

Finite Element Modeling of Stretch Drawing Process Using Bake Hardenable Steels

Aysema Ünlü*, Ezgi Kap+, Emre Esener*, Mehmet Fırat#

*Bilecik Şeyh Edebali University, Mechanical Engineering Department, Bilecik, Turkey
emre.esener@bilecik.edu.tr

+ Coşkunöz A.Ş., Makina Kalip Factory, Process Department, Bursa, Türkiye

Sakarya University, Mechanical Engineering Department, Sakarya, Turkey
firat@sakarya.edu.tr

Abstract— In this study, stretch drawing behaviors of bake hardenable BH210, BH280, and BH340 steels with 1 mm gauge thickness are investigated. Square drawing simulative test is used as stretch drawing process. Three different blank size were used in the study to evaluate blank size effect. In finite element analyses, Power Law, Hill-48, and Barlat-89 plasticity models are used to determine the prediction performances of the plasticity models. As a result, it is seen that, increasing blank size caused a decreasing failure height in stretch drawing. In finite element analyses, it is seen that Barlat-89 and Hill-48 plasticity models are more compatible with the experimental results when compared to Power Law model.

Keywords— Bake hardenable steels, Stretch drawing, Finite element analyses, Plasticity modeling

I. GİRİŞ

Günümüzde otomotiv endüstrisi, araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin yoğun olarak sürdürüldüğü sektörlerin başında gelmektedir. Otomobil tasarımı ve üretimi; yolcu güvenliği, araç performansı ve yakıt tasarrufu gibi etkenlerle şekillenmektedir. Ortalama iki ya da üç yılda bir otomobillerde komponent güncellemesinin yapıldığı düşünüldüğünde üreticilerin de bu kapsamda rekabet edebilir durumda olması beklenmektedir. Otomobil üreticilerinin kullanılan malzemelerden beklentisi ağırlık/dayanım oranlarının iyi olması bunun yanı sıra yüksek şekillendirilebilirlik ve darbe sönümleme yeteneklerinin gelişmiş olmasıdır. Bu kapsamda beklentileri karşılayabilmek adına, otomobillerde yüksek oranda sac metaller kullanılmaktadır [1]. İnce malzemelerle çalışıldığından ve karmaşık ürün formları elde edilmesi gerektiğinden sac metal şekillendirme prosesleri genelde karmaşık prosesler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle üretim sırasında meydana gelebilecek hataların tasarım aşamasında tahmin edilip telafi edilmesi ile beraber hatasız ürün formu elde etmek mümkün olmaktadır. Böylece zaman ve maliyet kayıplarının önüne geçilmektedir. Günümüzde bu amaçla en sık kullanılan yöntem sonlu elemanlar analizidir [2]. Günümüzde sac metal üretiminde birçok çelik sınıfı kullanılmaktadır. Çelikler için en yaygın sınıflandırma; yumuşak çelikler (Mild Steels), geleneksel yüksek mukavemetli çelikler (High Strength Steel) ve günümüzde üç jenerasyonu bulunan gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler (Advanced High Strength Steels) şeklinde yapılmaktadır [3].

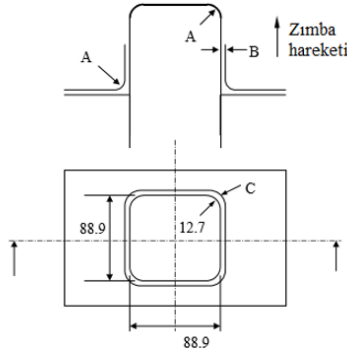
Yumuşak çeliklerin düşük maliyet, iyi şekil alma, kaynak edilebilirlik, boyadan sonra yüksek kaliteli görünüm ve genel imalat kolaylıklarının birleşimi gibi avantajları bu malzeme grubunu yaygınlaştırmada katkıda bulunmuştur. Yüksek mukavemetli çeliklerin yumuşak çeliklere göre çekme mukavemeti ve hafifleme potansiyeli daha yüksekken şekil bozukluğu (geri esneme) açısından değerlendirildiğinde ise bir dezavantaja sahip olduğu görülmektedir. Geliştirilmiş yüksek dayanımlı çeliklerin ise yumuşak ve yüksek mukavemetli çeliklere göre çekme mukavemeti, hafifleme potansiyeli, şekil alma kabiliyeti daha yüksektir [4]. Otomobil dış gövde komponentlerinin dayanımı, parçaların kalınlığı, kullanılan malzeme ve geometrik konfigürasyonunun ayarlanmasıyla sağlanabilir. Aynı zamanda bu komponentlerden düşük ya da yüksek şiddette darbelere dayanıklı olması beklenir. Darbe direncinin iyileştirilmesi amacıyla akma mukavemetini arttırmak bir çözüm olsa dahi, presleme proseslerinde yüzey bozulmalarına karşı yüksek yüzey kalitesinin sağlanabilmesi için akma mukavemetinin 240 MPa'nın altında tutulması gerekmektedir [5]. Bu gereksinimleri karşılamak için, üretim sırasında düşük akma dayanımına sahip, işletme koşullarında ise yüksek akma dayanımı gösteren fırınlama ile sertleştirilebilir (BH) çelik saclar geliştirilmiş ve ticarileştirilmiştir. BH çelikleri temel bir ferritik mikroyapıya ve katı çözümlü güçlendirmesine sahiptir. Bu çeliklerin benzersiz bir özelliği, çelik üretimi sırasında karbonu çözümlü içinde tutmak ve daha sonra bu karbonun boya pişirme sırasında veya oda sıcaklığında birkaç hafta çözümlü dışına çıkmasını sağlamak için tasarlanmış kimyasal işlemler uygulanmasıdır. BH çeliğinin temel özelliği şekillendirilebilirlik yeteneği azalmadan göçük (çentik) direncinin artmasıdır. Otomobillerde yaygın kullanım yeri, otomobil dış gövde panelleridir [6]. Otomobil dış gövde komponentleri için sertlik ve çentik direnci iki önemli kriterdir. Literatürde bu doğrultuda yapılan çalışmalar incelendiğinde komponentlerin tasarımı ve kullanılan malzemelere göre genellikle sertlik ve çentik özelliklerinin değişimi incelenmiştir [7-9].

Bu çalışmada ise fırında sertleşebilen çeliklerden BH210, BH280 ve BH340 çeliklerinin gerdirme altında çekme performansları sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Bu anlamda üç farklı açınım boyutu ve üç farklı plastisite modeli kullanılarak hem boyut faktörü hem de plastisite modellerinin tahmin performansları değerlendirilmiştir.

II. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında otomobil dış gövde komponentlerinin üretiminde kullanılan fırında sertleşebilen (BH) çeliklerin üç kalitesinin (BH210, BH280, BH340) şekillendirilebilirlik davranışı incelenmiştir. Malzemenin şekillendirilebilirlik davranışının incelenmesinde Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsünün teknik raporunda kullanılan kare çekme prosesi kullanılmıştır [10]. Şekil 1.'de çalışılan kare çekme prosesi kalıp takımının teknik resmi görülmektedir.

Çalışmada kare çekme prosesinde çalışılan BH210, BH280 ve BH340 çeliğinin malzeme özellikleri aşağıda Tablo 1.'de verilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan proses parametreleri Tablo 2.'de verilmiştir. Malzeme anizotropisinin şekillendirilebilirlik davranışı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla plastisite modellerinden Power Law, Hill-48 ve Barlat-89 malzeme modelleri ile çalışılmıştır.



Şekil 1. Kare çekme prosesi kalıp takımı teknik resmi [10]

TABLO I
BH210, BH280 VE BH340 ÇELİKLERİNE AİT MEKANİK ÖZELLİKLER [10]

Malzeme	BH210	BH280	BH340
Elastisite Modülü (GPa)	200	227	216
Akma Gerilmesi (MPa)	240.5	311.6	250
Pekleşme Üsteli (n)	0.17	0.17	0.21
Mukavemet Katsayısı (K) (MPa)	562.4	641	600
r_0	1.680	1.645	1.667
r_{45}	1.502	1.143	1.226
r_{90}	2.333	1.890	2.109

TABLO III
ÇALIŞMA KAPSAMINDA KULLANILAN PROSES PARAMETRELERİ

Sac Kalınlığı	1 mm
Şekillendirme Mesafesi	50 mm
Parça Tutucu Kuvvet	94 kN
Şekillendirme Hızı	2000 mm/sn

A. Power Law Plastisite Modeli

İzotropik malzeme-izotropik pekleşme kuralı kabulü yapan plastisite modeli (Power Law) genellikle basit bir model olup Holloman [11] ifadesi ile temsil edilebilmektedir. Holloman ifadesinde gerilme ve plastik gerinim arasındaki ilişki Denklem (1)'deki şekilde yazılabilir.

$$\sigma = K \cdot \epsilon_p^n \quad (1)$$

Burada K, mukavemet katsayısını ve n, pekleşme üstelini temsil etmektedir.

B. Hill-48 Plastisite Modeli

R.Hill, 1948 yılında von Mises kriterini genelleştirerek bir anizotropik akma kriteri geliştirmiştir [12]. Malzemenin üç ortogonal simetri düzleminde anizotropiye sahip olması gerekmektedir. Kriter bir ikinci dereceden bir fonksiyon olarak şu şekilde yazılabilir.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 \quad (2)$$

Burada f, akma fonksiyonu, F, G, H, L, M, N malzemenin anizotropi parametreleri ve x, y, z asal anizotropik eksenlerdir. Sac metal şekillendirme gibi düzlem gerilme durumları için ise Hill-48 akma kriteri şu hali alır,

$$2f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (3)$$

C. Barlat-89 Plastisite Modeli

Barlat ve Lian (1989), Hosford akma kriterinin izotrop malzemeler için daha genel bir halini asal eksenlerle çakışık olma zorunluluğu bulunmayan bir x, y, z koordinat sisteminde önermişlerdir [13].

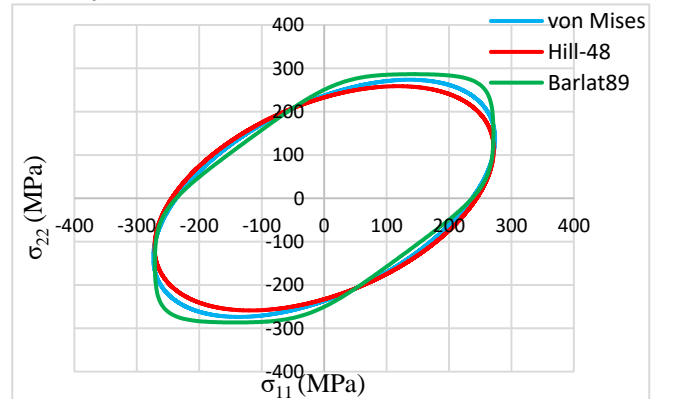
$$f = a|k_1 + k_2|^M + a|k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\sigma_e^M \quad (6)$$

Burada k_1 ve k_2 parametreleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

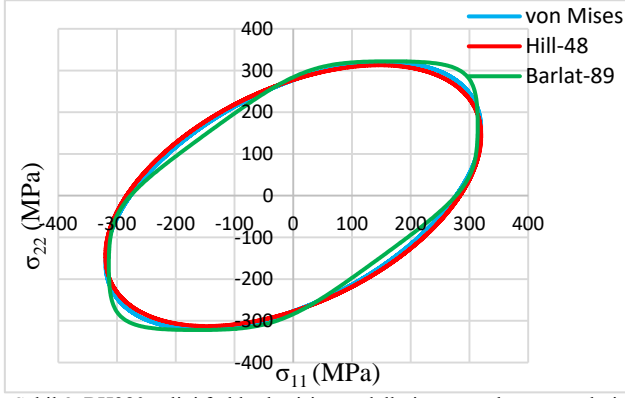
$$k_1 = \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2}, k_2 = \left[\left(\frac{\sigma_{11} - h\sigma_{22}}{2} \right)^2 + p^2\sigma_{12}^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Burada a, c, h ve p parametreleri Lankford parametrelerine bağlı katsayılardır. Barlat akma kriteri genellikle alüminyum alaşımlarından yüksek anizotropiye sahip olan malzemeler için kullanılır. Bu kriterin dezavantajı ise iki eksenli yüklenme durumları için hassas sonuç verememesidir.

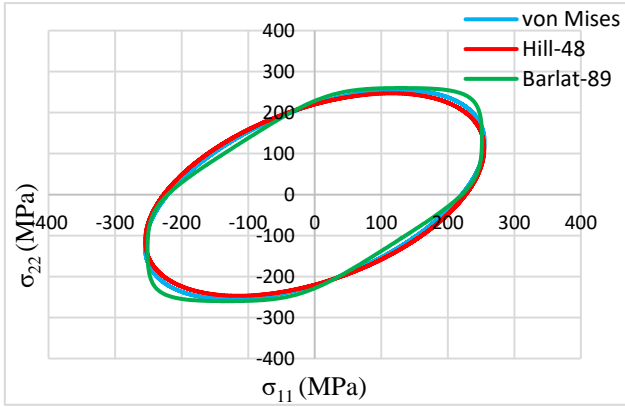
Bu çalışma kapsamında yukarıda anlatılanlar ışığında plastisite modellerinden Power Law, Hill-48 ve Barlat-89 modelleri kullanılarak BH210, BH280 ve BH340 malzemelerinin akma yüzeyleri hesaplanmış ve Şekil 2-4'te gösterilmiştir.



Şekil 2. BH210 çeliği farklı plastisite modellerine göre akma yüzeylerinin kıyaslanması



Şekil 3. BH280 çeliği farklı plastisite modellerine göre akma yüzeylerinin kıyaslanması



Şekil 4. BH340 çeliği farklı plastisite modellerine göre akma yüzeylerinin kıyaslanması

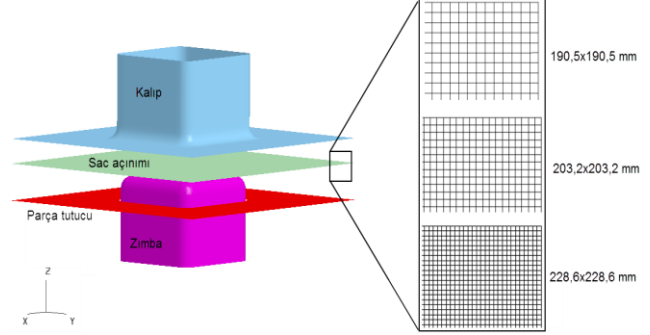
III. SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

Çalışmanın bu adımında Bölüm II’de anlatılan plastisite modelleri kullanılarak fırında sertleşebilen çeliklerin 3 farklı kalitesine ait (BH210, BH280, BH340) gerdirme altında çekme proseslerinin sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda şekillendirme prosesi olarak kare kutu çekme benzetim testi kullanılmıştır. Şekillendirme işlemleri üç farklı sac boyutunda (190,5x190,5, 203,2x203,2, 228,6x228,6 mm) gerçekleştirilmiştir. Tüm operasyonlar 94 kN parça tutucu kuvvet altında yapılmıştır. Şekillendirme sonrasında elde edilen yırtılma yükseklikleri sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır.

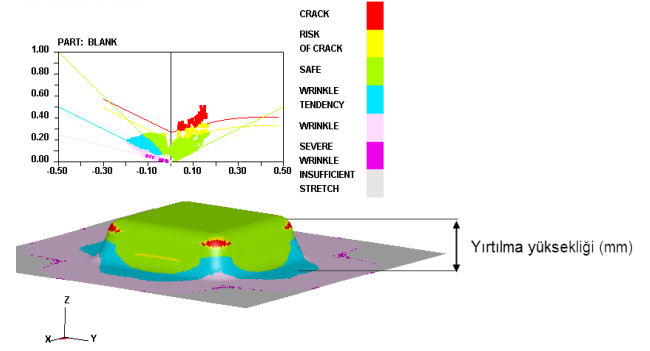
Çalışma kapsamındaki tüm sonlu elemanlar analizleri Dynaform ticari yazılımında gerçekleştirilmiştir. Tüm modeller yüzey olarak elde edilmiş ve simülasyonlarda kabuk eleman kullanılmıştır. Kabuk eleman formülasyonu olarak

“Belystchko-Tsay”, integrasyon nokta sayısı ise “5” olarak tercih edilmiştir. Kare kutu çekme prosesinin sonlu elemanlar modeli ve farklı sac açınımlarına ait ağ yapıları Şekil 5’te verilmiştir. Malzemelerin plastik davranışının modellenmesinde ise Power Law, Hill-48 ve Barlat-89 modelleri olmak üzere üç farklı akma kriteri kullanılarak modellerin tahmin hassasiyeti de değerlendirilmiştir.

Her bir plastisite modeli üç farklı kalitede ve üç farklı sac açınımlarındaki geometrilere uygulanmış ve yırtılma yükseklikleri sonlu elemanlar analizleri ile elde edilerek deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde yırtılma yüksekliği malzemelerin şekillendirme sınır diyagramlarında yırtılmanın gözlemlendiği andaki çekme yüksekliği olarak alınmıştır (Şekil 6). Yapılan karşılaştırma sonuçları Tablo 3’de verilmiştir.



Şekil 5. Kare kutu çekme prosesi sonlu elemanlar modeli ve sac açınımlı ağ yapıları



Şekil 6. Sonlu elemanlar analizlerinde yırtılma yüksekliği tespiti

TABLO III
KARE KUTU ÇEKME İŞLEMİ SONRASINDA YIRTIлма YÜKSEKLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Yırtılma Yüksekliği (mm)				
BH210				
Açınım (mm)	PL	H-48	B-89	Den.
190,5x190,5	33,66	X	X	49,86
203,2x203,2	29,35	X	33,61	49,74
228,6x228,6	25,03	33,61	25,02	27,79
BH280				
Açınım (mm)	PL	H-48	B-89	Den.
190,5x190,5	37,89	X	X	49,86
203,2x203,2	29,36	X	29,34	49,71
228,6x228,6	25,07	29,32	25,01	24,72
BH340				
Açınım (mm)	PL	H-48	B-89	Den.
190,5x190,5	X	X	X	49,87
203,2x203,2	33,68	X	42,21	31,09
228,6x228,6	25,00	33,60	29,34	25,64

*PL: Power Law, H-48: Hill-48, B-89: Barlat-89, Den.: Deneysel, X: 50 mm çekme mesafesinde yırtılma gözlemlenmedi

IV. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada fırında sertleşebilen çeliklerin gerdirme altında çekme davranışları sonlu elemanlar analizleri ile değerlendirilmiştir. Bu kapsamda üç farklı kalitede (BH210, BH280, BH340) çelik malzeme kare kutu çekme operasyonu ile gerdirme altında çekilerek yırtılma yükseklikleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde Power Law, Hill-48 ve Barlat-89 olmak üzere üç farklı plastisite modeli kullanılarak bu modellerin tahmin performansları da incelenmiştir. Ayrıca her form operasyonu için 190,5x190,5, 203,2x203,2 ve 228,6x228,6 mm olmak üzere üç farklı sac açılımı da kullanılarak açılım boyutunun çekme derinliğine etkisi de değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, deneysel çalışmada 190,5x190,5 mm açılımında her üç kalitedeki BH çeliklerin benzer yırtılma yüksekliklerinin olduğu bilinmektedir. Sonlu elemanlar analizi sonuçları incelendiğinde ise Hill-48 ve Barlat-89 modellerinin yırtılma yüksekliklerini 50 mm çekme mesafesinde öngörmediği fakat şekillendirme sınır diyagramları incelendiğinde yırtılma bölgesine çok yakın durumda oldukları görülmektedir. Bu anlamda en küçük sac açılımında Hill-48 ve Barlat-89 modellerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu söylenebilmektedir. İkinci açılım boyutu olan 203,2x203,2 mm kare formu incelendiğinde, BH210 ve BH280 çeliklerinin deneysel olarak 50 mm'ye yakın bir çekme derinliğinde yırtıldığı, BH340 kalitesinin ise bu açılım boyutunda 31,09 mm mertebesinde yırtıldığı görülmektedir. Sonlu elemanlar analizlerinde ise BH210 ve BH280 kaliteleri için Hill-48 modeli deneysel verilerle uyum sağlarken, Power Law ve Barlat-89 modelleri deneysel verilere göre çok daha erken seviyelerde yırtılmalar öngörmüştür. BH340 kalitesi için ise Hill-48 modeli yine 50 mm çekme derinliğinde yırtılma öngörmezken Barlat-89 modeli yaklaşık 40 mm'de, Power Law modeli ise yaklaşık 34 mm'de yırtılma öngörmüştür. Bu anlamda en başarılı tahmin BH340 çeliği için Power Law modeli tarafından gerçekleştirilmiştir. En büyük açılım boyutu olarak 228,6x228,6 mm formu incelendiğinde deneysel olarak her malzeme için diğer boyutlara göre çok daha düşük derinliklerde yırtılmanın olduğu görülmektedir. Benzer durum sonlu elemanlar analizleri ile de doğrulanmaktadır. Plastisite modelleri açısından bir değerlendirme yapıldığında her üç malzeme için de Hill-48 modelinin diğer modellere göre çekme derinliğini deneysel verilerden daha yukarıda öngördüğü tespit edilmiştir. Bu açılım boyutu için Barlat-89 modelinin her üç kalitedeki BH çelik için deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, sac açılım boyutunun büyümesi her üç BH çelik için de şekillendirilebilirliği düşürmüştür. Bu durum parça tutucu kuvvetin temas alanının sac açılımına paralel olarak artması sonucu gerdirme etkisinin de artmasından kaynaklanmaktadır. Daha fazla gerdirilen büyük açınımlar çekme mesafelerinde bir azalma ile karşılaşmışlardır. Tahmin performansı açısından sonlu elemanlar analizlerinde anizotropinin önemi açıkça görülmektedir. Malzemeyi izotropik kabul eden Power Law modelinin her durum altında

anizotropik modellere göre daha başarısız olduğu tespit edilmiştir. Bunun dışında Hill-48 modeli deneysel verilere göre çekme derinliğini Barlat-89 modeliyle kıyaslandığında daha yüksek tahmin etse de her iki model de deneysel verilere yakın sonuçlar vermiştir. Her üç malzemenin yırtılma yüksekliklerinin kendi açılım boyutları içerisinde bir değerlendirmesi yapıldığında ise yırtılma yükseklikleri arasındaki farkın çok büyük oranlarda değişmediği görülmektedir. Bu durum açısından bir değerlendirme yapılabilmesi adına malzemelerin anizotropi katsayıları incelendiğinde birbirlerine yaklaşık oldukları görülmektedir. Anizotropi katsayısı aynı zamanda malzemenin incelmeye karşı gösterdiği direnci temsil etmesi bakımından önem arz etmektedir. Diğer mekanik özelliklerin her üç kalite açısından değişimi yine çok büyük mertebelerle olmadığı da görülmektedir. Bu nedenle yırtılma yüksekliklerinin de benzer seviyede çıktığı görülmüştür.

Referanslar

- [1] L. Bo, D. Yuehong, H. Xiaoyan, and W. Yue, "Development of the third generation advanced high strength steel for automobile," 7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, 2018, 30-31 March, Shenzhen.
- [2] E. Esener, "Plastik Şekil Verme Proseslerinde Form ve Şekillendirme Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2015.
- [3] E. Özcan, "Yüksek Mukavemetli Çift Fazlı Çeliklerde Isıl İşlem Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkileri," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2019.
- [4] A. Quadfasel, J. Lohmar, and G. Hirt, "Investigations on Springback in High Manganese TWIP-Steels U-Profile Draw Bending," International conference on the Technology of Plasticity, 17-22 Sep. 2017, Cambridge, pp-1582-1587.
- [5] M. Takahashi, "Development of High Strength Steels for Automobiles," Nippon Steel Technical Report, 2003.
- [6] M. K. Singh, "Application of Steel in Automotive Industry," International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 6, 7, pp. 246-253, 2016.
- [7] J. Y. Lee, M. G. Lee, F. Barlat, K. H. Chung, and D. J. Kim, "Effect of Nonlinear Multi-Axial Elasticity and Anisotropic Plasticity on Quasi-Static Dent Properties of Automotive Steel Sheets," International Journal of Solids and Structures, 87, pp.254-266, 2016.
- [8] H. Kim, C. Kim, F. Barlat, E. Pavlina, and M. G. Lee, "Nonlinear Elastic Behaviors of Low and High Strength Steels in Unloading and Reloading," Materials Science & Engineering A, 562, pp. 161-171, 2013.
- [9] M. O. Andar, T. Kuwabara, S. Yonemura, and A. Uenishi, "Elastic-Plastic and Inelastic Characteristics of High Strength Steel Sheets under Biaxial Loading and Unloading," ISIJ International, 50, 4, pp. 613-619, 2010.
- [10] S. Sadagopan, and D. Urban, "Formability Characterization of a New Generation of High Strength Steels," AISI/DOE Technology Roadmap Program, Technical Report, 2003.
- [11] J. H. Hollaman, "Tensile Deformation," Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 162, pp. 268-290, 1945.
- [12] R. Hill, "A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals," Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences, 193, pp. 281-297, 1948.
- [13] F. Barlat, and J. Lian, "Plastic behaviour and stretchability of sheet metals (Part I): A yield function for orthotropic sheet under plane stress conditions," International Journal of Plasticity, 5, pp.51-56, 1989.