



# Paslanmaz Çeliklere Uygulanan Flanşlama Operasyonunun Parametrik Özelliklerinin Sonlu Elemanlar Analizleri ve Deneysel Tasarımı Yaklaşımını ile İncelenmesi

Onur Saray<sup>1\*</sup>, Uğur Efe<sup>2</sup>, Ömer Fırat<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Bursa Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-9378-3870), [onur.saray@btu.edu.tr](mailto:onur.saray@btu.edu.tr)

<sup>2</sup> YPS OTOMOTİV AŞ, Tasarım Merkezi, Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0001-7716-3404), [ugur.efe@yps.com.tr](mailto:ugur.efe@yps.com.tr)

<sup>3</sup> YPS OTOMOTİV AŞ, Tasarım Merkezi, Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0003-4852-0876), [omer.firat@yps.com.tr](mailto:omer.firat@yps.com.tr)

(1st International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences ICENSOS 2022, December 20 - 23, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1216746)

**ATIF/REFERENCE:** Saray, O., Efe, U. & Fırat, Ö (2022). paslanmaz çeliklere uygulanan flanşlama operasyonunun parametrik özelliklerinin sonlu elemanlar analizleri ve deneysel tasarımı yaklaşımını ile incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (45), 93-99.

## Öz

Bu çalışmada, ferritik paslanmaz çeliklere uygulanan flanşlama operasyonlarında kullanılacak zımba-kalıp çiftlerinin geometrik özellikleri ile elde edilen flanşlara ait geometrik özellikleri arasındaki ilişkiler Taguchi deneysel tasarımı ve sonlu elemanlar analizleri kullanılarak incelendi. Bu kapsamda hem flanş et kalınlığı hem de flanş boyunun en büyük değerlere ulaşması için zımba koniklik boyu, kalıp koniklik açısı ve pilot delik çapının sırasıyla 3,5 mm, 90° ve 2,75 mm değerini alması gerektiği anlaşıldı. Proses parametrelerinin deformasyon davranışı ile ilişkisi incelendiğinde ise, proses davranışını en çok zımba koniklik boyunun etkilediği görüldü. Bu faktörün mümkün olan en küçük değerler alması halinde, flanş boyu ve flanş et kalınlığının bir arada büyük değerlere taşınabileceği anlaşıldı. Ancak bunun aynı zamanda malzemenin sıvaması gibi şekillendirme problemlerine neden olabileceği anlaşıldı.

**Anahtar Kelimeler:** Paslanmaz çelikler, flanş oluşturma prosesi, flanş boyutları, plastik şekillendirme, deneylerin tasarımı

## Investigation of the Parametric Properties of the Flanging Operation for Stainless Steels with Finite Element Analysis and Experimental Design Approach

### Abstract

In this study, Taguchi's experimental design and finite element analysis were used to determine relationships between the geometrical properties of the punch-die pair and flange dimensions. Results of the study showed that the highest values of both flange wall thickness and flange length could be achieved when punch taper length, die taper angle and pilot hole diameter took values of 3.5 mm, 90°, and 2.75 mm, respectively. When the relationship between the process parameters and the deformation behavior was examined, a more substantial effect of punch taper length on the deformation behavior of the process was detected. The decrease in values of the punch taper length is found necessary to simultaneously increase flange length and flange wall thickness. However, it was realized that this could also cause forming problems, such as smearing the material due to high contact pressures.

**Keywords:** Flange forming process, Flange dimensions, Plastic Deformation, Design of Experiments

\* Sorumlu Yazar: [onur.saray@btu.edu.tr](mailto:onur.saray@btu.edu.tr)

## 1. Giriş

Sac malzemelerin şekillendirilmesi ile üretilen parçaların, diğerleri ile birleştirilerek bir ürün haline getirilmesinde kullanılan önemli yöntemlerden birisi de civata bağlantılarıdır. Söz konusu bağlantıların uygulanması, parçaların değiştirilmesine olanak tanıdığından düşük maliyetli bir endüstriyel çözüm sunmaktadır. Sac metallerin şekillendirilmesi ile üretilen parçaların birleştirilmesinde de kullanılan bu yaklaşımda, somun vazifesi, saclara açılan deliklerin flanşa formuna şekillendirilmesi sonrasında ovalanan dış formları ile sağlanmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde, ilave parça ve bu parçanın sac metal düzelenine birleştirilmesi ile alakalı ara işlemler elenerek, ekonomik ve işlevsel bir çözüm ortaya konulmaktadır. Bu çözümlere, otomotiv endüstrisinde de rastlamak mümkündür. Özellikle, paslanmaz çelik sacların şekillendirildiği egzoz hatlarının karoseriye sabitlenmesinde genellikle bu uygulama tercih edilmektedir.

Sac malzemelerin flanş olarak şekillendirilmesi ile alakalı literatürde yapılmış çalışmalara rastlamak mümkündür. Bu çalışmalar, deneysel, hesaplamalı ve analitik mühendisli araçları kullanılarak uygulanmıştır. Nipersin vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, silindirik zımba kalıp çifti ile uygulanan bir flanş oluşturma operasyonunun analitik modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, flanş et kalınlığı ile zımba kalıp boşluğunun birbiri ile uyumlu geometrik özelliklere sahip olduğu varsayılmıştır. Flanş oluşturma sürecinin plastisite modeli Jianping vd. (2010) tarafından da oluşturularak, elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan, şekillendirme için gerekli olan kuvvet değerleri ve gerilme dağılımı gibi analitik büyüklüklerin analitik hesaplama yaklaşımları ile yüksek doğrulukta hesaplanabildiği gösterilmiştir. Huang vd. (2001) tarafından yapılan hesaplamalı bir çalışmada, flanş oluşturma prosesinde, kullanılan zımbanın köşe radyusunun etkisini incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, köşe radyusunun büyüklüğünün zımba kuvveti ve flanş geometrisini belli oranda etkilediği, ancak, şekillendirme limitini değiştirmediği gösterilmiştir Luo vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, flanş et kalınlığının artırılması için ikincil ezme işleminin uygulanması önerilmiştir. Elastisite modülü, anizotropi ve akma dayanımı gibi parametrelerin flanş et kalınlığının geometrik dağılımı üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Krichen vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada alüminyum alaşımlarına uygulanan flanş oluşturma operasyonları sonrasındaki geri yaylanmanın pot çemberi basıncı ile olan ilişkisi incelenmiştir. Çalışmanın en önemli sonucu oluşturulan flanşların geometrik düzgünlüklerinin geri yaylanmadan belirgin olarak etkilendiği ve bunun kontrol edilmesi için geri yaylanma kuvvetinin en önemli parametre olduğudur. Thipprakmas vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, flanş oluşturma operasyonları için gerekli olan şekillendirilebilirlik değerlerinin delik germe testinden elde edilen HE% oranı arttıkça artış sergilediği gösterilmiştir. Bu nedenle, delik germe testlerinin flanş oluşturma proses tasarımı için gösterge verisi olarak kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Kacem vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, flanş boyutlarının kontrolü için flanş şekillendirme prosesine ütüleme adımı elenmiştir. Bu şekilde flanşın et kalınlığı azaltılarak boyunun uzatılması sağlanmıştır [7]. Masmodi vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, alüminyum alaşımlarına şekillendirilen deliklere hasarsız dış açılması için gerekli olan geometrik parametrelerin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada, GTN modelinin sonlu elemanlar

uygulamaları ile şekillendirme analizleri kurgulanıp, uygun zımba kalıp boşlukları için farklı modeller koşturulmuştur. Lin vd. (2014) kalın plakalarda flanş boyunun arttırılması için gerekli olan malzeme hacmini sağlanması için plakanın bölgesel olarak ezilmesine yönelik bir proses önermiştir. Silindirik kalıpların kullanıldığı proseste, flanş boylarının etkin şekilde arttırılmasına imkân sağlanırken şekillendirme yüklerinde de belirgin artış olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Literatürde yapılan az sayıdaki çalışmalar incelendiğinde, flanş oluşturma prosesinin incelendiği çalışmaların genellikle yapı çelikleri ve alüminyum alaşımları üzerine yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Bunun yanında prosesin uygulandığı kalıp sistemlerinin silindirik geometride olduğu dikkati çekmiştir. Proses sırasında ütüleme adımının uygulandığı çalışmaların ise az sayıda olduğu söylenebilir. Bu çerçevede yüksek et kalınlığına sahip paslanmaz çeliklere uygulanacak flanş oluşturma operasyonlarının hiç çalışılmadığı dikkati çekmektedir. Diğer taraftan flanş boyunun uzatılmasına yönelik olarak, ütüleme adımının eklenmesi ile uygulanan çözümler var olsa da bu uygulamanın endüstriyel uygulamaların çalışma stroğu üzerindeki olumsuz etkisi nedeniyle, fazlaca tercih edilemeyeceği aşikardır.

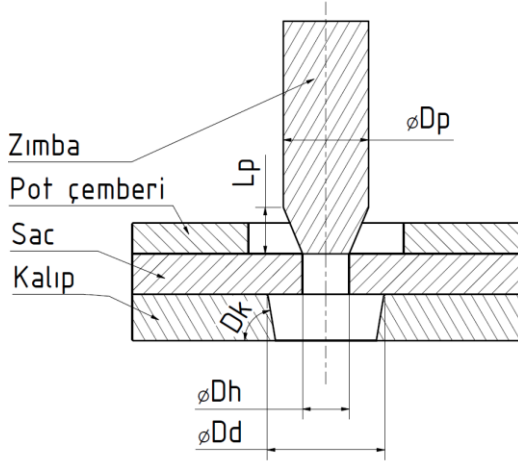
Literatürde görülen, yukarıda özetlenmiş olan eksikliklerin giderilmesi ve flanş oluşturma prosesinin endüstriyel perspektife göre daha kolay uygulanabilir bir çerçevede ele alınması amacıyla bu çalışmada, konik kalıp geometrisine sahip olan kalıplar ile uygulanacak bir şekillendirme operasyonu parametrik olarak incelenmiştir. İncelemeler, sonlu elemanlar yöntemi ve deneylerin tasarımı yaklaşımları ile optimize edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada 2 mm kalınlığa sahip 1. 4512 kalite ferritik paslanmaz çelik saclar kullanıldı. Deney malzemesinin temel mekanik özellikleri ve deformasyon davranışının belirlenmesi ölçü genişliği 20 mm ve inceltilmiş bölümünün boyu 125 mm olan çekme numunelerine oda sıcaklığında ve  $10^{-2}$  1/s deformasyon hızında tek eksenli çekme deneyi uygulandı. Bu deneylerden malzemenin akma dayanımı ( $\sigma_y$ ), çekme dayanımı ( $\sigma_{UTS}$ ), uniform birim uzama ( $\epsilon_u$ ) ve kopma uzaması ( $\epsilon_f$ ) değerleri ile pekleşme katsayısı (K) ve pekleşme üsteli (n) belirlendi.

Flanş oluşturma süreci sırasında malzemede meydana gelecek olan hasarın öngörülmesi için ISO16330'a uygun numunelere delik germe testleri uygulandı. Bu testlerde 60° koniklik açısına sahip zımba kullanılarak 10 mm çapındaki delikler çeperde çatlak oluşuncaya kadar genişletildi. Test sırasında gelişen şekillendirme süreci sonrasında elde edilecek en büyük delik çapı için % genişleme oranı belirlendi.

Flanş oluşturma operasyonu dahilinde kullanılacak zımba ve kalıp takımına ait teknik resimler Şekil 1. de verilmiştir. Üretilen flanşların iç delik çapları 5,5 mm olarak sabit tutuldu. Bu nedenle, zımbanın en geniş çapı da 5,5 mm değerini aldı. Flanşın oluşturmak üzere kullanılacak pilot delik çapı ( $d_0$ ), zımba koniklik boyu ( $L_p$ ) ve kalıp koniklik açısı ( $D_k$ ) parametreleri ise şekillendirme sisteminde yer alan bağımsız tasarım değişkenleri olarak belirlendi. Bu değişkenlerin uygulanabilir sınırdaki seviyeleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Seviye kombinasyonlarının optimum değerlerinin araştırılması için deney tasarımı yaklaşımı kullanıldı. Bu kapsamda Taguchi yönteminin L9 tablosuna göre parametrelerin kombinasyonları Tablo 2'te verilmiştir.



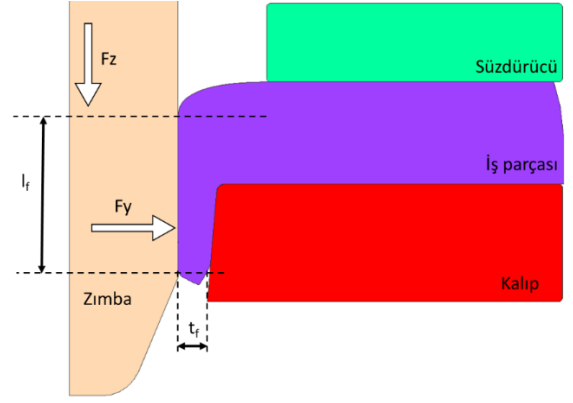
Şekil 1. Flanşlama zımba-kalıp çiftine ait geometrik parametrelerin şematik gösterimi

Tablo 1. Flanşlama zımba-kalıp çiftine ait geometrik parametrelerin aldığı değerler

Parametreler				
Sabit parametre		Değişken parametre		
Zımba çapı, Dp [mm]	Kalıp çapı Dd [mm]	Zımba konik boyu, Lp [mm]	Kalıp koniklik açısı, Dk [derece]	Pilot delik çapı, Dh [mm]
5,5	7,5	3,5	85,0	2,50
5,5	7,5	7,0	87,5	2,75
5,5	7,5	14,0	90,0	3,00

Tablo 2. Flanşlama zımba-kalıp çiftine ait geometrik parametreleri için L9 boyutunda Taguchi deney tasarımı parametre tablosu

Faktörler	Zımba koniklik boyu, Lp	Zımba koniklik açısı, Dk	Pilot delik çapı, Dh	
Seviyeler	A1	3,5	85,0	2,50
	A2	3,5	87,5	2,75
	A3	3,5	90,0	3,00
	A4	7,0	85,0	2,75
	A5	7,0	87,5	3,00
	A6	7,0	90,0	2,50
	A7	14,0	85,0	3,00
	A8	14,0	87,5	2,50
	A9	14,0	90,0	2,75



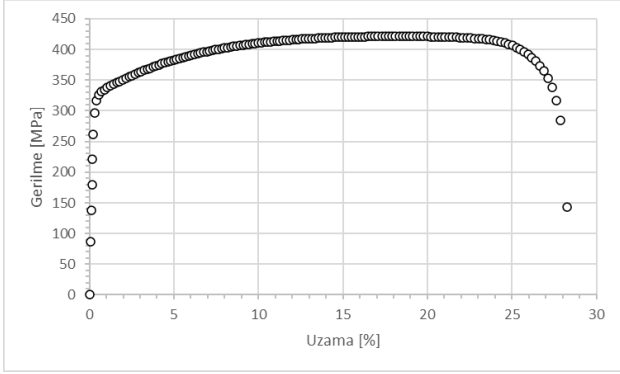
Şekil 2. L9 boyutunda Taguchi deney tasarımı kapsamında araştırılan sonuç değerlerinin şematik gösterimi

Tablo 2’de gösterilen proses parametrelerine göre uygulanacak şekillendirme analizlerinde kullanılacak  $Dh=2,5$  mm,  $Dh=2,75$  mm ve  $Dh=3$  mm çapındaki ön deliklerin oluşturulması için basit kesme analizleri yapıldı. Bu analizlerde kullanılan kesme kalıplarının geometrik özellikleri Şekil 3’de gösterilmiştir. Farklı çaplardaki deliklerin kesilmesinde kullanılacak kalıpların çapının zımba çapından sac kalınlığının %16 daha büyük olarak oluşturulmuştur. Modellemede, kalıp ve zımbanın deformasyona uğramadığı varsayılmıştır. Sistemde bulunan bileşenler arasında tanımlanan temas algoritması MSC Marc “Segment to segment” kullanılmıştır. Deformasyona uğratılacak sac malzemenin geometrisi boyutu 0,65 mm olan sonlu elemanlar ile temsil edilmiştir. Söz konusu elemanlar kesme bölgesinde 4 kat küçültülerek 0,1625 mm olarak oluşturulmuştur. Böylece, sac malzeme-zımba etkileşimlerinin daha hassas şekilde gözetlenebilmesi hedeflenmiştir. Kesmenin sonunda gerçekleşen koparma bölgesi ise, geometrik olarak tanımlanmıştır. Kesme prosesi sırasında sac malzeme ile zımba arasındaki sürtünme katsayısı 0, 15 olarak seçilmiştir. Kesme prosesi çıktısı olan pilot delikleri açılmış sac malzemeler biriken birim şekil değiştirmeler ile L9 ortogonal seri deney tasarımı kapsamındaki şekillendirme proseslerine aktarıldı. Böylece, prosesin hem kesme hem de şekillendirme süreçlerinin bir arada modellenmesi sağlanmıştır. Kesme ve flanş oluşturma operasyonlarında ortak işlem öncesi (pre-processing) ve çözüm parametreleri kullanıldı. Sonlu elemanlar analizleri için modeller MSC Simufact Forming yazılımında hazırlandı. Taguchi deney tasarımı için ise, ticari Minitab yazılımı kullanıldı.

Flanşları geometrik özelliklerinin değerlendirilmesinde, 5,5 mm iç çapa sahip olan deliklere M6 boyutunda iç vida dişinin ovalama ile oluşturulacağı varsayıldı. Bu boyuttaki civata dişlerinde diş dibi çapının 6 mm olduğu dikkate alınırsa, ovalama ile flanş et kalınlığına uygulanması gereken ezme miktarının yarı çap doğrultusunda 0,25 mm olacağı anlaşılmaktadır. Bu nedenle, diş çekilebilir flanş boyundaki et kalınlığının da bu değer en az iki katına karşılık gelen 0,5 mm olması gerektiği varsayıldı. Bunun yanında oluşturulacak flanşlara açılması gereken diş sayısının en az dört olacağı varsayıldı. M6 boyutundaki normal diş vidaların hatvesinin 1,0 mm olduğunu dikkate alarak oluşturulacak flanşlarının boyunun en az 4 mm olması gerektiği varsayıldı.

### 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Malzemenin çekme deneyinden elde edilen karakteristik mühendislik-yüzde uzama eğrisi Şekil 3'te verilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen temel mekanik özellikler ise Tablo 3'te verilmiştir. Şekil 3 ve Tablo 3 incelendiğinde 1.4512 malzemenin yaklaşık 307 MPa büyüklüğündeki akma dayanımı sonrasında etkin şekilde pekleşerek yaklaşık 418 MPa büyüklüğündeki çekme dayanımına %19'luk uniform uzama sergileyerek ulaşmıştır. Uniform deformasyon bölgesinde pekleşme katsayısı ve pekleşme üssü değerleri sırasıyla 656 MPa ve 0,16 olarak belirlenmiştir. Malzemenin boyun verme sonrasında ulaştığı kopma uzaması ise, yaklaşık %29 seviyelerindedir. Bu çerçevede malzemenin genel olarak soğuk şekillendirme proseslerine uygun nitelikte mekanik özelliklere ve deformasyon davranışına sahip olduğu söylenebilir. Malzemenin delik germe oranı %150 olarak belirlenmiştir. Bu durumda en küçük  $D_h$  değeri (2,5 mm) değerinin ulaşabileceği çap değeri 6,25 mm olarak belirlenebilir. Bu sonuç, malzemenin çekme kuvvetleri altında gerilmesi halinde çalışmada kullanılan zımba çapı olan 5,5 mm'den daha büyük bir değere kadar genişletilebileceği anlaşılmaktadır. Çalışmada kullanılan diğeri için de benzer sonuçlara ulaşılabilir ( $D_h=2,75$  mm için 6,875 mm ve  $D_h=3$  mm için 7,5 mm)



Şekil 3.1425 malzemenin tek eksenli gerilme-uzama eğrisi.

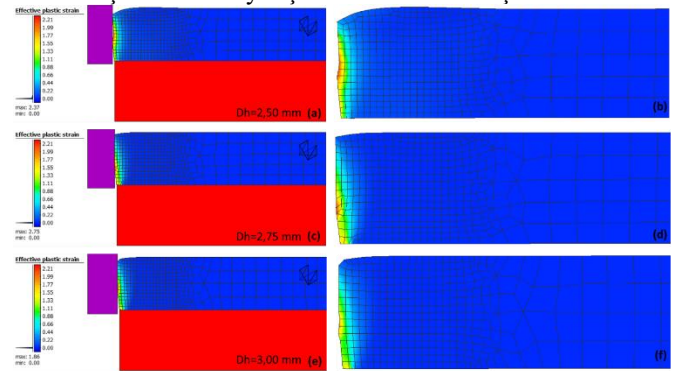
Tablo 3: 1.4125 malzemenin mekanik özellikleri

Mekanik özellik	Ortalama	Standart sapma
Akma dayanımı [MPa]	307,3	14,7
Çekme dayanımı [MPa]	418,7	3,2
Uniform uzama [%]	19,0	0,7
Kopma uzaması [%]	29,1	0,8
Pekleşme katsayısı [MPa]	655,7	25,9
Pekleşme üssü	0,16	0,015
Delik germe oranı [%]	150	5

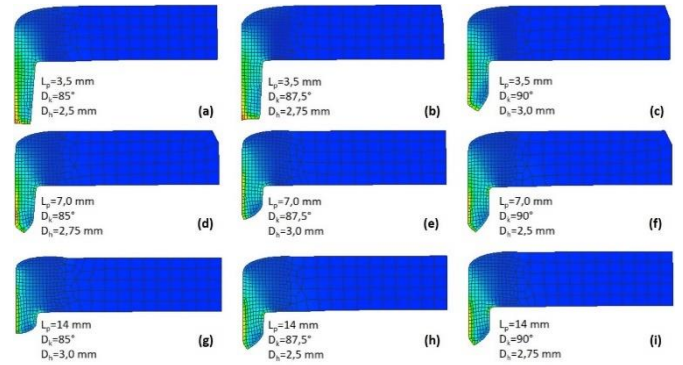
Malzemenin delik germe oranı %150 olarak belirlenmiştir. Bu durumda en küçük  $D_h$  değeri (2,5 mm) değerinin ulaşabileceği çap değeri 6,25 mm olarak belirlenebilir. Bu sonuç, malzemenin çekme kuvvetleri altında gerilmesi halinde çalışmada kullanılan zımba çapı olan 5,5 mm'den daha büyük bir değere kadar genişletilebileceği anlaşılmaktadır. Çalışmada kullanılan diğeri için de benzer sonuçlara ulaşılabilir ( $D_h=2,75$  mm için 6,875 mm ve  $D_h=3$  mm için 7,5 mm)

L9 boyutundaki deney tasarımı ile kurgulanan şekillendirme analizlerinden elde edilen sonuçları gösteren analiz görüntüleri Şekil 5'de verilmiştir. Bu şekillerden ölçülen  $L_f$  (flanş boyu),  $t_f$  (flanş et kalınlığı)  $F_x/F_z$  (normal kuvvet/şekillendirme kuvveti) yanıtları Tablo 4'de özetlenmiştir. Şekil 6 ve Tablo 5'de verilen e-ISSN: 2148-2683

değerler incelendiğinde deformasyon davranışı ile ilgili temel çıktıları elde etmek mümkündür. Şekillendirme prosesi ile elde edilmesi planlanan en önemli çıktı flanş içinde dış çekilebilir nitelikteki bölgenin mümkün olan en büyük boy ( $L_f$ ) ve et kalınlığına ( $t_f$ ) sahip olması gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Tablo 4). Bunun yanında prosesin şekillendirme sırasında karşılaşacağı en temel problemde, zımba yüzeyi ile malzeme yüzeyi arasındaki sürtünme etkileri olarak değerlendirilmelidir. Bu durum, Tablo 4'de verilen  $F_z/F_x$  oranının en düşük seviyede olmasını gerektirmektedir. Buna göre faktörlerden  $L_f$  ve  $t_f$  için "büyük olan iyidir" ve  $F_x/F_z$  için de "küçük olan iyidir" kriterlerine göre kurgulanan Taguchi deney tasarımı uygulanmıştır. Analiz sonuçlarının deney tasarımına uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla %95 güvence seviyesi skalasındaki normal dağılım Şekil 6'da verilmiştir. Deney tasarımında analizlerinden elde edilen sonuçlar ise sırasıyla Şekil 7-9'da verilmiştir.



Şekil 4.  $D_h$  parametresinde kullanılacak pilot deliklerin oluşturulmasında uygulanan kesme analizlerden elde edilen sonuçlar:



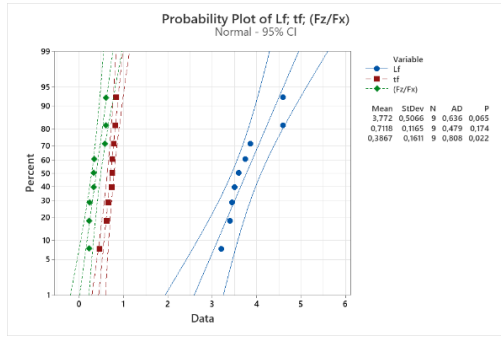
Şekil 5. Deney tasarımı kapsamında uygulanan flanş oluşturma parametrelerinden elde edilen kesit görüntüleri

$L_f$  yanıtının "en büyük en iyi" kriterine göre  $L_p$ ,  $D_k$  ve  $D_h$  faktörleri ile değişiminin ortalama değerler ve signal/gürültü türünden gösterimi Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde  $L_f$  yanıtının en etkili şekilde arttıran parametrenin  $L_p$  (zımba koniklik boyu) olduğu anlaşılmaktadır. Şekillendirme öncesinde açılan pilot deliğin çapı,  $D_h$  ise,  $L_f$  üzerinde en etkili ikinci faktör olduğu görülmektedir (Şekil 7).  $L_f$  yanıtının faktörler ile değişimi incelendiğinde,  $L_p$  ve  $D_h$  faktörlerinin artan değerleri ile azalma eğilimi sergilediği,  $D_h$  faktörünün 2,75 mm değerini aldığı anda en büyük değere ulaştığı görülmektedir. Buna göre,  $L_f$ 'nin ne büyük değere ulaşması için  $L_f$ ,  $D_k$  ve  $D_h$  faktörlerinin alması gereken uygun değerlerin sırasıyla 3,5 mm,  $85^\circ$  ve 2,75 mm olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 8).  $t_f$  (flanş et kalınlığı) yanıtının en büyük değere ulaşmasında en etkili parametrenin  $L_p$  zımba koniklik boyu olduğu, bunu sırasıyla  $D_h$  ve  $D_k$  takip ettiği söylenebilir.  $t_f$  yanıtının değeri  $L_p$ 'nin artan değerleri ile birlikte

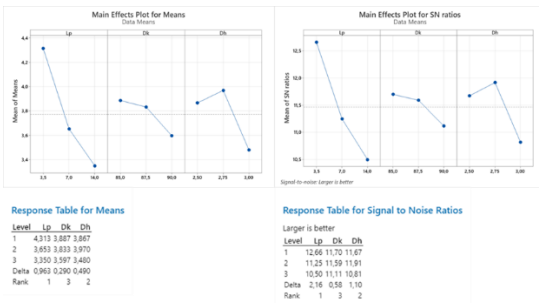
eğilimde olduğu,  $D_k$  faktörü ile ise  $87,5^\circ$  değerine kadar artış sergiledikten sonra belirgin bir değişim göstermediği söylenebilir (Şekil 8). Söz konusu yanıtın  $D_h$  ile değişimi dikkate alındığında ise en büyük değer  $2,75$  mm boyutundaki pilot delik çapında elde edildiği görülmektedir (Şekil 8). Elde edilen bu sonuçlara göre,  $t_f$  yanıtının en büyük değere ulaşması için  $L_p$ ,  $D_p$  ve  $D_h$  parametrelerinin alması gereken değerlerin sırasıyla  $3,5$  mm,  $87,5^\circ$  ve  $2,75$  mm olduğu söylenebilir (Şekil 8).  $F_x/F_z$  yanıtının etkileyen en güçlü faktörün  $L_p$  olduğu dikkati çekmektedir.  $L_p$ 'nin artan değerleri ile  $F_x/F_z$  yanıtının azalma eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 9).  $D_k$  ve  $D_h$  faktörlerinin ise,  $F_x/F_z$  yanıtı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir (Şekil 9). Buna göre  $L_h$  parametresinin  $14$  mm olması durumunda  $F_x/F_z$  en küçük değerini almaktadır.

Tablo 4. Deney tasarımı kapsamında uygulanan flanş oluşturma prosesinde kullanılan seviyeler ve elde edilen yanıtlar.  $L_p$ : Zimba koniklik boyu (mm),  $D_k$ : Zimba koniklik açısı  $D_h$ : Pilot delik çapı,  $L_f$ : Flanş boyu,  $t_f$ : Flanş et kalınlığı,  $F_z$ : Zimba kuvveti (kN),  $F_x$ : Yanal kuvvet (kN)

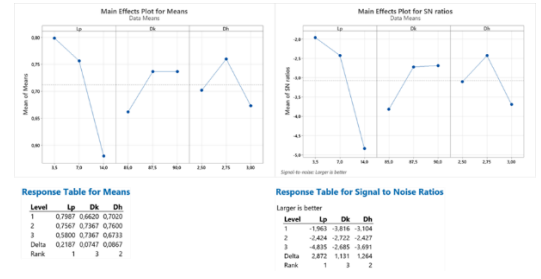
#	Faktörler			Yanıtlar				
	$L_p$ mm	$D_k$ (°)	$D_h$ mm	$L_f$ mm	$t_f$ mm	$F_z$ kN	$F_x$ kN	$F_z/F_x$
1	3,5	85,0	2,50	4,59	0,75	27,5	46,0	0,60
2	3,5	87,5	2,75	4,60	0,87	26,6	44,9	0,58
3	3,5	90,0	3,00	3,74	0,99	25,1	41,5	0,60
4	7	85,0	2,75	3,86	0,87	20,6	60,9	0,34
5	7	87,5	3,00	3,50	0,93	18,4	54,8	0,33
6	7	90,0	2,50	3,56	1,00	20,1	59,5	0,33
7	14	85,0	3,00	3,21	0,95	13,0	55,1	0,24
8	14	87,5	2,50	3,38	0,96	15,5	66,9	0,23
9	14	90,0	2,75	3,45	1,00	15,7	66,6	0,23



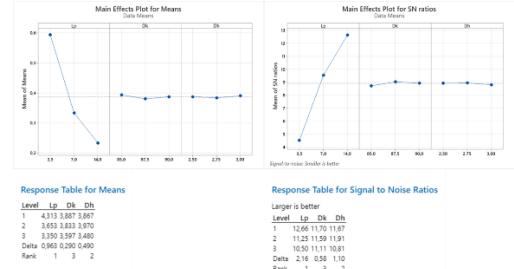
Şekil 6. Sonlu elemanlar analizlerden elde edilen yanıt değerlerinin istatistiksel dağılımı.



Şekil 7.  $L_f$  yanıtının “en büyük en iyi” kriterine göre  $L_p$ ,  $D_k$  ve  $D_h$  faktörleri ile değişiminin ortalama değerler ve signal/gürültü türünden gösterimi.



Şekil 8.  $t_f$  yanıtının “en büyük en iyi” kriterine göre  $L_p$ ,  $D_k$  ve  $D_h$  faktörleri ile değişiminin ortalama değerler ve signal/gürültü türünden gösterimi.



Şekil 9.  $F_z/F_x$  yanıtının “en büyük en iyi” kriterine göre  $L_p$ ,  $D_k$  ve  $D_h$  faktörleri ile değişiminin ortalama değerler ve signal/gürültü oranına göre değişimi

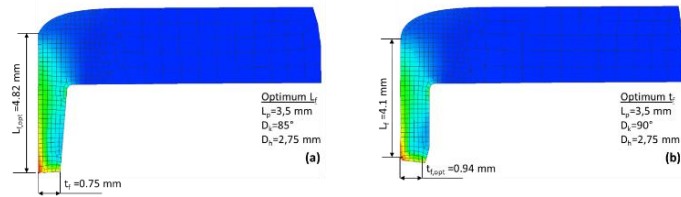
Faktörlerin yanıtlar üzerindeki etkileri genel olarak değerlendirildiğinde, flanş boyunu ( $L_p$ ) ve flanş et kalınlığını ( $t_f$ ) en büyük değerleri almasını sağlayacak faktörlerin birbiri ile uyumlu seyir içerisinde olduğu dikkati çekmektedir. Nitekim, her iki yanıtın da optimum seviyelerine ulaşması için  $L_p$  ve  $D_h$  faktörlerinin sırasıyla  $3,5$  mm ve  $2,75$  mm değerlerini alması gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak  $D_k$  faktörünün optimum seviyesinin  $L_f$ 'nin en büyük değerine ulaşması için  $85^\circ$  olması gerekirken,  $t_f$ 'nin en büyük değerine ulaşması için  $87,5^\circ$  veya  $90^\circ$  olması gerekmektedir. Bu sonuçlar göz önünde bulundurularak,  $L_f$  ve  $t_f$  parametrelerinin üç farklı optimum seviye kombinasyonu ortaya çıkmaktadır (Tablo 5, Şekil 10).

Tablo 5’de verilen optimum seviye kombinasyonlarının ürettiği yanıtlar incelendiğinde L9 deney tasarımı tarafından üretilen yanıtlardan daha büyük sonuçların elde edildiği anlaşılmaktadır. Nitekim, Tablo 5’te verilen L9 deney tasarımı seviyelerinden elde edilen yanıtlardan daha büyük olan  $L_f = 4,82$  (Tablo 5) yanıtının elde edildiği görülmektedir. Bu yanıtın elde edildiği optimum seviye kombinasyonunun ürettiği  $t_f$  yanıtı ise,  $0,76$  mm değerini almıştır.  $t_f$  yanıtının en büyük değeri alması için değerlendirilen olası iki farklı optimum seviye kombinasyonu karşılaştırıldığında  $D_k$  faktörünün  $90^\circ$  seviyesinde olması halinde elde edilen  $t_f$  yanıtının  $0,94$  mm değerine ulaştığı, aynı koşullardaki  $L_f$  yanıtının ise  $4,1$  mm değerini aldığı Tablo 6’dan anlaşılmaktadır.  $D_k$  faktörünün  $87,5^\circ$  değerini alması halinde ise,  $t_f$  yanıtının  $0,87$  mm değerine ulaştığı, aynı koşullardaki  $L_f$  yanıtının ise  $4,60$  mm değerini aldığı anlaşılmaktadır. Belirlenen optimum seviye kombinasyonlarının endüstriyel uygulama açısından performansları değerlendirildiğinde, elde edilen  $L_f$  yanıtlarının bütününde 4 tam diş açmak için yeterli boy ( $4$  mm) elde edilebildiği dikkati çekmektedir. Benzer şekilde optimum seviye kombinasyonlarından elde edilen  $L_f$  değerlerinin hiç birisi 5 tam diş oluşturmak için yeterli boy olan  $5$  mm değerine ulaşamamıştır. Bu durumda, optimum seviye kombinasyonları arasında en büyük et kalınlığına sahip seviyenin seçilmesi uygun görülmektedir. Bu bakış açısı ile, endüstriyel uygulamalara dönük optimum seviye

kombinasyonunun Tablo 5’de verilen seviye 11 olduğu söylenebilir. Söz konusu seviye kombinasyonu sayesinde hedeflenen dış sayısının mümkün olan en büyük et kalınlığında uygulanabildiği anlaşılmaktadır.

Tablo 5. Deney tasarımı ile üretilen optimum seviye kombinasyonları ve elde edilen yanıtlar.

Analiz	Faktörler			Yanıtlar		
	$L_p$	$D_k$	$D_h$	$L_f$	$t_f$	$F_z/F_x$
10 opt. $L_f$	3,5	85	2,75	4,82	0,76	0,58
2 opt. $t_f$	3,5	87,5	2,75	4,60	0,87	0,58
11 opt. $t_f$	3,5	90,0	2,75	4,10	0,94	0,59



Şekil 10. Deney tasarımında elde edilen optimum seviye kombinasyonları dahilinde  $L_f$ : flanş boyu ve  $t_f$ : flanş et kalınlığı yanıtlarının aldığı değerler.

İncelenen faktörlerin yanıtlar üzerindeki etkilerinin deformasyon davranışları ile açıklanması önemli bir çıktı teşkil etmektedir. İncelenen prosteste şekillendirilecek flanşın temel boyutlarını belirleyen önemli iki parametreden ilki,  $D_h$  ile  $D_d$  boyutları ile sınırlanmış durumdaki serbest malzemenin hacmidir (Şekil 1). İkincisi ise, bu hacmin doldurulacağı kalıp boşluğunun  $D_k$  ve  $L_p$  ile belirlenen sınırlarıdır (Şekil 1). Proses esnasında zımbanın hareketi ile deformasyon için serbest malzeme hacmi, kalıp boşluğunu doldurmak üzere akması sağlanmaya çalışılmaktadır. Söz konusu malzeme akışının seyrine göre de şekillendirilen flanşın temel boyutları ortaya çıkmaktadır (Şekil 5). Malzeme akışı üzerindeki en önemli parametre zımba koniklik boyudur. Bu parametrenin azalması durumunda serbest malzemenin kalıp boşluğuna aktarılması daha etkin şekilde gerçekleştiğinden daha yüksek flanş boyları elde edilmektedir. Tersisi durumda ise, zımba hareketi kalıp boşluğunu doldurmaktan çok malzemenin çap doğrultusunda akışını sağlayarak delik etrafının şişmesine neden olmaktadır. Bu etkiler Şekil 5(d)- Şekil 5(i)’de verilen analiz sonuçlarında net şekilde görülmektedir. Bu şekiller incelendiğinde  $L_p$  değerinin 14 olması çap doğrultusundaki genişlemenin daha belirgin olarak meydana geldiği açıkça görülmektedir. Malzeme akışının bu şekilde gelişmesi ile, elde edilen flanş boyu değerleri de sınırlı seviyede kalmaktadır (Tablo 4).  $D_k$  kalıp koniklik açısının malzeme üzerindeki etkileri incelendiğinde, artan koniklik değerleri ile kalıbın malzeme akışına karşı gösterdiği direnç artmaktadır. Bu artışın neticesinde zımba koniklik boyunda düşük değerler aldığı durumlarda (Tablo 4’de verilen seviye 1, 2 ve 3) flanş et kalınlığı azaltılarak flanş boyunun daha da uzaması sağlanabilmektedir. Bu durum, Şekil 5(a), Şekil 5(b) ve Şekil 5(c)’de gösterilen deformasyon geometrilerinde net bir şekilde görülmektedir. Nitekim,  $L_p$  değerinin 3,5 mm sabit kaldığı bu analizlerde kalıp koniklik açısının azalması durumunda elde edilen flanş boylarının arttığı flanş et kalınlıklarının ise azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan, hem zımba koniklik boyunun nispeten yüksek değerler aldığı şekillendirme operasyonlarında, kalıp konikliğinin

azaltılması durumunda, hem kalıbın akışa karşı sergilediği direncin yüksek olması hem de koniklik boyunun yüksek olması nedeniyle malzemenin çap doğrultusunda deforme olmaya daha yatkın olması sonucunda et kalınlığı büyük ancak boyu sınırlı flanşlar oluşmaktadır. Nitekim,  $L_p=14$  ve  $D_k=85^\circ$  değerlerini aldığı zaman flanş boyu  $L_f=3,21$  mm gibi sınırlı bir değer almaktadır (Şekil 5(g) ve Tablo 4).  $D_h$  pliot delik çapının azalan değeri ile deformasyona uğratılabilir nitelikteki sertbest malzeme hacmini artmaktadır. Bu değişim flanş oluşturma operasyonları için önemli bir avantaj sunmaktadır. Nitekim, flanşın hem boyunun hem de et kalınlığının daha büyük değerler alması istenmesi halinde oluşan flanş hacminin de serbest malzeme hacmi ile karşılayabilmesi gerekmektedir. Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, bu avantajın kullanılabilmesinin ancak, oluşturulan serbest malzeme hacminin akmaya zorlanmasına olanak sağlayacak zımba ve kalıp parametreleri ile uyumlu olduğunda mümkün olacağı anlaşılmaktadır.

Çalışmada incelenen önemli parametrelerden birisi de  $F_x/F_z$  oranının aldığı değerlerdir. Bu değerler ürünün geometrik boyutları ile direkt olarak ilişkili olmasa da prosesin tekrar edilebilirliği ve ekipmanların ömrü açısından önem arz etmektedir. Nitekim, elde edilmesi beklenen flanş boyutlarına ulaşılması için zımbanın hareketi için gerekli olan pres kuvveti  $F_z$  ve flanşın çevresel olarak maruz kaldığı  $F_x$  kuvvetlerinin oranı zımbanın flanş şekillenirken maruz kaldığı sıkışmayı temsil etmektedir. Bu oranın artan değerleri ile, şekillendirme sırasında meydana gelen zımba sıkışması ve buna bağlı olarak gelişen aşınma ve yüzey sıvamasının artması beklenmelidir. Bu oranın faktörler ile ilişkisi değerlendirildiğinde,  $L_p$  ve  $D_k$  faktörlerinin küçük değerler aldığı seviyelerin nispeten yüksek  $F_z/F_x$  oranı ürettiği dikkati çekmektedir. Başka bir deyişle, kalıbın malzeme akışına direncinin yüksek olması ve zımbanın serbest malzemeyi etkin şekilde kalıp boşluğuna akmaya zorlaması durumunda  $F_x/F_z$  oranı da belirgin şekilde artış sergilemektedir. Bunların arasında da  $L_p$ ’nin  $D_k$ ’dan daha belirgin şekilde etkili olduğu söylenebilir. Bu durum,  $L_p$  parametresinin kalıp boşluğuna malzeme akışını kontrol edebilen yegane parametre olmasından kaynaklanmaktadır. Gerçekten de  $L_p$  faktörünün yüksek değerler alması durumunda malzeme akışının kalıp boşluğuna etkin şekilde gerçekleşmiyor olması,  $D_k$  faktörünün etkisini ortaya çıkarmasının önüne geçmektedir. Taguchi deney tasarımından elde edilen sinyal/Gürültü oranları da bu düşüncüyü destekler niteliktedir. Şekil 9’da  $F_z/F_x$  cevabı üzerinde etkisi en yüksek olan parametre  $L_p$  faktörü olarak belirlenirken  $D_k$ ’nın belirgin olarak etki etmediği, ancak  $D_h$ ’da da az da olsa etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada kullanılan ferritik paslanmaz çelikler gibi elastisite modülü nispeten düşük olan malzemelerde bu tip etkilerin de daha belirgin şekilde gözleneceği öngörülebilir. Bu çalışmada olduğu gibi, flanş boyu ve et kalınlığının birlikte büyük değerler almasının hedeflendiği şekillendirme proseslerinin bütününde  $F_x/F_z$  oranının aldığı değerler 0,6 seviyelerinde elde edilmiştir. Bu durum yukarıda işaret edilen malzemenin zımbaya sıvaması gibi şekillendirme problemlerinin ortaya çıkmasının olası olduğunu, bunu engellemek için yağlayıcılar, yüzey kaplama gibi önlemlerin alınmasının zaruri olabileceğini göstermektedir.

## 4. Sonuç

Bu çalışmada paslanmaz çeliklere uygulanacak flanşların geometrik özellikleri ve proses özellikleri ile şekillendirmede kullanılacak zımba kalıp setinin geometrik özellikleri arasındaki ilişkiler deney tasarım teknikleri ve hesaplamalı yaklaşımlar kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. L9 boyutunda deney tasarımı tekniği flanşlama operasyonları üzerinde etkili geometrik parametrelerin öngörülmesinde ve bunlar arasındaki etkileşimler dahilinde elde edilecek uygun parametrelerin tayin edilmesinde üstün etkinlik sergilemektedir.

2. Flanş oluşturma operasyonlarında hem deformasyona uğratan serbest malzeme hacmi ile zımba ve kalıba uygun geometrik özelliklerin uyumlu olması gerekmektedir.

3. Flanş boyunu ve flanş et kalınlığı yanıtlarını en çok zımba koniklik boyu ( $L_p$ ), en az kalıp koniklik açısı ( $D_k$ ) etkilemektedir.

4. Şekillendirme kuvveti ile radyal kuvvet arasındaki  $F_x/F_z$  oranının en çok etkileyen faktör zımba koniklik boyu ( $L_p$ )'dir. Diğer faktörlerin etkisi göz ardı edilebilecek seviyededir.

5. Zımba-kalıp sisteminin malzeme ile etkileşimi dahilinde incelenen faktörlerde, şekillendirme kuvveti ile radyal kuvvet arasındaki  $F_x/F_z$  oranının flanş boyunu arttıran parametre setlerinde yüksek değerler almaktadır. Bu durum, malzemenin zımba üzerine sıvaması gibi proses hatalarına neden olabileceği değerlendirilmiştir.

6. Flanş et kalınlığı ve flanş boyunun birlikte en büyük değere ulaşması için en uygun parametreler  $L_p=3,5\text{mm}$ ,  $D_k=90^\circ$  ve  $D_h=2,75\text{mm}$  olduğu bulunmuştur. Bu değerler, M6 boyutundaki 4 tam civata dışın oluşturulmasına imkan sağlayacak flanşın hem flanş boyu hem de flanş et kalınlığının en büyük değerlere ulaşmasını sağlamaktadır.

## 5. Teşekkür

Çalışmada kullanılan MSC yazılımlarının lisanslarının sağlanmasındaki destekleri için BIAS Mühendislik, NETFORM Mühendislik firmalarına, çalışma sırasındaki analizlerin gerçekleştirilmesindeki destekleri için POSITIVE Dizayn Mühendislik ve Teknoloji Geliştirme firmasına teşekkür ederiz.

## Kaynakça

- Nepershin, R. I. (2011). Formation of a flange from a flat blank with a hole. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 40(2), 140-148.
- Jianping, W., Huanhuan, W., Shan, L., Anle, M., & Lijuan, F. (2010, June). Study of lip thickness calculation of hole-flanging process on mid-thick metal sheet. In 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (pp. 3032-3035). IEEE.
- Huang, Y. M., & Chien, K. H. (2001). Influence of the punch profile on the limitation of formability in the hole-flanging process. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), 720-724.
- Luo, J. C., Wang, X. Y., Guo, M. L., & Xia, J. C. (2011). Precision research in sheet metal flanging and upset

extruding. *Materials Research Innovations*, 15(sup1), s439-s442.

- Krichen, A., Kacem, A., & Hbaieb, M. (2011). Blank-holding effect on the hole-flanging process of sheet aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(4), 619-626.
- Thippakmas, S., & Phanitwong, W. (2012). Finite element analysis of flange-forming direction in the hole flanging process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(5), 609-620.
- Kacem, A., Krichen, A., & Manach, P. Y. (2011). Occurrence and effect of ironing in the hole-flanging process. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(10), 1606-1613.
- Masmoudi, N., Soussi, H., & Krichen, A. (2017). Determination of an adequate geometry of the flanged hole to perform formed threads. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1), 547-560.
- Lin, Q. Q., Dong, W. Z., Wang, Z. G., & Hirasawa, K. (2014). A new hole-flanging method for thick plate by upsetting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(7), 2387-2392.