COMPARISON BETWEEN SIMULATION RESULTS OF DIE ELEMENTS OBTAINED BY TRIAL-AND-ERROR AND DIE ELEMENTS MANUFACTURED BY REVERSE ENGINEERING

DENEME YANILMA İLE ELDE EDİLEN KALIP ELEMANLARI İLE TERSİNE MÜHENDİSLİK KULLANILARAK ÜRETİLEN KALIP ELEMANLARININ SİMÜLASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

İsmail Gürbüz [1]*, M. Hakan Özkan [2], Abdulmecit Güldaş [3]

[1]Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Müh. Bölümü, Teknikokullar, Ankara-Türkiye

[1]Döksan Isıl İşlem ve Ar-Ge Merkezi A.Ş. Sincan OSB, Sincan-Ankara-Türkiye

[1] ORCID ID: 0000-0002-1339-3427, ismailgrbz9@gmail.com

[2] Evimetal İnox Yapı Çözümleri Tasarım Merkezi, Arnavutköy-İstanbul-Türkiye

[2] ORCID ID: 0009-0004-0938-3586, hakan@evimetal.nl

[3] Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, Teknikokullar-Ankara-Türkiye

[3]Acar Engineering Savunma Medikal Mühendislik Tic. Ltd. Şti., Gazi Teknopark-Ankara-Türkiye

[3] ORCID ID: 0000-0002-1865-2272, aguldas@gazi.edu.tr

**** Corresponding Author***

Abstract

Deep drawing is one of the most widely used sheet metal forming methods in the mass production of thin-walled metallic products for various industries such as; automotive, aerospace, packaging and home appliance, etc. Deep drawing processes are strongly affected by various factors such as material properties, die geometry, friction properties, and punch forces. In deep drawing, some defect problems such as wrinkling, tearing, orange peel appearance, and springback occur. Elastic recovery, which occurs with the release of the die elements after forming, is one of the most important process errors that affect the net and/or near-net shape production of deep-drawn sheet metal parts. Springback compensation is carried out by using trial and error which a quite an expensive process or ironing operation which comes with a second die cost. In today's competitive environment, it is imperative to minimize the process design period and eliminate expensive trial-and-error applications that increase production process costs. In this study, pre-manufacturing debugging and springback compensation of the thin-walled rectangular drain hopper made of EN X5CrNi18-10 (AISI 304) sheet material, which needs a secondary forming process after conventional trial and error applications, was performed using finite element software. In addition, the study includes the production of die elements by reverse engineering from the final part manufactured by using the die elements obtained by the trial-and-error method, using Autoform AF finite element software, and the comparison of the simulation results of the springback compensated die elements.

Keywords: *Springback compensation, springback, die design, reverse engineering.*

1. Giriş

Derin çekme, imalat hacmi büyük endüstrilerin (otomotiv, paketleme, ev aletleri vb.) seri imalatta kullandığı en yaygın sac şekillendirme işlemlerinden biridir [1]. Derin çekme, sac levhanın kalıp elemanlarının uyguladığı kuvvetle plastik deformasyona uğratılarak şekillendirilmesi işlemidir. Günümüzün rekabet ortamında, işletmelerin varlıklarını sürdürebilmeleri için verimliliğin artırılması ve maliyetin düşürülmesi gereklidir. Derin çekme işlemlerinde, ürün kalitesi, malzeme özellikleri, kalıp geometrisi, sürtünme özellikleri ve pres ayarları (pot çemberi basıncı, zımba kuvveti vb.) gibi çeşitli faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenir [2] [3] [4] [5]. Derin çekme operasyonlarında kozmetik ve mekanik olarak bazı kusur sorunları oluşabilir. Bu sorunlardan bazıları; kırışma, yırtılma, lüder bant oluşumu, portakal kabuğumsu görüntü ve geri yaylanmadır [6].

Şekillendirme sonrasında kalıp elemanlarının serbest bırakılmasıyla meydana gelen elastik toparlanma, derin çekilmiş sac metal parçaların net ve/ya net şekle yakın imalatını etkileyen en önemli süreç hatalarından biridir. Seri sac metal parça imalatında önemli rol oynayan geri yaylanma telafisi birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir [7] [8] [9] [10] [11]. Geri esneme nedeniyle derin çekilmiş bir ürün ile tasarlanan ürün arasındaki şekil farklılığı, işlevini ve diğer parçalarla birleştirilmesini garanti etmek için kalıp tasarım aşamasında telafi edilmelidir. Bununla birlikte, geri yaylanmanın telafi miktarını tahmin etmek o kadar zordur ki, kalıp modifikasyonu, pres atölyesindeki deneyime veya deneme yanılma prosedürüne dayanır. Bu telafi prosedürü, kalıp elemanlarının ve

ürün geliştirme süresi için maliyeti artıran ekstra deneme süresi gerektirir [12]. Kalıp telafisi geri yaylanma sorununun çözümünde tek başına yeterli olmayabilir. Bu gibi durumlarda ikincil bir kalıp maliyeti gerektiren ütüleme işlemine gerek duyulabilir.

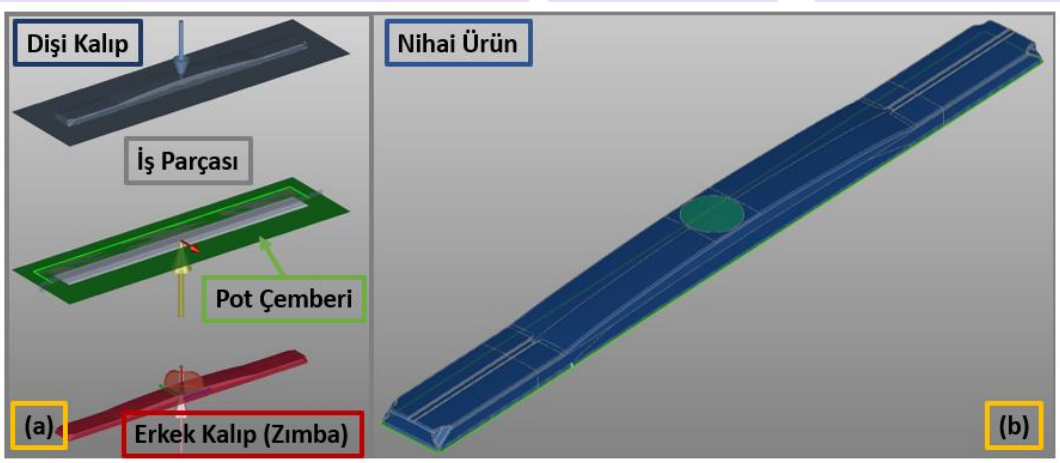
Geri yaylanma kusuru, derin çekme işlemi sırasında parçalarda meydana gelen karmaşık gerinim kombinasyonlarından (basma ve çekme gibi) etkilenir. Bu nedenle, proses parametrelerinin yanı sıra malzeme özelliklerinin geri yaylanma üzerindeki etkilerinin doğru bir şekilde anlaşılması, proseslerin etkin bir şekilde tasarlanması için göz önünde bulundurulmalıdır. Geri yaylanma kusur oluşumunu tetikleyecek bir diğer unsur ise kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünme davranışıdır. Çalışma yüzeyleri arasındaki bu sürtünme davranışının geri yaylanma telafisinde göz önünde bulundurulması sağlıklı geri yaylanma telafisi için önemlidir.

Son zamanlarda, sonlu elemanlar analiz yöntemi, deney tasarımını, vekil modelleri ve optimizasyon yöntemlerini birleştirme olasılığı ile yalnızca mümkün olan tasarımlar yerine en uygun metal şekillendirme süreçlerini tasarlamak için umut verici bir alternatif sunmaktadır [13] [14]. Sac şekillendirme operasyonları sırasında oluşabilecek kırılma [15], incelme [16], ayrılma riski ve kırışma [17] [18] [19] gibi hataların kalıp elemanları imalatı öncesinde sonlu elemanlar yöntemi ile tespit edilip, giderilmesi birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Sac metal şekillendirme işlemlerinde seri imalat ve montaj sırasında önemli sorun teşkil eden geri yaylanma sorununun sonlu elemanlar yöntemi kullanarak optimizasyonu üzerine de birçok araştırma yapılmıştır [20] [21] [10] [7] [8] [9] [11].

Bu çalışmada, geleneksel deneme yanılma uygulamasının ardından ikincil bir şekillendirme sürecine ihtiyaç duyan EN X5CrNi18-10 (AISI 304) sac malzemeden imal edilen ince cidarlı dikdörtgen haznenin imalat öncesi hata ayıklaması ve geri yaylanma telafisi, sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada var olan bir nihai parça kullanılarak, tersine mühendislik ile yeni kalıp elemanları oluşturulmuştur. Ayrıca çalışma, geri yaylanma telafisi yapılmış bu kalıp elemanlarının simülasyon sonuçları ile deneme yanılma yöntemi ile üretilen kalıp elemanlarının simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasını da içermektedir. Bu simülasyon çalışmaları için AutoForm AF yazılımı kullanılmıştır.

2. Simülasyon ve Araştırma Yöntemi

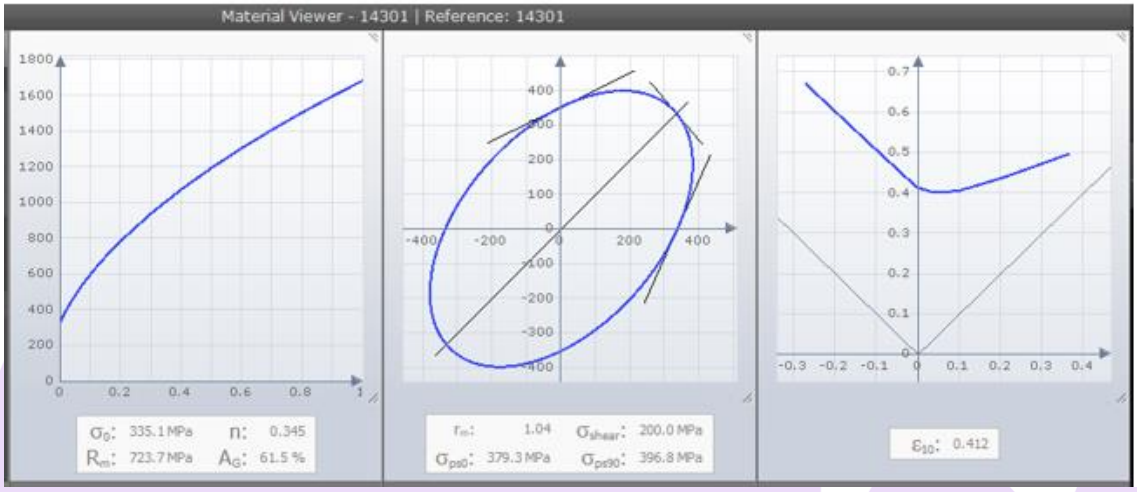
Çalışma Autorform AF yazılımının sayısal simülasyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tecrübeye ve deneme yanılma metoduna dayalı kalıp tasarımı Solidworks yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. 3 boyutlu kalıp elemanları (Dişi kalıp, Pot Çemberi ve Zımba) Autoform simülasyon ortamında kullanılmak üzere yüzey formuna dönüştürülmüştür. Kalıp elemanlarının operasyon boyunca iş parçası ile temas eden yüzeyleri Şekil 1(a)'de gösterilmiştir. Çalışmanın ikinci evresinde kalıp elamanı oluşturmada kullanılacak son ölçülere sahip ürün Solidworks ortamında tasarlanmıştır. Nihai ürün geometrisi Autoform yazılımında kullanılmak üzere kalınlıksız yüzey formuna dönüştürülmüştür. Nihai ürünün yüzey formu Şekil 1(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 1: (a) Kalıp yüzeyleriyle iş parçasının deformasyon boyunca temas ettiği yüzeyler. (b) Son ölçülere sahip nihai ürün geometrisi.

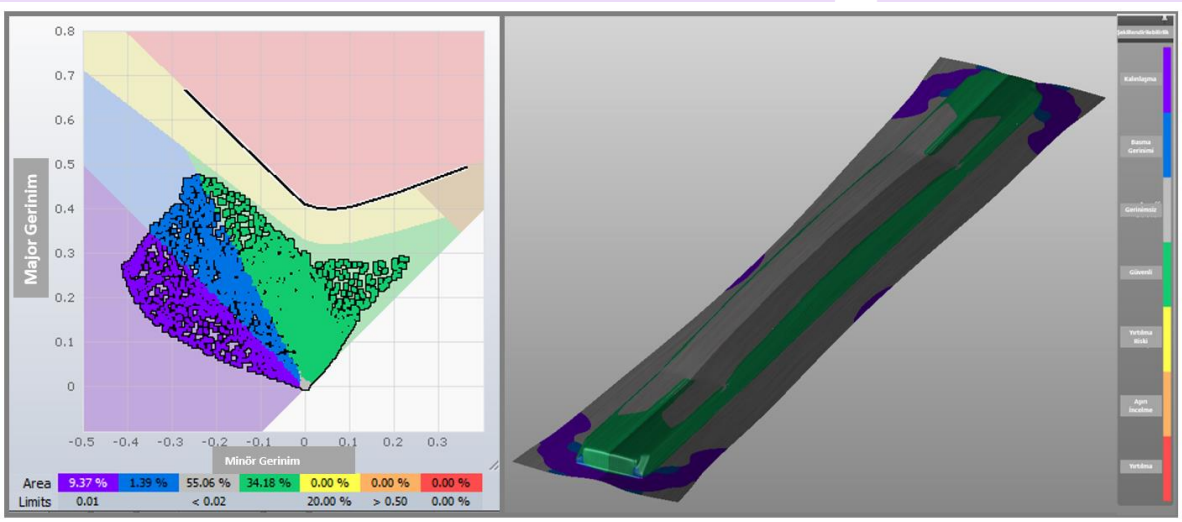
Bu çalışmada, iş parçası malzemesi olarak EN X5CrNi18-10 (AISI 304) kalite paslanmaz çelik kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında kullanılan malzeme özellikleri Şekil 2'de gösterilmektedir. İş parçası kalınlığı 1.00 mm, uzunluğu 635 mm ve genişliği 130 mm'dir.

Sac metal şekillendirme operasyonlarında sıklıkla karşılaşılan ve seri imalatın verimliliği için sorun teşkil eden geri yaylanma sorunu birçok parametreye bağlıdır. Bu parametrelerden bazıları; sürtünme katsayısı, pot çemberi basıncı, sıcaklık, malzeme elastik özellikleri ve kalıp elamanı geometrileridir. Geri yaylanma telafisi bahsedilen etkin parametrelerin her biri göz önünde bulundurularak ve sistem içerisinde birbirleriyle uyumu dikkate alınarak yapılmalıdır. Bu çalışma sadece geometrik açıdan geri yaylanma telafisi üzerinedir. Çalışmada gerçekleştirilen iki metotta da geri yaylanma kusuruna etki eden kalıp geometrisi hariç diğer etkin parametreler sabit tutulmuştur. Kullanılan sürtünme katsayısı orta sınıf yağlama özelliğine göre 0.15 kabul edilmiştir.

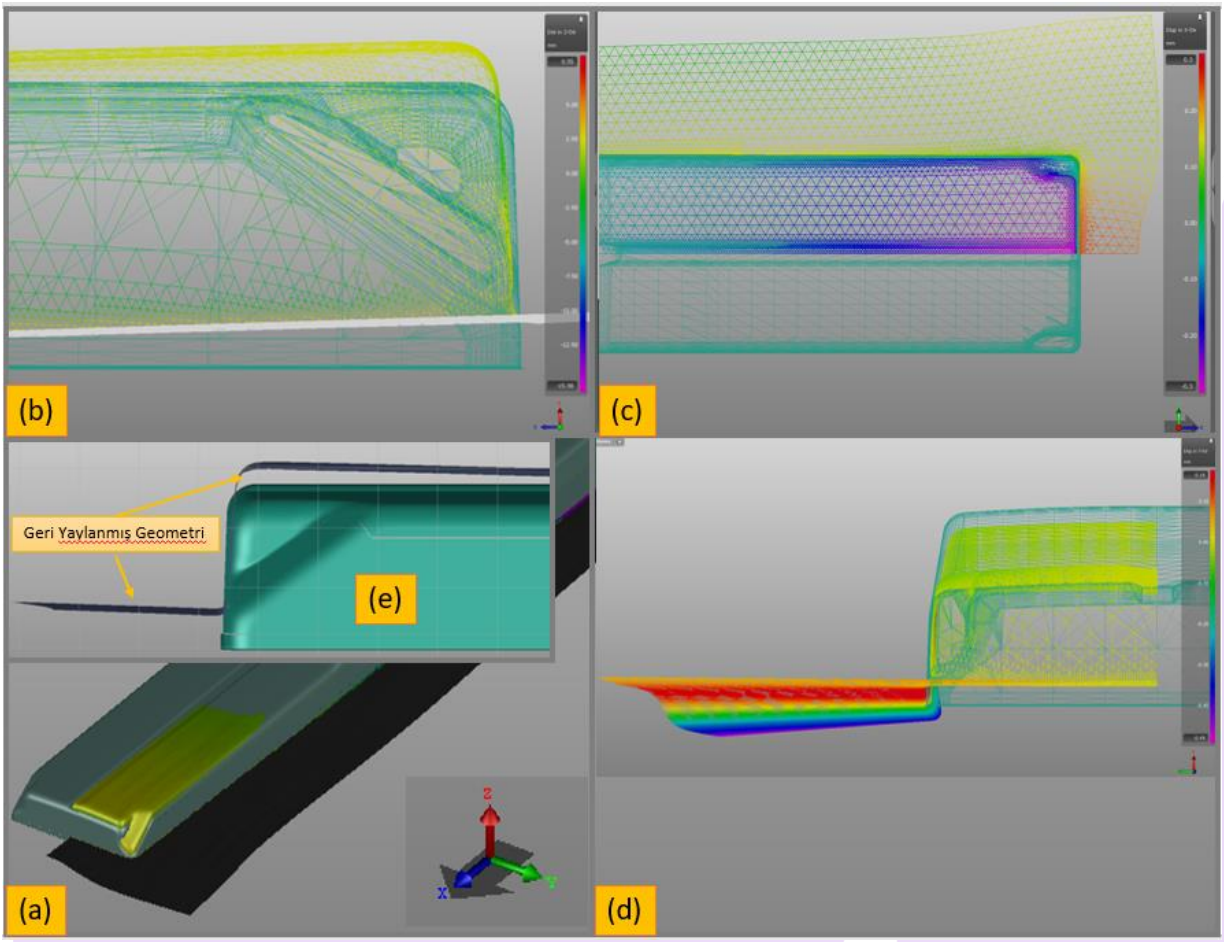


Şekil 2: EN X5CrNi18-10 (AISI 304) kalite paslanmaz çelik malzeme mekanik özellikleri

Çalışmada, ilk olarak tamamen tecrübe ve deneme yanılma yöntemi kullanılarak oluşturulan kalıp yüzeyleri ile şekillendirilebilirlik ve geri yaylanma simülasyonları yapılmıştır. Geri yaylanma hesaplaması serbest geri yaylanma formatında analiz edilmiştir. Tecrübeye ve deneme yanılma yöntemine göre İnce cidarlı hazne oluşturma sürecindeki farklı renklerle gösterilen deformasyon değişiklikleri, Şekil 3'de gösterildiği gibi kalınlaşma, basma/sıkışma gerinimi, çekme gerinimi, aşırı incelme ve ayrılma riski alanlarından oluşur. Bu mantıkla oluşturulan kalıp elemanlarıyla geri yaylanma oluşumu Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 4, (a) normal yönde geri yaylanma sonucu maksimum ölçüden sapma değeri +3.43/-2.91 mm'dir. (b) z-ekseni yönünde ölçüden sapma +3.68/-2.91 mm'dir. (c) x-ekseni yönünde ölçüden sapma +0.3/-0.3 mm'dir. (d) y-ekseni yönünde ölçüden sapma +0.18/-0.49 mm'dir. (e) ise referans geometri ve geri yaylanmış geometriyi göstermektedir. Autoform eksenlerdeki geri yaylanma miktarını hesaplarken geri yaylanma öncesi şekillendirmiş geometri koordinatlarıyla geri yaylanma sonrası oluşan ölçümsel değişiklikleri raporlamaktadır. Referans geometri ile geri yaylanma sonrası görsel Şekil 4(a)'da gösterilmektedir. Yazılıma dışardan kalıp elemanları eklenerek oluşturulan sistemde geri yaylanma telafisi etkin yapılamamaktadır. Bu nedenle bu bölümde geri yaylanma telafili kalıp oluşturulmamış ve geri yaylanma telafili kalıplarla tekrar bir simülasyon koşturulmamıştır.

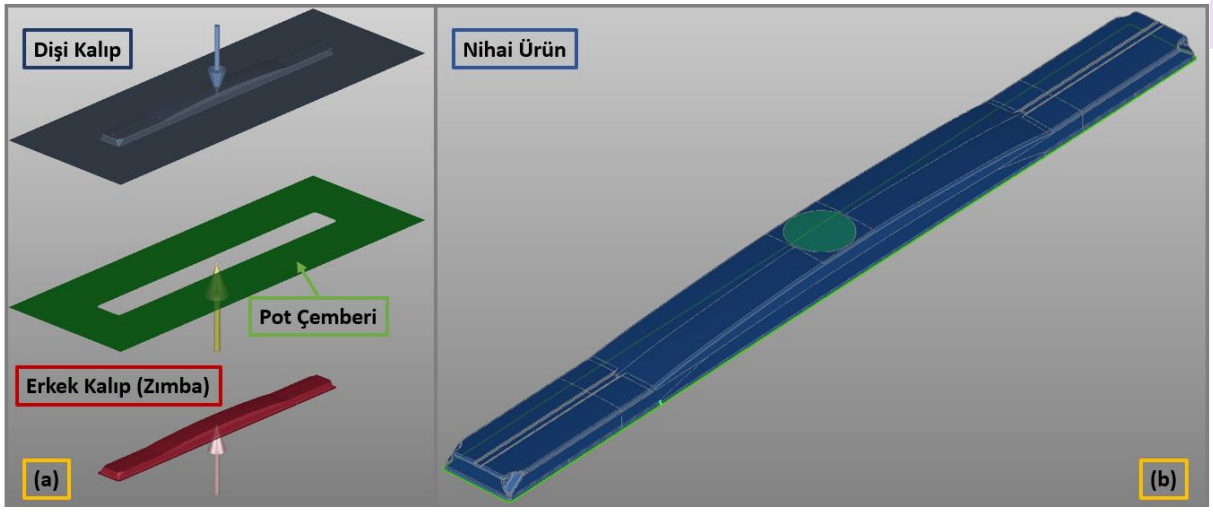


Şekil 3: Tecrübeye ve deneme yanılma yöntemine göre İnce cidarlı hazne oluşturma sürecindeki farklı renklerle gösterilen deformasyon değişiklikleri.



Şekil 4: Eksenlere göre geri yaylanma sonuç ölçüden sapma değerleri. (a) normal yönde sapma, (b) z-ekseni yönünde sapma, (c) x-ekseni yönünde sapma, (d) y-ekseni yönünde sapma değerleri, (e) referans geometri ve geri yaylanmış geometrinin gösterimi.

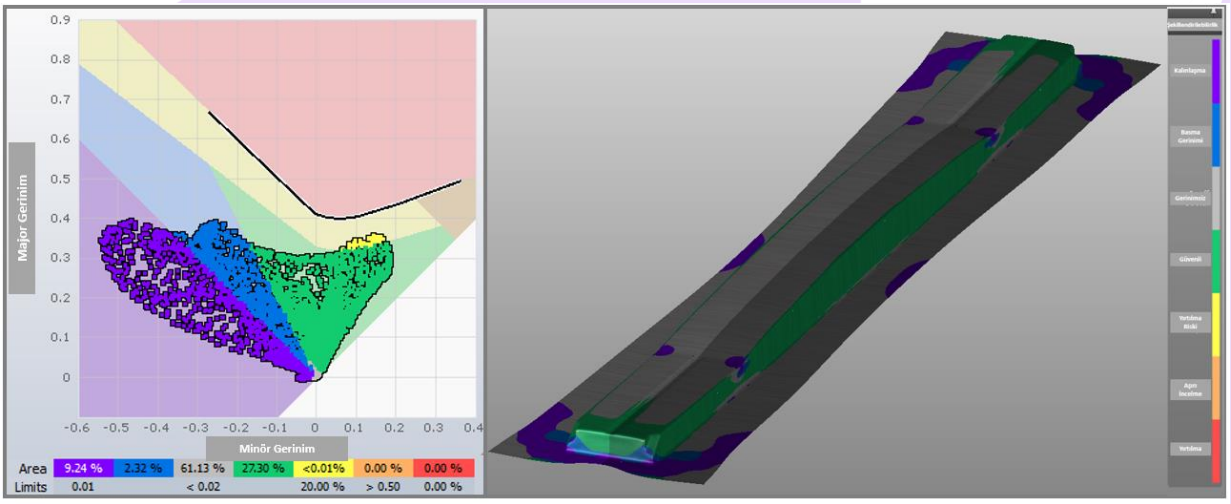
İkinci olarak, nihai ölçülere göre oluşturulmuş ürün geometrisi kullanılarak Autoform AF simülasyon ortamında kalıp elemanları oluşturulmuştur. Oluşturulan kalıp elemanları ve nihai ürün sırasıyla (a), (b) Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5: Nihai ölçülere göre oluşturulmuş ürün geometrisi kullanılarak Autoform AF simülasyon ortamında kalıp elemanları.

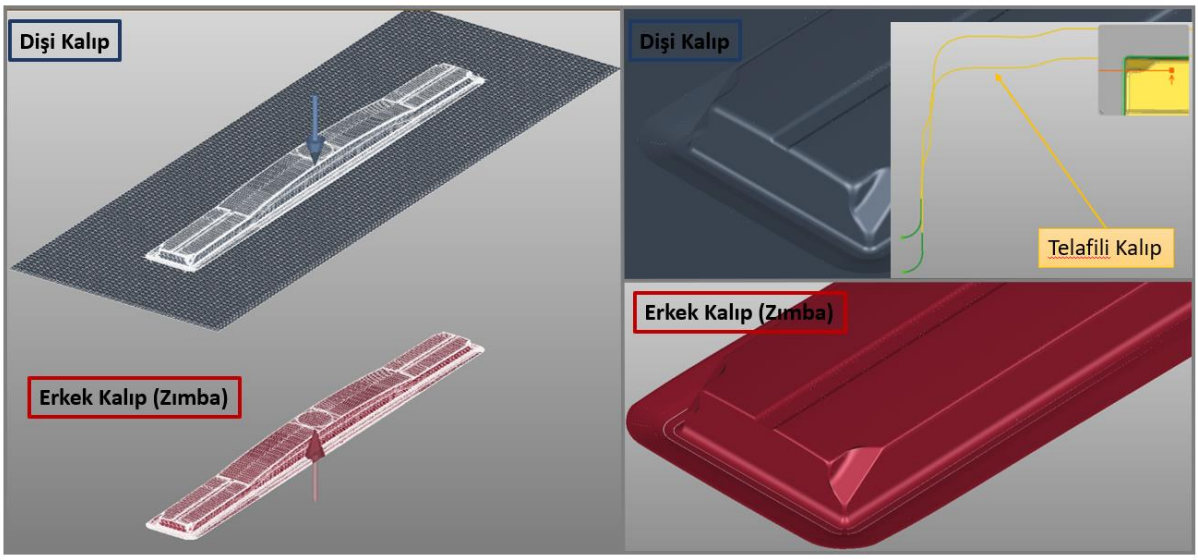
Nihai ürün geometrisine göre oluşturulan kalıp elamanlarıyla şekillendirilebilirlik ve geri yaylanma tahmin simülasyonları koşturulmuştur. İnce cidarlı hazne oluşturma sürecindeki farklı renklerle gösterilen deformasyon değişiklikleri, Şekil 6'da gösterildiği gibi kalınlaşma, basma/sıkışma gerinimi, çekme gerinimi, aşırı incelme ve ayrılma riski alanlarından oluşur.

Şekillendirilebilirlik Sınır Eğrisi (ŞSE), Şekillendirme işlemi sırasında arızayı önlemek için şekillenen parçanın güvenli alanını belirlemede kullanılan ampirik bir diyagramdır. Ayrıca ŞSE, derin çekme işleminde izotropik sertleşme ve gerinim davranışını gözlemlemek için kullanılabilmektedir. ŞSE aynı zamanda kırılma, boyun verme, buruşma, ayrılma riski ve buruşma gibi sac şekillendirme işlemlerinde oluşan kusurları ve incelmeyi analiz etmek için de kullanılır. ŞSE, bir elemanın ana ve küçük gerinimlerine dayalı malzeme deformasyon sürecinin sınırlarını temsil eden bir eğridir [6]. Bu eğri limitinin üzerinde bir gerinim yaşayan malzemenin aşırı incelme ve yırtılma gibi şekillendirme hatalarına sebep olur. Autoform AF yazılımı Şekillendirilebilirlik sınır eğrisinin 10% altını güvenlik açısından riskli bölgenin başlangıcı olarak tanımlamaktadır.



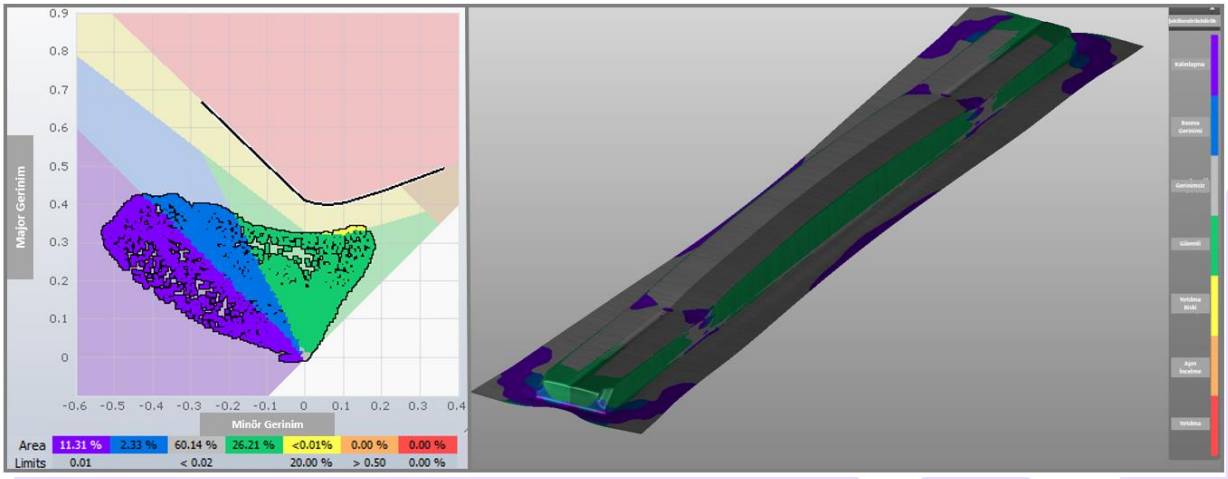
Şekil 6: İnce cidarlı hazne oluşturma sürecindeki farklı renklerle gösterilen deformasyon değişiklikleri.

Simülasyon ortamından elde edilen geri yaylanma verilerine göre Autoform yazılımın içerisinde gömülü geri yaylanma telafi modülü kullanılmıştır ve geri yaylanma telafili kalıp elemanları elde edilmiştir. Geri yaylanma telafili kalıp elemanları Şekil 7'de gösterilmiştir.



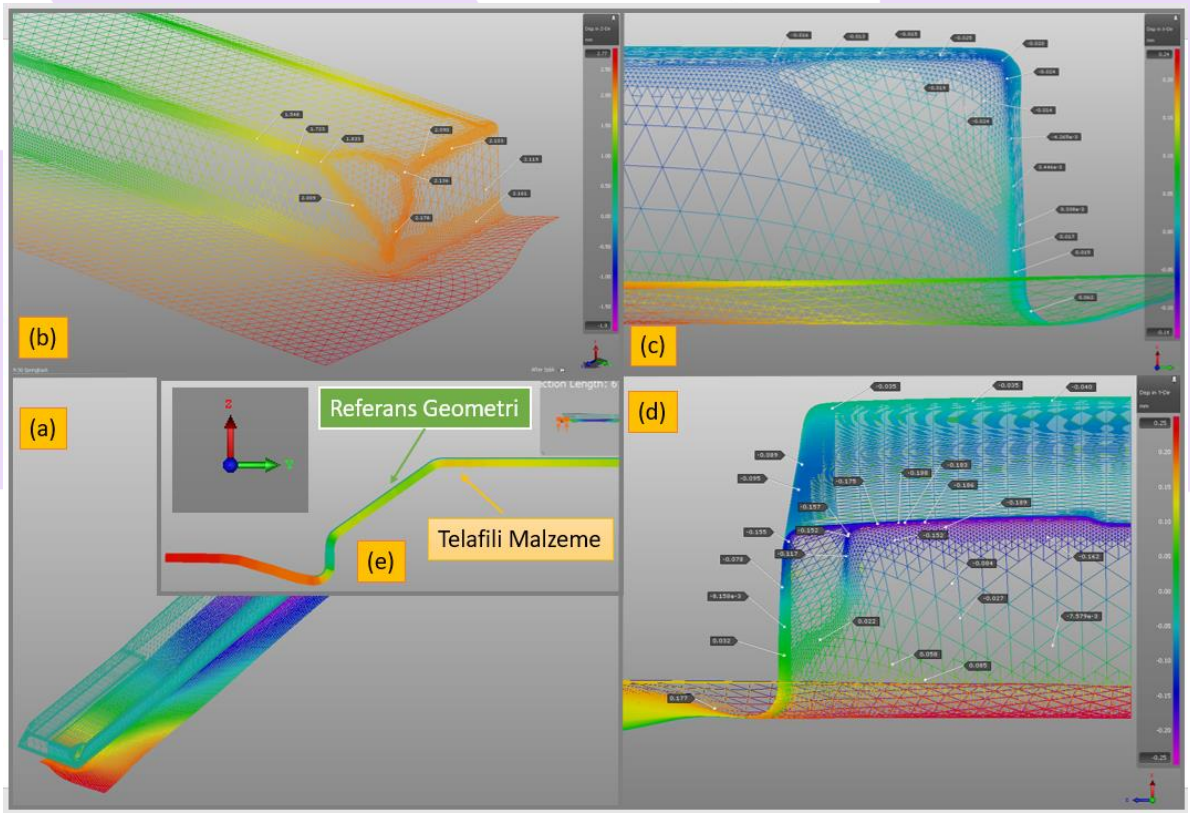
Şekil 7: Simülasyon ortamından elde edilen geri yaylanma verilerine göre Autoform yazılımın içerisinde gömülü geri yaylanma telafi modülü ile elde edilmiş telafili kalıp elemanları.

Geri yaylanma telafili kalıp elamanlarıyla şekillendirilebilirlik ve geri yaylanma tahmin simülasyonları tekrar koşturulmuştur. İnce cidarlı hazne oluşturma sürecindeki geri yaylanma telafili simülasyon için farklı renklerle gösterilen deformasyon değişiklikleri, Şekil 8'de gösterildiği gibi kalınlaşma, basma/sıkışma gerinimi, çekme gerinimi, aşırı incelme ve ayrılma riski alanlarından oluşur.



Şekil 8: İnce cidarlı hazne oluşturma sürecindeki geri yaylanma telafili simülasyon için farklı renklerle gösterilen deformasyon değişiklikleri.

Geri yaylanma telafili kalıp elamanlarıyla geri yaylanma tahmin simülasyon sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. (a) normal yönde geri yaylanma sonucu maksimum ölçüden sapma değeri +3.43/-2.91 mm'dir. (b) z-ekseni yönünde ölçüden sapma +2.77/-1.5 mm'dir. (c) x-ekseni yönünde ölçüden sapma +0.24/-0.14 mm'dir. (d) y-ekseni yönünde ölçüden sapma +0.25/-0.25 mm'dir. (e) Referans geometrisi ve telafili geri yaylanmış geometri gösterimidir.



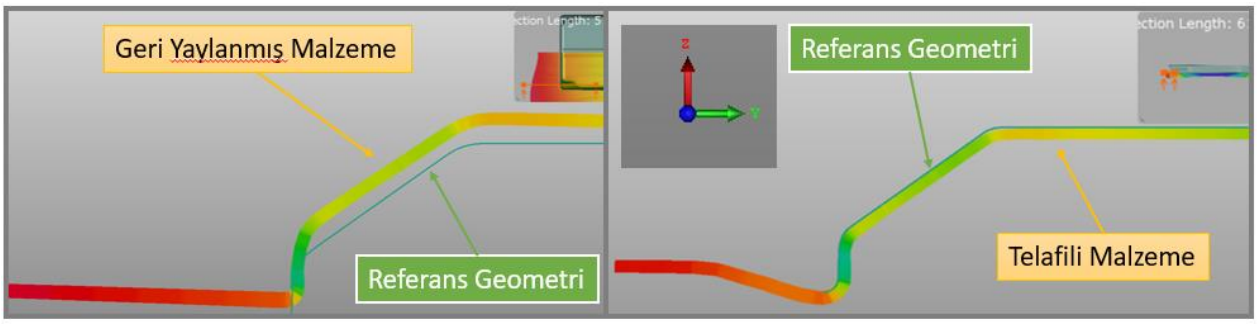
Şekil 9: Geri yaylanma telafili kalıp elamanlarıyla geri yaylanma tahmin simülasyon sonuçları. (a) normal yönde geri yaylanma sonucu maksimum ölçüden sapma, (b) z-ekseni yönünde ölçüden sapma, (c) x-ekseni yönünde ölçüden sapma, (d) y-ekseni yönünde ölçüden sapma, (e) Telafili geri yaylanmış numune geometrisi kesit görüntüsü.

3. Sonuç ve Karşılaştırma

Bu çalışmada, tecrübe ve deneme yanılma yöntemi kullanılarak tasarlanmış kalıp yüzeyleriyle tamamen Autoform AF simülasyon ortamında son üründen kalıp yüzeyleri elde edilen iki tasarım metodunun simülasyon ortamında deformasyon verileri ve geri yaylanma sebebiyle gerçekleşen geometrik kusurları incelenmiştir. Ek olarak geri yaylanma telafili simülasyon sonuçları paylaşılmıştır.

Tecrübe ve deneme yanılma yöntemiyle oluşturulan kalıp elemanlarıyla gerçekleştirilen simülasyon sonuçları deformasyon açısından incelendiğinde imalata engel teşkil edecek kusur bulunmamaktadır. Fakat geri yaylanma sebebinin elastik geri toparlanma olduğunu düşünürsek, şekillenmiş parça üzerinde yeteri kadar gerinim elde edilmemiş yüzeylerin olduğu ve şekillendirilen parça üzerinden kalıp elemanları yükü kaldırıldığında gereken gerinim elde edilmemiş yüzeylerdeki elastik geri toparlanmayla parça üzerinde geri yaylanma kusuru oluştuğu gözlemlenmiştir.

Son üründen kalıp tasarımı ve geri yaylanma telafi simülasyonu iş parçasının deformasyonu yönünden incelendiğinde imalat açısından problem teşkil edecek bir olguya rastlanmamıştır. Geri yaylanma telafili kalıpların kullanıldığı geri yaylanma sonuçlarının ilk simülasyon sonuçlarına oranla düştüğü gözlemlenmiştir. İlk simülasyonda olduğu gibi şekillenmiş parça üzerinde yeterli gerinime ulaşmamış yüzeylerin varlığı tespit edilmiştir. Bu gerekli gerinime ulaşmamış yüzeylerin varlığı bu tasarımda da geri yaylanmanın temel sebebi olarak düşünülmektedir. Fakat referans geometri ile geri yaylanma telafisi yapılmış kalıp ile elde edilmiş iş parçası karşılaştırıldığında geri yaylanma telafisinin başarılı olduğu gözlemlenmiştir. İki farklı metot ile elde edilen kalıp yüzeyleriyle gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen geri yaylanmış iş parçası geometrisi ile referans geometrisi karşılaştırması Şekil 10'da gösterilmektedir. (a) Tecrübe ve deneme yanılma metodu kullanılarak tasarımı yapılmış kalıplarla elde edilen geri yaylanma sonucu, (b) Son üründen kalıp elemanları üretilerek geri yaylanma telafisi uygulanmış geri yaylanma sonucu gösterilmektedir.



Şekil 10: İki tasarım yönteminden elde edilen geri yaylanma sonuçları. (a) Tecrübe ve deneme yanılma metodu kullanılarak tasarımı yapılmış kalıplarla elde edilen geri yaylanma sonucu, (b) Son üründen kalıp elemanları üretilerek geri yaylanma telafisi uygulanmış geri yaylanma sonucu.

4. Öneriler

Bu çalışmada, geri yaylanmayı etkileyecek unsurlardan sadece biri olan geometrik değişim ile geri yaylanma telafi çalışması ve deneme yanılma yöntemi ile elde edilen kalıp geometrileri ile geri yaylanma analiz çalışması yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarının gerçeğe yakınsamasında malzeme özelliklerinin, pekleşme davranışının, pres özelliklerinin ve sürtünme katsayısının doğru girilmesi önemlidir. Geri yaylanma kusuru, derin çekme işlemi sırasında parçalarda meydana gelen karmaşık gerinim kombinasyonlarından (basma ve çekme gibi) etkilendiği bilinmektedir. Bu nedenle, malzeme özelliklerinin geri yaylanma üzerindeki etkilerinin doğru bir şekilde anlaşılması, proseslerin etkin bir şekilde tasarlanması için göz önünde bulundurulmalıdır. Geri yaylanma kusur oluşumunu tetikleyecek bir diğer unsur ise kalıp ile iş parçası arasındaki sürtünme davranışıdır. Çalışma yüzeyleri arasındaki bu sürtünme davranışının geri yaylanma telafisinde göz önünde bulundurulması sağlıklı geri yaylanma telafisi için önemlidir. Sonraki çalışmalarda, malzeme özelliklerinin aynı hattan çıkan malzemelerde bile farklılık gösterdiği düşünüldüğünde, çalışılacak malzemenin detaylı karakterizasyonu ile simülasyon çalışmaları yapılması planlanmaktadır. Karakterize edilmiş malzeme kartı simülasyon sonuçlarının gerçeğe yakınsaması mümkün kılacaktır. Ayrıca, kalıp malzemeleri ve iş parçası arasındaki sürtünme davranışı fiziksel testlerle tespit edilerek, simülasyon ortamına sürtünme verilerinin daha doğru girilmesi sağlanabilir. Böylece sürtünme davranışının geri yaylanmaya etkisi doğru tespit edilebilir ve olumsuz etkileri telafi edilebilir.

5. Referanslar

[1] W. Zhang ve . R. Shivpuri, «Probabilistic design of aluminum sheet drawing for reduced risk of wrinkling and fracture,» Reliability Engineering and System Safety 94, pp. 152-161, 2009.

[2] B. W. Y. Z. J. H. M. D. K. Z. X.L. Genga, «Effect of crystalline anisotropy and forming conditions on thinning and rupturing in deep drawing of copper single crystal,» Journal of Materials Processing Technology 213 , pp. 574-580, 2013.

[3] K. H. N. T. K. Y. M.A. Hassan, «Friction aided deep drawing of sheet metals using polyurethane ring and auxiliary metal punch. Part 2: analysis of the drawing mechanism and process parameters,» International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 , p. 633–642, 2002 .

[4] P. V. K. D. R. P. Ramanjaneyulu, «Multi parameter optimization of deep drawing for cylindrical cup formation on brass sheets using Grey Relational Analysis,» Materials Today: Proceedings 18 , p. 2772–2778, 2019.

[5] K. K. G. Gantar, «Sensitivity and stability evaluation of the deep drawing process,» Journal of Materials Processing Technology 125–126, p. 302–308, 2002.

[6] D. A. W. A. S. S. Wahyanti, «Study of Wrinkling and Thinning Behavior in the Stamping Process of Top Outer Hatchback Part on the SCGA and SPCC Materials,» Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal Vol. 5, No. 3, pp. 241-248, 2020.

[7] T. A. E. H. A. C. I. E. Mrabti, «Springback optimization of deep drawing process based on FEM-ANN-PSO strategy,» Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021.

[8] J. H. S. O. M. P. J. W. R. Lingbeek, «The development of a finite elements based springback compensation tool for sheet metal products,» Journal of Materials Processing Technology 169, p. 115–125, 2005.
[9] S. C. S. H. Z. Y. X. H. W. S. H. Li, «Deformation Characteristics, Formability and Springback Control of Titanium Alloy Sheet at Room Temperature: A Review,» materials MDPI, 2022.
[10] G. C. B. S. N. Mole, «A 3D forming tool optimisation method considering springback and thinning compensation,» Journal of Materials Processing Technology 214 , p. 1673–1685, 2014.
[11] L. M. W. V. C. Hartmann, «Springback and compensation in sheet metal forming reconsidered as an ill-posed problem,» 40th International Deep-Drawing Research Group Conference (IDDRG), p. 1157, 2021.
[12] R. R. R. R. R. L. Reddy, «A Review on Springback in Metal Forming,» International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), p. Vol. 3 Issue 1, 2014.
[13] B. M. B. T. Meindersa, «Numerical product design: Springback prediction, Compensation and Optimization,» International Journal of Machine Tools & Manufacture , p. 48 499–514, (2008).
[14] v. d. B. J. H. M.H.A. Bonte, «An optimisation strategy for industrial metal forming processes,» Struct Multidiscip Optim, p. 35(6):571–586, 2008.
[15] M. L. B. W. B. a. A. S. P. S. Candra, «Analytical study and FEM simulation of the maximum varying blank holder force to prevent cracking on cylindrical cup deep drawing,» Procedia CIRP, pp. vol. 26, pp. 548–553, 2015.
[16] R. B. a. P. S. K. Dahake, «Optimization of Forming Process Parameters in Sheet Metal Forming Of Reinf-Rr End Upr-Lh,» Rh for Safe Thinning, pp. vol. 8, no. 8, pp. 1–7, 2018.
[17] M. W. X. W. S. Y. X. X. a. J. L. B. Meng, «Inner wrinkling control in hydrodynamic deep drawing of an irregular surface part using drawbeads,» Chinese J. Aeronaut, pp. vol. 27, no. 3, pp. 697–707, 2014.
[18] J. P. D. M. C. a. G. Ferron, «Wrinkling predictions in the deep-drawing process of anisotropic metal sheets,” J. Mater. Process,» Technol, pp. vol. 128, no. 1–3, pp. 178–190, 2002.
[19] V. L. a. S. R. Srivatsa, «Sheet Metal Forming Processes – Recent Technological Advances,» Mater. Today Proc. , pp. vol. 5, no. 1, pp. 2564–2574, 2018.
[20] D. A. B. O. a. K. J. W. A. Siswanto, «An alternate method to springback compensation for sheet metal forming,» Sci. World J, 2014.
[21] M. S. a. B. B. S. Jadhav, «Applications of Finite Element Simulation in the Development of Advanced Sheet Metal Forming Processes,» BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, pp. vol. 163, no. 3, pp. 109–118, 2018.