



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

DP600 Malzemenin Şekillendirilmesinde Değişken Baskı Plakası Kuvveti Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Araştırılması

Nuri ŞEN ^{a,*}

^a *Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE*

** Sorumlu yazarın e-posta adresi: nurisen@duzce.edu.tr*

ÖZET

Otomotiv üreticileri hem ağırlık/dayanım oranının düşürülmesinde hem de çarpışma anında daha mukavemetli araçları üretmek için ultra yüksek mukavemetli malzemelerin kullanım oranını gittikçe artırmaktadır. Bu çalışmada, ultra yüksek mukavemetli DP600 malzemesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak şekillendirebilirlik analizi yapılmıştır. Kalıp tasarımı yapılarak belirli bir geometride ve başlangıçta 1 mm kalınlığındaki sac malzeme için sanal ortamda hem sabit hem de değişken baskı plakası kuvvetlerinde derin çekme işlemi uygulanarak malzemenin oda şartlarında her iki farklı yöntem için sınır çekme oranı belirlenmiştir. Derin çekme analizleri sonucunda değişken baskı plakası kuvveti kullanılarak sınır çekme oranı 2,07'den 2,12'ye yükseldiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: DP600, Değişken Baskı Plakası Kuvveti, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Investigation of The Effect of Variable Blank Holder Force on The Forming of DP600 Material via Finite Element Method

ABSTRACT

Automobile manufacturers increase the usage of ultra-high strength materials for both lowering the weight/strength ratio and manufacturing stronger vehicles. In this study, the finite element forming analysis has been applied to the ultra-high strength DP600 material. The limit drawing ratio has been determined in finite elements by designing a die for a sheet material initially of 1 mm thickness and at certain geometry in both constant and variable blank holder forces. As a result of deep drawing analyses, the limit drawing ratio has been determined to be increased from 2.07 to 2.12 by employing variable blank holder force.

Keywords: DP600, Variable Blank Holder Force, Finite Element Method

I. GİRİŞ

Derin çekme işlemi, iki boyutlu düzlemsel geometriye sahip sac metal malzemelerin derin çekme kalıplarıyla preste kalıp boşluğuna itilerek, belirli derinlikte ve şekillere sahip üç boyutlu nesnelere elde edilmesi işlemidir[1]. Sınır çekme oranı, şekillendirilen parçanın kopmadan, yırtılmadan, hasara uğramadan ve sac kalınlığının %20 den daha fazla incelmeden çekilebilen maksimum ilkel malzeme çapının zımba çapına oranı olarak ifade edilmektedir.

Sınır çekme oranının sembolik gösterimi ise;

$$\beta = \frac{D_{max}}{d} \quad (1)$$

B = Sınır çekme oranı

D_{max} = En büyük dairesel numune çapı

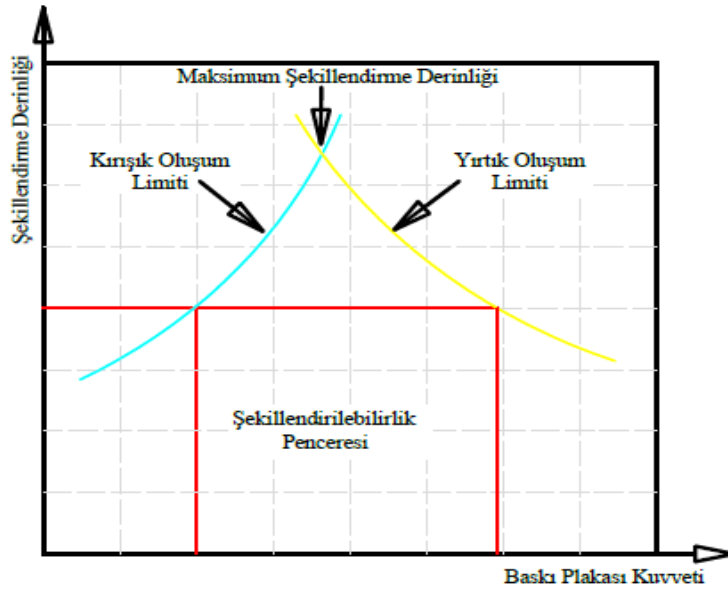
d = Zımba çapı

Son zamanlarda otomotiv üreticileri araç tasarlarken kaza anında yaşam mahallinde oluşması muhtemel risklerin, araç gövde ağırlığının ve yakıt sarfiyatının nasıl azaltılacağı konularını dikkate almaktadırlar. Bu üç önemli konunun çözümü noktasında çelik üreticileri ultra yüksek mukavemetli sac (AHSS) metal malzemeleri geliştirmişlerdir [2-4]. Ultra yüksek mukavemetli malzemelerin bir kaçış şöyle sıralanabilir. Çift fazlı (DP), kompleks fazlı (CP), Ferritik-Beynitik (FB), Martenzitik (MS) vb. [2].

AHSS çeliklerinden olan martenzitik ultra yüksek mukavemetli çelikler (MS-AHSS) araç üreticilerini mukavemetinin yanında daha ince AHSS çelikler kullanarak araç gövde ağırlığını azaltacağından bununla birlikte yakıt sarfiyatını azaltacak olması otomotiv üreticilerin dikkatlerini çekmektedir[1-3]. MS-AHSS, 950-1700 MPa arasında değişen yüksek mukavemetlere sahip olmasının yanında üretim maliyetleri düşüktür, fakat sınırlı oranda süneklik ve şekillendirilebilirliğe sahiptir[3,5,6].

Bir malzemenin sınır çekme oranının (SÇO) artırılması iki şekilde mümkün olabilir. Bunlardan birincisi malzeme iç yapısının (bileşen oranları) değiştirilmesiyle, ikincisi ise proses geliştirilerek SÇO'nun artırılmasını mümkün kılınabilir.

Proses geliştirme işleminde şekillendirmeyi etkileyen parametreler; malzemenin mekanik özellikleri, sıcaklık, baskı plakası kuvveti (BPK), sürtünme, kalıp boşluğu gibi başlıklar altında toplanabilir[1]. Malzeme seçimi yapıldıktan sonra sac levhaların istenilen geometride şekillendirilmeleri için yırtılma ve kırılma gibi hataların belirlenmesi gerekmektedir. Analiz programları kullanılarak malzemenin doğru modellenmesi şekillendirmeyi etkileyen parametreleri optimize ederek şekillendirme sürecinin geliştirilmesine katkıda bulunmakta ve kaynak verimliliği sağlamaktadır[7].



Şekil 1. Baskı Plakası Kuvveti ve şekillenme derinliği ilişkisinin şematik gösterimi

Otomotiv endüstrisinde kullanım oranlarının gittikçe arttığı ultra yüksek mukavemetli sacların deneysel safhaya geçmeden şekillendirme hatalarını en aza indirmek ve SÇO artırmak için baskı plakası kuvvetinin tespit edilmesi gerekmektedir. BPK, çevresel basınç gerilmelerine bağlı olarak kırışıklıkların oluşmasını önlemek için, deney parçasının flanşına uygulanmalıdır[8].

Şekil 1’de BPK’nin derin çekme işlemindeki etkisini göstermektedir. BPK çok yüksekse, çekme işlemi sırasında, kabın yan duvarı kırılmadan önce az miktarda gerilebilir; bu, yırtılma limiti olarak belirtilir. BPK azaldıkça, flanş bölgesinde kırışmalar görülür buda çekmeyi zorlaştırıp sacın kopmasına neden olur[8].

Yagami vd. yaptıkları çalışmada, baskı plakası kuvvetinin hareketinin kontrol edilebilirliği için önerdikleri bir algoritma ile kırışıklık sınırının yanı sıra kırışıklık davranışı perspektifinden ince bir sacın dairesel bir kabın derin çekilmesi işlemine yönelik olarak hem deneysel hem de simülasyon programı kullanarak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) çalışmasının sonucunda, baskı plakası kuvvetinin kontrolünün bir sonucu olarak, sünek hasar davranışının azalması nedeniyle, derin çekilebilirliğin geliştirilebileceğini göstermişlerdir[9].

Demirci vd. yaptıkları çalışmada, bir AlMg alaşımı olan AA5754-O malzemesini kare derin çekme işleminde baskı plakası kuvvetinin et kalınlığına olan etkisini deneysel çalışmanın ardından simülasyon programı olan LS-DYNA programını kullanarak karşılaştırmıştır. Sabit baskı plakası kuvveti ile çekilen kapların duvar kalınlıkları, aynı koşullar altında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi sonuçları ile genellikle % 85 civarında bir uyum sergilediğini göstermişlerdir. BPK’nin 1.3 MPa ve altındaki basınçlarda kırışıklıklar görülürken, BPK’nin 18 MPa’lı aşmasıyla kopmaların görüldüğünü belirlemişlerdir[10].

Yoshihara vd. yaptıkları çalışmada, bir magnezyum alaşım malzeme kullanarak dairesel derin çekme işlemini araştırmışlardır. Sabit BPK koşullarına kıyasla, derin çekme işlemi sırasında Magnezyum alaşımı sac’ın SÇO’sunu BPK kontrol tekniği kullanılarak geliştirmişler ve SEY simülasyonu kullanılarak doğrulamışlardır[11].

Özek ve Taşdemir AA 5754-O alaşımının ılık derin çekilmesi üzerine deneysel ve sayısal olarak 25°C, 100°C, 175°C ve 250°C sıcaklıklarında, 3600 N baskı plakası kuvvetinde gerçekleştirdikleri bir araştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, sıcaklığın artması ile et kalınlığı değişiminin daha homojen hale geldiği, SÇO arttığı, mikrosertlik, gerilme ve zımba kuvvetinin azaldığını belirlemişlerdir[12].

Özek ve Taşdemir'in bir başka çalışmasında ise AA 5754-O alaşımının oda sıcaklığı, 100°C, 175°C ve 250°C sıcaklıklarda kalıp ve baskı plakası yüzeylerine 0°, 5°, 10° ve 15°'lik açılar vererek derin çekmeye olan etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda, sıcaklığın etkisiyle baskı plakası kuvvetindeki artışa rağmen et kalınlığı değişiminin azaldığını, sıcaklık ve kalıp yüzey açısı ile birlikte malzeme akışının kolaylaştığını, kalınlık dağılımının daha homojen hale geldiğini ve sıcaklığın artmasıyla geri esnemenin azaldığını belirlemişlerdir[13].

Yukarıdaki çalışmalara ek olarak birçok araştırmacı derin çekme işleminde değişken BPK'nin matematiksel olarak hesapladığı ve hesaplamaların sonucundaki elde ettikleri BPK sonuçlarını SEY analiz programlarında kullanarak doğruluğunun ispatlandığı çalışmalarda yapılmıştır[14-17].

Bu çalışmada, Stampack analiz programı kullanılarak otomotiv endüstrisinde kullanımları her geçen gün artmakta olan DP600 sac malzemenin şekillendirilebilirliği etkileyen önemli parametrelerden olan sabit baskı plakası kuvveti ile değişken baskı plakası kuvvetinin şekillendirmeye olan etkileri karşılaştırılmış değişken baskı plakası kuvvetinin önemi vurgulanmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Sac metal malzemeleri şekillendirme işlemine geçmeden önce daha henüz tasarım aşamasındayken Autoform, Dynaform, Simufact, LS-DYNA ve Stampack vb. analiz programlarının kullanımı hem zaman hem de maliyet açısından önemli tasarruf sağlayacaktır. Çalışmada, 1 mm kalınlığında ticari olarak temin edilmiş olan DP600 malzeme kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri Stampack programında yapılmıştır.

Yapılan bu analizlerin doğruluk oranlarını % 90'lara hatta % 95'lere çıkarmak için programa hem malzeme özelliklerinin hem de deney parametrelerinin eksiksiz girilerek tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan DP600 çeliğinin 100 kN luk çekme test cihazıyla yapılan testler sonucunda elde edilen mekanik özellikleri Tablo 1'de ve malzemeye ait kimyasal bileşimleri ise Tablo 2'te verilmiştir.

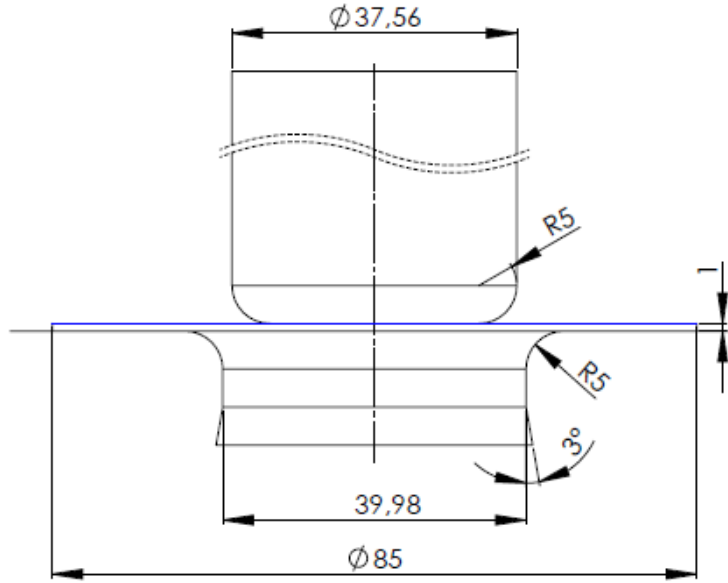
Tablo 1. Malzemenin mekanik özellikleri.

Malzeme		Mekanik özellikler				
Standart	Kalite	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama %	Malzeme izotropik kabul edilmiştir	Sürtünme
Docol CR350Y600T-DP	Docol 600DP	685,437	481,303	16	R=1	$\mu=0,15$

Tablo 2. Malzemenin kimyasal bileşim özellikleri

Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	V
	Karbon	Silisyum	Manganez	Fosfor	Kükürt	Alüminyum	Titanyum	Niobyum	Vanadyum
Docol 600DP	0,093	0,225	0,823	0,012	0,012	0,053	0,007	0,014	0,007

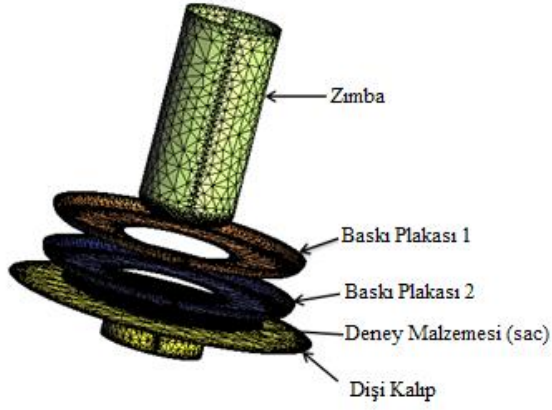
İlk olarak test ve deney parçasına oda sıcaklığı şartlarında çekme testleri yapılmıştır. Daha sonra alt kalıp, zımba, baskı plakası ve sac malzemelerden oluşan kalıp unsurları bilgisayar ortamında modellenmiştir (Şekil 2).



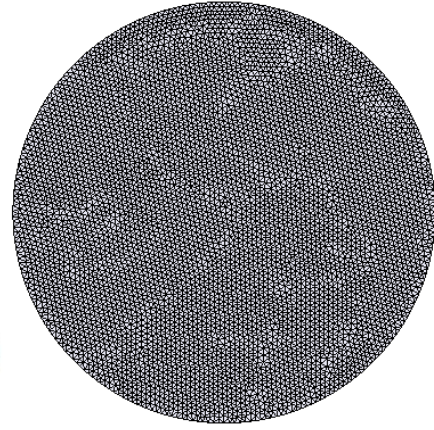
Şekil 2. Analizlerde kullanılan derin çekme deney düzeneği.

A. SONLU ELEMENLAR ANALİZLERİ (FİNİTE ELEMENT ANALYSIS)

Çalışmada sonlu elemanlar analizleri metal şekillendirme için tasarlanmış olan Stampack yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada öncelikle çekme testlerinden elde edilen verilen sisteme girilmiştir. Daha sonra yuvarlak derin çekme prosesi için tasarlanan kalıp takımları ve sac (deney numunesi) malzemenin ağ yapısı oluşturulmuştur. Kalıp takımlarının ağ yapısı Şekil 3'te gösterilmiştir. Son olarak sac numunelerin ağ yapısının oluşturulmasıyla işlem parametreleri ve sınır koşulları tanımlanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan analiz hesaplama parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Yuvarlak kesitli derin çekme prosesi simülasyonlarında 1 mm kalınlığında ve ilkel pul çapı 70 mm numuneden başlayarak 2 şer mm artırılarak 82 mm çapa kadar DP600 sac malzemeler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan sac malzemeye ait eleman boyutu 1mm olarak belirlenmiştir ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Her çaptaki malzeme için optimum baskı plakası kuvveti tespit edilmiş. Şekillendirme sonucunda kalınlık incelmesi oranı belirlenmiş, şekillendirme sınır diyagramları çizilmiş ve sınır çekme oranı belirlenmiştir.



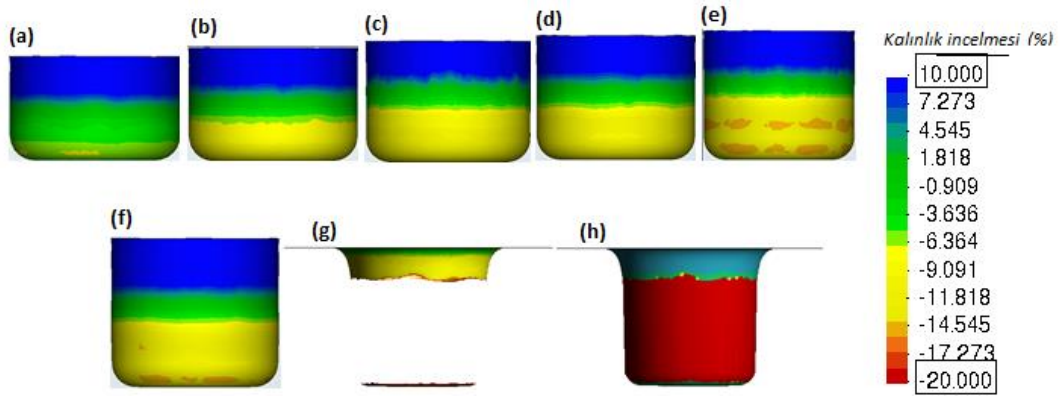
Şekil 3. Yuvarlak derin çekme prosesi kalıp takımı ağ yapısı.



Şekil 4. İlkel pul geometrisine ait ağ yapısı.

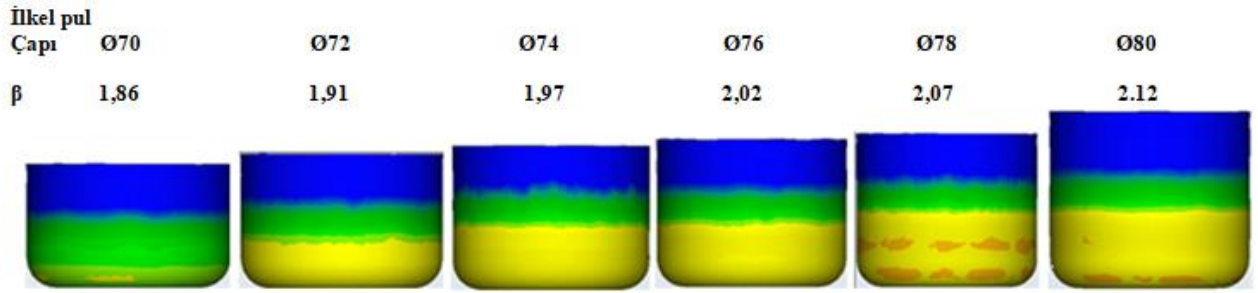
III. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada kullanılan DP600 malzeme için Stampack programı kullanılarak sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucu elde edilen kalınlık değişimleri Şekil 5'te, şekillendirme sınır oranı Şekil 6'ta ve şekillendirme sınır eğrisi (ŞSE) emniyet bölgeleri ise Şekil 7'de verilmiştir. Her çaptaki sac numune için optimum baskı plakası kuvveti tespit edilmiş ve Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 5. Derin çekme sonucunda elde edilen numunelere ait kalınlık incelmeleri a) Çap 70 mm b) Çap 72 mm c) Çap 74 mm d) Çap 76 mm e) Çap 78 mm f) Çap 80 mm g) Çap 82 mm h) Çap 82 mm.

Şekil 5'e baktığımızda ilkel pul çapı 70 mm numunedan başlayarak 2 şer mm artırılarak yapılan derin çekme deneylerinden elde edilen görüntüler incelendiğinde sarı renkli alandan itibaren, numunenin incelmeye başladığını göstermektedir. Derin çekme işleminde ilk incelen noktaların zimba radius bölgelerinin olduğu bilinmektedir. Bu simülasyon çalışmasında da sarı bölgeler zimba radius bölgesinden başlayarak ilkel pul çapı arttıkça artmış ve Şekil 5.g ve h'de görüldüğü gibi ilkel pul çapı 82 mm olan numunede yırtılmıştır.



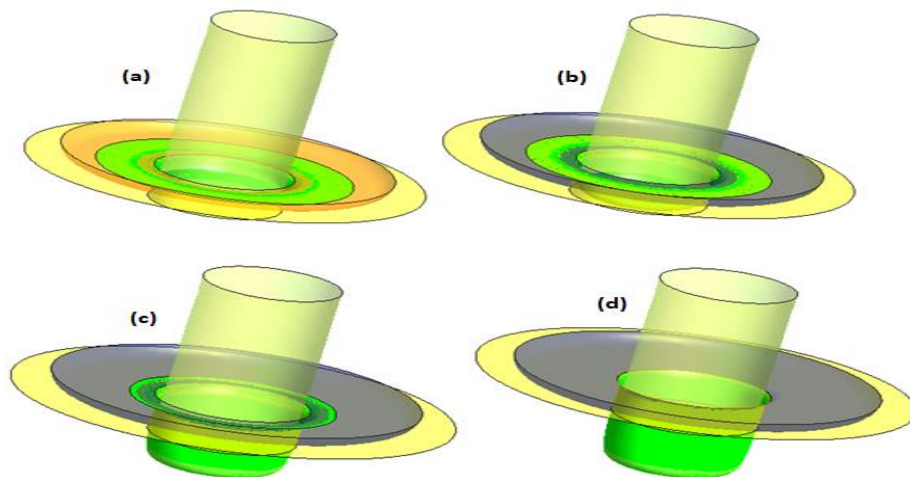
Şekil 6. DP600 malzemeye ait sınır çekme oranı.

Optimum BPK değerleriyle şekillendirilmiş DP600 malzemesinin limit çekme oranı simülasyon programıyla belirlenmiş ve şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi maksimum 80 mm çapındaki numunenin çekilebilmiş ve sınır çekme oranının 2,12 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Derin çekme sonuçlarından elde edilen optimum BPK değerleri.

İlkel Pul Çapı	BPK 1 (kN)	BPK 2 (kN)	Başarı Durumu
70 mm	6,864	-	Başarılı
72 mm	19,613	-	Başarılı
74 mm	25,497	-	Başarılı
76 mm	29,419	-	Başarılı
78 mm	30,400	-	Başarılı
80 mm	29,419	24,516	Başarılı
82 mm	29,419	24,516	Başarısız

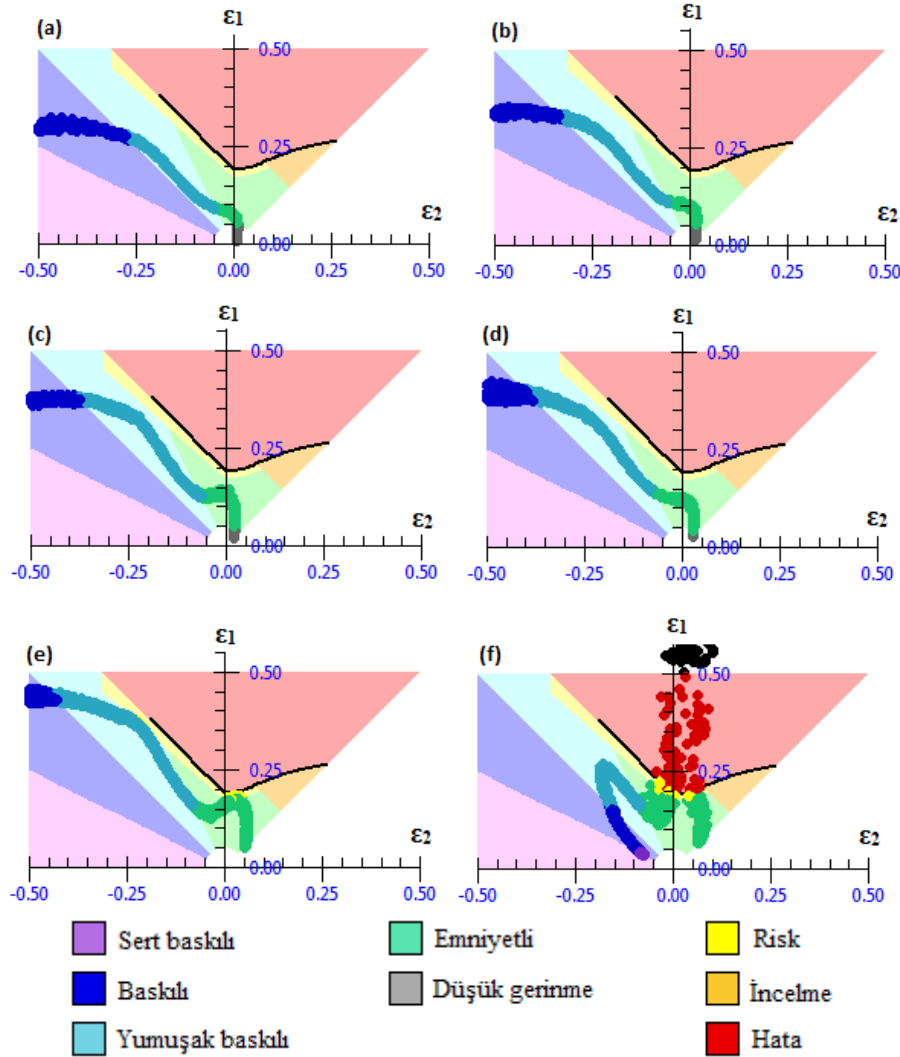
Derin çekme işlemlerinde BPK şekillendirmeye önemli derecede etkilemektedir. BPK yetersiz geldiğinde kırışıklık, BPK fazla geldiğinde ise yırtılmalar oluşmaktadır. Bu çalışmada ilkel pul çapı 70 mm numune 2,941 kN (kırışıklık oluşturarak) BPK değerinden başlayarak her bir çap için BPK 0,980 kN artırarak yeterli oluncaya kadar yani kırışıklığın oluşmadığı ve BPK'ni yenemediği değere ulaşmasıyla Tablo 3'te verilen optimum BPK değerleri bulunmuştur.



Şekil 7. Değişken baskı plakası kuvveti kullanılmasının aşamaları a) BPK 29,419 kN b) BPK 25,516 kN c) BPK 25,516 kN d) BPK 25,516 kN.

İlk etapta ilkel pul çapı 80 mm olan numune çeşitli kuvvetlerde tek BPK kullanılarak derin çekmeye çalışılmıştır. Fakat başarılı bir derin çekme işlemi gerçekleştirilememiştir. Pres tezgâhlarında programlanabilir mantıksal kontrol'ün (PLC) olması oransal güç kontrol mekanizmasının kullanılmasına imkân vermektedir. Bu da bize zımba hareketine bağlı olarak değişken oranlarda BPK kullanımı imkânı verecektir. Başarılı bir şekilde derin çekme yapılamayan 80 mm çapındaki numune için değişken baskı plakası kuvveti kullanılmıştır. Şekil 6'da derin çekme esnasında değişken BPK'nin nasıl kullanıldığı aşamalarını gösterilmektedir. Bu gösterimde derin çekme işleminde başlangıçta Şekil 7.a'da BPK 29,419 kN olarak işleme başlanmıştır. Zımba hareketine bağlı olarak Şekil 7.b'den itibaren BPK derin çekme esnasında 29,419 kN'dan 24,516 kN'a düşürülmüş ve Şekil 7.c ve d'de BPK 24,516 kN olarak derin çekme işlemi tamamlanmıştır. Sonuçta Şekil 5.f'de görüldüğü gibi başarılı bir şekilde şekillendirilmiştir.

Şekil 8'de ilkel pul çapı 72 mm numuneden başlayarak 2 şer mm artırılarak gerçekleştirilen numunelere ait ŞSE verilmiştir. Şekil 8.a, b, c, d, e, Başarılı derin çekme işleminin gerçekleştirildiğini fakat Şekil 8.f'de ise 82 mm çapındaki numune ŞSE'nin üzerine çıkmıştır. Bunun sonucunda da numunede Şekil 5.g ve h'da görüldüğü gibi kopma meydana gelmiştir. Başarılı bir şekillendirme yapılamamıştır.



Şekil 8. Derin çekme sonucunda elde edilen numunelere ait ŞSE a) Çap 72 mm b) Çap 74 mm c) Çap 76 mm d) Çap 78 mm e) Çap 80 mm f) Çap 82 mm.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, Stampack analiz programı kullanılarak DP600 çift fazlı sacın şekillendirilebilirlik simülasyonu yapılmış, değişken baskı kuvvetinin şekillendirmeye olan etkisi araştırılmış, optimum BPK tespit çalışmaları gerçekleştirilmiş ve sınır çekme oranı belirlenmiştir. Analiz sonuçlarına bakıldığında bir malzemeyi şekillendirirken kırışıklığı ve yırtılmayı önlemek için optimum BPK uygulamalarının mutlaka simülasyon programlarıyla yapılması gerekmektedir. Pres tezgâhlarındaki oransal güç kontrol sisteminin kullanılması yapılan çalışmada da görüldüğü gibi limit çekme oranı 2,07'den 2,12'ye yükseltmiştir. Şekillenmiş her çaptaki numuneye ait kalınlık incelmesi ve şekillendirme sınır diyagramı sayesinde malzemenin şekillendirilebilirliği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmayı, 2016.06.05.457 proje numaralı Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (DÜBAP) ile destekleyen Düzce Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederiz.

V. KAYNAKLAR

- [1] C. Özek ve E. Ünal, “The effect of die / blank holder angles on limit drawing ratio and wall thickness in deep drawing of square cups,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 27, no. 3, pp. 615–622, 2012.
- [2] S. Keeler, M. Kimchi ve P. J. Mooney, “Advanced high-strength steels application guidelines version 6.0” no. September, p. 314, 2017.
- [3] J. Venezuela, J. Blanch, A. Zulkipli, Q. Liu, Q. Zhou, M. Zhang ve A. Atrens, “Further study of the hydrogen embrittlement of martensitic advanced high-strength steel in simulated auto service conditions,” *Corrosion Science*, vol. 135, no. February, pp. 120–135, 2018.
- [4] Q. Liu, Q. Zhou, J. Venezuela, M. Zhang ve A. Atrens, “Hydrogen influence on some advanced high-strength steels,” *Corrosion Science*, vol. 125, no. March, pp. 114–138, 2017.
- [5] C. M. Tamarelli, “AHSS 101: the evolving use of advanced high-strength steel for automotive applications,” *Steel Market Development Institute*, p. 42, 2011.
- [6] J. Venezuela, Q. Zhou, Q. Liu, M. Zhang ve A. Atrens, “Influence of hydrogen on the mechanical and fracture properties of some martensitic advanced high strength steels in simulated service conditions,” *Corrosion Science*, vol. 111, pp. 602–624, 2016.
- [7] A. O. Özdemir, H. Şirin ve Ç. Karataş, “Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik saclardaki alaşım elementlerinin şekillendirmeye etkisinin araştırılması,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Part C*, vol. 5, no. 4, pp. 109–119, 2017.
- [8] E. Kayhan, “The development of a method to improve the limit drawing ratio of blanks using preferential heating,” Yüksek Lisans, İmalat Mühendisliği, Atılım Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2015.

- [9] T. Yagami, K. Manabe ve Y. Yamauchi, “Effect of alternating blank holder motion of drawing and wrinkle elimination on deep-drawability,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 187–188, pp. 187–191, 2007.
- [10] H. I. Demirci, C. Esner ve M. Yasar, “Effect of the blank holder force on drawing of aluminum alloy square cup: Theoretical and experimental investigation,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, no. 1–3, pp. 152–160, 2008.
- [11] S. Yoshihara, K. I. Manabe ve H. Nishimura, “Effect of blank holder force control in deep-drawing process of magnesium alloy sheet,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, no. 3, pp. 579–585, 2005.
- [12] C. Özek ve V. Taşdemir, “Alüminyum alaşımının derin çekilmesine sıcaklığın etkisinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması” *Politeknik Dergisi*, c.21, s.1, ss. 193-199, 2018.
- [13] C. Özek ve V. Taşdemir, “AA 5754-O alaşımının ılık derin çekilmesi üzerine kalıp yüzey açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisinin deneysel araştırılması” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c.32, s.1, ss. 193-201, 2017.
- [14] S. Candra, I. M. L. Batan, W. Berata ve A. S. Pramono, “Analytical study and FEM simulation of the maximum varying blank holder force to prevent cracking on cylindrical cup deep drawing,” *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 548–553, 2015.
- [15] I. Aminzahed, M. Mosavi Mashadi ve M. R. V. Sereshk, “Investigation of holder pressure and size effects in micro deep drawing of rectangular work pieces driven by piezoelectric actuator,” *Materials Science and Engineering C*, vol. 71, pp. 685–689, 2017.
- [16] Y. Feng, Z. Zhang, G. Tian, Z. Lv, S. Tian ve H. Jia, “Data-driven accurate design of variable blank holder force in sheet forming under interval uncertainty using sequential approximate multi-objective optimization,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 86, pp. 1242-1250, 2018.
- [17] P. Kováč ve V. Tittel, “Blank holder force optimization of hemispherical product using numerical simulation In,” *Materials science and technology*, No. 5, pp. 5–10, 2010.