



Ticari TWIP900 ve DP600 yüksek mukavemetli çeliklerin otomotiv endüstrisindeki performanslarının karşılaştırılması

Süleyman Kılıç^{1*}, Fahrettin Öztürk²

¹Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Bölümü, Kırşehir, Türkiye

²The Petroleum Institute, Department of Mechanical Engineering, Abu Dhabi, UAE

Ö N E Ç İ K A N L A R

- TWIP çeliğinde yüksek mukavemet ve birim deformasyon oranının incelenmesi
- Yüksek miktarda geri esneme probleminin irdelenmesi
- Pekleşme modellerinin farklı çeliklerdeki tahminlerinin belirlenmesi

Makale Bilgileri

Geliş: 16.09.2015

Kabul: 20.12.2015

DOI:

10.17341/gummfd.81389

Anahtar Kelimeler:

İkizlenme ile plastisite kazanılan çelik, çift fazlı çelik, geri esneme, pekleşme modelleri, Marciniak–Kuczynski model

ÖZET

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisi için yeni bir malzeme olan TWIP900 çeliğinin mekanik ve şekillendirilebilirlik özellikleri incelenmiştir. TWIP çelikleri yüksek mukavemet değerlerinin yanında yüksek şekillendirilebilirliklerinden dolayı otomotiv endüstrisinin ilgisini çekmektedir. Çarpışma esnasında yüksek miktarda enerjiyi sönmülemeleri de önemli bir avantajdır. En büyük dezavantajları ise sac şekillendirme sonrasında ortaya çıkan geri esneme miktarının oldukça yüksek olmasıdır. Bu çalışma kapsamında çekme ve geri esneme deneyleri yapılarak malzeme davranışı incelenmiş ve otomotiv endüstrisinde yaygın kullanıma sahip DP600 çeliği ile karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca her iki malzeme için akma yüzeyleri ve şekillendirilebilirlik sınır diyagramları modellenerek karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan TWIP çeliğinin hafifletmeye büyük katkı sağlayacağı fakat geri esneme probleminin çözülmesi gerektiği tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar yazılımlarında TWIP çelikleri modellenirken Swift modelinin Backofen ve Hollomon modellerine göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Comparison of performances of commercial TWIP900 and DP600 advanced high strength steels in automotive industry

H I G H L I G H T S

- Investigation of high strength and strain rate for TWIP steel
- Evaluation of high springback problem
- Predictions of hardening models for different steels

Article Info

Received: 16.09.2015

Accepted: 20.12.2015

DOI

10.17341/gummfd.81389

Keywords:

TWIPing induced plasticity, dual phase, springback, hardening models, Marciniak–Kuczynski model

ABSTRACT

Mechanical properties and formability of TWIP900 steel, which is a new material for automotive industry, are investigated. TWIP steels have a good combination of high strength and high formability. Therefore, they are very attractive for the automotive industry. The energy absorption capability of the steel during collisions is a significant advantage. The biggest disadvantage of this steel is the relatively high springback of stamped parts. Tensile and springback behaviors of the material are investigated and compared with DP600 steel which is widely used in automotive industry. Besides, yield surfaces and forming limit diagrams for both materials are modelled and compared with each other. Results indicate that the use of TWIP steel will contribute weight reduction significantly, but the springback issue needs to be resolved. In finite element modelling of TWIP steel, it is seen that the Swift model gives more accurate results than the Backofen and Hollomon models.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv endüstrisinde malzeme seçiminde hafiflik, yakıt tasarrufu, güvenlik ve çevre kirliliği kriterleri esas

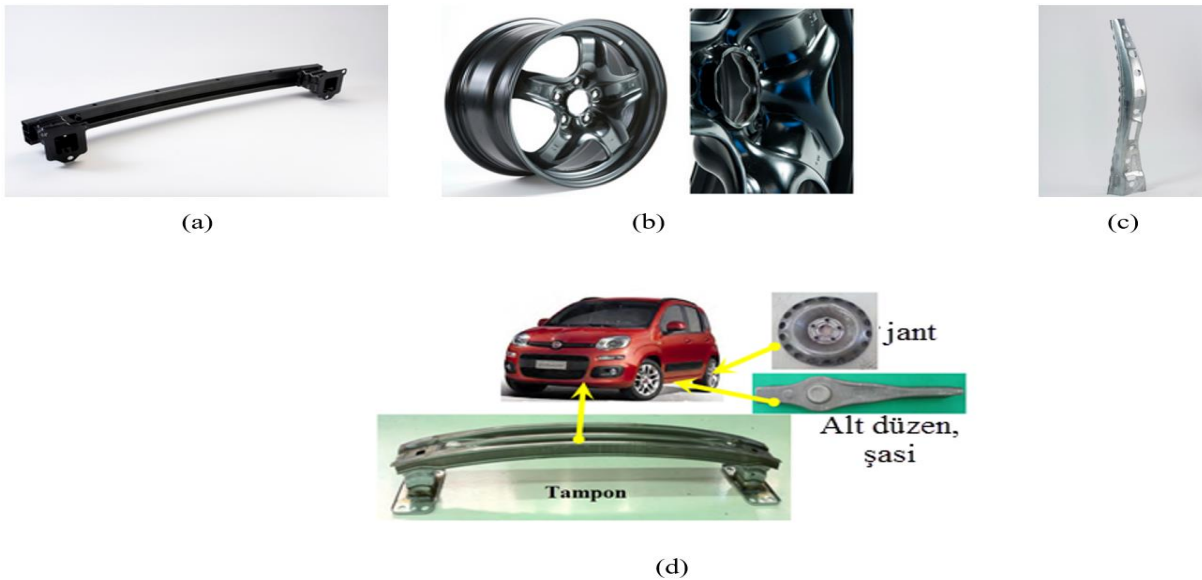
alınmaktadır. Son yıllarda mukavemet yönünden güçlü yakıt tasarrufu sağlayan karbondioksit salınımı düşük yüksek mukavemetli çeliklere (Advanced High Strength Steels, AHSS) ilgi yoğunlukla artmıştır. İmalatçılar daha kalın

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: suleymankilic@ahievran.edu.tr / Tel: 0 543 320 6008

parçalar yerine daha ince kalınlıkta daha yüksek mukavemetli çelikler kullanmaya başlamışlardır. Bu sayede 2 mm kalınlığı olan parça yerine 1 mm kalınlığında aynı mukavemet değerine sahip bir parça kullanarak güvenlikten ödün vermeden hafiflik sağlanabilmektedir. İkinci nesil yüksek mukavemetli çelik grubunda yer alan ikizlenmeyle plastisite kazanan (TWinning Induced Plasticity, TWIP) çelikler, yüksek mukavemetleri ile hafiflik sağlarken, yüksek sünekliklerinden dolayı da kolayca şekillendirilebilmektedirler. Yüksek mangan içeriğinden dolayı oda sıcaklığında tamamen östenitik bir yapıya sahip olmaktadır [1]. TWIP çeliğinin yüksek mukavemeti (>800 MPa), ikizlenme mekanizması sayesinde ortaya çıkmaktadır. Ayrıca yüksek pekleşme değerlerinden dolayı boyun verme olayı daha geç meydana gelmekte bunun sonucunda yüksek miktarda (>%40) uzama değerleri elde edilmektedir [2-7]. Bununla birlikte TWIP çeliklerinin en büyük dezavantajı da şekillendirmeden sonra yüksek miktarda geri esneme yapmalarıdır [8]. Diğer dezavantajlarına gelince, üretim maliyetinin yüksek olması ve gecikmeli çatlama sorunlarıdır [9]. Son yıllarda yapılan araştırmalar neticesinde gecikmeli çatlama sorunu çelik içerisine alüminyum ilave edilerek çözülmüştür [10]. Literatürdeki birçok çalışmada TWIP çeliklerinin yüksek ($n > 0,4$) bir pekleşme katsayısına sahip olduğu belirtilmektedir [6, 11-15]. Çeliğin tipik akma eğrisi incelendiğinde çeliğin davranışını en iyi temsil eden pekleşme modelinin Swift modeli olduğu görülmüştür [12]. Yakın gelecekte otomotiv endüstrisinde yoğun olarak kullanılan çift fazlı (Dual Phase, DP) çeliklerin yerini, yeni geliştirilen TWIP çeliklerinin alabileceği tahmin edilmektedir. Şekil 1'de DP ve TWIP çeliklerinden üretilmiş birkaç örnek parça gösterilmiştir. Müşterilerin isteği doğrultusunda yirmiye yakın parça üretilmiş ve yeni parçaların üretilmesine de devam edilmektedir [16]. Çelik üreticisi POSCO ile Renault

arasında yapılan ortak bir çalışmada TWIP çeliği kullanılarak araçta 130 kg'lık bir hafifletme sağlandığı belirtilmiştir. Bu çelikler, gelecekte yaygınlaşacağı düşünülen elektrikli araçların hafifletilmesi çalışmalarında da önemini koruyacaktır [17]. Literatürde TWIP ve DP çeliğiyle ilgili çeşitli karşılaştırma çalışmaları yapılmıştır [2, 18-21]. Günümüzde sac metallerin şekillendirmesi esnasında çoğunlukla benzetim (simülasyon) programları kullanılmakta ve deneme yanılma yöntemi ile hataların giderilmesi yönteminden hemen hemen vazgeçilmektedir. Bu sebeple, kullanılacak çeliğe en uygun malzeme modelinin belirlenmesi çok büyük öneme sahiptir. Aksi takdirde, yanlış simülasyon sonuçları imalat esnasında önemli hatalara ve maliyet kayıplarına sebebiyet verecektir. Daha önce yapılan bir çok çalışmada, TWIP çeliğinde simülasyon sonuçlarının yeterli doğrulukta olmadığı ve en uygun pekleşme modelinin seçiminin gerekliliği vurgulanmıştır [18, 22, 23].

TWIP900CR çeliğinin mekanik ve geri esneme özellikleri detaylıca incelenmiş, otomotiv endüstrisinde yaygın kullanıma sahip DP600 çeliği ile karşılaştırması ilk olarak bu çalışmada yapılmıştır. Literatürde her iki çeliğin bu kapsamda karşılaştırmasını yapan bir çalışmaya rastlanmamıştır. İlave olarak, her iki çeliğin von Mises akma yüzeyleri gösterilmiştir. Çalışmanın son bölümünde, Marciniak ve Kuczynski (M-K) modeli kullanılarak farklı pekleşme modellerinin şekillendirme sınır diyagramının (SSD, FLD) belirlenmesindeki performansları tespit edilmiştir. Literatürde bu kapsamda da herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Özellikle bu malzemelere ait SSD'lerin analitik olarak belirlenmesi ve deneysel SSD ile karşılaştırması alandaki ilk çalışmalardan birisi olacaktır. Bilindiği üzere SSD'lerin deneysel tespiti oldukça zahmetli bir iş olup her zaman da kolayca mümkün olmamaktadır [25].



Şekil 1. DP çeliklerinden yapılmış [24] a) Tampon, b) Jant, c) Destek parçası, d) TWIP çeliklerinden yapılmış parçalar [16]. (Parts produced from DP steels a) Bumper, b) Wheel, c) B-pillar reinforcement, d) Parts produced from TWIP steels)

2. DENEYSEL METOT VE TEORİK METOT (EXPERIMENTAL METHOD AND TEORICAL METHOD)

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan DP600 çeliği ile bu çeliğin yerini alacağı düşünülen TWIP900CR çeliği karşılaştırılmıştır. CR (Cold Rolled) kısaltmasının anlamı soğuk haddelenmiştir. DP600 malzemenin sac kalınlığı 0,8 mm ve TWIP900CR sacın kalınlığı ise 1,3 mm'dir. Deney numuneleri Şekil 2a'da görüldüğü üzere 0°- 45°- 90°'lik açılarda su jetiyle kesilerek ASTM-E8 standardına göre hazırlanmıştır. Standart numunenin boyutları Şekil 2b'de gösterilmiştir. Çekme ve eğme deneyleri 25 mm/min hızında gerçekleştirilmiştir. Bu hız genelde standart olarak uygulanan bir hızdır. Geri esneme deneyinde Şekil 2c'de şematik olarak gösterilen 60°'lik V kalıp kullanılmıştır. Şekil 2d'de geri esneme numunesinin boyutları verilmiştir. Deneyler SHIMADZU Autograph AGS-X serisi 100 kN kapasiteli tek eksenli çekme cihazında 3 kez tekrarlanarak yapılmıştır. Numunelerde meydana gelen uzamalar video tipi ekstansometre yardımıyla ölçülmüştür. Bu ölçüm tekniğinde

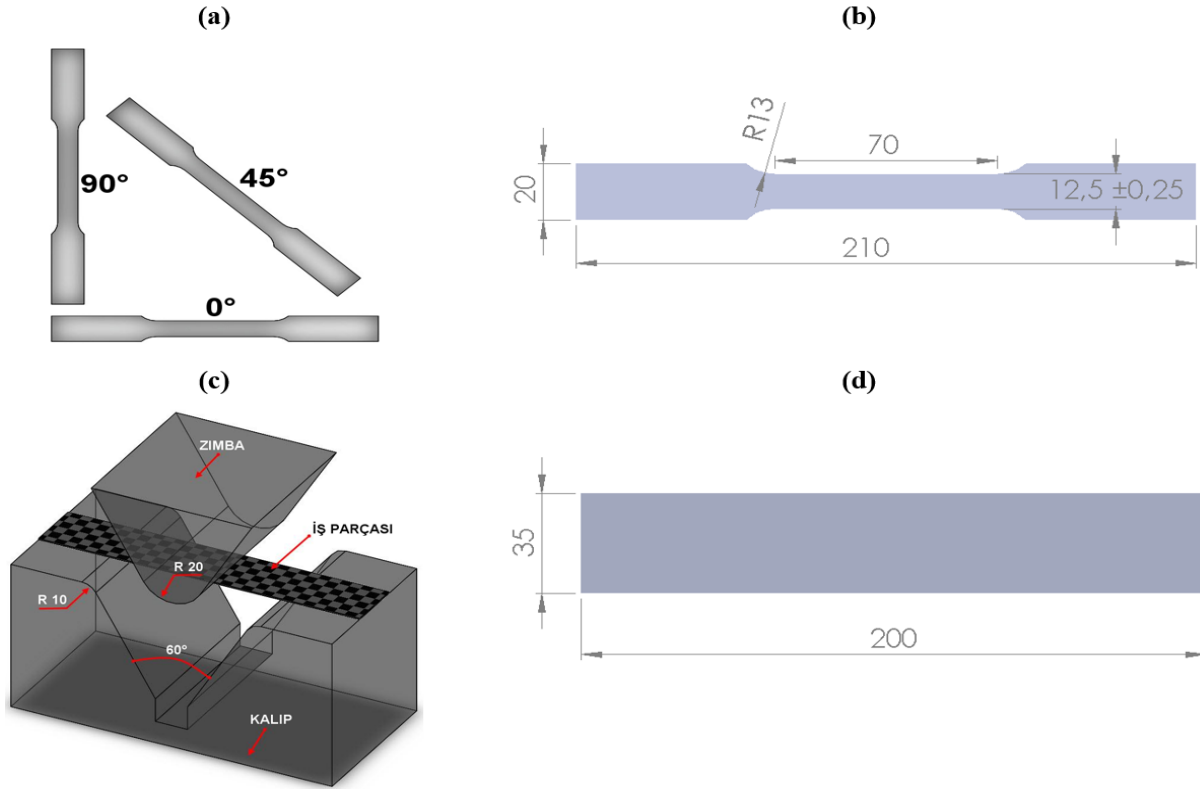
malzeme üzerine işaretlenen iki çizgi aralığının (ölçü uzunluğu) değişimi video ile takip edilerek ölçülmekte ve birim deformasyon değerleri yazılım içerisinde hesaplanmaktadır. Malzeme üzerinde herhangi bir mekanik ölçme sistemi bulunmamaktadır. İncelenen malzemelerin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Yüksek mukavemetli çelik kullanılarak yapılan hafifletme çalışmalarında, daha ince saclar kullanılarak hafifletme gerçekleştirilmektedir. Mukavemet ve güvenlikten ödün verilmeyen, parça daha ince sacdan imal edilmektedir. Daha önce belirtildiği üzere, bu çalışmada 0,8 mm kalınlığındaki DP600 çeliği [26] ile 1,3 mm kalınlığındaki TWIP900CR çeliklerinin malzeme özellikleri ve şekillendirme kabiliyetleri incelenmiştir. Literatürdeki mevcut ŞSD modelleri kullanılarak her iki çelik için ŞSD diyagramları elde edilmiştir. Elde edilen diyagramların literatürde mevcut olan deneysel ŞSD'lerle doğruluğu test edilmiştir. Her iki

Tablo 1. Ağırlıkça (%) kimyasal kompozisyonu (Chemical composition (in wt.%))

| Malzemeler | C | Mn | Si | Cr | Al | Cu | P | S |
|------------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|
| DP600 | 0,092 | 1,912 | 0,147 | | 0,031 | | 0,014 | 0,003 |
| TWIP900 | 0,37 | 20,96 | 0,17 | 0,46 | 4,80 | 0,06 | | |

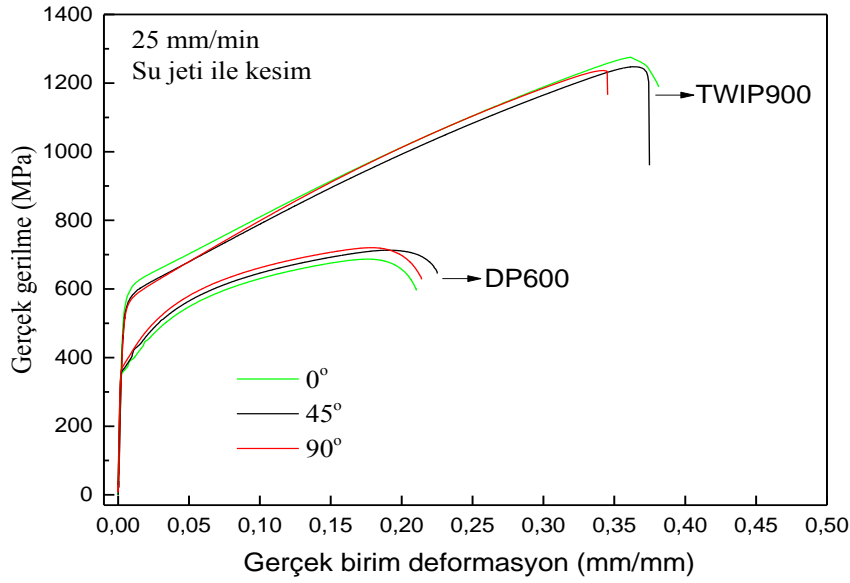


Şekil 2. a) Farklı doğrultularda hazırlanmış çekme deneyi numuneleri, b) ASTM-E8 standardına göre hazırlanmış çekme deneyi numunesi ölçüleri, c) 60°'lik V eğme deney düzeneği, d) Eğme numunesi boyutları

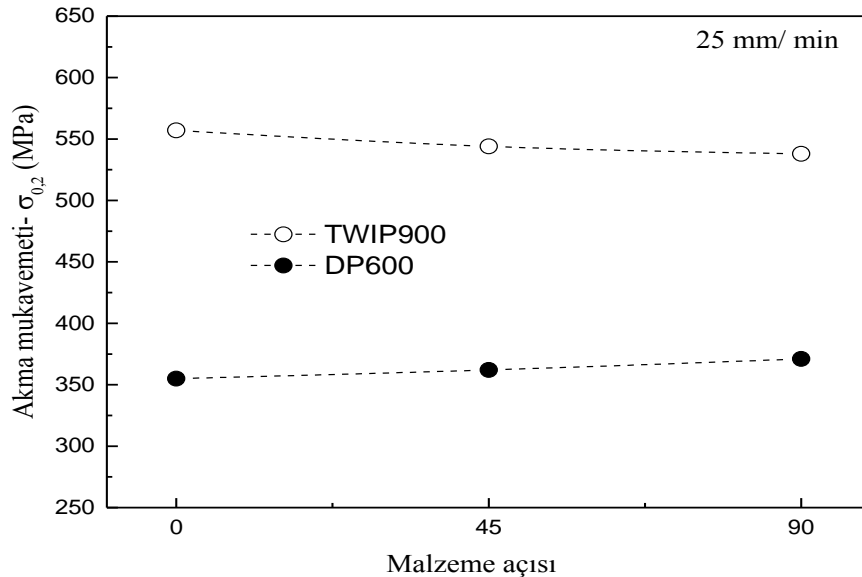
(a) Tensile test samples in different directions, b) Dimensions of a tensile test specimen according to ASTM-E8 standard, c) 60° V-bending experimental setup, d) Dimensions of a bending test sample)

malzemeye ait gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekilden TWIP900CR çeliğinin DP600 den çok daha fazla uzama gösterdiği görülmektedir. Aynı zamanda şekillendirme açısından önemli olan düzgün uzama miktarının TWIP çeliklerinde oldukça fazla olduğu, bundan dolayı TWIP çelikleriyle daha karmaşık geometriler kolaylıkla üretilebilecektir. Bu önemli özellikler otomotiv endüstrisi için çok büyük önem arz etmektedir. Akma eğrisinin altında kalan alanlara bakıldığında, darbe esnasında TWIP çeliğinin daha fazla sönümlenmeye sahip olacağı açıktır. Aynı zamanda deneysel açıdan veriler incelendiğinde deneysel çalışmanın doğruluğu ve güvenilirliği net olarak görülmektedir. Yaklaşık olarak her bir deneyde benzer eğilimin ve davranışlar elde

edilmiştir. Tekrarlarda da aynı davranışlar tespit edilmiştir. Malzemenin yönlere bağlı olarak akma ve çekme dayanımları Şekil 4 ve Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu değerler hem şekillendirme hem de pres (baskı) kuvvetinin belirlenmesi açısından önemlidir. Şekiller incelendiğinde, TWIP çeliğinin daha yüksek mukavemete sahip olmasından dolayı, daha ince sac kullanılarak istenen mukavemet değerleri elde edilebileceği anlaşılmaktadır. İnce sac kullanıldığından dolayı da araç gövdesi hafifleyecektir. Malzemelerin doğrultulara bağlı değerlerinden çok büyük farklar görülmemiştir. Neredeyse izotropik olarak nitelendirilecek davranışlar elde edilmiştir. Akma eğrisi genel olarak deneysel verilerle elde edilir. Literatürde bu deneysel verileri temsil edebilen modeller geliştirilmiştir.



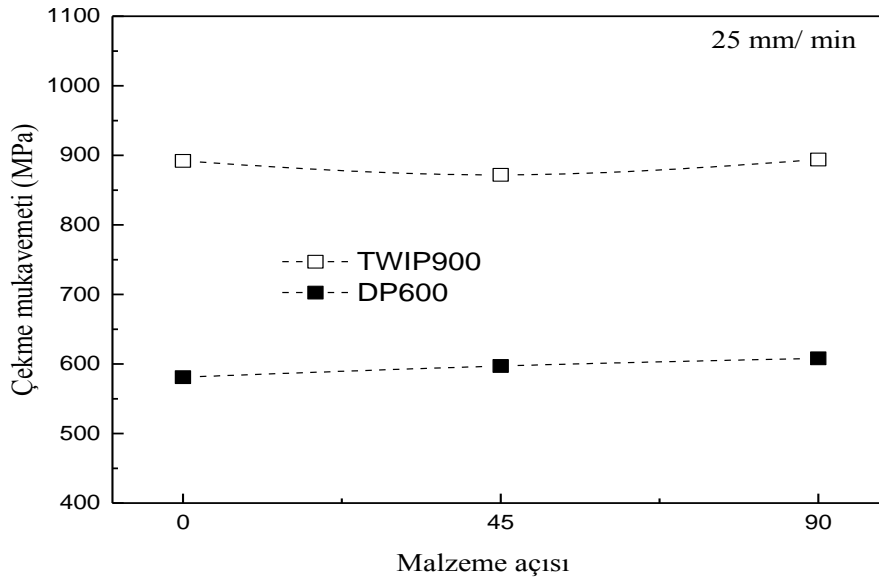
Şekil 3. Farklı doğrultulardaki gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon eğrileri (True stress-true strain curves at different directions)



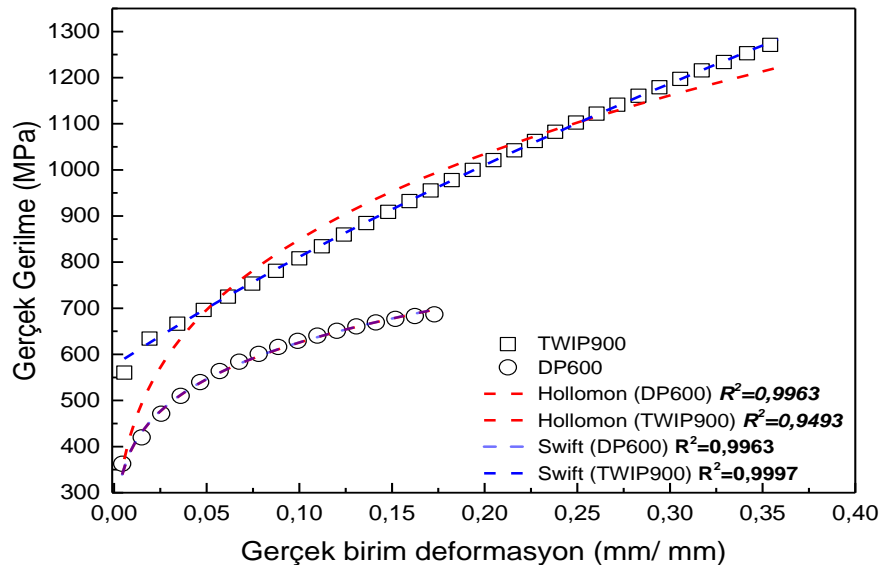
Şekil 4. Akma mukavemetinin haddeleme doğrultusuyla değişimi (Yield strength vs. rolling direction)

Bu modeller akma modeli olarak adlandırılmaktadır ve yeni malzemeler için zaman zaman uyarlanmakta ve hatta yenileri de geliştirilmektedir. Sonlu elamanlar programlarında genel olarak akma eğrisini tanımlarken Hollomon ve Swift modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, her iki malzeme için bu modeller test edilmiştir. Modellerin tahminleri ve deneysel olarak elde edilmiş akma eğrileri Şekil 6'da gösterilmiştir. TWIP çeliğinde görülen çok yüksek miktardaki uzama ve pekleşmeden dolayı, literatürde en yaygın kullanıma sahip Hollomon modeli akma eğrisinin tahmininde yeterli doğruluğu sağlayamamıştır. Bu yüzden pek çok çalışmada [2, 12, 18] TWIP çeliği için Swift modeli kullanılmaktadır. Bizim elde ettiğimiz sonuçlarda bu çalışmaları desteklemektedir. Pekleşme katsayısının 0,6 gibi yüksek değerlerde olması düzgün uzama miktarındaki yüksek artışın temel sebebidir.

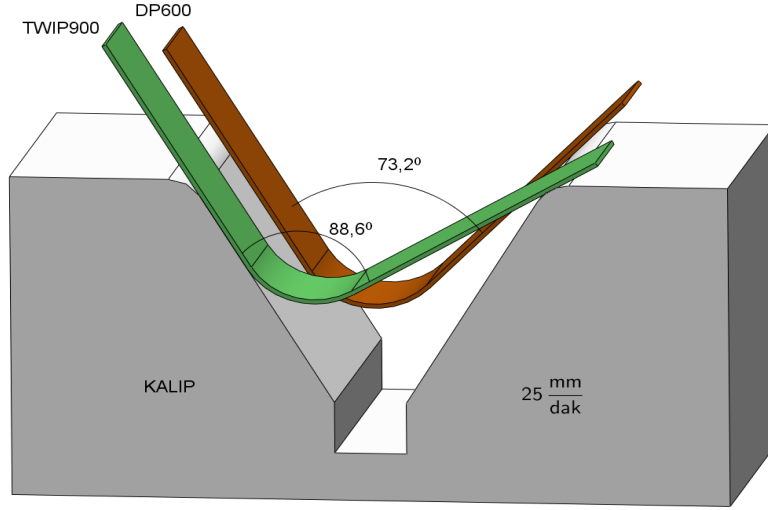
Bu özellik de, bu çeliğin gelecekte yaygın kullanıma sahip olabileceğinin göstergesidir. Sonuç olarak, iki çelik mekanik davranışlar açısından karşılaştırıldığında, TWIP900 çeliğinin çok büyük avantajlar sağlayacağı açıkça görülmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, TWIP900 çeliğinin otomobil endüstrisindeki kullanımının artırılmasıdır. Bu açıdan bakıldığında sadece mekanik özelliklere bakmak yetersiz kalacaktır ve aynı zamanda malzemenin pres altındaki davranışı özellikle deformasyon sonrası geri esnemesinin belirlenmesi çok önemlidir. Aksi takdirde mekanik özellikler iyi olsa dahi sorunlu bir malzeme kullanmak hem maliyet hem kalite açısından sıkıntılar yaşanmasına sebebiyet verecektir. Bu yüzden bu çeliğin geri esneme davranışı da literatürde yaygın olarak kullanılan V kalıpta şekillendirilerek ölçülmüştür. Saclar kalıpta şekillendirilmiş pres kuvveti kaldırıldıktan sonrada



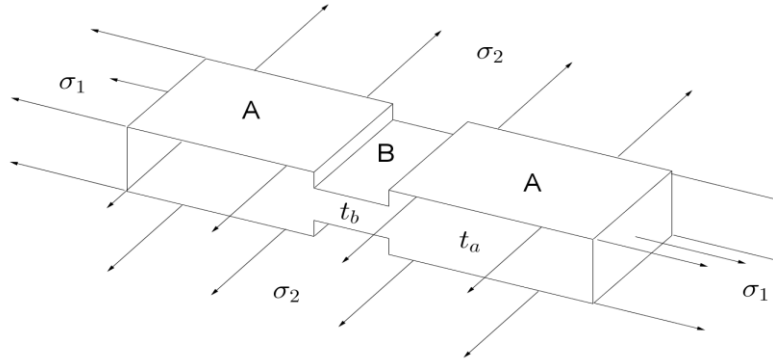
Şekil 5. Çekme mukavemetinin haddeleme doğrultusuyla değişimi (Tensile strength vs. rolling direction)



Şekil 6. Farklı pekleşme modellerin tahminleri (Flow curve predictions using different hardening models)



Şekil 7. DP600 [27] ve TWIP900 çeliklerinin geri esneme ölçümleri
(Springback measurements for DP600 [27] and TWIP900 steels)



Şekil 8. Marciniak-Kuczynski (M-K) modelinin şematik gösterilişi
(Schematic representation of Marciniak-Kuczynski (M-K) model)

sacların geri esneme açılırları ölçülmüştür. Şekil 7'de görüldüğü üzere TWIP çeliğinin geri esneme miktarının DP600 çeliğine göre çok yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum TWIP çeliklerinin dezavantajlarından birisidir. Bu probleme çözüm getirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde montajda sıkıntılar yaşanacaktır. Bu sıkıntı temel olarak TWIP900 çeliğinin yüksek akma mukavemetinden kaynaklanmaktadır. Deformasyon esnasında depolanan enerji büyük miktarda olmaktadır. Çok yüksek geri esneme değerleri elde edildiğinde sadece kalıp üzerinde ayarlamalar yaparak hataların düzeltilmesi mümkün olmayabilir. Bu yüzden daha farklı çözüm önerilerine ve araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu önemli problemin çözüme kavuşturulması çeliğin kullanımının artırılmasında çok büyük etkiye sahip olacaktır. Bu çalışmanın diğer önemli bölümü ise malzemelerin von Mises akma yüzeyleri ve şekillendirme sınır diyagramlarının incelenmesidir. Bu anlamda literatürde yeterli düzeyde çalışma bulunmamaktadır. Özellikle elastik bölgenin sınırlarının belirlenmesi ve simülasyon esnasında malzemenin şekillendirilip şekillendirilemeyeceğinin değerlendirilmesi açısından ŞSD çok önemli bir araçtır. Günümüzde birçok

yazılıma malzemeye ait eğriler veri olarak girilmektedir. Deformasyon esnasında parçanın her yerindeki deformasyon değerleri şekillendirme sınır diyagramıyla karşılaştırılmakta sacın kabul edilebilir değerlere sahip olup olmadığına karar verilmektedir [28]. Eğer değerler diyagramın üst bölgesinde çıkmışsa sac şekillendirme esnasında yırtılacaktır. Eğer değerler eğriye çok yakın bir bölgede ise şekillendirme esnasında yırtılma riski oldukça yüksek olacaktır. ŞSD'lerin numerik olarak elde edilmesinde yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Sebebi ise, deneysel diyagramın elde edilmesinin oldukça zahmetli olması her durumda kolaylıkla elde edilemediğinden dolayıdır. Bunun için özel ölçüm sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Marciniak [29], Marciniak ve Kuczynski [30] ŞSD tahmin eden bir model geliştirmişlerdir ve bu model çok yaygın bir kullanıma sahiptir. Farklı pekleşme modelleri kullanılarak ŞSD rahatlıkla elde edilmektedir. Marciniak ve Kuczynski ikilisinin beraber geliştirdikleri bu model, sac kusurlarının varlığı hipotezine dayanmaktadır. Bu hipotez anlamlı bir hipotezdir çünkü sac malzemenin her noktasının aynı kalınlıkta olduğunu ve hatasız olduğunu söylemek güçtür.

Malzeme üzerinde geometrik farklılıklar olacaktır. Marciniak'a göre sacların üretimi esnasında geometrik kusurlar (kalınlık homojensizliği) ve yapısal kusurlar (boşluklar vb.) meydana gelmektedir. Şekillendirme işlemlerinde bu kusurlar zamanla genişlemekte ve plastik şekil değişimleri esnasında tamamen bölgesel hale gelerek boyun verme oluşumu başlattığını söylemektedir. Net olarak boyun vermenin geometrik düzgünsüzlüklerin olduğu bölgede ortaya çıkacağı hipotezi ortaya konulmaktadır. Azrin ve Backofen [30], Marciniak'ın bu hipotezinin gerçekliğini deneysel olarak göstermişlerdir. Bu modelin yoğun bir şekilde kullanıma ve araştırmacılar tarafından sürekli geliştirilme nedeni: sezgisel bir altyapıya sahip olması; farklı süreçlerin ve malzeme parametrelerinin etkisini doğru olarak tahmin edebilmesi ve aynı zamanda kolayca sac metal şekillendirme benzetim programlarına dâhil edilebilir olmasıdır. Deneysel araştırmalar sonucunda boyun verme, homojen olmayan yapısal veya geometrik bozuklukların olduğu yerden başlamaktadır [29]. Kalınlıktaki değişim homojensizlik olarak ifade edilmiştir. Kalınlık değişimi çok hassas bir şekilde meydana gelmekte, ancak teorik hesaplamada ani bir düşüş olmuş gibi inceleme yapılmaktadır (Şekil 8). M-K model için von Mises akma kriteri [32] ve Eşitlik 1-3'de verilen pekleşme modelleri kullanılmıştır.

$$\text{Hollomon [33]} \quad \sigma = K \varepsilon^n \quad (1)$$

$$\text{Swift [33]} \quad \sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (2)$$

$$\text{Backofen [34]} \quad \sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (3)$$

Von Mises akma kriteri [35]

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4)$$

M-K modelde iteratif olarak yapılan hesaplamalara göre A ve B bölgelerinde kuvvet dengesi gereği aşağıdaki gibidir.

$$F_{1A} = F_{1B} \quad (5)$$

A ve B bölgelerindeki birim deformasyon artışları eşit kabul edilerek aşağıdaki gibi yazılır.

$$d\varepsilon_{2A} = d\varepsilon_{2B} \quad (6)$$

A ve B bölgelerindeki gerilme durumları 5 numaralı eşitliğe göre aşağıdaki şekilde tanımlanırsa aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\sigma_{1A} \exp(\varepsilon_{3A}) t_A = \sigma_{1B} \exp(\varepsilon_{3B}) t_B \quad (7)$$

Burada f_0 , A ve B bölgelerindeki kalınlık oranını ifade etmektedir ($f_0 = (t_B / t_A)$). ε_{3A} ve ε_{3B} , sıkıştırılmamazlık prensibine göre hesaplanabilen kalınlık yünündeki birim

deformasyon miktarını göstermektedir. Sıkıştırılmamazlık prensibine göre yapılan hesaplama göre $\varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ şeklindedir. Eşdeğer gerilmenin büyük gerilmeye oranını φ olarak tanımlarsak aşağıdaki gibi yazılır.

$$\varphi = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_1} \quad (8)$$

3 ve 8 numaralı eşitlikler 7 numaralı eşitlikte yerlerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{1}{\varphi_A} \bar{\varepsilon}_A^n \dot{\varepsilon}_A^m \exp(\varepsilon_{3A}) = \frac{1}{\varphi_B} \bar{\varepsilon}_B^n \dot{\varepsilon}_B^m \exp(\varepsilon_{3B}) f_0 \quad (9)$$

13 numaralı eşitlikteki limit birim deformasyon miktarının hesaplanmasında, oluk bölgesindeki bilinmeyen parametrelerin belirlenmesi için bir seri eşitlik sisteminin Newton-Raphson gibi iteratif yöntem ile belirlenmesi gerekmektedir. Bu hesaplamaların yapılması esnasında parçadaki güvenli bölge sabit bir gerilme oranı α ile yüklenmesi gerekmektedir. β ve η eşdeğer ve normal birim deformasyon oranlarını ifade etmektedir.

$$\alpha = \sigma_2 / \sigma_1 \quad (10)$$

$$\beta = d\bar{\varepsilon} / d\varepsilon_1 = \bar{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_1 \quad (11)$$

$$\eta = d\varepsilon_2 / d\varepsilon_1 = \dot{\varepsilon}_2 / \dot{\varepsilon}_1 \quad (12)$$

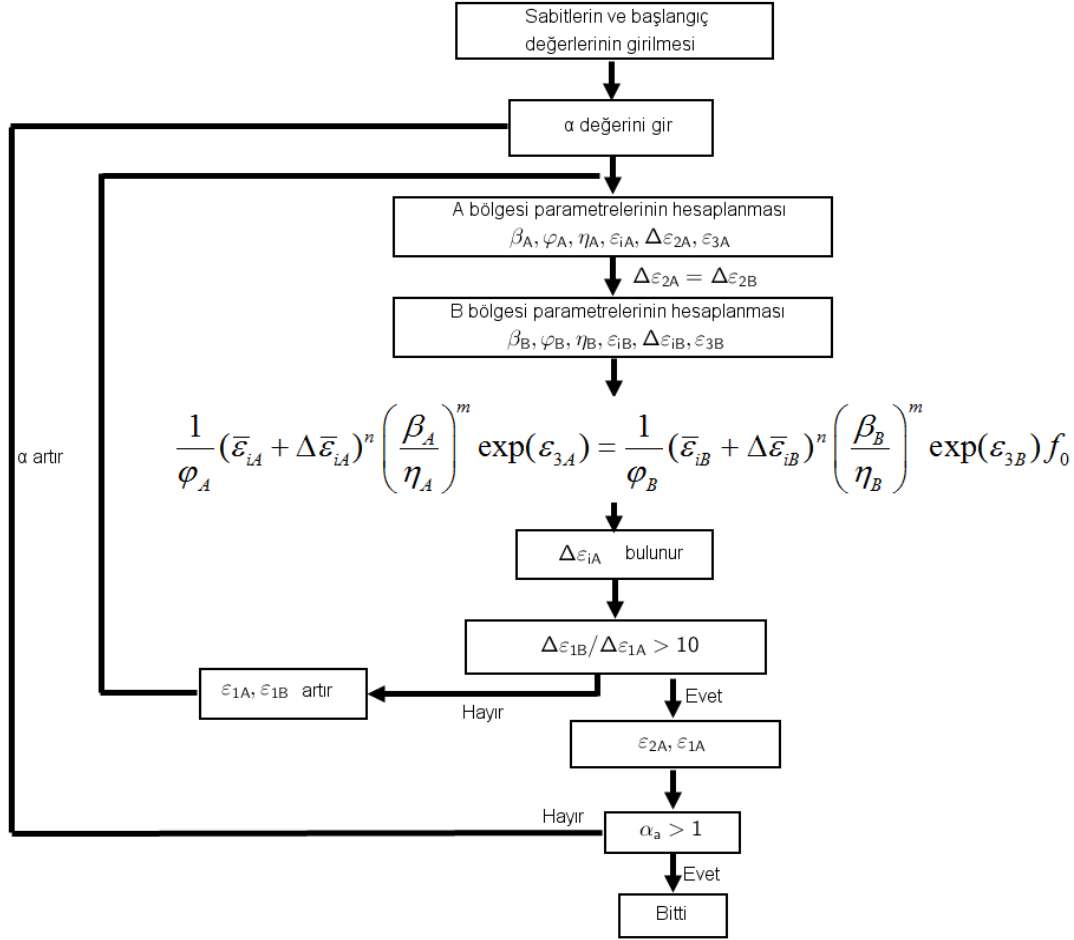
Eşitlik tekrar iteratif olarak düzenlendiğinde:

$$\frac{1}{\varphi_A} (\bar{\varepsilon}_{iA} + \Delta \bar{\varepsilon}_{iA})^n \left(\frac{\beta_A}{\eta_A} \right)^m \exp(\varepsilon_{3A}) = \frac{1}{\varphi_B} (\bar{\varepsilon}_{iB} + \Delta \bar{\varepsilon}_{iB})^n \left(\frac{\beta_B}{\eta_B} \right)^m \exp(\varepsilon_{3B}) f_0 \quad (13)$$

eşitliği elde edilir.

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{iB} / \Delta \bar{\varepsilon}_{iA} > 10 \quad (14)$$

13 numaralı eşitliğin iteratif bir şekilde çözdürülmesiyle, 14 numaralı eşitlikte verilen oluk kısımdaki efektif birim deformasyon miktarının güvenli bölgedeki efektif birim deformasyon miktarının 10 katı olması durumunda, malzemede boyun verme oluşacak kabulü yapılmaktadır [36-39]. 13 numaralı eşitliğin elde edilmesinde 3 numaralı Eşitlikte verilen Backofen pekleşme modeli kullanılmıştır. Aynı zamanda kullanılan pekleşme modellerinin etkisini incelemek için, Eşitlik 1 ve 2' de verilen Hollomon ve Swift eşitlikleriyle de elde edilen ŞSD karşılaştırılmıştır. Kullanılan hesaplama yönteminin akış diyagramı Şekil 9'da gösterilmiştir. Malzemelerde akma yüzeyi, uygulanan kuvvetler neticesinde oluşan gerilme dağılımlarının hangi



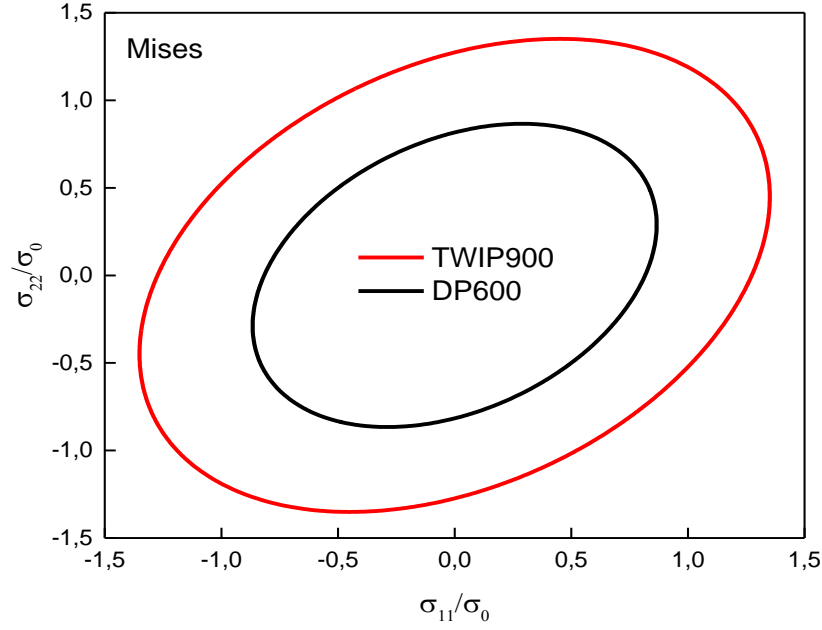
Şekil 9. M-K model akış diyagramı (Flowchart of M-K model)

kombinasyonlarda plastik şekil değişiminin başlayacağını ifade eden diyagramlardır. Akma yüzeyi, iki ve tek eksenli çekme kombinasyonlarını, basma ve basit kayma durumlarını ifade etmektedir. Şekil 10'da TWIP ve DP çeliğine ait von Mises akma kriteri kullanılarak elde edilmiş akma yüzeyi verilmiştir. TWIP çeliğinin her kombinasyonda DP çeliğinden daha geniş akma yüzeyine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, 1-3 numaralı eşitliklerde verilen Backofen, Hollomon ve Swift pekleşme modelleri M-K modeliyle birlikte kullanılarak DP600 ve TWIP900 çelikleri için ŞSD diyagramları tahmin edilmiştir. Elde edilen diyagramlar literatürde mevcut olan [2, 26] deneysel diyagramlarla karşılaştırılmıştır. M-K modelde Swift pekleşme modeli kullanılarak elde edilmiş ŞSD'ler Şekil 11'de gösterilmiştir.

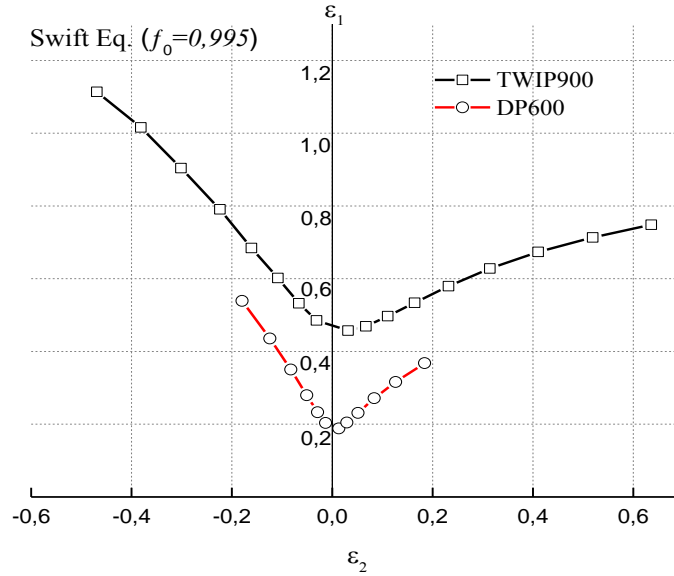
Şekilden, TWIP çeliğinin DP çeliğine göre daha geniş şekillendirme aralığına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum otomotiv endüstrisi için büyük öneme sahiptir ve çeliğin kullanımının yaygınlaşmasında önemli bir kriterdir. Şekillendirme açısından özellikle birim deformasyon bölgesinde çok daha yüksek değerler elde edilmiştir. Karmaşık bir sac parça şekillendirilmesi gerektiğinde, TWIP900 çeliğinin hatasız şekillendirilmesi daha kolay

olacaktır. ŞSD çalışmasına ilave olarak pekleşme modellerinin etkisini göstermek için M-K modelde, farklı pekleşme modelleri kullanılarak ŞSD'ler elde edilmiştir. Modellerde kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir. Elde edilen diyagramlar Şekil 12 ve 13'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların ışığında DP çeliğinde pekleşme modellerinin bir etkisi görülmezken, TWIP çeliğinde pekleşme modellerinin etkisinin olduğu net olarak tespit edilmiştir. Swift modelinin daha iyi tahmin yaptığı görülmüştür. Bu sonuçta bize sonlu elemanlar programlarında bu modeller kullanılırken TWIP çeliği için uygun olan modelin kullanılmasının zorunluluğunu göstermektedir. Hatta bu malzemeye ait özel modellerin geliştirilmesi de düşünülebilecek bir konudur. Literatürde de benzer şekilde pekleşme modeli seçiminin TWIP çeliğinde etkili olduğu ve Swift modelinin daha doğru sonuç verdiği gösterilmiştir [2, 18, 22, 23].

TWIP çelik için bire bir aynı özellikte deneysel ŞSD tespit edilememiştir. Bu yüzden TWIP900 malzemeye ait model sonuçları literatürdeki en yakın malzemeye ait deneysel sonuçlarla [2] karşılaştırılmıştır. Deneysel veri bire bir aynı olmamasına rağmen Şekil 12'de de görüleceği üzere en iyi sonuçlar Swift modeliyle elde edilmiştir.



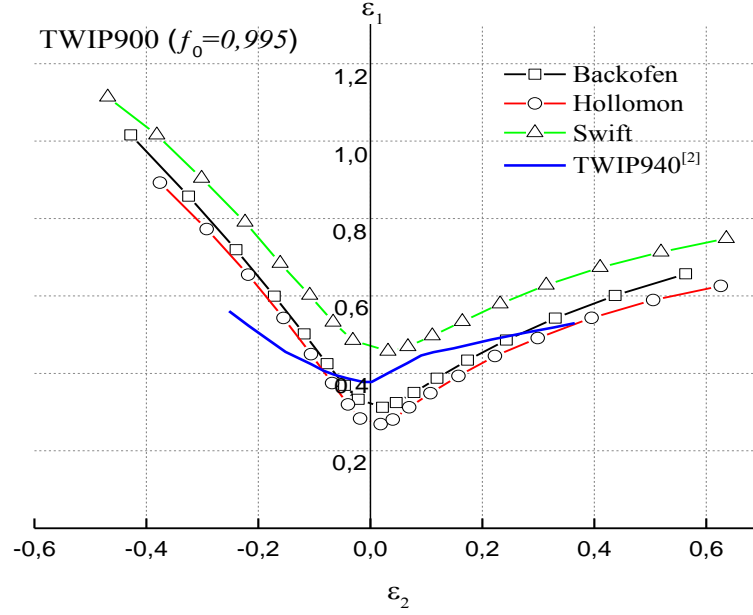
Şekil 10. von Mises akma yüzeyleri ($\sigma_{12} = 0$) (von Mises yield surfaces ($\sigma_{12} = 0$))



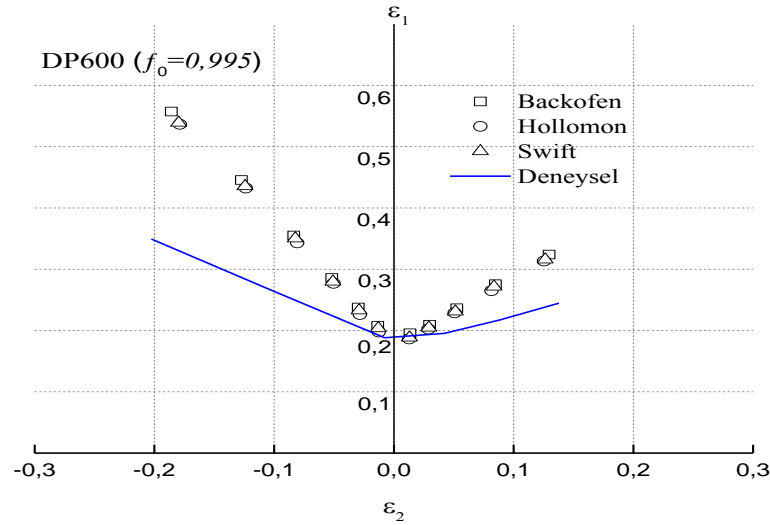
Şekil 11. TWIP900 ve DP600'ün şekillendirme sınır diyagramları (Forming limit diagrams of TWIP900 and DP600) Diyagramlar Swift modeli ve M-K modeli kullanılarak elde edilmiştir (Diagrams were determined both using the Swift and the M-K models)

Tablo 2. Model parametreleri (Model parameters)

| Model | Malzeme | Parametre | | | | |
|----------|---------|-----------|------------------|-------|-------|--------------|
| | | K | $\dot{\epsilon}$ | m | n | ϵ_0 |
| Backofen | TWIP900 | 1691 | 0,0083 | 0,007 | 0,283 | |
| | DP600 | 991 | 0,0083 | 0,001 | 0,197 | |
| Swift | TWIP900 | 1979 | | | 0,622 | 0,139 |
| | DP600 | 994 | | | 0,202 | 0,001 |
| Hollomon | TWIP900 | 1636 | | | 0,283 | |
| | DP600 | 986 | | | 0,197 | |



Şekil 12. Pekleşme modellerinin TWIP900' ün şekillendirme sınır diyagramına etkisi
(Effect of hardening models on forming limit diagram of TWIP900)



Şekil 13. Pekleşme modellerinin DP600' ün şekillendirme sınır diyagramına etkisi
(Effect of hardening model on forming limit diagram of DP600)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında, Backofen, Hollomon ve Swift pekleşme modelleri M-K modeliyle birlikte kullanılarak DP600 ve TWIP900 çelikleri için FLD diyagramları tahmin edilmiştir. DP600 çeliği için kullanılan pekleşme modelleri (Hollomon ve Swift) deneysel eğriyi 0,996 doğruluğunda temsil edebilirken, TWIP çeliğinde Hollomon modeli 0,949, Swift ise 0,999 doğruluğunda, deneysel elde edilen eğriyi temsil etmektedir. Dolayısıyla sonlu elemanlar programlarında TWIP çelikleri analiz edileceği zaman akma eğrisi modeli olarak Swift modelinin kullanılması daha doğru sonuçlar verecektir. Aynı zamanda gösterdiği yüksek

mukavemet ve birim deformasyon bu çelik için avantaj iken yüksek miktarda geri esnemeleri de bir dezavantajdır. Bu çeliğin yaygın kullanımının artırılması için geri esnemenin azaltılması yönündeki çalışmalara devam edilmesi gerekmektedir.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

| | |
|---|---------------------------------|
| TWIP | : Twinning Induced Plasticity |
| DP | : Dual Phase |
| SSD | : Şekillendirme sınır diyagramı |
| M-K | : Marciniak–Kuczynski model |
| K, $\dot{\epsilon}$, ϵ_0 , n, m | : Model parametreleri |

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Schumann V.H., Martensitische umwandlung in austenitischen mangan-kohlenstoff-stählen, Neue Hütte, 17 (10), 605-609, 1972.
2. Chung K., Ahn K., Yoo D.H., Chung K.H., Seo M.H. ve Park S.H., Formability of TWIP (twinning induced plasticity) automotive sheets, Int. J. Plast., 27 (1), 52-81, 2011.
3. Dai Y.J., Tang D., Mi Z.L. ve LÜ, J.C., Microstructure characteristics of an Fe-Mn-C TWIP steel after deformation, J. Iron. Steel Res. Int., 17 (9), 53-59, 2010.
4. Renard K. ve Jacques P.J., On the relationship between work hardening and twinning rate in TWIP steels, Mater. Sci. Eng., A, 542 (0), 8-14, 2012.
5. Soulami A., Choi K.S., Shen Y.F., Liu W.N., Sun X. ve Khaleel M.A., On deformation twinning in a 17.5% Mn-TWIP steel: A physically based phenomenological model, Mater. Sci. Eng., A, 528 (3), 1402-1408, 2011.
6. Wang S.H., Liu Z.Y., Wang G.D., Liu J.L., Liang G.F. ve Li Q.L., Effects of Twin-Dislocation and Twin-Twin Interactions on the Strain Hardening Behavior of TWIP Steels, J. Iron. Steel Res. Int., 17 (12), 70-74, 2010.
7. Xu L., Barlat F. ve Lee M.G., Hole expansion of twinning-induced plasticity steel, Scr. Mater., 66 (12), 1012-1017, 2012.
8. Lee M.G., Kim D., Kim C., Wenner M.L. ve Chung K., Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions, part III: applications, Int. J. Plast., 21 (5), 915-953, 2005.
9. Billur E., Dykeman J., ve Altan, T., Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part II, Stamping Journal, 12-13, 2014.
10. Hamada A.S., Karjalainen L.P. ve Somani M.C., The influence of aluminum on hot deformation behavior and tensile properties of high-Mn TWIP steels, Mater. Sci. Eng., A, 467 (1-2), 114-124, 2007.
11. Chen L., Kim H.S., Kim S.K. ve De Cooman B.C., Localized Deformation due to Portevin-LeChatelier Effect in 18Mn-0.6C TWIP Austenitic Steel, ISIJ Int., 47 (12), 1804-1812, 2007.
12. Chung K., Ma N., Park T., Kim D., Yoo D. ve Kim C., A modified damage model for advanced high strength steel sheets, Int. J. Plast., 27 (10), 1485-1511, 2011.
13. Li D., Feng Y., Yin Z., Shangguan F., Wang K., Liu Q. ve Hu F., Prediction of hot deformation behaviour of Fe-25Mn-3Si-3Al TWIP steel, Mater. Sci. Eng., A, 528 (28), 8084-8089, 2011.
14. Vercammen S., Blanpain B., De Cooman B.C. ve Wollants P., Cold rolling behaviour of an austenitic Fe-30Mn-3Al-3Si TWIP-steel: the importance of deformation twinning, Acta Mater., 52 (7), 2005-2012, 2004.
15. Xu S., Ruan D., Beynon J.H. ve Rong Y.H., Dynamic tensile behaviour of TWIP steel under intermediate strain rate loading, Mater. Sci. Eng., A, 573 (0), 132-140, 2013.
16. NAM, J.B. *Development of new auto steels and application technology*. [http://309fbf2c62e8221fbaf0-b80c17cbaf20104b072d586b316c6210.r88.cf1.rackcdn.com/Gangzhao Presentations/09_China Automotive Steel Conference_POSCO_Jae-Bok Nam.pdf](http://309fbf2c62e8221fbaf0-b80c17cbaf20104b072d586b316c6210.r88.cf1.rackcdn.com/Gangzhao%20Presentations/09_China%20Automotive%20Steel%20Conference_POSCO_Jae-Bok_Nam.pdf). Erişim tarihi Haziran 1, 2015.
17. Comp., P.S. <http://globalblog.posco.com/tag/ecofriendly/>. 2015.
18. Ahn K., Yoo D., Seo M., Park S.H. ve Chung K., Springback prediction of TWIP automotive sheets, Met. Mater. Int., 15 (4), 637-647, 2009.
19. Busch C., Hatscher A., Otto M., Huinink S., Vucetic M., Bonk C., Bouguecha A. ve Behrens B.-A., Properties and Application of High-manganese TWIP-steels in Sheet Metal Forming, Procedia Eng., 81 939-944, 2014.
20. Faccoli M., Cornacchia G., Gelfi M., Panvini A. ve Roberti R., Notch ductility of steels for automotive components, Eng. Fract. Mech., 127 181-193, 2014.
21. Çavuşoğlu O. ve Gürün H., Investigation of the Effects of Deformation Speed on the Mechanical Properties and Deep Drawing Process of DP600 and DP780 Sheet Metal, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (4), 777-784, 2014.
22. Kilic S., Ozturk F., Sigirtmac T. ve Tekin G., Effects of Pre-strain and Temperature on Bake Hardening of TWIP900CR Steel, J. Iron. Steel Res. Int., 22 (4), 361-365, 2015.
23. Smith A., Chen Z., Lee J.Y., Lee M.G. ve Wagoner R.H., Effective method for fitting complex constitutive equations, Int. J. Plast., 58 100-119, 2014.
24. Com., A.S. <http://www.arcelormittal.com/automotive>. 2014.
25. Ozturk F. ve Lee D., Analysis of forming limits using ductile fracture criteria, J. Mater. Process. Technol., 147 (3), 397-404, 2004.
26. Ozturk F., Toros S. ve Kilic S., Effects of Anisotropic Yield Functions on Prediction of Forming Limit Diagrams of DP600 Advanced High Strength Steel, Procedia Eng., 81 (0), 760-765, 2014.
27. Ozturk, F., Toros S. ve Kilic S., Tensile and Spring-Back Behavior of DP600 Advanced High Strength Steel at Warm Temperatures, J. Iron. Steel Res. Int., 16 (6), 41-46, 2009.
28. Dilmeç M., Halkacı H.S. ve Özturk F., Investigation into Reasons for Minimum Major Strain Offsetting of Forming Limit Curve Obtained with Nakajima Test for AL 2024-T4, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 29 (3), 527-536, 2014.
29. Marciniak Z., Stability of plastic shells under tension with kinematic boundary condition, Archiwum Mechaniki Stosowanej, 17 (0), 577-592, 1965.
30. Marciniak Z. ve Kuczyński K., Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, Int. J. Mech. Sci., 9 (9), 609-620, 1967.

31. Azrin M. ve Backofen W.A., The deformation and failure of a biaxially stretched sheet, *Metallurgical Transactions*, 1 (10), 2857-2865, 1970.
32. Zhu X.-K. ve Leis B.N., Average shear stress yield criterion and its application to plastic collapse analysis of pipelines, *Int. J. Press. Vessels Pip.*, 83 (9), 663-671, 2006.
33. Fernandes J.V., Rodrigues D.M., Menezes L.F. ve Vieira M.F., A modified swift law for prestrained materials, *Int. J. Plast.*, 14 (6), 537-550, 1998.
34. Fields D. ve Backofen W., Determination of strain hardening characteristics by torsion testing, *Proc. ASTM*, 57 (0), 1259-1272, 1957.
35. Mises R.v., *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand*, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 1913 582-592, 1913.
36. Butuc M.C., Banabic D., Barata da Rocha A., Gracio J.J., Ferreira Duarte J., Jurco P. ve Comsa D.S., The performance of Yld96 and BBC2000 yield functions in forming limit prediction, *J. Mater. Process. Technol.*, 125 (126), 281-286, 2002.
37. Cao J., Yao H., Karafillis A. ve Boyce M.C., Prediction of localized thinning in sheet metal using a general anisotropic yield criterion, *Int. J. Plast.*, 16 (9), 1105-1129, 2000.
38. Yao H. ve Cao J., Prediction of forming limit curves using an anisotropic yield function with prestrain induced backstress, *Int. J. Plast.*, 18 (8), 1013-1038, 2002.
39. Li X., Guo G., Xiao J., Song N. ve Li D., Constitutive modeling and the effects of strain-rate and temperature on the formability of Ti-6Al-4V alloy sheet, *Mater. Des.*, 55 (0), 325-334, 2014.