



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Al 1050 sac metal malzemenin çekilebilirliğinin incelenmesi

Investigation of drawability of Al 1050 sheet metal material

Yazar(lar) (Author(s)): Yılmaz ÇAKIŞ¹, Ahmet ÖZDEMİR², Ulvi ŞEKER³, İbrahim ÇİFTÇİ⁴

ORCID¹: 0000-0003-3626-6698

ORCID²: 0000-0001-9919-8149

ORCID³: 0000-0001-6455-6858

ORCID⁴: 0000-0001-7875-6324

To cite to this article: Çakış Y., Özdemir A., Şeker U., ve Çiftçi İ., “Al 1050 Sac Metal Malzemenin Çekilebilirliğinin İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 1001-1010, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Çakış Y., Özdemir A., Şeker U., ve Çiftçi İ., “Al 1050 Sac Metal Malzemenin Çekilebilirliğinin İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 1001-1010, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1206641

Al 1050 Sac Metal Malzemenin Çekilebilirliğinin İncelenmesi

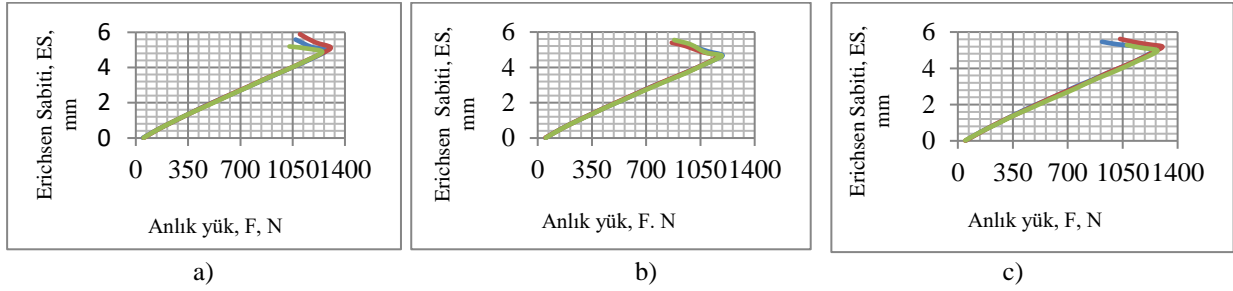
Investigation of Drawability of Al 1050 Sheet Metal Material

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Erichsen Sabiti/Erichsen Index
- ❖ Zımba hızı ve çapı değişimi/Variation of punch speed and diameter
- ❖ Anlık yük değeri ve ES değişimi/Variation of instant load value and EI

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Farklı zımba çapları ve hızlarında, 0,5 mm kalınlığındaki Al 1050 (%99,53 saf alüminyum) levha malzemeye Erichsen şişirme testi uygulanmıştır (Şekil 1)./Erichsen cupping test was applied to 0.5 mm thick Al 1050 (99.53% pure aluminum) sheet material at different punch diameters and speeds (Figure 1).



Şekil. Yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi/Şekil. Load - Erichsen Index change relationship)

Amaç (Aim)

Özgün tasarımı, imalatı ve kalibrasyonu yapılan tam otomasyonlu Erichsen şişirme donanımında, Al 1050 (%99,53 ticari saflıkta) malzemenin, zımba hızı, numune eni ve zımba çapı değişiminin Erichsen Sabitine olan etkilerini incelemek. / To examine the effects of Al 1050 (99.53% commercial purity) on the Erichsen Index by using the fully automated Erichsen cupping equipment which was originally designed, manufactured and calibrated.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Erichsen Şişirme testi donanımı tasarımı CAD ortamında yapılmış, imalatı ve montajı gerçekleştirilmiş, donanım kalibre edilmiş, donanımın çalışabilirliği Al 1050 sac metal numunelerin değişken parametreler altında şekillendirilmesiyle test edilmiştir. The design of Erichsen Cupping test device carried out on the CAD package, the manufacturing and assembly processes applied, the workability of device tested under different parameters for samples of Al 1050 sheet metal material.

Özgünlük (Originality)

Özgün tasarım ve hassas imalatla elde edilen ve tam otomatik çalışan bir test donanımında, Al 1050 sac metal malzemenin şekillendirilebilirlik kriterlerinin tayini. /The determination of formability values of Al 1050 sheet metal materials on the test device obtained by a original design and precise manufacture and run fully automatic.

Bulgular (Findings)

Numune genişliğinin ve zımba çapının artmasıyla ve Erichsen Sabiti'nin arttığı tespit edilmiştir. Test cihazının 0,01 mm hassasiyette ve güvenilir Erichsen Sabiti değerlerini tespit edecek nitelikte bir donanım olduğunu göstermiştir. /It has been determined that the Erichsen Index increases regularly with the increase of the sample width and the punch diameter. It has shown that the test device is capable of detecting reliable Erichsen Index values with a precision of 0.01 mm.

Sonuç (Conclusion)

Çekme hızının artması, en değişiminin artması ve zımba hızının artışı ile Erichsen Sabitinde artış olmuştur./the calibration of the hardware, the hardware worked with acceptable accuracy. There was an increase in Erichsen Index with increase in drawing speed, increase in width change and increase in punch speed.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission

Al 1050 Sac Metal Malzemenin Çekilebilirliğinin İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Yılmaz ÇAKIŞ^{1*}, Ahmet ÖZDEMİR², Ulvi ŞEKER², İbrahim ÇİFTÇİ³

¹Merzifon Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü, Amasya Üniversitesi, Türkiye

²Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

³Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 18.11.2022 ; Kabul/Accepted : 12.12.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 28.12.2022)

ÖZ

Bu çalışmada; endüstriyel sektörde tercih edilmesi yaygın olan AL1050 (%99,53 ticari saflıkta) malzemenin, çekme hızı (zımba hızı), numune eni ve zımba çapı değişiminin Erichsen Sabitine olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda tasarımı, imalatı ve kalibrasyonu yapılan tam otomasyonlu Erichsen şişirme donanımından faydalanılmıştır. Deneysel çalışmalar 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika zımba hızlarında, TS EN ISO 20482 standardına uygun olarak 8 mm, 15 mm ve 20 mm küresel uçlu zımbalar ile yapılmıştır. Elde edilen Erichsen şişirme deneyi sonuçlarından; zımba çapının 1,5 katı değerine ulaştığı noktadan itibaren numune genişliğinin artmasıyla ve Erichsen Sabiti'nin düzenli artmaya başladığı, numune genişliği zımba çapına eşit olduğunda ise zımba yükünün ve Erichsen Sabiti değerinin düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca, zımba çapının artmasıyla Erichsen Sabitinin arttığı tespit edilmiştir. Tasarımı, analizi ve imalatı yapılan test cihazından elde edilen deneysel bulgular; 0,01 mm hassasiyette ve güvenilir Erichsen Sabiti değerlerini tespit edecek nitelikte bir donanım olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Erichsen şişirme testi, erichsen sabiti, zımba hızı, zımba çapı.

Investigation of Drawability of Al 1050 Sheet Metal Material

ABSTRACT

In this study; The effects of drawing speed (punch speed), sample width and punch diameter change on the Erichsen Index of Al 1050 (99.53% commercial purity) material, which is widely preferred in the industrial sector, were investigated experimentally. Fully automated Erichsen cupping equipment designed, manufactured and calibrated was used in the experimental studies. The tests were carried out with 8 mm, 15 mm and 20 mm spherical end punches in accordance with ISO 20482 standard at 5 mm/min, 6.25 mm/min and 8 mm/min punch speeds. From the results of the Erichsen cupping test; It has been determined that, from the point where the punch diameter reaches 1.5 times the value of the punch diameter, the punch load and the Erichsen Index-EI value decrease when the sample width is equal to the punch diameter. In addition, it was found that EI increased with increasing punch diameter. Experimental findings obtained from the test device designed, manufactured and calibrated; It has demonstrated that it is a hardware capable of detecting reliable Erichsen Index values with a precision of 0.01 mm.

Keywords: Erichsen cupping test, erichsen index, punch speed, punch diameter.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

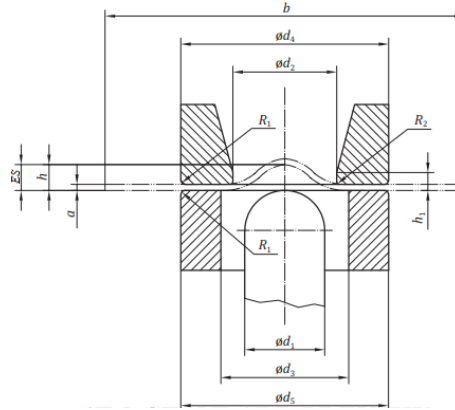
Zahmetsiz üretim ve kaliteli ürün sağlamak için sac şekillendirilebilirlik testleri uzun zamandır endüstrinin ilgi odağı olmuştur. Genel olarak şekillendirilebilirlik, bir sac metalin plastik deformasyon yoluyla şekillendirilme kolaylığı demektir. Sac ve şeridin kalitesini belirleyen ilk özel yöntemlerden biri, yaklaşık 100 yıl önce Erichsen tarafından icat edilen çukurluk oluşturma testidir [1 - 4]. Bu Erichsen çukurluğu testi, sac metal malzemenin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için temel yöntemlerden biri haline gelmiştir [5 - 11]. Bu test, levha üzerinde görünür çatlak oluşana kadar, kalıp ve tutucu arasında kenetlenen sac metal numuneye küresel uçlu zımbanın baskıyla ilerletilmesini içerir. TSE EN ISO 20482 standardında detayları açıklanan bu test [9],

kalıplama işlemlerine maruz kalacak sac metal malzemelerin şekillendirilebilirliğe yatkınlığını belirlemeye ve farklı kalınlıkta ve türde sac metal malzeme sınıflarının karşılaştırmasına imkân tanır. Şekil 1, şematik olarak bu test düzeneğini göstermektedir. Bu testin sonucu Erichsen Sabiti (ES) olarak ifade edilir [7 - 9, 11].

Akademik çalışmalarda sadece zımbanın sac numune ile ilk temas anından şişme yüzeyinde çatlak oluşumuna kadar alması gereken yol dikkate alınmamış, aynı zamanda yırtılmanın şekli, yırtılma yüzeylerinin deformasyon deseni de muhtelif çalışmalara konu olmuştur [11, 12]. Erichsen testinden geçmemiş sac malzemelerden yapılmış parçaların seri üretiminde çok sayıda problemle karşılaşılması kaçınılmazdır. Diğer taraftan, aynı veya farklı sac metal malzemelerin çeşitli kaynak yöntemleriyle birleştirilmesinden sonra Erichsen testinin uygulandığı ve kaynaklı bölgenin birleşme

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : yilmaz.cakis@amasya.edu.tr

kalitesinin tespitinde de ES değerinin bir ölçüt olarak yaygın kabul görmeye başlandığı bilinmektedir [9, 11 - 15].



Sembol	Tanımlama	Test parçası ve takım ölçüleri, ve Erichsen şişirme dizinleri			
		Standart test	Daha kalın veya daha dar levhalarla yapılan testler		
a	Test parçasının kalınlığı	$0,1 \leq a \leq 2$	$2 < a \leq 3$	$0,1 \leq a \leq 2$	$0,1 \leq a \leq 1$
b	Test parçasının genişliği veya çapı	≥ 90	≥ 90	$55 \leq b < 90$	$30 < b \leq 55$
d_1	Zımbanın küresel ucunun çapı	$20 \pm 0,05$	$20 \pm 0,05$	$15 \pm 0,02$	$8 \pm 0,02$
d_2	Kalibin delik çapı	$27 \pm 0,05$	$40 \pm 0,05$	$21 \pm 0,02$	$11 \pm 0,02$
d_3	Baskı plakasının delik çapı	$33 \pm 0,1$	$33 \pm 0,1$	$18 \pm 0,1$	$10 \pm 0,1$
d_4	Kalibin dış çapı	$55 \pm 0,1$	$70 \pm 0,1$	$55 \pm 0,1$	$55 \pm 0,1$
d_5	Baskı plakasının dış çapı	$55 \pm 0,1$	$70 \pm 0,1$	$55 \pm 0,1$	$55 \pm 0,1$
R_1	Kalibin dış köşe yarıçapı, baskı plakasının dış köşe yarıçapı	$0,75 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,1$	$0,75 \pm 0,1$	$0,75 \pm 0,1$
R_2	Kalibin iç köşe yarıçapı	$0,75 \pm 0,05$	$2,0 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$
h_1	Kalibin iç yuvarlak kısmının yüksekliği	$3,0 \pm 0,1$	$6,0 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$
h	Test sırasında zımbanın girme derinliği				
IE	Erichsen çukurluğu göstergesi (Erichsen Sabiti)	IE	IE ₄₀	IE ₂₁	IE ₁₁

a İlgili Erichsen çukurluğu göstergesi standart test için belirlenmiştir. Daha kalın malzemeler ve daha ince malzemelerin ve daha dar örnekleri için göstergeye d_2 boyutu eklenir.

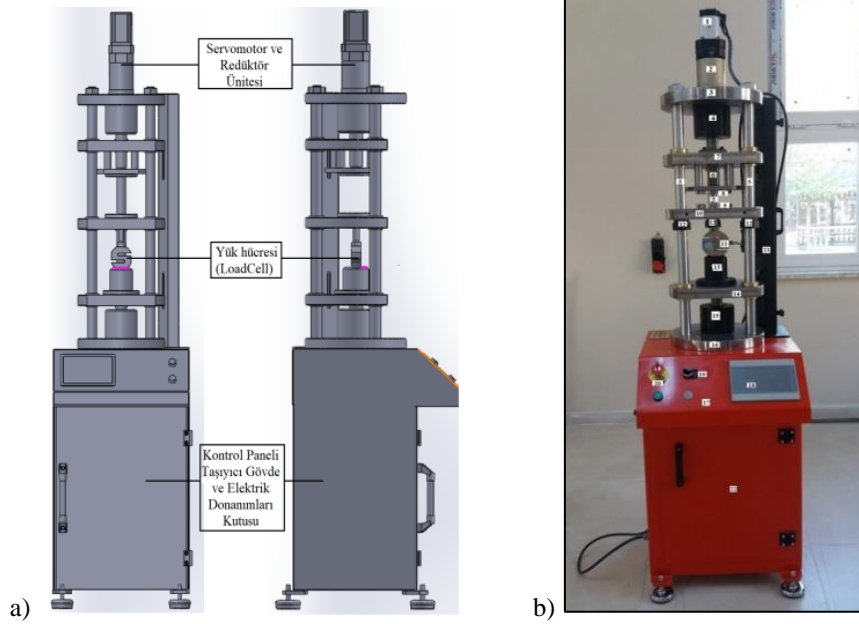
Şekil 1. Erichsen Şişirme Testinin Şematik Gösterimi (ES) (Schematic Illustration of Erichsen Cupping Test) [9]

Çalışma; TSE EN ISO 20482 standardı gereklerine uygun olarak 3 farklı zımba çapının ve kalıp setinin modüler yapıda kullanılabilirdiği, test boyunca kullanıcı müdahalesi gerektirmeyecek şekilde tasarımı ve imalatı yapılan Erichsen Test donanımında gerçekleştirilmiştir. Donanımın deneme aşamalarında, AL1050 (%99,53) sac metal malzemenin hazırlanan numunelere, 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika zımba ilerleme hızlarında şişirme testleri uygulanmış elde edilen bulgular tartışılmıştır.

2. ERICHSEN ŞİŞİRME TEST DONANIMININ TASARIMI ve İMALATI (DESIGN, MANUFACTURING OF ERICHSEN CUPPING TEST EQUIPMENT)

Erichsen testinin yapılacağı donanımların; tamamen mekanik ve elle tahrikli olanından, hidrolik güç tahrikli çalışanına kadar gerek akademik ortamlarda gerekse ticari ortamlarda farklı biçim ve boyutlarda imal edildiği görülmektedir [12, 16 - 18]. Bu çalışmada literatürde yer alan Erichsen Şişirme Testi donanımlarından farklı

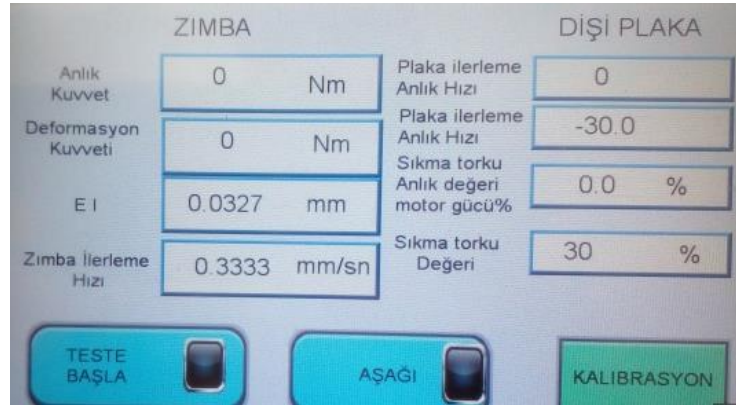
olarak servo motorlar ve bağlı hız kutularıyla güçlendirilen zımba ve baskı plakası yüklerine sahip ve tam otomasyonla testi yapabilen bir donanımdan faydalanılmıştır. Donanım; mevcut haliyle hem ticari ortamlarda yer alan hem de akademik çalışmalarda dikkate alınan donanımlardan önemli farklara sahip olarak tasarlanmış ve prototip imalat yapılmıştır [11]. Donanımın önemli özelliği; küresel uçlu zımbayla sac metal malzemenin bombe biçiminde şekillendirilmesi sırasında tam boyun verme (yırtilma) anında oluşan kuvveti tespit edebilmesidir. 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. Tam Otomatik Erichsen Şişirme Test Cihazı tasarımında gereken güç ihtiyacına dayalı analitik hesaplardan faydalanılmış, modellemesi ve montajı bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında (SolidWorks) yapılmış, bilgisayar destekli dayanım analizi (CAE) ile donanımın kritik parçalarının doğrulanması sağlanmış ve imalatında geleneksel imal usullerine sahip universal ve CNC makineler kullanılmıştır [Şekil 2].



Şekil 2. Otomatik Erichsen Şişirme Test Donanımının CAD ortamında hazırlanan üç boyutlu a) Modeli, b) Resmi (3D Model of Automatic Erichsen Cupping Test Equipment prepared in CAD environment, b) Picture) [11, 12]

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. Test Donanımının kalibrasyonu zımba tahrik elemanları ve baskı plakası tahrik elemanları için ayrı ayrı yapılmıştır [12].

Zımba, doğrudan servoredüktörden tahrik edilmekte ve tahrik hızı 0–100 mm/dakika arasında istenilen değere ayarlanabilmektedir. 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 (Şekil 3) okunmuş ve zımba hızının doğruluğu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Cihazın gösterge paneli (Indicator screen of device)

3. ÇEKME HIZININ (ZIMBA İLERLEME ORANI) ERICHSEN SABİTİNE OLAN ETKİSİ (EFFECT OF DRAWING SPEED ON ERICHSEN INDEX)

Tasarımı ve imalatı yapılan Erichsen test donanımının sağlıklı çalışıp çalışmadığına ve güvenilir sonuçlar verip vermediğine dair karar vermek amacıyla 0,5 mm kalınlığındaki AL 1050 (%99,53) malzemeden hazırlanan numunelere, 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika hızlarda ve zımba çapı $x 2 =$ Numune

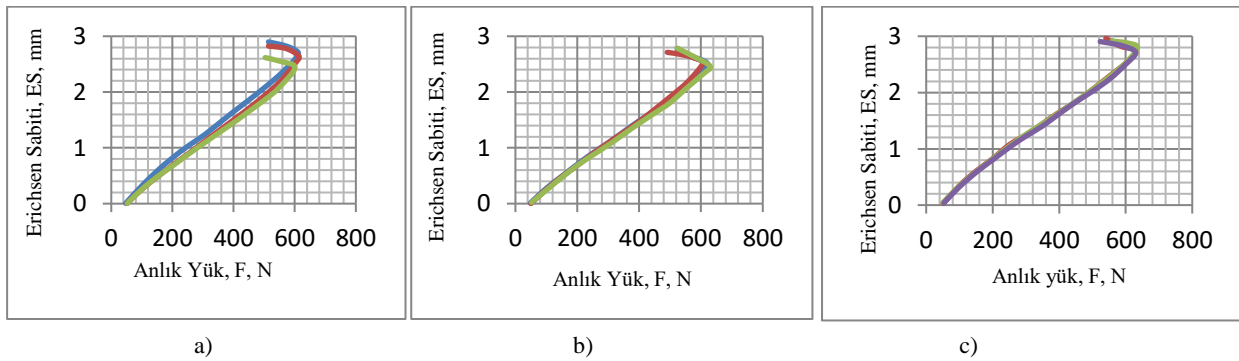
genişliği değeri seçilerek Erichsen şişirme testi uygulanmıştır.

Araç ağırlıklarının azaltılması amacıyla Alüminyum, magnezyum, titanyum alaşımları ve yüksek mukavemetli çeliklerin, kullanımı her geçen gün artmaktadır [19]. Saf alüminyum yüksek süneklik özelliğine sahiptir, şekillendirilebilir ve bükülebilir, çok ince dövülebilir özelliktedir [20]. Saf alüminyum oldukça yumuşak ve yüksek iletkenliğe sahiptir ve saf halde endüstriyel kullanımda istenilen mekanik gereksinimleri

karşılayamadığı için alüminyum alaşımlandırma yapılarak kullanılmaktadır. Alüminyum başta silisyum (Si) olmak üzere, magnezyum (Mg), bakır (Cu), çinko (Zn), titanyum (Ti), bor (B), stronsiyum (Sr), mangan (Mn), demir (Fe) gibi pek çok element ile alaşım oluşturabilmektedir. Alüminyumda demir elementi parçanın sünekliğini olumsuz etkiler ve korozyon direncini düşürür [21]. Yoğunluğu, mukavemet değerleri ve erime sıcaklık derecesi düşüktür. Bünyesine ilave edilen az miktarda değişik alaşım elementleri ile bu zayıf özellikleri güçlendirilmektedir [22 – 24]. Sözü edilen alaşım elemanları ile mukavemet değerleri iyileştirilmiş alüminyum alaşımları, hafif olmaları korozyon direncinin yüksek olması, ısı ve elektrik iletkenlikleri iyi olması, rahat şekillendirilebilme özellikleri nedeniyle neredeyse tüm sektörlerde kullanılmaktadır [23, 25, 26]. Gemi, uçak, savunma, otomotiv, kalıp-makine, tanker sanayileri gibi birçok endüstride milyonlarca farklı ürünün yapımında önemli yer teşkil etmektedir. Hafiflik ve yüksek özgül dayanım özellikleri sayesinde, alüminyumdan imal edilmiş yapısal bileşenler, başta uzay ve havacılık sanayii olmak üzere taşımacılık ve inşaat sanayiinde geniş kullanım alanı da mevcuttur [23, 26].

Sac malzemelerin davranışları deformasyon hızı değişiminden etkilenmektedir [27]. Zımba hızı değişiminin Erichsen Sabitine olan etkisi incelenmiş ve her farklı zımba hızında üç deney tekrarı ile toplamda 27

ayrı deney yapılmıştır. Her grafikte yer alan üç farklı renkte beyan edilen eğriler, üç deney tekrarını temsil etmektedir. 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında yapılan deneylerde; zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2,4 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı ve bu andaki Erichsen Sabiti ortalama 2,59 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 4.a). 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızında yapılan deneylerde; zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı ve bu andaki Erichsen Sabitinin ortalama 2,50 mm değere ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 4.b). Zımba ilerleme hızındaki artışın ES değerinde 0,09 mm azalmayla sonuçlandığı görülmüştür. 8 mm/dakika zımba ilerleme hızında yapılan deneylerde; zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 2 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı ve her üç deney sonucundan Erichsen Sabiti ortalama 2,75 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.c). Zımba ilerleme hızındaki artışın, 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında elde edilen ortalama ES değerine göre 0,16 artışla sonuçlandığı görülmüştür. En büyük ortalama anlık yük değişimlerinin zımba ilerleme hızı 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika için sırasıyla 608,66 N, 618,33 N ve 631,33 N olduğu ve zımba ilerleme hızının artmasıyla anlık ortalama yük değerinde kayda değer artış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. Numune boyutlarının 90x16x0,5 mm alındığı, Zımba çapı 8 mm, Zımba hızı a) 5 mm/dakika, b) 6,25 mm/dakika ve c) 8 mm/dakika olan testlerde yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi (The relationship between load - Erichsen Index variation in tests with 8 mm punch diameter, a) 5 mm/min, b) 6,25 mm/min and c) 8 mm/min punch speed, for 90x16x0.5 mm dimensions of samples)

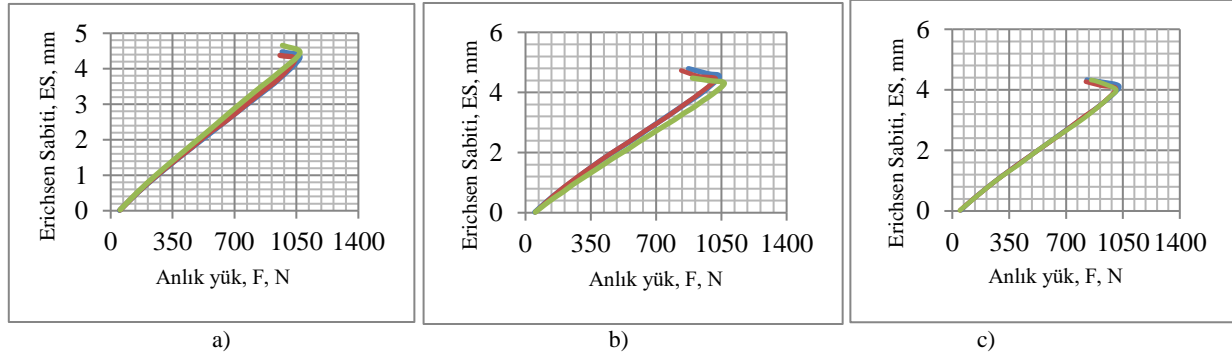
Grafiklerden de görüldüğü gibi her üç zımba hızında; 90 mm uzunlukta, zımba çapı $x 2 = 16$ mm eninde ve 0,5 mm kalınlığında hazırlanan numunelerden elde edilen ortak anlamlı sonuç; zımbanın malzemeye girme miktarı arttıkça donanımın kumanda panelinden okunan anlık yükün artış gösterdiği; değişimin grafiğinin hem kendi grubunda hem de tüm deneyler için artıkça artan ve doğrusal değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Malzemede şişirme deneyinin tabii sonucu olarak en büyük dayanım sınırının aşılmasını ve yırtılma deformasyonunun oluşmasını müteakip anlık yükün aniden düştüğü ve donanımın zımba taşıyıcı bloğuna monte edilen yük hücrelerinden okunan anlık yük değerinin birkaç okuma sonrası deneylerin tamamlandığı da görülmektedir. Grafiğin bu biçiminin literatürde yapılan çok sayıda

çalışmadan [3, 8, 27 - 29] elde edilen grafiklerle uyumlu olduğu ve kalıcı deformasyonla sonuçlanan deneysel çalışmaların teorik altyapısı ve deneysel bulguları ile örtüştüğü tespit edilmiştir. Diğer taraftan; gerek grafiklerin oluşturduğu yük değişiminde gözlenen doğrusal değişimlerdeki uyumluluk, gerekse deneylerin her birinde deney bitiş noktasının çok yakın uyumlu sonuçlanması, tasarımı ve imalatı yapılan Erichsen Test donanımının tekrarlanabilir sonuçlar için güvenilir ve kararlı değerler verdiğini de göstermektedir.

8 mm çaplı zımba ile yapılan deneylerden sonra bu zımba, zımba taşıyıcı ünitesinden sökülmüş, aynı yere 15 mm çaplı zımba takılarak yukarıdaki gibi 3 farklı zımba ilerleme hızının ES değerine olan etkisi araştırılmıştır. 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında yapılan deneylerde;

zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 4 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı ve bu andaki Erichsen Sabiti ortalama 4,34 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 5.a). 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızında yapılan deneylerde; zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 4 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı ve bu andaki Erichsen Sabitinin ortalama 4,43 mm değere ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 5.b). Zımba ilerleme hızındaki artışın ES değerinde 0,09 mm artışla sonuçlandığı görülmüştür. 8 mm/dakika zımba ilerleme hızında yapılan deneylerde; zımbanın

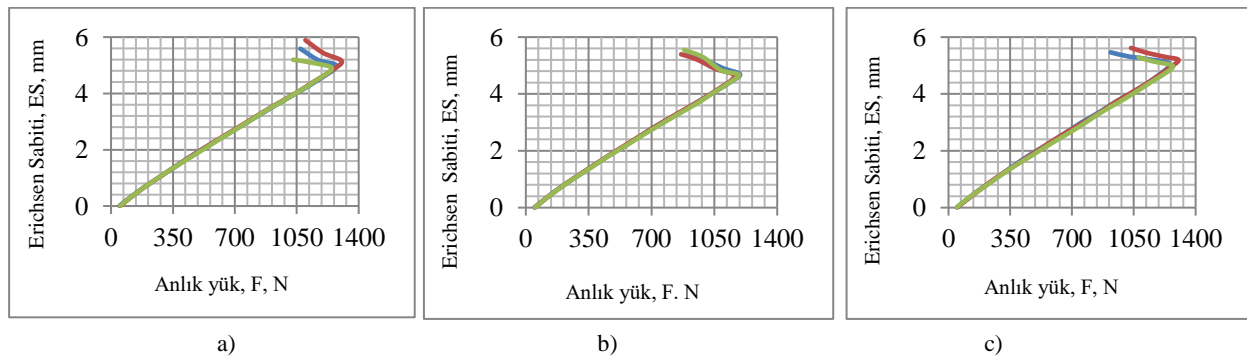
malzemeyi şekillendirme derinliği 4 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı ve her üç deney sonucundan Erichsen Sabiti ortalama 4,05 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.c). Zımba ilerleme hızındaki artışın, 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında elde edilen ortalama ES değerine göre 0,29 azalışla sonuçlandığı görülmüştür. En büyük ortalama anlık yük değişimlerinin zımba ilerleme hızı 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika için sırasıyla 1061,33 N, 1041,66 N ve 1013,33 N olduğu ve zımba ilerleme hızının artmasıyla anlık ortalama yük değerinde kayda değer azalış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. Numune boyutlarının 90x30x0,5 mm alındığı, Zımba çapı 15 mm, Zımba hızı a) 5 mm/dakika, b) 6,25 mm /dakika ve c) 8 mm/dakika olan testlerde yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi. (The relationship between load - Erichsen Index variation in tests with 15 mm punch diameter, a) 5 mm/min, b) 6,25 mm/min and c) 8 mm/min punch speed, for 90x30x0.5 mm dimensions of samples)

15 mm çaplı zımba ile yapılan deneylerden sonra bu zımba, zımba taşıyıcı ünitesinden sökülüş, aynı yere 20 mm çaplı zımba takılarak yukarıdaki gibi 3 farklı zımba ilerleme hızının ES değerine olan etkisi araştırılmıştır. 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında yapılan deneylerde; zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 4,5 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı ve bu andaki Erichsen Sabiti ortalama 5,00 mm olarak elde edilmiştir (Şekil 6.a). 6,25 mm/dakika zımba ilerleme hızında yapılan deneylerde; zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 4 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı ve bu andaki Erichsen Sabitinin ortalama 4,66 mm değere ulaştığı tespit edilmiştir (Şekil 6.b). Zımba ilerleme hızındaki artışın ES değerinde 0,34

mm azalışla sonuçlandığı görülmüştür. 8 mm/dakika zımba ilerleme hızında yapılan deneylerde; zımbanın malzemeyi şekillendirme derinliği 5 mm'yi aştıktan sonra cihazın dijital ekranından okunan yükün en büyük değere ulaştığı ve her üç deney sonucundan Erichsen Sabiti ortalama 5,08 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 6.c). Zımba ilerleme hızındaki artışın, 5 mm/dakika zımba ilerleme hızında elde edilen ortalama ES değerine göre 0,08 artışla sonuçlandığı görülmüştür. En büyük ortalama anlık yük değişimlerinin zımba ilerleme hızı 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika ve 8 mm/dakika için sırasıyla 1275,33 N, 1180,33 N ve 1275,33 N olduğu ve zımba ilerleme hızının artmasıyla anlık ortalama yük değerinde kayda değer azalış olduğu tespit edilmiştir.



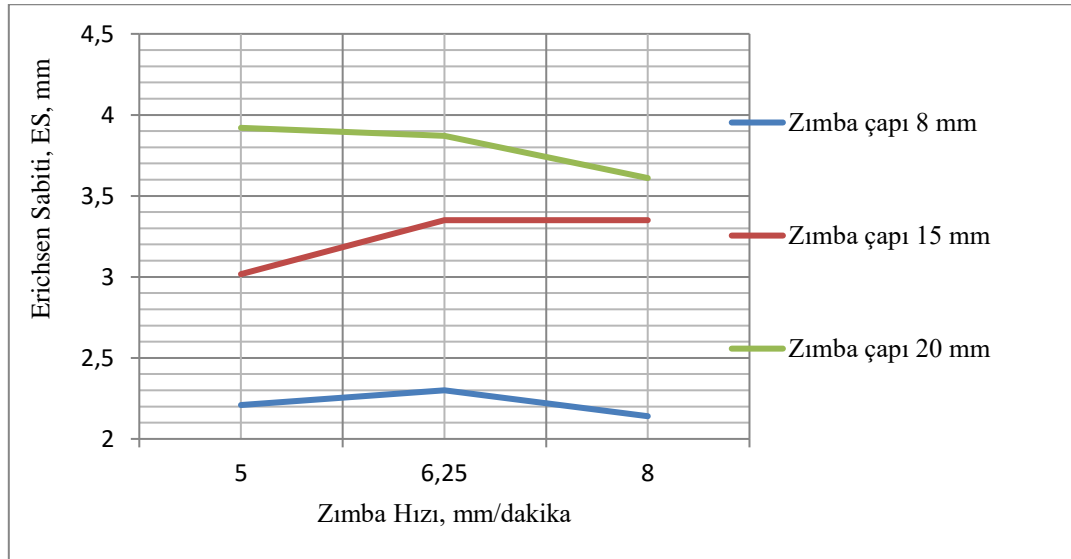
Şekil 6. Numune boyutlarının 90x40x0,5 mm alındığı, Zımba çapı 20 mm, Zımba hızı a) 5 mm/dakika, b) 6,25 mm /dakika ve c) 8 mm/dakika olan testlerde yük - Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi (The relationship between load - Erichsen Index variation in tests with 20 mm punch diameter, a) 5 mm/min, b) 6,25 mm/min and c) 8 mm/min punch speed, for 90x40x0.5 mm dimensions of samples)

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 [3, 8, 30 - 32]; yük – zımba derinliği (ES) değişimlerinde, zımba ilerleme miktarı arttıkça yük

değerinin de arttığı, numune malzemesinin en büyük çekme dayanımı sınırı aşılır aşılmaz deneyin bitirildiğini gösteren benzer grafikler yer almaktadır. Her üç farklı zımba çapı ve zımba ilerleme hızında yapılan deneylerden elde edilen ortalama ES değerleri grafik (Şekil 7) ve çizelge olarak da verilmiştir (Çizelge 1). Buna göre elde edilen bu deneylerin sonucu ortalama zımba hızı ile Erichsen Sabiti ilişkisinde çekme hızı 5 mm/dakikadan 6,25 mm/dakikaya artırılınca Erichsen Sabitinde de artış olduğu görülmüştür. Fakat Zımba hızının 8 mm/dakika'ya yükseltilmesi ile her üç zımba çapında da Erichsen Sabiti değerinde düşüş gerçekleşmiştir.

Çizelge 1. Farklı zımba çaplarına göre farklı zımba hızı ile elde edilen Erichsen Sabiti verileri (Erichsen Index data obtained with different punch speed according to different punch diameters)

Zımba çapı, mm	Zımba hızı, mm/dakika	ES, mm	Zımba çapı, mm	Zımba hızı, mm/dakika	ES, mm	Zımba çapı, mm	Zımba hızı, mm/dakika	ES, mm
8	5	2,21	15	5	3,017	20	5	3,92
8	6,25	2,3	15	6,25	3,35	20	6,25	3,87
8	8	2,14	15	8	3,35	20	8	3,61



Şekil 7. Zımba hızı-Erichsen Sabiti ilişkisi (Punch speed-Erichsen Index relationship)

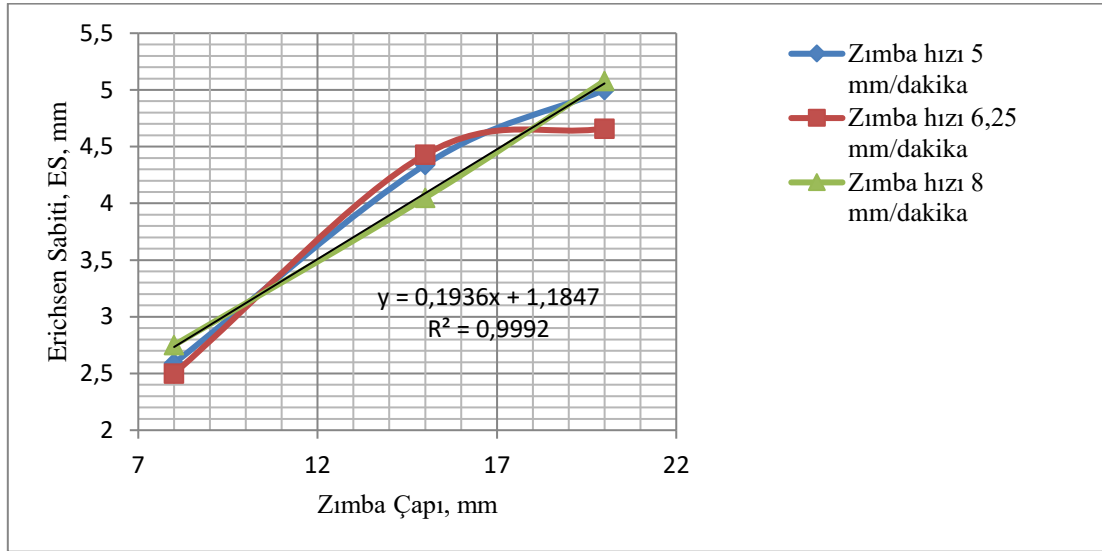
4. ZIMBA ÇAPI DEĞİŞİMİNİN ERICHSEN SABİTİNE OLAN ETKİSİ (EFFECT OF PUNCH DIAMETER ON ERICHSEN INDEX)

Erichsen şişirme testinde zımba hızına bağlı olarak zımba çapı ile Erichsen Sabiti arasındaki ilişki incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda Çizelge 2'deki değerler elde edilmiştir. Bu değerler ile Şekil 8'deki Erichsen Sabiti ile zımba çapı ilişkisini açıklayan grafik elde edilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda Çizelge 2'deki değerler elde edilmiştir. Bu değerler ile Şekil 8'deki Erichsen Sabiti ile zımba çapı ilişkisini açıklayan grafik elde edilmiştir.

Çizelge 2. Zımba çapı-Erichsen Sabiti değerleri (Punch diameter-Erichsen Index values)

Zımba çapı, mm	Zımba hızı, mm/dakika	Erichsen Sabiti, mm	Zımba çapı, mm	Zımba hızı, mm/dakika	Erichsen Sabiti, mm	Zımba çapı, mm	Zımba hızı, mm/dakika	Erichsen Sabiti, mm
8	5	2,59	8	6,25	2,5	8	8	2,75
15	5	4,34	15	6,25	4,43	15	8	4,05
20	5	5	20	6,25	4,66	20	8	5,08

**Şekil 8.** Zımba çapı-Erichsen Sabiti ilişkisi (Punch diameter-Erichsen Index relationship)

Şekil 8 incelendiğinde, zımba çapının Erichsen Sabiti değeri üzerinde önemli etkisi olduğu anlaşılmaktadır. 20 mm küresel çaplı zımba ile her üç değişik zımba hızında uygulanan deneylerde zımba çapının artması ile Erichsen Sabiti değerinde artış tespit edilmiştir. Zımba çapı ile Erichsen Sabiti değişiminin, yaklaşık 45°'lik açı ile korelasyonun $R^2 = 0,9992$ değeriyle varlığı ortaya konmuştur.

5. NUMUNE ENİNİN ERICHSEN SABİTİNE OLAN ETKİSİ (EFFECT OF SAMPLE WIDTH ON ERICHSEN INDEX)

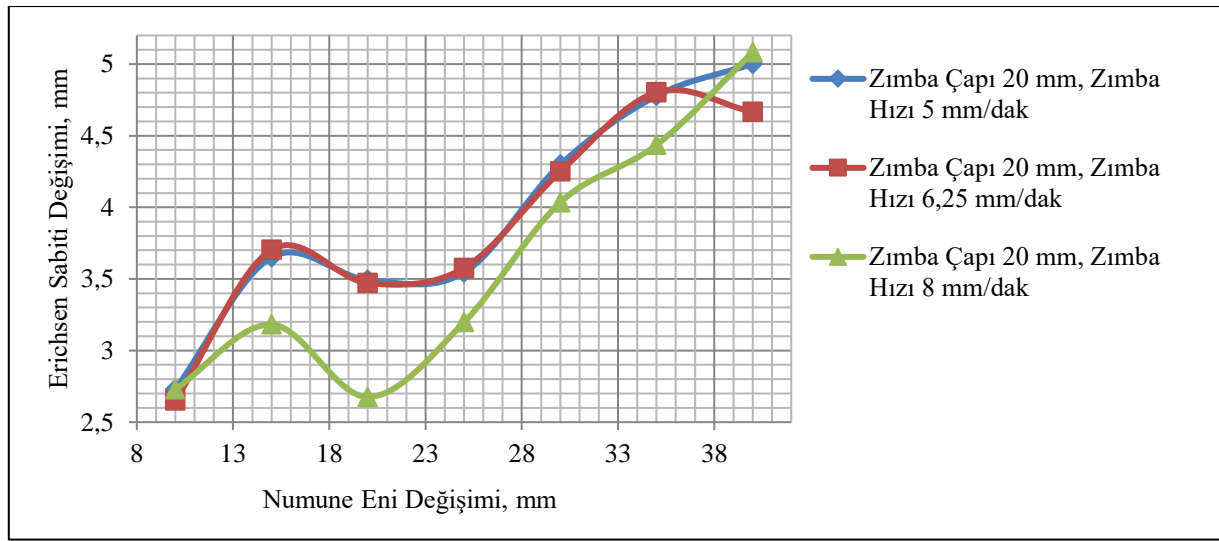
Erichsen şişirme testlerinde yapılan yaygın uygulamalardan birisi, zımba çapının yarı değerine karşılık gelen numune eni genişliğinden başlayarak ve adım adım zımba çapının iki katı değerine kadar numune enini artırarak ES değerinin değişiminin tespiti olmuştur [12, 30 - 32]. Sadece 20 mm zımba çapı ile 3 farklı zımba ilerleme hızında ilave bir grup deney daha yapılmıştır. Zımba çapı 20 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune en değişimi ile Erichsen Sabiti değişimi arasındaki ilişki incelenmiş ve Çizelge 3'deki değerler elde edilmiştir. Çizelge 3 ve Şekil 9'da verilen grafik incelendiğinde, zımba çapı 20

mm'de numune malzeme genişliği 10 mm seçildiğinde 5 mm/dakika zımba hızında Erichsen sabiti, ES, 2,72 mm olarak gerçekleşirken 6,25 mm/dakika zımba hızında 2,65 mm, 8 mm/dakika zımba hızında 2,72 mm olarak elde edilmiştir. Numune eni 20 mm olduğunda, 8 mm/dakika zımba hızında Erichsen Sabiti değerlerinde düşüş görülmüş ve 2,67 mm olarak gerçekleşmiştir. 40 mm numune genişliğinde 6,25 mm/dakika zımba hızında Erichsen sabiti değerlerinde bir miktar azalma olmuş, Erichsen Sabiti 4,66 mm olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, numune eni 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.

Her üç zımba hızında numune en değişiminin artması ile Erichsen Sabitinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca Zımba çapına eşit veya ona yakın numune enlerinde Erichsen Sabitinde azalma görüldüğü tespit edilmiştir (Çizelge 3 ve Şekil 9).

Çizelge 3. Zımba çapı 20 mm ve 5 mm/dakika, 6,25 mm/dakika, 8 mm/dakika zımba hızlarında numune en değişimi ile Erichsen Sabiti değişimi arasındaki ilişki verileri (The data of relationship between sample width change and Erichsen Index at punch diameter 20 mm and punch speeds of 5 mm/min, 6.25 mm/min, 8 mm/min)

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



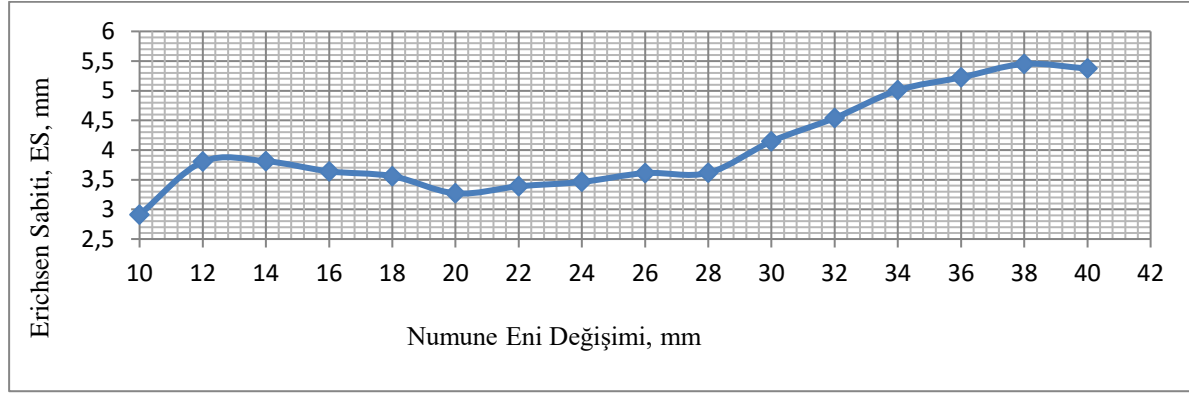
Şekil 9. 20 mm zımba çapında ve belirli zımba hızlarında yapılan deneyde numune genişliği ile Erichsen Sabiti değişimi ilişkisi (The relationship between sample width and Erichsen Index variation in the experiment performed with 20 mm punch diameter and different punch speeds)

Bu deneylere ilaveten aynı malzeme ile değişik numune enlerinde ayrıca bir deney daha yapılmıştır. Deney 20 mm küre çaplı zımba ile 6,25 mm/dakika zımba hızında yapılmıştır. Elde edilen veriler ve buna bağlı olarak oluşturulan grafik Çizelge 4 ve Şekil 10'da görülmektedir.

Gerek Çizelge 4 ve gerekse Şekil 10'da verilen grafik incelendiğinde numune eni zımba çapına eşit olduğunda en düşük ES değerinin oluştuğu görülmüştür. Numune eni 28 mm'den sonra Erichsen Sabiti değerinde hızlı bir artış meydana gelmiştir.

Çizelge 4. 20 mm zımba çapında, 6,25 mm/dakika zımba hızında deney sonucu numune eni değişimine bağlı olarak Erichsen Sabiti verileri (Erichsen Index data depending on the sample width change as a result of the test at punch diameter of 20 mm and a punch speed of 6.25 mm/min.)

Al 1050 Numune Eni Değişimi - Erichsen Sabiti İlişkisi Değerleri																
Numune En 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 10. Numune Eni - Erichsen Sabiti Değişimi (Relationship between the widths of samples and the Erichsen Index)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

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 kalibrasyonu müteakip farklı koşullarda donanım denenmiş ve kalibrasyonu yapılmıştır. Günümüzde imalat sanayisinde yaygın olarak tercih edilen Al 1050 malzemeden hazırlanan numuneler, donanım vasıtasıyla Erichsen şişirme testlerine tabi tutulmuştur. Bu numunelerin testlerinin sonuçlarına bakılarak zımba hızı- Erichsen Sabiti ilişkisi, numune eni-Erichsen Sabiti ilişkisi ve Zımba çapı-Erichsen Sabiti ilişkileri incelenmiştir. Sonuç olarak;

1. Kalibrasyon sonrası donanımın kabul edilebilir doğrulukta çalıştığı görülmüştür.
2. Elde edilen deneylerin sonucu ortalama zımba hızı ile Erichsen Sabiti ilişkisinde çekme hızı 5 mm/dakikadan 6,25 mm/dakikaya artırılınca Erichsen Sabitinde de artış olduğu görülmüş, fakat zımba hızının 8 mm/dakika'ya yükseltilmesi ile her üç zımba çapında da Erichsen Sabiti değerinde düşüşün olduğu tespit edilmiştir.
3. Her üç farklı zımba hızında, numune eni değişiminin artması ile Erichsen Sabitinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, zımba çapına eşit veya ona yakın numune enlerinde Erichsen Sabitinde azalma görülmüştür.
4. Zımba çapının Erichsen Sabiti değeri üzerinde önemli etkisi olduğu görülmüştür. 20 mm küresel çaplı zımba ile her üç değişik zımba hızında uygulanan deneylerde zımba çapının artması ile Erichsen Sabitinin de arttığı tespit edilmiştir. Zımba çapı ile Erichsen Sabiti değişiminin son derece yakın bir ilişki sergilediği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Test donanımının imalatında ve yazılımının geliştirilmesinde desteklerini esirgemeyen Çorum merkezli ÖZ-ER CNC ve HM Otomasyon firmalarına teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yılmaz ÇAKIŞ : Test cihazının tasarımını, analizlerini ve imalatını yapmış, cihazdaki deneysel çalışmaları kurgulamış ve gerçekleştirmiştir. Deneysel bulguları elde etmiş ve yorumlamıştır. Makalenin yazımı sürecindeki değişiklik ve düzeltmeleri uygulamıştır.

Ahmet ÖZDEMİR : Donanımın tasarımına, analizine ve imalatına danışmanlık etmiş, deneysel bulguları değerlendirmiş ve makalenin revizyonlarını takip etmiştir.

Ulvi ŞEKER : Donanımın çalışmasını ve deneysel bulguların doğruluğunu takip etmiştir.

İbrahim ÇİFTÇİ : Donanımın çalışmasını, deneysel bulguların doğruluğunu ve sac metal numunelerden alınan bulguların uygunluğunu takip etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Kocaında, C. Jasiński. "Extended evaluation of Erichsen cupping test results by means of laser speckle", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16 (2) : 211 - 216, (2016).
- [2] TSE EN ISO 20482 "International Standard, Metallic materials-sheet and strip-Erichsen cupping test", (2013).
- [3] Aydın, M., Wu, X., Çetinkaya, K., Yaşar, M., Kadı, İ. "Application of digital image correlation technique to Erichsen cupping test", *Engineering Science and Technology, International Journal*, 21(4) : 760-768, (2018).

- [4] Reddy, M., R., N., Theja, M., S., Tilak, M., G., “Modified Erichsen cupping test for copper, brass, aluminium and stainless steel”, *The SIJ Transactions on Industrial, Financial & Business Management (IFBM)*, 1(2) : 52-57, (2013).
- [5] Anket, O., Koruvatan, T., Ay, İ., “Sac Malzemelerin şekillendirilmesinde şekillendirme Sınır diyagramlarının kullanımı”, *Politeknik Dergisi*, 14(1) : 39-47, (2011).
- [6] Singh, M., Choubey, A., K., Sasikumar, C., “Formability analysis of aluminium alloy by Erichsen cupping test method”. *5th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC 2016), Materials Today: Proceedings*, 4(2): 805–810, (2017).
- [7] Hamada, A., S., Kisko, A., Khosravifard, A., Hassan, M., A., P., Karjalainen, L., P., Porter, D., “Ductility and formability of three high-Mn TWIP steels in quasi-static and high-speed tensile and Erichsen tests”, *Materials Science & Engineering:A*, 712, 255–265, (2018).
- [8] Giuliano, G., Samani, F., “Effect of lubrication on the Erichsen test”, *Applied Mechanics and Materials, Trans Technical Publications*, 365-366 : 425-428, (2013).
- [9] <https://www.erichsen.de/en-gb/service/test-methods/sheet-metal-testing/erichsen-cupping-test>.
- [10] Singh, J., Kim, M.-S., Lee, S.-E., Kim, E.-Y., Kang, J.-H., Park, J.-H., Kim, J.-J., Choi, S. H., “Heterogeneity in deformation and twinning behaviors through the thickness direction in e-form Mg alloy sheets during an Erichsen Test”, *Materials Science & Engineering:A*, 729 : 370–384, (2018).
- [11] Çakış, Y., Özdemir, A., “Tam otomatik Erichsen test donanımının tasarımı ve prototip imalatı”, *Uluslararası Multidisipliner İnovatif Yaklaşımlar Kongresi*, İstanbul, (2022).
- [12] Çakış, Y., “Tam otomasyonlu Erichsen şişirme testi donanımının tasarımı, imalatı ve farklı koşullar için denenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2022).
- [13] Subramanian, R., Natarajan, B., Kaliyaperumal, B., Chinnasamy, R., “Effect of MIG welding process parameters on microstructure and tensile behavior of hastelloy C276 using response surface methodology”, *Materials Research Express*, 6(6) : 1-18, (2019).
- [14] Çapan L., “Metallere Plastik Şekil Verme”, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, (1999).
- [15] Chino Y., Iwasaki H., Mabuchi M., “Stretch formability of AZ31 alloy sheets at different testing temperatures”, *Materials Science and Engineering*, 406 : 90-95, (2007).
- [16] Koç, E., Yıldızlı, K., Dengiz, C., G., “Erichsen deney föyü”, *19 Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü*, (2017).
- [17] http://www.testingequipmentie.com/Cupping_Testing_Machine.html
- [18] Talapatra, A., Choudhary R. V., Malhotra, K., Vyas, M., Jamal, A., Singhi M. K., “Formability characteristics of different sheet metals by Erichsen cupping testing with NDT methods”, *i-Manager’s Journal on Material Science*, 1(1) : 14-18, (2013).
- [19] Eryılmaz, İ., Gürün, H., “DP600 Sac Malzemenin delik flanşlama işleminde zımba formunun etkileri”, *Muş Alparslan Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2(1) : 44-53, (2021).
- [20] <https://www.sistemal.com/aluminyumun-ozellikleri-nelerdir/>
- [21] Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., Korkmaz, A., “Alüminyum döküm alaşımlarına dair son yıllardaki akademik ve endüstriyel gelişmelere genel bakış ve değerlendirme”, *Bursa Uludağ Üniv. Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(3):1191-1210, (2021).
- [22] Çakanyıldırım Ç. ve Gürü M., “Alüminyum üretim teknolojilerindeki gelişmeler, çevreye etkisi ve uygulama alanları”, *Politeknik Dergisi*, 24(2) : 585-592, (2021).
- [23] Samtaş, G., Korucu, S., “Optimization of cutting parameters for surface roughness in milling of cryogenic treated EN AW 5754 (AlMg3) aluminum alloy”, *Journal of Polytechnic*, 22(3) : 665-673, (2019).
- [24] Demirbaş, A., K., Çevik, S., “TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiş alüminyum 1050 alaşımının mekanik ve mikroyapı özellikleri”, *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 8-3, 471-477, (2020).
- [25] Brough, D. ve Jouhara, H., “The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery”, *Int. Journal of Thermofluids*, 1(2) : 1-39, (2020).
- [26] Özlü, B., Akgün, M., Demir, H., “AA6061 alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2): 151-158, (2019).
- [27] Çavuşoğlu, O., Gürün, H., “Deformasyon hızının DP600 ve DP780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkilerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4) : 777-784, (2014).
- [28] Gavrus, A., Banu, M., Ragneau, E., Maier C., “An inverse analysis of the Erichsen test applied for the automatic identification of sheet materials behavior”, *Engineering*, 2, 471-476, (2010).
- [29] Somekawa, H., Kinoshita, A., Washio, K., Kato, A., “Enhancement of room temperature stretch formability via grain boundary sliding in magnesium alloy”, *Materials Science & Engineering:A*, 676 : 427–433, (2016).
- [30] İpek, S., K., “Termomekanik prosesler ile üretilen yassı alüminyum ürünlerin mukavemet diyagramlarının oluşturulması”, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, (2018).
- [31] Adamus, J., Winowiecka, J., Dynier, M., “Analysis of forming thin titanium panels with stiffeners”, *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(1) : 173-180, (2017).
- [32] Somekawa, H., Kinoshita, A., Kato, A., “Greatroom temperature stretch formability of fine-grained Mg-Mn alloy” *Materials Science and Engineering:A*, 697 : 217-223, (2017).