

## New Generation Advanced High Strength Steels: Developments, Trends and Constraints

Eren Billur (Corresponding author)  
Billur Metal Form Ltd., General Manager, Bursa, Turkey  
Atilim University, Automotive Engineering Dept., Ankara, Turkey  
eren@billur.com.tr

Baris Cetin  
FNSS Defense System Inc.,  
Engineering and Research Department, Ankara, Turkey

Murat Gurleyik  
FNSS Defense System Inc.,  
Manufacturing Services Department, Ankara, Turkey

### Abstract

It is very obvious that new technological improvements take place rapidly in steel production industry. With this progress, which is basically forced by the need for new engineering materials in automotive industry, new generation steels have been developed and commercialized continuously. In the field of high-strength steels, cost effective, new products are also developed with better mechanical properties like Q&P, TBF, etc. In this context, recent events in advanced high strength steels (AHSS) are investigated and the applications, mechanical properties and availabilities of them are analyzed. Some brief explications are also made for the necessary material characterization tests for the CAE simulations of AHSS

**Keywords:** Advanced high strength steels, Material characterization, Q&P, TBF, Nanosteel

## Yeni Nesil Yüksek Dayanımlı Çelikler: Gelişmeler, Trendler ve Kısıtlar

### Özet

Çelik imalat sektöründe, yeni teknolojik gelişmelerin, çok hızlı bir şekilde meydana geldiği rahatlıkla söylenebilir. En baskın şekilde otomotiv sektöründeki yeni mühendislik malzemelerine olan ihtiyacın tetiklediği bu süreçte, yeni nesil çelikler devamlı olarak geliştirilmekte ve piyasaya sürülmektedir. Yüksek dayanımlı (mukavemetli) çelikler alanında da yeni nesil, daha iyi mekanik performansa ve daha düşük maliyete sahip ürünlerin geliştirildiği (Q&P, TBF, vb.) gözlemlenmektedir. Bu çalışmada; yüksek dayanımlı çelikler konusunda güncel teknolojik gelişmeler irdelenmiş, yeni nesil çeliklerin teknik kısıtları, uygulama alanları ve piyasadaki temin edilebilme imkânları açıklanmıştır. Yeni nesil, yüksek dayanımlı çeliklerin CAE ortamında simülasyonu için gerekli malzeme karakterizasyon işlemlerine de çalışma içerisinde yer verilmiştir.

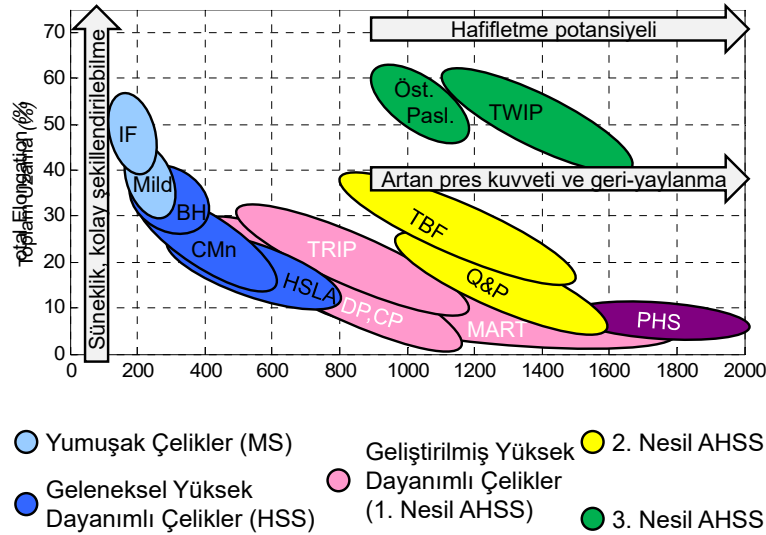
**Anahtar Kelimeler:** Yüksek dayanımlı çelikler, Malzeme karakterizasyonu, Q&P, TBF, TWIP, NanoSteel.

## 1. Giriş

Otomotiv sektöründeki zorlayıcı koşullar ve yönetmelikler, devamlı bir şekilde daha yüksek dayanımlı çeliklerin üretilmesini ve geliştirilmesini tetiklemektedir. Sektördeki güvenlik standartlarının artması, daha az emisyon oranına sahip olması açısından, daha hafif araçların üretilmek istenmesi, vb. nedenlerle uzun yıllardır, yüksek dayanımlı çelikler (Advanced High Strength Steels / AHSS) konusu araştırılmakta ve geliştirilmektedir. Bu nesil çelikler, otomotiv sanayinde 1990'ların sonundan itibaren yaygın bir şekilde kullanılarak, malzeme kalınlıkları ve araç ağırlıkları azaltılmaktadır. Üretilen yüksek dayanımlı çeliklerin sadece dayanım değerleri değil form verilebilirlikleri, bir diğer deyişle süneklikleri ve punta kaynağına elverişli olmaları da otomotiv sektörü için oldukça önemlidir. Asıl olarak otomotiv sektörü için geliştirilen bu çelikler, diğer birçok sektör için de kullanılabilir bir hammadde olarak hizmet vermektedir. Çelik üreticisi firmaların hem yüksek dayanımlı, hem de form verilebilirlikleri yüksek, sünek malzemeler geliştirmek üzerine yaptıkları Ar-Ge çalışmalarını kesintisiz olarak sürdürdükleri söylenebilir.

Çelikler genel olarak üç sınıfta değerlendirilebilirler. Yumuşak çelikler (mild steels), konvansiyonel yüksek dayanımlı çelikler (HSS-high strength steels) ve geliştirilmiş yüksek dayanımlı çelikler (AHSS, Advanced High Strength Steels) [1, 2].

Çelik sektöründeki son güncel gelişmelerle birlikte, kopma dayanımı (UTS) 1000-1200 MPa, soğuk sac şekillendirmeye hatta derin çekme (deep drawing) işlemine olanak verecek kadar sünek çelikler üretilmektedir.



Şekil 1. Çeşitli çelik sınıflarının dayanım-toplam uzama eğrisi [1].

## 2. Güncel Kullanım Durumu ve Teknik Kısıtlar

### 2.1 Yumuşak Çelikler

Yumuşak çelikler (Mild Steels), genellikle sadece Ferrit fazından oluşmaktadır. Bu çeliklerin en yüksek kopma dayanımı 280 MPa seviyesindedir; ancak yüksek süneklikleri sayesinde, bu çelikleri kullanarak oldukça karmaşık geometrilerin elde edilebilmesi mümkündür. Bu nedenle ticari olarak derin çekme kalitesi (Deep Draw Quality / DDQ) olarak da adlandırılırlar. Yumuşak çelikler 1980'lere kadar otomobil gövdelerinin tamamında kullanılmaktaydı. Günümüzdeyse otomobil gövdelerindeki kullanımları iki alanda kısıtlanmıştır:

1) taban sacı gibi fazla yük taşımayan, kaza güvenliğini etkilemeyen ama rijitliği önemli komponentler,

2) görünüşü önemli olan dış paneller.

Yumuşak çeliklerin günümüzde iki sınıfı vardır:

#### 2.1.1 Yumuşak Çelikler (Mild Steels)

Bu çelikler (Şekil 1'de Y.Ç. ile gösterilen), bazen karbon çeliği olarak da adlandırılırlar ve oldukça az alaşım elementi barındırır.

### 2.1.2 Arayer Atomu İçermeyen Çelikler (Intersititial Free Steels)

Bu çelikler (Interstitial Free, Şekil 1'de IF olarak gösterilen), ultra-düşük seviyede karbon içermektedir. Dayanım değerleri yumuşak çeliklerden de düşük olup, süneklikleri son derece yüksektir. Ticari olarak EDDQ (Enhanced Deep Draw Quality - Geliştirilmiş Derin Çekme Kalite çelik) olarak da bilinmektedir.

### 2.2 (Geleneksel) Yüksek Dayanımlı Çelikler (Conventional High Strength Steels)

"Geleneksel" yüksek dayanımlı çeliklerin sertleşme mekanizması "katı-çözültü sertleşmesi"dir. Genel olarak 3 sınıfta incelenebilirler:

#### 2.2.1 Fırında Sertleşen Çelikler (Bake-Hardenable Steels):

Bu çeliklerde (Şekil 1'de BH ile gösterilen), özel bir proses sayesinde karbon atomlarının boya fırınlama sırasında çözültüden çıkması sağlanır. Böylece çelik pres atölyesindeyken yumuşak ve kolay form alabilir haldeyken, son ürün aşamasında daha yüksek dayanımlı olması sağlanır. BH çelikler, 2015 Ocak ayı fiyatlarına göre, standart yumuşak çeliklerden 45-60 EUR/ton daha pahalıya satılmaktadır [3].

#### 2.2.2 Karbon-Mangan Çelikleri (C-Mn Steels):

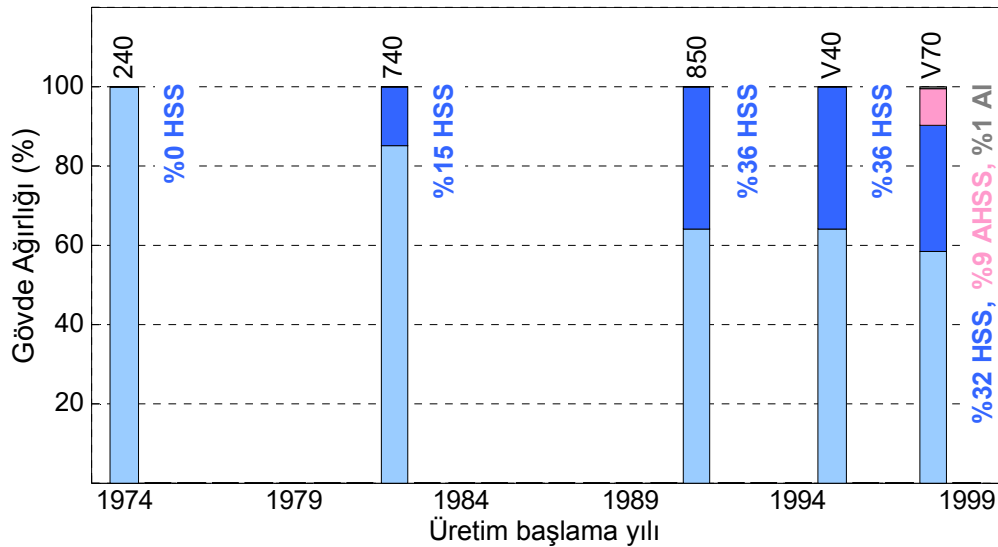
Bu çelikler (Şekil 1'de CMn ile gösterilen), basitçe yumuşak çeliklerin Mangan alaşımı ile sertleştirilmiş halidir. En yaygın kullanımı CMn 440 çeliğidir, kopma dayanımı 440 MPa olan bu çelik, standart yumuşak çeliğe kıyasla yaklaşık 80 EUR/ton daha pahalıdır [3, 4].

#### 2.2.3 Yüksek Dayanım Düşük Alaşımli Çelikler (High Strength Low Alloying Steels)

Bu çelikler (Şekil 1'de HSLA ile gösterilen), CMn çeliklerinin çok az miktarda (mikro alaşım seviyesinde) Titanyum, Vanadyum veya Niyobyum ile alaşımlanması ile dayanımı artırılmış halidir. Bu çeliklerin akma dayanımı 900 MPa seviyesine kadar çıkabilmektedir [2]. HSLA otomotivde yaygın olarak kullanılan ilk yüksek dayanımlı çelik ailesidir. HSLA serisinde verilen rakamlar kopma dayanımını değil, akma dayanımını ifade eder. Örneğin HSLA340, akma dayanımı 340 MPa, kopma dayanımı 550 MPa olan bir çeliktir. Dayanım seviyesine göre HSLA çelikler standart çeliklerden 35-200 EUR/ton daha pahalı olabilir [3].

Otomotivde ilk kullanımları 1979'da Mercedes S-serisi (W126) ile başlamıştır [5]. 1980'lere gelindiğinde Volvo firması da HSS kullanmaya başlamıştır [6].

Geleneksel yüksek dayanımlı çelikler otomotivde sanayide günümüzde de kullanılmaktadır. BH sınıfı çelikler dış panellerde, CMn ve HSLA ise enerji emmesi beklenen kaza komponentlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yeni nesil otomobillerin kaza komponentlerinde, alüminyum alaşımları ve geliştirilmiş yüksek dayanımlı çeliklerin kullanımı da giderek artmaktadır [1].



Şekil 2. 1974-1999 yılları arasında tanıtılan bazı Volvo modellerinin gövde malzeme dağılımı [6-8].

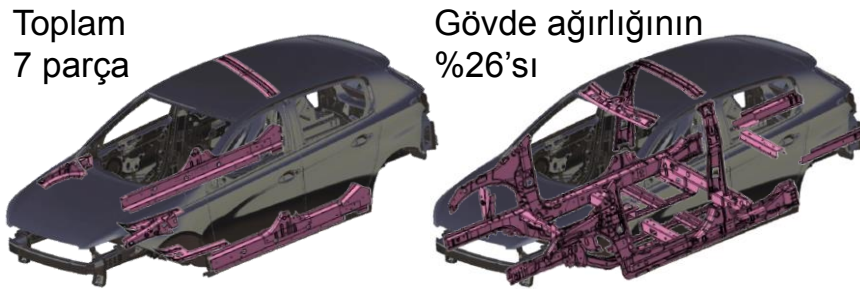
### 2.3 Geliştirilmiş Yüksek Dayanımlı Çelikler ( Advanced High Strength Steels)

Birinci nesil AHSS olarak adlandırılacak DP (Dual Phase – Çift Fazlı), CP (Complex Phase – Karmaşık Fazlı), TRIP (Transformation Induced Plasticity – Şekillendirme ile artan plastisite), MS (Martensitik) ve PHS (Press Hardened Steel – preste sertleştirilmiş/sıcak şekillendirilmiş çelikler) sınıfı çelikler, otomotiv sektöründe yoğun bir kullanıma sahiptirler.

AHSS çelikler ile konvansiyonel yüksek mukavemetli çelikler (HSS) arasındaki en temel fark mikro yapılarıdır. HSS çelikler, tek fazlı ferritik çeliklerdir. AHSS'ler ise değişik miktarlarda martensit, beynit, ferrit, kalıntı östenit (retained austenite) içeren çok fazlı çeliklerdir [9]. Bu çeliklerde dayanımın artması için martensit fazı, sünekliliğin artırılması için ise martensitin yanına en az bir tane daha faz (genellikle ferrit ya da az miktarda kalıntı östenit) eklenmektedir [1, 9].

#### 2.3.1 DP Çelikleri (DP Steels)

Sahip oldukları yüksek dayanım, HSS'lere görece yüksek form verilebilirlik, iyi kaynak edilebilirlik, piyasadan temin edilme kolaylığı ve maliyet avantajları sayesinde en çok kullanılan AHSS sınıfı çeliktir [10]. DP çeliklerinin bir diğer önemli avantajı ise mikro yapılarındaki martensitin hacimsel oranı ve yayılımı değiştirilerek farklı mukavemet ve form verilebilirlik değerlerinde kolaylıkla elde edilebilmeleridir [11]. Bu çelikler, 590-1400 MPa aralığında kopma mukavemetine sahip olarak, piyasadan kolaylıkla temin edilebilmektedir. DP600, DP800 ve DP1000 çelikleri otomotiv sektöründe hali hazırda yoğun olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ise Erdemir, (Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.) DP600'ü seri olarak üretmekte, DP800'e ise hazırlık yapmaktadır [12]. Özellikle Bursa ve Kocaeli bölgesindeki otomotiv yan sanayii, DP600 ve DP800 ile uzun süredir çalışmaktadır. Türkiye'de 2015 itibarı ile komponent üretiminde bilinen en yüksek dayanımlı şekillendirme ise DP1000 seviyesindedir [13]. DP600, konvansiyonel yumuşak çeliğe oranla 150 EUR/ton, DP1200 ise yaklaşık 250 EUR/ton daha pahalıdır [3].



Şekil 3. Peugeot 308'de DP çeliği kullanımı: (a) 2008 model 1. nesil, (b) 2014 model 2. nesil [14].

#### 2.3.2 TRIP Çelikleri (TRIP Steels)

DP çelikleri ile birlikte TRIP (Transformation Induced Plasticity) çeliklerinin de otomotiv sanayinde kullanım alanları geniştir. TRIP çelikleri DP'lerden farklı olarak mikro yapılarında %10-15 seviyelerinde kalıntı östenit içerirler [2]. Deformasyon altında kalıntı östenit, martensite dönüşerek hem yüksek bir lokal sertlik sağlar hem de gerinimin erken birikmesini engelleyerek toplam uzamayı arttırır [15]. Bu nedenle, TRIP'ler DP'lere göre daha sünektirler ve yine bu sayede darbe emilimleri daha yüksektir. Yüksek süneklilikleri, derin çekme operasyonunu zorunlu kılan parçalar için önemli bir avantaj oluşturmaktadır. TRIP çelikleri, 590-1180 MPa mukavemet aralığında piyasada bulunabilmektedir. Türkiye'de TRIP çeliğinin üretimi 2015 yılı itibarı ile söz konusu değildir. Bu çelikler, ithalat yoluyla yurtdışı çelik üreticisi firmalardan temin edilebilmektedirler. Ülkemizde bilinen en yüksek uygulaması TRIP 980'dir [13]. TRIP 780 çeliği, yumuşak çelikten yaklaşık 250 EUR/ton daha pahalı satılmaktadır [3].

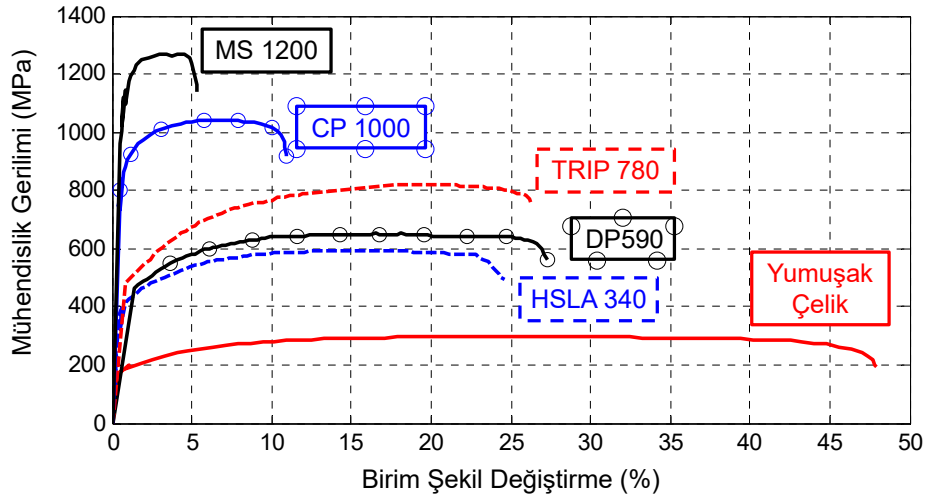
#### 2.3.3 CP Çelikleri (CP Steels)

Karmaşık fazlı (Complex Phase) çeliklerde, ferrit ve martensitin yanı sıra beynit ve bazı durumlarda kalıntı östenit bulunmaktadır. Tanecik boyutunu (grain size) küçültmek amacı ile Ti ve/veya Nb alaşımları içerebilirler [2, 15]. Bu çelikler özellikle Avrupalı üreticiler tarafından A-sütunu, B-sütunu ve marşpiyel sacı gibi yerlerde kullanılmaktadır [1]. Genel olarak benzeri DP çeliklerinden daha yüksek sünekliliğe ve delik flanşlama kabiliyetine sahiptirler. Günümüzde 600-1180 MPa dayanım aralığında

temin edilebilirler [2, 3, 15]. CP600 sacı standart çelikten 170 EUR/ton daha pahalı iken, CP1000 sacı 280 EUR/ton daha pahalıdır [3].

### 2.3.4 MS Çelikleri (MS Steels)

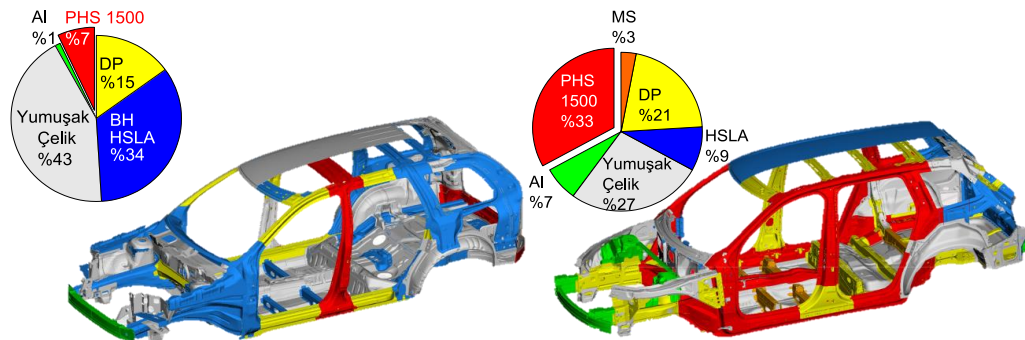
Martensitik çelikler, adından da anlaşılacağı üzere neredeyse tamamen martensitten oluşan çeliklerdir. Bu çelikler üretim esnasında hızlıca soğutulmuş olarak tamamen martensite dönüştürülmeye çalışılmaktadır, buna karşılık üretim koşullarında bir miktar beyrit ve/veya ferrit içerebilirler. Diğer AHSS'lerden farklı olarak tek fazlı olduklarından, dayanımları içerisindeki karbon miktarı ile ve/veya Mangan (Mn), Krom (Cr), Molibden (Mo), Bor (B) alaşımı ile değiştirilir. Bu çeliklerin süneklikleri oldukça düşüktür. Bu nedenle yapısal parçalarda kullanılmaktadır. Genellikle roll-form operasyonları için de tercih edilirler. MS çelikleri 900-1900 MPa dayanımları arasında temin edilebilmektedir [1, 2, 16]. MS 1500 çeliği, standart çeliğe oranla 330 EUR/ton daha pahalıdır [3]. Şekil 4'te çeşitli sınıflardan çeliklerin mühendislik gerilim-gerinim eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 4. Çeşitli yumuşak çelik, HSS ve AHSS'lerin gerilim-gerinim eğrileri [1].

### 2.3.5 PHS Çelikleri (PHS Steels)

Martensitik çeliklerin bir özel durumu da sıcak şekillendirilebilir çelikler olarak sınıflandırılır. Bu çelikler Mangan (Mn) ve Bor (B) alaşımli çeliklerdir. Çelik üreticileri tarafından ısıl işlem uygulanmayan bu çelikler, parça üreticilerinde östenitlenip şekillendirilir. Daha sonra kalıp içindeki soğutulmuş sertleştirilir. 1980 ve 90'lı yıllarda kapı içi çelik barlar ve tampon takviye sacı gibi görece basit şekillerde kullanılmıştır. 2000'li yıllardan itibaren kullanımı oldukça artan bu sınıftaki çelikler, yaygın olarak 1500 MPa seviyesinde üretilmektedir [17]. Son yıllarda 500 MPa, 1000-1200 MPa ve 1800-2000 MPa seviyelerinde 3 yeni sınıf ortaya çıkmıştır [18]. 1800 MPa seviyesi, ilk kez 2011 yılından itibaren Mazda CX-5'te kullanılmaktadır [19]. 500 MPa seviyesi ise ilk kez Volvo XC90'da, 2014'ten bu yana kullanılmaktadır [20]. 1000-1300 MPa seviyesi çelikleri, bir çelik üreticisi piyasaya sunmuş, diğerleri tarafından halen geliştirilme aşamasındadır [21-23]. PHS çeliklerinin 2015 itibarı ile en çok kullanıldığı otomobil yeni XC90'dır ve gövde ağırlığının %38'i sıcak şekillendirilmiştir, bkz. Şekil 4. Bunun %33'ü 1500 MPa seviyesinde, %5'i ise 500 MPa seviyesindedir [20].



Şekil 5. Volvo XC90 malzeme dağılımı: (a) 2002 model 1. Nesil, (b) 2014 model 2. nesil [20].

#### 2.4 İkinci Nesil AHSS Çelikler (2nd Generation AHSS)

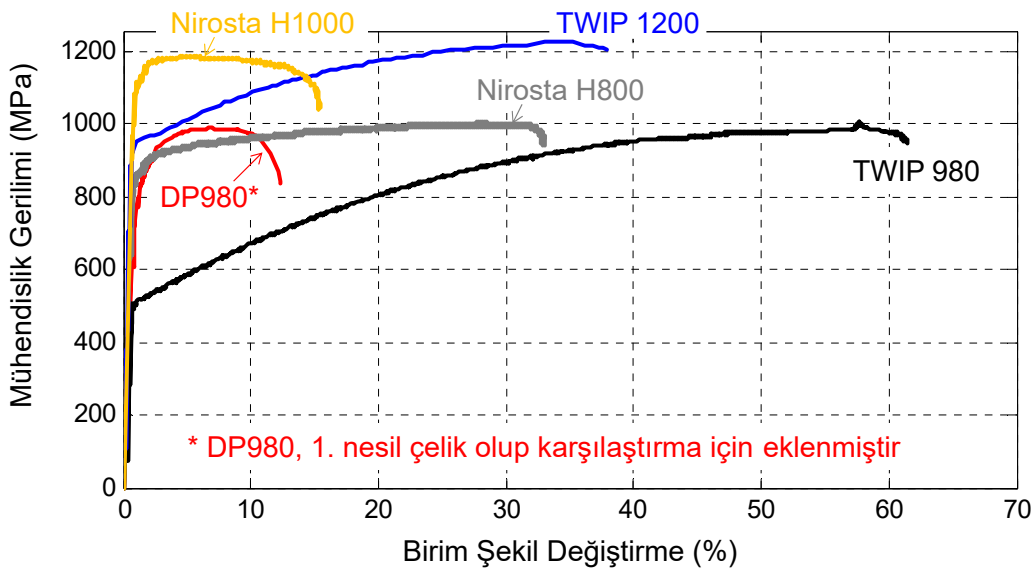
İkinci nesil AHSS olarak tanımlanabilecek olan östenitik paslanmaz çelikler (Austenitic Stainless Steel) ve TWIP (Twinning-Induced Plasticity) sınıfı çelikler, birinci nesil AHSS'e göre çok daha yüksek sünekliğe sahiptir. 1. nesil AHSS olan TRIP çelikleri hacimsel oran olarak %10-15 kalıntı östenit içerir. TWIP çeliklerinde ve östenitik paslanmaz çeliklerde ise bu oran yaklaşık %100'dür. Östenit oda sıcaklığında kararlı olmadığı için TWIP çeliklerinde östenit mikro yapı, yüksek alaşım elementleri (Mn, vb.) ile bağlanarak bu kararsızlık giderilmektedir. TWIP çeliklerinde kullanılan alaşım elementlerinden biri de alüminyumdur. Alüminyumun, istifleme hatası enerjisi değerini de (stacking fault energy) yükselttiği bilinmektedir. Tüm bu nedenlerle, TWIP çelikleri hem yüksek bir kopma mukavemetine (~UTS 1000 MPa) sahip olabilmekte hem de yüksek bir süneklik (toplam uzama > %50) gösterebilmektedir [1, 2]. Bu büyük avantajlarından ötürü pres altında soğuk sac şekillendirme işlemi için son derece uygundur. Fakat içerdikleri yüksek alaşım malzemeleri nedeniyle yüksek maliyetlidir ve kaynak edilmeleri zordur. 2015 yılı itibarıyla dünyada iki firma TWIP 900-980 seviyelerinde üretim yapmaktadır. TWIP çeliklerinin 1700 MPa'a kadar üretilebilmeleri planlanmaktadır [22, 24]. Türkiye içerisinde seri miktarlarda üretilmeleri, mevcut durumda söz konusu değildir. Ancak 2014 yılında Tübitak MAM tarafından bir yüksek lisans tez çalışması kapsamında deneysel miktarlarda TWIP çeliği lab ortamında üretilmiştir [25].

TWIP çelikleri ile ilgili bir diğer zorluk da Mn, Si, Al gibi yüksek oranda içerdikleri alaşım elementleri nedeniyle kaynak performanslarının düşük olmasıdır. Ayrıca bu malzemelerde gecikmiş kırılma (delayed-cracking) gözlemlenebilmektedir [26]. Bu sebeplerden ötürü, ikinci nesil AHSS çelikler şu an için geniş bir kullanıma sahip değildirler fakat konu hakkındaki AR-GE ve iyileştirme faaliyetleri sürdürülmektedir. 2013 Mayıs ayında yapılan "Materials in Car Body Engineering" Konferansı'nda yapılan anket çalışmasında, katılımcıların %87'si, sağlanacak bazı iyileştirmeler ile TWIP çeliklerinin, bazı özel alanlarda seri imalatla kullanılabileceğini değerlendirmektedir [27].

2016 Ocak itibarı ile TWIP çeliği kullanımı sadece Fiat Panda ve Aegea'nın tampon sacı ile sınırlıdır. Bu uygulamada, Fiat 500'de bulunan PHS1500+DP600 saclarının yerine tek parça TWIP980 sacı kullanılarak yaklaşık 1 kg ağırlık tasarrufu sağlanmıştır [28]. Alman üretici Volkswagen ise 2014'ün sonunda TWIP çeliklerinin otomobil koltuk üretiminde kullanılabileceğini ve bu konuda Hanover Üniversitesi ile araştırma yaptığını açıklamıştır [29].

Bir diğer 2. Nesil AHSS olarak östenitik paslanmaz çelikler gösterilmektedir. Adından da anlaşılacağı üzere bu çelikler de %100 östenit fazında üretilmektedir. Bu nedenle yüksek alaşım olmaları gerekmektedir. Bu sacların otomobil gövdesinde kullanımları eski (2004-2010 arası C6 kodlu) kasa Audi A6 [30] ve Porsche Panamera ile sınırlıdır [31].

2. Nesil AHSS ailesine ait bazı çeliklerinin mühendislik gerilim-gerinim eğrileri Şekil 6'da gösterilmiş ve 1. Nesil DP980 ile kıyaslanmıştır. (Not: Nirosta çeliklerde H800 ve H1000 rakamları akma dayanımını işaret etmekte, diğer çeliklerde ise rakamlar kopma dayanımını ifade etmektedir.).



Şekil 6. 2. Nesil AHSS'lerin mühendislik gerilimi eğrileri [1, 31, 32].

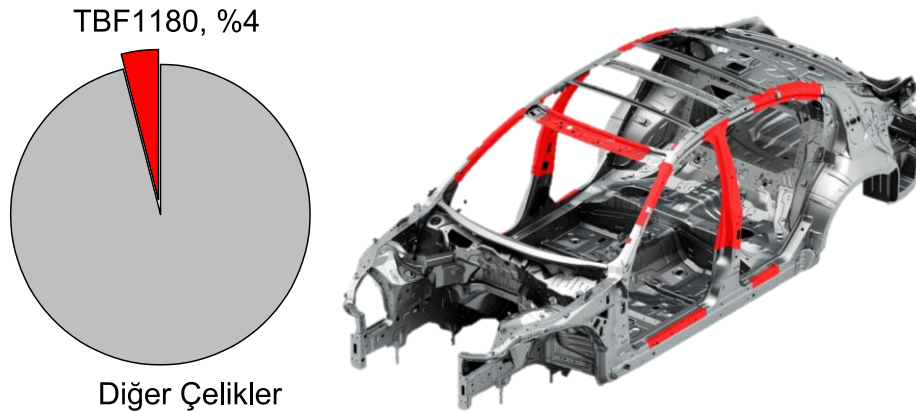
## 2.5 Üçüncü Nesil AHSS Çelikler (3rd Generation AHSS)

2. Nesil çeliklerin yüksek maliyeti ve kaynak problemleri nedeniyle, hem Avrupa Birliği hem de ABD, 3. nesil çeliklerin geliştirilmesini istemekte, bu konuda araştırmaları fonlamaktadır. 3. Nesil için hedeflenen alan, 1. Nesil çeliklerden daha yüksek dayanım, 2. nesil çeliklerden ise daha düşük maliyettir. Amerikan Enerji Bakanlığı (DOE - Department of Energy), çelik üreticilerinden "soğuk şekillendirilebilir", 1000 MPa kopma dayanımında %30 toplam uzamaya sahip ve 1500 MPa kopma dayanımında %20 toplam uzamaya sahip çelikler geliştirmelerini istemiştir [33]. Mevcut çelik üreticileri arasında 3 farklı yöntem izlenmektedir [22, 34]:

- 1) 1. Nesil AHSS çeliklerini biraz daha geliştirmek: Bunlar "Enhanced DP" olarak da adlandırılan, geliştirilmiş çift fazlı çelikler ya da modifiye edilmiş (Mn eklenmiş) TRIP çelikleridir.
- 2) 2. Nesil AHSS çeliklerinde kullanılan alaşımları azaltmaya çalışmak: Medium-Mn TWIP (Daha az Mangan alaşımlı TWIP) çeliği konusunda da çalışmalar yapılmaktadır.
- 3) Tamamen yeni nesil çelik geliştirilmesi: Bu alanda Q&P, TBF ve NanoSteel olarak adlandırılan üç çelik sınıfı geliştirilmiştir.

Bu sınıfta yazılan çeliklerden Q&P çeliği Çinli BaoSteel ve AnSteel firmaları tarafından seri olarak üretilmektedir. Mevcut durumda Q&P çelikleri 980-1180 MPa aralığında temin edilebilmektedir [22, 35, 36]. Yine Çinli üretici Great Wall (otomobil üreticisi), bir modelinde Q&P980'den üretilmiş kaza komponentleri kullanmıştır [37]. BaoSteel, 2013'ten bu yana Q&P1300 üzerinde çalışmaktadır [22]. Amerikalı AK Steel ise deneysel ölçekte Q&P 1760 çeliğinde %15, Q&P 2100 çeliğinde ise %13 toplam uzamaya ulaşıldığını açıklamıştır [38]. Genel kural olarak %12'nin üzerinde toplam uzama soğuk şekillendirme için yeterli görülmektedir.

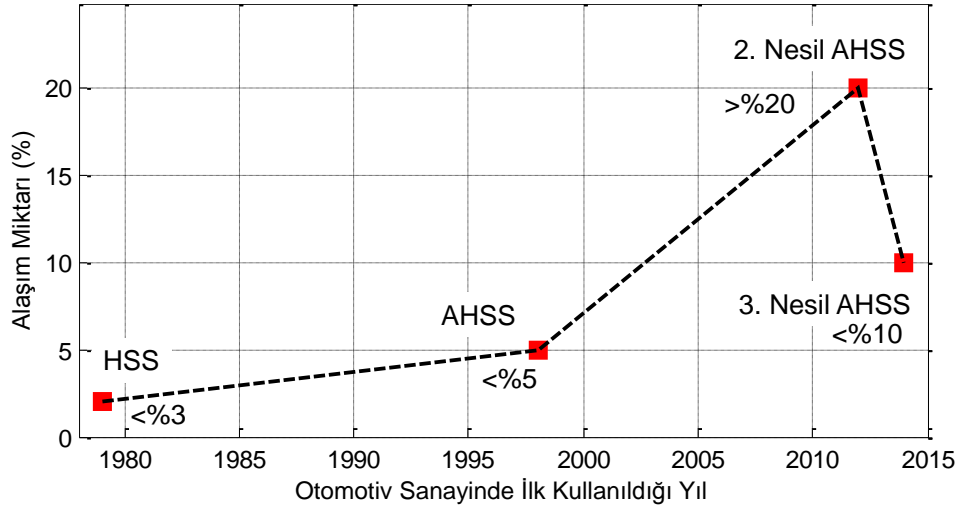
TBF çeliği ise ilk etapta Japon üretici Kobe Steel tarafından tanıtılmıştır [39]. Özellikle otomotiv endüstrisinde Renault-Nissan grubu tarafından kullanılmaktadır. 2012'de Renault-Nissan grubunun hafif gövde mühendislik stratejileri başlıklı bir konuşmada [40], TBF çeliklerinin grup açısından gelecek hedeflerinde bulunduğu bahsedilmiştir. Nitekim 2013'te önce Infiniti Q50 modelinin kaza komponentlerinde TBF 1180 çeliği kullanılmıştır, bkz. Şekil 7 [41]. Bu yıl tanıtılan 2015 Nissan Murano'da ise gövde ağırlığının %3'ünü TBF 1180 çelikleri oluşturmaktadır [42]. Kobe Steel 1470 MPa seviyesine kadar TBF çeliği üretilebileceğini açıklamıştır [43]. 2014 Eylül itibarı ile dünyanın en büyük çelik üreticisi ArcelorMittal de FortiForm ticari adı ile TBF çeliği üretmeye başlamıştır [44]. 2015 Ocak fiyat listesinde FortiForm 1050 çeliğinin DP980'den 100 EUR/ton daha yüksek fiyatla satışa başladığı görülmüştür [3].



Şekil 7. Infiniti Q50'de TBF1180 kullanımı [41].

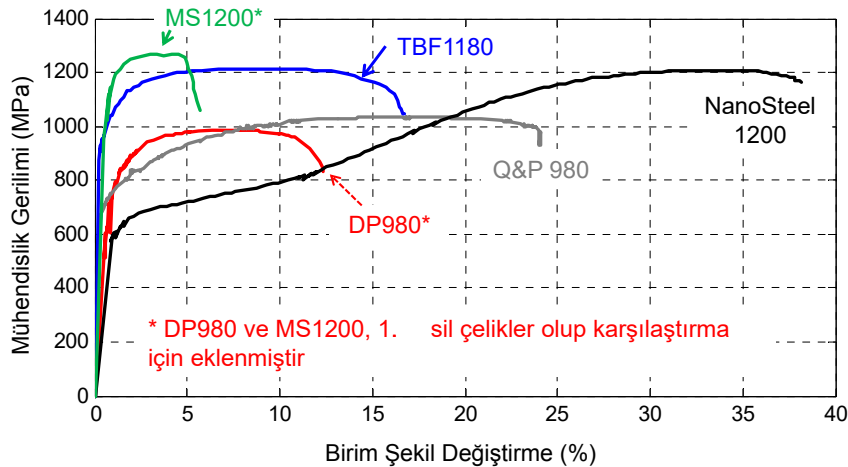
Bu çeliklerin geliştirilmesindeki en önemli motivasyon, ikinci nesil AHSS gibi çok iyi mekanik özelliklere sahip ama aynı zamanda birinci nesil AHSS'e yakın bir maliyete sahip çelik sınıfının geliştirilmek istenmesidir. Q&P ve TBF sınıfı çelikler piyasalaşmış ürünlerdir. Nanosteel sınıfı çelikler içinse Ar-Ge, patent vb. çalışmalar devam etmektedir. Nanosteel, mevcut durumda ticarileşmiş bir ürün değildir [34]. 3. Nesil AHSS çelikler, çok yeni geliştirilmiş ürünler olduklarından avantajları, dezavantajları konusunda literatürde çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Fakat ikinci nesil AHSS'e göre çok daha düşük oranlarda alaşım içerdiklerinden (< %10) kaynak edilebilirliklerinin daha iyi olduğu

düşünülebilir, bkz. Şekil 8 [45].



Şekil 8. Farklı sınıflardaki çeliklerin otomotivde kullanım yılları ve içerdikleri alaşım miktarları.

Sahip oldukları fiyat avantajı ve yüksek mekanik performansları sayesinde 3. Nesil AHSS'lerin çok kısa bir zamanda büyük bir kullanım alanına sahip olacağı rahatlıkla söylenebilir. Şekil 9'da 1.0-1.2 GPa seviyesindeki 3. nesil AHSS çeliklerin, 1. nesil çeliklerle kıyaslanması gösterilmiştir.



Şekil 9. 1.0-1.2 GPa seviyesindeki 3. Nesil AHSS çeliklerin 1. Nesil DP ve MS çelikleri ile kıyaslanması [1].

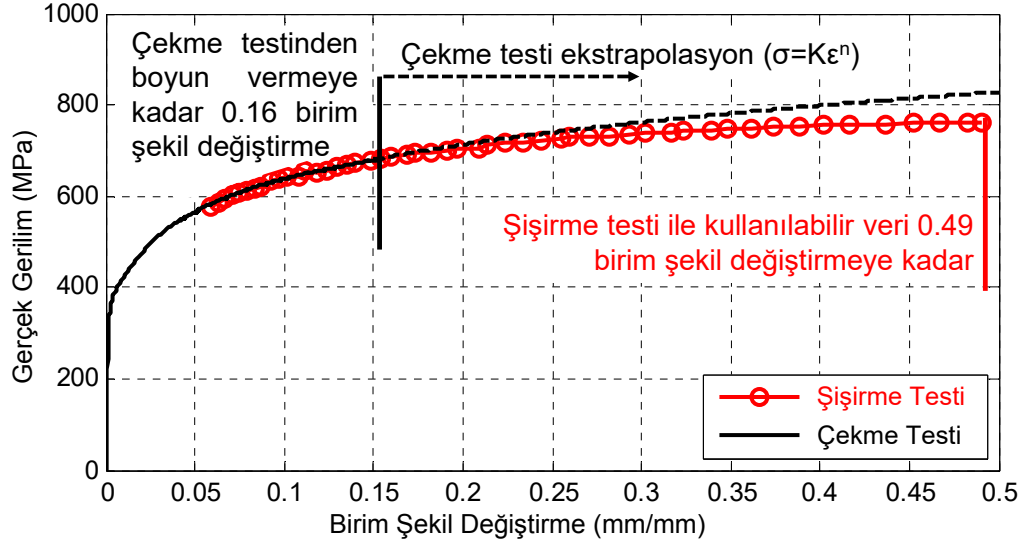
### 3. Yeni Nesil Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Tasarımlarda Kullanımı

Yeni nesil AHSS çeliklerinin tasarımlarda kullanılabilmesi için öncelikle bu malzemelerin bilgisayar ortamında simülasyon/analiz yöntemleri ile doğrulanması gerekmektedir. Tek eksenli (uni-axial) kuvvet uygulamaya dayalı olan standart çekme testinden elde edilen malzeme bilgileri, iki eksenli (bi-axial) deformasyonlar içeren prosesler için yapılan simülasyonlar için yeterli değildir. Tek eksenli bir uygulama olan standart çekme testinde, elde edilebilecek gerçek gerinim değeri (true strain), güçlükle 0.30 değerine ulaşabilmektedir. Bu değer sünek olmayan çelikler için 0,30 değerinin çok daha altında kalmaktadır. (Yüksek gerçek gerinim değerli akma eğrilerini [ $\sim 0,60$ ] elde edebilmek için çekme testinden elde edilen bilgiler ile birlikte ilave sonlu elemanlar modelleri, matematiksel hesaplamalar ve optik ölçme cihazlarını içeren özel ve geliştirilmiş yöntemler kullanılmalıdır[46].)

Oysaki; sac şekillendirme gibi iki eksenli imalat uygulamalarında, iş parçasının gerçek gerinim değeri 0.70 seviyesine ulaşabilmekte hatta bu değeri aşabilmektedir. Standart çekme testlerinden elde edilen rakamlarla yapılacak sac şekillendirme simülasyonları, büyük oranda ekstrapolasyon hesaplaması içermekte; bu da analizlerde kayda değer ölçüde belirsizliklerin, sapmaların yaşanmasına yol



açabilmektedir [47]. Şekil 10'da 1. Nesil AHSS olan DP600'ün çekme ve sac şişirme testi sonuçları görülmektedir. Ekstrapolasyon halinde %5-10 civarında hata çıkacağı tahmin edilebilir [48].



Şekil 10. Standart çekme testi ve sac şişirme testi ile elde edilebilen akma eğrileri, 1. Nesil AHSS olan DP600 için [48]

Bu nedenle, sac şekillendirme analizi, çarpma testi ve balistik performans simülasyonları için standart çekme testi ile elde edilen akma mukavemeti, yüzde uzama, vb. değerler yeterli değildir. Yüksek gerinimler içeren sac şekillendirme simülasyonlarından doğru sonuçların elde edilebilmesi için sac şişirme testi (hydraulic bulge test), Nakajima testi, vb. deneysel çalışmaların da yapılması zorunludur. Sac şişirme testiyle 0.70 gerçek birim şekil değişirme değerine yaklaşılabilir.

Yüksek dayanımlı çeliklerin seri imalat koşullarında soğuk şekillendirilmelerinde oluşan yüksek gerinimler, önemli ölçüde ısı açığa çıkmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, üretim esnasında kalıp sıcaklığı yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Benzer bir şekilde bazı uygulamalarda kullanılan mekanik preslerin çalışma hızı dikkate alındığında plastik deformasyon hızları, göz ardı edilemeyecek kadar yüksektir. Bu nedenle numerik simülasyonlarda, yüksek sıcaklık ve şekil değişirme hızlarında (strain rate) elde edilmiş malzeme karakterizasyon sonuçlarına da ihtiyaç vardır. Savunma sanayinde uygulanan blast ve mayın korunması simülasyon çalışmaları içinse, çok daha yüksek deformasyon hızlarında (103 s-1, vb.) elde edilen malzeme özelliklerine sahip olmak bir zorunluluktur. Özetle yeni nesil AHSS çelikler için yapılacak simülasyon çalışmaları için öncelikle malzeme karakterizasyonunu hassas olarak belirleyebilecek birden fazla testin değişik parametrelerle yapılması gerekmektedir. Uygulanacak tüm bu testlerle, yeni nesil çeliklerin şekillendirme sınır diyagramı (FLD- Forming Limit Diagram), akma eğrisi (Flow Stress Curve), yüksek deformasyon hızlarındaki davranış karakteristiği, sıcaklığa bağlı gerilim akış eğrisi ve kırılma oluşum biçimi (fracture mechanism) hakkında detaylı bilgiler elde edilebilir.

#### 4. Askeri Kara Araçlarında AHSS Uygulamaları

Savunma sanayinin önemli bir alanı olan askeri kara araçlarında, değişik mühendislik gereklilikleri için çok çeşitli malzemeler (çeşitli kalitede yüksek mukavemetli çelikler, zırh çelikleri, değişik temper seviyelerine sahip alüminyum malzemeler, CFRP kompozitler, vb.) kullanılmaktadır. Sektörde kullanılan yüksek mukavemetli çelik malzemeler özelinde, iki ana uygulama sebebi olduğu söylenebilir. Birincisi, yüksek mukavemetli çelikler, yüksek mukavemet ve tokluk özelliğine sahip araç gövdelerinin ve taşıyıcı parçaların imalatında, yapısal gövde elemanları olarak kullanılmaktadır. İkinci kullanım bölgesi ise müşteri şartnamesindeki balistik gereklilik sağlamak için kullanılan zırh çelikleridir.

Askeri kara araçları imalatında kullanılan çeliklerin kalınlıkları, otomotiv sektöründeki uygulamalarla temel bir farklılık yaratmaktadır. Savunma sanayinde kullanılan kalınlıklar 10 mm'yi aşabilmektedir. Bundan ötürü, otomotiv sektöründe büyük çoğunlukla kullanılan yassı çelik ürünlerin savunma sanayinde kullanımı, yok denecek kadar azdır. Askeri kara araçlarının imalatında hammadde olarak plaka çelikler kullanılmaktadır. Bu hammaddedeki kalınlık farkı, imalat yönetiminde de önemli bir

ayırışma yaratmaktadır. Otomotiv sektöründe büyük yoğunlukla kullanılan sac şekillendirme uygulaması (sheet metal forming) kalınlığın 3 mm'yi aştığı durumlarda geçerliliğini yitirmektedir. Kalınlığın bu değerlere ulaştığı durumlar, artık bir kütleli şekillendirme (bulk forming) işlemidir ve bir sac şekillendirme işlemi gibi modellenmesi, simüle edilmesi mümkün değildir.

Yüksek mukavemetli plaka çelikler temel olarak iki başlık altında incelenebilir. Birinci grup S500MC, S700 MC gibi termomekanik haddelenme yöntemiyle (TCMP) ile üretilmiş çeliklerdir. İkinci grup ise S690QL, S890QL gibi su verilmiş ve temperlenmiş (QT, Quenched and tempered) çeliklerdir. TCMP çelikler EN 10149, EN 10025-4 standartları kapsamındadır. QT çelikler ise EN 100025-6 standardına uymalıdır [49].

Zırh çelikleri ise dünyada sayılı çelik üretici firma tarafından üretilen, özel çeliklerdir. Bu ürünler için geçerli teknik özellikler için üretici firmaların kendi hazırladıkları şartnamelere, ürün bilgi sayfalarına başvurmak gerekmektedir. Genel olarak bu çeliklerin de doğal olarak su verilmiş ve temperlenmiş oldukları, tamamen martensitik mikroyapıya sahip oldukları açıktır. Zırh çeliklerinin kopma mukavemetleri 2000 MPa'ın üzerine çıkabilmektedir. Bu çelikler genellikle 5 mm'den 20 mm'ye kadar değişen kalınlıklarda yurtdışı firmalardan temin edilebilmektedirler.

QT opsiyonunda satın alınmış bir çeliği, herhangi bir imalat yönteminde kullanırken dikkat edilmesi gereken en önemli parametre, çeliğin işlem sırasında ulaştığı sıcaklıktır. Özellikle düşük derecelerde temperlenmiş bir çeliğin talaşlı imalat, lazer kesme, yüzey kaplama, vb. işlemlerde maruz kalacağı ısı, yeni bir temperlenmeye yol açarak, üretici firma tarafından garanti edilen mukavemet seviyesini azaltabilir. Örneğin bir zırh çeliği olan ArmoX 600T için üretici firma, malzemenin 170°C'den daha yüksek sıcaklıklara maruz kalması durumunda, ürün şartnamesindeki mukavemet değerlerinin sağlanamayabileceğini belirtmiştir [50].

Gerek yapısal QT çelikleri, gerekse zırh çelikleri sahip oldukları yüksek mukavemet nedeniyle talaşlı imalat için zorlayıcı malzemelerdir. Ayrıca sahip oldukları martensitik mikroyapı nedeniyle kaynak edilebilmeleri için de özel tedbirler alınması gerekmektedir. Soğuk çatlak (cold crack) oluşumu, martensitik yüksek dayanımlı çeliklerin kaynaklı birleştirilmesinde görülen en tipik hata biçimidir [51]. (Soğuk çatlakın bir diğer adı da hidrojen çatlakıdır.) Soğuk çatlakın en kritik yanı, kaynaktan sonraki 48 saat içinde ortaya çıkabilme riskidir. Kaynakta soğuk çatlak oluşumu için temel olarak 3 temel etkenin bir arada bulunması gereklidir:

- 1) Malzemedeki görece yüksek alaşım miktarı
- 2) Birleşim detayındaki hidrojen miktarı (nem, yağ, kir, pas, boya vb.)
- 3) Birleşimde kaynak sonrası oluşan kalıntı çekme gerilimleri

Bu etkenlerden birincisine, tasarım istekleri ve son üründen beklentiler nedeniyle müdahale etmek mümkün olmamaktadır. Fakat malzemenin alaşım miktarına ve eşdeğer karbon içeriğine bağlı olarak ön ısı uygulayarak, soğuma hızını kontrol altına almak (azaltmak) ve hidrojenin ortamdan uzaklaşması için yeterli zamanı sağlamak, soğuk çatlak oluşma riskini önemli ölçüde azaltacaktır. İkinci etkenin ortadan kaldırılması için, kaynak öncesi temizlik uygulamaları ile yabancı maddeleri uzaklaştırmak ve ön ısı ile hidrojen kaynağı olan nemi ortamdan kaldırmak, soğuk çatlak oluşumunu önlemek için kritik öneme sahiptir. Etkenlerden üçüncüsü olan kalıntı gerilimler, her ne kadar fiktürleme metotları ve çeşitli imalat yöntemleri ile azaltılabilse de kaynak işlemindeki hızlı ve bölgesel ısınma-soğuma etkilerinden dolayı kaçınılmazdır. Fakat etkenlerden birini ve/veya birkaçı ortadan kaldırıldığında, soğuk çatlak riskini büyük ölçüde azaltmış olur. Bu nedenle zırh çelikleri gibi yüksek dayanımlı ve yüksek tokluk değerli çelikler, kaynak işlemi öncesinde, kaynak sonrası soğuma hızını azaltma amacıyla ön ısıtma (pre-heating) işlemine tabii tutulurlar.

Otomotiv sanayinde martensitik yapıya sahip çeliklerde, kaynaktan beklenen mekanik performansı sağlamak ve soğuk çatlak riskini azaltmak için ön ısıtma, hatta kaynak bölgelerinin temperlenmesi uygulamaları mevcuttur. Bu ön ısıtma ve/veya temperleme işleminden sonra uygulama bölgelerinde bir miktar dayanım kaybı göze alınmaktadır. Ama sonuçta çok daha iyi bir kaynak sonrası performans ve dayanım elde edilebilmektedir.

Soğuk çatlakları önlemek için değişik çeliklere uygulanması gereken ön ısıtma sıcaklık değerlerine ilişkin tavsiyeler FD CEN ISO/TR 17844 numaralı teknik rapor dokümanında yer almaktadır [49].

## 5. Sonuç

Çelik imalat sektörünün kendine has özellikleri nedeniyle, satın alınan standart çelikler için (St37-2, DC04, vb.) imalatçı firmalar, çoğunlukla akma mukavemeti, kopma mukavemeti, toplam % uzama, kimyasal kompozisyon gibi teknik değerleri sağlamaktadır. Bu makalede de tartışıldığı üzere güvenilir simülasyon sonuçları için bu teknik girdiler yeterli değildir. Malzeme karakterizasyonu için detaylı testler yapılması gerekmektedir. Fakat yeni nesil AHSS'ler için bu durum, daha da zorlayıcıdır. Bu

ürünler yeni geliştirilmiş, teknoloji yoğun ürünler oldukları için üretici firma, sadece kopma mukavemeti ve toplam yüzde uzama gibi çok sınırlı mekanik özellikleri müşteri ile paylaşmaktadır. Çoğu zaman kimyasal kompozisyon değerleri bile üretici firmadan elde edilememektedir. Ya da sadece kimyasal kompozisyonun max. değerleri müşteriye verilmektedir. Konunun bir başka boyutu da farklı üreticilerden satın alınan yeni nesil AHSS'ler, kopma mukavemeti ve toplam uzama dışında çok farklı mekanik özelliklere ve mikro yapıları sahip olabilmektedir. Örneğin; değişik üreticilerden temin edilen DP600 çelikleri şekillendirme anında farklı mekanik tepkiler gösterebilmektedir. Tüm bu belirsizliklerin giderilebilmesi, doğru tasarımların ortaya çıkabilmesi için çok önemlidir. Bu nedenle, tasarım mühendisleri için gerekli detaylı teknik bilgiler, malzeme karakterizasyon testleri ile sağlanmalı ve/veya doğrulanmalıdır.

3. nesil AHSS çeliklerin, yüksek mekanik performansları ve fiyat avantajlarından dolayı başta otomotiv sanayi olmak üzere hızlı bir şekilde sanayide kullanıma gireceğinin tartışmasız bir gerçek olduğu düşünülmektedir. Bu yeni nesil çelik malzemelerin, karakterizasyonunun, kaynak performanslarının, imalat süreçlerine uygunluklarının araştırılması ve simüle edilmesi önümüzdeki dönemde önemli bir AR-GE alanı olacaktır.

### Kaynakça

- [1] Billur, E., Dykeman, J. ve Altan, T., (2013-2014). Three generations of advanced high strength steels for automotive applications, 3 parça yazı dizisi, *Stamping Journal*: Nov/Dec 2013, p.15-16, Jan/Feb 2014, p.12-13, Mar/Apr 2014, p. 12-13.
- [2] Posco Technical Research Lab, (2015). *2015 Automotive Steel Data Book*, Incheon-Si, Güney Kore.
- [3] ArcelorMittal Flat Carbon Europe S.A., (2014). Cold Rolled Prices Extras List, basım tarihi 26/12/2014.
- [4] Dykeman, J., (2013). Advanced High Strength Steel - Recent Progress, Ongoing Challenges, and Future Opportunities, *Proceedings of Intl. Symp. on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels 2013*, p. 15-28, AIST.
- [5] Wilhelm, M. (1993). Materials used in automobile manufacture - current state and perspectives, *Journal de Physique IV*, Vol. 3, p. 31-40.
- [6] Fredin, K. (2005), Future materials for body structure applications, *Uddeholm Automotive Seminar*.
- [7] Jonsell, St., Olsson, A. ve Edbäck, S., (2004). The New Volvo V50, *EuroCarBody 2004 - 6<sup>th</sup> Global Car Body Benchmarking Conference*, p. 165-174.
- [8] Nyström, P., Fermér, M. ve Nilsson, H. (2007). The New Volvo V70 and XC70 Car Body, *EuroCarBody 2007 - 9<sup>th</sup> Global Car Body Benchmarking Conference*, p. 255-295.
- [9] Matlock, D.K., Speer, J.G., De Moor, E. ve Gibbs, P.J. (2012). Recent Developments in Advanced High Strength Sheet Steels for Automotive Applications: An Overview, *JESTECH*, 15, 1, p. 1-12.
- [10] Wang, W. ve Wei, X. (2013). The effect of martensite volume and distribution on shear fracture propagation of 600–1000 MPa dual phase sheet steels in the process of deep drawing, *International Journal of Mechanical Sciences*, 67, p. 100–107.
- [11] Samek, L. ve Krizan, D. (2012). Steel – Material Of Choice For Automotive Lightweight Applications, *Proceedings of Metal 2012*, p. 551-556.
- [12] Erdemir A.Ş., birebir görüşme, 2014.
- [13] Otomotiv yan sanayi firmaları ile birebir görüşmeler, 2014.
- [14] Patois, C. ve Barbier, M. (2014). Body-in-white of the New Peugeot 308, *EuroCarBody 2014 - 16<sup>th</sup> Global Car Body Benchmarking Conference*.
- [15] Keeler, S. ve Kimchi, M. (2014). *Advanced High-Strength Steels: Applications Guidelines*

Version 5.0, WorldAutoSteel.

- [16] ArcelorMittal USA LLC, (2014). Products & Prices USA, basım tarihi 12/01/2014.
- [17] Billur, E. (2013). Fundamentals and Applications of Hot Stamping Technology for Producing Crash-Relevant Automotive Parts, Doktora Tezi, The Ohio State University, Columbus, OH.
- [18] Billur, E. (2014). Producing Ultra High Strength Automotive Components: Hot Stamping of Boron Alloyed Steels vs. Cold Stamping of New Generation Steels, *2<sup>nd</sup> International Metal Forming Conference*.
- [19] Matsuoka, H. ve Fujihara, K., Mazda CX-5 (2011). *EuroCarBody 2011 - 13<sup>th</sup> Global Car Body Benchmarking Conference*.
- [20] Ljungqvist, H., Amundsson, K. ve Lindblad, O. (2014). The All-New Volvo XC90 Car Body, *EuroCarBody 2014 - 16<sup>th</sup> Global Car Body Benchmarking Conference*.
- [21] ThyssenKrupp Steel Europe AG (2014), birebir görüşme.
- [22] Gao, M. (2013). Sustainable steel solutions for Chinese cars, *Green Manufacturing – the Future of Steel and Automobile*, WorldAutoSteel.
- [23] Vietoris, T. (2011). New development in PHS: Materials, coatings, production methods, *AP&T Seminar*.
- [24] Nam, J.-B. (2013). Development of new auto steels and application technology, *Green Manufacturing – the Future of Steel and Automobile*, WorldAutoSteel.
- [25] Aydemir, B., Kazdal-Zeytin, H., Güven, G. ve Güngör, A. Deformation behaviour of cold-formed 32Mn2.3Si3Al TWIP steel in tension at different temperatures. *ISITES 2014*, Karabük, 18-20 Haziran 2014, p. 1340-1346.
- [26] Chin, K. G. (2010). Characteristics of newly developed TWIP steels, *Ultra High Performance Steels for Eco-friendly Automotive Application Workshop*, POSTECH.
- [27] Automotive Circle International (2012). How do you judge the market potential of TWIP steels in car body series production?, *Materials in Car Body Engineering 2012*.
- [28] Maggi, S., Federici, C. ve D'Aiuto, F. (2012). TWIP Steel application on the Fiat Nuova Panda body, *Materials in Car Body Engineering 2012*.
- [29] Busch, C., Hatscher, A., Behrens, B.-A., Bouguecha, A., Vucetic, M., Bonk, C. ve Huinik, S. (2014). Numerical and experimental investigations of deformation behavior of high-manganese TWIP-steels in automotive industry, *Global EVI Forum*, posco.
- [30] Wilde, H., Hunger, H., Erbe, R. ve Fuest, H. (2004). Die Karosserie des neuen Audi A6, *EuroCarBody 2004 - 6<sup>th</sup> Global Car Body Benchmarking Conference*, p. 315-333.
- [31] Fröhlich, T. (2013). Maximum safety and lightweight potential due to use of new austenitic high strength steels, *Materials in Car Body Engineering 2013*.
- [32] Lee, K. (2014). Introduction to Development and Application of Automotive Steels of Posco, *Global EVI Forum*, posco.
- [33] Speer, J., Matlock, D., De Moor, E. ve Edmonds, D. (2013). Quenching and Partitioning: Science and Technology, Adventures in the Physical Metallurgy of Steels, *Cambridge Üniversitesi*.
- [34] Branagan, D. (2013). Overview of a New Category of 3rd Generation AHSS, *Great Designs in Steel 2013*, Steel Market Development Institute.
- [35] Li, W., Yong, Z., Weijun, F., Xinyang, J. ve Speer, J.G. (2013). Industrial Application of Q&P Sheet Steels, *Proceedings of Intl. Symp. on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels 2013*, p. 141-151, AIST.
- [36] An'Steel (2014). Birebir görüşme.

- [37] Huijin, D., Shuli, L., Jie, Y., Hongxin, Y. ve Kebin, B. (2012). The automobile steel of the third generation in B-pillar reinforced panel, *Engineering Sciences*, 10, 6, p. 20-22.
- [38] Thomas, G.A., De Moor, E. ve Speer, J.G. (2013). Tensile Properties Obtained by Q&P Processing of Mn-Ni Steels With Room Temperature Quench Temperatures, *Proceedings of Intl. Symp. on New Developments in Advanced High-Strength Sheet Steels 2013*, p. 153-165, AIST.
- [39] Kimura, T. (2011). Formability of TRIP Type Bainitic Ferrite Steel Sheet, *Kobelco Technology Review*, 30, p. 85-89.
- [40] Jacque, S. ve Obayashi, K. (2012). Renault and Nissan Light weight body engineering strategy, *Strategies in Car Body Engineering 2012*, Automotive Circle International.
- [41] Kondo, T. ve Ishiuchi, K. (2014). 1.2GPa Advanced High Strength Steel with High Formability, *SAE Technical Paper*, 2014-01-0991.
- [42] Worldautosteel (2015). 2015 Nissan Murano Redesigns with AHSS [online]. <http://www.worldautosteel.org/why-steel/steel-muscle-in-new-vehicles/2015-nissan-murano-redesigns-with-ahss/>. Son erişim tarihi: 28.02.2015.
- [43] Mukai, Y. (2005). The Development of New High-Strength Steel Sheets for Automobiles, *Kobelco Technology Review*, 26, p. 28-31.
- [44] ArcelorMittal (2014). Steels for cold stamping - Fortiform®, basım tarihi 10/09/2014.
- [45] Kang, Y. (2013). Synthetic Properties and Potentialities of Future Automobile Steel, *Green Manufacturing – the Future of Steel and Automobile*, WorldAutoSteel.
- [46] Coruk, E., ve Karadoğan, C. (2011). Flow Curve Evaluation by Optic Strain Measurements and Force Balance at the Most Critical Section in the Neck Region of a Tensile Specimen, *steel research int., special edition* p. 714-719.
- [47] Gutscher, G., Wu, H-C., Ngaile, G. ve Altan, T. (2004). Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test, *Journal of Materials Processing Technology* 146, p. 1-7.
- [48] Billur, E. ve Altan, T. (2013). Determining material properties and batch-to-batch variations with bulge testing, *Stamping Journal*, Sep/Oct 2013, p. 16-17.
- [49] Dainelli, P., Maltrud, F. (2012). Management of Welding Operations with High Strength Steels, *Soudage et Techniques Connexes*, p. 37-42.
- [50] SSAB Technology AB Sweden (2014). Data Sheet 197en Armox 600T, basım tarihi 06/03/2014.
- [51] Pokhodnya, I., K., Shvachko, V., I. (1996). Cold Cracks in Welded Joints of Structural Steels, *Material Science*, Vol.32, No.1, p. 45-55.