

**Araştırma / Research**

## PASLANMAZ ÇELİKLERDE HİDRO-KESME YÖNTEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Habip Gökay KORKMAZ<sup>1,2</sup> (ORCID: 0000-0003-2670-7912)\*

Serkan TOROS<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-0438-2862)

Hüseyin Selçuk HALKACI<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0001-5739-4862)

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 51245 Niğde

<sup>2</sup> Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 42555 Konya

Geliş / Received: 06.03.2018

Kabul / Accepted: 27.04.2018

### ÖZ

Yapılan bu çalışmada kesme operasyonunun özellikle son yıllarda birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlanan hidro şekillendirme prosesine uyarlanabilirliğinin nümerik olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Nümerik çalışmalar kapsamında malzemenin kesilme yüzeyleri değerlendirilmiş ve çapak oluşum durumu zımbanın farklı hareketi için incelenmiştir. Modelleme çalışması kapsamında Johnson-Cook (J-C) pekleşme ve hasar modeli kullanılarak, hedeflenen proses parametrelerinde kesme durumunun gerçekleşip gerçekleşmediği belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak hedef proses parametrelerinde 304 paslanmaz çeliğin bu proses ile kesilebilirliği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hidro-kesme, Johnson-Cook hasar kriteri, 304 paslanmaz çeliği

## INVESTIGATION OF HYDRO-PIERCING METHOD FOR STAINLESS STEELS BY FINITE ELEMENT METHOD

### ABSTRACT

In this study, numerical evaluation of the adaptability of the cutting operation to the hydroforming process, which has been widely used in many areas especially in recent years, has been made. In the numerical studies, the cut surfaces of the material were evaluated and the burr formation state was investigated for the different movement of the punch. Within the scope of the modeling study, it was tried to determine whether the cutting condition in the target process parameters was realized by using the Johnson-Cook (J-C) hardening and damage model. As a result, 304 stainless steel can be cut by this process in target process parameters.

**Keywords:** Hydro-piercing, Johnson-Cook damage criteria, 304 stainless steel

### 1. GİRİŞ

Son yıllarda sac şekillendirme işlemlerinde gelenekselleşmiş erkek ve dişi kalıp sistemleri yerine, hidro-şekillendirme prosesi özellikle form verilmesi oldukça güç olan geometrilerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. [1] Bu sistem ile proses adımları önemli ölçüde azaltılmış, çok parçalı sistemlerde ki parça sayısı da azaltılabilmektedir. Bu kapsamda otomotiv ve havacılık endüstrilerinde gerek boru şişirme gerekse de düzlemsel formdaki sac malzemelere hidrolik basınç uygulanması ile istenilen geometriler rahatlıkla elde edilebilmektedir. Hidro şekillendirme sistemleri ilk olarak 1890'lı yıllarda ortaya çıkmış olsa da kontrolün zorluğu nedeniyle uzun yıllar beklenen ilgiyi görmemiştir. [2] Son yıllarda kontrol sistemlerinin ve basınç yükseltici sistemlerin gelişmesi ve sistemdeki bir takım kazanımların dikkate alınması ile birçok alanda uygulanmaya başlanmıştır. [3]

\*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 388 225 26 74 ; e-mail / e-posta: hkorkmaz@ohu.edu.tr

*H. G. KORKMAZ, S. TOROS, H. S. HALKACI*

Bu sistemlerde, geleneksel kalıp sistemlerine nazaran parça ve iş takımları arasındaki sürtünme durumunun minimum seviyede olması parçaların kalıp içerisinde daha yüksek oranlarda şekillendirilebilmesine olanak sağlamıştır. Hidro şekillendirme işlemi gerek deneysel gerekse de nümerik olarak birçok araştırmacı tarafından literatürde incelenmiş, bu prosesin ileriki dönemlerde geleneksel sacların ve/veya karmaşık çıkıntılara sahip boruların şekillendirilmesinde giderek yaygınlaşacağı ön görülmektedir.

Wang ve ark. [4] yapmış oldukları çalışmada Al 5182-O alaşımının hidro şekillendirme yöntemlerinden diyaframlı hidro şekillendirme yöntemini kullanarak karmaşık bir parça olan otomobil motor kaputunu şekillendirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada basıncın, nihai ürün üzerindeki içbükey ve dışbükey radyüslerin, baskı plakası kuvveti gibi parametrelerin optimum değerlerini belirlemişlerdir. Ayrıca mevcut hidro şekillendirme işlemini sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ederek deneysel bulgularla karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak deneysel ve nümerik çalışmaların uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Wang ve ark. [5] başka bir hidro şekillendirme yöntemi olan viskoz basınçla şekillendirme yöntemini kullanarak 1,2 mm kalınlığındaki 6K21 T4 alüminyum alaşımı malzemeyi, bir otomobil kaputunu laboratuvarında üretilebilecek boyutlarda ölçeklendirerek şekillendirmişlerdir. Sonuç olarak nihai geometrinin sorunsuz olarak elde edildiğini tespit etmişlerdir. Lang ve ark. [6] sac hidro şekillendirmeye üç katmanlı sacı hidro mekanik derin çekme işlemine tabi tutmuşlardır. Yaptıkları çalışmada orta katmandaki sac, kalınlığı 0,011 mm alüminyum, içteki ve dıştaki saclar ise saf yumuşak alüminyum (APP211) ile yumuşak çelik (DC04) olmak üzere katmanların dizilimi çelik alüminyum çelik ve alüminyum alüminyum alüminyum olacak şekilde belirlemişlerdir. Ekip şekillendirmeyi yaparken hadde yönlerinin şekillenmeye olan etkilerini de incelemişlerdir. Nümerik analizlerle sonuçlarını doğruladıkları çalışmalarını, buruşma ve yırtılma olmadan başarılı şekilde gerçekleştirmişlerdir. Ngaile ve ark. [7] 0,1 mm ve 0,2 mm kalınlığındaki SS304 malzemeyi Y, T ve şişirme şekillerinde formlamak için bir mikro tüp hidro şekillendirme sistemine uygun şekilde zımba tasarımı yaparak bir takım deneyler ve analizler gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonucunda farklı zımba tasarımlarının malzemenin şekillenmesine ve mekanik özelliklerine etkisi olduğunu belirlemişlerdir. Hashemi ve ark. [8] 40 mm çapında 1,5 mm kalınlığında AA6063 dairesel boru şeklindeki bir malzemenin dikdörtgen biçiminde şekillendirilmesi için farklı yükleme koşullarında tüp hidro şekillendirme prosesini kullanmışlardır. Koordinatsal ölçme makinesinde (CMM) yaptıkları ölçümlerde deneysel verilerle sonlu eleman analiz sonuçlarının çok benzer olduğunu belirlemişlerdir. Huang ve ark. [9] T şekilli tüpü, hidro şekillendirme prosesi için yükleme şartlarını Pareto ve Taguchi yöntemlerini kullanarak optimize etmişlerdir. Yaptıkları nümerik çalışmalarla optimizasyon sonuçlarını doğrulamışlardır.

Son yıllarda üretim maliyetlerinin azaltılmasına yönelik proses birleştirme ve tek seferde nihai parça elde edimi üzerinde önemli çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde şekillendirme işlemi sonrası parça üzerinde yer alan bir takım montaj unsuru deliklerin açımı ikincil kesme kalıpları ile farklı istasyonlarda gerçekleştirilmektedir. Bu işlem ile parçalar nihayetlendirilerek montajlama hatlarına sürülmektedir. Kalıpcılık sektöründe geliştirilen son sistemler ile şekillendirme ve kesme işlemlerinin birleştirildiği progresif kalıpcılığında önemli gelişmeler yer almıştır. Bu sistemlerdeki iyileştirmeler ile hidro şekillendirme işlemlerinin sonunda, son adım olarak istenen deliklerin parçaya kazandırılması amacı ile yine hidroliğin basıncından istifade ederek kesme operasyonları uygulanabilmektedir. Kesme (Trimleme) operasyonlarında üreticiler tarafından bir takım yüzey kalite sınırlamaları bulunmasından dolayı işlemin daha verimli ve nihai parçalarda daha yüksek kaliteye sahip yüzey hatlarının oluşturulması adına bir takım farklı proses parametrelerinin etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmektedir.

Kim ve ark. [10] kesme zımbasının iki hareketi ile çapak oluşumu meydana gelmeden sac hidro kesme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Dört farklı malzeme (Al6061, CuB152, SPCC ve SS304) üzerinde çalışan ekip, her bir malzeme için zımbanın ilk hareketi olan batma mesafesini farklı boyutlarda uygulamışlardır. Nümerik analizlerini Cockroft ve Latham [11] matematik modelini kullanarak gerçekleştirmişler ve deneysel verilerle kıyasladıklarında yüksek doğrulukta sonuç elde etmişlerdir. Hassannejadasl ve ark. [12] ise çalışmalarında tüp hidro kesme prosesini bir tüp için geliştirmiş ve parça yüzeyinde kesme işlemi sonrası oluşan çapaklanma kusurunu nümerik olarak incelemişlerdir. Yapılan nümerik çalışmalarda farklı hasar kriterleri deneyerek oluşan çapaklanma ve parça yüzey kalitesi belirlenmeye ve model performansları karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Çalışma kapsamında Johnson Cook (JC) hasar kriteri [13], sabit eşdeğer plastik şekil değişimi kriteri, kesme ile sabit eşdeğer plastik şekil değişimi kriteri ve Gurson Tvergaard Needleman (GTN) kriterini [14] kullanılarak modellenmişlerdir. JC ve kesme ile sabit eşdeğer plastik şekil değişimi kriterlerinin sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının çok yakın çıktığı gözlemlenmiştir. Wu ve ark. [15] sabit eşdeğer plastik şekil değişimi, Cockroft ve Latham [16], Brozzo [17, 18], Ayada [19], birim hacim başına genelleştirilmiş plastik iş (Freudenthal) [17, 18] ve Rice ve Tracey [20] olmak üzere 6 farklı matematiksel modeli tüp hidro kesme prosesine uygulamışlar ve sonuçlarını kıyaslamışlardır. Deneysel sonuçlara en yakın bulguları veren matematiksel modelin Rice ve Tracey kriteri olduğu sonucuna varmışlardır. Shiomi ve ark. [21] sac hidro kesme işlemi düz plaka üzerinde farklı basınç değerleri ve delik çaplarında deneysel ve nümerik olarak çalışmışlardır. Kesme zımbasının farklı

## PASLANMAZ ÇELİKLERDE HİDRO-KESME YÖNTEMİNİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

hareketleriyle üç farklı tipte kesme yapmışlar her bir tipteki kesme için farklı karakteristikte boyun bölgesi, çapak miktarı gibi parametreler elde etmişlerdir. Yapılan çalışmalarda en iyi sonucu ise kesme zimbasının iki aşamalı hareketiyle oluşan kesme işlemi ile yapılabildiğini göstermişlerdir.

Yapılan bu çalışma kapsamında literatürde oldukça az olan düzlemsel sacların hidro-kesme yöntemi ile kesilebilirliğinin belirlenmesi adına bir seri nümerik ve deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

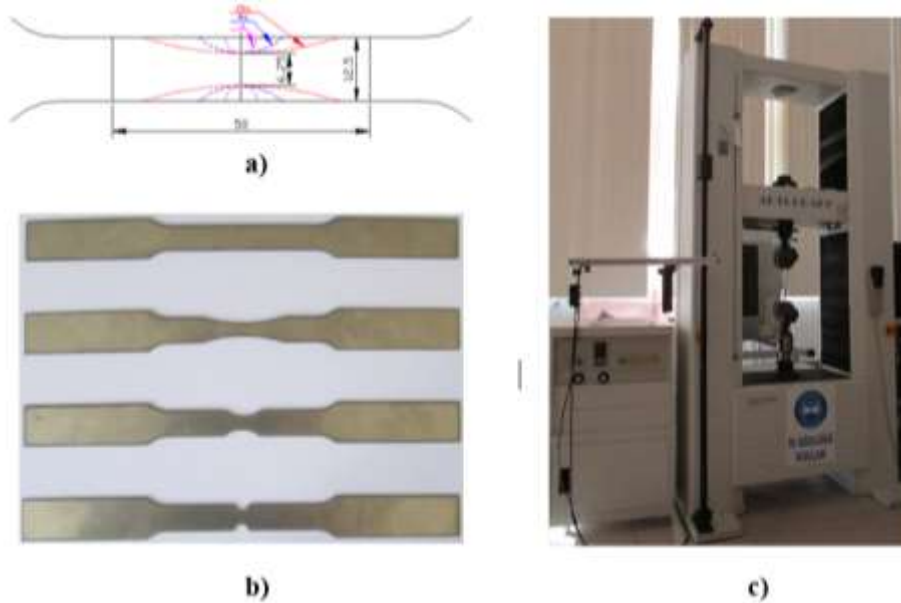
## 2. JOHNSON-COOK HASAR KRİTERİ VE MODEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Bu çalışmada beyaz eşya sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılan 304 paslanmaz çeliğin kesilebilirliğinin bilgisayar ortamında belirlenebilmesi için bir takım hasar kriterlerinin kullanılması gerekmektedir. Literatürde özellikle kesme işlemlerinin simülasyonlarında sıklıkla kullanılan Johnson-Cook (JC) hasar kriteri tercih edilmiş, bu kriter Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = [D_1 + D_2 \exp(-D_3\eta)][1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}^{pl}/\dot{\epsilon}_0)](1 + D_5 T^*) \quad (1)$$

Eşitlikte (1)'de yer alan  $\eta$ ,  $\dot{\epsilon}^{pl}$  ve  $T^*$  sırasıyla üç eksenli gerilme oranı (triaxiality), deformasyon hızı ve homolog sıcaklık değerlerini göstermekte olup, D1, D2, D3, D4 ve D5 malzeme sabitlerini göstermektedir.  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  ise çekme deneyi neticesinde ölçülen kopma birim uzama değerini göstermektedir. Eşitlikte yer alan sabitler deneysel olarak elde edilen limit şekil değiştirme verilerinden belirlenebilmektedir. Bu anlamda bu parametrelerin belirlenebilmesi için bir seri çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Model parametreleri yukarıda belirtilen farklı triaxiality, deformasyon hızı ve sıcaklık değişkenlerinin malzeme davranışına etkisinin bir göstergesi olup bu çalışmada sabit sıcaklıkta, farklı triaxiality ve deformasyon hızı değerlerine göre model parametreleri tayin edilmeye çalışılmıştır. Çekme deneyi esnasında malzemede farklı triaxiality değerleri oluşturabilmek için çekme deney numunesi üzerinde farklı büyüklüklerde çentikler su jeti ile oluşturulmuştur. Bu çentik büyüklükleri a, 4a ve 20a olup a=3,125mm, değerindedir. Deney numunelerinin şematik ve gerçek görüntüleri Şekil 1 (a,b)'de gösterilmiş olup farklı çentik değerleri için Eşitlik (2)'ye göre hesaplanan triaxiality değerleri de Tablo 1'de verilmiştir.

$$\sigma_x = \bar{\sigma} \ln \left[ 1 + \frac{a}{2R} \left( 1 - \frac{y^2}{a^2} \right) \right] \quad (2)$$



Şekil 1. Çekme deney numunelerinin şematik (a), gerçek (b), Çekme deney sistemi görüntüleri (c)

Eşitlik (2)'de  $\sigma_x$  çekme yönünden ölçülen gerilme bileşenini gösterirken  $\bar{\sigma}$  efektif gerilmeyi göstermektedir. Ayrıca R ve y değerleri ise sırası ile çentik yarıçapı ve deformasyonla birlikte değişen çentik derinliği ölçüsünü

H. G. KORKMAZ, S. TOROS, H. S. HALKACI

göstermektedir. Tablo 1’de verilen Triaxiality ( $\eta$ ) değeri numunlerin başlangıç durumundaki sahip oldukları değerleri göstermekte olup bu değerler deformasyonla birlikte değişebilmektedir.

**Tablo 1.** Farklı radyüs değerine göre belirlenen triaxiality değerleri

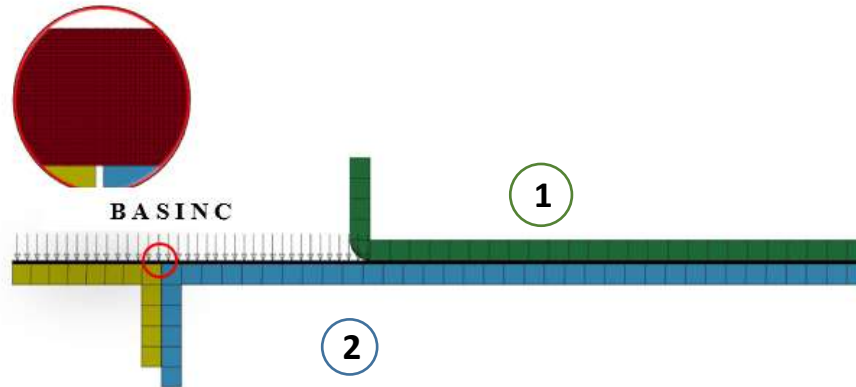
| Çentik | R     | Triaxiality |
|--------|-------|-------------|
| 20a    | 62,5  | 0,36        |
| 4a     | 12,5  | 0,45        |
| a      | 3,125 | 0,74        |

Çekme deneyleri Shimadzu Autograph 100kN çekme cihazında gerçekleştirilmiş olup deney düzeneği Şekil 1 (c)’de gösterilmektedir. Deneyler esnasında çekme deney numuneleri farklı deformasyon hızlarında çekilmiş olup bu hızlar  $0,0016 \text{ s}^{-1}$ ,  $0,0083 \text{ s}^{-1}$ ,  $0,042 \text{ s}^{-1}$ ,  $0,16 \text{ s}^{-1}$ ,  $0,33 \text{ s}^{-1}$  olarak seçilmiştir. Deneyler en az üçer kez tekrarlanmış olup ortalamaları alınmıştır. Ayrıca parçaların kopma birim şekil değiştirme değerleri belirlenirken kesit alandaki değişime göre belirlenmeye çalışılmıştır. Bunun temel sebebi ise parça üzerinde oluşturulan çentiklerin çekme deney sistemine entegreli video tipi deformasyon ölçüm sistemi ile uyumlu olmamasından kaynaklanmaktadır.

### 3. HİDRO-KESME İŞLEMİNİN MODELLENMESİ

Çalışma kapsamında Hidro-Kesme işlemi 0,18 mm ve 0,7 mm kalınlığındaki saclar için Ls-Dyna’da modellenerek analizler koşturulmuştur. Burada özellikle uygulanan hidrolik basıncı ve kalıplar arası kesme boşluğu referans alınarak sacın kesilip kesilemeyeceği belirlenmeye çalışılmıştır. Model kurulumu aşamasında kesme işlemi öncesi malzemede ön deformasyon oluşturmak adına proses iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada destek zımbası hidrolik basıncı uygulanmasından sonra yukarı doğru hareket ettirilerek kesme iz bölgesi oluşturulmaktadır. Sonrasında ise destek zımbası ters yönde hareket ettirilerek ve nihayetinde akışkan hidrolik basıncı ile parçanın kesilmesi sağlanmaktadır.

Şekil 2’de Ls-Dyna’da kurgulanmış Hidro-Kesme modeli gösterilmektedir. Çalışma kapsamında düzlem bir sacın hedef proses ile kesilebilirliğinin değerlendirilmesi adına sistem, 2D eksenel simetrik olarak modellenmiştir. Bu sayede hesaplama süreleri önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Sistem, iki adet kalıp ve birde zımbadan oluşmaktadır. Şekilde gösterilen 1 ve 2 nolu kalıplar arasında parça sıkıştırılarak basıncın ve zımbanın etkisi ile ilerlemesi engellenmiştir. Bu kapsamda iki kalıp arasında 100000 N'luk bir parça tutma kuvveti uygulanmıştır. Zımbanın birinci hareketinde ise yukarı yönde parça kalınlığı kadar hareket verilmiş ve bu sayede parça üzerinde kesme hattı oluşturulmuştur. Ayrıca hidrolik basıncı olarak parça üzerine 1500 bar’lık bir basınç uygulanmıştır. Şekilden de görüleceği üzere parçada kesme işlemi sonrası oluşabilecek çapak etkisinin belirlenebilmesi adına oldukça ince bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Hesaplamalarda parça üzerinde 0,18 mm sac için 23868 adet eleman, 0,7 mm’lik sac için ise 57908 adet eleman kullanılmıştır.

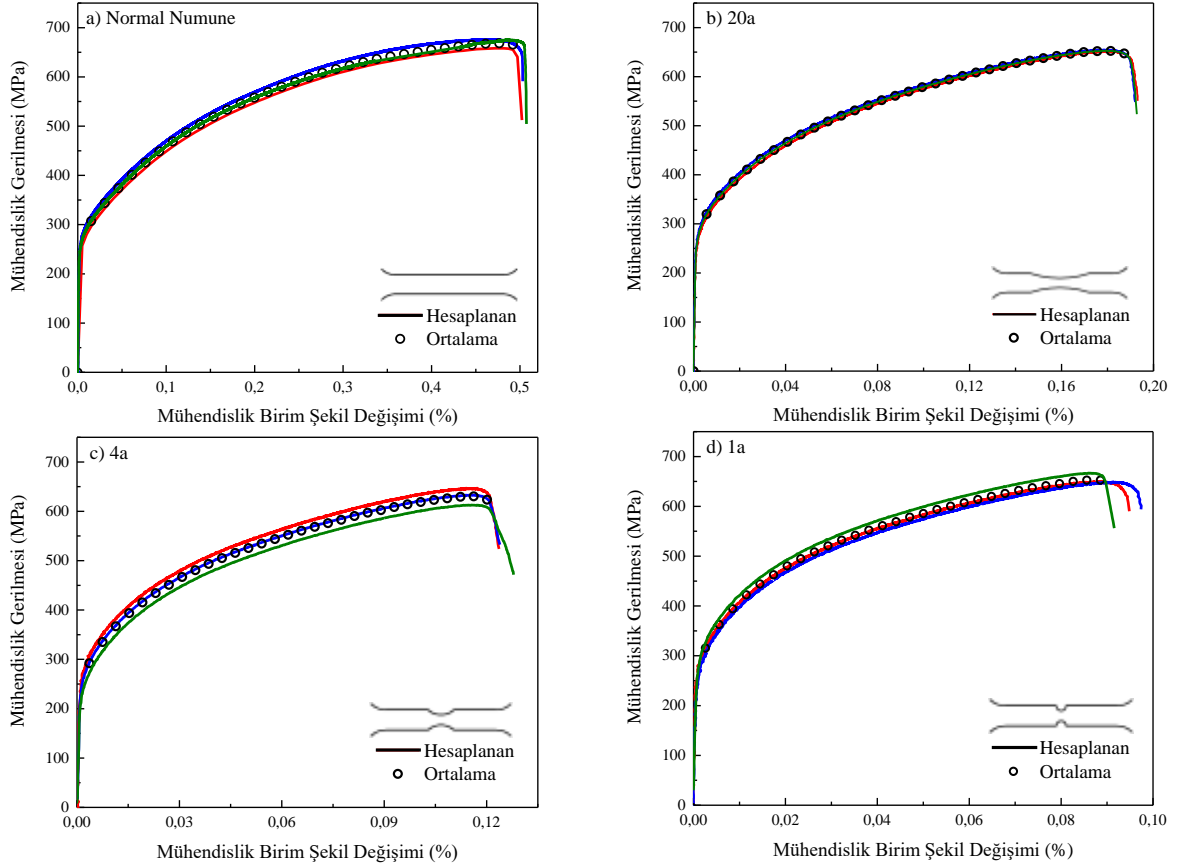


**Şekil 2.** 2D eksenel simetrik Hidro-Kesme sistem modeli

## PASLANMAZ ÇELİKLERDE HİDRO-KESME YÖNTEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan çekme deneyleri neticesinde farklı çentik değerlerine sahip 0,7 mm kalınlığındaki 304 paslanmaz çeliğinin mühendislik gerilme birim deformasyon eğrileri sabit  $0,0083 \text{ s}^{-1}$  deformasyon oranı için Şekil 3 (a-d)'de gösterilmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere deneyler 3'er tekrar olacak şekilde yapılmış ve ortalamaları alınmıştır. Şekil 3-a'da ASTM E8 standardına göre hazırlanmış normal çekme deney numunesinin gerilme birim deformasyon eğrileri gözlemlenmektedir. Şekilde çizgisel olarak gösterilenler deney tekrarları olup dairesel formda gösterilenler ise ortalama gerilme birim deformasyon eğrisini temsil etmektedir. Diğer numuneler içinde aynı yöntem Şekil 3(b-d)'de gösterilmiştir. Deney tekrarları değerlendirildiğinde sonuçların oldukça tutarlı oldukları görülmektedir.



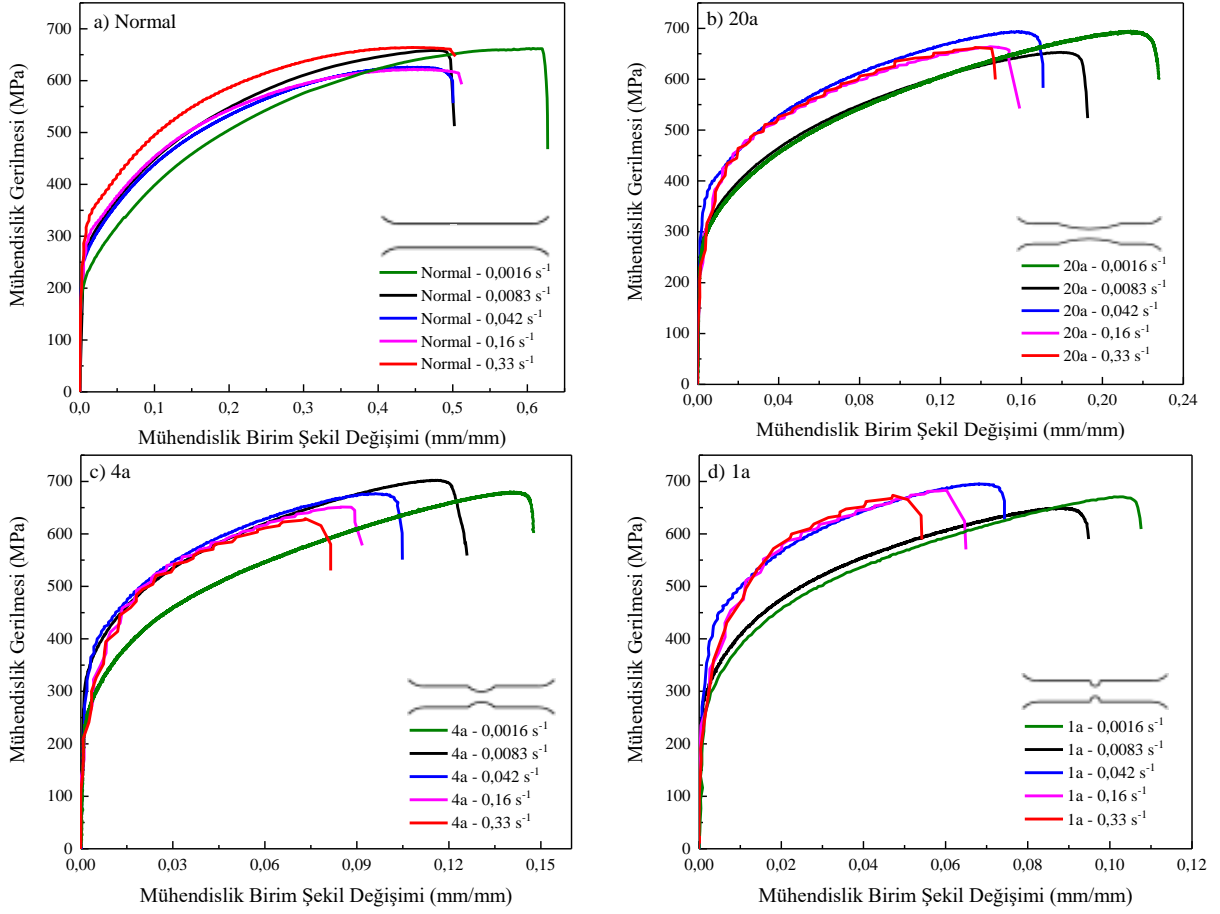
Şekil 3. Farklı çentik değerlerine sahip numunelerin Mühendislik Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Grafikleri

304 paslanmaz çelikleri östenitik faz yapısına sahip olup çelik grupları içerisinde önemli bir şekillendirilebilme kabiliyetine sahiptirler. Normal çekme deney numunesi değerlendirildiğinde malzemenin kopma uzaması yaklaşık olarak %50 mertebesinde. Bu durumda özellikle bu malzemeler ile karmaşık geometri parçaların kolaylıkla şekillendirilebileceği anlamına gelmektedir. Buna karşın bu denli yüksek süneklik hidro-kesme işleminde ise istenilen yüzey kalitesinde kesme hattının oluşmamasına sebep olabilecektir. Bu çalışma kapsamında bu durumun değerlendirilmesi hedef malzeme için yapılarak literatüre kazandırılacaktır. Şekil 3 (a-d)'de farklı çentik değerlerinden elde edilen gerilme değerleri incelendiğinde, çentik değerinin azalması ile birlikte numunede oluşan gerilme değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum Eşitlik (2) ile rahatlıkla açıklanabilmektedir. Artan R değeri ile parçada okunması beklenen gerilme değeri azalacaktır.

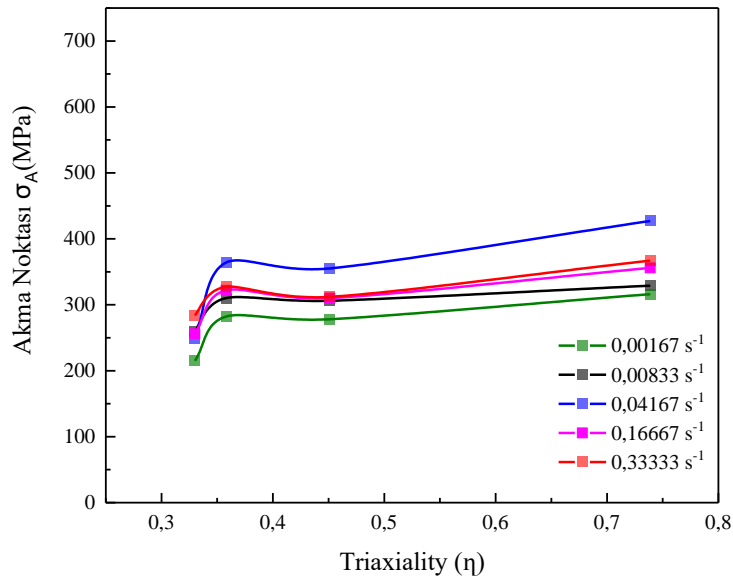
Literatürde yaygın olarak bilindiği üzere malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyetleri genel manada deformasyon hızı ile azalmaktadır. Bu malzemenin şekillendirilebilme kabiliyetleri daha önce de belirtilen deformasyon hızlarında ( $0,0016-0,33 \text{ s}^{-1}$ ) belirlenmiş ve Şekil 4 (a-d)'de gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere numunelerin şekillendirilebilme kabiliyetleri genel anlamda deformasyon hızı ile azalırken gerilme değerlerinde artış görülmüştür. Özellikle akma dayanımları normal numune için 210 MPa'dan 320 MPa değerlerine kadar çıkmıştır. Akma dayanımdaki değişimin daha iyi anlaşılması amacı ile Şekil 5 oluşturulmuştur.

H. G. KORKMAZ, S. TOROS, H. S. HALKACI

Şekilden de görüldüğü üzere farklı triaxiality ve deformasyon oranları için malzemenin akma dayanımı genel itibari ile artış göstermiştir.



Şekil 4. Numunelerin farklı deformasyon oranlarındaki gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

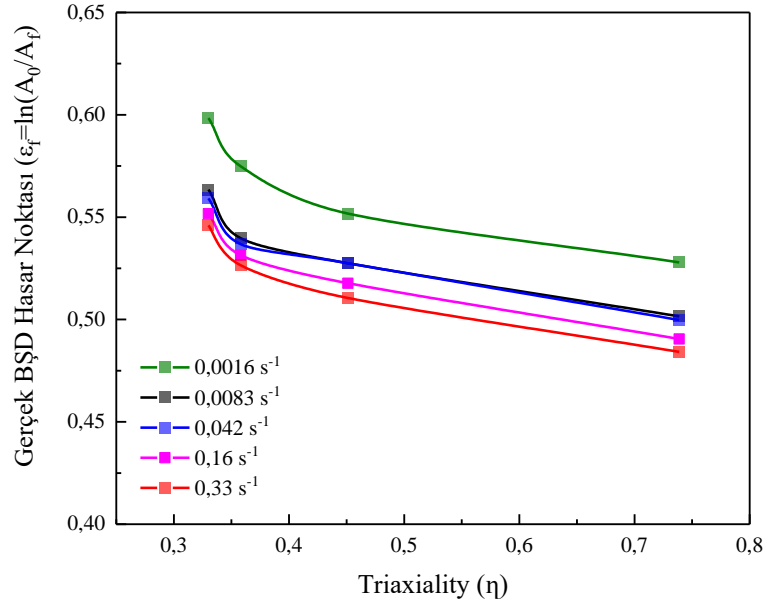


Şekil 5. Akma dayanımının farklı triaxiality ve şekillendirme oranları için değişimi

Numunelerin kopma uzama değerleri değerlendirilirken kesit alandaki değişimler kumpas yardımı ile ölçülerek Eşitlik (3) ile hesaplanmıştır. Hesaplanan kopma birim şekil değiştirme değerleri Şekil 6'de gösterilmiştir. Farklı

PASLANMAZ ÇELİKLERDE HİDRO-KESME YÖNTEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

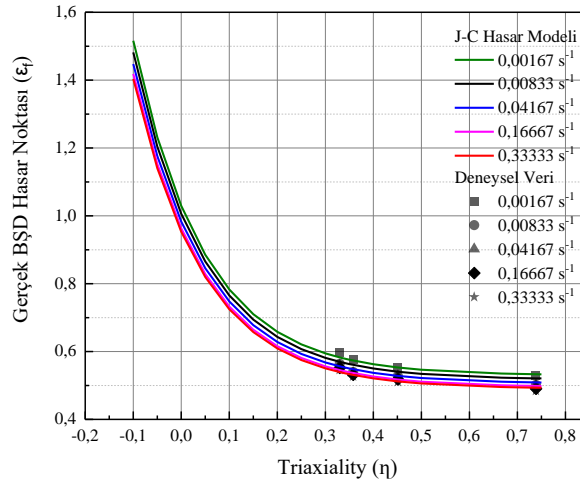
triaxiality ve deformasyon oranı değerlerine göre oluşturulmuş grafik incelendiğinde deformasyon oranı ve triaxiality değeri arttıkça parçanın kopma birim şekil değiştirme değeri azalmaktadır. Ayrıca şekilden de görülebileceği üzere kesit alanın değişiminin değerlendirilmesi ile elde edilen birim uzama değerleri video tipi deformasyon ölçüm sisteminden bir parça daha fazla çıkmaktadır. Bunun temel sebebi ise malzeme deformasyon sonuna doğru oluşan boyun verme ile azalan kuvvet neticesinde ölçümün tamamlanmasından kaynaklanmaktadır. Bu esnada kesit azalmaya devam etmektedir ve buna bağlı olarak kırılma uzamaları daha yüksek çıkmaktadır.



Şekil 6. Başlangıç triaxiality değerlerine göre gerçek kırılma birim şekil değiştirme miktarının değişimi

$$\epsilon_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (3)$$

Farklı miktarlarda çentik oluşturulmuş deney numunelerinden elde edilen kırılma birim şekil değişim değerleriyle, bu çalışma kapsamında kesme simülasyonlarını gerçekleştirebilmek amacı ile kullanılan Johnson-Cook hasar kriteri model parametreleri ( $D_1$ - $D_5$ ) belirlenmiştir. Deneyler farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmemesinden dolayı sıcaklığın etkisi ihmal edilmiştir. Çalışmanın bir sonraki adımı olan deneysel kesme işlemleri oda sıcaklığında gerçekleştirileceğinden  $D_5$  parametresi 0 olarak alınmıştır. Model parametreleri belirlenirken deneysel verilere eğri uydurma yöntemi kullanılmış sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Johnson-Cook ve deneysel verilerin karşılaştırılması

H. G. KORKMAZ, S. TOROS, H. S. HALKACI

Şekil 7’den de görüleceği üzere farklı triaxiality ve deformasyon oranlarında modelin deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Grafikte triaxiality değerleri incelendiğinde 0 sade kayma tipi deformasyona karşılık gelirken +0,33 tek eksenli çekme, -0,33 ise tek eksenli basma tipi deformasyonlara karşılık gelmektedir.

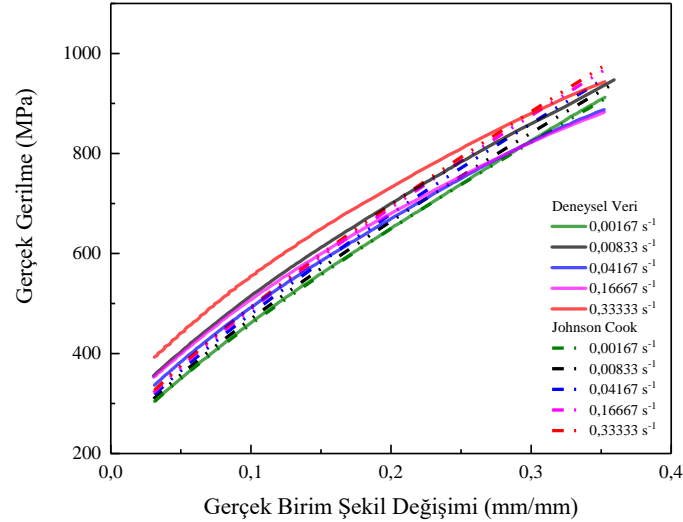
Johnson-Cook hasar kriterine ait malzeme parametrelerinin belirlenmesinin yanında malzemede meydana gelen pekleşme durumunun belirlenmesi adına da yine Eşitlik (4)’te verilen Johnson-Cook pekleşme modeli kullanılmıştır. Modelde  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$  ve  $m$  değerleri malzeme sabitleri olup sırasıyla, Akma dayanımı, mukavemet katsayısı, pekleşme üstelini, hız ve sıcaklık parametrelerini göstermektedir. Burada kullanılan sıcaklık değeri hasar kriterinde olduğu gibi homolog sıcaklık olup Eşitlik (5)’de verilmiştir.

$$\bar{\sigma} = (A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n)[1 + C \ln(\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}/\dot{\bar{\epsilon}}_0^{pl})](1 - T^{*m}) \quad (4)$$

$$T^* = (T - T_{oda}) / (T_{erime} - T_{oda}) \quad (5)$$

Parametrelerin belirlenmesi aşamasında farklı sıcaklık verileri işlenmediğinden dolayı  $m$  değeri 1 olarak alınmıştır. Johnson-Cook pekleşme modeline ait malzeme parametreleri belirlenirken farklı hızlarda gerçekleştirilen çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerilme birim şekil değiştirme verileri kullanılmıştır. Burada sadece normal (çentiksiz) deney numunesinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere her ne kadar yüksek deformasyon oranlarında model performansı biraz düşmüş olsa da genel itibari ile kabul edilebilir bir sapma ile model tahmin edebilmektedir.

Yapılan bu deneysel çalışmalar ile belirlenmiş Johnson-Cook pekleşme ve hasar kriteri modellerine ait malzeme parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Kesme simülasyonlarında malzeme girdisi olarak bu veriler tanımlanacaktır.



Şekil 8. Deneysel verilere uydurulan Johnson-Cook pekleşme eğrileri

Tablo 2. Johnson-Cook Pekleşme ve Hasar Model parametreleri

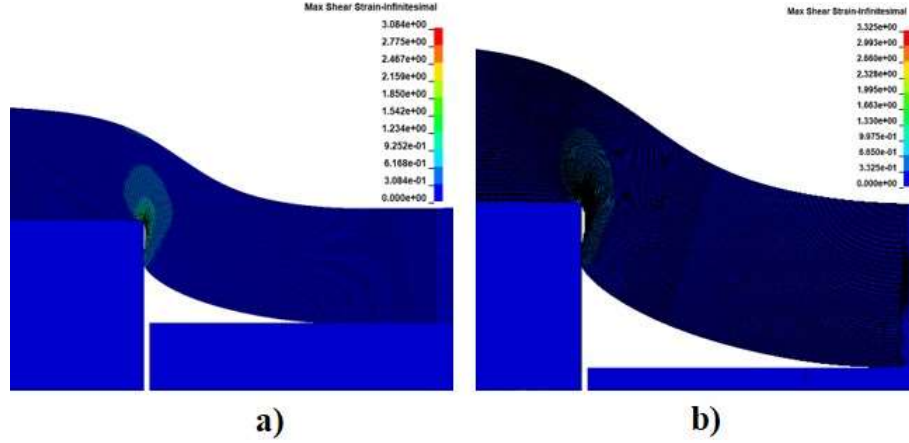
| A (Mpa) | B (Mpa)  | n     | C      | m  |
|---------|----------|-------|--------|----|
| 205,578 | 1637,984 | 0,811 | 0,014  | 1  |
| D1      | D2       | D3    | D4     | D5 |
| 0,53    | 0,5      | -6,8  | -0,014 | 0  |

Hidro-Kesme işleminin teorik olarak modellenmesi aşamasında, elemanların koparılması durumu Johnson-Cook hasar kriterine göre gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda kesme hattında meydana gelen triaxiality değerine bağlı olarak parçada meydana gelen deformasyon miktarları program tarafından değerlendirilmekte ve deformasyon değerleri kritik değeri aşması durumunda da elemanlar silinmektedir.



*PASLANMAZ ÇELİKLERDE HİDRO-KESME YÖNTEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ*

Şekil 9'da 0,18 mm (a) ve 0,7 mm (b) kalınlığındaki sacların birinci şekillendirme aşaması görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere kesme zımbası sac kalınlığı kadar yukarı hareket ettirilerek parça ile zımba birleşme yüzeyinin köşesinde bir miktar ön kesme işlemi oluşmuş durumdadır. Ayrıca zımba kenar bölgesinde zımbanın yukarı yöndeki hareketi ile parça da bir miktar yukarı yönde plastik deformasyon oluşturacak şekilde deforme olmuştur. Çalışmanın ana hedeflerinden biri olan kesme hattındaki çapak oluşumunun azaltılması, parçaya verilen ön plastik deformasyon ile sağlanacaktır. Bu bölge ilave pekleşme ile sertleşmiş ve bir miktar daha gevrek kırılmaya aday konuma gelmiştir. Zımbanın ters yönde hareketi ile parça ilerleyen deformasyon hareketinde basıncın etkisi ile kesilebilmektedir. Burada daha öncede değinildiği üzere 1500 bar'lık bir basınç malzeme üzerine uygulanmıştır.

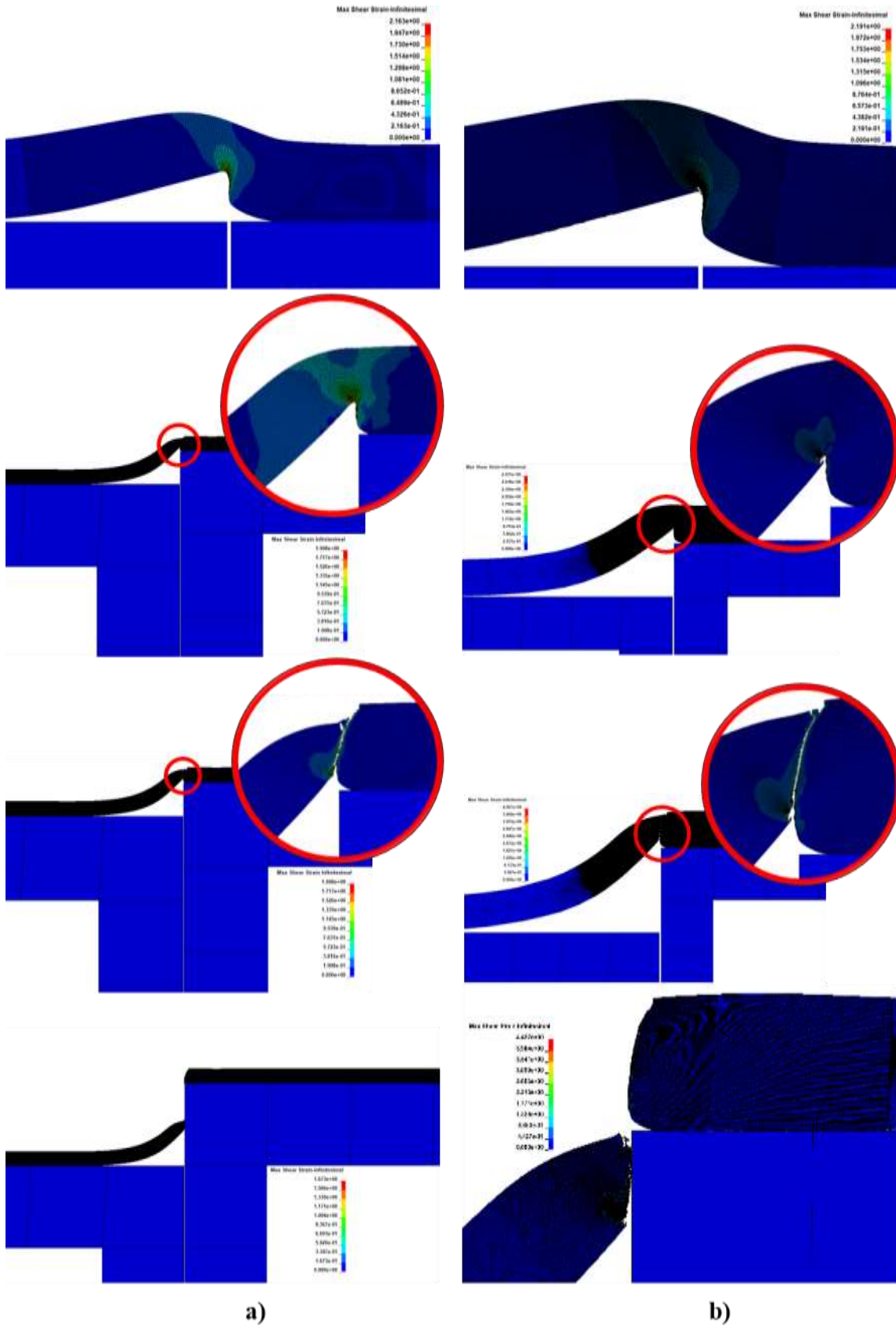


**Şekil 9.** Kesme zımbasının ilk aşamasında meydana gelen deformasyonlar 0,18 mm (a), 0,7 mm (b)

Kesme zımbasının ikincil hareketinde meydana gelen kesme olayı kademe kademe Şekil 9'da gösterilmektedir. Şekil 10'da kalıp ve zımbanın her bir elemanı  $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 'dir. Her iki kalınlıktaki sac malzeme zımbanın aşağı yöndeki hareketi ile kesilebilmekte ve beklenildiği üzere 0,18 mm'lik sac çok daha erken seviyede tamamen kopmaktadır. Yapılan ölçümlerde zımbanın yaklaşık olarak 0,4 mm'lik aşağı yöndeki hareketi sonrası 0,18 mm kalınlığındaki sacda kesme işlemi tamamlanırken 0,7 mm kalınlığındaki sacda tam kesme olayı henüz elde edilememiştir. Kalın sacda tam kesilme durumu ancak kesme zımbasının 1,65 mm'lik mesafesinde meydana gelmiştir.

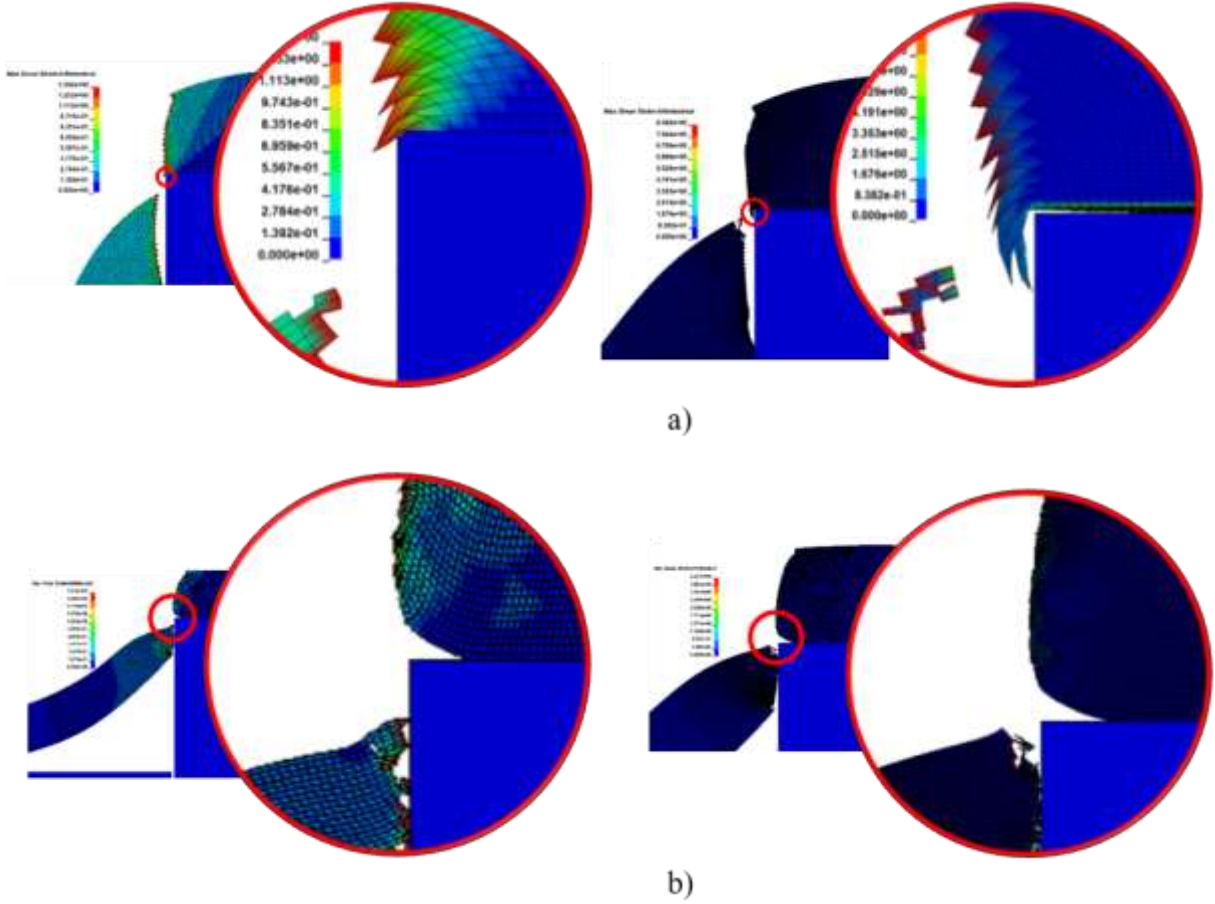
Hedeflenen çalışma kapsamında, prosesin hedef malzemeye uygulanıp uygulanamayacağı parçanın kesme yüzeylerinde meydana gelen çapaklanma durumunun değerlendirilmesi ile gösterilmiştir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde zımbasının iki hareketiyle yapılan kesme işleminde çapak oluşumu görülmezken tek hareketi sonrası (aşağı yönlü) bir miktar çapak oluşumu yapılan analizlerde gözlemlenmiştir. Her iki sistem hareketine ait deformasyonlar ve kesme hattı görüntüleri Şekil 11'de gösterilmektedir.

H. G. KORKMAZ, S. TOROS, H. S. HALKACI



Şekil 10. Kesme zımbasının ikinci aşamasında meydana gelen deformasyonlar 0,18 (a), 0,7(b)

*PASLANMAZ ÇELİKLERDE HİDRO-KESME YÖNTEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ*



**Şekil 11.** Zımbanın hareketi ile gerçekleştirilen kesme operasyonu sonucundaki çapak oluşumları tekli hareket (a), ikili hareket (b)

## 5. SONUÇLAR

Yapılan çalışma kapsamında 304 paslanmaz çeliğinin hidro şekillendirme süreci ile bütünleşik kesme prosesinin verimliliği nümerik olarak değerlendirilmiştir. 0,18 mm ve 0,7 mm kalınlığındaki 304 paslanmaz çeliğinin, hidro-kesme işlemi sonrası meydana gelen çapakanma durumu destek zımba elemanın tekli ve ikili hareketleri için değerlendirilmiştir. Analizlerde özellikle talaşlı imalat ve kesme operasyonlarının değerlendirilmesinde yoğun olarak kullanılan Johnson-Cook hasar modeli kullanılmış, model parametreleri deneysel yöntemlerle belirlenmiştir.

Sonuç olarak her iki kalınlıktaki sacın hidro-kesme operasyonunda destek zımbanın tekli hareketi için çapakanma durumunun elde edildiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte ince sacda meydana gelen çapakanma kalın sacdan bir miktar daha düşük olduğu yapılan nümerik çalışmalarla belirlenmiştir. Zımbanın ikili hareketinde ise kesme işlemi sonrası oluşan çapakanma her iki sac kalınlığı içinde ortadan kalkmıştır. Bu durum zımbanın ilk hareketi ile elde edilen ön kesme ve ilgili kesme bölgesinde oluşan pekleşmenin oluşması ile sağlanmıştır. İkincil harekette parça kenar bölgeden boşluğa doğru akamamış ve o bölgede çapak oluşumuna mani olunmuştur.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilimsel Araştırmaları Destekleme Birimi tarafından desteklenmiş, 17201138 numaralı “Sac Hidro-Kesmede Proses Parametrelerinin Deneysel Sayısal Olarak Belirlenmesi” başlıklı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] KOCANDA A. and SADLOWSKA H., "Automotive Component Development by Means of Hydroforming: A Review". Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008.8, 3, 55-72.
- [2] ŞAHİN S., "Hidrolik Şekillendirme Yönteminin Esasları Ve Sınıflandırılması". Mühendis ve Makina, 2004.45-553, 35-39.
- [3] LANG L.H., WANG Z.R., KANG D.C., YUAN S.J., ZHANG S.H., DANCKERT J., and NIELSEN K.B., "Hydroforming Highlights: Sheet Hydroforming and Tube Hydroforming". Journal of Materials Processing Technology, 2004.151, 1-3, 165-177.
- [4] WANG Y., LANG L., SHERKATGHANAD E., NIELSEN K.B., LI X.X., and SUN Z.Y., "Rigid-Flexible Coupling Forming Process for Aluminum Alloy Automobile Body Panels". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.
- [5] WANG Z.J., ZHENG L.H., LIU Z.G., XIANG N., and WANG P.Y., "Investigation of Viscous Pressure Forming for 6k21-T4 Aluminum Alloy Car Panels". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016.85, 9-12, 2525-2534.
- [6] LANG L.H., DANCKERT J., and NIELSEN K.B., "Multi-Layer Sheet Hydroforming: Experimental and Numerical Investigation into the Very Thin Layer in the Middle". Journal of Materials Processing Technology, 2005.170, 3, 524-535.
- [7] NGAILE G. and LOWRIE J., "Punch Design for Floating Based Micro-Tube Hydroforming Die Assembly". Journal of Materials Processing Technology, 2018.253, 168-177.
- [8] HASHEMI S.J. and RAHMANI F., "Investigation of the Geometry of Rectangular Cross Section Aluminum Parts in Low Pressure Tube Hydroforming Process". The Indian Institute of Metals, 2018.
- [9] HUANG T.L., SONG X.W., and LIU M., "The Multi-Objective Non-Probabilistic Interval Optimization of the Loading Paths for T-Shape Tube Hydroforming". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.94, 1-4, 677-686.
- [10] KIM S.S., HAN C.S., and LEE Y.S., "Development of a New Burr-Free Hydro-Mechanical Punching". Journal of Materials Processing Technology, 2005.162, 524-529.
- [11] COCKROFT M.G. and LATHAM D.J., "A Simple Criterion of Fracture for Ductile Metals". National Engineering Laboratory, 1966.Report No:240,
- [12] HASSANNEJADASL A., GREEN D.E., ALTENHOF W.J., MARIS C., and MASON M., "Numerical Modeling of Multi-Stage Tube Hydroforming". Materials & Design, 2013.46, 235-246.
- [13] MAJZOBI G.H. and DEHGOLAN F.R., "Determination of the Constants of Damage Models". 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (Icm11), 2011.10,
- [14] FEUCHT M., SUN D.-Z., ENHART T., and FRANK T., "Recent Development and Applications of the Gurson Model". LS-DYNA Anwenderforum, 2006.D II, 21-32.
- [15] WU Z.G., LI S.H., ZHANG W.G., and WANG W.R., "Ductile Fracture Simulation of Hydroforming Process Based on Various Criteria in 3d Modeling". Materials & Design, 2010.31, 8, 3661-3671.
- [16] G. C.M. and J. L.D., "Ductility and the Workability of Metals". Journal of the Institute of Metals, 1968.96, 33-39.
- [17] CLIFT S.E., HARTLEY P., STURGESS C.E.N., and ROWE G.W., "Fracture Prediction in Plastic-Deformation Processes". International Journal of Mechanical Sciences, 1990.32, 1, 1-17.
- [18] P H., I P., and C. S., "Numerical Modelling of Material Deformation Processes Research, Development and Applications". 1992, Berlin: Springer.
- [19] HAMBLI R. and RESZKA M., "Fracture Criteria Identification Using an Inverse Technique Method and Blanking Experiment". International Journal of Mechanical Sciences, 2002.44, 7, 1349-1361.
- [20] J.R. R. and D.M. T., "On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields". Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969.17, 3, 201-217.
- [21] SHIOMI M., UEDA Y., and OSAKADA K., "Piercing of Steel Sheet by Using Hydrostatic Pressure". Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2006.55, 1, 255-258.