

ÇOK NOKTALI SAC ŞEKLİLENDİRMEDE KALIP TASARIMI VE PROTOTİP ÜRETİMİ

Ümit Yalçın¹, İsmail Durgun², Abdil Kuş³, Necmettin Kaya⁴

¹Balıkesir Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Makine Programı, Balıkesir

²TOFAŞ Arge, Bursa

³Uludağ Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine Programı, Bursa

⁴Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa

Corresponding Author: necmi@uludag.edu.tr

ÖZET

Çok noktalı sac şekillendirme tekniği, metal sac parçaların şekillendirilmesi için geliştirilmiş esnek bir şekillendirme yöntemidir. Bu yöntem sayesinde farklı formlardaki sac metaller tek bir kalıp sisteminde şekillendirilebilmektedir. Bu yöntem ile havacılık, uzay, gemi ve otomotiv endüstrilerinde yüzey panellerinin şekillendirilmesi söz konusudur. Çok noktalı şekillendirmede geleneksel kalıpların yerini alt ve üst olmak üzere bir çift pim matrisi alır. Bu pimlerin bağlı pozisyonu hedeflenen forma göre düzenlenebilmektedir. Her bir pimin eksenel yöndeki bağımsız hareketi ile pim matrisi çok noktalı kalıba dönüşür. Bu bildiride, çok noktalı formlama kalıp sisteminde formlama yüzeyini belirleyen pimlerin düşey yüksekliklerinin elle pozisyonlanması yerine bir CNC tezgah tarafından otomatik olarak konumlandırılması sağlayan bir sistemin tasarımı ve prototip üretimi açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sac şekillendirme, Çok noktalı formlama

DIE DESIGN AND PROTOTYPE PRUDUCTION OF MULTI-POINT SHEET METAL FORMING

ABSTRACT

Multi-point sheet metal forming technique is a flexible forming method developed for forming sheet metal parts. Sheet metals in different shapes can be formed in a single die system. With this method, surface panels can be formed in aviation, space, ship and automotive industries. Instead of traditional dies, two pin matrices are used in multi-point forming. The relative position of these pins can be adjusted to the targeted form. With the independent movement of each pin in the axial direction, the pin matrix turns into a multi-point forming die. This article describes the design and prototype production of a CNC machine tool that allows automatic positioning of the vertical heights of the pins defining the forming surface in a multi-point forming die system, rather than manual positioning of the pins.

Keywords: sheet metal forming, multi-point forming

1. GİRİŞ

Çok noktalı formlama (MPF) tekniği, metal sac parçaların şekillendirilmesi için geliştirilmiş esnek bir şekillendirme yöntemidir. Bu yöntem ile farklı formlardaki sac metallerin tek bir kalıp sistemi kullanılarak şekillendirilmesi mümkün olmaktadır. Havacılık, uzay, gemi ve otomotiv endüstrileri gibi modern endüstrilerde yüzey panellerinin şekillendirilmesi önemli rol oynamaktadır. Çok noktalı şekillendirmede geleneksel kalıplar yerine pimlerden oluşan ve pimlerin bir yüzey formu oluşturduğu alt ve üst pim matrisleri kullanılır. Bu pimlerin eksenel yönde bağlı pozisyonları ayarlanarak şekillendirilecek yüzey geometrisi oluşturulur. Şekillendirilecek yüzeyin formunu oluşturacak olan pimlerin temas yüzeyleri küresel olduğu için temas noktasal olmaktadır. Bu nedenle bu yönteme çok noktalı kalıp adı verilmiştir. Bu

yöntem ile ilgili şekillendirilecek sac parçaların yüzey geometrileri derin çekme yöntemi ile şekillendirilen parçalara göre daha basit yapıdadır. Şekil 1’de örnek çok noktalı kalıp görülmektedir.



Şekil 1. Çok noktalı kalıp örneği

Bu çok noktalı kalıp sayesinde, kalıp değiştirilmeden sadece pim yükseklikleri ayarlanarak farklı şekillerdeki üç boyutlu sac metal parçaların şekillendirilmesi yapılabilmektedir. Form verilecek parça büyüklüğüne göre pimlerin sayısı değişmektedir. Klasik üretim tekniğinde bu pimlerin yükseklikleri manuel olarak ayarlanmakta ve bu süreç günler alabilmektedir. Ayrıca manuel olarak ayarlanan yükseklikler istenen konum toleranslarının dışında olabilmektedir. Pimlerin yüksekliklerinin ayarlanması için pimlerin gövdesine vida açılmakta ve pimler kalıp içinde eksenel yönde hareket etmektedir. Pim uçları genellikle küresel formda olup kalıp içinde pimlerin küresel uçlarının birbirleri ile temas etmesi söz konusudur. İstenilen yüzey formu için pim yüksekliklerinin ayarlanması sırasında her bir pim anahtar yardımıyla çevrilmekte ve istenilen yüksekliğe getirilmektedir. Bu süreçte temas nedeniyle sürtünme etkisinden dolayı bu işlemin elle yapılması operatörü yorabilmektedir. Bu çalışmada tüm bu olumsuzlukları giderecek yapıda yeni bir kalıp sistemi ve CNC tezgâhı geliştirilerek pimlerin ayarlanması otomatik hale getirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, çok noktalı formlama kalıp sisteminde formlama yüzeyini belirleyen pimlerin düşey yüksekliklerinin elle pozisyonlanması yerine otomatik olarak belirleyen bir sistemin tasarımı ve prototip üretimidir. Yapılan çalışmada pim yerleşim düzeni belirlenmiş, her bir pimin yüksekliğinin form verilmek istenen sac parça yüzeyine değecek şekilde CAD yazılımı içinde düşey mesafesini hesaplayan bir algoritma ve yazılım geliştirilmiş, bu yükseklikleri otomatik olarak ayarlayabilecek ve pimleri konumlandırabilecek bir mekanizma ve otomasyon sistemi tasarlanmış, sistemin prototipinin yapılmış ve çalışması test edilmiştir. Kalıp ile örnek parça basım işlemleri devam etmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çok noktalı formlama ile ilgili literatürde birçok yayın mevcuttur. Çalışmaların çoğu formlama işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ve proseste oluşan yüzey izleri ve geri esneme miktarının belirlenmesi ile ilgilidir. Ayrıca ele alınan örnek parçalar düzleme çok yakın, kıvrımları az ve basit yüzeylerden oluşmaktadır. Çok noktalı formlama işleminde, bu bildirinin konusunu teşkil eden pimlerin kalıp üzerinde otomatik konumlandırılması ile ilgili donanım ve otomasyon konusunda yayına rastlanmamıştır. Literatürde yapılan çalışmaların öne çıkan özellikleri şu şekilde gruplanabilir:

1. Yüzey formu üçgen sonlu elemanlar ile tanımlanmış [Cai ve Li, (2006), Zhongyi ve Mingzhe, (2001)],
2. Form verilen yüzeydeki geri yaylanma sonlu elemanlar yöntemi ile çalışılmış, yüzey ile pimler arasında kauçuk tabaka kullanılmış [Davoodi ve Zareh-Desari, (2014), Quan ve ark., (2011), Liua ve ark., (2012), Kadhim ve Abbas, (2013)],
3. Sonlu elemanlar yöntemi ile çok noktalı formlama incelenmiş [Liyong ve Le, (2010), Cai ve Li, (2005), Păunoiu ve ark., (2011), Caia ve ark., (2009)],
4. Sonlu elemanlar yöntemi ile düzleme yakın örnek parçaların şekillendirme analizleri yapılmış, form izleri oluşumu ve geri yaylanma özellikleri incelenmiş [Chunguo ve ark., (2010), Fuxing ve ark., (2009), Quan ve ark., (2011), Cai ve ark., (2008), Li ve ark., (2010), Paunoiu ve ark., (2009), Hwang ve ark., (2010)],
5. Çok noktalı formlama yöntemi ve problemleri genel olarak incelenmiş [Durgun ve Doruk, (2014), Li ve ark., (1999), Li ve ark., (2002)],
6. Yüzey formu CAD ortamında polinomlar ile ifade edilmiştir. [Hwang ve ark., (2011)],

7. Sac üzerinde kırışıklığın önlenmesi için pot çemberi kullanımının gerekliliği tartışılmıştır [Zhang ve ark., (2007), Liu ve ark., (2008)].

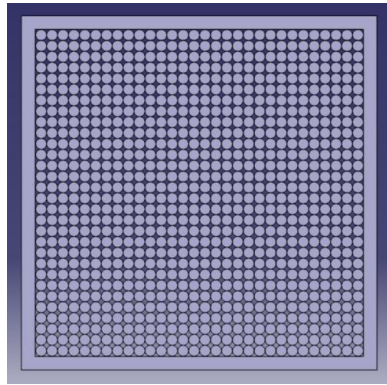
Şekillendirilen sac yüzeyine pimlerin eksenleri doğrultusunda hareket ederek temas edecek şekilde gerekli öteleme mesafesini hesaplayan algoritmalar ise literatürde şu şekilde yer almıştır:

1. Sac parça yüzeyinin üçgen ve/veya dikdörtgen sonlu elemanlar ile tanımlanması ve teğet sınır şartlarının kullanılması ile denklemlerin çözümü [Cai ve Li, (2006), Zhongyi ve Mingzhe, (2001)],
2. Küresel yüzey gibi basit sac parça yüzeyinin parametrik yüzey tanımı yapıp doğrusal olmayan denklemlerin çözülmesi [Liyong, W., Le, (2010), Păunoiu ve ark., (2011), Hwang ve ark. (2010)],
3. Sac parça yüzeyinin Bezier yüzey tanımı ile tanımlanması [Kadhim ve Abbas, (2013)].

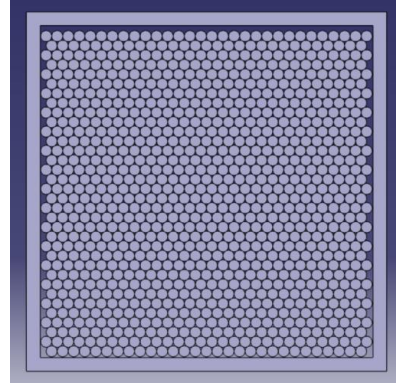
Bu çalışmada, literatürden farklı olarak CAD ortamında her bir pimin yüzeye otomatik olarak teğetlik sınırlaması ile temas ettirilmesi sonucu hesaplanan mesafelerin bir text dosyasına standart bir formatta her bir pimin koordinatı (x,y) ve hareket etmesi gereken z mesafesi yazdırılarak dosyanın tezgahın kontrol ünitesine yüklenmesi şeklinde bir yol izlenmiştir.

3. PİM YERLEŞİM DÜZENİ

Klasik sac kalıpcılığında sac parça iki kalıbın tüm yüzeyleri ile temas ederken, çok noktalı kalıp ile sac şekillendirmede ise sac parça pim yüzeyleri ile temas ederek şekil almaktadır. Bu nedenle sabit bir kalıp alanı içinde pim sayısının maksimum tutulması, sac şekillendirmede istenilen yüzey formunun yakalanması için önemlidir. Bu amaçla matris formunda ve hegzagonal formda iki yerleşim düzeni belirlenerek birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Örnek bir kalıp alanı için her iki pim yerleşim düzeni Şekil 2’de verilmiştir.



a) Matris formu



b) Hegzagonal form

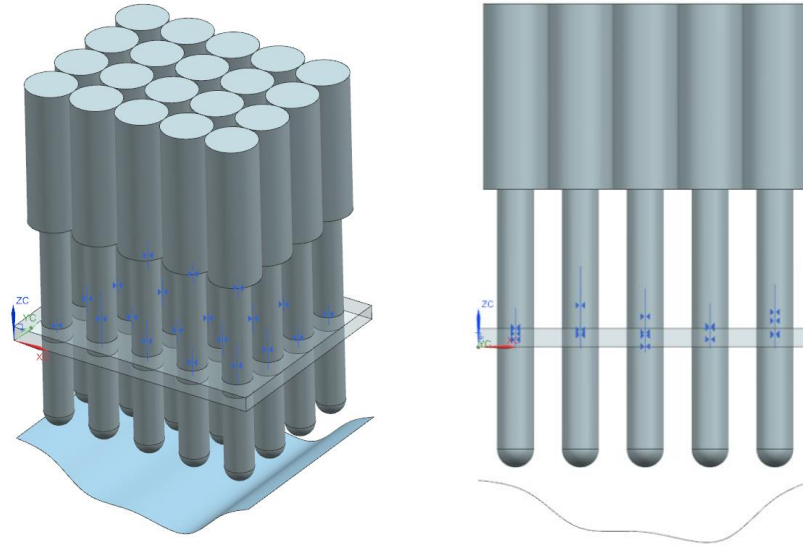
Şekil 2. Pim yerleşim düzenleri

Şekil 2.a’da yer alan yerleşim düzeninde pimler matris formunda satır ve sütun şeklinde yerleştirilmiş ve toplam 900 pim kullanılmıştır. Bu yerleşim planı için boşluk oranı %21.5 olarak bulunmuştur. Şekil 2.b’deki yerleşim planı ise hegzagonal yerleşimdir. Aynı kalıp alanına altıgen formunda yerleştirilen pim sayısı 1003 olup, boşluk oranı %12.5 olarak bulunmuştur. Birim alanda daha fazla pim yerleştirilen form hegzagonal form olduğundan kalıplar bu yerleşim planına göre tasarlanmıştır.

4. PİM EKSENEL HAREKET MİKTARLARININ HESAPLANMASI

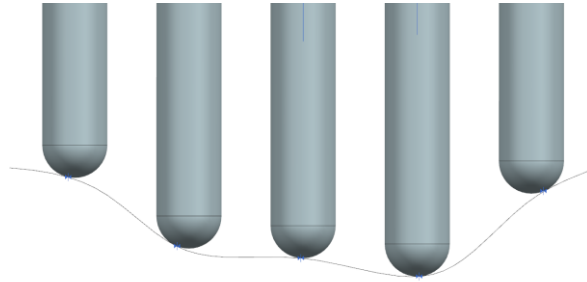
Kalıp içinde hegzagonal formda yerleştirilen pimlerin sac parçanın formunu oluşturması için istenilen yüzey formunda eksenel yönde ilerletilmesi gerekmektedir. Geliştirilen CNC tezgahın her bir pimi eksenel yönde ilerletmesi için pimin diğer ucunda yer alan allen başlı civatayı döndürmesi gerekecektir. Bu amaçla her bir pimin, şekillendirilecek olan yüzeye olan mesafesinin hesaplanması için CAD ortamında bir algoritma geliştirilmiştir. Siemens NX yazılımı içinde Visual

Basic programlama dili kullanılarak kod yazılmış ve her pimin x,y ve yüzeye olan z mesafesi hesaplanmış ve bir text dosyasına yazdırılmıştır. Şekil 3'te algoritma geliştirme aşamasında kullanılan örnek kalıp modeli görülmektedir.



Şekil 3. Pimlerin şekillendirilecek yüzeye olan mesafeleri

Şekil 3'te verilen resimlerde pimler ve şekillendirilecek yüzey geometrisi görülmektedir. Her bir pim, yüzeye teğet olarak temas edecek şekilde z yönünde kaydırılmakta ve bu mesafe bir text dosyasına yazdırılmaktadır. Pimlerin yüzey formunu aldığı durum şekil 4'te görülmektedir.

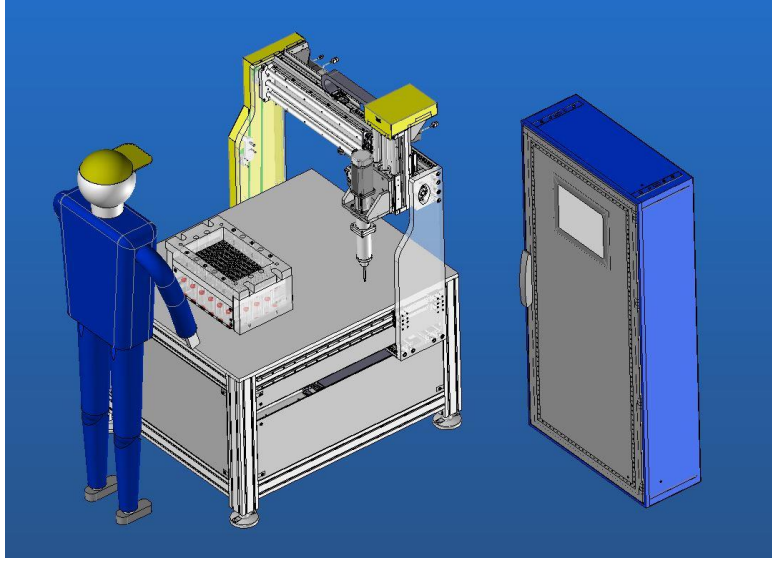


Şekil 4. Geliştirilen algoritmanın çalışması sonucunda ötelenmiş pimler

Her bir pimin x,y ve z koordinatlarının yazdırıldığı text dosyası prototip üretimi yapılan tezgahın bilgisayarına yüklenerek pimlerin konumlandırılması yapılmıştır.

5. ÇOK NOKTALI FORMLAMA SİSTEMİ TASARIMI

Kalıp içine yerleştirilen pimlerin yüzey formunu oluşturacak şekilde döndürülerek aksel yönünde hareket etmesi için bir CNC tezgâh tasarlanmıştır. Tezgâh üzerinde bulunan sıkma kafası, text dosyasında yer alan pim x,y koordinatlarına gitmekte ve z ekseninde ilerlemesi için pimi döndürerek ilgili mesafeye ulaşmasını sağlamaktadır. Hedeflenen fonksiyonlara sahip olacak şekilde CAD ortamında tezgah tasarlanmış ve CAD modeli Şekil 5'te verilmiştir. Tezgâhta 3 eksende doğrusal hareket ve 1 eksende dönme hareketi mevcuttur. Kalıp tezgâh tablasında bulunan yere yerleştirilmekte ve tezgâhın sıkma kafası kalıp içinde bulunan pimleri döndürerek istenilen mesafeye konumlandırmaktadır.

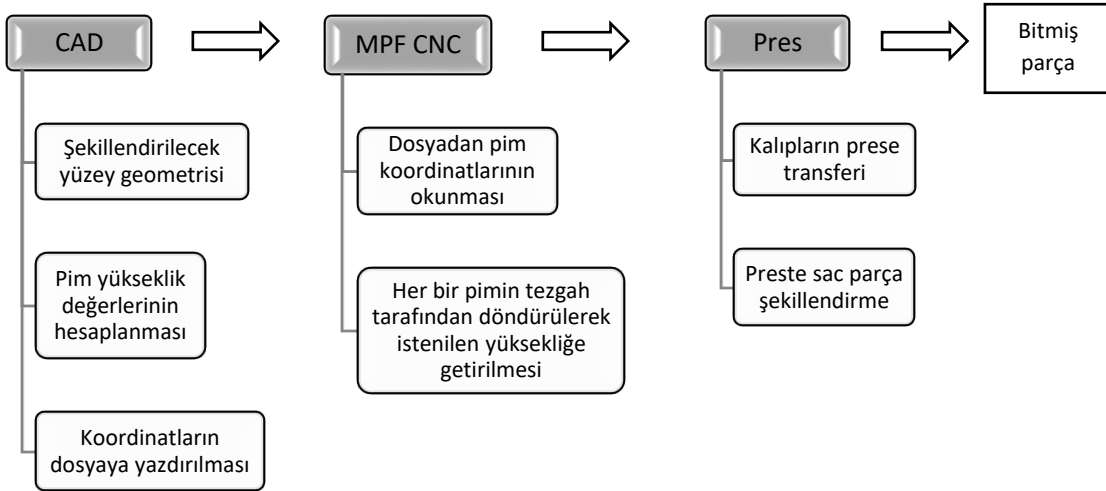


Şekil 5. Çok noktalı formlama kalıbı pim ayar CNC tezgah tasarımı

Üç doğrusal hareket ve bir dönme hareketi yapan tezgâhın çalışma prensibi şu şekilde kurgulanmıştır:

1. İlk kalıp tezgâhın tablasına ters şekilde dikdörtgen formda boşluk olan yere yerleştirilir. Kalıp yüzeyini oluşturacak küresel pim yüzeyleri aşağıda kalır.
2. CAD yazılımından alınan dosya koordinatları tezgâhın bilgisayarına yüklenir.
3. Kontrol ünitesinden alınan sinyal ile sıkma kafası ilk pimin hizasına gelerek allen başlı cıvata kavranır ve ilgili mesafe kadar döndürülür.
4. Bu işlem sıra ile tüm pimler için gerçekleştirilir.
5. İlk kalıp tezgâh tablasından alınarak tablaya ikinci kalıp yerleştirilir.
6. 3. ve 4. adımlar bu kalıp içinde tekrarlanır.
7. Böylece her iki kalıpta bulunan pimler istenilen yüzey formuna getirilmiş olur.

Tüm süreci açıklayan akış diyagramı Şekil 6’da verilmiştir.

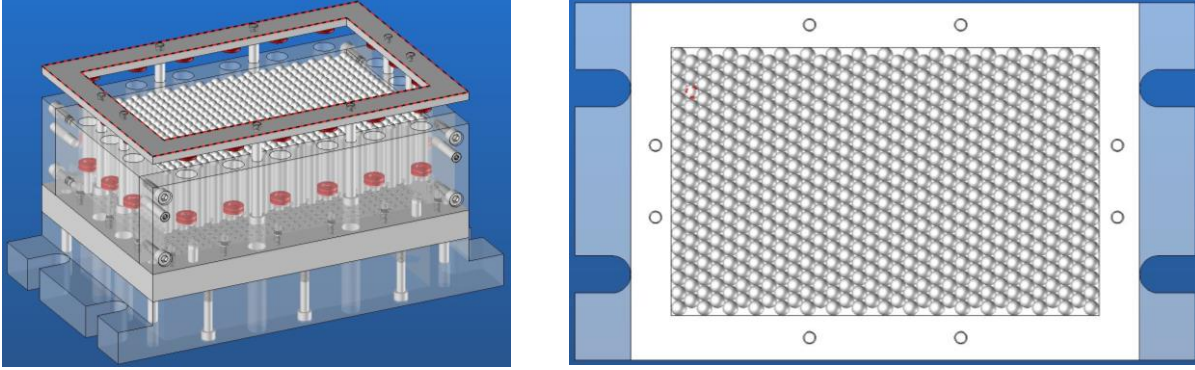


Şekil 6. Çok noktalı sac şekillendirme işlem adımları

CAD ortamında oluşturulan koordinat dosyası CNC tezgâha taşınır, tezgâh burada pim yüksekliklerini otomatik olarak ayarlar, son olarak kalıplar prese taşınarak burada sac parça şekillendirme işlemi ile istenilen formda parça elde edilmiş olur.

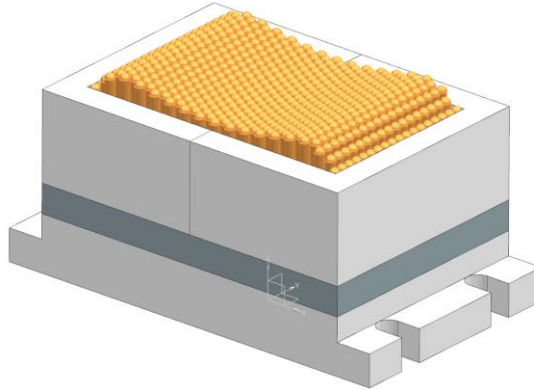
6. ÇOK NOKTALI FORMLAMA SİSTEMİ PROTOTİP ÜRETİMİ

Tasarımı yapılan tezgahın prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu tezgâhta kullanılacak kalıp tasarımı Şekil 7’de görülmektedir. Pimlerin yerleştirildiği alanın ölçüleri 340 x 216 mm olarak belirlenmiştir. Tezgah prototip amaçlı olarak üretildiği için nispeten küçük ebatlı parçalar şekillendirilebilecektir. Kalıpta pot çemberi de bulunmaktadır.



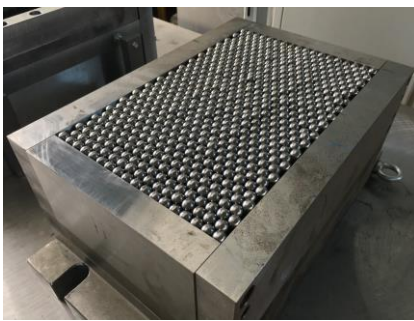
Şekil 7. Çok noktalı formlama kalıp tasarımı

Örnek bir parça için pim yüksekliklerinin değiştirildiği erkek kalıptaki pimlerin konumları Şekil 8’de görülebilir. Dişi kalıpta ise pimler kalıp içine doğru yerdeğiştirmiş olacaktır. Erkek ve dişi kalıp pim yüksekliklerinin hesaplanmasında sac parça kalınlığı da dikkate alınmaktadır.



Şekil 8. Örnek yüzey için pim konumları

Bu çalışmada üretilen kalıp resimleri Şekil 9’da verilmiştir. Erkek ve dişi kalıp olmak üzere 2 kalıp üretilmiştir. Kalıbın şekillendirme yüzeyi olan üst yüzeyi Şekil 9.a’da, pimlerin sıkıldığı alt yüzeyden bir görüntü ise Şekil 9.b’de görülmektedir.



a) Kalıp üst şekillendirme yüzeyi



b) Pim sıkma kalıp alt yüzeyi

Şekil 9. Çok noktalı formlama kalıp görüntüleri

Çok noktalı formlama kalıbı pim ayar CNC tezgâhı prototip olarak üretilmiş ve Şekil 10'da görülmektedir. Tezgâh pim sıkma kafası x,y ve z eksenlerinde doğrusal hareket, z ekseninde ise dönme hareketi olmak üzere toplam 4 eksenle hareket edebilmektedir. Eksenler Şekil 10'da görülebilir. Dönme hareketi ile sıkma kafası pimleri döndürerek mesafelerini ayarlamaktadır.

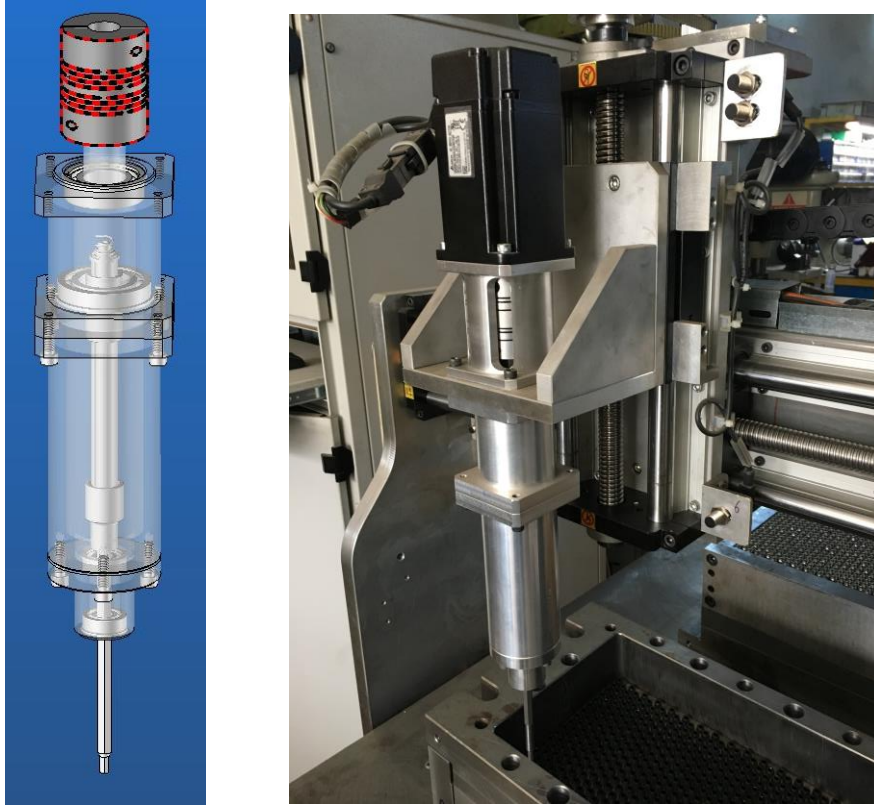


Şekil 10. Çok noktalı formlama kalıbı pim ayar CNC tezgâhı ve kontrol ünitesi

Pimler iki parça şeklinde tasarlanmış olup Şekil 11'de görülmektedir. Sağ parça sağ uç kısmına açılan allen civatadan döndürülmekte, sol tarafta görülen parça ise sac parçaya temas edecek küresel yüzeyin olduğu uç kısmını taşımaktadır. Sağ parçaya açılan vida sayesinde kalıp gövdesinde dönerek ilerlemekte ve sağ parçanın sol tarafı sol parça içinde serbestçe dönebilmektedir. Sağ parçanın dönmesi sırasında sol parça sadece eksenel yönde ilerlemektedir. Böylece birbirlerine küresel yüzeylerden temas eden pimler dönme hareketi yapmadan sadece ilerleme hareketi yaparak daha az moment ile eksenel yönde hareket edebilmektedirler.

Şekil 11. İki parçalı pim

Pimlerin sıkılması için geliştirilen sıkma kafası tasarımı Şekil 12'de görülebilir. Kontrol ünitesi sıkma kafasını ilgili pimin üzerine getirmekte ve z ekseninde düşey hareket ile altıgen sıkma ucu, pimin allen yuvasına oturmaktadır. Yuvasına oturan uç pimi döndürerek istenilen konuma getirmekte ve bu işlem tüm pimler için gerçekleştirilmektedir. Örnek kalıp tasarımında alt kalıpta 578 pim, üst kalıpta da yine 578 pim mevcut olup yapılan testlerde Şekil 8'de verilen örnek bir sac yüzeyi için toplam pim ayar zamanı 3.5 saat almaktadır.



Şekil 12. Çok noktalı formlama kalıbı pim sıkma kafası

Tezgahın prototip üretimi tamamlanmış olup kalıplarda örnek parça basımları devam etmektedir. Parça basım sürecinde parça yüzeylerinde oluşabilecek pim izlerine karşı kauçuk plakaların kullanılması düşünülmektedir. 2 mm'lik kauçuk plakalar her erkek hem de dişi kalıp üzerine konularak formlama sırasında yüzeyde oluşabilecek bölgesel izlerin oluşmaması sağlanacaktır.

7. SONUÇ

Tek kalıpla farklı formdaki parçaların şekillendirilmesi için kullanılan çok noktalı formlama prosesi otomotiv, havacılık ve uzay gibi sektörlerde geniş ebatlı panel sac parçaların şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Sac parça değiştiğinde formuna bağlı olarak kalıp pimlerinin yüksekliklerinin de değiştirilmesi gerekmektedir. Bu işlemin elle yapılması durumunda süreç hem günler sürebilmekte hem de istenen toleransların dışına çıkılabilmektedir. Binlerce pimin tek tek pozisyonlanması için insan gücüne de ihtiyaç vardır. Bu çalışmada bu dezavantajları ortadan kaldıracak bir CNC tezgâh geliştirilmiştir. Literatürde benzeri olmayan sistem için, pim yerleşim düzeni belirlenmiş ve CAD ortamında pim yüksekliklerini belirleyen bir algoritma ve yazılım geliştirilmiştir. Ayrıca tezgah üzerinde özel bir sıkma kafası ve pim tasarımı gerçekleştirilerek tezgahın prototip imalatı tamamlanmıştır. Farklı formlarda parça basım işlemleri devam etmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma XXXXX no'lu Tübitak TEYDEB projesi kapsamında Tübitak tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TOFAŞ firmasına ve kauçuk plakların sağlanmasında desteği olan Angst Pfister firmasından Ali Kamil Serbest'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Cai, Z.-Y. Li, M.-Z. A finite element method to generate digitized-die shape from the measured data of desired part, Int J Adv Manuf Technol, 2006, v. 30, pp. 61–69.

- [2] Davoodi, B., Zareh-Desari, B., Assessment of forming parameters influencing spring-back in multi-point forming process: A comprehensive experimental and numerical study, *Materials and Design*, v.59, 2014, pp.103–114.
- [3] Liyong, W., Le, L., Computer Simulation of Thick Plate Multi-Point Forming Process, *International Conference on Computer Design and Applications (ICCD A 2010)*, 25 -27 June, 2010, Qinhuangdao, China.
- [4] Chunguo, L., Mingzhe, L., Zhongyi, C., Aimin, Y., Shizhong, S., Digitally Adjustable Tooling Technology for Manufacturing of Aircraft Panels, *2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, 18-20 December 2010, ChangSha, China.
- [5] Cai, Z.-Y., Li, M.-Z., Finite element simulation of multi-point sheet forming process based on implicit scheme, *Journal of Materials Processing Technology*, v.161, 2005, pp. 449–455.
- [6] Fuxing, T., Mingzhe, L., Zhongyi, C., Xiangji, L., Formability analysis on the process of multi-point forming for titanium alloy reticulated sheet, *Int J Adv Manuf Technol*, v.41, 2009, pp. 1059–1065.
- [7] Quan, G.-Z., Ku, T.-W., Kang, B.-S., Improvement of Formability for Multi-point Bending Process of AZ31B Sheet Material Using Elastic Cushion, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol.12, no.6, 2011, pp. 1023-1030.
- [8] Durgun, İ., Doruk, E., Çok Noktalı Şekillendirme ile Parça Üretimi, *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 2014/2, s. 78-106.
- [9] Hwang, S.Y., Ryu, C.H., Lee, J.H., Localization between Curved Shell Plate and Its Unfolded Shape in Different Coordinate Systems for Ship-Hull Plate Forming, *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2011, Article ID 257804, 15 pages.
- [10] Li, M., Liu, Y., Su, S., Li, G., Multi-point forming: a flexible manufacturing method for a 3-d surface sheet, *Journal of Materials Processing Technology* v.87, 1999, 277–280.
- [11] Li, M.Z., Cai, Z.Y., Sui, Z., Yan, Q.G., Multi-point forming technology for sheet metal, *Journal of Material Processing Technology*, v.129, 2002, pp.333-338.
- [12] Zhang, Q., Wang, Z.R., Dean, T.A., Multi-point sandwich forming of a spherical sector with tool-shape compensation, *Journal of Materials Processing Technology*, v.194, 2007, 74–80.
- [13] Păunoiu, V., Maier, Teodor, V., Găvan, E., Numerical analysis of multipoint forming process, *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, Vol. III, No. 2, 2011, pp. 85-90.
- [14] Cai, Z.-Y., Wang, S.-H., Li, M.-Z. Numerical investigation of multi-point forming process for sheet metal: wrinkling, dimpling and springback, *Int J Adv Manuf Technol* v.37, 2008, pp. 927–936.
- [15] Caia, Z.-Y., Wang, S.-H., Xub, X.-D., Li, M.-Z., Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal, *Journal of materials processing technology*, v. 209, 2009, pp. 396–407.
- [16] Li, L., Seo, Y.-H., Heo, S.-C., Kang, B.-S., Kim, J., Numerical simulations on reducing the unloading springback with multi-step multi-point forming technology, *Int J Adv Manuf Technol*, v.48, 2010, pp. 45–61.
- [17] Liua, Q., Lu, C., Fua, W., Tieu, K., Li, M., Gong, X., Optimization of cushion conditions in micro multi-point sheet forming, *Journal of Materials Processing Technology*, v.212, 2012, pp.672– 677.
- [18] Zhongyi, C., Mingzhe, L., Optimum path forming technique for sheet metal and its realization in multi-point forming, *Journal of Materials Processing Technology*, v.110, 2001, pp.136-141.
- [19] Kadhim, A.J., Abbas, M.I., Influence of Die Elements Shapes on Process Parameters in Multi-Point Sheet Metal Forming Process, *3rd International Conference on Management, Economics and Social Sciences (ICMESS'2013)*, January 8-9, 2013, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [20] Liu, C., Li, M., Fu, W., Principles and apparatus of multi-point forming for sheet metal, *Int J Adv Manuf Technol*, v.35, 2008, pp.1227–1233.
- [21] Paunoiu, V., Teodor, V., Epureanu, A., Springback Compensation in Reconfigurable Multipoint Forming, *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering, ICOSSE '09*, October 17-19, 2009, Genova, Italy.
- [22] Hwang, S.Y., Lee, J.H., Yang, Y.S., Yoo, M.J., Springback adjustment for multi-point forming of thick plates in shipbuilding, *Computer-Aided Design*, v.42, 2010, pp. 1001-1012.