



Ultrasonically assisted deep drawing process: Two-stage finite element analysis and experimental verification

Sadık Olguner*^{ID}, Ali Tolga Bozdana^{ID}

Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Gaziantep University, 27310, Şhitkamil, Gaziantep, Türkiye

Highlights:

- Ultrasonically assisted deep drawing process
- Transient structural and forming analyses
- Increase in Limiting Drawing Ratio

Keywords:

- Deep drawing process
- Ultrasonic vibrations
- Limiting drawing ratio
- Finite element analyses

Article Info:

Research Article
Received: 22.06.2021
Accepted: 02.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.955897

Acknowledgement:

This research was financially supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TÜBİTAK) (Project No: 315M300)

Correspondence:

Author: Sadık Olguner
e-mail: olguner@gantep.edu.tr
phone: +90 342 317 2529

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effects of ultrasonic vibrations on the formability of sheet metals were investigated by finite element analyses and the results were verified by deep drawing experiments. Figure A shows improvements in limiting drawing ratio and cup depth with application of ultrasonic vibrations.

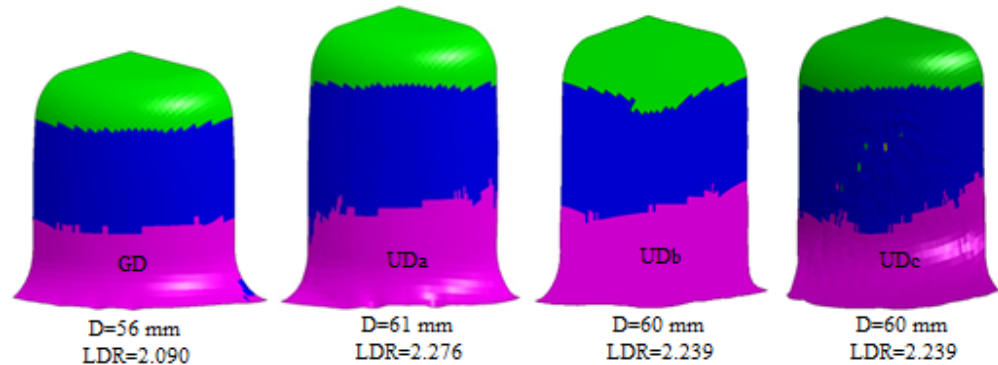


Figure A. Limiting drawing ratios and cup depths in conventional and ultrasonically assisted processes (GD: conventional deep drawing, UDa: low-amplitude vibration assisted deep drawing, UDb: medium-amplitude vibration assisted deep drawing, UDC: high-amplitude vibration assisted deep drawing)

Purpose: The main purpose of this study is to perform a numerical investigation on the effects of ultrasonic vibrations applied onto blank holder in axial direction, which is thought to be the most effective way for increasing the formability of sheet material, and to verify numerical results with drawing experiments.

Theory and Methods: A two-stage finite element analysis, including transient structural and forming analyses, was developed. In the first stage; transient structural model of the complete die system was built, and the contact force due to application of ultrasonic vibrations at the contact region between material and sonotrode was determined. The variation in the contact force throughout the process was mathematically modeled. In the second stage, forming analyses have been performed under the influence of ultrasonically fluctuated blank holder force. Uniaxial tensile tests were carried out to model the anisotropic properties of DC01 and DC04 cold-rolled low-carbon steels. The strain-based Keeler-Brazier (KB) empirical forming limit diagram was employed for predicting failure in the sheet metal. Numerical results were verified by conventional and ultrasonically assisted deep drawing experiments.

Results: In numerical analyses, with the effect of ultrasonic vibrations, an increase of up to 9% in limiting drawing ratio and up to 26% in cup depth were achieved. The analyses performed on circular blanks of identical diameter revealed that the thinning of sheet metal was decreased by up to 43%. Numerical results were found to be in good agreement with experimental results since particular effects of ultrasonic vibrations (namely dynamic impact, stress superposition, and contact separation) could be effectively modeled in finite element analyses with the proposed method.

Conclusion: It was evident that the application of ultrasonic vibrations onto blank holder in axial direction significantly improves limiting drawing ratio and cup depth as well as reduces thinning of sheet metal, regardless of amplitude level of vibrations, blank holder force, forming speed, or material condition.



Ultrasonik destekli derin çekme işlemi: İki aşamalı sonlu elemanlar analizi ve deneysel doğrulaması

Sadık Olguner*^{ID}, Ali Tolga Bozdana^{ID}

Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 27310, Şehitkamil, Gaziantep, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Ultrasonik destekli derin çekme işlemi
- Zamana bağlı yapısal ve şekillendirme analizleri
- Sınır Çekme Oran'ının artırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 22.06.2021

Kabul: 02.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.955897

Anahtar Kelimeler:

Derin çekme işlemi,
ultrasonik titreşimler,
sınır çekme oranı,
sonlu elemanlar analizleri

ÖZ

Bu çalışmada, Geleneksel Derin Çekme Yönteminde sac metal malzemelerin şekillendirilebilirliğini iyileştirebilmek adına Ultrasonik Destekli Derin Çekme Yöntemi geliştirilmiştir. Derin çekme işleminde baskı plakasına aksel yönde uygulanan ultrasonik titreşimlerin malzemenin şekillendirilebilirliğine etkileri sonlu elemanlar analizleriyle nümerik olarak araştırılmış, elde edilen sonuçlar derin çekme deneyleriyle doğrulanmıştır. Nümerik çalışmada, zamana bağlı yapısal ve şekillendirme analizlerini içeren iki aşamalı sonlu elemanlar analizi içeren metodoloji geliştirilmiştir. Geleneksel ve ultrasonik destekli derin çekme analizlerinde, belirli işlem parametrelerine maruz kalan DC01 ve DC04 malzemelerin sınır çekme oranları ve maksimum çekilebilir kupa derinlikleri kıyaslanmıştır. Ultrasonik titreşimlerin etkisiyle sınır çekme oranında %9'a, kupa derinliğinde ise %26'ya varan artış sağlanmıştır. Aynı çapa sahip dairesel malzemeler üzerinde gerçekleştirilen analizlerde, sac malzemedeki incelmelerin %43'e varan oranda azaldığı tespit edilmiştir. Doğrulama deneyleri neticesinde sınır çekme oranında ve kupa derinliğindeki artış oranları ise sırasıyla %11 ve %31 olarak gerçekleşmiştir. Ultrasonik titreşimlerin dinamik darbe, gerilme süperpozisyonu ve temas ayrılması etkileri, önerilen yöntemle sonlu elemanlar analizlerinde etkin bir şekilde modellenemediğinden nümerik analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Buradaki küçük farkların, ultrasonik titreşimlerin malzeme üzerindeki akustik yumuşatma ve sürtünme katsayısını azaltma etkilerinin nümerik modele aktarılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ultrasonically assisted deep drawing process: Two-stage finite element analysis and experimental verification

H I G H L I G H T S

- Ultrasonically assisted deep drawing process
- Transient structural and forming analyses
- Increase in Limiting Drawing Ratio

Article Info

Research Article

Received: 22.06.2021

Accepted: 02.02.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.955897

Keywords:

Deep drawing process,
ultrasonic vibrations,
limiting drawing ratio,
finite element analyses

ABSTRACT

In this study, Ultrasonically Assisted Deep Drawing Process was developed in order to improve formability of sheet metals in Conventional Deep Drawing Process. Effects of ultrasonic vibrations, applied onto the blank holder in axial direction, on formability of sheet metal were investigated numerically by finite element analyses, and the results of such analyses were verified by deep drawing experiments. In the numerical study, a methodology for two-stage finite element analyses including transient structural and forming analysis was developed. In conventional and ultrasonically assisted deep drawing analyses, limiting drawing ratios and maximum drawable cup depths for DC01 and DC04 materials prone to certain process parameters were compared. With application of ultrasonic vibrations, an increase of up to 9% in limiting drawing ratio and up to 26% in cup depth were achieved. In the analyses performed on circular materials of identical diameters, it was determined that the thinning on sheet metal decreased by up to 43%. As result of the validation experiments, increase in limiting drawing ratio and cup depth was achieved as 11% and 31%, respectively. Numerical results were found to be in good agreement with experimental results since dynamic impact, stress superposition and contact separation effects of ultrasonic vibrations could be effectively modeled in finite element analyses with the proposed method. Small differences in obtained results may be due to the reason that it was not possible to involve the effects of acoustic softening and friction coefficient reduction on the material in numerical analyses.

1. Giriş (Introduction)

Derin çekme, kupa şekilli ürünler üretmek için endüstride yaygın şekilde kullanılan sac metal şekillendirme işlemlerinden biridir. Otomobil parçaları, mutfak eşyaları, içecek kutuları ve hava/yakıt filtreleri olmak üzere pek çok uygulama alanına sahiptir. Derin çekme işlemlerinde karşılaşılan en önemli problemler, üründe meydana gelen kırışma ve yırtılmalardır. İşlem sırasında çekilen malzemenin kırışmasını engellemek için baskı plakasına yük uygulanmakta, ancak malzemenin belirli bir derinliğe kadar çekildikten sonra yırtılmasına neden olmaktadır. Mevcut baskı plakası yüklemeye koşulları altında, yırtılma olmadan tek adımda çekilebilen en büyük malzeme çapının elde edilen kupa çapına oranı Sınır Çekme Oranı (SÇO) olarak tanımlanır. Sac metalin SÇO'su malzemenin kalınlığı ile de ilişkilidir. İnce malzemelerin kırışma eğilimi daha yüksek olduğundan, kırışmayı önlemek adına daha yüksek baskı plakası kuvveti uygulanmakta, bu durum malzemenin daha erken yırtılmasına neden olmaktadır. Derin çekme işleminde sac metal malzemelerin şekillendirilebilirliği, çekilen malzemenin deformasyona karşı gösterdiği dirence ve malzeme ile kalıp yüzeyleri arasındaki sürtünme koşullarına doğrudan bağlıdır. Dolayısıyla, malzemenin şekillendirilebilirliğini sınırlandıran etkileri azaltarak malzemelerin SÇO'sunu artırmak, işlem yeteneklerini geliştirmek açısından önemli bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ultrasonik teknolojisi günümüz imalat sanayinin önemli bir figürü haline gelmiştir. Makine imalatı, otomotiv, metalürji, kaynak, gıda ve kimya endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal şekillendirme işlemlerinde ultrasonik titreşimlerin, malzeme hacmini ve yüzeyini ilgilendiren önemli etkileri bulunmaktadır. Hacim etkisi malzemenin deformasyona karşı gösterdiği direnci zayıflatmakta, yüzey etkisi ise şekillendirme kalıplarıyla sac malzeme arasındaki sürtünmeyi azaltmaktadır. Ultrasonik titreşimlerin hacim etkisi üzerine çalışmalar, 1955 yılında Blaha ve Langenecker [1] ile başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. Bu çalışmalarda, titreşimlerin yüzey etkisini bertaraf etmek ve sadece hacim etkisi üzerine odaklanmak için genellikle tek eksenli çekme testleri tercih edilmiş ve titreşimlerin hacim üzerindeki akustik yumuşatma [2], gerilme süperpozisyonu [3, 4], dinamik darbe [4], ısıtma [5] ve akustik sertleştirme [6] etkileri tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarda, gerilme süperpozisyonu ve akustik yumuşatma etkilerinin malzemenin akma gerilmesinin düşürülmesinde ana faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Gerilme süperpozisyonu ve akustik yumuşatma etkileri ultrasonik titreşimler uygulandığında, akustik sertleştirme etkisi ise malzemeye uygulanan titreşimler sona erdikten sonra meydana gelmektedir. Hacim etkisine ilaveten, ultrasonik titreşimlerin malzemelerin yüzeyi üzerindeki etkileri de araştırmalara konu olmuştur. Bu çalışmalarda, ultrasonik titreşimlerin etkileşen yüzeyler arasındaki kayma sürtünmesini önemli ölçüde azalttığı, bu etkinin kalıbın hareket hızına, titreşimlerin uygulama yönüne, hızına ve genliğine bağlı olduğu tespit edilmiştir [7-10]. Yüksek frekanslı titreşimlerin, düşük frekanslı titreşimlere göre sürtünme katsayısını azaltmada daha etkili olduğu ancak daha fazla aşınmaya sebebiyet verdiği belirtilmiştir [11].

Yukarıda belirtildiği üzere ultrasonik titreşimlerin malzeme üzerindeki hacim ve yüzey etkileri, genel olarak çekme, basma ve sürtünme testleriyle incelenmiştir. Bununla birlikte, ultrasonik titreşimlerin sac malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyetine etkilerini derin çekme deneyleriyle inceleyen çalışmalar da vardır. Biddell ve Sansome [12] yaptıkları çalışmada, derin çekme işleminde radyal yönde uygulanan ultrasonik titreşimlerle gerekli zımba kuvvetinin azaltılıp, çekilebilen kupa derinliğinin artırılabilirliğini göstermişlerdir. Bu çalışmayı destekleyen diğer çalışmalarda [13, 14], zımba yükünde %40'a varan azalma sağlanmış, SÇO'nun 1,9'dan 2,0'a

yükseltildiği tespit edilmiş, çekilebilen kupa derinliğinde ise yaklaşık %20'ye varan iyileştirme sağlanmıştır. Smith [15], zımbaya eksenel yönde ve baskı plakasına radyal yönde uygulanan 13 kHz'lik titreşimlerin etkilerini araştırmıştır. Eksenel titreşimlerin ortalama zımba yükünü %30 azaltmasına rağmen SÇO'yu değiştirmedikleri; radyal titreşimlerin ise maksimum zımba yükünü %30 azaltmakla birlikte SÇO'yu %12 artırdığı tespit edilmiştir. Jimma vd. [16], baskı plakası ve dişi kalıba radyal yönde 20 kHz ve 28 kHz'lik titreşimler uygulayarak soğuk haddelenmiş çelik ve paslanmaz çeliklerin SÇO'larını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda SÇO'ların %12 ile %16 arasında arttığı, maksimum zımba yükünün ise %15 azaldığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, baskı plakası veya dişi kalıba eksenel yönde uygulanacak titreşimlerin SÇO'yu daha fazla artırabileceği, ancak radyal titreşim uygulanmasının tasarım açısından şekillendirme preslerine daha kolay uygulanabildiği belirtilmiştir. Ultrasonik titreşimlerin AZ31 magnezyum alaşımlı levhalar üzerindeki etkileri, Wen vd. [17] tarafından incelenmiştir. Çekilen kupaların derinliğine ve deformasyon bölgesinin mikroyapı analizlerine dayanarak, titreşimlerin malzemenin şekillendirilebilirliği ve şekillendirme yükünü olumlu etkilediği ancak etkiyen genliğindeki artışın kırılganlığı artırarak şekillendirilebilirliği olumsuz etkilediği görülmüştür. Yamazaki vd. [18] tarafından yapılan çalışmada, dişi kalıba eksenel yönde etki eden yüksek frekanslı titreşimlerin etkileri araştırılmış; uygulanan yöntemin maksimum şekillendirme yükünü azalttığı, ancak SÇO'da herhangi bir iyileşme sağlamadığı belirtilmiştir. Chu vd. [19], baskı plakasına radyal yönde etkiyen ultrasonik titreşimlerin soğuk haddelenmiş çelik ve Al5052 alüminyum alaşımların derin çekilebilirliği üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmış, maksimum çekme derinliği ve çekme kuvvetini tepki yüzeyi metodolojisiyle incelemişlerdir. Çekme hızı ve hareket oranının, çekme kuvvetini azaltmak ve çekme derinliğini artırmak adına etkili parametreler oldukları görülmüştür. Cao vd. [20] tarafından katı granül ortamı şekillendirme ile ultrasonik titreşim destekli şekillendirmeyi birleştiren yeni bir şekillendirme yöntemi önerilmiştir. 20 kHz frekansta AZ31B magnezyum alaşımlı levhalar üzerinde yapılan deneyler, titreşimlerin granül ortamın basınç aktarım kabiliyetini ve malzemenin şekillendirilebilirliğini artırdığını göstermiştir. Lowe vd., dişi kalıba eksenel veya radyal yönde, zımbaya ise eksenel yönde ultrasonik titreşimler uygulanmasına olanak sağlayan esnek bir test düzeneği geliştirerek lifli malzemelerde ultrasonik destekli şekillendirme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Gerekli zımba kuvvetinde %80'e varan azalma sağlandığı ve yüzey kalitesinin önemli ölçüde iyileştirildiği belirtilmiştir [21]. Geometrik doğruluk ve yüzey kalitesinin işlem parametreleriyle ilişkisi belirlenmiş ve optimize edilmiştir [22]. Takip eden diğer çalışmada, eksenel titreşimlerin en etkili konfigürasyon olduğu vurgulanmıştır. Önerilen yöntemle kap mukavemetinde %200 artış ile kap yüzey pürüzlülüğünde %50 azalma sağlanmıştır [23].

Sac metal şekillendirme işlemleri; malzeme hazırlama, kalıp tasarımı ve preslemeyi içeren uzun ve maliyetli bir süreçtir. Zaman ve maliyetten tasarruf sağlamak adına deneysel uygulamalardan önce nümerik yöntemlerden faydalanılmaktadır [24-26]. Ultrasonik destekli derin çekme işleminin nümerik olarak modellenmesi de araştırmalara konu olmuştur. Ashida ve Aoyama [27], sonlu elemanlar yöntemi ile şekillendirme kalıbının titreşim modlarını incelemiş ve şekillendirme analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Ultrasonik titreşimler sayesinde sürtünme katsayısının önemli ölçüde azaldığı vurgulanmıştır. Siddiq ve El Sayed [28], ultrasonik titreşimlerin termal ve akustik yumuşatma etkilerini de içeren bir plastisite modeli geliştirerek titreşimlerin sac şekillendirme, dövme ve tel çekme üzerine etkilerini nümerik olarak incelemişlerdir. Analizler sonucunda ultrasonik enerjinin, sürtünme kuvvetini ve şekillendirme yükünü önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. Dişi kalıba uygulanan eksenel yönde ultrasonik titreşimlerin etkileri sonlu elemanlar

analizleri ile incelenmiş, deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Titreşimlerin, sürtünmeyi azaltarak SÇO'yu önemli ölçüde artırdığı görülmüştür [29,30]. Shekholeslami vd. [31], ultrasonik titreşimlerin yumuşak kalıp derin çekme üzerine etkilerini nümerik olarak incelemiştir. Zimbaya uygulanan eksenel titreşimlerin genlik ve frekansının artırılması ile pirinç malzemeden üretilen plakaların çekme derinliğinin artırılabilirliği, şekillendirme yükünün ise azaltılabildiği görülmüştür. Zha ve Chen [32], mikro-kare kapların ultrasonik titreşim destekli şekillendirilmesi sırasında çekme derinliğini belirlemek için bir tahmin modeli geliştirmiştir. Geliştirilen modelin kap derinliğini nümerik analizlere göre %15,1, deneysel sonuçlara göre ise %4,95 ortalama hata oranıyla tahmin ettiği görülmüştür. Malekipour vd., rezonans frekansı ve titreşim genliğindeki değişimlerin ultrasonik destekli derin çekme işlemindeki etkilerini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır. Modal analizlerle elde edilen zorlanmış titreşim frekansları, şekillendirme analizlerinde kullanılmıştır. 20 kHz frekansta, 5µm titreşimlerin kullanılmasıyla geleneksel derin çekmeye göre şekillendirme yükünde %5,6 azalma, SÇO'da ise %12,2 artış görülmüştür [33]. Sabit genlikte titreşim frekansının artırılmasıyla şekillendirme yükündeki azalmanın %15,8'e ulaştığı, sabit frekansta genliğin artırılması ile ise şekillendirme yükündeki azalmanın devam ettiği belirtilmiştir. 10 µm genlik seviyesinin şekillendirilen kaptaki en uygun kalınlık dağılımını sağladığı vurgulanmıştır [34].

Yukarıda bahsedildiği üzere, çeşitli konfigürasyonlarda ultrasonik titreşimlerin derin çekme işlemi üzerine etkileri farklı malzemeler üzerinde deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Ancak literatürde, en etkili konfigürasyon olduğu düşünülen titreşimlerin baskı plakasına eksenel yönde uygulandığı bir çalışma bulunmamaktadır. Söz konusu konfigürasyon; deneysel çalışmalarda kalıpların tasarlanması ve pres üzerinde konumlandırılması adına belirli zorluklar ve kısıtlar oluşturmakta, nümerik çalışmaları açısından ise baskı plakasının pozisyon-kuvvet ilişkisinin tanımlanmasını gerektirmektedir. Çünkü şekillendirme sırasında baskı plakası, belirli bir baskı plakası kuvvetine ve ultrasonik titreşimlere aynı yönde maruz kalmaktadır. Diğer konfigürasyonlarda; titreşimlerin uygulandığı elemanın (dişi kalıp, zimba) pozisyon modellemesi yeterlidir, dolayısıyla ilgili elemanın maruz kalacağı yük miktarı pozisyona göre şekillendirilmenin bir sonucudur. Ancak baskı plakasına eksenel titreşimlerin uygulanması, ilgili hareket noktasında kuvvet-pozisyonun etkileşiminin tanımlanmasını gerektirmektedir. Buradan hareketle bu çalışmada, baskı plakasına uygulanan eksenel titreşimlerin etkilerini inceleyebilmek için iki aşamalı bir sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Baskı plakasının tüm şekillendirme süreci boyunca pozisyon-kuvvet ilişkisi zamana bağlı yapısal analizlerle belirlenmiş, elde edilen veriler ise şekillendirme analizlerinde kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analiz sonuçları, gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları ile kıyaslanmıştır.

2. Malzeme Seçimi ve Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi (Material Selection and Determination of Material Properties)

Derin çekme işlemleri için sac malzeme seçimi; malzemenin mekanik özellikleri, sektörlerdeki kullanımı ve mevcudiyeti gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. İşlemin yaygın olarak kullanıldığı otomotiv endüstrisinde özellikle otomobil gövde parçalarının üretiminde soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelikler sıklıkla tercih edilmektedir. Sac metalin çekilebilirliği, malzemenin mekanik özelliklerinin yanı sıra kalınlığıyla da doğrudan ilişkilidir ve kalınlığın azalmasıyla önemli ölçüde azalır. İnce sac malzemeler kırılmaya daha yatkındır, kırılmayı önlemek adına yüksek baskı plakası kuvveti uygulandığında malzeme yırtılma eğilimi gösterir. Bu durum, çok ince malzemelerin çekme oranını sınırlar. Bu çalışmada temel amaç ultrasonik titreşimlerin vasıtasıyla malzemenin SÇO'sunu artırmak ve yırtılmayı önlemek olduğundan; kırılma ve yırtılma eğilimi yüksek olan ve EN 10130

standardına [35] uygun olarak üretilmiş 0,33 mm kalınlığında DC04 ve 0,40 mm kalınlığında DC01 soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelikler tercih edilmiştir. Lazer kesim yöntemiyle, tek eksenli çekme testlerinde kullanılacak numuneler ve derin çekme deneylerinde kullanılacak dairesel levhalar hazırlanmıştır. DC04 ve DC01 malzemelerin kimyasal bileşimleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. DC04 ve DC01 malzemelerin kimyasal bileşimleri (%) [36] (Chemical composition (%) of DC04 and DC01)

Malzeme	Erdemir Kalite No	$C_{(max)}$	$P_{(max)}$	$S_{(max)}$	$Mn_{(max)}$
DC04	6114	0,08	0,030	0,030	0,40
DC01	6112	0,12	0,045	0,045	0,60

Sac levhanın şekillendirilebilirliğini tahmin etmek için gerçekleştirilecek sonlu elemanlar analizleri için iki farklı deneysel veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan ilki anizotropik malzeme modelinin bilgisayar ortamında tanımlanabilmesini sağlayan ve farklı doğrultularda tek eksenli çekme testleri ile elde edilen Lankford Katsayıları (r); diğeri ise şekillendirilebilirliğin sınırlarını belirleyen Şekillendirme Sınır Diyagramı ($\dot{\epsilon}_{SSD}$)'dir.

2.1. Tek Eksenli Çekme Testleri (Uniaxial Tensile Tests)

Bu çalışmada sac malzemenin anizotropi davranışını gösteren Lankford katsayıları (r), farklı doğrultulardaki tek eksenli çekme testleri sayesinde deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca, her doğrultudaki mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) tespit edilmiştir.

r -değeri; tek eksenli çekme testine maruz kalan numunede gerçek plastik genişlik gerinmesinin, gerçek plastik kalınlık gerinmesine oranıdır. Ancak, kalınlıktaki boyutsal değişikliklere kıyasla uzunluktaki değişiklikler daha hassas ölçülebildiğinden, r -değerini hesaplamak için Eş. 1 kullanılmış ve maksimum kuvvette elde edilen plastik uzama yüzdesine ulaşmaya kadar hacmin sabitliği ilkesinden faydalanılmıştır [37].

$$r = \frac{\ln\left(\frac{b}{b_0}\right)}{\ln\left(\frac{L_0 b_0}{L b}\right)} \quad (1)$$

r -değeri, test numunesinin hadde yönüne bağlıdır ve hadde yönüne göre doğrultusunu karakterize eden açı ile tanımlanır. Bu amaçla, master uzunluğu 80 mm ve genişliği 20 mm olan numuneler hadde yönünde (r_0), diyagonal doğrultuda (r_{45}) ve hadde yönüne dik doğrultuda (r_{90}) olmak üzere ISO 6892-1 standardına [38] göre hazırlanmış ve ISO 10113 standardına [37] uygun olarak 10 mm/min deformasyon hızında test edilmiştir. Testler 30 ton yüklem kapasiteli Shimadzu AG-X serisi cihazda gerçekleştirilmiştir. Ölçüm hatalarını azaltmak amacıyla malzemeler, her yönde en az üç numune ile teste tabi tutulmuştur. Bu durum sadece plastik gerinmenin homojen olduğu bölgede geçerli olduğundan, genişlik ölçümü için numune üzerinde master uzunluğu boyunca eşit aralıklarda 9 bölge belirlenmiş ve ölçümlerin ortalamaları dikkate alınmıştır. Lankford katsayılarının maksimum yükte ölçülmesi gerektiğinden her testte maksimum yüke ulaşıldığında test durdurulmuş, ölçümler sonrasında devam ettirilmiş ve numunenin kırılmasıyla sonlandırılmıştır. Test düzeneği ile farklı doğrultularda test edilmiş numuneler Şekil 1'de gösterilmektedir. Elde edilen Lankford katsayıları Tablo 2'de verilmiştir.

Nümerik analizler sırasında malzeme davranışının tanımlanması için anizotropinin yanı sıra akma mukavemeti, nihai çekme mukavemeti, mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) gibi diğer özellikler de testlere dayalı olarak belirlenmiştir. Plastik bölgedeki gerilme-uzama ilişkisi Holloman denklemi (Eş. 2) ile ifade edilebilir.

Tablo 2. Anizotropik özellikler ve Lankford katsayıları (Anisotropic properties and Lankford coefficients)

Malzeme	Yön (°)	L _{ort} (mm)	b _{ort} (mm)	Mastar Gerinmesi	r _{ort}
DC04	0	96,73	17,868	0,209	1,46
	45	95,97	18,146	0,200	1,15
	90	96,85	17,968	0,206	1,33
DC01	0	96,62	18,299	0,208	0,89
	45	96,15	18,420	0,202	0,81
	90	96,28	18,125	0,204	1,13

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2)$$

Logaritmik ölçekte gerçek gerilme-gerinme grafiğinin eğimi pekleşme üstelini (n), gerçek gerinmenin bire eşit olduğu durumdaki gerçek gerilme değeri ise mukavemet katsayısını (K) vermektedir. Buradan hareketle, eğimi belirlenebilen bir doğru plastik bölgedeki gerçek gerilme-gerinme grafiğine eğri uydurma yöntemiyle eşleştirilmiş ve doğrunun denklemi elde edilmiştir. Hadde yönünde (0°) test edilen DC04 numunelerinden birisi için, elde edilen doğrunun denklemi ve Holloman ile elde edilen akma gerilmesi grafiğinin deneysel grafik ile uyumu Şekil 2'de gösterilmiştir. Sonuç olarak, Holloman denklemi kullanılarak her iki malzeme türü için tüm doğrultularda K ve n değerleri elde edilmiştir. Tablo 3'te tüm doğrultulardaki akma mukavemeti (S_y), nihai çekme mukavemeti (S_{ut}), mukavemet katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) verilmiştir.

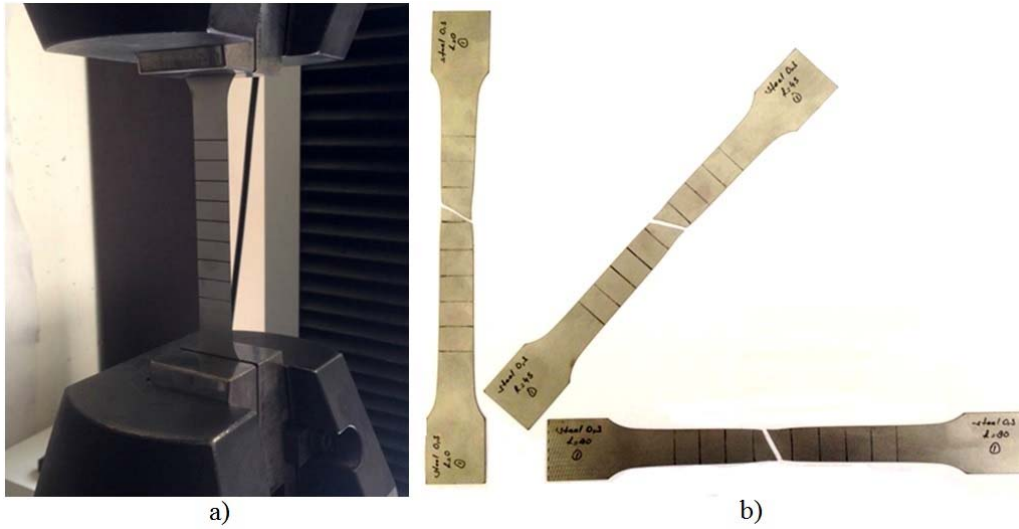
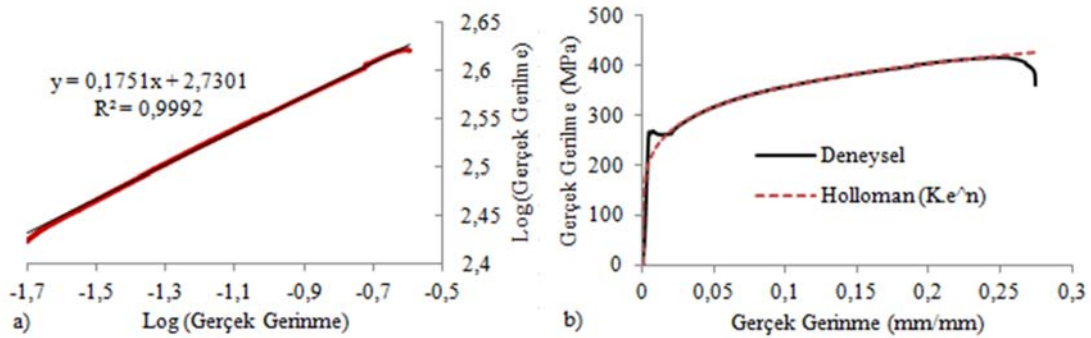
Tablo 3. DC04 ve DC01'in farklı yönlerdeki mekanik özellikleri (Mechanical properties of DC04 and DC01 in different directions)

Malzeme	Yön (°)	S_y (MPa)	S_{ut} (MPa)	K_{ort} (MPa)	n_{ort}
DC04	0	256,7	329,7	533,0	0,176
	45	260,5	335,2	538,0	0,173
	90	246,4	329,8	536,8	0,182
DC01	0	348,3	399,3	661,3	0,193
	45	357,4	403,1	656,7	0,183
	90	356,5	397,0	654,7	0,190

2.2. Şekillendirme Sınır Diyagramı (Forming Limit Diagram)

Şekillendirme Sınır Diyagramı (ŞSD), sac metal şekillendirmede lokalize boyun verme hatalarını tespit etmek için kullanılır. Bu yöntemde, şekillendirilebilirliğin sınırları büyük ve küçük gerinmeler olarak tanımlanır. ŞSD'de Şekillendirme Sınır Eğrisi (ŞSE), düzlem içi büyük gerinmenin küçük gerinmeye karşı şekillendirme sınırı olarak kullanılır ve bu sınırın ötesinde sac metalin lokalizasyona başlayarak yırtıldığı kabul edilir [39].

ŞSE genellikle deneysel olarak belirlenir, ancak literatürde teorik çalışmalar da mevcuttur. Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çeliklerin şekillendirme sınırlarının, Keeler-Brazier (KB) ampirik ilişkisi [40] ile kesin olarak tahmin edilebileceği ifade edilmiştir [41]. Bu sebeple, sac metaldeki yırtılmayı tahmin etmek için gerinmeye dayalı KB ampirik ŞSD tercih edilmiştir. Söz konusu ampirik

**Şekil 1.** a) Test düzeneği b) Üç farklı doğrultuda kırılmış numuneler ((a) Testing of specimen (b) Fractured specimens in three directions)**Şekil 2.** a) Eğri uydurma yöntemiyle elde edilen denklem b) K ve n değerlerinin deneysel veri ile kıyaslanması ((a) Equation obtained by curve fitting method (b) Comparison of K and n values with experimental data)

formülasyon, analiz sonuçlarının eş zamanlı karşılaştırılması için bu çalışmada çözücü olarak kullanılan LS-DYNA'nın sonuç işleminde bulunmaktadır. KB formülasyonunda ŞSD'nin büyük gerinme eksenine kesişimi (ŞSD₀), Eş. 3 kullanılarak hesaplanır; dolayısıyla sac metalin ŞSD'si, sınır gerinmenin tahmini için grafikte kaydırılarak elde edilir [40, 41].

$$\text{ŞSD}_0 = \ln \left[\frac{1+n(23.3+14.134t_b)}{21.0} \right] \quad (3)$$

Farklı deformasyon aşamalarında malzemenin olası kırışma ve aşırı incelleme bölgeleri, malzemenin pekleşme üsteli (n) ve sac kalınlığı (t_b) kullanılarak tahmin edilir. Malzemede gerinme, sınır gerinme değerini aştığında yırtılma gerçekleşir.

3. Nümerik Metot (Numerical Method)

Titreşim destekli şekillendirmeyi nümerik olarak modelleyebilmek için, titreşime maruz kalan kalıbın hareket profili harmonik olarak tanımlanmalıdır. Kalıbın hareketi, zamana göre Eş. 4 kullanılarak tanımlanabilir.

$$x = A \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

Diğer taraftan bu çalışmada ultrasonik titreşimlerin, baskı plakası yayı tarafından sürekli olarak bir kuvvetin etkisine maruz kalan baskı plakasına uygulanması hedeflenmiştir. Bu nedenle, ultrasonik titreşim sisteminin aktif elemanı olan sonotrotun baskı plakası olarak kullanılması amaçlanmıştır. Şekillendirme sırasında sonotrot, ultrasonik dönüştürücü tarafından üretilen titreşimleri sac metale iletmekte ve aynı zamanda dişi kalıbın hareketi ile baskı plakası yayı üzerinde hareket etmektedir. Böylece sonotrot, işlem boyunca büyüklüğü değişen baskı plakası kuvvetinin etkisi altında titreşmektedir. Ancak, şekillendirme analizlerinde kalıbın konumunu ve üzerine etkiyen kuvvetin büyüklüğünü aynı anda kontrol etmek mümkün değildir. Bu durumda, kalıbın pozisyonunu değişken kuvvet altında modellemek veya titreşimlerin neden olduğu kuvvet değişimini modellemek gerekir.

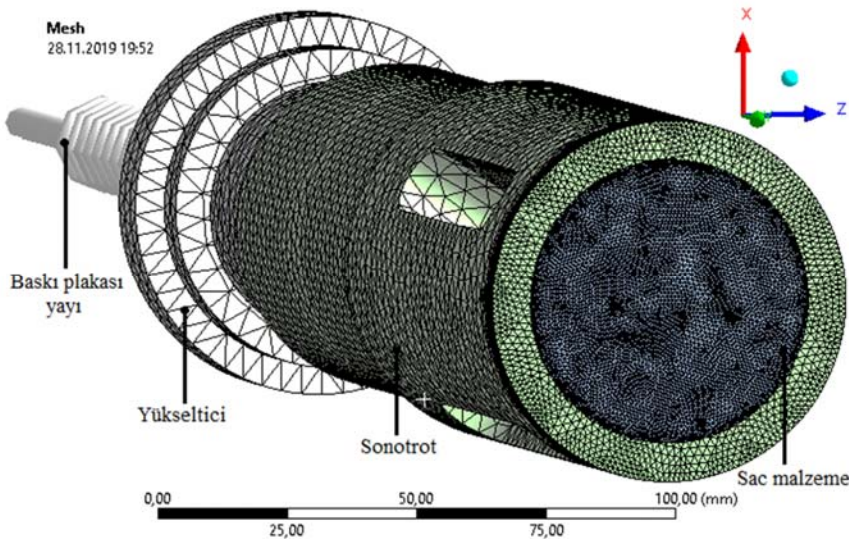
Bu sebeplerden ötürü bu çalışmada, iki aşamalı bir SEA yaklaşımı kullanılmıştır. İlk aşamada, kalıp sisteminin ultrasonik titreşimler ve baskı plakası yayı ($k=253,76 \text{ N/mm}$) etkisi altında zamana bağlı yapısal modeli oluşturulmuştur. İşlemin başından sonuna kadar

malzemenin geometrisindeki ve baskı plakası kuvvetindeki değişimler dikkate alınarak, malzeme ile sonotrot arasındaki temas kuvveti SEA ile belirlenmiştir. Karşılık gelen yüklenme koşulları altında temas kuvvetindeki değişim matematiksel olarak tanımlanmıştır. İkinci aşamada ise zamana bağlı yapısal analizler sonucunda elde edilen ultrasonik dalgalı baskı plakası kuvvetinin etkisi altında şekillendirme analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. Zamana Bağlı Yapısal Analizler (Transient Structural Analyses)

Sac malzeme ve sonotrot arasındaki temas kuvvetini belirlemek için, tüm kalıp bileşenleri elastik olarak tanımlanmış, kalıp sisteminin zamana bağlı yapısal analizi ANSYS Workbench Zamana Bağlı Yapısal Araç Kutusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik yükseltici titanyum alaşımı ($E=113,8 \text{ GPa}$, $\nu=0,342$), sonotrot DIN 2379 çeliği ($E=210 \text{ GPa}$, $\nu=0,3$), diğer şekillendirme kalıpları yapısal çelik ($E=200 \text{ GPa}$, $\nu=0,3$), sac malzeme ise soğuk haddelenmiş çelik ($E=200 \text{ GPa}$ ve $\nu=0,3$) olarak tanımlanmıştır. Yapısal analizlerde malzeme üzerinde plastik deformasyon meydana gelmeyeceği ve malzemelerin anizotropisi temas kuvvetini ciddi oranda etkilemeyeceği için tüm malzemelerin lineer elastik-izotropik malzeme modeline sahip olduğu varsayılmıştır. Yükseltici ve sonotrot birbirine vida ile sabitlendiğinden aralarındaki temas, ayrılmaya ve kaymaya müsaade etmeyen bağlı temas olarak tanımlanmıştır. Sürtünmeli temas bölgelerinde sürtünme katsayısına karar vermek amacıyla, detayları Bölüm 3.2'de verildiği üzere, ön şekillendirme analizleri gerçekleştirilmiş ve sac malzeme-sonotrot ve dişi kalıp-sac malzeme temas bölgeleri 0,2 sürtünme katsayısı ile sürtünmeli temas olarak tanımlanmıştır. Baskı plakası yayı, ultrasonik titreşimlerin yaydan geçerek kaybolmasını önlemek adına genliğin sıfır olduğu yükselticinin flanş bölgesi ile sistemin yerleştirildiği zemin arasında modellenmiştir. Ayrıca, dişi kalıp boşluğuna çekilen malzemeyi iterek çıkarmak için kullanılan tahliye yayı, tahliye çubuğu üzerine yerleştirilmiştir. Zımbanın alt yüzeyi ve dişi kalıbın üst yüzeyi ise tüm eksenlerde sabitlenmiştir.

Temas problemlerinin SEA'sında, ağırlık eleman boyutu temas kuvvetini önemli ölçüde etkilemektedir. Temas yüzeyinde en uygun ağ yapısına karar vermek amacıyla çok sayıda ön analizler gerçekleştirilmiştir. Sac malzeme yüzey ağ yapısının Seviye-1'den ve sonotrot yüzey ağ yapısının Seviye-3'ten daha fazla rafine edilmesinin işlem boyunca temas kuvveti değişimini önemli ölçüde etkilemediği fark edilmiştir. Bu nedenle maksimum eleman boyutu tüm sistem için



Şekil 3. Sonotrot ve sac malzemede ağ inceltmesi (Mesh refinement on sonotrot and blank)

2 mm olarak tanımlanmış, sac malzeme ve sonotrotta sırasıyla birinci ve üçüncü derecede ağ inceltmesi yapılmıştır. Başlangıçtaki sac malzeme çapına bağlı olarak toplam eleman sayısı yaklaşık 230000'dir, mevcut ağ yapısı yaklaşık 400000 düğüm noktası içermektedir. Sonotrot ve sac malzemedeki ağ inceltme Şekil 3'te gösterilmiştir.

Ultrasonik jeneratörün üç farklı titreşim genlik seviyesi için sonotrot yüzeyindeki titreşim genliği piezoelektrik ivmeölçer ile ölçülmüştür. Transdüserin sağladığı titreşim genliği (yükseltici giriş genliği) ile sonotrot çıkış genliğine göre sistemin sönümlenme oranı harmonik tepki analizleriyle tahmin edilmiş, böylece yükseltici giriş genlikleri belirlenmiştir. Farklı jeneratör genlik seviyelerinde yükseltici giriş ve sonotrot çıkış genlik değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Sonuç olarak, 20,5 kHz frekansında ve Tablo 4'te belirtilen genlik değerlerindeki ultrasonik titreşimler, Eş. 4 kullanılarak elde edilen sinüs dalgası şeklinde yükseltici girişine yer değiştirme olarak tanımlanmış ve sonotrot ile sac malzeme arasındaki zamana bağlı temas kuvveti araştırılmıştır. Sac malzemenin ilk halinde (55 mm'lik çapta) tüm kalıp sisteminin aksel deformasyonu Şekil 4'te gösterilmektedir.

İşlemin başlangıcından sonuna kadar 0,5 sn aralıklarla sac malzeme geometrisindeki değişim ve baskı plakası yayı üzerindeki sıkışma dikkate alınarak zamana bağlı yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Her analizde sistemin tepki süresi düşünülerek 7 titreşim darbesi boyunca çözüm elde edilmiş ve temas kuvvetinde meydana gelen dalgalanmanın ortasındaki 3 adet dalga dikkate alınmıştır. Şekil 5'te 10 mm'lik baskı plakası yayı ön yüklem etkisi altında 55 mm'lik çapta DC04 malzeme üzerinde işlemin başlangıcında ve 1 sn sonrasında meydana gelen temas kuvvetleri gösterilmektedir.

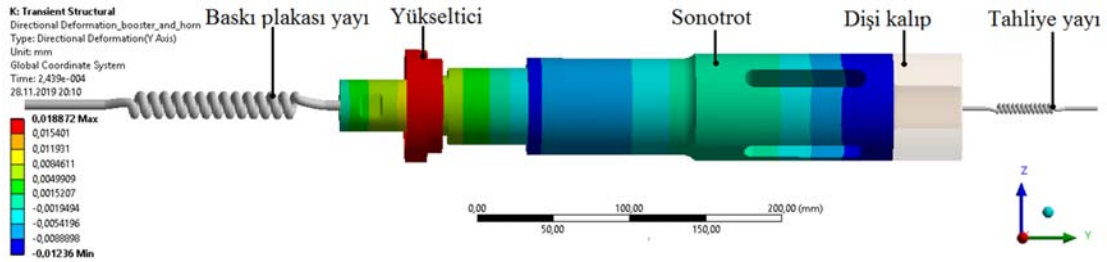
Şekil 5'te görüldüğü üzere, Ultrasonik Destekli Derin Çekme (UD) işleminde temas kuvveti sıfır ile maksimum değer arasında harmonik olarak değişmektedir. Temas kuvvetinin sıfıra düşmesi, işlem sırasında sac malzeme yüzeyi ile sonotrot arasındaki temasın ayrılmasından kaynaklanmaktadır. Bunun nedeni, ultrasonik titreşimlerin etkisi altındaki sonotrot yüzeyinin geriye doğru hareket hızının, baskı plakası yayının salınma hızı ve pres koçunun hareket hızının toplamından daha büyük olmasıdır. Dolayısıyla işlem boyunca, sonotrot ile sac malzeme arasındaki temas anlık olarak kaybolmakta ve kısa süre içerisinde yeniden sağlanmaktadır. Ayrıca, maksimum temas kuvvetinin işlem boyunca azaldığı Şekil 5'te görülmektedir. Sac malzeme dişi kalıbın içine çekildikçe; sonotrot ile temas eden sac malzeme yüzey alanı küçülürken, baskı plakası yayı tarafından uygulanan kuvvet ise artmaktadır. Temas kuvveti açısından, yüzey temas alanındaki azalmanın baskı plakası yayı kuvveti artışına göre daha baskın olduğu görülmektedir. Zamana bağlı yapısal analizlerle elde edilen ve şekillendirme analizlerinde Baskı Plakası Kuvveti (BPK) olarak kullanılacak temas kuvvetini matematiksel olarak tanımlamak için Eş. 5'te verilen harmonik ifade kullanılmıştır.

$$BPK = [F_m + F_a \sin(2\pi ft)] * \left(\frac{k_r}{k_r+t}\right) \quad (5)$$

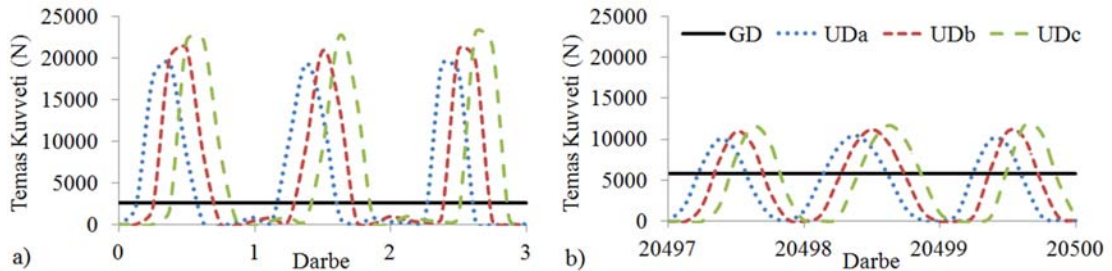
k_r , işlem boyunca maksimum BPK'deki azalmayı modellemek için kullanılan indirgeme faktörüdür ve her bir şekillendirme analizi için zamana bağlı yapısal analizlerle nümerik olarak tespit edilmiştir. 10 mm'lik baskı plakası yayı ön yüklem etkisi altında 55 mm'lik çapta DC04 malzeme üzerinde farklı genlik seviyelerinde işlemin başından sonuna kadar Eş. 5 kullanılarak elde edilen BPK'deki değişimler Şekil 6'da gösterilmektedir.

Tablo 4. Jeneratör genlik seviyelerine göre yükseltici giriş ve sonotrot çıkış genlik değerleri (Booster input and sonotrot output amplitude values according to generator amplitude levels)

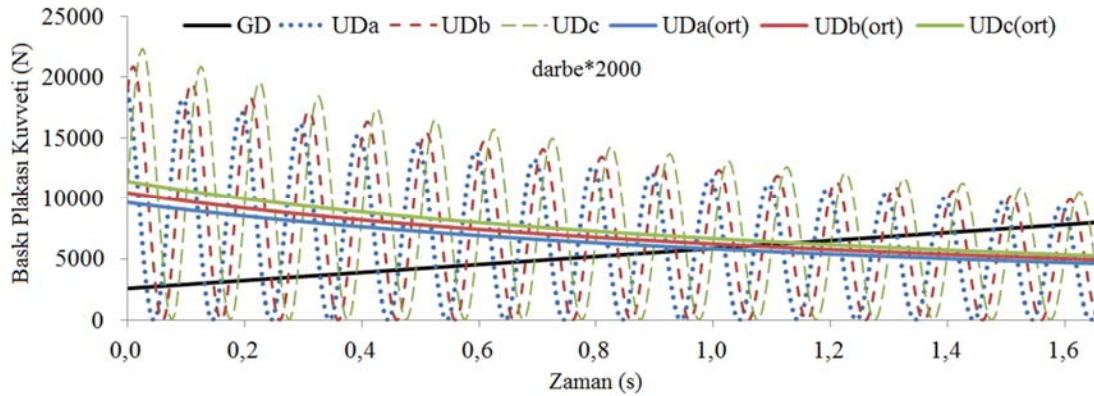
Titreşim Seviyesi	Jeneratör Genlik Seviyesi (%)	Yükseltici Giriş Genliği (µm)	Sonotrot Çıkış Genliği (µm)
UDa (düşük)	50	7,98	5,67
UDb (orta)	75	9,03	6,61
UDc (yüksek)	100	10,00	7,12



Şekil 4. Zamana bağlı yapısal analizde kalıp sisteminin aksel yönlü deformasyonu (Directional deformation of die system in transient structural analysis)



Şekil 5. Farklı genlik seviyelerindeki temas kuvvetleri a) işlemin başlangıcında, b) 1 sn sonra (Contact forces at different amplitude levels a) at the beginning of process, b) after 1 s.)

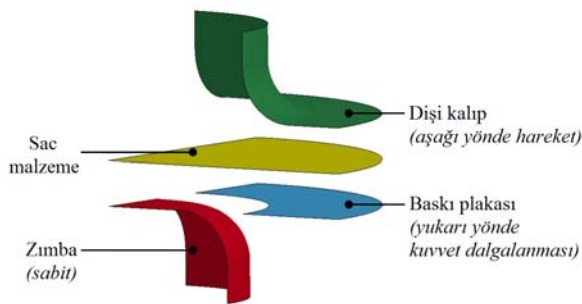


Şekil 6. BPK'deki değişimler (Variations in BHF)

Şekil 6'da görüldüğü üzere titreşimlerin dinamik darbe etkisinden ötürü ultrasonik dalgalı BPK'nin maksimum değeri, Geleneksel Derin Çekme (GD) işlemindeki BPK'den önemli ölçüde yüksektir. Yüksek frekanslı bu yükleme durumu, şekillendirme sırasında gerilme süperpozisyonu sağlar. Başlangıçta, UD işleminde BPK'nin ortalaması, GD işlemine göre daha yüksektir. Süreç devam ettikçe GD işlemindeki BPK, baskı plakası yayının sıkışmasıyla artar ve bir süre sonra UD işlemindeki BPK ortalamasını aşar. Öte yandan UD işleminde, sac malzeme ile sonotrot arasındaki yüzey temas alanının küçülmesi nedeniyle işlem ilerledikçe BPK azalmaktadır.

3.2. Şekillendirme Analizleri (Forming Analyses)

Şekillendirme simülasyonları için üç boyutlu SEA'lerden faydalanılmıştır. Dişi kalıp, baskı plakası, zımba ve sac malzemeye ait tüm yüzey modelleri, ağ yapıları ve sınır koşulları ANSYS Workbench'te oluşturulmuştur. Analizler, doğrusal olmayan LS-DYNA çözücü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, simülasyon sürelerini kısaltmak için sac malzemenin tüm geometrisi yerine çeyrek kesiti simetrik düzlem sınır koşulları baz alınarak modellenmiştir. Rijit cisimlerin deformasyon geçmişlerinin depolanması gerekmediğinden hesaplama verimliliğini artırmak adına zımba, dişi kalıp ve baskı plakası gibi bileşenler MAT_020 eleman tipi ile rijit olarak tanımlanmıştır. Zımba tüm eksenlerde sabitlenmiş, dişi kalıbın tanımlanan hız ile aşağı yönlü hareketine izin verilmiştir. Baskı plakası ise matematiksel modele göre ultrasonik olarak dalgalanan yukarı yönlü kuvvet ile yüklenmiştir. ANSYS Workbench'te oluşturulan model bir çözücü dosyasına yazılmış, baskı plakası üzerindeki değişken kuvvet Eş. 5 kullanılarak çözücü dosyasında tanımlanmıştır.



Şekil 7. Çekme kalıplarının ve sac malzemenin modellenmesi (Modeling of drawing tools and sheet blank)

Sac malzeme, aynı kalınlıktaki kabuk elemanları ile minimum ağ boyutu 0,1 mm olacak şekilde ağ yapısıyla donatılmıştır. Farklı ağ

yapılarıyla gerçekleştirilen analizlerde, daha ince ağ yapısının maksimum çekilebilir malzeme çapını değiştirmediği görülmüştür. Toplam eleman sayısı, başlangıçtaki malzeme çapına bağlı olmak üzere, 6966 ile 11039 arasında değişmektedir. Tüm analizlerde adım-zaman aralığı $2E-7$ sn olarak tanımlanmış ve sonuçlar eşit aralıklı 200 noktada incelenmiştir. Şekillendirilebilir malzemelerin modellemesinde, LS-DYNA içerisinde MAT_036 eleman tipi ile MAT 3-PARAMETER BARLAT olarak tanımlanmış olan ve polikristal çelik sacın normal ve düzlemsel anizotropisine duyarlı Barlat-89 akma kriteri [42] kullanılmıştır. Analizlerdeki sürtünme katsayısı, gerçekleştirilen ön deneylere dayalı olarak tahmin edilmiştir. 20 mm baskı plakası yayı ön yükleme seviyesinde DC04 malzeme üzerinde GD deneyleri gerçekleştirilmiş ve yırtılmadan başarıyla çekilebilen maksimum malzeme çapının 53 mm olduğu görülmüştür. Daha sonra aynı koşullardaki analizlerde, sürtünme katsayısı 0,01 aralıklarla artırılarak 53 mm çapındaki malzemenin başarıyla çekilmesine olanak tanıyan ancak 54 mm'lik çapta malzemenin yırtılmasına neden olan sürtünme katsayısı tespit edilmiştir. Böylece tüm analizlerde zımba-malzeme, dişi kalıp-malzeme ve baskı plakası-malzeme ara yüzeylerinde 0,2'lik sürtünme katsayısı ile Coulomb sürtünme modeli uygulanmıştır.

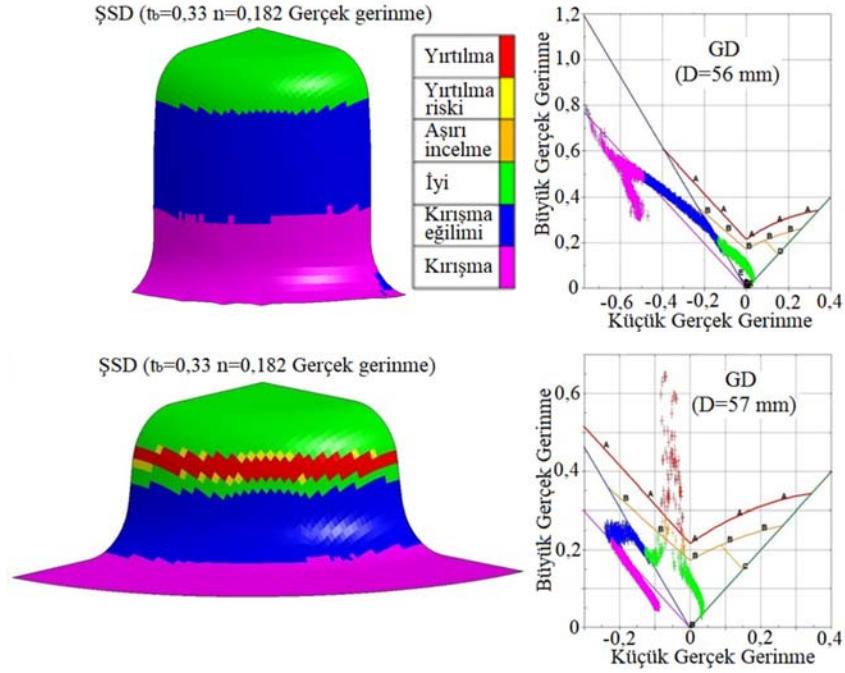
SÇO ve kupa derinliğinin belirlenmesi, kademeli olarak artan çapa sahip dairesel malzemeler üzerinde bir dizi derin çekme analizleri gerektirir. Güvenli çekme işlemi için kritik çap, yırtılmadan çekilebilecek maksimum çaptır (D_{maks}) ve SÇO'nun hesaplanmasında kullanılır. Dolayısıyla SÇO, çapı kritik çaptan büyük olan malzemede yırtılmanın gerçekleşeceğini ifade eder. Bu çalışmada, çapları 50 mm'den başlayarak 65 mm'ye kadar 1 mm'lik aralıklarla ardışık olarak artan dairesel levhalar analiz edilmiş ve başarıyla çekilebilen en büyük çap dikkate alınarak malzemelerin ilgili koşullar altındaki SÇO ve kupa derinlikleri tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

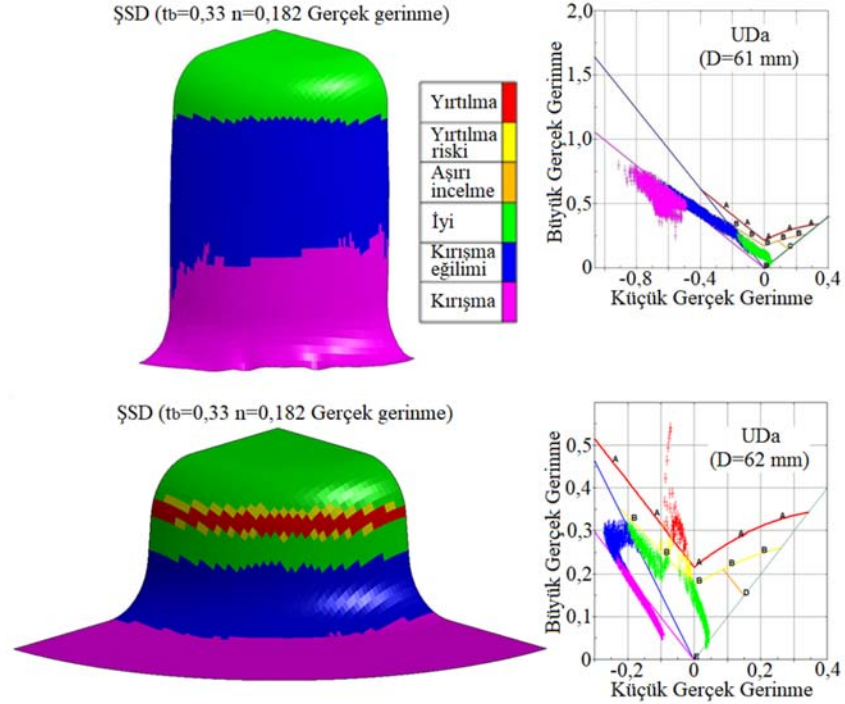
Ultrasonik titreşimlerin neden olduğu yüksek frekanslı BPK'nin SÇO ve sac malzemedeki incelmeye üzerine etkilerini araştırmak için SEA'lar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları; titreşim genliği, baskı plakası yayı ön yükleme seviyesi, malzeme türü veya şekillendirme hızından bağımsız olarak, ultrasonik titreşimlerin her koşulda SÇO'da önemli artışa ve malzeme incelmesinde ciddi azalmaya sebep olduğunu ortaya koymuştur.

4.1. Ultrasonik Titreşimlerin SÇO ve Kupa Derinliği Üzerine Etkisi (Effect of Ultrasonic Vibrations on LDR and Cup Depth)

GD ve UD işlemlerinde elde edilen analiz sonuçları sırasıyla Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekil 8'de görüldüğü üzere 26,8



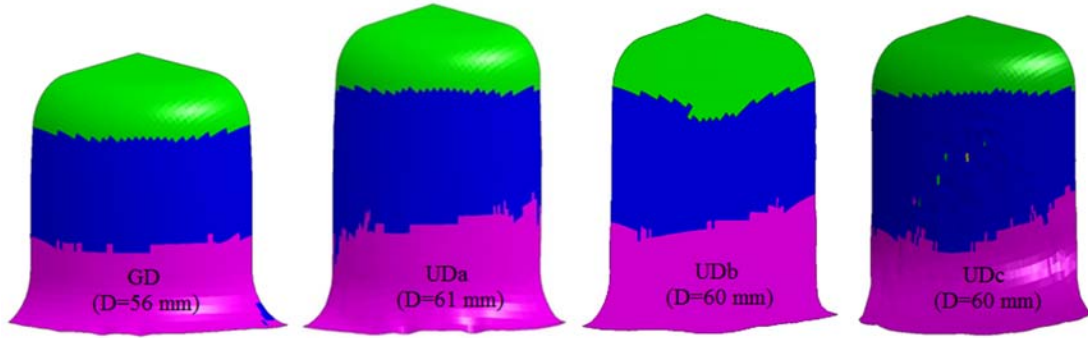
Şekil 8. GD işleminde maksimum çekilebilir malzeme çapı ve daha büyük çapın yırtılması (Maximum drawable blank diameter and tearing of subsequent blank in conventional process)



Şekil 9. UD işleminde maksimum çekilebilir malzeme çapı ve daha büyük çapın yırtılması (Maximum drawable blank diameter and tearing of subsequent blank in ultrasonic vibration assisted process)

mm'lik zımba çapı kullanılarak 10 mm'lik baskı plakası yayı ön yükleme ve 13 mm/s şekillendirme hızında; DC04 malzemede GD ile çekilebilen en büyük çap 56 mm, SÇO ve kupa derinliği ise sırasıyla 2,09 ve 22,55 mm'dir. Şekil 9'da ise düşük genlikteki UD (*UDa*) işlemi sonucunda aynı koşullarda çekilebilen en büyük malzeme çapının 61 mm, karşılık gelen SÇO ve kupa derinliğinin ise sırasıyla

2,276 ve 28,01 mm olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, düşük genlikli (*UDa*) titreşimlerin sayesinde kupa derinliğinde ve SÇO'da sırasıyla %24,2 ve %8,9 oranında artış sağlanmıştır. Bununla birlikte, orta (*UDb*) ve yüksek (*UDc*) genlikte titreşimler uygulandığında, çekilebilen maksimum çapın 60 mm olduğu Şekil 10'da görülmektedir. Bu durumda, SÇO'daki iyileşme %9'dan %7'ye, kupa



Şekil 10. GD ve UD işlemlerinde çekilebilen kupa derinliklerinin karşılaştırılması
(Comparison of cup depths in conventional and ultrasonic vibration assisted processes)

derinliğindeki iyileşme ise %24,2'den %19,2'ye düşmektedir. GD işleminde SÇO ve kupa derinliğinin BPK seviyesinden önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. DC04 malzemede 13 mm/s şekillendirme hızında yapılan analizlerde, 10 mm'lik baskı plakası yayı ön yüklem etkisi altında D_{maks} değeri 56 mm ($SÇO=2,090$) iken, 20 mm ve 30 mm'lik ön yüklemelerde D_{maks} 'ın sırasıyla 53 mm ($SÇO=1,978$) ve 50 mm'ye ($SÇO=1,866$) düştüğü görülmüştür. Dolayısıyla BPK'daki artış, SÇO ve kupa derinliğini önemli ölçüde azaltmıştır. Diğer taraftan UD analizlerinde, BPK'nın artmasıyla SÇO'daki iyileşmenin daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. 10 mm'lik ön yüklemde SÇO'daki artış %8,9 (2,090'dan 2,276'ya), 20 mm'lik ön yüklemde ise %9,4 (1,978'den 2,164'e) olmuştur. Kupa derinliğindeki artış %26,6'ya ulaşmıştır.

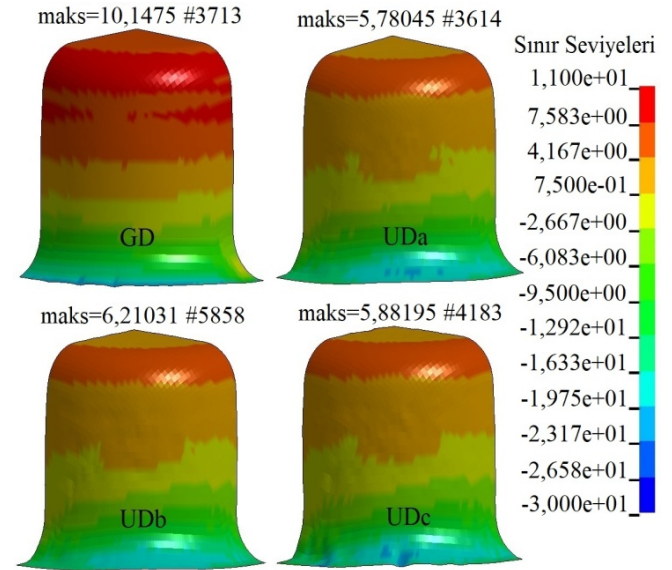
Bununla birlikte GD analizlerinde, DC01 ve DC04 malzemelerin SÇO'ları birbirine oldukça yakındır. Baskı plakası yayının 10 mm ön yüklendiği analizlerde D_{maks} , DC01 için 55 mm iken DC04 için 56 mm'dir. Benzer şekilde UD analizlerinde, SÇO'daki artışın malzeme türünden çok fazla etkilenmediği görülmüştür. SÇO'daki artış DC01 için %9,1 (2,052'den 2,239'a), DC04 için ise % 8,9 (2,090'dan 2,276'ya) olarak tespit edilmiştir.

DC01 ve DC04 malzemelerin gerinme hızına duyarlılığı ihmal edilebilir olduğundan ve dolayısıyla bu çalışmada oluşturulan malzeme modellerinde ihmal edildiğinden, GD işleminde şekillendirme hızının SÇO üzerinde hiçbir etkisi olmamıştır. Diğer taraftan UD analizlerinde, şekillendirme hızının artırılması SÇO'daki artış önemli ölçüde sönümlenmiştir. 13 mm/s şekillendirme hızında SÇO'daki artış %8,9 (2,090'dan 2,276'ya) iken, 50 mm/s şekillendirme hızında bu artışın %5,3'e (2,090'dan 2,201'e) düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni, şekillendirme hızının artmasıyla işlem süresinin ve buna bağlı olarak ultrasonik titreşimlerin etkiye süresinin azalmasıdır.

4.2. Ultrasonik Titreşimlerin Sac Malzemenin İncelmesi Üzerine Etkisi (Effect of Ultrasonic Vibrations on Thinning of Sheet Material)

Derin çekme işleminde malzemenin yırtılmasının temel nedeni sacın incelmesidir. Malzemenin zımba köşe bölgesindeki aşırı incelleme, lokalize gerilmede önemli bir artışa neden olmakta ve çekilen kabın yırtılmasına sebebiyet vermektedir. Analizler sonucunda, ultrasonik titreşimlerin uygulanmasıyla şekillendirme esnasında incelenin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 11'de görüldüğü üzere, 56 mm çapındaki DC04 malzemenin 10 mm baskı plakası yayı ön yüklemesiyle 13 mm/s hızda çekilmesi sırasında, GD işleminde sacın zımba köşesinde maksimum %10,15 incelleme meydana gelirken, söz konusu incelleme düşük genlikte (*UDa*) ultrasonik titreşimlerin uygulanmasıyla %5,78'e düşmüştür. Bu durum, malzeme incelmesinde %43,1'lik azalmaya tekabül etmektedir. Orta (*UDb*) ve

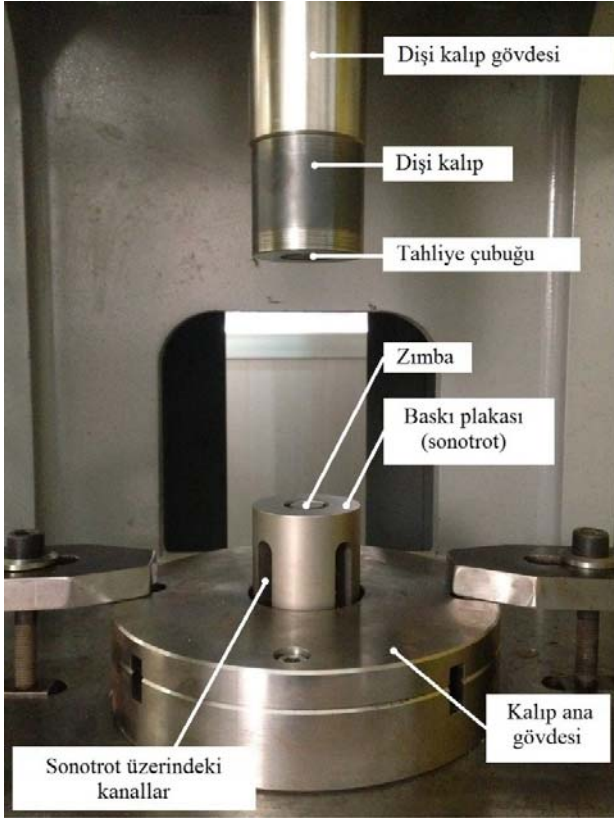
yüksek (*UDc*) genlikte titreşimlerin uygulanması durumunda ise sac malzeme incelleme oranı sırasıyla %6,21 ve %5,88 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, aynı çaptaki malzemelerin farklı genlik seviyelerindeki ultrasonik titreşimlerin etkisi altında çekilmesi sırasında minimum sac malzeme incelmeye *UDa*'da görülmüştür. Dolayısıyla bu durumun, SÇO'daki maksimum artışın düşük genlikte (*UDa*) ultrasonik titreşimlerin uygulanması durumunda görülmesinin temel sebebi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca tüm analizlerde, ultrasonik titreşimlerin uygulanmasının sac metalin incelmesinde önemli bir azalma sağladığı görülmüştür.



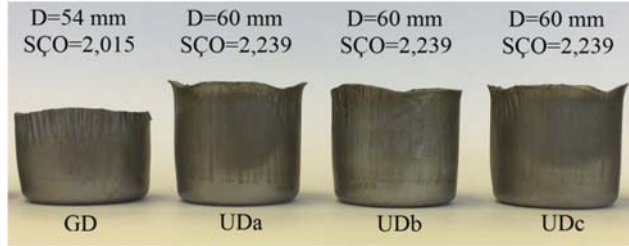
Şekil 11. Sac malzemedeki incelleme (Thinning of sheet material)

5. Deneysel Doğrulama (Experimental Verification)

SEA'larla elde edilen nümerik sonuçların doğrulanabilmesi için ultrasonik destekli derin çekme deney düzeneği hazırlanmış ve deneyler bu sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 12'de görülmektedir. Şekil 13'de görüldüğü üzere, 10 mm'lik baskı plakası yayı ön yüklemesi koşulu altında ve 13 mm/s çekme hızında, DC04 malzemenin GD ile çekilebilen en büyük çapı 54 mm, SÇO'su 2,015 ve kupa derinliği 20,50 mm'dir. Öte yandan UD deneylerinde, söz konusu genlik aralığında genlik seviyesinden bağımsız olarak çekilebilen en büyük çap 60 mm'dir. Böylece, SÇO'nun 2.239'a, çekilebilir kupa derinliğinin ise 26,88 mm'ye ulaştığı görülmektedir. Bu sayede, SÇO'da %11,1, kupa derinliğinde ise %31,1 oranında artış sağlanmıştır.



Şekil 12. Ultrasonik destekli derin çekme deney düzeneği (Ultrasonically assisted deep drawing experimental setup)



Şekil 13. Deneyler sonucunda elde edilen kupalar ve karşılık gelen SÇO değerleri (Drawn cups and corresponding LDR values obtained after experiments)

6. Simgeler (Symbols)

A	: Titreşim genliği (μm)
b	: Test numunesinin master genişliği (mm)
b_0	: Test numunesinin orijinal master genişliği (mm)
D	: Malzeme çapı (mm)
E	: Elastikiyet modülü (GPa)
F_a	: Kuvvetin genlik değeri (N)
F_m	: Kuvvetin ortalama değeri (N)
f	: Titreşim frekansı (Hz)
K	: Mukavemet katsayısı (MPa)
k	: Yay sertliği (N/mm)
k_r	: Baskı plakası kuvveti indirgeme faktörü
L	: Test numunesinin master uzunluğu (mm)
L_0	: Test numunesinin orijinal master uzunluğu (mm)
n	: Pekleşme üsteli
r	: Lankford katsayısı
S_y	: Akma mukavemeti (MPa)

S_{ut}	: Nihai çekme mukavemeti (MPa)
t	: Zaman (sn)
t_b	: Sac malzeme kalınlığı (mm)
x	: Sonotrot ucunun pozisyonu (μm)
ε	: Gerinme (mm/mm)
σ	: Gerilme (MPa)
ν	: Poisson oranı

6.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

BPK	: Baskı plakası kuvveti
GD	: Geleneksel derin çekme işlemi
$SÇO$: Sınır çekme oranı
SEA	: Sonlu elemanlar analizi
$\mathcal{S}SD$: Şekillendirme sınır diyagramı
$\mathcal{S}SE$: Şekillendirme sınır eğrisi
UDa	: Düşük genlikte ultrasonik destekli derin çekme işlemi
UDb	: Orta genlikte ultrasonik destekli derin çekme işlemi
UDc	: Yüksek genlikte ultrasonik destekli derin çekme işlemi

7. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, baskı plakasına aksel yönde uygulanan ultrasonik titreşimlerin sac metal malzemelerin şekillendirilebilirliğine etkileri Sonlu Elemanlar Analizleriyle (SEA) nümerik olarak araştırılmış, analiz sonuçları derin çekme deneyleriyle desteklenmiştir. Önerilen yöntemin derin çekme prosesine etkilerini inceleyebilmek için zamana bağlı yapısal ve şekillendirme analizlerini içeren iki aşamalı sonlu elemanlar yöntemi geliştirilmiştir. Geleneksel Derin Çekme (GD) ile Ultrasonik Titreşim Destekli Derin Çekme (UD) işlemlerinin kıyaslanması, çapları ardışık olarak artan dairesel şekilli DC01 ve DC04 malzemelerin sıralı analizleriyle elde edilen Sınır Çekme Oranı (SÇO) ve maksimum çekilebilir kupa derinliği değerleri üzerinden yapılmıştır. Buna ilaveten, malzemelerin SÇO'sunu etkileyen sac malzeme incelmeleri incelenmiştir. Ayrıca, kullanılan malzeme türü, titreşim genliği, Baskı Plakası Kuvveti (BPK) ve şekillendirme hızının önerilen yöntemle etkileri araştırılmıştır. Analiz ve deney sonuçları ile elde edilen çıktılar aşağıda özetlenmiştir.

- Baskı plakasına uygulanan aksel titreşimlerin dinamik darbe etkisinden dolayı BPK'nın, titreşimlerle aynı frekansa sahip olan ve minimum (sıfır) bir değer ile statik duruma kıyasla çok daha yüksek bir değer arasında dalgalandığı görülmüştür. Yüksek frekanslı bu yüklenme durumu, şekillendirme sırasında gerilme süperpozisyonu sağlamaktadır.
- Titreşimlerin etkisiyle BPK'nın ortalama değerinin önemli ölçüde artmasına rağmen titreşim genliği, baskı plakası yayı ön yüklenme seviyesi, malzeme türü ve şekillendirme hızından bağımsız olarak, her koşulda SÇO'da önemli derecede artış ve malzeme incelmesinde ciddi oranda azalma sağlandığı görülmüştür.
- UD analizlerinde SÇO'da %9'a, kupa derinliğinde ise %26'ya varan artış ortaya konulmuştur. Aynı çapta dairesel malzemeler üzerinde gerçekleştirilen analizlerde, sac malzeme incelmelerinin %43'e varan oranda azaldığı tespit edilmiştir.
- Titreşim genliğinin artırılmasının, SÇO ve kupa derinliğindeki artışa etkisi çok düşük olmuştur. BPK'nın artırılması, titreşimlerin SÇO ve kupa derinliği üzerindeki etkilerini belirgin hale getirmiştir. Şekillendirme hızının artması, titreşimlerin olumlu etkilerini önemli ölçüde sönmüştür. Öte yandan, malzeme türünün söz konusu etkileri dikkate değer oranda değiştirmedikleri gözlemlenmiştir.
- UD deneyleri neticesinde, SÇO'da ve kupa derinliğinde sırasıyla %11 ve %31'e varan artış gözlemlenmiştir. Nümerik analiz sonuçlarında titreşimlerin SÇO ve kupa derinliğini artırma üzerindeki etkisi, deneysel sonuçlara göre daha sınırlıdır. Bunun

nedeni, SEA'larda titreşimlerin sadece dinamik darbe, gerilme süperpozisyonu ve temas ayrılması etkilerinin modellenilebilmesinin mümkün olmasıdır. Malzeme üzerindeki akustik yumuşatma ve sürtünme katsayısındaki azalmanın etkilerini modelleyebilmek için titreşimler altında çekme ve basma testlerinden elde edilebilecek deneysel verilere ihtiyaç vardır.

- Deneysel derin çekme işlemlerinde titreşimlerin, malzeme yüzeyindeki kırışıklığı azalttığı görülmüştür. Bu durumun, titreşimlerin dinamik darbe etkisiyle BPK'nın maksimum değerinin işlem boyunca önemli ölçüde artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, 315M300 proje numarası ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen sistem, Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından TR2018-15097B numaralı patent belgesi ile tescil edilmiştir. Yazarlar, destekleri için TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

Kaynaklar (References)

1. Blaha F., Langenecker B., Dehnung von zink-kristallen unter ultraschalleillwirkung, Z. Naturwiss., 20, 556, 1955.
2. Fartashvand V., Abdullah A., Vanini S.A.S., Investigation of Ti-6Al-4V alloy acoustic softening, Ultrasonics Sonochemistry, 38, 744-749, 2017.
3. Dauda Y., Lucas M., Huang Z., Modelling the effects of superimposed ultrasonic vibrations on tension and compression tests of aluminium, Journal of Materials Processing Technology, 186, 179-190, 2007.
4. Hu J., Shimizu T., Yang, M., Investigation on ultrasonic volume effects: Stress superposition, acoustic softening and dynamic impact, Ultrasonics-Sonochemistry, 48, 240-248, 2018.
5. Langenecker B., Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 13, 1-8, 1966.
6. Yao Z., Kim G.Y., Wang Z., Faidley L., Zou Q., Mei D., Chen Z., Acoustic softening and residual hardening in aluminum: Modeling and experiments, International Journal of Plasticity, 39, 75-87, 2012.
7. Lehfeldt E., Influence of ultrasonic vibration on metallic friction, The Journal of the Acoustical Society of America, 45, 334, 1969.
8. Kumar V.C., Hutchings I.M., Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration, Tribology International, 37, 833-840, 2004.
9. Cao M., Li J., Liu Y., Yuan Y., Zhao C., Dong G., Frictional characteristics of sheet metals with superimposed ultrasonic vibrations, J. Cent. South Univ., 25, 1879-1887, 2018.
10. Lin J., Li J., Liu T., Zhu L., Chu X., Zhao G., Guan Y., Evaluation of friction reduction and frictionless stress in ultrasonic vibration forming process, Journal of Materials Processing Tech., 288, 116881, 2021.
11. Wu L., Zhao C., Cao M., Han X., Effect of ultrasonic and low frequency vibrations on friction coefficient at die radius in deep drawing process, Journal of Manufacturing Processes, 71, 56-69, 2021.
12. Biddell D.C., Sansome D.H., Deep drawing of cans with ultrasonic radial oscillations applied to the die, Ultrason Int. Conf., London-England, 27-29 March 1973.
13. Young M.J.R., Sansome D.H., An oscillatory deep-drawing analogue, Proceedings of the Fifteenth International Machine Tool Design and Research Conference, Editors: Tobias S.A., Koenigsberger F., Palgrave Macmillan Publishers Limited, London, 551-559, 1975.
14. Biddell D.C., Ultrasonic deep-drawing and ironing with the aid of flat and profiled radial resonators, Acta Acustica, 45 (1), 14-24, 1980.
15. Smith A.W., An investigation of the deep drawing process with the application of ultrasonic oscillations, PhD. Thesis, The University of Aston, Birmingham, England, 1977.
16. Jimma T., Kasuga Y., Iwaki N., Miyazawa O., Mori E., Ito K., Hatano H., An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process, Journal of Materials Processing Technology, 80-81, 406-412, 1998.
17. Wen T., Gao R., Chen X., Influence of high frequency vibration on deep drawing process of AZ31 sheet at room temperature, Journal of Shanghai Jiaotong University, 17, 456-460, 2012.
18. Yamazaki T., Hayakawa C., Kodama M., Jin M., Deep drawing with ultrasonic vibration, Journal of the JSTP, 54, 47-51, 2013.
19. Chu T.H., Fuh K.H., Yeh W.C., Modelling and analysis of deep drawing with utilization of vibrations and servo press using response surface methodology, Materials Research Innovations, 18, 936-939, 2014.
20. Cao M., Li J., Yuan Y., Zhao C., Flexible die drawing of magnesium alloy sheet by superimposing ultrasonic vibration, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 27, 163-171, 2017.
21. Lowe A., Hofmann A., Hauptmann M., The use and application of ultrasonic vibrations in the 3D deformation of paper and cardboard, Journal of Materials Processing Technology, 240, 23-32, 2017.
22. Lowe A., Hauptmann M., Majschak J.P., The effect of ultrasonic oscillation on the quality of 3D shapes during deep-drawing of paperboard, BioResources, 12, 7178-7194, 2017.
23. Lowe A., Nikowski A., Hauptmann M., Functional design of sonotrodes for deep-drawing of cardboard, BioResources, 15 (2), 2763-2773, 2020.
24. Çavuşoğlu O., Gürün H., Investigation of the effects of deformation speed on the mechanical properties and deep drawing process of DP600 and DP780 sheet metal, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (4), 777-784, 2014.
25. Ankaralı M.S., Dilmeç M., Türköz M., Investigation on the effect of use of movable die in sheet hydroforming with die on formability, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 787-801, 2020.
26. Olguner S., Bozdana A.T., Influence of press ram pulsation on deep drawability of dual phase steel sheet, Acta Physica Polonica A, 132 (3), 742-745, 2017.
27. Ashida Y., Aoyama H., Press forming using ultrasonic vibration, Journal of Materials Processing Technology, 187-188, 118-122, 2007.
28. Siddiq A., El Sayed T., Ultrasonic assisted manufacturing processes: Variational model and numerical simulations, Ultrasonics, 52, 521-529, 2012.
29. Kim S.W., Son Y.G., Lee Y.S., FEA and experiment investigation on the friction reduction for ultrasonic vibration assisted deep drawing, Transactions of Materials Processing, 23, 413-418, 2014.
30. Kim S.W., Lee Y.S., Investigations on the effect of ultrasonic vibration in cylindrical cup drawing processes, Key Engineering Materials, 622-623, 1152-1157, 2014.
31. Sheykholeslami M., Cinquemani S., Mazdak S., Numerical study of the of ultrasonic vibration in deep drawing process of circular sections with rubber die, SPIE Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XII, Denver-Colorado, USA, 15 March 2018.
32. Zha C., Chen W., Theories and experiments on effects of acoustic energy field in micro-square cup drawing, The Int. J. of Advanced Manufacturing Tech., 104, 4791-4802, 2019.
33. Malekipour E., Heidary H., Majd N.S., Mazdak S., Sharifi E., Effect of resonant frequency variation on the ultrasonically assisted deep drawing process: numerical and experimental study, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106, 2243-2264, 2020.
34. Malekipour E., Sharifi E., Majd N.S., Heidary H., Observation on the behavior of ultrasonic micro-hammer and its effects on the deep drawing process: Numerical simulation and experimental study, Ultrasonics, 119, 106566, 2022.
35. BS EN 10130, Cold rolled low carbon steel flat products for cold forming. Technical delivery conditions, 2006.
36. Sheet Metal Product Catalogue. Erdemir Group, Kdz. Ereğli, Türkiye, 2017.
37. BS EN ISO 10113, Metallic materials - Sheet and strip - Determination of plastic strain ratio, 2014.
38. BS EN ISO 6892-1, Metallic materials - Tensile testing. Part 1: Method of test at room temperature, 2016.
39. Wang W., Chang H., Zhao Z., Wei X., The limit drawing ratio and formability prediction of advanced high strength dual-phase steels, Materials and Design, 32, 3320-3327, 2011.
40. Hallquist J.O., Ls-Dyna Theory Manual, LSTC, Livermore, California, USA, 2006.
41. Bandyopadhyay K., Panda S.K., Saha P., Padmanabham G., Limiting drawing ratio and deep drawing behavior of dual phase steel tailor welded blanks: FE simulation and experimental validation, Journal of Materials Processing Technology, 217, 48-64, 2015.
42. Barlat F., Lian K., Plastic behavior and stretch ability of sheet metals. Part I. A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions, Int. J. Plast., 5 (1), 51-66, 1989.