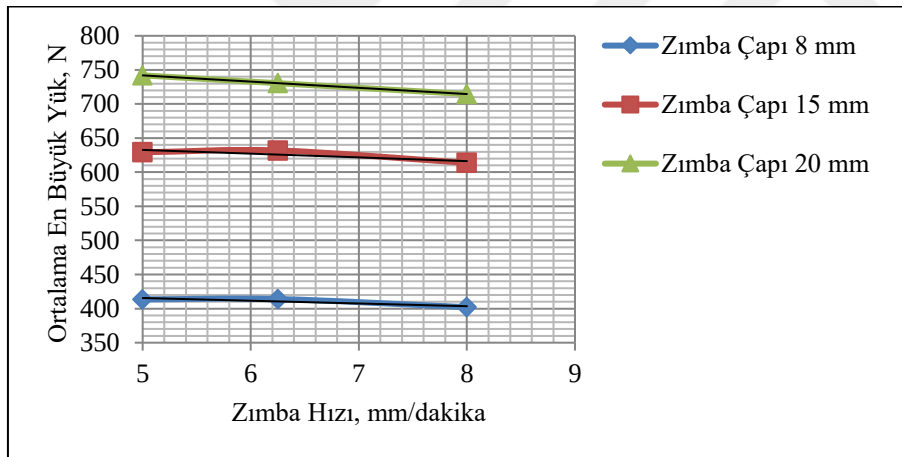
Çizelge 5.32. Zımba çapına bağlı olarak zımba hızı ile ortalama en büyük yük ilişkisi verileri

Ortalama En Büyük Yük, N	Hız, mm/dak	Zımba Çapı, mm	Ortalama En Büyük Yük, N	Hız, mm/dak	Zımba Çapı, mm	Ortalama En Büyük Yük, N	Hız, mm/dak	Zımba Çapı, mm
413,52	5	8	629,16	5	15	742	5	20
414	6,25	8	631,89	6,25	15	730,52	6,25	20
402,04	8	8	613,69	8	15	714,61	8	20

15 mm küre çaplı zımba ile 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında, Çizelge 5.34'te genişlik ölçüleri verilmiş olan numunelerin testlerinden elde edilen ortalama en büyük yük, 629 N iken, aynı genişlikte olan numunelere 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızında uygulanan testlerde bu değer 2 N artışla 631 N olmuş ve yine aynı genişlikteki numuneler için 8

mm/dakika zımba ilerleme hızında ise en düşük zımba ilerleme hızından elde edilen değere nazaran 18 N azalma göstererek ortalama en büyük 613 N olmuştur. 20 mm küre çaplı zımba ile 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında, Çizelge 5.33'te genişlik ölçüleri verilmiş olan numunelerin testlerinden elde edilen ortalama en büyük yük, 742 N iken, aynı genişlikte olan numunelere 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızında uygulanan testlerde bu değer 12 N azalma ile 730 N olmuş ve yine aynı genişlikteki numuneler için 8 mm/dakika zımba ilerleme hızında ise en düşük zımba ilerleme hızından elde edilen değere nazaran 18 N azalma göstererek ortalama en büyük 714 N olmuştur.

Her üç zımba küre çapı ile yapılan testte, zımba hızının artışının ortalama en büyük yük değişiminde az da olsa azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Sac metal parçaların şekillendirilme hızının yük azalmasına ve güç tüketiminde azalamaya yol açması rutin literatür sonuçlarından [117] biri olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.31. Zımba Çapına Bağlı Olarak Zımba hızı ile Ortalama en büyük yük ilişkisi

5.2.3. Zımba çapına ve zımba hızına bağlı gerilim değişiminin incelenmesi

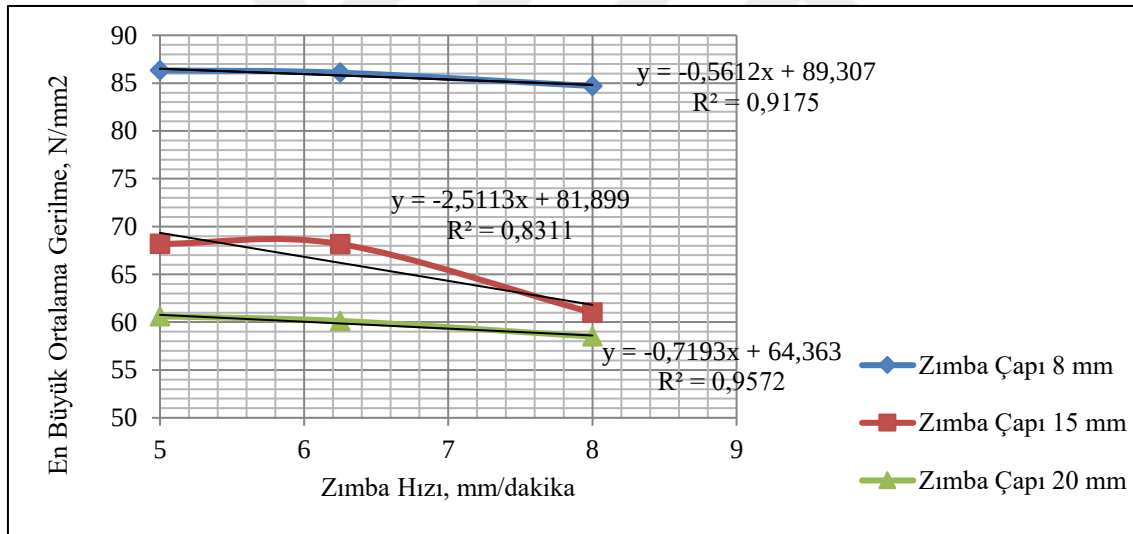
Şekillendirme hızının artmasıyla, şekillendirme ortalama en büyük yükün az da olsa azalması eğilime paralel olarak gerilme değişimleri de incelenmiştir (Çizelge 5.33, Şekil 5.32 ve Çizelge 5.34)

Çizelge 5.33 ve Şekil 5.32'de verilen grafik incelendiğinde 8 mm zımba küre çapı ile 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında Çizelge 5.34'de kesit alan ölçüleri verilen numunelerin ortalama gerilim değeri 86 N/mm^2 olarak gerçekleşirken, zımba ilerleme hızı 6,25

mm/dakika'ya artırılması, gerilimde bir değişime yol açmayarak 86 N/mm² olmuştur. 8 mm/dakika zımba ilerleme hızında numune malzemede gerilim değişimi 2 N/mm² azalarak 84 N/mm² olmuştur.

Çizelge 5.33. Zımba çaplarına göre zımba hızına bağlı olarak numune kesiti ile gerilme değişimi verileri

Zımba Küre Çapı, mm					
Ø8 mm		Ø15 mm		Ø20	
Ortalama Gerilim Değişimi, N/mm ²	Zımba Hızı, mm/dak	Ortalama Gerilim Değişimi, N/mm ²	Zımba Hızı, mm/dak.	Ortalama Gerilim Değişimi, N/mm ²	Zımba Hızı, mm/dak
86,331	5	68,199	5	60,613	5
86,35	6,25	68,165	6,25	60,131	6,25
83,75	8	60,992	8	58,499	8



Şekil 5.32. Zımba çaplarına ve zımba hızı değişimine göre gerilme değişimi ilişkisi

15 mm zımba küre çapı ile 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında Çizelge 5.34'da kesit alan ölçüleri verilen numunelerin ortalama gerilme değeri 68 N/mm² olarak gerçekleşirken, zımba ilerleme hızı 6,25 mm/dakika'ya artırılması, gerilimde bir değişime yol açmayarak 68 N/mm² olmuştur. 8 mm/dakika zımba ilerleme hızında numune malzemede gerilme değişimi 8 N/mm² azalarak 60 N/mm² olmuştur.

20 mm zımba küre çapı ile 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında Çizelge 5.34'de kesit alan ölçüleri verilen numunelerin ortalama gerilme değeri 60 N/mm² gerçekleşirken, zımba

ilerleme hızı 6,25 mm/dakika'ya artırılması, gerilmede bir değişime yol açmayarak 60 N/mm² olmuştur. 8 mm/dakika zımba ilerleme hızında numune malzemede gerilme değişimi 2 N/mm² azalarak 58 N/mm² olmuştur.

Her üç zımba küre çapında, 5 mm/dakika ve 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızlarında numune malzeme gerilme değeri değişmezken 8 mm/dakika hızda bir azalma tespit edilmiştir. Ayrıca zımba küre çapının büyümesi ile numune malzemenin gerilmesinde önemli ölçüde azalma olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.34. Numunelerin kesit alan ölçüleri

Zımba Küre Çapı, mm		
8 mm	15 mm	20 mm
Numune Kesit Alanı, mm ²	Numune Kesit Alanı, mm ²	Numune Kesit Alanı, mm ²
4x0,48 = 1,92 mm ²	7,5x0,48 = 3,6 mm ²	10x0,48 = 4,8 mm ²
6x0,48 = 2,88 mm ²	10x0,48 = 4,8 mm ²	15x0,48 = 7,2 mm ²
8x0,48 = 3,84 mm ²	12,5x0,48 = 6 mm ²	20x 0,48 = 9,6 mm ²
10x0,48 = 4,8 mm ²	15x0,48 = 7,2 mm ²	25x0,48 = 12 mm ²
12x0,48 = 5,76 mm ²	17,5x0,48 = 8,4 mm ²	30x0,48 = 14,4 mm ²
14x0,48 = 6,72 mm ²	20x0,48 = 9,6 mm ²	35x0,48 = 16,8 mm ²
16x0,48 = 7,68 mm ²	22,5x0,48 = 10,8 mm ²	40x0,48 = 19,2 mm ²
Toplam Kesit Alanı = 33,6 mm ²	25x0,48 = 12 mm ²	Toplam kesit alanı = 84 mm ²
	27,5x0,48 = 13,2 mm ²	
	30x0,48 = 14,4 mm ²	
	Toplam kesit alanı = 90 mm ²	

5.2.4. Zımba çapı ve hızına göre EBO yük–numune genişliği ilişkisinin incelenmesi

Zımba çapı sabit tutularak üç değişik zımba ilerleme hızında numunelere uygulanan Erichsen testinde, numune genişliği ile ortalama en büyük yük arasındaki ilişki incelenmiştir. Verilerin değerlendirilmesi sonucu zımba hızlarına bağlı olarak numune genişliği ile ortalama en büyük yük arasındaki değişim incelenmiştir.

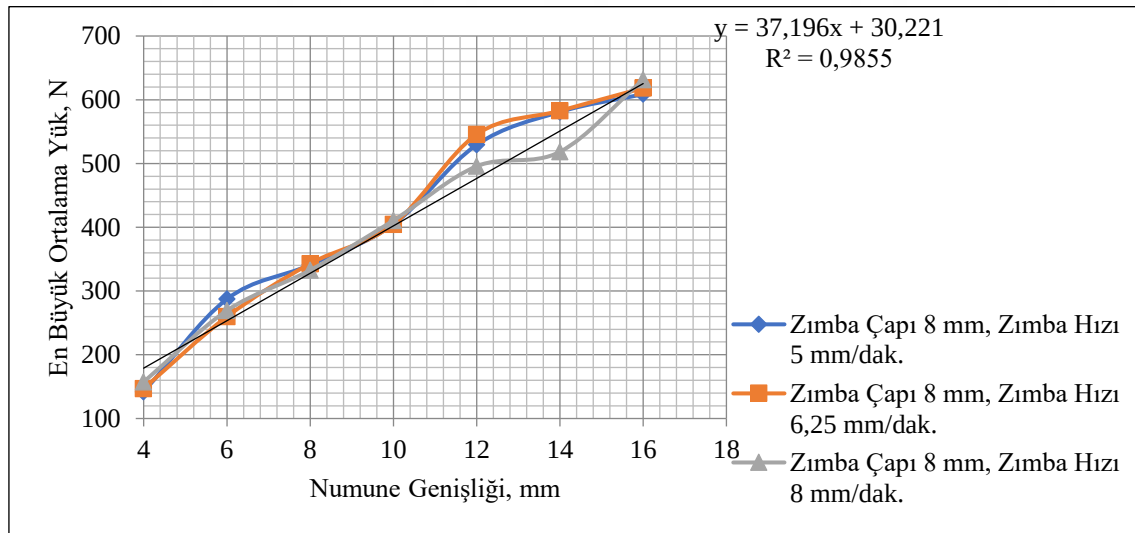
Çizelge 5.35 ve Şekil 5.33'de verilen grafik incelendiğinde 8 mm zımba çapı ile 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune malzemede periyodik olarak artan genişlik değişimi ile ortalama en büyük yükte de artan bir yükseliş tespit edilmiştir. Örnek olarak 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı incelendiğinde 4 mm genişlikte 147 N elde edilmiş, 8 mm genişlikte 343 N olmuş, 16 mm numune genişliğinde yük 618 N

olarak gerçekleşmiştir. Her üç zımba hızında da zımba çapına eşit genişlikte olan 8 mm numune genişliğinde ortalama en büyük yükte hafif bir düşüş olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.35. Belirlenen hızlarda zımba çapı 8 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi verileri

Zımba Hızı mm/dakika	En Büyük Ortalama Yük Değerleri, N						
	Numunelerin Eni, mm						
	4	6	8	10	12	14	16
5	142	287,33	341	404,66	529,33	581	608,66
6,25	147	259,66	343	404,66	545,66	582,66	618,33
8	157,33	269,33	332,66	410,66	495,66	518,33	631,33

5 mm/dakika ve 6,25 mm/dakika hızda numune genişliği değişiminde ortalama en büyük yük artışı ortalaması 1,28 olarak tespit edilirken, 8 mm/dakika hızda bu oran 1,25'e düşmektedir. Sonuç olarak numune malzeme genişliğinin ardışık olarak 2 mm artması ile ortalama en büyük yük değerleri arasında da ortalama 1,27 katı artış olduğu tespit edilmiştir. Numune malzemenin genişliğinin zımba çapına eşit olduğunda, Ortalama En Büyük Yük değerlerinin her üç hızda da birbirine eşit veya çok yakın gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5.33. 8 mm küre çaplı zımba ile belirli hızlarda ve belirli genişlikteki numuneler ile yapılan Erichsen şişirme testinde elde edilen değerlerin grafikleri

Numune genişliğinin artmasına karşılık en büyük ortalama yük değerini artırdığı, artışın eğrilerin ortalama denklemi itibariyle düzgün bir seyir gösterdiği tespit edilmiştir. Zımba küre çapına yakın ve 6 mm enli numunelerde ve 12-14 mm enli numunelerde artışın dalgalılık gösterdiği görülmektedir. Tasarımı ve imalatı yapılan test donanımının tüm

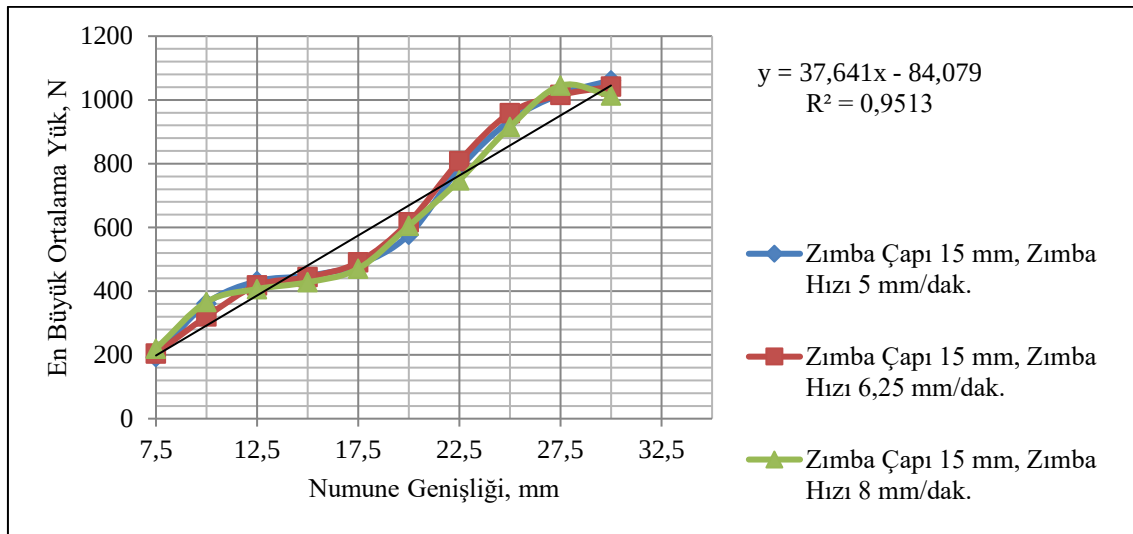
aksamlarıyla kararlı bir yapıda çalıştığı ve deneylerin sonuçlarının son derece uyumlu olduğu grafiklerdeki eğrilerin şeklinden ve benzerliğinden elde edilen en önemli bir sonuç olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.36. Belirlenen hızlarda zımba çapı 15 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi verileri

Zımba Hızı mm/dakika	En Büyük Ortalama Yük Değerleri, N									
	Numunelerin Eni, mm									
	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
5	193,33	361,33	431,33	448,33	483	576,66	784,66	934,66	1017,66	1061,33
6,25	204,66	320,33	418,66	444	490,66	616,33	808,33	959	1015,3	1041,7
8	219,66	366,33	406,66	428	470,66	604,66	748	915	1044,7	1013,3

Çizelge 5.36 ve Şekil 5.34’de verilen grafik incelendiğinde 15 mm zımba çapı ile 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune malzemede periyodik olarak artan genişlik değişimi ile ortalama en büyük yükte de artan bir yükseliş tespit edilmiştir. Örnek olarak 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı incelendiğinde 7,5 mm genişlikte 204 N elde edilmiş, 15 mm genişlikte 444 N olmuş, 30 mm numune genişliğinde yük 1041N olarak gerçekleşmiştir. Her üç zımba hızında da zımba çapına eşit genişlikte olan 15 mm numune genişliğinde ortalama en büyük yükte bir düşüş olduğu tespit edilmiştir.

Numune genişliğinin artmasına karşılık en büyük ortalama yük değerini artırdığı, artışın eğrilerin ortalama denklemi itibariyle düzgün bir seyir gösterdiği tespit edilmiştir. Zımba küre çapına yakın ve 12,5 mm enli numunelerde ve 15-17,5 mm enli numunelerde artışın dalgalılık gösterdiği görülmektedir. Tasarımı ve imalatı yapılan test donanımının tüm aksamlarıyla kararlı bir yapıda çalıştığı ve deneylerin sonuçlarının son derece uyumlu olduğu grafiklerdeki eğrilerin şeklinden ve benzerliğinden elde edilen en önemli bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Çizelge 5.37 ve Şekil 5.34’deki verilerde ve grafiklerde, 5 mm/dakika ve 6,25 mm/dakika hızda numune genişliği değişiminde ortalama en büyük yük artışı ortalaması 1,21 olarak tespit edilirken, 8 mm/dakika hızda bu oran 1,24’e çıkmıştır. Sonuç olarak numune malzeme genişliğinin ardışık olarak 2,5 mm artması ile ortalama en büyük yük değerleri arasında da ortalama 1,21 katı artış olduğu tespit edilmiştir. Numune malzemenin genişliğinin zımba çapına eşit olduğunda, ortalama en büyük yük değerlerinin her üç hızda da birbirine çok yakın gerçekleştiği görülmektedir.



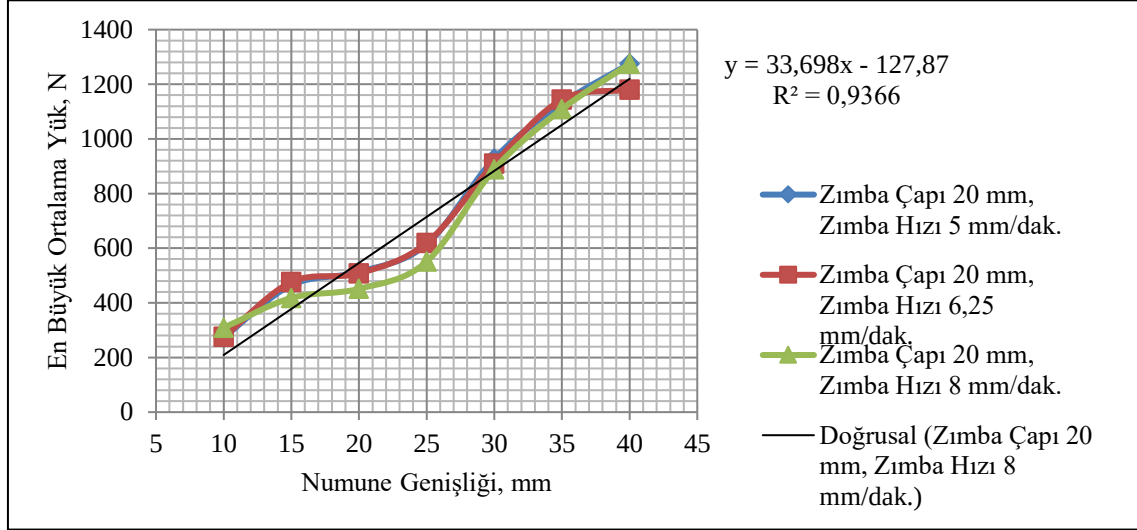
Şekil 5.34. Belirlenen hızlarda zımba çapı 15 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi

Çizelge 5.37. Belirlenen hızlarda zımba çapı 20 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi verileri

Zımba Hızı mm/dakika	En Büyük Ortalama Yük Değerleri, N						
	Numunelerin Eni, mm						
	10	15	20	25	30	35	40
5	273,66	465	512,66	614,33	927,66		1275,33
6,25	276	476	508	619	910	1143,66	1180,33
8	309	418	451,66	550,66	889	1109	1275

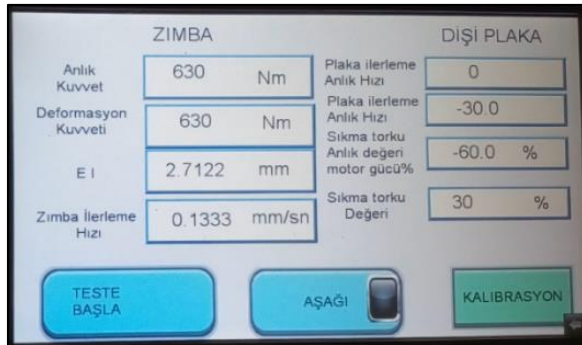
Çizelge 5.37 ve Şekil 5.35'te verilen grafik incelendiğinde 20 mm zımba çapı ile 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune malzemede periyodik olarak artan genişlik değişimi ile ortalama en büyük yükte de artan bir yükseliş tespit edilmiştir. Örnek olarak 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı incelendiğinde 10 mm genişlikte 276 N elde edilmiş, 20 mm genişlikte 508 N olmuş, 40 mm numune genişliğinde yük 1180,3 N olarak gerçekleşmiştir. Her üç zımba hızında da zımba çapına eşit genişlikte olan 20 mm numune genişliğinde ortalama en büyük yükte bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Bu düşüşün numune hazırlamadan kaynaklı bir hata olabileceği düşünülmektedir. Numune genişliğinin artmasına karşılık en büyük ortalama yük değerini artırdığı, artışın eğrilerin ortalama denklemi itibarıyla düzgün bir seyir gösterdiği tespit edilmiştir. Zımba küre çapına yakın ve 15 mm enli numunelerde ve 20-25 mm enli numunelerde artışın dalgalılık gösterdiği görülmektedir. Tasarımı ve imalatı yapılan test donanımının tüm aksamlarıyla kararlı bir yapıda çalıştığı ve deneylerin sonuçlarının son derece uyumlu olduğu

grafiklerdeki eğrilerin şeklinden ve benzerliğinden elde edilen en önemli bir sonuç olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.35. Belirlenen hızlarda zımba çapı 20 mm için numune genişliği ile en büyük ortalama yük ilişkisi

Çizelge 5.37 ve Şekil 5.35'deki verilerde ve grafiklerde, ardışık olarak artan değerlerde 5 mm numune genişliği değişiminde, ortalama en büyük yük artışı ortalamasının artış oranı, 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika hızlarda sırasıyla 1,3, 1,28 ve 1,27 gerçekleştiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, her üç zımba çapı ve her üç zımba hızında, numune genişliği ile ortalama en büyük yük arasında artışın 1,25 katı olduğu tespit edilmiştir. Tasarımı ve imalatı yapılmış olan Erichsen Test donanımının ekran görüntüsüne bir örnek olması için, Resim 5.2'de zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika olan testin görüntüsü verilmiştir.



Resim 5.2. Zımba küre çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika ve 90x6x0,5 mm boyutlu numunenin testi esnasında 3. deneyin video kaydı ekran görüntüsü

5.2.5. Tekrarlanabilirlik değerlendirmesi

Tez çalışması kapsamında tasarımı ve imalatı yapılan Tam Otomasyonlu Erichsen Test Donanımının, deneyleri aynı güvenilirlikte tekrar edebildiğini; Şekil 5. 32’de verilen ilişkide görülen (-5612; -25113; -07193) değerler ispat etmektedir. Ayrıca, örnek olarak Şekil 5.33’de, Şekil 5.34’te ve Şekil 5.35’de verilen grafiklerdeki eğrilerin eğilim değerleri ($37,19/R^2=0,98$; $37,64/R^2=0,95$ ve $33,69/R^2=0,93$) de bu görüşü güçlü olarak desteklemektedir.

5.2.6. Zımba çaplarına göre OEB yük – Erichsen Sabiti ilişkisinin incelenmesi

Zımba çaplarına göre ortalama en büyük yük ile Erichsen sabitinin değişimi incelenmiş ve Çizelge 5.38, Çizelge 5.39 ve Çizelge 5.40’te sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.38. 8 mm zımba çapına göre ortalama en büyük yük-Erichsen Sabiti ilişkisi verileri

Ortalama En Büyük Yük Değişimi-Erichsen Sabiti İlişkisi Verileri							
Zımba Hızı, mm/dakika	5						
Numune genişliği, mm	4	6	8	10	12	14	16
Ortalama En Büyük Yük, N	142	287	341	404	529	581	608
Erichsen Sabiti, mm	1,25	2,42	2,16	2,08	2,78	2,24	2,59
Zımba Hızı, mm/dakika	6,25						
Numune genişliği, mm	4	6	8	10	12	14	16
Ortalama En Büyük Yük, N	147	259	343	404	545	582	618
Erichsen Sabiti, mm	1,39	2,09	2,15	2,99	2,64	2,38	2,5
Zımba Hızı, mm/dakika	8						
Numune genişliği, mm	4	6	8	10	12	14	16
Ortalama En Büyük Yük, N	157	269	332	410	495	518	631
Erichsen Sabiti, mm	1,52	2,2	1,9	2,1	2,41	2,11	2,75

Çizelge 5.39. 15 mm zımba çapına göre ortalama en büyük yük-Erichsen Sabiti ilişkisi verileri

Ortalama En Büyük YükDeğişimi-Erichsen Sabiti İlişkisi Verileri										
Zımba Hızı, mm/dakika	5									
Numune genişliği, mm	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
Ortalama En Büyük Yük, N	193	361	431	448	483	576	784	934	1017	1060
Erichsen Sabiti, mm	1,79	2,99	3,19	3,07	3,01	3,21	3,72	4	40,6	4,34
Zımba Hızı, mm/dakika	6,25									
Numune genişliği, mm	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
Ortalama En Büyük Yük, N	204	320	418	444	490	616	808	959	1015	1041
Erichsen Sabiti, mm	1,98	2,61	3,07	3,02	3,04	3,33	3,86	4,07	4,15	4,43
Zımba Hızı, mm/dakika	8									
Numune genişliği, mm	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
Ortalama En Büyük Yük, N	219	366	428	406	470	604	748	915	1044	1013
Erichsen Sabiti, mm	1,98	3,04	3,38	2,53	2,67	3,21	4,2	4,23	4,26	4,05

Çizelge 5.40. 20 mm zımba çapına göre ortalama en büyük yük-Erichsen Sabiti ilişkisi

Ortalama En Büyük Yük Değişimi-Erichsen Sabiti İlişkisi Verileri								
Zımba Hızı, mm/dakika	5							
Numune Genişliği, mm	10	15	20	25	30	35	40	
Ortalama En Büyük Yük, N	273	465	512	614	927	1130	1275	
Erichsen Sabiti, mm	2,72	3,65	3,49	3,54	4,29	4,77	5	
Zımba Hızı, mm/dakika	6,25							
Numune Genişliği, mm	10	15	20	25	30	35	40	
Ortalama En Büyük Yük, N	276	476	508	619	910	1143	1180	
Erichsen Sabiti, mm	2,65	3,7	3,47	3,57	4,25	4,8	4,66	
Zımba Hızı, mm/dakika	8							
Numune Genişliği, mm	10	15	20	25	30	35	40	
Ortalama En Büyük Yük, N	309	418	451	550	889	1109	1275	
Erichsen Sabiti, mm	2,72	3,18	2,67	3,19	4,03	4,43	5,08	

Ortalama en büyük yük, Erichsen sabiti ilişkisinde; numunelerin en değeri ölçüsü arttıkça Erichsen Sabiti değerinin de arttığı, zımba hızı arttıkça Erichsen Sabitinin arttığı, numune parçanın eninin artmasıyla beraber deformasyon kuvvetinin de arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca; zımba çapı büyüdükçe deformasyon kuvvetinin arttığı, zımba hızı arttıkça da

deformasyon kuvvetinde az da olsa bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Diğer taraftan; bazı Erichsen Sabiti değerlerinde artan OEB yüke bağlı olarak düşme olduğu tespit edilmiştir. Bunun numune hazırlama sırasında en ölçülerinde ondalık miktardaki değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.2.7. Zımba çapı ve hızına göre ES ile numune genişliği arasındaki ilişkinin incelenmesi

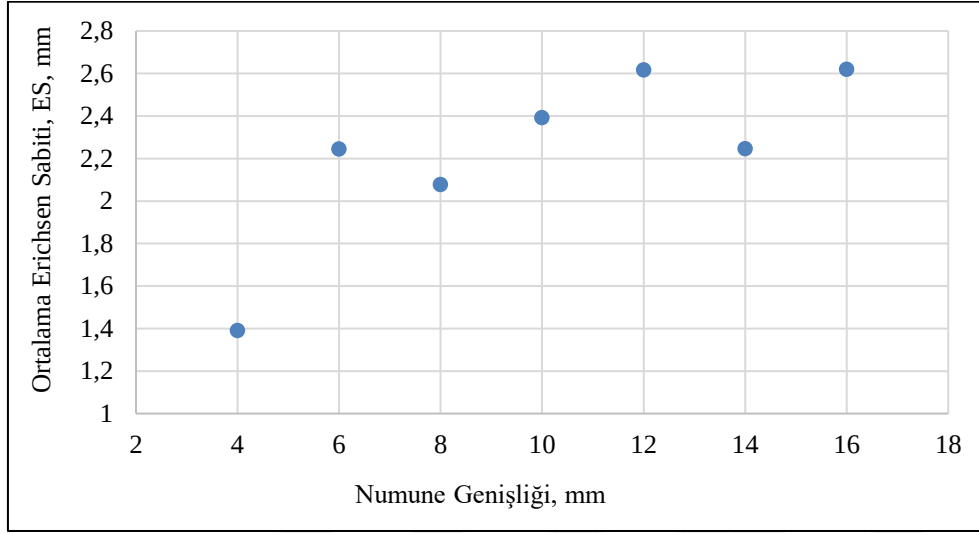
Zımba çapı 8 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında Numune Genişlik Değişimi ile Erichsen Sabiti değişimi arasındaki ilişki incelenmiş ve Çizelge 5.41'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.41. Zımba çapı 8 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune genişlik değişimi ve Erichsen Sabiti verileri

Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 5 mm/dakika için Erichsen Sabiti-numune genişliği ilişkisi		Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika için Erichsen Sabiti-numune genişliği ilişkisi			Zımba çapı 8 mm, zımba hızı 8 mm/dakika için Erichsen Sabiti-numune genişliği ilişkisi			
Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm	Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm		Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm		
1,2557	4	1,3907	4		1,5212	4		
2,4284	6	2,0992	6		2,2088	6		
2,1659	8	2,1538	8		1,902	8		
2,0811	10	2,99	10		2,1047	10		
2,7865	12	2,6488	12		2,4141	12		
2,2407	14	2,3855	14		2,1118	14		
2,5984	16	2,5079	16		2,7557	16		
Numune Genişliği, mm		4	6	8	10	12	14	16
Ortalama Erichsen Sabiti, mm		1,3901	2,2454	2,0772	2,3919	2,6164	2,246	2,6206

Her üç zımba hızında elde edilen verilerin ortalama değerinin oluşturduğu ilişki Şekil 5.36'da gösterilmiştir. Gerek Çizelge 5.41'deki veriler ve gerekse Şekil 5.36'da verilen grafik incelendiğinde, zımba çapı 8 mm'de numune malzeme genişliği 4 mm olduğunda 5 mm/dakika zımba hızında Erichsen sabiti, ES, 1,25 mm olarak gerçekleşirken 6,25 mm/dakika zımba hızında 1,4 mm, 8 mm/dakika zımba hızında 1,5 mm olarak elde edilmiştir. Numune genişliği 8 mm olduğunda Erichsen Sabiti değerlerinde küçük bir farklılık meydana gelmiş, 16 mm numune genişliğinde 8 mm/dakika zımba hızında Erichsen sabiti değerlerinde bir miktar artış görülerek 2,75 mm olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak,

numune genişliği değişiminin artışı ile beraber Erichsen Sabiti değerlerinde de bir artış görülerek, 4 mm numune genişliğinde ortalama Erichsen Sabiti değeri 1,38 mm olarak tespit edilirken, 8 mm numune genişliğinde 1,5 kat artarak 2,07 mm, 16 mm numune genişliğinde 1,26 kat artarak 2,62 mm olarak gerçekleşmiştir.



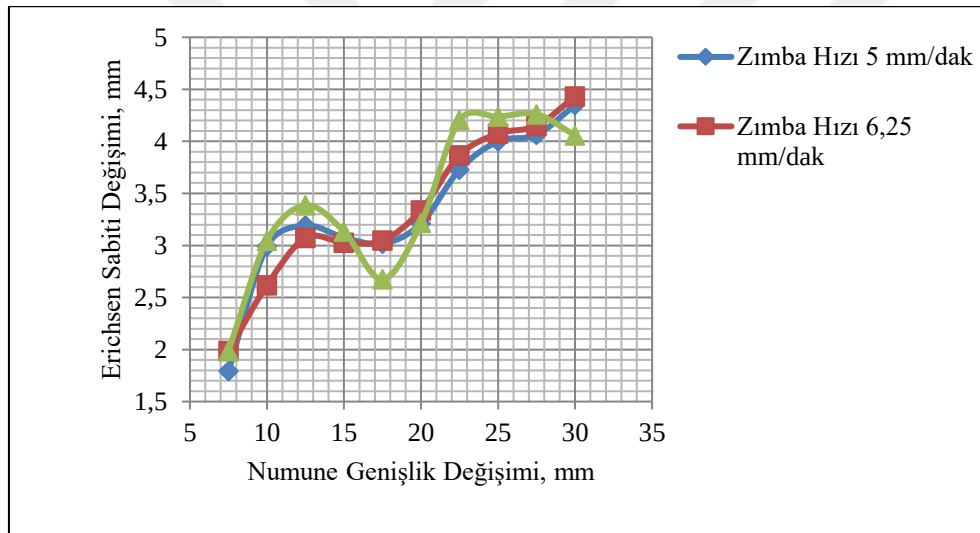
Şekil 5.36. 8 mm zımba çapında ve belirli zımba hızlarında yapılan deneyde numune genişliği ile Erichsen Sabiti ilişkisi

Zımba çapı 15 mm, zımba hızları 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika olan deneyde Erichsen Sabiti ile numune genişlik değişimi ilişkisi incelenmiş ve Çizelge 5.42'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.42. Zımba çapı 15 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune genişlik değişimi ile Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

Zımba Çapı 15 mm, Zımba Hızı 5 mm/dakika için Erichsen Sabiti - Numune Genişliği ilişkisi		Zımba Çapı 15 mm, Zımba Hızı 6,25 mm/dakika için Erichsen Sabiti - Numune Genişliği ilişkisi		Zımba Çapı 15 mm, Zımba Hızı 8 mm/dakika için Erichsen Sabiti - Numune Genişliği ilişkisi	
Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm	Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm	Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm
1,7927	7,5	1,9854	7,5	1,9865	7,5
2,9931	10	2,6187	10	3,0462	10
3,1917	12,5	3,0725	12,5	3,3859	12,5
3,0756	15	3,0272	15	3,1347	15
3,0166	17,5	3,0478	17,5	2,6743	17,5
3,2105	20	3,3382	20	3,2155	20
3,7288	22,5	3,8663	22,5	4,2031	22,5
4,0008	25	4,0747	25	4,2372	25
4,0632	27,5	4,1503	27,5	4,2606	27,5
4,3497	30	4,4314	30	4,0579	30

Gerek Çizelge 5.42’de verilen veriler ve gerekse Şekil 5.37’de verilen grafik incelendiğinde, zımba çapı 15 mm’de numune malzeme genişliği 7,5 mm olduğunda 5 mm/dakika zımba hızında Erichsen sabiti, ES, 1,79 mm olarak gerçekleşirken 6,25 mm/dakika zımba hızında 1,98 mm, 8 mm/dakika zımba hızında 1,98 mm olarak elde edilmiştir. Numune genişliği 15 mm olduğunda Erichsen Sabiti değerlerinde küçük bir farklılıkla 3,05 mm olarak gerçekleşmiş, 30 mm numune genişliğinde 8 mm/dakika zımba hızında Erichsen sabiti değerlerinde bir miktar azalma 4,05 mm olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, numune genişliği değişiminin artışı ile beraber Erichsen Sabiti değerlerinde de bir artış görülerek, 7,5 mm numune genişliğinde ortalama Erichsen Sabiti değeri 1,91 mm olarak tespit edilirken, 15 mm numune genişliğinde 1,6 kat artarak 3,07 mm, 30 mm numune genişliğinde 1,4 kat artarak 4,27 mm olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.37. 15 mm zımba çapında ve belirli zımba hızlarında yapılan deneyde numune genişliği ile Erichsen Sabiti ilişkisi

Zımba çapı 20 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune genişlik değişimi ile Erichsen Sabiti değişimi arasındaki ilişki incelenmiş ve Çizelge 5.43’deki değerler elde edilmiştir.

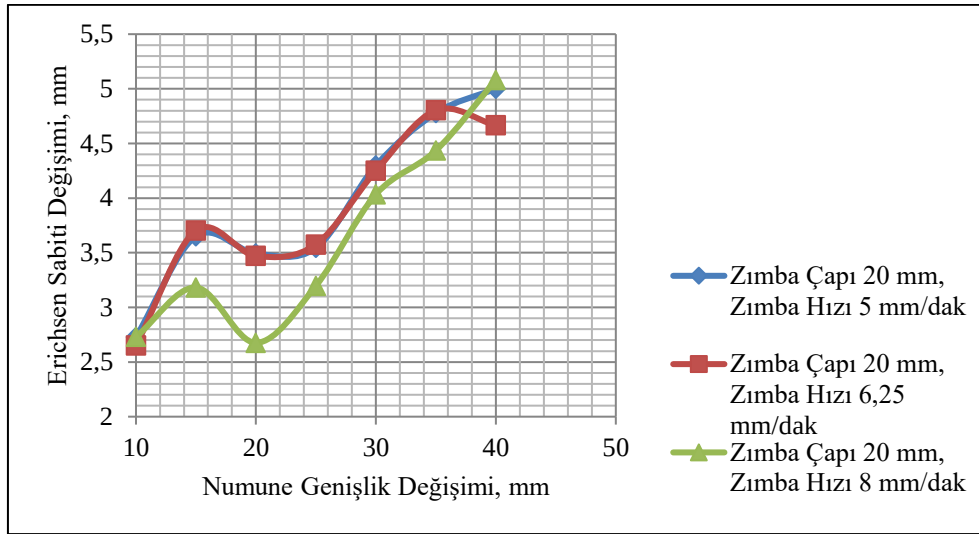
Gerek Çizelge 5.43’de verilen veriler ve gerekse Şekil 5.38’de verilen grafik incelendiğinde, zımba çapı 20 mm’de numune malzeme genişliği 10 mm olduğunda 5 mm/dakika zımba hızında Erichsen sabiti, ES, 2,72 mm olarak gerçekleşirken 6,25 mm/dakika zımba hızında 2,69 mm, 8 mm/dakika zımba hızında 2,72 mm olarak elde edilmiştir. Numune genişliği 20 mm olduğunda, 8 mm/dakika zımba hızında Erichsen Sabiti değerlerinde düşüş görülmüş ve

2.67 mm olarak gerçekleşmiş, 40 mm numune genişliğinde 6,25 mm/dakika zımba hızında Erichsen sabiti değerlerinde bir miktar azalma olmuş, Erichsen Sabiti 4,67 mm olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, numune genişliği değişiminin artışı ile beraber Erichsen Sabiti değerlerinde de bir artış görülerek, 10 mm numune genişliğinde ortalama Erichsen Sabiti değeri 2,69 mm olarak tespit edilirken, 20 mm numune genişliğinde 1,2 kat artarak 3,21 mm, 40 mm numune genişliğinde 1,5 kat artarak 4,91 mm olarak gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.43. Zımba çapı 20 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune genişlik değişimi ile Erichsen Sabiti değişimi arasındaki ilişki

Zımba Çapı 20 mm, Zımba Hızı 5 mm/dakika için Erichsen Sabiti-Numune Genişliği ilişkisi		Zımba Çapı 20 mm, Zımba Hızı 6,25 mm/dakika için Erichsen Sabiti-Numune Genişliği ilişkisi		Zımba Çapı 20 mm, Zımba Hızı 8 mm/dakika için Erichsen Sabiti-Numune Genişliği ilişkisi	
Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm	Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm	Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm
2,7284	10	2,6503	10	2,7294	10
3,6513	15	3,7042	15	3,1816	15
3,4927	20	3,471	20	2,6759	20
3,5450	25	3,5757	25	3,1973	25
4,2973	30	4,2502	30	4,0344	30
4,7784	35	4,8037	35	4,4354	35
5,0012	40	4,6658	40	5,0812	40

Her üç ayrı zımba çapında ve zımba hızında numune genişliğinin artması ile Erichsen Sabitinin de arttığı tespit edilmiştir. Zımba çapının büyümesi ve numune genişliği değişiminin artması ile Erichsen Sabitinin arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.38. 20 mm zımba çapında ve belirli zımba hızlarında yapılan deneyde numune genişliği ile Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi

5.2.8. Erichsen şişirme testinde numune kesitine bağlı olarak zımba hızı ile gerilme değişimindeki ilişkinin incelenmesi

5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika olmak üzere her üç zımba hızında deneylerde numunelerin kesit değerlerine bağlı olarak oluşan gerilme değerleri Çizelge 5.44'de gösterilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak Şekil 5.39'daki grafik oluşturulmuştur.

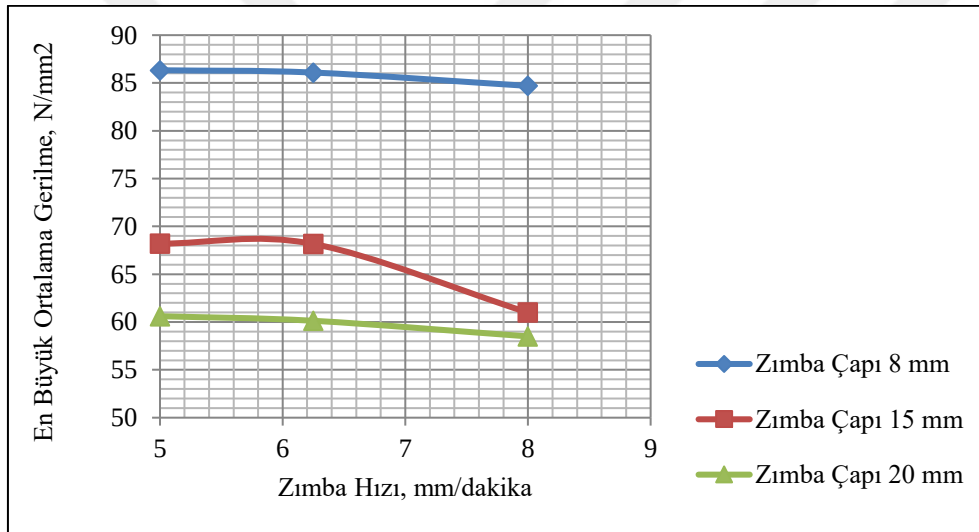
Çizelge 5.44. 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika zımba hızlarında kesit değerlerine bağlı olarak oluşan gerilme değerleri

Zımba Hızına Bağlı Olarak Numune Kesiti ile Gerilme Değişimi İlişkisi					
Ø8 mm		Ø15 mm		Ø20 mm	
Gerilme Değişimi, N/mm ²	Zımba Hızı, mm/dakika	Gerilme Değişimi, N/mm ²	Zımba Hızı, mm/dakika	Gerilme Değişimi, N/mm ²	Zımba Hızı, mm/dakika
86,331	5	68,199	5	60,613	5
86,091	6,25	68,165	6,25	60,131	6,25
84,696	8	60,992	8	58,499	8

Gerek Çizelge 5.44'de verilen veriler ve gerekse Şekil 5.39'da verilen grafik incelendiğinde, gerilme değişimi, 8 mm zımba çapında, 5 mm/dakika ve 6,25 mm/dakika hızlarında 86 N/mm² olarak gerçekleşirken, 8 mm/dakika hızda bir 84 N/mm² tespit edilmiştir. Gerilme değişimindeki bu düşme 15 mm zımba çapı ve 8 mm/dakika hızda daha fazla olduğu ve 68 N/mm²'den 60 N/mm²'ye düştüğü tespit edilmiştir. 20 mm zımba çapında her üç hızda gerilme değişiminde önemli bir değişiklik olmamıştır.

Sonuç olarak; Erichsen testinde 8 mm zımba çapı ve her üç hızda ortalama gerilme 85 N/mm² gerçekleşirken, 15 mm zımba çapında ortalama gerilme 65 N/mm², 20 mm zımba çapında 59 N/mm² olarak gerçekleşmiştir. Numune kesitine bağlı olarak gerilme, zımba çapı büyüdükçe azaldığı görülmüştür. Gerilmenin, 8 mm/dakika hızda düştüğü görülmüş, 15 mm zımba çapında bu düşme daha fazla olmuş, 68 N/mm²'den 60 N/mm² olarak gerçekleşmiştir.

Zımba hızı arttıkça gerilmenin düştüğü, 8 mm zımba çapında yapılan deneyde gerilme düşüşünün daha az ve düzenli bir eğilim gösterdiği, zımba çapı büyüdükçe gerilme düşüşünün daha fazla olduğu ve zımba çapı ve zımba hızı arttıkça gerilmenin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.39. Zımba hızı ile gerilme arasındaki ilişki grafiği

5.2.9. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika alındığında OEB yük - Erichsen Sabiti ilişkisinin incelenmesi

Numune malzemenin genişlik ölçülerine dayalı daha detaylı inceleme için Al 1050 (%99,53 saf alüminyum) numune malzemeye ayrıca bir deney uygulanmıştır, genişlik itibarıyla 90x10 mm, 90x12 mm, 90x14 mm, 90x16 mm, 90x18 mm, 90x20 mm, 90x22 mm, 90x24 mm, 90x26 mm, 90x28 mm, 90x30 mm, 90x32 mm, 90x34 mm, 90x36 mm, 90x38 mm, 90x40 mm boyutlarında hazırlanan deney grubu ile Erichsen şişirme testi yapılmıştır. Herbir deney üç defa tekrarlanmıştır. Zımba çapı 20 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dakika parametreleri ile uygulanan bu testlerde elde edilen yük ve Erichsen Sabiti (ES) verileri Çizelge 5.45’de verilmiştir.

Bu veriler ışığında 20 mm zımba çapında ayrıca uygulanan Erichsen testlerinde Çizelge 5.46’da verilen ortalama en büyük yük- Erichsen Sabiti değerleri elde edilmiştir. Çizelge 5.46 ve ona bağlı olarak Şekil 5.40’daki grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 5.45. 20 mm zımba çapında uygulanan Erichsen testlerinde elde edilen yük-Erichsen Sabiti değerleri

%99,53 saf (al 1050) saf alüminyum ikinci kategori Erichsen testleri (Kalınlık 0,5 mm, Zımba çapı 20 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dak.)													
Numune Genişliği, 10 mm		Numune Genişliği, 12 mm		Numune Genişliği, 14 mm		Numune Genişliği, 16 mm		Numune Genişliği, 18 mm		Numune Genişliği, 20 mm		Numune Genişliği, 22 mm	
Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
286	2,8667	397	3,7904	514	4,3501	447	3,4206	474	3,5756	453	3,1287	518	3,4192
289	2,8772	401	3,8229	509	4,3128	483	3,7665	480	3,5843	468	3,2978	506	3,3439
303	2,9865	401	3,7958	478	4,8996	481	3,7345	474	3,5181	482	3,3857	512	3,4035
Ortalama En Büyük Yük : 292,66 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 2,9101 mm	Ortalama En Büyük Yük : 399,66 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 3,8030 mm	Ortalama En Büyük Yük : 469,66 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 3,8113 mm	Ortalama En Büyük Yük : 470,33 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 3,6405 mm	Ortalama En Büyük Yük : 476 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 3,5593 mm	Ortalama En Büyük Yük : 467,66 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 3,2707 mm	Ortalama En Büyük Yük : 512 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 3,3888 mm

Numune Genişliği, 24 mm		Numune Genişliği, 26 mm		Numune Genişliği, 28 mm		Numune Genişliği, 30 mm		Numune Genişliği, 32 mm		Numune Genişliği, 34 mm		Numune Genişliği, 36 mm	
Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
564	3,4788	626	3,6207	643	3,5258	820	3,9876	967	4,4274	1110	4,9409	1222	5,1601
556	3,4811	615	3,6042	668	3,7023	865	4,159	1005	4,6155	1092	4,9371	1288	5,4418
555	3,4286	623	3,6095	679	3,6188	900	4,294	984	4,5779	1140	5,143	1198	5,0702
Ortalama En Büyük Yük : 558,33 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 3,4628 mm	Ortalama En Büyük Yük : 621,33 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 3,6114 mm	Ortalama En Büyük Yük : 663,33 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 3,6156 mm	Ort. En. Büyük Yük : 861,66 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES, : 4,1468 mm	Ort. En. Büyük Yük : 985,33 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 4,5402 mm	Ort. En. Büyük Yük : 1114 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 5,007 mm	Ort. En. Büyük Yük : 1236 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 5,2240 mm

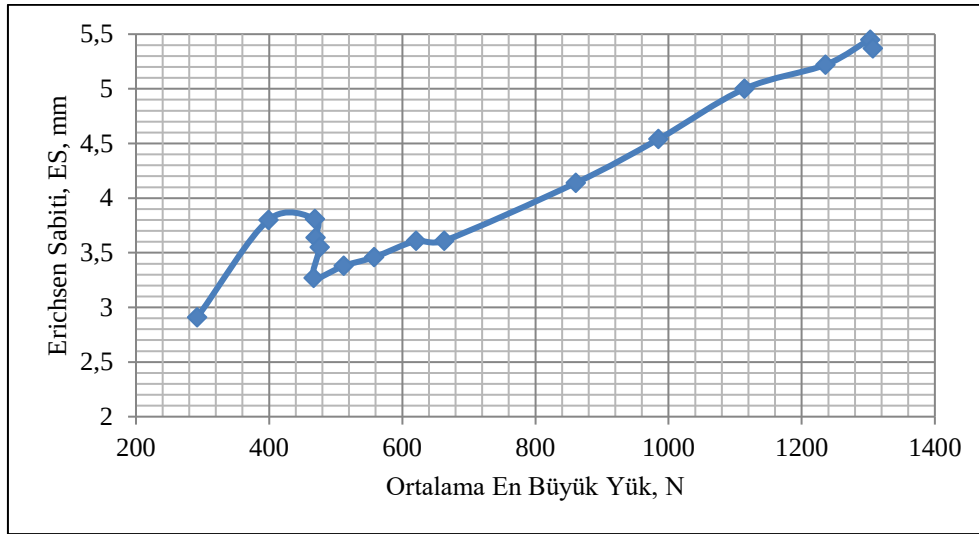
Numune Genişliği, 38 mm		Numune Genişliği, 40 mm	
Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
1334	5,5848	1296	5,3291
1288	5,3698	1298	5,3256
1287	5,3976	1329	5,4643
Ort. En. Büyük Yük : 1303 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 5,4507 mm	Ort. En. Büyük Yük : 1307,66 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 5,373 mm

Çizelge 5.46 verileriyle oluşturulan Şekil 5.40 incelendiğinde 20 mm küre çaplı zımba ile 6,25 mm/dakika hızda yapılan testte numuneye uygulanan deformasyon yükünün artması ile numune genişliğinin de etkisinde olmasını dikkate alarak, Erichsen Sabitinde de bir artış olduğu görülmekte ve 469 N’da 3,81 mm olarak gerçekleşmiştir.

Ancak 470 N yükten sonra Erichsen Sabiti değerinde aşağı bir eğilim görülerek keskin bir düşüş ile Erichsen Sabiti 3,27 mm'ye kadar düştüğü tespit edilmiştir. İlişki incelendiğinde Erichsen Sabiti değerindeki düşüş, numune genişliğinin zımba çapından bir önceki numune genişliğinden başlayarak, numune genişliğinin zımba çapına eşit olduğu değerler arasında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Erichsen Sabitindeki bu düşüşün daha önce her üç hızda ve her üç zımba çaplarında yapılan testlerde de gerçekleştiği tespit edilmiştir (Bkz, Şekil 5.33, Şekil 5.34, Şekil 5.35). Yükün 512 N'a ulaşmasına kadar düşen Erichsen Sabiti değeri yük ile orantılı olarak düzgün doğrusal bir ivmeyle arttığı tespit edilmiştir.

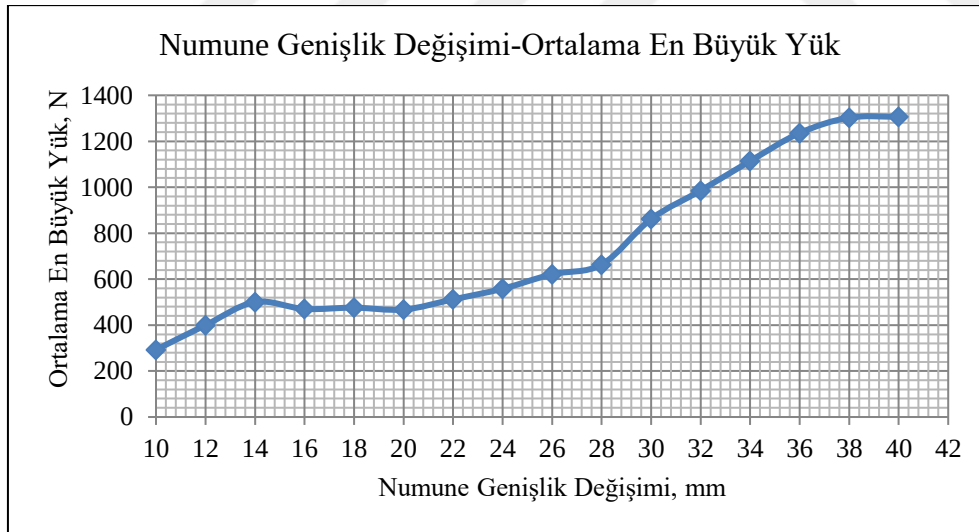
Çizelge 5.46. Zımba Çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika parametrelerinde yapılan deneyde EBO yük – Erichsen Sabiti verileri

Ortalama En Büyük Yük–Erichsen Sabiti, ES, ilişkisi		
Ortalama En Büyük Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Numune Genişliği, mm
292	2,91	10
399	3,8	12
469	3,81	14
470	3,64	16
476	3,55	18
467	3,27	20
512	3,38	22
558	3,46	24
621	3,61	26
663	3,61	28
861	4,14	30
985	4,54	32
1114	5	34
1236	5,22	36
1303	5,45	38
1307	5,37	40



Şekil 5.40. 20 mm zımba çapında 6,25 mm/dakika zımba hızında deney sonucu numunelerin genişlik değişimine bağlı olarak ortalama en büyük yük değişimi ile Erichsen Sabiti (ES) değişimi ilişkisi

5.2.10. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika için EBO yük – Numune genişliği ilişkisinin incelenmesi



Şekil 5.41. Numune genişliği ile ortalama en büyük yük ilişkisi

Gerek Çizelge 5.46, gerekse Şekil 5.41 incelendiğinde, 10 mm genişliğe sahip numunede Erichsen Sabitinin elde edildiği ortalama en büyük yük 292 N iken, numune genişliği 20 mm'ye kadar yük yaklaşık yatay ilerlemektedir. 20 mm genişlikten sonra yük artmaya başlamaktadır. 28 mm genişlikten sonra ortalama en büyük yükte hızlı bir yükseliş görülmektedir. Çekme sırasında numune genişliğinin artması ile tek eksenli çekmeden iki

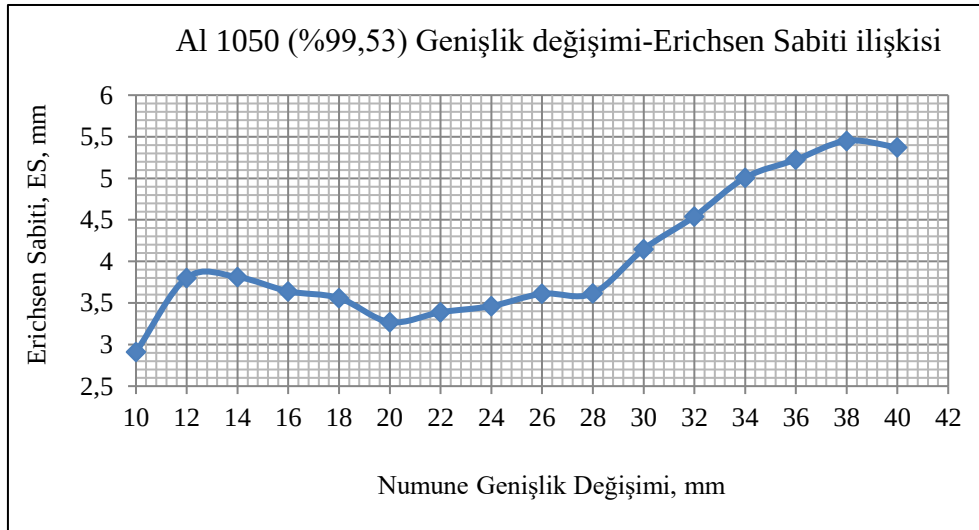
eksenli çekme oluşmaya başlaması ile yük artmaya başlamıştır. 38 mm genişlikten sonra baskı plakası altındaki numune malzemenin genişlik yeterliliği yükün yaklaşık olarak sabit kalmasını sağlamaktadır. Bu deney, en sağlıklı Erichsen şişirme testi verileri, zımba çapının 2 katı genişlikte olan numunelerle elde edilebileceğini göstermektedir.

5.2.11. Numune genişlik değişimi ile Erichsen Sabiti arasında oluşan ilişkinin incelenmesi

6,25 mm/dakika zımba hızında, 20 mm zımba çapında yapılan deneyde numune genişlik değerleri ve Erichsen sabiti değerleri Çizelge 5.47’de verilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak Şekil 5.42’deki ilişki gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.47. 20 mm zımba çapında, 6,25 mm/dakika zımba hızında deney sonucu genişlik değişimine bağlı olarak Erichsen Sabiti verileri

Al 1050 Numune Genişlik Değişimi-Erichsen Sabiti İlişkisi																
Numune Genişlik Değişimi, mm	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
Erichsen Sabiti, mm	2,91	3,8	3,81	3,64	3,56	3,27	3,39	3,46	3,61	3,62	4,15	4,54	5,01	5,22	5,45	5,37



Şekil 5.42. Numune genişlikleri ile Erichsen Sabiti arasındaki ilişki

Gerek Çizelge 5.47, gerek Şekil 5.42’de verilen grafik incelendiğinde en büyük ortalama yükü paralel bir benzerlik göstermektedir. Numune genişliği zımba çapına eşit olduğunda

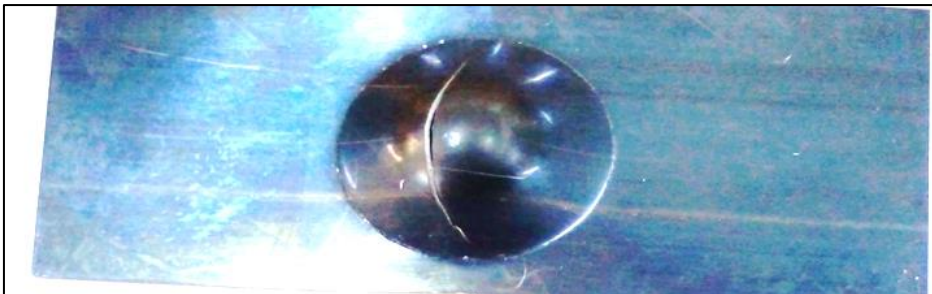
en düşük Erichsen Sabiti (ES) meydana geldiği görülmüştür. 28 mm numune genişliği ile Erichsen Sabiti değerinde hızlı bir artmanın meydana geldiği görülmektedir.

5.2.12. Ck75 numune malzemenin, zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika için numune genişlik değişimi - Erichsen sabiti (ES) ilişkisinin incelenmesi

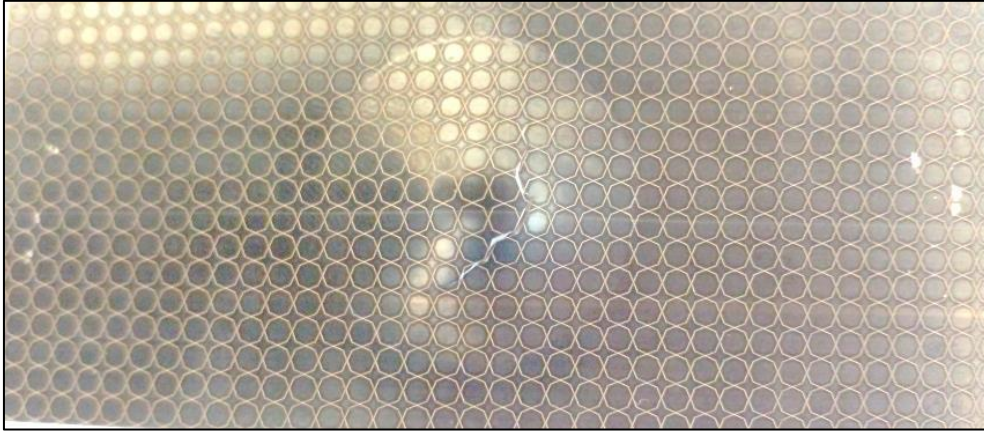
Ck75 malzemeden 90x10 mm, 90x15 mm, 90x20 mm, 90x25 mm, 90x30, 90x35 ve 90x40 mm boyutlarında numuneler hazırlanmış ve Erichsen testi uygulanmıştır. Herbir deney 3 defa tekrarlanmıştır. Genişlikleri 10 mm, 15 mm, 20 mm ve 25 mm numunelerin deneylerinden sağlıklı veriler alınamamıştır. Diğer bir deyişle, numune genişliği kalıp delik çapından küçük ve eşit ölçüde olduğu durumda 10 kN baskı kuvvetinin yetmediği ve numune delik içine aktığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, genişliği 30 mm, 35 mm ve 40 mm olan numunelerin test verileri dikkate alınarak incelenmiştir (Çizelge 5.48). Resim 5.3’de kalıp deliği içine akan numune ve Resim 5.4’te 35 mm genişlikte Ck75 çelik sac numunenin Erichsen şişirme test sonucu görüntüsü ve Resim 5.5’te 40 mm genişlikteki numunenin ızgara desenli test sonrası görüntüsü verilmiştir.



Resim 5.3. Ck75 çelik sac numunelerden kalıp deliği içine akan örnekleri



Resim 5.4. 35 mm genişlik ve 0,5 mm kalınlıktaki Ck75 çelik sac numune

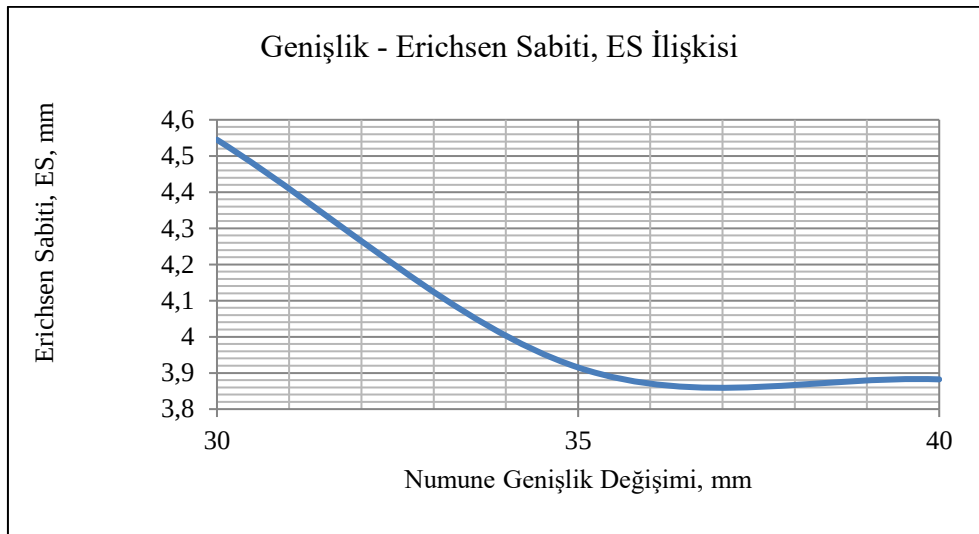


Resim 5.5. Genişliği 40 mm olan Ck75 numune malzemeye Erichsen testi uygulanmış durumu

Çizelge 5.48’deki verilerle elde edilen Şekil 5.43’de verilen grafik incelendiğinde numune malzemenin genişliği artmasıyla Erichsen Sabiti değerinde bir düşüş olduğu görülmektedir. 30 mm genişlikte numune malzemenin Erichsen Sabiti (ES) 4,54 mm iken, 35 mm genişlikte iki yönlü çekmenin oluşmaya başlamasıyla gerçek Erichsen Sabitinin 3,91 mm ve 40 mm genişlikte 3,88 mm olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.48. Ck75 çelik sac malzemenin Erichsen testi ile elde edilen yük- Erichsen Sabiti verileri

Numune Genişliği, 30 mm		Numune Genişliği, 35 mm		Numune Genişliği, 40 mm	
Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
9303	4,9511	8205	3,6217	9626	3,9113
8801	4,6208	9579	4,0993	9197	3,7991
7848	4,0629	8874	4,009	9590	3,9362
Ortalama En Büyük Yük: 8559,66 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES:4,5449 mm	Ortalama En Büyük Yük: 8886 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES: 3,9151 mm	Ortalama En Büyük Yük: 9471 N	Ortalama Erichsen Sabiti, ES: 3,8822 mm



Şekil 5.43. Numune genişlik değişimi ile Erichsen Sabiti arasındaki ilişki

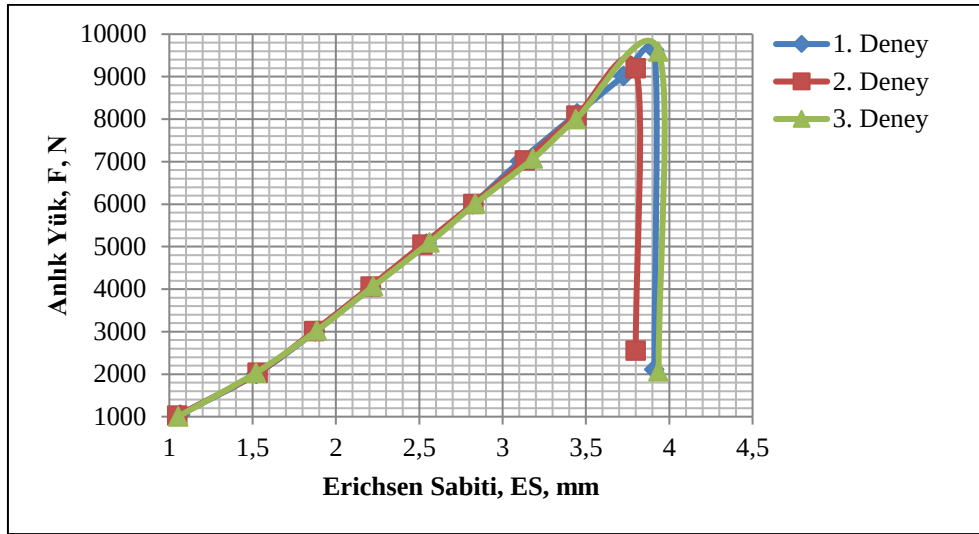
Çizelge 5.49. Zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune genişliği 40 mm deneyde elde edilen anlık yük ve Erichsen Sabiti verileri

Genişlik 40 mm, Zımba çapı 20 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dakika, Ck75 Sac Numune Erichsen Testi					
1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Anlık Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Anlık Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Anlık Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
1048	1,0648	1023	1,0491	1005	1,0549
2003	1,5219	2036	1,5313	2039	1,5217
3004	1,8756	3018	1,8697	3031	1,8864
4044	2,213	4065	2,2083	4071	2,2245
5072	2,5424	5047	2,519	5100	2,5622
6000	2,8216	6006	2,8248	6010	2,8371
7015	3,106	7032	3,1349	7072	3,1835
8135	3,4486	8084	3,4445	8002	3,4399
9017	3,7253	9197	3,7991	9590	3,9362
9626	3,9113	2553	3,7991	2062	3,9362

Ortalama En BüyükYük, F=9471 N

Erichsen Sabiti, ES₂₇ =3,8822 mm

Gerek Çizelge 5.49 değerleri ve gerekse Şekil 5.44'de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 3,50 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı, 9471 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 3,88 mm olduğu tespit edilmiştir. Numune malzemenin boyun vermesi ve yırtılması anında yükün ani düşüşü de gözlemlenmiştir. Ck 75 malzemedan hazırlanan numunelerin tekrarlanan üç deneyden elde edilen ES ve yük değerleri Çizelge 5.49'da ve bu verilere dayalı değişimin grafiği Şekil 5.44'de verilmiştir.



Şekil 5.44. Numune genişliği 40 mm Ck75 çelik sac numunenin Erichsen Sabiti ile anlık yük değişimi ilişkisi

Aydın, M. ve arkadaşları; hidrolik prese adapte edilmiş bir Erichsen şişirme testi düzeneğinde; 0,4 mm, 0,5 mm ve 0,6 mm kalınlıklarında Ck75 sac numune malzemelerle ve zımba çapı 20 mm olarak çalışmıştır [25]. Zımba hızının 6 mm/dakika (0,1 mm/s) alındığı literatür çalışmasında; Erichsen sabitinin de tespit edildiği, 140 mm x 120 mm boyutlarında hazırlandığı, numune yüzeylerinin zımparalanarak kir ve çapak oluşumundan temizlendiği görülmüştür. Deneylerinin sonucunda 0,2 mm kalınlıktaki Ck 75 malzemedeki numunelerin ortalama Erichsen Sabitini (ES) 4,72 mm ve ortalama en büyük yükü de 10623,67 N olarak beyan etmişlerdir [25]. Bu çalışma kapsamında aynı malzeme ve numune kalınlığı için yapılan deneyde; zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika alınmış, 90x40x0,5 mm boyutlarında Ck75 numune sac malzemeye Erichsen şişirme deneyi uygulanmıştır. Kalınlık dışındaki numune boyutları küçük olmakla birlikte, bu çalışmada aynı malzeme ve kalınlık için ortalama Erichsen sabiti (ES) 3,88 mm, ortalama en büyük yük 9471 N olarak tespit edilmiştir. Elde edilen değerlerin farklılıkları büyük olmamakla beraber, bu farklılığın gerek numunelerin yüzeylerinin zımparalanarak temizlenmesinden ve gerekse donanımlardaki boyut farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

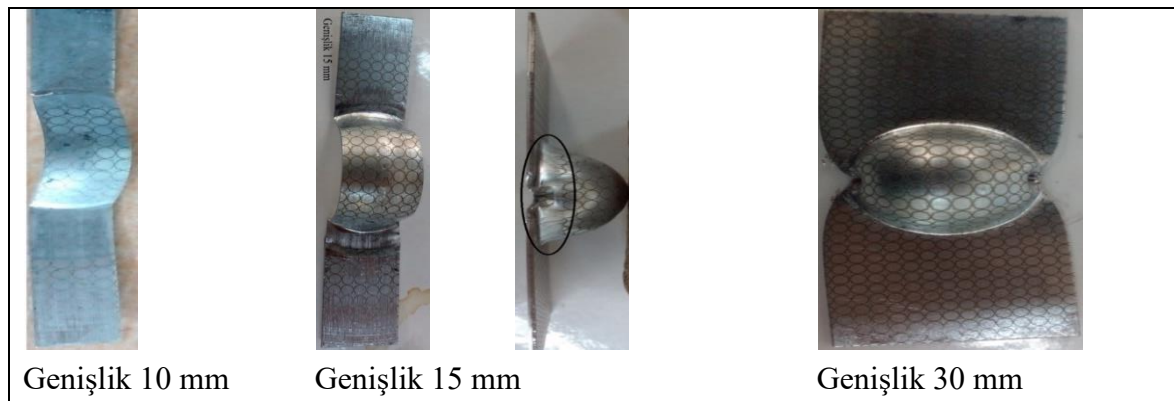
Aydın, M. ve arkadaşlarınca hazırlanan Erichsen test donanımında kalıp köşe kavislerinin 0,81 mm ve dişi kalıp delik çapının 25,4 mm alındığı tespit edilmiştir. Bilindiği gibi test esnasında numune malzemenin kalıp içine akışının kolaylaşmasını sağlayan kavisin bu çalışmadakine göre yüzde 6 mm büyük alınmasının ES değerini büyüttüğü anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, zımba ile dişi kalıp arasındaki kalıp boşluğu bu çalışmada ISO 20482

önerilerine uygun olarak 3,5 mm alınmış, halbuki diğer çalışmada bu boşluk değeri 2,7 mm olarak kalıbın üretildiği görülmüştür. Yine bilindiği gibi kalıp boşluğunun azalması yükün artmasına yol açmaktadır. Bu farklılıkların ve literatür çalışmasında numunelerin test öncesi zımpara ile yüzey temizliğinin yapılmasının, numunelere basan plakaların yüzey pürüzlülüklerinin çalışmada [25] belirtilmemiş olması da dikkate alınır; bu çalışmada elde edilen ES değerinin ve yükün düşük değerde kalmasının son derece makul bulunduğu ifade edilebilir.

Ayrıca çalışmada [25] Ck75 malzemenin pot çemberi arasında kalarak baskı uygulanan boyutları hakkında ve şişirme testinin yağlayıcı etkisinde yapılıp yapılmadığına dair bilgiler de elde edilememiştir. Bu deneyde, sağlıklı Erichsen şişirme testi verileri, numune malzemeye baskı kuvvetinin uygulandığı, diğer bir ifadeyle pot çemberinin numune malzemeye baskı uyguladığı kısmının genişliği zımba çapının en az iki katı olması gerektiği kanaati oluşmuştur (Resim 5.5).

5.2.13. DP600 çelik sac numune malzemeye yapılan Erichsen testi ve deneylerinin sonuçları

Kalınlığı 1 mm olan DP600 numuneler ile her biri için 3 defa tekrarlanan 10 mm, 15 mm, 20 mm ve 25 mm genişlikteki numunelerde Erichsen testleri sağlıklı bir şekilde yapılamamıştır (Resim 5.6). 10 kN baskı kuvvetinde numune malzemenin her yönden kalıp deliği içine aktığı gözlenmiştir. Genişliği 48 mm olan DP600 numune malzemenin Erichsen testinde numunenin pot çemberi baskısı altında kalan kısmının yeterli olması deneyin sağlıklı olması ile sonuçlanmıştır (Resim 5.7).



Resim 5.6. Kalınlık 1 mm, genişlik 35 mm DP 600 sac numunelerden kalıp deliği içine akan örnekler



Resim 5.7. Genişlik ölçüsü 48 mm olan DP600 sac numunenin Erichsen testi

DP olarak adlandırılan çift fazlı çelikler yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler ile karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemete, pekleşme oranına, enerji absorbe edebilme yeteneğine ve daha düşük akma dayanımına sahip olması dolayısıyla kolay şekil alabilmektedirler [125]. Çift fazlı çelikler yumuşak ferrit ve sert martensit içeren düşük karbonlu çeliklerdir [17]. Resimde çerçeve içinde görüldüğü gibi numune malzeme kalıp deliği kavisinden delik içine akarken numune yüzeyinin de sürtünmeyle birlikte, yüzeydeki dairesel ızgaraların silindiği görülmüştür.

5.2.14. Al 5754 numune malzemeyle yapılan deneyde zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika, parametrelerinde anlık yük değişimi - Erichsen Sabiti ilişkisi

Kalınlığı 1 mm olan ve her biri için 3 defa tekrarlanan Al 5754 sac numunelerden 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm ve 40 mm genişlikteki numunelerle Erichsen testleri sonucu Çizelge 5.50’de gösterilen veriler elde edilmiştir. Bu veriler esas alınarak zımba çapının yarısı, zımba çapına eşit ve zımba çapının iki katı deneyler örnek alınarak anlık yük değişimleri ve Erichsen sabiti incelenmiştir.(Çizelge 5.51, Çizelge 5.52, Çizelge 5,53).

Çizelge 5.50. Al 5754 Erichsen Şişirme Testin de elde edilen veriler

AL5754 alüminyum alaşımı sac malzeme Erichsen testleri (Kalınlık 1mm, Zımba çapı 20 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dak.)									
Numune Genişliği, 10 mm		Numune Genişliği, 15 mm		Numune Genişliği, 20 mm		Numune Genişliği, 25 mm		Numune Genişliği, 30 mm	
Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
1957	6,5507	3084	7,437	4493	8,2663	4784	7,603	5409	7,4828
1967	6,5547	3061	7,4152	4502	8,342	4784	7,7705	5400	7,4713
1927	6,4849	3292	7,9637	4461	8,2883	4775	7,7902	5536	7,622
Ort. En. Büyük Yük : 1950,33 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 6,5301 mm	Ort. En. Büyük Yük : 3145,66 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 7,6053 mm	Ort. En. Büyük Yük : 4485,33 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 8,2988 mm	Ort. En. Büyük Yük : 4781 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 7,7212 mm	Ort. En. Büyük Yük : 5448,33 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 7,5253 mm
Numune Genişliği, 35 mm		Numune Genişliği, 40 mm							
Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm						
6238	7,7155	6557	7,5211						
6093	7,4599	7016	7,941						
6117	7,5596	6442	7,4216						
Ort. En. Büyük Yük : 6149,33 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 7,5783 mm	Ort. En. Büyük Yük : 6671,66 N	Ort. Erichsen Sabiti, ES, : 7,6279 mm						

Çizelge 5.51. Al 5754 numunenin Erichsen Testinde anlık yük ve Erichsen Sabiti verileri

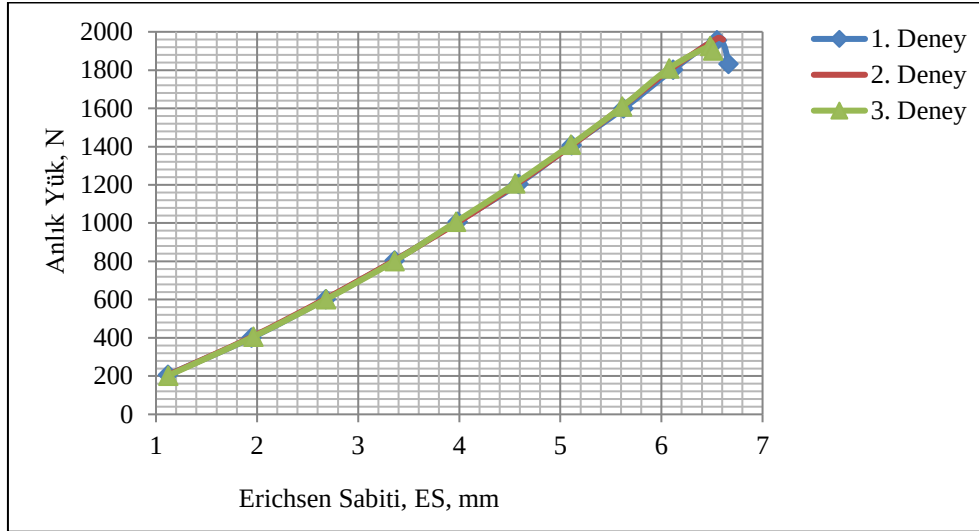
Zımba Çapı 20 mm, Zımba Hızı 6,25 mm/dakika, Numune genişliği 10 mm Al 5754 Anlık Yük Değişimi-Erichsen Sabiti					
1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Anlık Yük Değişimi, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Anlık Yük Değişimi, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Anlık Yük Değişimi, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
207	1,1207	204	1,1142	203	1,123
401	1,9475	400	1,9275	407	1,9667
603	2,6802	602	2,6681	602	2,6854
805	3,3613	800	3,3417	802	3,3607
1007	3,9859	1010	4,0044	1007	3,9682
1205	4,5858	1207	4,5742	1208	4,5555
1408	5,1115	1410	5,1222	1411	5,1076
1600	5,6263	1604	5,602	1610	5,6135
1803	6,1176	1800	6,0784	1810	6,0777
1957	6,5507	1967	6,5547	1927	6,4849
1833	6,6646	1959	6,6097	1903	6,5131

Ortalama En Büyük Yük, $F=1950$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27}= 6,53$ mm

Çizelge 5.51 değerleri ve Şekil 5.45’de verilen ilişki incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 6,00 mm’yi aştıktan sonra cihazın dijital

ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 1950 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 6,53 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.45. Al 5754 numunenin zımba çapı 20 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune genişliği 10 mm parametrelerinde anlık yük - Erichsen Sabiti ilişkisi

Çizelge 5.52. Al 5754 numunenin Erichsen testinde anlık yük ve Erichsen Sabiti verileri

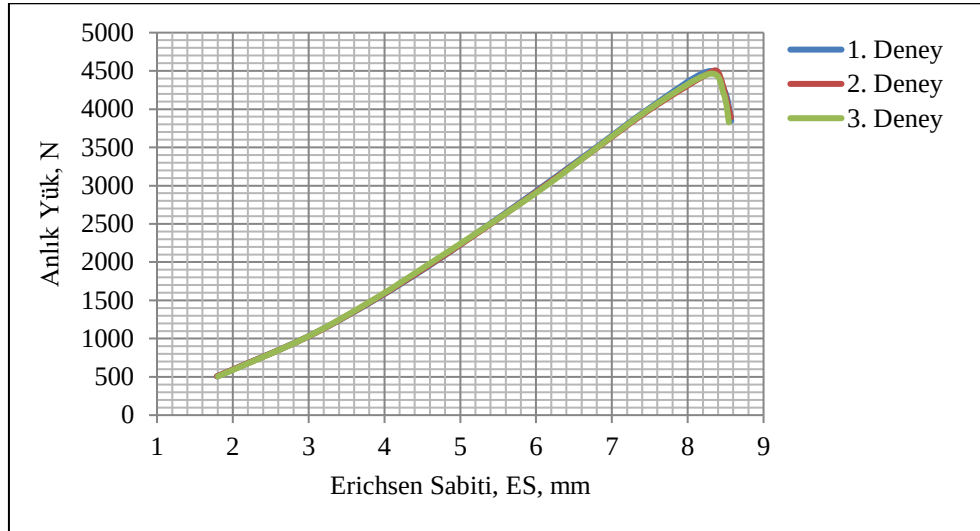
Zımba Çapı 20 mm, Zımba Hızı 6,25 mm/dakika, Numune genişliği 20 mm Al 5754 Anlık Yük Değişimi-Erichsen Sabiti					
1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Anlık Yük Değişimi, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Anlık Yük Değişimi, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Anlık Yük Değişimi, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
506	1,7906	508	1,7915	506	1,8036
1014	2,9632	1013	2,9645	1007	2,9488
1506	3,8705	1506	3,8615	1518	3,8672
2009	4,6757	2003	4,6555	2020	4,6577
2503	5,3948	2503	5,41	2522	5,4305
3004	6,107	3018	6,145	3001	6,1367
3506	6,8003	3513	6,832	3522	6,8382
4008	7,4884	4003	7,5145	4021	7,5243
4493	8,2663	4502	8,342	4461	8,2883
4237	8,4871	4419	8,4293	4202	8,4737
3848	8,5735	3889	8,5694	3828	8,5424

Ortalama En Büyük Yük, $F=4485$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27} = 8,29$ mm

Gerek Çizelge 5.52 değerleri ve gerekse Şekil 5.46'da verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 8,00 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 4485 N olarak en büyük

ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 8,29 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.46. Al 5754 numunenin zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune genişliği 20 mm parametrelerinde anlık yük- Erichsen Sabiti ilişkisi

Çizelge 5.53. Al 5754 numunenin Erichsen testinde anlık yük ve Erichsen Sabiti verileri

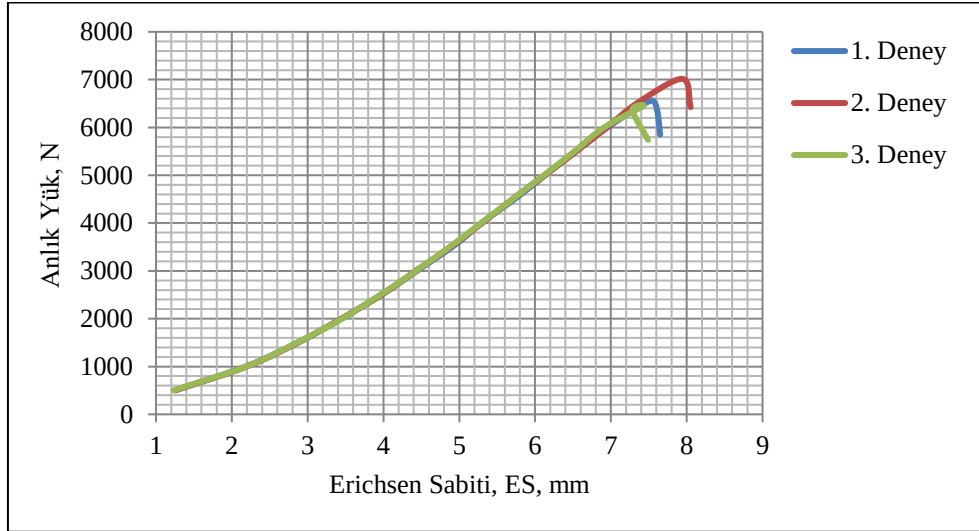
Zımba Çapı 20 mm, Zımba Hızı 6,25 mm/dakika, Numune genişliği 40 mm Al 5754 Anlık Yük Değişimi- Erichsen Sabiti					
1. Deney		2. Deney		3. Deney	
Anlık Yük Değişimi, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Anlık Yük Değişimi, N	Erichsen Sabiti, ES, mm	Anlık Yük Değişimi, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
502	1,2538	503	1,2556	503	1,234
1011	2,2002	1008	2,2108	1004	2,1956
1516	2,8865	1525	2,9044	1510	2,872
2009	3,4593	2033	3,4789	2014	3,4693
2531	4,0023	2506	3,9814	2531	3,9878
3005	4,4468	3040	4,4597	3016	4,442
3529	4,9308	3506	4,8894	3521	4,8908
4029	5,3177	4006	5,3048	4029	5,3116
4555	5,7745	4538	5,7323	4508	5,7088
5065	6,1842	5003	6,1275	5018	6,1296
5502	6,5445	5515	6,5533	5502	6,5194
6022	6,9743	6023	6,9635	6010	6,9177
6557	7,5211	6511	7,3482	6442	7,4216
6369	7,6072	7016	7,941	6359	7,2841

Ortalama En Büyük Yük, $F = 6671$ N

Ortalama Erichsen Sabiti, $ES_{27} = 7,62$ mm

Gerek Çizelge 5.53 değerleri ve gerekse Şekil 5.47'de verilen grafik incelendiğinde; her üç deneyde de zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 7,00 mm'yi aştıktan sonra cihazın

dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaşıldığı, 6671 N olarak en büyük ortalama yükün elde edildiği anda ise malzemenin 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızı için Erichsen Sabitinin ortalama 7,62 mm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.47. Al 5754 numunenin zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika ve numune genişliği 40 mm parametrelerinde anlık yük- Erichsen Sabiti ilişkisi

5XXX serisi Al-Mg alaşımları sahip oldukları yüksek mukavemet, uzama, şekil verilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve yüksek korozyon direnci özellikleriyle farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. AA 5754 alaşımların yüksek şekillendirilebilirlik yetenekleri sahip oldukları Mg içeriğinden kaynaklanmaktadır [113]. Literatür araştırmasında Al5754 malzemenin Erichsen şişirme testi ve sonuçları ile ilgili bir çalışma bulunamamıştır. Bu nedenle bu çalışmada elde edilen sonuçların mukayesesinin yapılma imkânı olamamıştır.

5.2.15. Zımba çapı 20 mm ve zımba hızı 6,25 mm/dakika ile yapılan testte ortalama en büyük yük – numune genişlik değişimi ilişkisi

Erichsen testinde, zımba çapı 20 mm ve zımba hızı 6.25 mm/dakika parametrelerinde numune malzemenin genişlik değişimi ile ortalama en büyük yük değişimi ilişkisi incelenmiş ve Çizelge 5.54'deki veriler tespit edilmiş, bu veriler ile elde edilen ilişki Şekil 5.48'de gösterilmiştir.

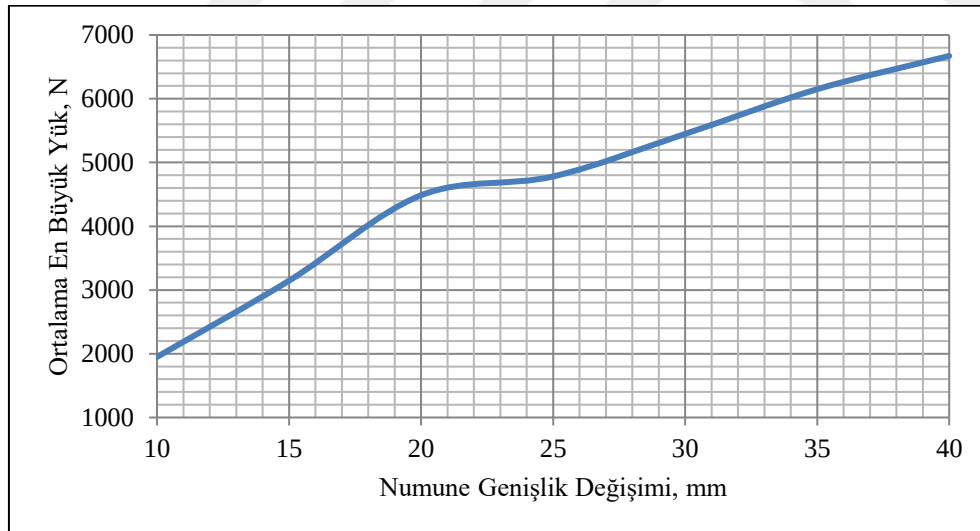
Çizelge 5.54. 20 mm zımba çapında ve 6,25 mm/dakika hızda ortalama en büyük yük-
numune genişlik değişimi verileri

Genişlik, mm	Ortalama En Büyük Yük, N	Erichsen Sabiti, ES, mm
10	1950,33	6,5301
15	3145,66	7,6053
20	4485,33	8,2988
25	4781	7,7212
30	5448,33	7,5253
35	6149,33	7,5783
40	6671,66	7,6279

Ortalama En Büyük Yük, $F = 4661 \text{ N}$

Erichsen Sabiti, $ES_{27} = 7,55 \text{ mm}$

Gerek Çizelge 5.54 değerleri ve gerekse Şekil 5.48’de verilen grafik incelendiğinde; 20 mm zımba çapı ve 6,25 mm/dakika hızda yapılan testte 10 mm numune genişliğinde ortalama en büyük yük 1950 N olarak gerçekleşirken, 15 mm genişlikte 1,6 artış oranı ile yük 3145 N olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak; Numune genişliğinin artması ile ortalama en büyük yükte ki artış oranında bir azalma görüldüğü tespit edilmiştir.



Şekil 5.48. Al 5754 numunenin zımba çapı 20 mm, zımba hızı 6,25 mm/dakika parametrelerinde numune genişliği ile ortalama en büyük yük arasındaki ilişki

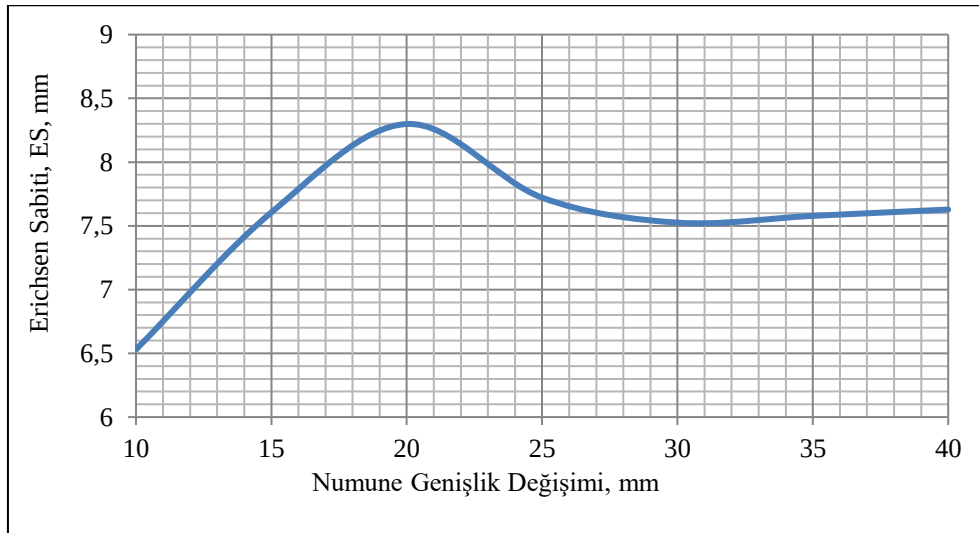
5.2.16. Zımba çapı 20 mm ve zımba hızı 6,25 mm/dakika ile uygulanan testte numune genişlik değişimi – Erichsen Sabiti, ES ilişkisinin incelenmesi

Erichsen testinde, zımba çapı 20 mm ve zımba hızı 6.25 mm/dakika parametrelerinde numune malzeme genişlik değişimi ile Erichsen sabiti arasındaki ilişki incelenmiş ve Çizelge 5.55’deki veriler bulunmuş, bu veriler ile elde edilen grafik Şekil 5.49’da verilmiştir.

Çizelge 5.55. Ortalama en büyük yük-numune genişlik değişimi verileri

Numune Genişlik, mm	10	15	20	25	30	35	40
Erichsen Sabiti, ES, mm	6,5301	7,6053	8,2988	7,7212	7,5253	7,5783	7,6279

Çizelge 5.55 ve Şekil 5.49 incelendiğinde, 10 mm enli numunenin testinde Erichsen sabiti 6,5 mm tespit edilmiş, numune genişliğinin periyodik artışı ile beraber Erichsen sabitinin artarak, zımba çapına eşit genişlikte en yüksek değere ulaşmış ve 8.2 mm olarak gerçekleşmiştir. Numune genişliği periyodik olarak 40 mm’ye kadar artması ile birlikte Erichsen sabiti değerinde ihmal edilebilecek küçük sapmalar dikkate alınmazsa düzgün bir düşüşle 7.6 mm olmuştur. Sonuç olarak, Erichsen sabitinin en yüksek değerinin, numune malzemenin genişliğinin zımba çapına eşit olduğu durumda olması dikkat çekici olmuştur.

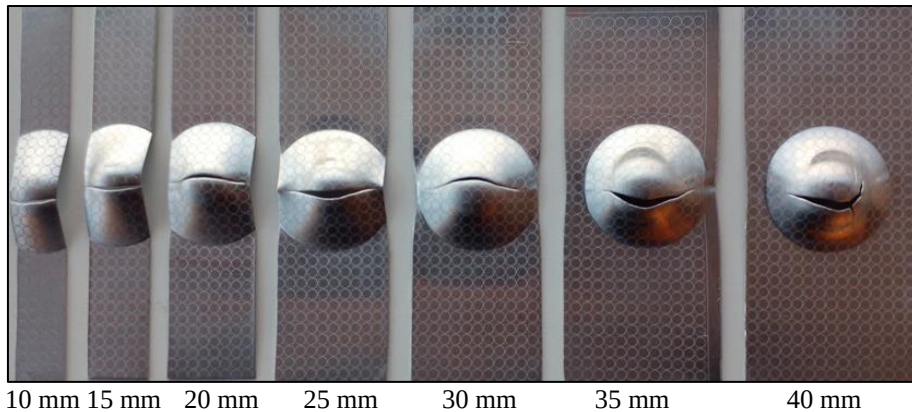


Şekil 5.49. Al 5754 numunenin Zımba çapı 20 mm, Zımba hızı 6,25 mm/dakika parametrelerinde numune genişliği ile Erichsen Sabiti arasındaki ilişki grafiği

5.3. Şekillendirme Sınır Diyagramları, (ŞSD)

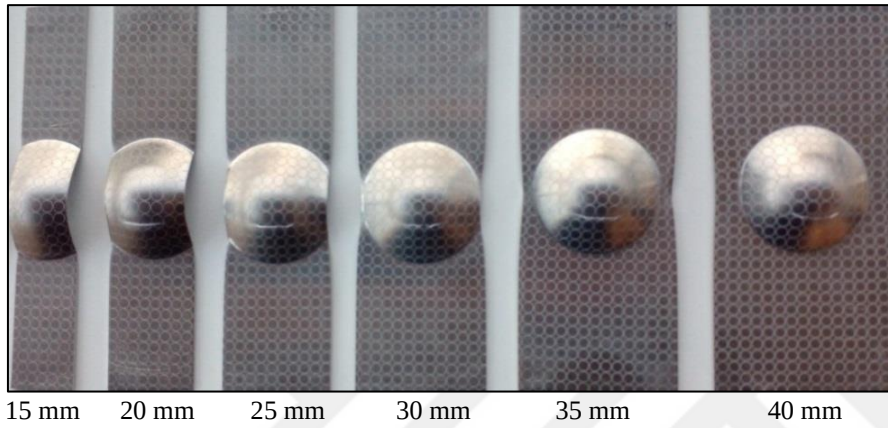
Sac metal şekillendirme endüstrisinde şekillendirilebilirlik önemli bir alan teşkil etmektedir. Şekillendirme sınır diyagramı farklı geometrideki numuneler sayesinde farklı şartlar altında birim uzamaların değerlendirilerek bir diyagramda gösterilmesidir. Şekillendirme sınır diyagramı sayesinde malzeme davranışı ve kritik bölgeler analiz edilebilmektedir. Seri üretime başlamadan önce bir dizi deneyler yapılarak malzemenin istenilen şekli alıp alamayacağı, kusurların oluşup oluşmayacağı, kalıpların veya modelin hangi bölgesinin riskli olduğu gibi durumlar detaylı olarak araştırılır. Bu araştırmada kullanılan eğriye de şekillendirilebilirlik sınır diyagramı denilmektedir [114].

Son 50 yılda ŞSD etkileyen parametrelerin belirlenmesi ve ŞSD'nın elde edilmesiyle ilgili araştırmalar yapılmıştır. Yapılan araştırma sonuçları ŞSD'nın malzeme şekillendirme tahmininde önemli bir araç olduğunu ortaya koymuştur [116]. ŞSD'nın çizdirilebilmesi için sac metal yüzeyinde şekillendirme sırasında farklı uzama şartlarının oluşturulması gerekmektedir. Bu uzama şartları farklı test yöntemlerinin biri veya birkaçı birlikte kullanılarak elde edilmektedir. Kullanılan test metoduna uygun ölçülerde hazırlanan numunelerin yüzeyine fotokimyasal, elektrokimyasal vb. desen oluşturma tekniklerden biri kullanılarak desenler oluşturulur. Kullanılan dairesel desenlerin bütün yüzeyi kaplayacak şekilde birbirine çok yakın fakat temassız veya karelerle bölünmüş alanların içine çizilen desenler gibi birkaç farklı yapıda çeşitleri bulunmaktadır [115].



Resim 5.8. Al 1050 numunelerin yüzey gridleri ve Erichsen Şişirme Testinin uygulanmış durumu

Bu çalışmada ŞSD çiziminde, zımba hızı 6,25 mm/dakika, zımba küre çapı 20 mm parametrelerinde yapılan deneylerin verileri tercih edilmiştir. Numune boy ölçüleri, Al1050 için 90 mm standart boy ve kalınlık 0,50 mm, Al5754 için 90 mm standart boy ve kalınlık 1 mm tercih edilmiştir. Genişlik ölçüleri, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm ve 40 mm olarak kesilen numunelerin bir yüzeylerine, lazer ışını ile, çapları 2,5 mm olan gridler çizilmiş, hazırlanan numunelere Erichsen testi uygulanmıştır (Resim 5.8 ve Resim 5.9).



Resim 5.9. Al5754 numunelerin yüzey gridleri ve Erichsen Şişirme Testinin uygulanmış durumu

Erichsen Şişirme testinde numune malzemede oluşan birim uzama hesaplamaları için mühendislik uzama ve gerçek uzama formülleri olmak üzere iki yol kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, mühendislik birim uzama değerleri, Eşitlik 3.49, Eşitlik 3.50'deki formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.57 ve Çizelge 5.58'de her iki numunenin büyük ve küçük uzama değerleri verilmiştir. Hesaplanan bu değerlerle her iki deney grubunun Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD) oluşturulmuştur (Şekil 5.51 ve Şekil 5.52).

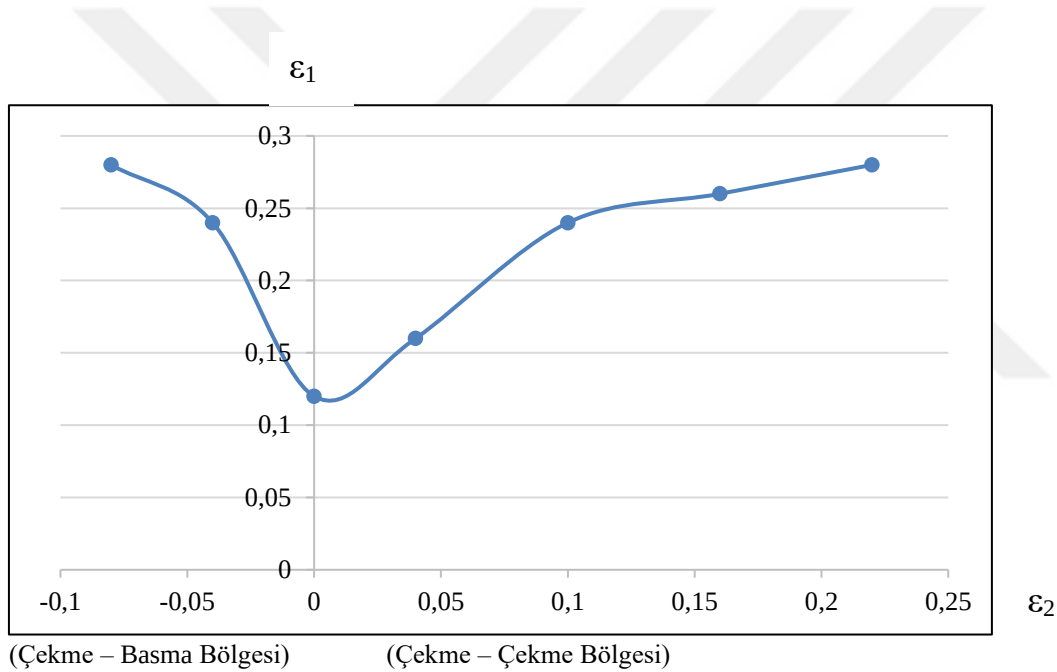
5.3.1. Al 1050 (%99,53) Şekillendirme Sınır Diyagramı ve deneylerinin sonuçları

Şekillendirme Sınır Diyagramında, eğrinin altında kalan bölge güvenli bölgeyi, üstte kalan alan bölge de şekillendirmede başarısız olunan bölgeyi ifade etmektedir [99]. Al 1050 ve Al 5754 numune malzemelerin ŞSD'ları Çizelge 5.56, Şekil 5.50, Çizelge 5.57 ve Şekil 5.51'de verilmiştir.

Çizelge 5.56. Al 1050 numunelerinin ŞSD ve büyük-küçük birim uzama değerleri (ϵ_1 ve ϵ_2 verileri)

Al 1050 Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD) verileri							
Numune Genişliği, mm	10	15	20	25	30	35	40
ϵ_1	0,28	0,24	0,12	0,16	0,24	0,26	0,28
ϵ_2	-0,08	-0,04	0	0,04	0,1	0,16	0,22

Gerek Çizelge 5.56’da verilen değerler gerekse Şekil 5.50’deki grafik incelendiğinde iki eksenli çekme–basma bölgesinde numune genişliği 10 mm de sac malzemenin yırtılmadan önce en büyük uzamanın 0,28 mm/mm olarak şekillendirilebildiği gözlenmiştir.



Şekil 5.50. Al1050 numune malzemenin ŞSD ve büyük-küçük birim uzama değerleri ve Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)

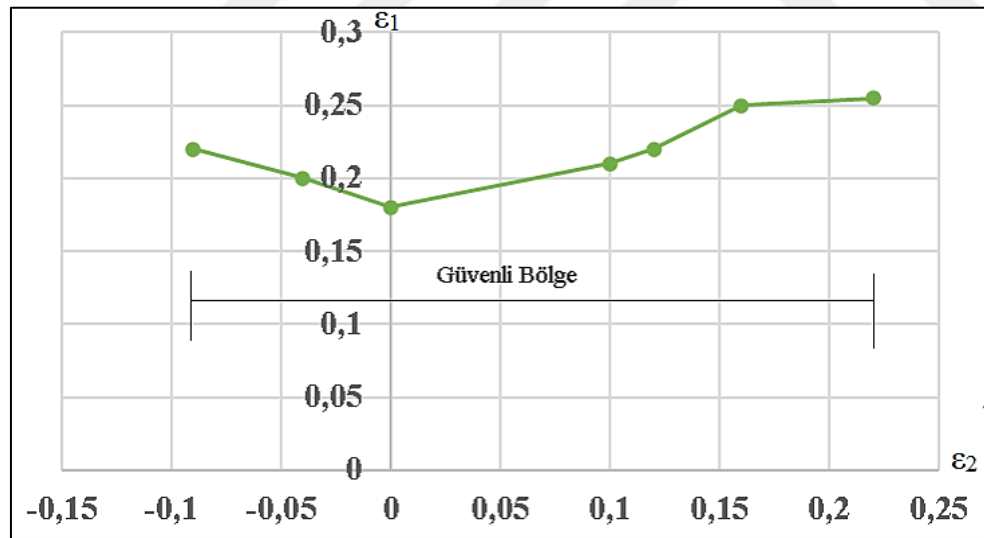
Numune malzeme genişliğinin 20 mm olduğu ve tek eksenli çekme bölgesinde numunenin 0,12 mm/mm şekillenebildiği tespit edilmiştir. İki eksenli çekme – çekme bölgesinde numune malzemenin 0,26–0,28 mm/mm aralıklarında şekillenebildiği tespit edilmiştir.

5.3.2. Al 5754 Şekillendirme Sınır Diyagramı ve deneylerinin sonuçları

Çizelge 5.57. Al5754 numunelerinin ŞSD ve büyük-küçük birim uzama değerleri (ϵ_1 ve ϵ_2 verileri)

Al 5754 Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD) verileri							
Numune Genişliği, mm	10	15	20	25	30	35	40
ϵ_1	0,22	0,2	0,18	0,21	0,23	0,25	1,255
ϵ_2	-0,09	-0,04	0	0,1	0,12	0,16	0,22

Çizelge 5.57’de verilen değerler ve Şekil 5.51’deki grafik incelendiğinde iki eksenli çekme – basma bölgesinde numune genişliği 10 mm de sac malzemenin yırtılmadan önce en büyük uzamanın 0,22 mm/mm olarak şekillendirilebildiği gözlenmiştir. Numune malzeme genişliğinin 20 mm olduğu ve tek eksenli çekme bölgesinde numunenin 0,18 mm/mm şekillenebildiği tespit edilmiştir. İki eksenli çekme-çekme bölgesinde numune malzemenin 0,25–0,255 mm/mm aralıklarında şekillenebildiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.51. Al 5754 numune malzemenin ŞSD ve büyük-küçük birim uzama değerleri ve Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, tam otomasyonlu Erichsen şişirme testi donanımının servomotor ve servoredüktör ikilisinden elde edilen kuvvetle çalışan farklı bir tasarımı yapılmış ve donanımın sahip olduğu niteliklerin tespiti bakımından koşullarda denenmiştir. Farklı koşullarda deneme amacıyla günümüzde imalat sanayisinde yaygın olarak tercih edilen Al 1050 ve Al 5754 alüminyum sac malzemeler öncelikle donanım vasıtasıyla Erichsen şişirme testlerine tabi tutulmuştur. Tasarımı ve imalatı çalışma kapsamında gerçekleştirilen Erichsen Testi donanımının kullanıcı müdahalesi olmaksızın son derece mantıklı ve kabul edilebilir Erichsen Sabiti-ES değerleri verecek nitelikte bulunduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, donanımın tekralanabilirlik ve güvenilirlik niteliklerine de haiz olduğu elde edilen grafiklerin tutarlılığı ile ispat edilmiştir.

Baskı plakası, küresel oynak yüzeyleri birbiri içine oturan iki parçalı aparat olarak imal edilmiş ve sac numunelere tam paralel baskı sağlama gerçekleştirilmiştir.

Erichsen Sabiti'nin doğru tespiti önemli hedeflerden biri olarak çalışmada dikkate alınmış, numune malzemenin boyun verme aşamasında ve yırtılma esnasında, zımbanın anında durmasının önemine uygun kontrol yeteneğinin bulunması, donanımın tasarımı ve imalatında elde edilmiştir. Zımbanın numuneye temas ettiği anda ES değeri başlangıcı sıfırlanmış, zımbanın hem anlık malzemeye girme derinliği hem de zımbada bu esnada oluşan anlık yük değişimi ölçülebilmektedir.

Zımba kuvveti ve baskı plakasının baskı kuvvetinin kontrolü için yük hücrelerinden faydalanılmıştır. Zımbanın konumu ve sac numuneye uyguladığı kuvvetin kontrolü yük hücresi ile yapılırken, baskı plakasının numuneyi sıkıştırma kuvveti servomotor / servoredüktörün döndürme momenti aracılığıyla temin edilmiştir. Gerek zımbanın ileri yönde boşluksuz ilerlemesinde gerek baskı plakasının istenilen yükte sabit kalmasında servomotor ve servoredüktörden tahrik alan ve literatürde yer alan benzer Erichsen testi yapabilen cihazlardan farklı olarak bilyalı vida somun çiftleri, iki ayrı takım halinde donanımın yapısına monte edilmiştir.

Farklı koşulların gözlemlenmesi amacıyla Erichsen Şişirme donanımından aşağıdaki ilişkilerin incelenebildiği sayısal veriler elde edilmiş, grafik temsilleri sağlanmış ve bulgular yorumlanmıştır.

- a. Yük değişimi – Erichsen Sabiti, ES, ilişkisi
- b. Yük değişimi - Numune genişlik değişimi ilişkisi
- c. Erichsen Sabiti – Numune genişlik değişimi ilişkisi
- d. Birim şekil Değişimi (BşD) ve şekillendirme Sınır Diyagramı (şSD)
- e. Zimba apı değişimi - Erichsen Sabiti ilişkisi
- f. Zimba ileleme hızı - Erichsen Sabiti ilişkisi

Donanımda kullanıcı istediği bir değerde zimba ilerleme hızını ayarlayabilmekte, ISO 20482 standardı kapsamında kalan dört farklı zimba ve kalıp seti ile deney yapabilmekte, zimbaların ve kalıp setlerinin donanıma bağlanması modüler yapının getirilmesiyle hızlı, gereken doğrulukta ve pratik bağlama imkânı bulunmaktadır. Ayrıca, sac metal numunelere uygulanacak baskı yükünün ayarlanabilir olduğu kumanda donanım ve yazılımı cihaza yerleştirilmiş, baskının numunelere tüm yüzey boyunca paralel olarak dağılım göstermesini elde etmek maksadıyla, ticari ve akademik ortamlarda bulunan donanımlarda bulunmayan küresel oynar mafsallı plakalar yerleştirilmiştir.

Donanım, mevcut haliyle sadece ticari amaçlı testler için değil aynı zamanda akademik çalışmalarda yeni sac metal numunelerin ES değerinin hassas olarak temininde, aynı veya farklı sac metal malzemelerin muhtelif kaynak yöntemleriyle birleştirilmesi sonrasında kaynaklı bölgenin dayanımının incelendiği ve literatürde gittikçe yaygınlaşan araştırmalara yol açacaktır. Diğer taraftan, donanım üzerinde yapılacak küçük ölçü değişimleriyle, kalıplama boşluğunun, sac metal malzemeden numune şekillendirme sıcaklığının, numune sertliğinin, dişi kalıp kavis yarıçapının değişiminin ES ile olan münferit veya çok yönlü ilişkilerinin kurulabileceği bir donanım tasarımı ve imalatı başarılmıştır.

Çalışmanın devamı olarak deneysel verilerin saklanabildiği bir ara yüz ortamı üzerinden tez metninde yer alan tüm grafiklerin bilgisayar ortamında otomatik olarak izdirilmesini sağlayacak donanım ve yazılım eklenmesi son derece gerekli bir adım olarak grlmştir. İlave olarak, numunenin yırtılma başlangıcını optik destekli veya lazer ışığının yansıma motifine dayalı tespit edilebildiği nitelik arttırıcı yöntemlerin ve ilgili araçlarının mevcut yapıya eklenmesi, donanımın hem ticari rekabet gücünü geliştirecek hem de akademik çalışmaların niceliğinde ve niteliğinde önemli artışlar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: International Standart ISO 20482 Second edition (2013-11-15). *Metallic materials - heet and strip - Erichsen cupping test*, 2 (2). Web: <https://www.sis.se/api/document/preview/916777/>. Son Erişim Tarihi: 25.09.2022.
2. İnternet: Mansouri, R. (2006). Method of Erichsen Cupping Test. *JIS- Japanese Industrial Standarts, Standarts Manager Web: Standarts List*, 67(2550- Z2247). Web: [https://www.academia.edu/30606932/Standards_Manager_Web_Standart ds List JIS. Japanese_Industrial_Standards](https://www.academia.edu/30606932/Standards_Manager_Web_Standart_ds_List_JIS_Japanese_Industrial_Standards). Son Erişim Tarihi: 25.09.2022.
3. İnternet: ASTM International standards, (2010-Dec.-31), *ASTM E643-84, Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material*.(1). Web: <https://www.astm.org/e0643-84r00.html>. Son Erişim Tarihi: 16.08.2022.
4. Talapatra, A., Choudhary R. V., Malhotra, K., Vyas, M., Jamal, A., Singhi M. K. (2013). Formability characteristics of different sheet metals by Erichsen cupping testing with NDT methods. *Manager's Journal on Material Science*, 1(1), 14-18.
5. İnternet: ISO 20482. First Edition, (2003-07-01). *Metallic materials — Sheet and strip — Erichsen cupping test, International Standard, First edition*. Web: <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:20482:ed-1:v1:en>, Son Erişim Tarihi: 16.08.2022.
6. Nayar, A. (2005). *Testing of metals. Erichsen cupping test for metallic sheet and strip*. (First Edition). India, McGraw-Hill Professional, AccessEngineering, 3, 30-35.
7. İnternet: Testing Erichsen (1910). *Sheet Metal Testing*. Web: <https://www.Erichsen.de/sheet-metal-testing/deep-drawing-test>. Son Erişim Tarihi: 16.08.2022.
8. İnternet: Erichsen (1910). *Erichsen USA Erichsen, Inc*. Web: <https://www.Erichsen-usa.com/>. Son Erişim Tarihi: 16.08.2022.
9. Kim, Y., I., Kim, J., H., Lee, M.,Y., Moon, Y.,H., Kim, D. (2011). Formability evaluation of tailor-welded blanks of boron steel sheets by Erichsen cupping test at elevated temperature. *Transactions of Materials Processing*, 20, 568-574.
10. Nawawi, I., I. (2009). *Finite element modeling of Erichsen Olsen sheet metal formability test*. Master Thesis, Universiti Malaysia, Pahang. 27-30.
11. Reddy, M. R. N., Theja, M. S., & Tilak M. G. (May-June 2013). Modified Erichsen Cupping Test for Copper, Brass, Aluminium and Stainless Steel. *The SIJ Transactions on Industrial, Financial & Business Management (IFBM)*, 1, 2.
12. Kaftanoglu B., Alexander, J., M. (1961). An Investigation of the Erichsen Test. *Journal of the Institute of Metals*, 90, 457-470.
13. Hosford, F., Caddell, R., M. (1983). *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*. (Third Edition), Cambridge: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 295-303.

14. Hawtin, L., R., Parkes, G., M. (1970). (First edition). *Erichsen Test for Formability of Metal Sheet*. Sheet Metal Industries, Cambridge: Cambridge University Press, 433-543.
15. Gronostajski, J., Banasiak, C. (1976). The Effect of Anisotropic Plasticity and Work Hardening on the Sheet Metal Draw Ability. *Sheet Metal Forming and Energy Conservation, American Society of Metals*, 310-450.
16. Çelik, G., Kaftanoğlu, B., Karadoğan, C., Alkaş. (2011). C.O. AA2024 Alüminyum alaşımı için şekillendirilebilirlik sınır diyagramlarını etkileyen parametrelerin incelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 12(1), 28 – 33.
17. Çavuşoğlu, O., Gürün, H. (2014). Deformasyon Hızının DP600 ve DP780 Sac Malzemelerin Mekanik Özelliklerine ve Derin Çekme İşlemine Etkisinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4), 777-784.
18. Dengiz, C. G., Yıldızlı, K., Altınordu, B. (2014). Desenli Çelik Sacların Şekil Alma Kabiliyetlerinin Araştırılması. *Mühendis ve Makina*, 55(650), 47-55.
19. Anket, O., Koruvatan, T., Ay, İ. (2011). Sac Malzemelerin Şekillendirilmesinde Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 14(1), 39-47.
20. Çetin, M., E., Demirtaş, M., Sofuoğlu, H., Cora, Ö. (Ağustos 2015). *Süperplastik Zn-22Al Alaşımında Ultra İnce Tane Oluşumunun Oda Sıcaklığının Şekillendirilebilirliğe Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*. XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 24-28.
21. Köksal, N.S., Uzkut, M. (2001). Çift fazlı bölgede tavllanmış Erdemir 6114 sacının biçimlendirilebilirlik parametrelerinin belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(3), 337-341.
22. Kanca, E., Günen, A. (2018). St 22 çeliğinin derin çekilebilirliğine etki eden parametrelerin ANOVA ile analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 22, 42-49.
23. Adamus, J., Winowiecka, J., Dyrer, M. (2017). Analysis Of Forming Thin Titanium Panels with Stiffeners. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(1), 173-180.
24. Hamada, A. S., Kisko, A., Khosravifard, A., Hassan, M.A., Karjalainen, L.P., Porter, D. (2018). Ductility and Formability of Three High-Mn TWIP Steels in Quasi-Static and High-Speed Tensile and Erichsen Tests. *ELSEVIER, Materials Science & Engineering A*, 712, 255–265.
25. Aydın, M., Wu, X., Çetinkaya, K., Yaşar, M., Kadı, İ. (2018). Application of Digital Image Correlation Technique to Erichsen Cupping Test. *ELSEVIER, Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21, 760–768.
26. Kocańda, A., Jasińsk, C. (2016). Extended Evaluation of Erichsen Cupping Test Results by Means of Laser Speckle. *ELSEVIER, Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16, 211-216.

27. Giuliano, G. (2015). Evaluation of the Coulomb Friction Coefficient in DC05 Sheet Metal Forming. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 61(12), 709-713.
28. Giuliano, G., Samani, F. (2013). Effect of Lubrication on The Erichsen Test. *Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications*, 365-366, 425-428.
29. Singh, M., Choubey, A. K., Sasikumar, C. (2017). *Formability Analysis of Aluminium Alloy by Erichsen Cupping Test Method*. ELSEVIER, 5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016), 4, 805– 810.
30. Singh, J., Kim, M.-S., Lee, S.-E., Kim, E.-Y., Kang, J.-H., Park, J.-H., Kim, J.-J., Choi, S.-H. (May 2018). Heterogeneity in Deformation and Twinning Behaviors Through the Thickness Direction in E-form Mg Alloy Sheets During an Erichsen Test. *ELSEVIER, Materials Science & Engineering A*, 729, 370–384.
31. Reddy, M. R. N., Theja, M. S., & Tilak M. G. (May-June 2013). Modified Erichsen Cupping Test for Copper, Brass, Aluminium and Stainless Steel. *The SIJ Transactions on Industrial, Financial & Business Management (IFBM)*, 1(2), 5-57.
32. Akrouf, M., Amar, M. B., Chaker, C., Dammak, F. (2008). Numerical And Experimental Study of The Erichsen Test for The Metal Stamping. *APEM Journal, Advanced in Production Engineering & Management* 3(2), 81-92.
33. Singh, J., Kim, M.-S., Choi, S.-H. (2018). *The Effect of Initial Texture on Deformation Behaviors of Mg Alloys Under Erichsen Test*. (The first online). Pittsburgh: Part of the The Minerals, Metals & Materials Series book series (MMMS), ResearchGate & In book: Magnesium Technology, 223-229.
34. Somekawa, H., Kinoshita, A., Washio, K., Kato, A. (2016). Enhancement of Room Temperature Stretch Formability via Grain Boundary Sliding in Magnesium Alloy. *ELSEVIER, Materials Science & Engineering A*, 676, 427–433.
35. Oleksik, V., Gavrus, A., Păunoiu, 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, Technologies in Machine Building*, ISSN 1221-4566.
36. Somekawa, H., Kinoshita, A., Kato, A. (2018). Effect of Alloying Elements on Room Temperature Stretch Formability in Mg Alloys. *ELSEVIER, Materials Science & Engineering A*, 732, 21–28.
37. Somekawa, H., Kinoshita, A., Kato, A. (May 2017). Great Room Temperature Stretch Formability of Fine-Grained Mg-Mn Alloy. *ELSEVIER, Materials Science & Engineering A*, 697, 217–223.
38. Kim, J., H., Lee, C., J., Lee, S., B., Ko, D., C., Kim, B., M. (January 2017). Integrated Hot Forming and Heat Treatment Process on Al6061 Tailor Rolled Blank. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 18(1), 127-132.

39. Ghorbel, O., Mars, J., Koubaa, S., Wali, M., Dammak, F. (2019). Coupled Anisotropic Plasticity-Ductile Damage: Modeling, Experimental Verification, and Application to Sheet Metal Forming Simulation. *ELSEVIER, International Journal of Mechanical Sciences*, 150, 548-560.
40. Sekban, D. M., Akterer, S. M., Saray, O., Ma, Z. Y., Purcek, G. (2018). Formability of Friction Stir Processed Low Carbon Steels Used in Ship Building. *ELSEVIER, Journal of Materials Science & Technology*, 34, 237–244.
41. Subramanian, R., Natarajan, B., Kaliyaperumal, B., Chinnasamy, R. (2019). Effect of MIG welding process parameters on microstructure and tensile behavior of hastelloy C276 using response surface methodology. *Materials Research Express, Material Research Express* 6(6), 1-18.
42. Guo, T., Liu, C., Ran, C., Dong, X. (2018). Effects of Spangle Size on Performances of Hot-Dip 55%Al-Zn Alloy Coating. *International Journal of Electrochemical Science*, 13, 9505–9519.
43. Wang, L., Song, B., Zhang, Z., Zhang, H., Han, T., Cao, X., Wang, H., and Cheng, W. (2018). Enhanced Stretch Formability of AZ31 Magnesium Alloy Thin Sheet by Induced Precompression and Sequent Annealing. *Materials, MDPI*, 11(8), 1-13.
44. Gavrus, A., Banu, M., Ragneau, E., Maier C. (2010). An Inverse Analysis of the Erichsen Test Applied for the Automatic Identification of Sheet Materials Behavior. *Engineering*, 2, 471-476.
45. Hyun, C. S., Kim, K. S., S.-H. Choi, S. -H., Shin, K. S. (2018). Crystal Plasticity FEM Study of Twinning and Slip in a Mg Single Crystal by Erichsen Test. *ELSEVIER, Acta Materialia*, 156, 342-355.
46. Masoumi, M., Echeverri, E. A. A., Silva, C. C., Aguiar, W. M., Gomes de Abreu, H. F. (June 2018). Improvement of Formability and Tensile Mechanical Properties of SAE 970X Steel by Controlled Rolling Process. *Jmr&t, Journal of Materials Research And Technology, JMRTEC*, 510(13). 1353-1365.
47. Kalkan, H., Hacaloğlu, T., Kaftanoğlu, B. (2016). Sac Şekillendirme İşleminde Sürtünmenin İncelenmesi. *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 14(2), 88-94.
48. Ghorbel, O., Mars, J., Koubaa, S., Wali, M., Dammak, F. (2019). Coupled Anisotropic Plasticity-Ductile Damage: Modeling, Experimental Verification, and Application to Sheet Metal Forming Simulation. *ELSEVIER, International Journal of Mechanical Sciences*, 150, 548-560.
49. Esmaeilpour H., Zarei-Hanzaki A., Eftekhari N, H.R. Abedi H.R., Ghandehari Ferdowsi M.R. (2020). Strain Induced Transformation, Dynamic Recrystallization and Texture Evolution During Hot Compression of An Extruded Mg-Gd-Y-Zn-Zr Alloy. *ELSEVIER, Materials Science & Engineering A*, 778, 1-5.
50. Timurkutluk B., Toros S., Onbilgin S., Korkmaz H. G. (2018). Determination of Formability Characteristics of Crofer 22 APU Sheets as Interconnector for Solid Oxide Fuel Cells. *ELSEVIER, International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 14638- 14647.

51. Rao B.V.S (2019). Determination of formability of bimetallic sheet using forming limit diagram. *ELSEVIER, ScienceDirect, ICMPC-2019, Materials Today: Proceedings*, 18, 2787–2795.
52. Logesh K., Bupesh Raja V. K. (2017). Formability analysis for enhancing forming parameters in AA8011/PP/AA1100 sandwich materials. *International Journal Advanced Manufacturing Technologies*, 93, 113–120.
53. Jasinski, C., Swillo, S., Kocanda, A. (2019). Application of two advanced vision methods based on structural and surface analyses to detect defects in the Erichsen cupping test. *PAN, Archives of Metallurgy and Materials*, 64(3), 1041-1049.
54. Jasinski, C., Kocanda, A., Morawinski, Ł., Swillo, O. S. (2019). A new approach to experimental testing of sheet metal formability for automotive industry. *Archives Metallurgy Materials*, 64(4), 1231-1238.
55. Basaeri A., Khorsand, H., Farsani, R., E., Hasanniya, M. H. (2020). Comparative experimental and numerical study on the mechanical properties, formability, and microstructure of two high strength steel sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(6), 1-11.
56. Choubey, A. K., Agnihotri, G., Sasikumar, C. (2017). Experimental and mathematical analysis of simulation results for sheet metal parts in deep drawing. *Springer, Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(9), 4215-4220.
57. Jiandi, D., Dongyan, D., Wenlong, Z., Zhou, X., Yongjin, G., Guozhen, C., Xiaohua, Y., Renzong, C., Yuanwei, H., Jinsong, T. (2018). Effect of CeLa addition on the mechanical properties of Al–Cu–Mn–Mg–Fe alloy. *Materials Science and Technology*, 34(8), 917-925.
58. Kamikawa, N., Morino, H. (2019). Quantitative analysis of load–displacement curves in Erichsen cupping test for low carbon steel sheet. *Springer Link, Metallurgical and Materials Transactions, A*, 50, 5023-5037.
59. Fann, K.-J., Su, J-Y. (2018). *Cold forming of Ni-Ti shape memory alloy sheet*. 4th International Conference on Advanced Engineering and Technology (4th ICAET), Materials Science and Engineering, Taiwan, 317.
60. Santos R. O., Pereira A. B., Butuc M. C., Vincze G., Festas A. J., Moreira L. P. (2019). Development of a device compatible with universal testing machine to perform hole expansion and Erichsen cupping tests. *ResearchGate, Machines, MDPI*, 8(1), 2.
61. Kılıç S., Öztürk F. (2017). Evaluation of formability under different deformation modes for TWIP900 steel. *Research article, Journal of Engineering Materials and Technology*, 139(3), 1-8.
62. Sekhar R. A. (17-19 December 2019). *Determining the formability of AA5052 sheets in annealed and H32 condition*. International Conference on Aerospace and Mechanical Engineering, Journal of Physics: Conference Series, Kerala/India, 1355, 012044.

63. Sorce F. S., Ngo S., Lowe C., Taylor A. C. (2019). Quantification of coating surface strains in Erichsen cupping tests, *Polymers, Journal Materials Science*, 54, 7997–8009.
64. Uriya Y., Yanagimoto J. (2017). Erichsen cupping test on thermosetting CFRP sheets. *International Journal Materials Form*, 10, 527–534.
65. Ataşımşek, S. (1971). *Sac kalıpları, Çekme kalıpları*, İstanbul: Nadir kitapevi, 6, 401-570.
66. Marciniak, Z., Duncan, J. L., Hu, S. J. (2002). *Mechanics of sheet metal forming*. (Second Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, 30-151.
67. Gavas, M. (2017). *Sac metallerin şekillendirilmesi*. Ankara: Seçkin Yayınevi, 211-352.
68. Kayhan, E., Kaftanoğlu, B. (Kasım 2016). Yüksek mukavemet çeliklerinin derin çekme oranlarının geliştirilmesi için yapılan deneysel çalışmalar. *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 14(2), 77.
69. Gürün, H. (2008). *Derin çekme kalıplarındaki parametrelerin deneysel olarak incelenmesi ve bulanık mantık ile tahmini*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-45.
70. Groover, M., P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing. Materials, Processes and Systems*, (4th Edition), United States of America: Copyright Clearance Center, Inc, 455-466.
71. Aytaç, F. (2007). *Matris açılı derin çekme kalıplarında alüminyumun derin çekme oranı üzerine etkisinin deneysel araştırılması*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 21-22.
72. Karaağaç, İ. (2011). *Sıvı basıncıyla sac metal şekillendirme işlem parametrelerinin deneysel olarak araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 37-93.
73. Kesici, T. (2008). *%70 Cu-%30 Zn pirinç alaşımlarında tav parametrelerinin derin çekilebilirliğe etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 1-26.
74. Karalı, M. (19-21 Nisan 2006). *Derin sac çekme işleminde kap verimini düşürmeyecek minimum pot baskı miktarının ve değişim eğrisinin FEM yoluyla araştırılması*. Proceedings of 11th International Materials Symposium, Denizli, 991- 995.
75. Çapan, L. (2003). *Plastik metallere şekil verme*. Çağlayan Basımevi, İstanbul, 291-310.
76. Karalı, M. (2008). Silindirik kapların derin çekilmesinde farklı baskı plakası kuvvetlerinin ve uygulama yöntemlerinin kulaklaşmaya olan etkilerinin incelenmesi. *Trakya Üniversitesi Journal Science*, 9(1), 41-46.

77. Khaleel, M.A.; Johnson, K.I.; Smith, M.T. (1997). On the thinning profiles in super plastic forming of a modified 5083 aluminum alloy. *Materials Science Forum*, 243-245, 739-744.
78. Tschaetsch, H. (2005). *Metal forming practise*. (7th edition). Wiesbaden: Vieweg Verlag, 141-146.
79. Karalı, M. (2005). *Derin sac çekme işleminde pot çemberi baskısının cidar kalınlığı üzerindeki etkilerinin incelenmesi*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 41-46.
80. Özdielli, Ö. (2018). *Polimer kaplı metal sacların derin çekme davranışının incelenmesi*. Doktora Tezi, Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum, 49-50.
81. Güneş, A. T. (2002). *Pres işleri tekniği*, Ankara: Makine Mühendisleri Odası, 2, 1- 159.
82. Ay, İ., (2008). Ders 12: Sac Şekillendirme [Ders notları]. <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/?view=lectures&lecture=iy2> sayfasından erişilmiştir.
83. Altan, T.(1998). *Metal forming handbook/schuler*. (1th Edition). Berlin: Verlag, 185-193.
84. Erişkin, Y. (1986). *Uygulamalı sac metal kalıp konstrüksiyonu*.(1. Baskı). Ankara: Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları, 127-159.
85. MEGEP, Makine teknolojisi, (2006). *Çekme kalıpları*. Ankara: T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, 13-14.
86. Taşdemir, V.(2013). Derin çekme işlemi üzerine kalıp geometrisinin etkisinin sonlu elemanlar analizi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 43.
87. Colgan, M. and Monaghan, J. (2003). Deep drawing process: analysis and experiment. *Journal of Material Processing Technology*, 132(1-3), 35-41.
88. Simith, A.D. (1994). *Fundamentals of pressworking*. (Fourth Edition), Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 75-142.
89. Zhang, S.H. (1999). Developments in hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 9, 236–244.
90. Zhou, G., Xu, C., Tricarico, L., Zhang, S.H., Palumbo, G. (2006). Numerical/Experimental investigations for enhancing the sheet hydroforming process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1212-1221.
91. Nagaraj, S.C.; (2005). *Experimental and numerical investigations of the sheet hydraulic bulge test for aluminum alloys*. Master Science Thesis, Michigan State University, Department of Mechanical Engineering, Michingan, 1-7.
92. Simith, A.D. (1990). *Die design handbook*. (Third Edition). Michigan, Society of Manufacturing Engineers, 1-44.

93. Suchy, I. (2006). *Handbook of die design*. (Third Edition). New York: McGraw-Hill, 369-454.
94. Lorenzo, R.,D., Fratini, L., Micar, F. (1999). Optimal blankholder force path in sheet metal forming processes. An AI based procedure, *ELSEVIER, ScienceDirect CIRP Annals*, 48, 231-234.
95. Şen, N. (2018). DP600 malzemenin şekillendirilmesinde değişken baskı plakası kuvveti etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*,6, 1295-1304.
96. Gavas, M., Uğraş, A. (2010). Hava etkili baskı plakasının derin çekme işlemlerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (4), 847-855.
97. İnternet: Dizdar, H., Aydemir, B., Vatan, C. (2018-03-22). ISO 6892-1 ve ASTM E8 Çekme deney standartları arasındaki farklılıklar. Web: <https://metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/88/iso-6892-1-ve-astm-e8-cekme-deney-standardlari-arasindaki-farkliliklar.html>. Son Erişim Tarihi: 22.08.2022.
98. Andersson R. (2005). *Deformation characteristics of stainless steels*. Doctora Thesi Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, 12.
99. Şen N., Kurgan N. (2015). Sac metal malzemelerin ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirme prosesinde malzeme karakterizasyonu. *Araştırma Makalesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, 663-674.
100. Dilmec M., Halkaci H. S., Ozturk F., Turkoz M. (2012). Detailed investigation of forming limit determination standards for aluminum alloys. *Journal of Testing and Evaluation*, 10-21).
101. İnternet: Li-ming Machinery Co. Ltd, Taiwan.(1969). Web: http://www.li-ming.com/ENGLISH/index.php?option=com_content&view=article&id=17&Itemid=6. Son Erişim Tarihi : 13 Ağustos 2022.
102. İnternet: Mavin, (2018). Xinle Road, Xinyang Industrial Zone, Haicang District, Xiamen City, Fujian Province, China 361028, Web: https://www.mavin.cn/s-type-load-cell_c4. Son Erişim Tarihi 14 Ağustos 2022.
103. İnternet: Ak Kalıp Elemanları, Teknik Hırdavat, (2015) Web: <https://www.akteknikhirdavat.com/enjeksiyon-plastik-kalip-elemanlari/sari-yay> Son Erişim Tarihi : 14 Ağustos 2022.
104. MKE Normu (1978). *Özel Nitelikte Çelik Türleri Kataloğu*, Ankara: Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu.
105. İnternet: Kutay, M.,G. (Kasım 2019). Standartlar ve Standart Sayılar Web: <https://archive.md/https://docplayer.biz.tr/4690182-2009-kasim-www-guven-kutay-ch-standartlar-ve-standart-sayilar-01-ozet-m-guven-kutay-01-standartlar-doc.html>. Son Erişim Tarihi: 14 Ağustos 2022.

106. Kahraman, B. (2009). *Otomativ endüstrisinde kullanılan 5754 alüminyum alaşımı sacların direnç nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 8.
107. İnternet: Selim Tiritoglu Metal Tasarım, Dış Ticaret Tasarım Dekorasyon ve İnşaat Malzemeleri Ticaret, Ankara, Web:<https://www.selimtiritoglu.com/aluminyum>. Son Erişim Tarihi: 14 Ağustos 2022.
108. İnternet: Ankara Alüminyum ve Metal San. Tic. Ltd. Şti. (1988). Web: <https://www.ankarametal.com.tr/urunler/aluminyum/>. Son Erişim Tarihi: 13 Ağustos 2022.
109. İnternet: Mak Elektronik, Malzeme Analiz ve Kalite Kontrol Cihazları Dış Ticaret Ltd. Şti., Web: <https://makelektronik.com.tr/vkat/9/Tahribats%C4%B1z-Muayene-Yontemleri.html>. Son Erişim Tarihi : 14 Ağustos 2022.
110. Wang, W., Wei, X. (2013). The effect of martensite volume and distribution on shear fracture propagation of 600–1000 MPa dual phase sheetsteels in the process of deep drawing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 67, 100–107.
111. Zhang, H., Wei, A., Qui, J.C. (2014). Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual phase steel joints. *Materials & Design*, 54, 443– 449.
112. Tolun, F. (2020). EN AW-5754 ve EN AW-5083 Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmelerinde kullanılan farklı takım geometrilerinin kaynaklı birleştirmeye etkilerinin araştırılması. *Araştırma Makalesi, BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 334-344.
113. Altın İ. (2014). *AA 5754 sac malzemenin metal sıvama ve hidrolik akışkanla şekillendirilmesinin incelenmesi*. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İmalat Mühendisliği, Karabük, 4, 43.
114. Kılıç, S., Kacar, İ. (2019). Farklı ısıtım işlem uygulanmış 7075 alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik sınır diyagramının deneysel olarak belirlenmesi. ISSN: 2564-6605, *Araştırma, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 512-520.
115. Koçar, O., Karayel, D., Eldoğan, O., Özkan, S. Tersine mühendislik yaklaşımı kullanarak sac metalin şekillendirme sınır diyagramının belirlenmesi. *Akademik Platform, Şeyh Edebali Üniversitesi*, 540-544.
116. Ozturk, F., Toros, S., Kılıç, S., (2009). Tensile and spring-back behavior of DP600 advanced high strength steel at warm temperatures, *Journal of Iron and Steel Research. International*, 16(6), 41-46.
117. Kim S. B., Huh H., Bok H.H., Moon M.B., (2010). Forming limit diagram of autobody steel sheets for high-speed sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 236–287.





EKLER

(Ekler Tezin arka kapağında CD ortamında verilmiştir.)



GAZİ GELECEKTİR..