

## Artımlı sac şekillendirme tekniği ile otomobil sac parça üretimi

### Automobile sheet metal part production with incremental sheet forming

İsmail DURGUN<sup>1\*</sup>, Ali SAKİN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tofaş Anonim Şirketi, Ar-Ge Bölümü, Bursa, Türkiye.  
ismail.durgun@tofas.com.tr, ali.sakin@tofas.com.tr

Geliş Tarihi/Received: 13.01.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 08.05.2015  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.37980  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Günümüzde küresel problemlerin etkisini hissedilir derecede arttırması, enerji verimliliği ve sürdürülebilir üretim yöntemlerine olan ilginin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu olumsuz şartların sonucu olarak, ulusal veya uluslararası proje platformları, üretici firmalar ileri üretim teknikleri kapsamında birçok çalışma yapmakta veya mevcut çalışmaların iyileştirilmesi konusunda çaba sarf etmektedirler. Bu çalışma da son zamanlarda yerini ileri üretim teknikleri kapsamında sürdürülebilir üretim yöntemi olarak bilinen Artımlı Sac Şekillendirme (ASS) metodu kullanılarak sac parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Uygulama olarak araç çamurluk sacı farklı takım yolları ve kalıp setleri kullanılarak, kalıplı, kalıpsız olarak şekillendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda operasyonda kullanılan yöntem ve parametreler birlikte ele alınarak değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Artımsal sac şekillendirme, Metal şekillendirme

#### Abstract

Nowadays, effect of global warming is increasing drastically so it leads to increased interest on energy efficiency and sustainable production methods. As a result of adverse conditions, national and international project platforms, OEMs (Original Equipment Manufacturers), SMEs (Small and Mid-size Manufacturers) perform many studies or improve existing methodologies in scope of advanced manufacturing techniques. In this study, advanced manufacturing and sustainable production method "Incremental Sheet Metal Forming (ISF)" was used for sheet metal forming process. A vehicle fender was manufactured with or without die by using different toolpath strategies and die sets. At the end of the study, Results have been investigated under the influence of method and parameters used.

**Keywords:** Template incremental sheet metal, Metal forming

## 1 Giriş

Literatürde prototip imalat ile ilgili önerilmiş birçok yöntem söz konusudur. Bunlar arasında, seri imalatta kullanılan kalıplara alternatif olarak farklı (daha ucuz, daha kolay üretilen ve geri dönüşümü daha az enerji ile gerçekleştirilebilecek olan) malzemelerle üretilen kalıplar [1]-[3] araştırılmakla birlikte, özellikle son on yılda giderek artan bir şekilde artımlı sac şekillendirme yöntemleri belirgin bir şekilde ön plana çıkmaya başlamıştır [4].

Artımlı sac şekillendirme (ASS) yöntemi, hassas bir şekilde kumanda edilebilen (tercihen bilgisayar kontrollü-CNC) bir dik/yatay işleme tezgâhına bağlanan sac malzemenin üzerine bir veya birkaç noktadan baskı uygulanarak ve uygulanan baskı noktası kontrolü olarak hareket ettirilerek saca şekil verme işlemi olarak tanımlanabilir [5]. İşlem, deformasyon şekli olarak sıvama yöntemine benzetilebilir; şu farkla ki, sıvama işleminde şekillendirilen malzeme hareketli iken (bir platforma bağlanmış döndürülürken), ASS yönteminde hareketsizdir (tablada üçüncü eksen hareketi verilen dik işleme tezgâhları için, tablaya bağlanan malzeme tablanın x-ekseni doğrultusunda tek yönlü hareket sahibidir) [6].

Malzeme deformasyonu artımlı ve lokal olarak yapıldığından dolayı süreçte meydana gelen kuvvetler, konvansiyonel kuvvetlere göre düşüktür [7]. ASS yöntemi ile form verme işleminde, sac sıvama (spinning) ve gerdirmeli form (stretch forming) verme tekniklerinin kombinasyonuna ilave olarak aksel simetrisi olmayan parçalara form verilebilmektedir [8]. Durante ve diğ. [9], AA7075T0 alüminyum plakalar üzerinde, koni ve piramit geometriler üzerinde farklı takım yapısı, çapı ve devir parametrelerinin etkisinde şekillendirilebilirlik, yüzey pürüzlülüğü ve takıma gelen yükleri incelemişlerdir. Sabit uçlu, takım dönmeden yapılan şekillendirme işleminde yüzey pürüzlülük değeri en yüksek seviyeye ulaşırken, teflon kaplı

yataklanmış serbest olarak dönebilen küre takım ise en düşük pürüzlülük değerini vermiştir. Takım çapı ve açılardaki artışın şekillenebilirliği azaltıcı yönde etkilediği, takım ile sac arasındaki temas şeklinin ise etkili olmadığını tespit etmişlerdir.

Hagan ve Jeswiet [10], araç reflektörünü; tek parça ve iki parça olarak üreterek test etmişlerdir. Reflektör üretiminde, 3D modelin direk olarak kullanılmasından farklı olarak, z doğrultusunda modele farklı ölçeklerde çekme vererek ara operasyonlar oluşturarak kademeli modelleme uygulaması yapmışlardır. Skjoedt ve diğ. [11] kap modellemesinde şekillendirme yönünü operasyon bazında aşağıdan yukarıya veya yukarıdan aşağıya olacak şekilde değiştirerek, kademeli olarak modelleme stratejisi geliştirmiş olup, aynı geometri için tek operasyona göre şekillenebilirlikteki artışı göstermişlerdir. Jurisevic ve diğ. [12] rijit takım kullanmak yerine su jeti, Okoye ve diğ. [13] ise elektromanyetik alan oluşturacak bir uç kullanarak artımlı şekillendirme yöntemi konusunda çalışmışlardır. Bazı çalışmalarda, şekillendirme, belirli bir matris yapı içinde istenilen form verilebilen bir seri şekillendirme ucu ile ve bir pres altında yapılmaktadır. Bu yöntemde değişken kalıplı şekillendirme adı verilir [14]. Değişken kalıplı şekillendirme tekniği, ASS yöntemi öncesinde şekillendirme bölgesine ön form vermek amacıyla da kullanılmaktadır. Değişken kalıpla ön form verme stratejisindeki asıl amaç şekillendirme bölgesinde eşit kalınlık dağılımının sağlanması ve ASS işlemi esnasında inceleme kaynaklı yırtılma problemlerinin önlenmesidir. Fan ve diğ. [15], TiAl 4V alaşımının, ısıtılarak artımlı şekillendirme yöntemi ile şekillendirmişlerdir.

Sac parçalar, işleme merkezinde oluşturulan takımıyolunun takım tarafından takibi ile şekillendirileceğinden konvansiyonel yöntemlere göre imalat daha uzun sürmekte ve bu açıdan yöntem prototip veya düşük adetli üretimler için

uygun bir yöntemdir. Kalıp üretiminin gerekmemesi, kalıp stoklamak için gerekli alandan tasarruf edilirken aynı zamanda imalat süresini kısaltarak ürün geliştirme sürecinde değişikliklerin hızlı ve maliyetsiz olarak uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu çalışma da belirli bir ölçekteki araç ön çamurluk sacının farklı teknikler kullanarak üretim denemeleri yapılarak sonuçlar irdelenmiştir.

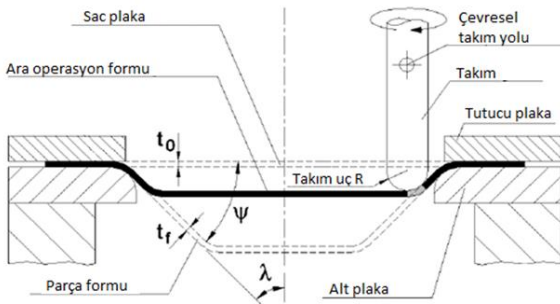
## 2 Artımsal şekillendirme yöntemi

Artımsal şekillendirme yöntemi, birçok farklı süreçte kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda malzeme deformasyonu lokal ve artımsal olarak yapıldığından, şekillendirme kuvvetleri konvansiyonel süreçlere göre oldukça küçüktür. Artımsal şekillendirme yönteminde işlem kullanılan malzeme (sac, titanyum, plastik...) takım (HSS & karbür rijit takım, su jeti...) ve temas durumunda (tek nokta kontak, iki nokta kontak...) bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

### 2.1 Artımsal şekillendirme-tek nokta kontak (Single point incremental forming-SPIF)

Artımsal sac şekillendirme sürecinde çeşitlilik unsurlarından biri, saca temas eden nokta sayısıdır. Tek takım kullanıldığında temas sayısı tek, karşı takım veya destek, alt kalıp kullanıldığında ise temas noktası iki olabilmektedir. Bu yöntemlerden ilki SPIF tek noktada kontak esasına dayanan, kalıp veya destek gerektirmeyen yöntemdir. Tek nokta ile form verme işlemi, sac sıvama (spinning) ve gerdirmeli form (stretch forming) verme tekniklerinin kombinasyonuna ilave olarak eksenel simetrisi olmayan parçalara da form verebilmektedir [16].

Düz sac, detayları Şekil 1'de gösterilen metal karkas üzerine, tutucu plaka ile sabitlenir. CNC dik işleme merkezi ya da frezede, küre uçlu takım kullanılarak form verme işlemi yapılır. SPIF yönteminde, sac altında destek ya da kalıp kullanılmadığından en az maliyetli ASŞ sürecidir.

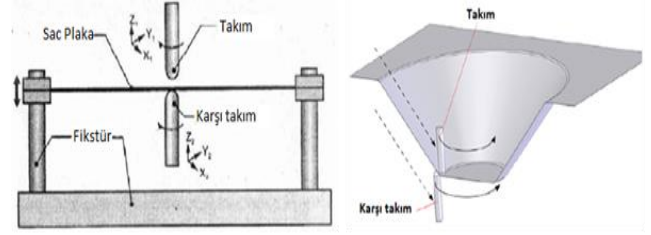


Şekil 1: SPIF-ekipman kesit görünüşü [16].

### 2.2 Karşı takım kullanarak sayısal kontrollü şekillendirme (Incremental forming with counter tool-IFWCT)

Bu yöntemde, tek nokta kontak yönteminden farklı olarak, alt plaka yerine, üstteki takım ile senkronize hareket eden karşı takım vardır (Şekil 2). Bu süreçte karşı takım, alt destek kalıbı ya da alt kalıp görevini yerine getirmektedir. Karşı takım, her parça için alt kalıp ya da destek gibi kullanılabilir olduğundan, esnek kalıp (flexible support) olarak da adlandırılır. Süreçte şekillendirme iki takımın hareketiyle sağlandığından dolayı, robot veya ikinci takımın hareketini simule edebilen çok eksenli işleme merkezleri kullanılır.

Karşı takım kullanarak şekillendirme yönteminde, sac tutucu plaka Şekil 2'deki gibi Z yönünde hareketli veya sabit konumda olabilir.



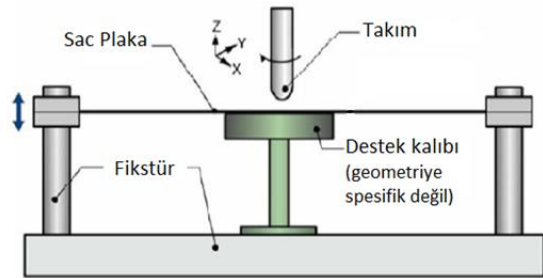
Şekil 2: IFWCT yöntemi ile şekil verme sürecinin şematik görünümü [17].

### 2.3 Artımsal şekillendirme-iki nokta kontak (Two point incremental forming)

İki nokta kontak ile şekillendirmede (TPIF) sac, Z eksenli yönünde dikey olarak hareket edebilen bir tutucu plaka ile sabitlenir. Tek nokta ile şekillendirme yöntemine benzer şekilde, takım dış konturdan başlar, geometrinin üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru hareket eder. İki nokta ile şekillendirme; alt destek kalıbı (partial die) ve alt kalıbı (full die) olmak üzere ikiye ayrılır.

#### 2.3.1 Alt destek kalıbı kullanarak (TPIF-partial die) artımsal şekillendirme

Tek nokta kontak ile şekillendirmede kullanılan alt plakanın (sacın çevre kesimini taşıyan plaka) görevini, bu yöntemde Şekil 3'te gösterildiği gibi sacın altında bulunan destek kalıbı üstlenir. Alt destek kalıbı olarak kullanılan geometri, üretilen parçaya spesifik olmaması durumunda, aynı destek kalıbından farklı parçaların üretiminde faydalanılabilir. Destek kalıbının kullanılmasındaki amaç, parça geometrisinin desteklenmesi ve dolayısıyla, tek nokta kontak (SPIF) yöntemine göre daha hassas geometri elde edilebilmesidir. Süreçte, takım, CAD dataya göre oluşturulan takım yollarını takip ederek, destek kalıp ile takım arasında sacın şekillendirilmesi sağlanır. Sac tutucu plaka, belirli bir katmanda form verme işlemi sona erdikten sonra, -Z yönünde hareket ederek, yeni katmanın şekillendirilme işlemine başlanır.

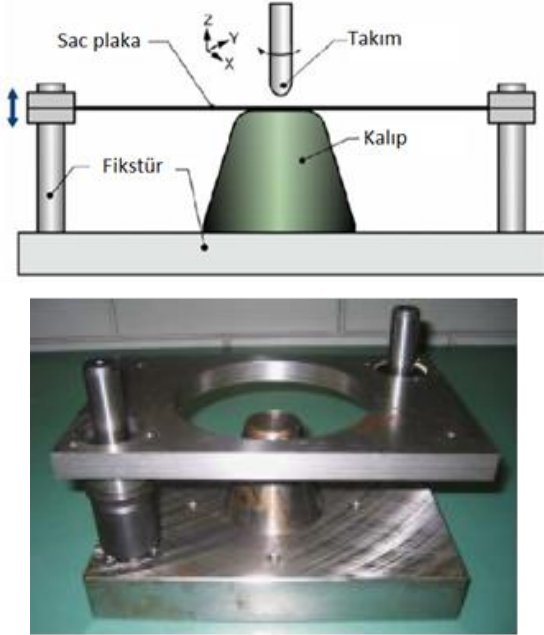


Şekil 3: TPIF (patial die) şematik gösterimi [18].

#### 2.3.2 Alt kalıp kullanarak (TPIF-Full die) artımsal şekillendirme

Bu yöntemde, alt destek yerine parça formuna göre işlenmiş kalıp kullanılmaktadır (Şekil 4). Yöntemde alt kalıp kullanıldığından dolayı, kalıpsız şekillendirme olarak nitelendirilmemesine rağmen prototip ve düşük adetli üretim açısından, kalıbın tek tarafına ihtiyaç duyulması nedeniyle

konvansiyonel yöntemlere göre maliyet ve zaman açısından avantaj sağlamaktadır. Form verme işleminde sac, kalıp ve takım arasında kaldığından dolayı, diğer yöntemlere göre geometri doğruluğu açısından daha hassastır.

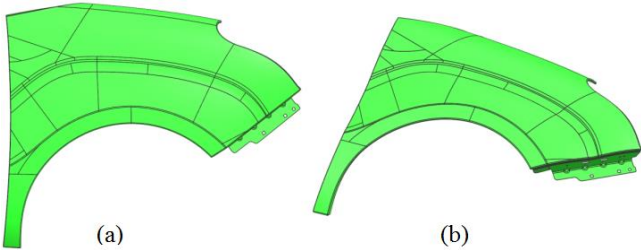


Şekil 4: TPIF (full die) [18].

Süreçte, parçaya özel alt kalıp kullanılması, kalıp malzemesi ve üretimi göz önüne alındığında konvansiyonel yöntemlerdeki kadar olmasa da ekstra maliyet oluşturmaktadır. İşçilik maliyetlerinde değişkenlik olmayacağından, kalıp maliyeti, seçilen kalıp malzemesine göre (çelik, alüminyum, plastik, ahşap ya da köpük) değişkenlik göstermektedir. Ayrıca üretim esnekliği, üretilen kalıbın sadece spesifik parça üretiminde kullanılmasından dolayı diğer yöntemlere (SPIF ve TPIF-partial die) göre düşüktür.

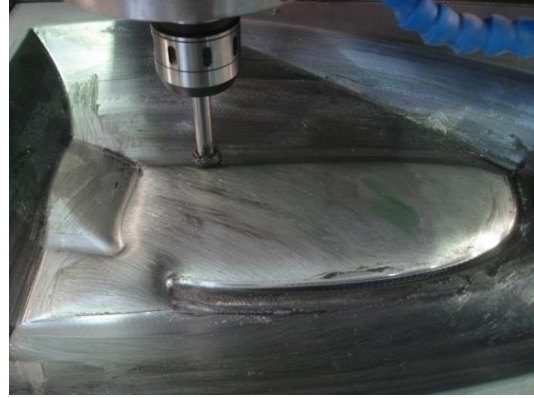
### 3 Deneysel konfigürasyonu ve ekipman

Çalışmada ASŞ yöntemi ile şekillendirme için araç ön çamurluğu seçilmiştir (Şekil 5). Mevcut CNC dik işleme merkezinde uygulama yapılabilmesi için çamurluk sacı 0.5 oranında ölçeklendirilerek tabla ebatlarına uygun hale getirilmiştir.



Şekil 5: Ön çamurluk. (a): Üst görünüş, (b): 3D görünüş.

Şekillendirme işlemi deneysel Şekil 6'da gösterilen Mazak VTC-300CII dik işleme merkezi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan işleme merkezinin işleme hacmi 1750 x 760 x 660 mm'dir.



Şekil 6: Artımlı şekillendirme operasyonunda kullanılan dik işleme merkezi.

Artımlı şekillendirme işleminde kullanılan  $\varnothing 15$  ve  $\varnothing 18$  mm HSS takımlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Takım çapı seçiminde parça minimum radyus değeri referans alınarak iç bükey formları şekillendirilecek doğrultuda seçim yapılmıştır.



Şekil 7: (a):  $\varnothing 15$ , (b):  $\varnothing 18$  HSS takımlar.

1 mm kalınlığında, DC04 soğuk haddelenmiş sac malzeme çamurluğun üretiminde kullanılmıştır. DC04 malzeme otomotiv parçaları, yapıların dış panelleri, ev aletleri, elektrik-elektronik eşyalar, mobilya, radyatör gibi çok geniş bir alanda kullanılan derin çekme sürecine uygun sünek bir malzemedir. Bu malzeme, iki fazlı veya üç fazlı çeliklerle karşılaştırıldığında şekillendirilebilirliği oldukça yüksektir. Çekme deneyi sonucunda elde edilen değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: DC04 1 mm çekme deneyi sonuçları.

Ölçüm	Değer
Akma Gerilmesi (MPa)	156.59
Kopma Gerilmesi (MPa)	296.53
Uzama (%)	41.53

Deneysel için kullanılan yöntem (erkek kalıp, dişi kalıp veya kalıpsız), takım yolu parametrelerini (ilerleme, devir, takım çapı...) içeren deneysel konfigürasyonu Tablo 2'de detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Tablo 2: Çamurluk üretimi için kullanılan deney konfigürasyonu.

Deney No	Yöntem	Takım Çapı (mm)	Takımyolu Stratejisi	$\Delta Z$ (mm)	f (mm/dk)	n (dev/dk)
1	TPIF-Dişi Kalıp	Ø18	Z Level profile optimized	0.3	10000	2000
2	SPIF	Ø15	Z Level profile optimized	0.5	36000	2000
3	SPIF	Ø15	Z Level profile optimized	0.5	15000	2000
4	SPIF	Ø18	Z Level profile	0.5	10000	2000
	SPIF	Ø18	Z Level profile optimized	0.5	20000	2000
5	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Contour Area - Follow Periphery	0.5	1000	2000
6	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Z Level profile optimized	0.5	5000	2000
7	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Z Level profile	0.15	5000	2000
	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Z Level profile optimized	0.3	5000	2000
8	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Z Level profile	0.3	5000	2000
	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Z Level profile optimized	0.3	5000	2000
9	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Cavity Milling Follow Periphery	1	15000	2000
	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Z Level profile	0.5	15000	1000
10	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Area Milling- Follow Periphery	0.05	10000	2000
11	TPIF-Dişi Kalıp	Ø15	Cavity Milling Follow Periphery	0.3	15000	2000
12	TPIF-Erkek Kalıp	Ø18	Z Level profile optimized	0.3	10000	2000

#### 4 Takım yolu stratejileri

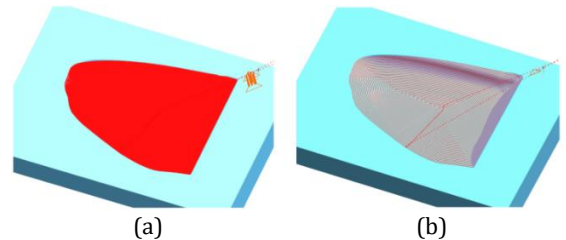
Takım yolunun oluşturulması aşamasında, takım yolu stratejisi (yöntem), işleme payı (stock), derinlik adımı ( $\Delta z$ ), devir, ilerleme, takım çapı ve tip bilgilerinin tanımlanması gerekmektedir. Takım yolu oluşturma stratejisi, free form yüzeylerin işlenmesi için CAM programlarında genel olarak kaba ve finish operasyonlar olmak üzere sınıflandırılır. Birçok programda benzer stratejiler farklı isim ve alt operasyon seçenekleri ile birlikte sunulmaktadır.

Bu çalışmada Unigraphics NX 7.5 sürümü CAM modülü kullanılarak takım yolları oluşturulmuştur. ASS yöntemi, açısından bakıldığında, takım kesme işlemi yapmadan lokal ve artımlı deformasyonlar oluşturarak şekillendirme yapması, programların konvansiyonel talaşlı imalat süreçlerine göre tasarlanmasından dolayı yöntemlerin farklı sıralamada uygulanması gerekmektedir.

##### 4.1 Kaba işleme (Cavity milling)

Kaba boşaltma ya da blok işleme olarak ta adlandırılmaktadır. İşlenecek blok, girilen yanal ve dikey adım parametrelerine göre aynı z seviyesinde parça ve blok geometrilerinin kesitlerinin alınması sonucunda arada kalan alanın taranması için hesaplanan programdır. Her z seviyesinde tüm alanların taranması ve dikey adım sonrasında aynı işlemlerin

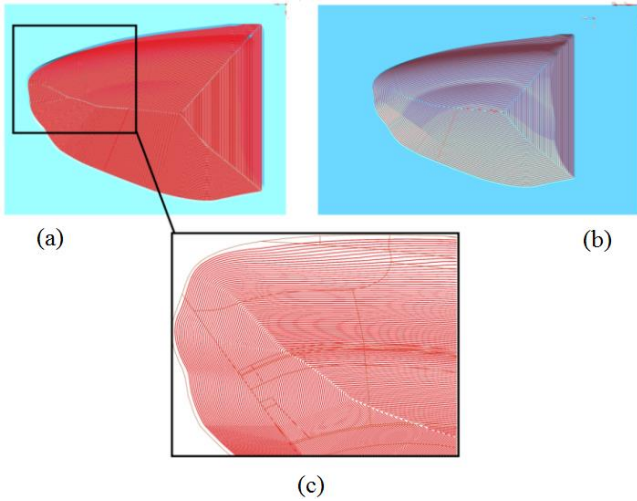
tekrarlamasından dolayı artımlı şekillendirme işlemi için süreç zamanını oldukça arttıran bir tekniktir. Ön çamurluk üretimi için oluşturulan cavity mill yöntemi ile elde edilen takım yolu Şekil 8(a)'da, z=0 (en üst) seviyesindeki takım yolu görüntüsü verilmiştir. Çalışma kapsamında cavity mill operasyonlarında yanal adım 0.5 mm olarak alınmıştır. Cavity mill operasyonunda bu takım yolları her z seviyesi için tekrarladığından dolayı Şekil 8(b)'de tek bir seviyeye ait takım yolları hesaplatılmıştır.



Şekil 8: Cavity mill yöntemi ile ön çamurluk işlemek için oluşturulan. (a): Takım yolu, (b): z=0 seviyesindeki takım yolu.

##### 4.2 Contour area-area milling

Yüzey finish işlemleri için kullanılan klasik yöntemlerden biridir. İşlenecek alan seçiminin ardından, işleme yöntemi seçilir ve parça yüzeyine göre takım yolu oluşturulur.



Şekil 9: Contour area. (a): Normal takım yolu, (b): Yanal adım mesafesi arttırılmış takım yolu, (c): Normal takım yolunun büyütülmüş görünüşü.

Contour area metodunda elde edilen takım yolu Şekil 9(a)'da verilmiştir. Takım yolunun daha iyi gösterilebilmesi amacı ile yanıl adım mesafesi arttırılarak Şekil 9(b)'de, tekrar verilmiştir. Çalışmada contour area metodunda yanıl adım, cavity milling yönteminde olduğu gibi 0.5 mm olarak seçilmiştir. Contour area metodunda parça üzerindeki takım yollarının geçişini, parça yüzey formunun süreklilik gösterdiği lokasyonlarda yapmasından dolayı ASŞ uygulamalarında geri esneme ve katlanma problemlerine sebep olmaktadır. Şekil 9(c)'de takım yolunun oluşturduğu, takımın o noktada köşeli olarak dönüş yaptığı diyagonal hattın, parça çizgileri ile örtüşmediği açıkça görülmektedir.

### 4.3 Z level profile

Yüzey finiş için kullanılan alternatif yöntemlerden biridir. Follow Periphery ile birlikte parçanın dış profiline en uygun konturları oluşturarak parçanın işlenmesi esasına dayanmaktadır. ASŞ yöntemi açısından değerlendirildiğinde, parça formunun dış profilinin parça geometrisine uygun olarak takım yolunun elde edilmesi ve dıştan içeriye doğru ilerleyerek parçanın şekillendirilmesi açısından en uygun yöntemdir.

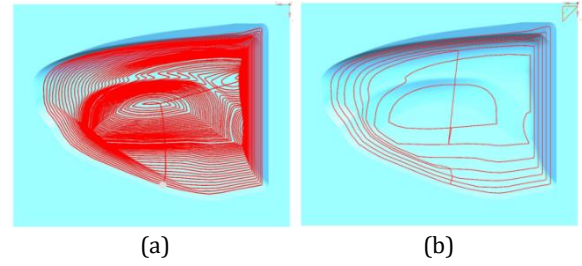
Z Level profile operasyonunda dikey adım sabit olarak girildiğinde, kullanıcı tarafından belirlenen değer tüm geometri boyunca aynı olacak şekilde uygulanarak takım yolu oluşturulur, dolayısıyla yatayla yapılan açı azaldıkça, takım yolları arasındaki mesafe artacaktır. Dikey adım belirlemede optimizasyon seçeneğinin kullanılması ile dik duvarlarda belirtilen maksimum dikey adım değeri hesaplanırken, daha az açılı duvarlarda takım yolu adımlarını sıklaştırarak, açıdan kaynaklanan boşlukları önlemektedir.

Z Level profile yönteminde sabit dikey adım ve optimized takım yolu arasındaki farkın daha net açıklanabilmesi için ön çamurluk için oluşturulan takım yolunda yanıl adım değeri 10 mm için Şekil 10(a)'da takım yolları yüzeyin açısına göre sıklık gösterirken, optimizasyon dışında aynı parametreleri kullanarak elde edilen takım yolu Şekil 10(b)'de verilmiştir.

## 5 Üretim metotları

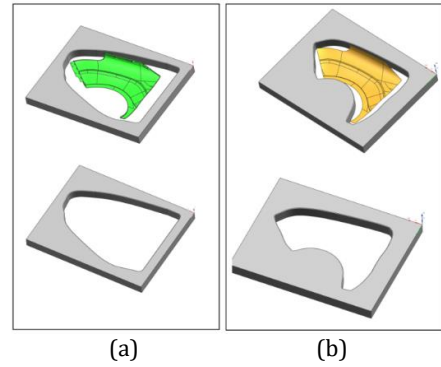
Ön çamurluk sacının 1/2 ölçekte ASŞ yöntemi ile üretimi Tablo 2'de verilen konfigürasyona göre yapılmıştır. Parça üretiminde temel olarak kalıpsız (SPIF), dişi kalıplı (TPIF) ve erkek kalıplı (TPIF) olmak üzere 3 farklı yöntem kullanılmıştır.

Bu yöntemlerden farklı olarak geometrinin farklı z seviyeleri şeklinde işlenmesi, birden fazla operasyon uygulamaları da gerçekleştirilmiştir.



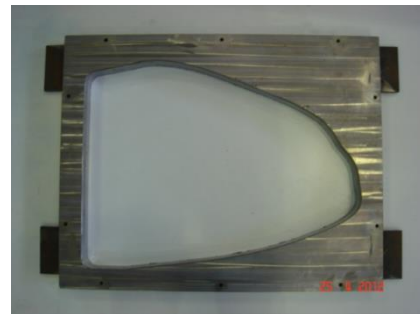
Şekil 10: Z Level profile. (a): Optimized, (b): Sabit dikey adım.

ASŞ yönteminde seçilen temel yöntemlere göre konstrüksiyon gereklilikleri de farklılık göstermektedir. Örnek olarak kalıpsız (SPIF) olarak şekillendirme işlemi için sadece parça profilini ve boşluğunu içeren bir alt plakanın modellenmesi ve imalatı yeterli olmaktadır. Ön çamurluk sacının imalatı için başlangıçta tekerlek bölgesinin formu değiştirilmeden alt plaka modellenerek imal edilmiştir (Şekil 11(b)). Yüzey geliştirme çalışmaları sonucunda daha az dik duvara sahip, ASŞ yöntemi ile üretim için daha uygun geometri Şekil 11(a)'da gösterilmiştir.



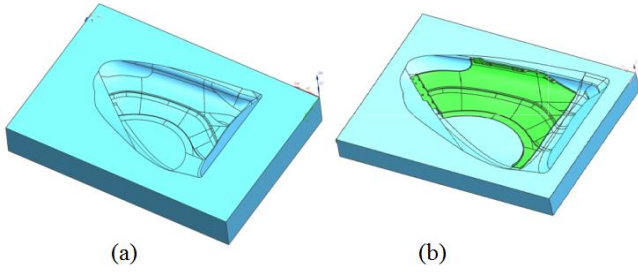
Şekil 11: Ön çamurluk sacı kalıpsız üretimi için kullanılan alt plakalar. (a): Tekerlek bölgesi geliştirme yüzeyine dâhil edilmiş, (b): Tekerlek bölgesi sabit.

Kalıpsız ASŞ (SPIF) yöntemi için imalatla kullanılan alt plaka Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12: ASŞ (SPIF) yönteminde kullanılan alt plaka.

ASŞ yönteminde iki noktadan temas esasına dayanan, kalıplı üretim teknikleri ikiye ayrılmaktadır. ASŞ yönteminde, alt plaka yerine ağaç, poliüretan veya metalden yapılmış bir dişi kalıp kullanılarak sac akışının iki nokta arasında daha kontrollü olarak yapılmaktadır. Ön çamurluk sacının imalatında kullanılan dişi kalıpların matematik modeli Şekil 13'te, kalıp ise Şekil 14'te verilmiştir.

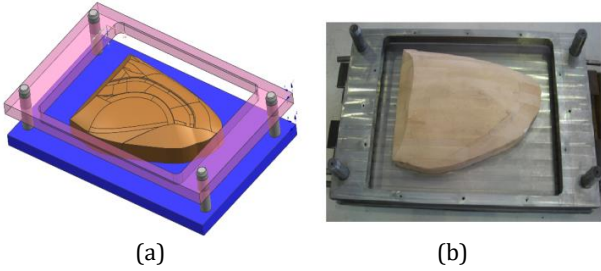


Şekil 13: ASŞ yönteminde kullanılan dişi kalıp. (a): Parçasız, (b): Kalıp ve parça.



Şekil 14: ASŞ yönteminde kullanılan dişi kalıp.

ASŞ yönteminde erkek kalıp kullanılması durumunda, diğer yöntemlerden farklı olarak erkek kalıp ve hareketli bir sac tutucu sistemi kullanılmaktadır. Sac kalıp ve takım arasında iki nokta temas esasına göre şekillenmektedir. ASŞ yöntemi ile üretim çalışmalarında kullanılan erkek kalıbın matematik modeli Şekil 15(a)'da, üretimi gerçekleştirilen ağaç kalıp ve hareketli tutucu sistemi Şekil 15(b)'de gösterilmiştir. Bu yöntemde takım ilk seviyede sacı şekillendirdikten sonra, tutucu plakanın kendi ağırlığından dolayı yerçekiminin etkisiyle aşağıya doğru hareket etmektedir.

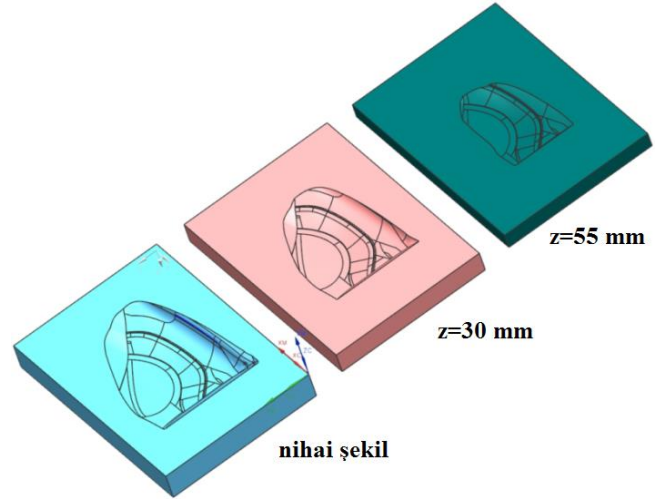


Şekil 15: ASŞ Yöntemi erkek kalıplı sistem. (a): 3D geometri, (b): Erkek kalıp ve hareketli tutucu plaka.

Şekillendirme için kullanılan konstrüksiyondan farklı olarak kademeli şekillendirme yöntemleri de uygulanabilmektedir. Kademeli şekillendirme için örnek olarak kalıpsız veya dişi kalıp kullanılan yöntemde, parça geometrisinin bir defa da tümünü şekillendirmek yerine belli z seviyelerinde ön form verme işlemi yapılarak, son operasyonda nihai şekil verme işlemi uygulanmaktadır. Çalışma kapsamında kademeli şekillendirme işlemi, dişi kalıp kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak Şekil 16'da, kademeli şekillendirme işlemi için kullanılan geometriler verilmiştir.

Kademeli şekillendirmede, dişi kalıp üzerindeki sac önce z=55 sonra 30 mm ile elde edilen Şekil 16'da gösterilen forma göre

şekillendirilir. Son olarak parça geometrisi kullanılarak nihai form verme aşaması tamamlanmış olur.



Şekil 16: Kademeli şekillendirme işleminde kullanılan geometriler.

## 6 Sac parça üretimi

Bu bölümde deneme üretimleri yapılan ve detayları Tablo 2'de verilen deneylerin sonuçları detaylı olarak görselleriyle birlikte sunulmuştur.

### 6.1 Deneysel 1

Dişi kalıp kullanılarak, Ø18 mm takım ile Z level optimized algoritması kullanılarak sac parça şekillendirilmiştir. Üretim sonucunda elde edilen parçanın işleme yüzeyi ve dış yüzeyi Şekil 17'de verilmiştir. Parçada yırtılma oluşmamış olup, orta bölgesinde takımın geçişleri esnasında geri esnemenin kaynaklanan lokal deformasyonlar meydana gelmiştir.



Şekil 17: Deneysel 1 üretim parçası.

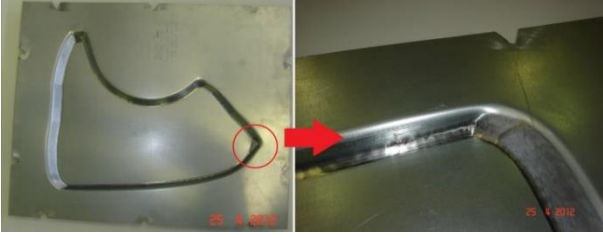
### 6.2 Deneysel 2

Kalıpsız olarak Ø15 mm takım kullanılarak Z level optimized algoritması kullanılarak parça üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Z=20.5 mm derinlikte yırtılma meydana geldiğinden üretime devam edilmemiştir. Kullanılan takım yolu stratejisinde, takım şekillendirme bölgesine yeterli malzemeyi yığamadığından dolayı inceleme ve yırtılma gerçekleşmektedir. Elde edilen geometri ve yırtılmanın detayları Şekil 18'de verilmiştir.

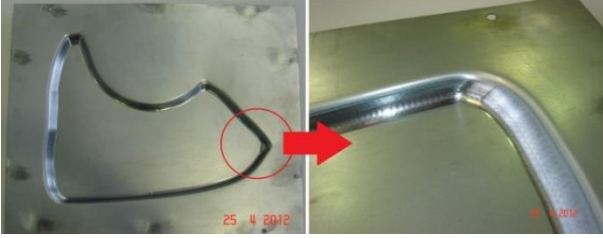
### 6.3 Deneysel 3

Deneysel 2'de olduğu gibi kalıpsız olarak Ø15 mm takım kullanılarak Z level optimized algoritması ile parça üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Deneysel 2'den farklı olarak ilerleme hızı 15000 mm/dk olarak yavaşlatılmıştır. Bu deneyde de Z=20.5 mm derinlikte yırtılma meydana geldiğinden (Şekil 19) üretim sonlandırılmıştır. Farklı ilerleme hızları Deneysel 2 ve

3'te uygulanmasına rağmen yırtılmanın meydana geldiği z yüksekliğinin değişmemesi, ilerleme hızının şekillendirilebilirlik üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir.



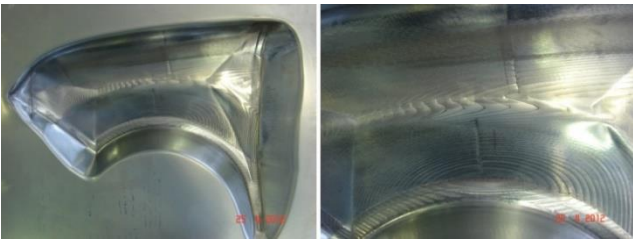
Şekil 18: Deney 2 üretim parçası.



Şekil 19: Deney 3 üretim parçası.

#### 6.4 Deney 4

Kalıpsız olarak  $\varnothing 18$  mm takım kullanılarak önce Z level ve ikinci operasyon olarak aynı algoritmanın daha geniş açılı duvarlarda daha sık takımı yolu oluşturmasını sağlayan Z level optimized algoritması ile tamamlanmıştır. Z level operasyonu ile ilk şekillendirme 10000 mm/dk ilerleme ile yapılırken, z level optimized algoritması için ilerleme 20000 mm/dk olarak girilmiştir. Bu çalışmada Deney 1'den farklı olarak çamurluk sacı tekerlek bölgesine form verilmesi üretim aşamasını daha zorlu kılmaktadır. Geometri Şekil 20'de gösterildiği üzere tamamen elde edilirken, parçanın üzerinde geri esneme kaynaklı izler oluşmuştur. Ayrıca parçanın işlem gören yüzünde takım yolu izleri oldukça belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 20: Deney 4 üretim parçası.

#### 6.5 Deney 5

Kalıplı olarak  $\varnothing 15$  mm takım kullanılarak Contour area follow periphery algoritması kullanılarak parça üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. İlerleme hızı 1000 mm/dk olarak diğer denemelere göre daha derin form verilmiştir. Follow periphery seçeneği, parça dış konturundan başlayarak, parça merkezine doğru çevresel sürekli konturlar oluşturarak şekillendirmeyi sağlamaktadır. Z=65 mm derinlikte parçanın ortasında meydana gelen potluk, şekillendirme esnasında takım kırma riski oluşturduğundan operasyon durdurulmuştur. Oluşan potluk ve köşelerde geri esnemenin kaynaklanan köşeler Şekil 21'de verilmiştir.



Şekil 21: Deney 5 üretim parçası.

#### 6.6 Deney 6

Kalıplı olarak  $\varnothing 15$  mm takım kullanılarak Z level optimized algoritması kullanılarak parça üretimi gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Deney 5'den farklı olarak algoritmanın dışında sadece ilerleme değeri 5000 mm/dk olarak girilmiştir. Z=60 mm derinlikte parçanın ortasında meydana gelen potluk, şekillendirme esnasında takım kırma riski oluşturduğundan operasyon durdurulmuştur. Deney 5 ve 6 kıyaslandığında Deney 5'te form verme işlemi 5 mm daha derin yapılabilirken Z level optimized algoritmasında ise geri esneme kaynaklı köşe ve katlanmaların önemli derecede ön plana çıktığı görülmektedir (Şekil 22).



Şekil 22: Deney 6 üretim parçası.

#### 6.7 Deney 7

Kalıplı olarak  $\varnothing 15$  mm takım kullanılarak Z level ve Z level optimized algoritmaları sırasıyla 0.15 ve 0.3 mm dikey adımlar için sac parça üretimi gerçekleştirilmektedir. Deney 4'den farklı olarak, sac malzeme düz plaka şeklinde iken parçanın son 55 mm derinlikteki form şekillendiriliyor ve devamında komple form Z level optimized algoritması ile baştan parçanın tamamı şekillendiriliyor. Parça geometrisi Şekil 23'te verilmiştir. Parçanın üzerinde detaylı olarak belirtilen kısım dışında lokal deformasyon meydana gelmemiştir.

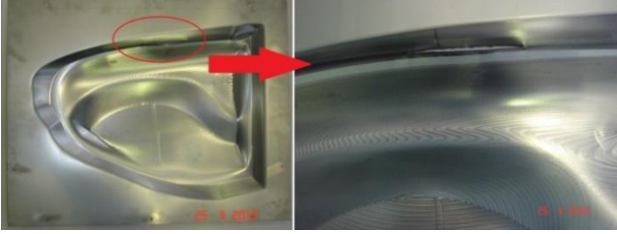


Şekil 23: Deney 7 üretim parçası.

#### 6.8 Deney 8

Kalıplı olarak  $\varnothing 15$  mm takım kullanılarak Z level ve Z level optimized algoritmaları 0.3 mm dikey adım için sac parça üretimi gerçekleştirilmektedir. Deney 7'den farklı olarak, dikey adım değeri ilk operasyonda 0.15 mm yerine 0.3 mm olarak ve ilk form verme derinliği ise 55 mm yerine 30 mm olarak ayarlanmıştır. Sac malzeme düz plaka şeklinde iken parçanın son 30 mm derinlikteki form şekillendiriliyor ve devamında

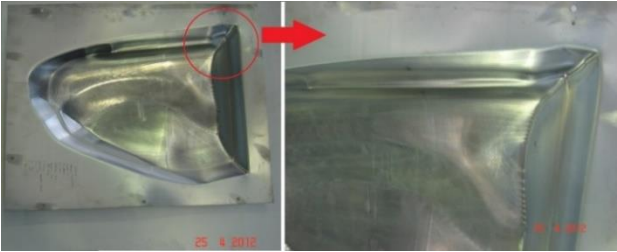
komple form Z level optimized algoritması uygulandığında ise Z=20 mm derinlikte yırtılma meydana geldiğinden operasyona devam edilmemiştir. Şekil 24'te önceden şekillendirilen z=30 mm derinlik ve yeni operasyon başlangıcı detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 24: Deney 8 üretim parçası.

### 6.9 Deney 9

Kalıplı olarak Ø15 mm takım kullanılarak Cavity milling follow periphery ve Z level algoritmaları kullanılarak sırasıyla 1 ve 0.5 mm dikey adım değerleri için sac parça üretimi gerçekleştirilmiştir. İki operasyonlu şekillendirme denemelerinden farklı olarak bu deneyde ilk operasyonda kaba boşaltma olarak tabir edilen Cavity milling algoritmasının follow periphery yöntemi (pattern) kullanılmış ve 3 mm işleme payı son operasyon için bırakılmıştır. İlk operasyonda takım yolları parçanın çevresinden başlayarak parça merkezine doğru oluşturulmaktadır. Z level operasyonunda z=30 mm'de yırtılma meydana geldiğinden operasyona devam edilmemiştir. Şekil 25'te Cavity milling follow periphery yöntemi ile 3 mm işleme payı şekillendirilen parça ve Z level operasyonu ile oluşturulan yeni kademe yırtılma seviyesine kadar gösterilmektedir.



Şekil 25: Deney 9 üretim parçası.

### 6.10 Deney 10

Kalıplı olarak Ø15 mm takım kullanılarak Area milling follow periphery algoritması kullanılarak 0.05 mm dikey adımlar kullanılarak, ilerleme 10000 mm/dk ve devir 2000 dev/dk takım yolu parametreleri ile parça şekillendirilmeye çalışılmıştır. Şekil 26'da görüldüğü üzere parçanın iki bölgesinde meydana gelen geri esneme kaynaklı potluk oluşmasından dolayı z=65 mm'de takımın kırılmasını önlemek için şekillendirme işlemi sonlandırılmıştır. Geri esneme kaynaklı takım ucunun lokal olarak plastik deformasyonu gerçekleştirmediği noktalarda potluk oluşmakta ve z derinliği arttıkça pot yüksekliği de artmaktadır.

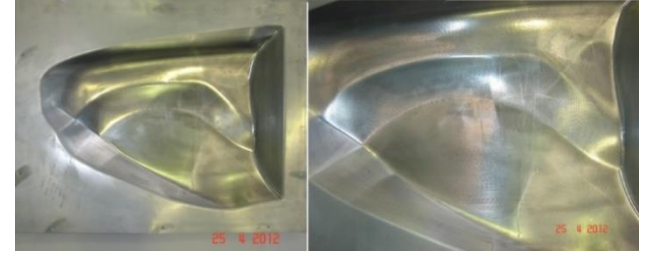
### 6.11 Deney 11

Kalıplı olarak Ø15 mm takım kullanılarak Cavity milling follow periphery algoritması kullanılarak 0.3 mm dikey adım, ilerleme 15000 mm/dk, devir 2000 dev/dk ve yatay adım 3 mm takım yolu parametreleri ile parça şekillendirilmeye çalışılmıştır. Şekil 27'de görüldüğü üzere parça dişi kalıp içinde

katlanma ya da geri esneme kaynaklı potluk deformasyonları olmadan başarılı bir şekilde üretilmiştir.



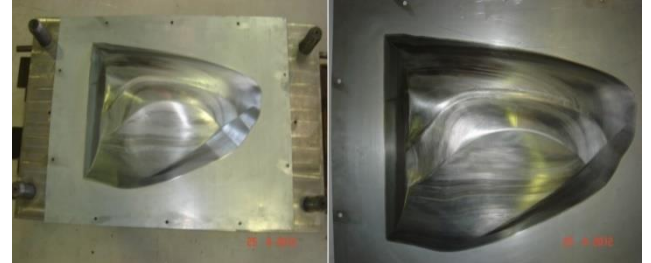
Şekil 26: Deney 10 üretim parçası.



Şekil 27: Deney 11 üretim parçası.

### 6.12 Deney 12

Erkek kalıp sistemi ve Ø18 mm takım kullanılarak Z level optimized algoritması kullanılarak 0.3 mm dikey adım kullanılarak, ilerleme 10000 mm/dk, devir 2000 dev/dk takım yolu parametreleri ile parça şekillendirilmeye çalışılmıştır. Sac tutucu plaka erkek kalıp üzerinde kolonlar aracılığı ile askıda dururken, erkek kalıp üzerinde her şekillendirme adımında sac tutucu plaka erkek kalıp üzerinde z yönünde aşağıya doğru hareket etmektedir. Uygulanan bu yöntemde metal sac tutucu plaka ağırlığından dolayı sac erkek kalıp üzerinde aşağıya doğru hareketi sağlanmıştır. Şekil 28'de erkek kalıp kullanılarak başarı ile şekillendirilen sac parça gösterilmiştir.



Şekil 28: Deney 12 üretim parçası.

## 7 Sonuçlar

Çalışmada kalıpsız, erkek ve dişi kalıplı olmak üzere farklı teknikler ve farklı takım yolu parametreleri denenerek araç ön çamurluk sacının 1/2 ölçekli geometrisinin üretilmesi amaçlanmıştır. Kalıpsız şekillendirme deneylerinde (Deney 2-4), iki operasyon; Z level ve Z level optimized algoritmalarının kullanılması sonucunda (Deney 4) parça başarılı bir şekilde üretilebilmiştir. Şekillendirme esnasında takımın saca tek noktadan teması geri esnemeyi arttırırken, sac yüzeyinde takım kaynaklı izlerin yoğunlaşması ve parça üzerinde katlanmalara neden olmuştur. Diğer tek adımlı algoritmalar ile şekillendirme işleminde başarılı sonuçlar elde edilememiştir.

Kalıplı şekillendirme denemelerinde ağırlıklı olarak dişi kalıp ile form verme işlemi çalışılmıştır (Deney 1.5-11). Kalıplı şekillendirme de sac akışı iki nokta arasında



gerçekleştirildiğinden, kalıpsız şekillendirmeye göre daha stabil ve uygun geometri elde edilebilir. Dişi kalıpla yapılan denemelerde Deney 7 ve Deney 11 başarılı bir şekilde sacın şekillendirilebilmesi sağlanabilmiştir. Deney 7’de kalıpsız şekillendirme de olduğu gibi Z level ve Z level optimized algoritmaları ile iki kademeli uygulanması sonucunda geometri elde edilmiştir. Üretim sonucunda sac üzerinde lokal bölgelerde geri esneme kaynaklı katlanma problemleri tespit edilmiştir.

Deney 11’de ise Cavity milling follow periphery algoritması kullanarak yapılan çalışma da oldukça düzgün takım izlerinin az olduğu, dişi kalıpla yapılan en iyi seviyede geometri elde edilmiştir. Bu algoritma tek adımlı olmasına karşın, her z seviyesini alan olarak taradığından z seviyesinde malzeme kalınlığı çok fazla incelmeden form verme işlemi tamamlanabilmektedir. Algoritma kaba boşaltma algoritması olarak ta bilinmektedir. Diğer Z level algoritmalarına göre işlem zamanı çok daha uzun sürmektedir.

Deney 12’de ise erkek kalıp sistemi ile parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu sistem de sac tutucu plaka üzerine sabitlenir ve erkek kalıp üzerinde kolonlarla merkezlenir. Sac her z seviyesi şekillendirildiğinde tutucu plaka ağırlığından dolayı aşağı yönde hareket etmektedir. Z level optimized algoritması tek adımlı olarak uygulanmış olup sonuç başarılı olmuştur ve yine bu yöntemle elde edilen en iyi seviye geometridir. Tutucu plakanın ağırlığından dolayı sacı erkek kalıp üzerinde sürekli gerilmiş olması şekillendirme esasında geri esneme kaynaklı geometrik bozuklukların önlenmesinde oldukça etkili olmuştur.

Yapılan çalışma sonucunda kalıpsız şekillendirme çalışmasının geliştirilmesi, daha az geri esneme sağlanması dolayısıyla katlanma ve oluşan lokal deformasyonların giderilmesinde faydalı olacaktır. Dişi kalıpla yapılan çalışmada z seviyesini komple tarayarak diğer z seviyesine geçen ve kaba boşaltma olarak tabir edilen cavity millin algoritması parçanın başarılı bir şekilde şekillendirilmesine olanak sağlamıştır. Bunun nedeni ise komple z seviyesinde malzemenin taranması ve diğer z seviyesine kalınlık dağılımı uniform malzemenin transfer edilmesidir.

Erkek kalıp ile yapılan çalışmada ise sacın sürekli olarak gergin olması, her z seviyesinden sonra sac tutucu plakanın ağırlığı ile aşağı yönde hareketi sayesinde parça başarı bir şekilde üretilmiştir. Elde edilen geometri oldukça iyi seviyededir. Dişi kalıpla şekillendirme ile karşılaştırıldığında ise, z level algoritmasının bu yöntem için kullanılması üretim süreleri açısından önemli derecede avantaj sağlamaktadır. Erkek kalıp ile şekillendirme yöntemi z level algoritmasının kullanımı için oldukça uygun bir mekanizma sunmaktadır. Ayrıca kalıp hareketinin z yönündeki kontrolünü CNC dik işleme merkezi ile entegre edilerek daha hassas bir yapı elde edilebilir. AŞŞ yöntemi, farklı teknik ve takımıyolu parametreleri kullanarak sac parça üretimi için ileri üretim teknikleri kapsamında geliştirmeye açık, sürdürülebilir üretim yöntemleri açısından gelecek vaat eden teknikler arasında yer alacaktır.

## 8 Kaynaklar

- [1] Kleiner M, Curbach M, Tekkaya AE, Ritter R, Speck K, Trompeter M. "Development of Ultra High Performance Concrete Dies for Sheet Metal Hydroforming". *Production Engineering Research and Development*, 2, 201-208, 2008.
- [2] Sladojevic J, Müller H. "Rapid Tooling Approaches for Small Lot Production of Sheet-Metal Parts". *Journal of Materials Processing Technology*, 115(1), 97-103, 2001.
- [3] Bate PS, Shaw GR, Hancock MA, Jones S, Barrett D, McDonagh, VN, Ponton CB. "Superplastic Forming with Ceramic Lost-Wax Dies". *Journal of Materials Processing Technology*, 47(3-4), 361-373, 1995.
- [4] Emmens WC, Sebastiani G, van den Boogaard AH. "The Technology of Incremental Sheet Forming-a Brief Review of the History". *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 981-997, 2010.
- [5] Lamminen L, Wadman B, Küttner R, Svinning T. "Prototyping and Low Volume Production of Sheet Metal Components". Nordic Industrial Fund, Norway, Research Report, 03028, 2004.
- [6] Dai K, Wang ZR, Fang Y. "CNC Incremental Sheet Forming of an Axially Symmetric Specimen and the Locus of Optimization". *Journal of Materials Processing Technology*, 102, 164-167, 2000.
- [7] Sakin A, Durgun İ. "Sac Parça Üretiminde Sayısal Kontrollü Şekillendirme Yönteminin İncelenmesi". *Mühendis ve Makine Dergisi*, 52(615), 62-68, 2011.
- [8] Câmara J. Single Point Incremental Forming. MSc. Thesis, Technical University of Lisbon, Lisbon, Spain, 2009.
- [9] Durante M, Formisano A, Langella A. "Observations on the Influence of Tool-Sheet Contact Conditions on an Incremental Forming Process". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(6), 941-946, 2011.
- [10] Hagan E, Jeswiet J. "A Review of Conventional and Modern Single-Point Sheet Metal Forming Methods". *Journal of Engineering Manufacture*, 217(2), 213-225, 2003.
- [11] Skjoedt M, Bay N, Endelt B, Ingarao G. "Multi Stage Strategies for Single point Incremental Forming of a Cup". *Journal of Material Forming*, 1(1), 1199-1202, 2008.
- [12] Jurisevic B, Kuzman K, Junkar M. "Water Jetting Technology: an Alternative in Incremental Sheet Metal Forming". *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31, 18-23, 2006.
- [13] Okoye CN, Jiang JH, Hu ZD. "Application of Electromagnetic-Assisted Stamping (EMAS) Technique in Incremental Sheet Metal Forming". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46(11), 1248-1252, 2006.
- [14] Li MZ, Cai ZY, Sui Z, Yan QG. "Multi-Point Forming Technology for Sheet Metal". *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1-3), 333-338, 2002.
- [15] Fan G, Sun F, Meng X, Gao L, Tong G. "Electric Hot Incremental Forming of Ti-Al-4V Titanium Sheet". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49, 941-947, 2010.
- [16] Franzen V, Kwiatkowski L, Neves J, Martins PAF, Tekkaya AE. "On the Capability of Single Point Incremental Forming for Manufacturing Polymer Sheet Parts". *ICTP2008, 9th International Conference on Theory of Plasticity*, Gyeongju, Korea, 7-11 September 2008.
- [17] Tizsa M, Panity I, Kovács PZ. "Experimental and Numerical Study of a Milling Machine-Based Dieless Incremental Sheet Forming". *Journal of Material Forming*, 3(1), 971-974, 2010.
- [18] Shankar R, Jadhav S, Goebel R, Homberg W, Kleiner M. "Incremental Sheet Metal Forming of Preformed Sheets". *Proceedings of the 8th International Conference on Technology of Plasticity*, Verona, Italy, 9-13 October 2005.