

TRIP ÇELİKLERİNİN OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANIMININ İNCELENMESİ

Fatih HAYAT

Metalürji Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, 78050 Karabük
fhayat@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 12.11.2009; Kabul/Accepted: 24.09.2010)

ÖZET

Türkiye ilk ağır sanayi hamlesi olan Karabük Demir-Çelik Fabrikasının kuruluşuyla birlikte entegre çelik üretimine başlamıştır. Türk Demir-Çelik endüstrisi, 21. Yüzyıla kadar olan süreçte farklı krizlere maruz kalmakla birlikte 2001 yılından itibaren hızlı bir büyüme sürecine girmiştir. Fakat küresel ekonomide gelişen sektörel değişimlere ayak uydurmak ve üretimi o yönlere çevirmek gereksinim haline gelmiştir. Bu amaçla ülkemizde önemli bir sektör olarak kendini gösteren, katma değeri ve kazanımı yüksek olan otomotiv endüstrisine çelik üretmek önemli bir amaç olabilir. Türkiye ve Dünya endüstrileri için gelişmiş hafif yüksek mukavemetli çelik üretimi kritik bir teknolojidir. Gelişmiş ülkelerde çelik endüstrisi entegre tesislere dayalı olup, katma değeri yüksek; gelişmiş yüksek mukavemetli çelik, paslanmaz çelik v.b. gibi ürünlere yönelmiştir. Ülkemizde farklı çelik sac türleri üretilmekle beraber özellikle son yıllarda yoğun bir şekilde kullanılan çift fazlı çelik düşük miktarlarda üretilmekte, ilerleyen yıllarda otomobil ağırlığını azaltmak amacıyla kullanımı artacak olan TRIP çeliği ise üretilmemektedir. Literatür çalışması son yıllarda yapılan özgün çalışmalar çerçevesinde biçimlendirilmiştir. Çalışmada TRIP çeliklerinin otomobillerde kullanılan diğer çeliklerle mikroyapı, çekme dayanımı, çarpma (darbe), şekillendirilebilme ve yorulma özellikleri gibi kriterlere bağlı olarak karşılaştırmalı bir biçimde sunulmuştur. Ayrıca TRIP çeliğinin otomotiv endüstrisinde kullanımı ve Türkiye’de üretilebilirliği hakkında da bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Demir-çelik, otomotiv, gelişmiş yüksek mukavemetli çelik, TRIP çeliği.

THE INVESTIGATION OF THE USE OF TRIP STEELS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

ABSTRACT

Turkey has started the integrated steel production with the foundation of Karabük Iron-Steel Factory which is the first heavy industry attempt of the country. Even though Turkish Iron-Steel industry has been exposed to various crises until the 21st century, it took an important step into a growth process starting from the year 2001. However, to keep up with the sectoral changes developing in the global economy and to direct the production in accordance with such developments have become a requirement. For this purpose, it might be an important objective to produce steel for the automotive industry that has come into prominence in our country with a high level of added value and income. Production of light and advanced high-strength steel for Turkish and World industries is a very critical technology. In developed countries, the steel industry is based on integrated plants and has been directed to products such as advanced high-strength steel, stainless steel, etc. that have a very high added value. In spite of that different kinds of steel sheet are being produced in our country, the dual phase steel which has been intensively utilized especially in recent years is being produced in low quantities whereas TRIP steel, which shall be used more with the purpose of reducing the weight of the vehicles in future, is not being produced. The literature study has done considering most recent research shaped within the frame of original studies conducted in recent years. In this study, TRIP steels have been introduced in comparison with other steels used in automobiles based on certain criteria such as microstructure, tensile strength, crash (impact), formability and fatigue. Furthermore, a study has also been conducted about the utilization of the TRIP steel in automotive industry and manufacturability in Turkey.

Keywords: Iron-steel, automotive, advanced high strength steel, TRIP steel.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türk Demir-Çelik endüstrisi ülke ekonomisine büyük katma değer sağlayan en önemli sektörlerden biridir. 2000'li yıllara kadar olan süreçte farklı krizlere maruz kalan Demir-Çelik endüstrisi 2001 yılından itibaren hızlı bir büyüme sürecine girmiştir [1,2]. Türkiye'nin toplam çelik ürünleri ihracatının %76'sı uzun ürünlerden oluşurken, ithalatının %56'sını da yassı ürünler teşkil etmektedir [2]. Yassı olarak üretilen sac malzemelerin kullanım alanı ve türleri her geçen gün artmaktadır. Yassı demir çelik üretimi aleyhine olan mevcut yassı/uzun ürün üretim dengesinin (% 20/80), gelişmiş ülkelerin seviyesine (% 60/40) çıkarılması, yurt içi yassı ürün ihtiyacının büyük oranda karşılanması, AB'ye uyum sürecinde sektör için gerekli olan tüm çalışmaların gerçekleştirilmesi sektörün temel vizyonudur. Bu vizyon doğrultusunda; üreticilerin, otomotiv, dayanıklı tüketim eşyası, gemi inşaatı, zırh çeliği ve yapısal çelik gibi yassı çelik tüketen sektörlerdeki yüksek büyüme potansiyelini esas alarak planlanan yatırımları gerçekleştirilmesi stratejisinin hayata geçirilmesi gerekmektedir [1].

Malzeme kullanan bütün endüstriyel alanlarda üreticiler, üstün özelliklere sahip hafif, dayanımı yüksek, şekillendirme kabiliyeti ve şekillendirme sonrası dayanımı iyi olan malzeme kullanmayı arzu ederler. Son yıllarda otomotiv endüstrisinde yolcu güvenliğini, sürüş emniyetini, yakıt tasarrufunu artırmak ve çevresel faktörlerden dolayı araçların karoser kısmı hafifletilmek istenmektedir [3-5]. Özellikle enerji ve petrol krizlerinin yaşandığı zamanlarda bu konu ön plana çıkmaktadır. Yine enerji krizlerinin çıktığı 1980'li yıllardan sonra HSLA çeliklerinden geliştirilen çift fazlı çelikler üretimde büyük yer almıştır. Benzer bir şekilde 1990'lı yıllarda meydana gelen krizler nedeniyle TRIP çeliği geliştirilmiştir. TRIP çelikleri otomotiv endüstrisinin ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilmiş ileri yüksek mukavemetli çeliklerin en yeni türüdür.

2. OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE ÇELİK (STEEL IN AUTOMOTIVE INDUSTRY)

Otomotiv endüstrisinde çelik haricindeki plastik, alüminyum, magnezyum vb. gibi malzemelerin kullanımı, araçlarda yakıt tüketimini düşürmek amacıyla ağırlık azaltma kaygısından dolayı artış göstermesine rağmen, çelik endüstrisinde kaydedilen ilerlemeler sayesinde çelik; otomotiv sektörü için hala önemini korumaktadır [5,6]. Otomotiv endüstrisi için üretimde gelişmiş araç konsepti çerçevesinde en önemli unsurlar Şekil 1'de verilmiştir.

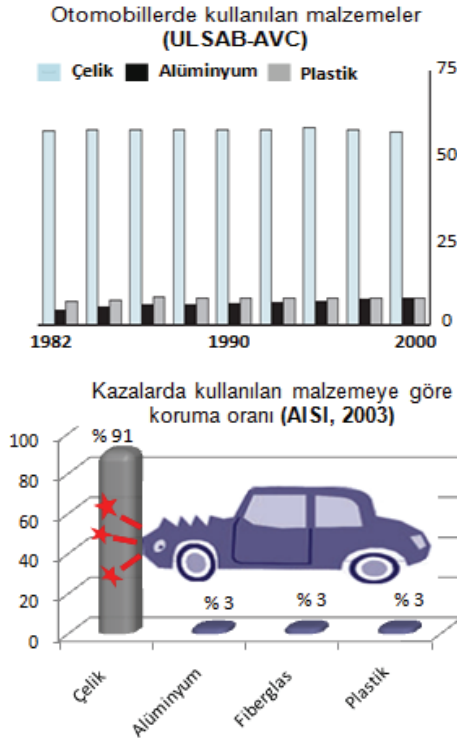


Şekil 1. Bir otomobilde aranan özellikler (Features desired in a car) [7].

Grafikte görüldüğü gibi otomobilden istenen özellikler öncelikle güvenli oluşu, yakıt tüketimi, yakıt verimliliği ve ekonomikliğidir. Diğer taraftan bu temel üç unsurun sağlanmasının yanında CO₂ emisyonu önemli hale gelmiştir. Ayrıca konfor, otomobilin ağırlığı, sürüş performansı, maliyet/fiyat ilişkisi önem arz etmektedir. 2009 yılında Dünya Çelik Topluluğu (World Steel Association) CO₂ emisyonuna özellikle dikkat çekerek 5 kişi taşıyabilen taşıtlarda diğer kalite çelikler yerine gelişmiş yüksek mukavemetli çelik kullanımının artırılması halinde CO₂ emisyonunun % 6 oranında azalacağını rapor etmiştir [8]. Yapılan çalışmalara göre ortalama bir araç yılda 22.000 km'de 4 ton CO₂ emisyonuna neden olmaktadır. Avrupa Komisyonunun 2009 raporuna göre ise yüksek hacme sahip B ve C segmenti araçların 2012'ye dek güçlü rekabet ve ağırlık azaltılması ile emisyonun 120 kg CO₂/km'ye düşürülmesini planlamaktadır [8].

ULSAB-AVC'nin bildirdiğine göre otomotiv endüstrinde çelik kullanım oranının geçen yıllarla birlikte azalmadığı görülmektedir. Bunun çeşitli nedenleri vardır. Birincisi oluşacak kazalarda koruma oranının yüksekliği, ikincisi ise otomotiv çeliklerini geliştirme çabalarının istenilen sonuçları vermesidir. Bir çok otomobil üreticisi daha hafif çelik kullanımını seçerek otomobili hafifletme yoluna gitmektedir [9].

Dünyada her 9 saniyede bir trafik kazasının olduğu düşünüldüğünde güvenlik ve kullanılan malzemeler önem arz etmektedir [10]. Amerikan Demir-Çelik Enstitüsünün (American Iron and Steel Institute, AISI) 2003 yılında yayınladığı rapora göre; tasarımı çelik yapılarla yapılmış araçlarda can kaybının % 90 oranında azaltıldığı rapor edilmiştir [11]. Şekil 2'de yıllara göre kullanılan malzeme türlerinin oranları ve kazalarda korunma oranları verilmiştir.



Şekil 2. Otomobillerde kullanılan malzemeler ve kazalarda koruma oranı (Materials used in automobiles and rate of protection in the accidents) [11].

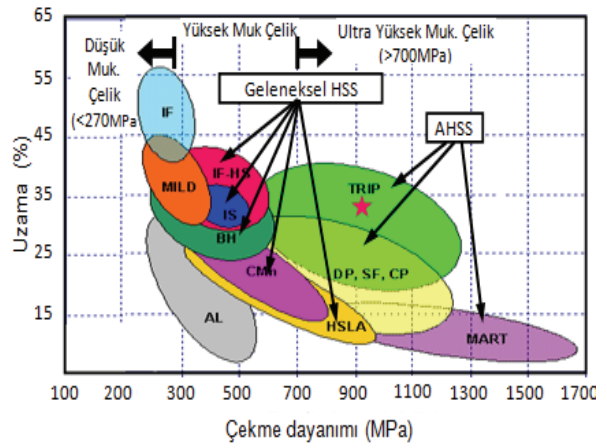
Alüminyum, plastik ve diğer malzemelerin ise % 3'tür. Bu nedenle çelik otomotiv endüstrisi için vazgeçilmez bir malzeme olmakta ve hala araç ağırlığının % 55'ini oluşturduğu rapor edilmektedir [11].

Yapılan diğer bir araştırmada ise güvenlik açısından malzemelerin maksimum dayanımının 600 MPa civarlarında olmasının can kaybını önemli ölçüde azalttığını bildirilmiştir. Örnek verilecek olursa DaimlerChrysler servis bilgilerine göre 2006 Jeep Grand Cherokee ve Commander araçların darbe performansını artırmak amacıyla DP600 (dual phase steel; çift-fazlı çelik) çeliğini kullanmışlardır [12].

2.1. Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Çelik Türleri (Types of Steel Used in Automotive Industry)

Her malzeme için karakteristik bir "gerilme-şekil değiştirme" ilişkisi vardır; bu eğri genellikle çekme deneyi ile saptanır ve malzemenin mekanik davranışı ile özellikleri hakkında çok önemli bilgiler içerir. Çekme deneyi, malzemenin statik veya yavaş uygulanan bir kuvvete karşı direncini ölçmek için yapılır.

Otomotiv endüstrisinde farklı çelik türleri kullanılmaktadır. Şekil 3'te otomobil yapımında kullanılan çeliklerin mukavemet ve % uzama oranları verilmiştir.



Şekil 3. Düşük mukavemetli, konvansiyonel yüksek mukavemetli (HSS) ve ileri yüksek mukavemetli (AHSS) saclar arasındaki mukavemet ve % uzama ilişkisi (Strength and % elongation relationship for low strength, conventional HSS, and AHSS sheet steels) [12-14].

Otomotiv çelikleri üç kısımda incelenebilmektedir.

Birincisi yumuşak çelikler; IF çeliği ve diğerleri. İkincisi; HSS (High Strength Steel) çelikleri ve üçüncüsü ise AHSS (AHSS: Advanced High Strength Steel) çelikleridir. IF çelikleri çok az arayer atomu içeren çelikler, düşük akma mukavemetleri, yüksek uzama ve iyi derin çekilebilirlik özellikleri nedeniyle çok iyi biçimlenebilirlik özellikleri gösterirler ve otomotiv sanayinde sıklıkla kullanılırlar. Düşük çekme mukavemeti ve yüksek % uzama değerlerine sahip olup darbe absorbe özelliğine sahiptir. Yüksek şekillendirilebilmeye sahip olan bu çelikler beyaz gövdede yüksek dayanıma ihtiyaç duyulmayan bölgelerde kullanılır [15-17].

İkinci tür HSS, konvansiyonel yüksek mukavemet çelikleri, genellikle karbon-mangan, fırında sertleştirilebilen izotropik, yüksek mukavemetli IF ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerdir.

Üçüncü tür AHSS ise gelişmiş yüksek mukavemet çeliklerinin yeni türleri: Çift faz ve martensitik çelik saclarıdır. Çift fazlı çelikler, üretildikleri yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (YMDA) çeliklere göre oldukça iyi dayanım-süneklik ilişkisi göstermektedir. Bu çelikler üretildikleri YMDA ve karbon çelikleri ile kıyaslandığında pek çok şartlar için ideal olarak ifade edilebilecek özelliklere sahiptirler. Bunlar; düşük akma dayanımı, sürekli akma davranışı, yüksek pekleşme hızı, düzgün ve toplam uzama, yüksek yorulma dayanımı ve korozyon direnci gibi özelliklerdir [18-24]. Tablo 1'de otomobillerde kullanılan çeliklerin mekanik özellikleri ve otomobilde kullanıldığı bölgeler verilmiştir.

Tablo 1. Otomobillerde kullanılan çeşitli çelik kalitelerinin mekanik özellikleri, (Mechanical properties of different types of steel qualities used in automobiles) [25].

Kalite	Akma muk. (MPa)	Çekme muk. (MPa)	Toplam uzama, (%)	n-değeri	r-değeri	Uyg. alan kodu
Mild 140/270	140	270	38-44	0,23	1,8	A,C,F
BH210/340	210	340	34-39	0,18	1,8	B
BH260/370	260	370	29-34	0,13	1,6	B
IF 300/420	300	420	29-36	0,20	1,6	B
HSLA350/450	350	450	23-27	0,22	1	A,B,S
DP350/600	350	600	24-30	0,14	1,1	A,B,C,W,S
TRIP450/800	450	800	26-32	0,24	0,9	A,B
DP 500/800	500	800	14-20	0,14	1	A,B,C,W
Mart 950/1200	950	1200	5-7	0,07	0,9	A,B

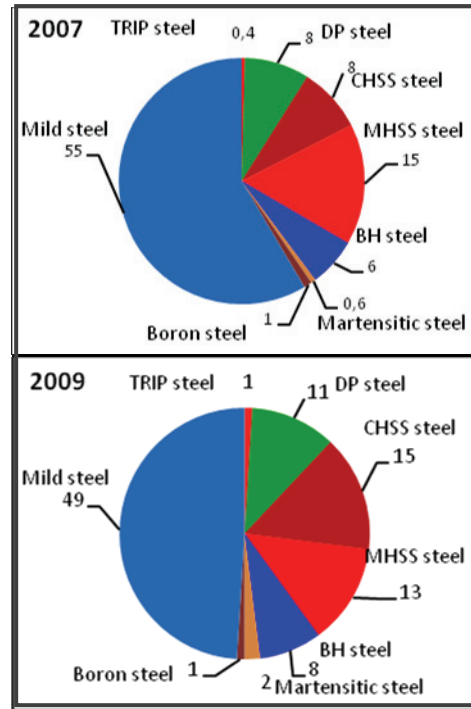
*Uygulanan bölge kodu: A= yardımcı (yan) parçalar, B= gövde yapısı, C= paneller, F= yakıt tankı, S= süspansiyon/şasisler, W= tekerlekler

Çekme deneyinde elde edilen yük - uzama eğrisi, gerçek şekil değişimi (σ - ϵ) eğrisine dönüştüğünde çoğu malzeme;

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

biçiminde parabolik bir bağıntı gösterir. K ve n, malzeme sabitleri; K = Malzemenin mukavemet katsayısı, n = Deformasyon pekleşme üstelini gösterir. Yüksek yüzde uzama, düşük akma dayanımı/çekme dayanımı oranı, yüksek n değeri malzemenin iyi gerilebilirlikte olduğunu gösterir. Gerilebilirlik artan n değeri ile artar [26]. Levhanın incelmeye karşı gösterdiği direnç çekme deneyi yardımı ile ölçülmektedir. Bu deneyde belli bir uzamada (örnek; % 20) numunenin enine gösterdiği birim deformasyonun, kalınlıkta oluşan birim deformasyonuna oranı, R değeri bunun bir ölçüsüdür. İyi derin çekilebilir bir malzemede bu değer

mümkün olduğu kadar yüksek yani sacın incelmeye karşı dirençli olması istenir [27]. İyi derin çekilebilirlik; kap duvarının sağlam (incelmeye karşı dayanıklı), yakanın ise mümkün olduğu kadar yumuşak olmasını gerektirir. Malzeme seçiminde bu önemli bir özelliktir. Otomotiv çelikleri dönemsel koşullar ve gelişen teknolojilerle birlikte değişim göstermiştir. Tablo 2'de görüldüğü gibi otomobillerde kullanılan çelik sacların gelişimi her dönemin farklı ihtiyaçlarından etkilenmiştir. Şekil 4'de Kuzey Amerika'da hafif araçların otomobil gövde, tavan (panel), tampon, süspansiyon, tekerlek, şasi gibi kısımlarında kullanılan çelikler verilmiştir.



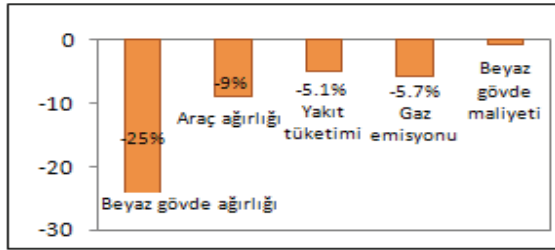
Şekil 4. 2007 ve 2009 model otomobillerde farklı çeliklerin kullanım oranları (Use ratios of different types of steels in 2007 and 2009 model cars) [28].

Tablo 2. Otomobillerde kullanılan çelik sac malzemelerin tarihsel gelişimi (Historical development of steel sheet used in automobiles) [6].

Yıl	1960	1970	1980	1990	2000
Otomobili etkileyen değişimler	Motorlu taşıtlara hızlı geçiş	Petrol krizi	Yüksek kalite	Yasal zorunluluklar (CAFE standart)	Kaza değerliği
			Anti-korozyon		CO ₂ sınırlaması
					Geri dönüşüm
Çekme mukavemeti (MPa)	300	Düşük akma muk. çelikler	IF çeliği	BH çeliği	Süper şekillendirilebilen çelikler
	400	C-Mn çeliği	Fosforlu yüksek muk. çelikler	Yüksek mukavemetli IF çelikleri	TRIP çeliği
	600				
	800	Çökeltmeyle sertleştirilmiş çelik	DP çeliği	TRIP çeliği	
	>1000		1000 MPa ultra yüksek mukavemetli çelik	1500MPa ultra yüksek muk. çelik	

2.2. 2000'li Yıllarda Yapılan Çalışmalar (Studies in the Years 2000)

Bu bölümde Dünya piyasasında yer bulmuş büyük otomotiv üreticileri ve Demir-Çelik üreticilerinin yapmış olduğu çalışmalar ele alınarak irdelenecektir. AISI'nın (Automotive Applications Council of AISI's Steel Market Development Institute, SMDI) çelik geliştirme enstitüsünün raporunda 2007 model taşıtla 2009 model taşıt arasında AHSS çeliklerinin kullanımının % 10'dan % 15'e çıktığı olduğu belirlenmiştir. AHSS çeliğinin kullanım oranının artışıyla birlikte toplam gövde ağırlığında 70 kg. azalma olduğu bildirilmiştir. World Steel Association [29], geleneksel çeliklerin yerine gelişmiş çelik kullanımıyla beyaz gövde, araç ağırlığı, yakıt tasarrufu, gaz emisyonu ve maliyetteki değişimi araştırmıştır (Şekil 5).

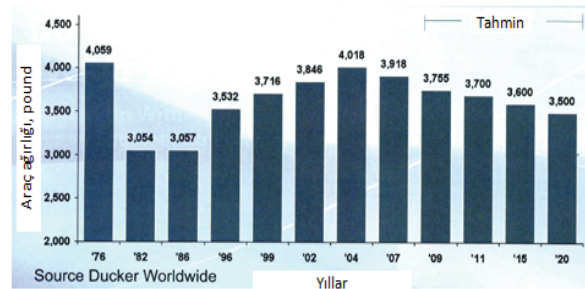


Şekil 5. Otomobil imalatında dikkat edilen 5 önemli unsurun AHSS çeliği kullanımıyla değişimi (The change of 5 important issues that are paid attention in the production of automobiles with AHSS Steel) [29].

Corus 2008 (Tata group) raporunda otomobil ağırlığını AHSS çeliğinin kullanımını artırarak 60 kg azalttığını ve daha fazla AHSS çeliği kullanımı ile bu ağırlık tasarrufunun 100 kg'a çıkarılabileceğini ve CO₂ emisyonundan her bir aracın kullanımı boyunca 1 ton tasarruf sağlanacağı bildirilmiştir [30]. Dünyanın bir numaralı çelik üreticisi ArcelorMittal [31] ise 2008 yılı raporunda ultra-hafif yüksek mukavemet çeliklerinin kullanımı ile ağırlığın gaz silindirlerinde % 50, otomobil parçalarında % 40 azaldığını, bununla birlikte gaz emisyonunun da azaldığını bildirmiştir [31]. ArcelorMittal gelişmiş çelikler üzerine çalışmaları yoğunlaştırarak geleneksel çeliklerin yerine kullanımını artırıp % 20 daha hafif

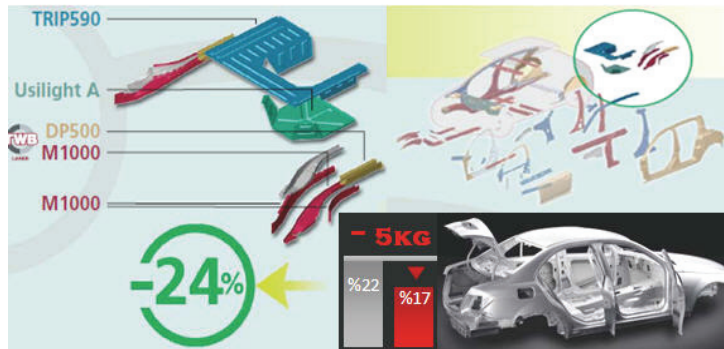
araçlar üretilebileceğini rapor etmiştir [32]. (Şekil 6).

Bir başka çalışmada Arcelor Auto, otomobillerde gelişmiş çeliklerin kullanımı ile ağırlıktaki azalışın otomobilin bölgeleri arasında farklılık gösterdiğini rapor etmiştir [32,33]. Otomobilin bir bölgesinden örnek verilecek olursa; arka panel bölgesinde gelişmiş çelik kullanımı (TRIP, DP çeliği vb.) ile ağırlığın 22 kg'dan 17 kg'a düştüğü ve % 24 oranında ağırlıktan tasarruf sağlandığı bildirilmiştir. Ön panellerde ağırlıktan tasarrufun % 28'e çıktığı, arka ve ön kapıda ise ağırlıktaki düşüş oranının % 18 olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca ArcelorMittal firması, 2007 itibarı ile son çalışmalarla geliştirilmiş olan TRIP 1200 ve DUAL 1200 çeliklerinin üretimine başladığını bildirmiştir [32]. Dünya genelinde üretilen BMW-6 (2009 model) otomobil serisinde gövde yapısı ve ana kısımları olmak üzere AHSS çeliği oranı % 32'ye çıkarılmıştır. Ortalamının üstünde AHSS kullanan diğer yeni modeller ise Chevrolet Traverse, Ford F-150, Chrysler Town and Country olmuştur [13]. Ayrıca Corus 2007 [33], raporunda Volvo S80, XC90, V50, S40, C70, C30 ve XC60 modellerinde ağırlıktan tasarrufun yanında yan yükler, darbeler göz önünde bulundurularak kapı çerçevelerinde ve beyaz gövdede gelişmiş yüksek mukavemetli çelik kullandığını rapor etmiştir. Şekil 7'te Kuzey Amerika'da araç ağırlığının değişimi verilmiştir.



Şekil 7. 2020 yılına kadar Kuzey Amerika'da araç ağırlığının değişimi (The change of vehicle weight in North America by 2020) [9].

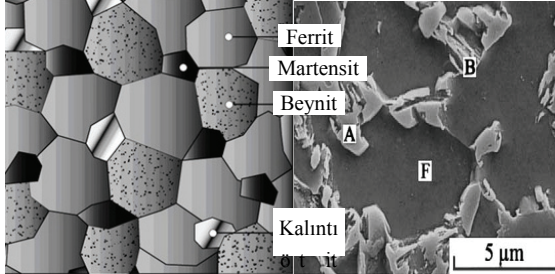
Ducker Worldwide'ın Kuzey Amerika'da araç ağırlığının değişimiyle ilgili yaptığı çalışmada 2004 yılına kadar artış sürecine giren araç ağırlığının 2020 yılına kadar düşürüleceğinin planladığını bildirmiştir.



Şekil 6. Otomobillerde gelişmiş çelik kullanılan bölgeler ve ağırlık düşüş oranları (Parts where improved steel is used in automobiles and weight loss rates) [31]

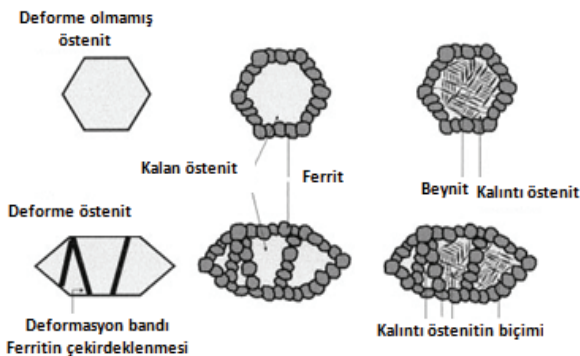
3. TRIP ÇELİKLERİ (TRIP STEELS)

TRIP (Transformation Induced Plasticity) çelikleri otomotiv endüstrisi için geliştirilmiş yüksek mukavemetli (AHSS) çeliklerin en yeni türüdür [35-49]. (Şekil 8).



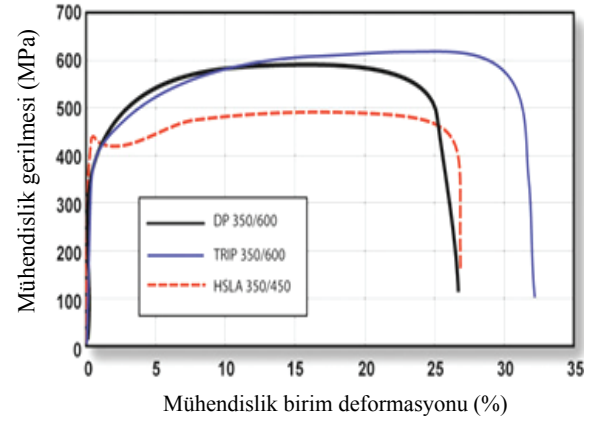
Şekil 8. TRIP çeliğinin mikroyapısı (Microstructure of TRIP steel) [36, 50].

Mikroyapıda yumuşak ferrit matris içinde, beynit ve kalıntı östenit içerdiğinden üç fazın da belli oranlarda üstün mekanik özellikleri malzeme gelişimine katkı sağlamaktadır [35-48]. Bazen kalıntı östenitle beraber çeşitli miktarlarda sert martensit fazı görülebilmektedir. Bu grup çeliklerin önemli şekil verme özellikleri esas olarak spesifik bir şekilde ayarlanmış mikrobileşen kalıntı östenitten türetilmektedir [39,49]. TRIP çelikleri diğer çeliklere nazaran daha kompleks mikroyapıya sahiptir. İhtiyaçlara cevap vermesi için geliştirilen TRIP çeliklerinin mekanik özellikleri mikroyapı değişimi ile (boyut, şekil ve dağılım) değişebilmektedir [51,52]. TRIP çeliklerinde mikroyapıdaki fazların boyutları düşürülebilir; öyle ki beynit ve östenit 1 ila 3 µm arasında iken ana yapı ferrit 5 ila 10 µm arasında olabilmektedir [36,52]. Şekil 9'da TRIP çeliğinin ısıl işlemi esnasında meydana gelen faz dönüşümleri verilmiştir.



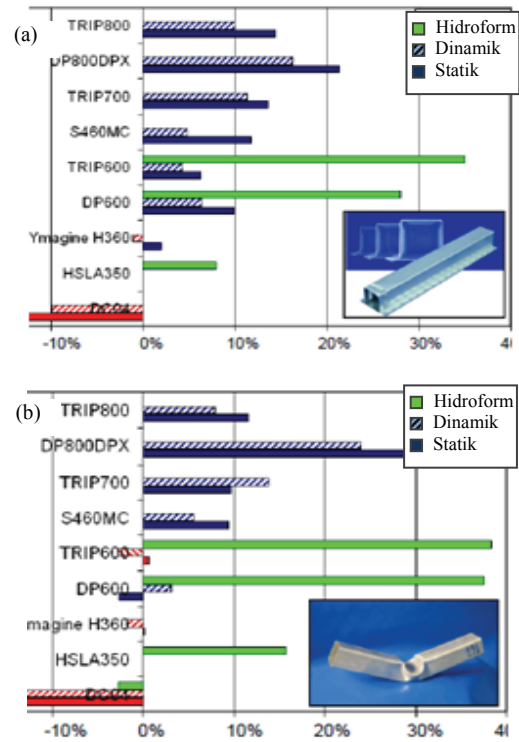
Şekil 9. Termomekanik ısıl işlem esnasında faz dönüşümleri (Phase transformations during thermomechanical heat treatment) [53].

Fazların renkleri ferrit gri, beynit siyah ve kalıntı östenit beyaz renkte belirlenmektedir [53-58]. TRIP çeliklerinin otomobillerde kullanılan diğer çeliklerle karşılaştırılmalı çekme grafikleri Şekil 10'da verilmiştir [13].



Şekil 10. Otomobillerde en çok kullanılan çeliklerin çekme grafikleri (Tensile graphics of mostly used steels in automobiles) [13].

TRIP çeliği grafikteki iki çelik türünden de mekanik özellikler açısından daha üst seviyede olup uzama düşmeden dayanımda artış görülmüştür [44-47]. Corus 2002 yılında, otomobil ağırlığının darbelere dayanıklı olarak azaltmaya yönelik yapmış olduğu bir çalışmada, araç ağırlığını azaltacak en yüksek potansiyele sahip çelikleri incelemiştir.

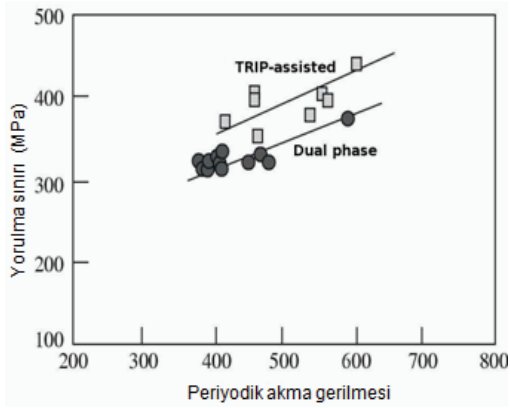


Şekil 11. Otomobillerde kullanılan çeliklerin (a) aksenal ve (b) yanal çarpma (darbe) deneyi sonucunda ağırlık azaltma potansiyelleri (Weight reduction potentials of the steels used in automobiles as a result of axial crash and bending crash experiments) [58].

Yeni emniyet düzenlemelerine uymak için otomobil üreticileri; çarpışma enerjisini absorblamak için ön kısmı yeniden dizayn etmekte ve yolcu kabininde içeri geçmeyi önlemeye çalışmaktadır. Bu nedenle

hidroform, dinamik ve statik yükler altında darbe deneyleri yapılmıştır [58]. Bu deneyler çerçevesinde otomobil ağırlığının azaltılmasını sağlayacak en yüksek potansiyele sahip çeliğin TRIP çeliği olduğu söylenebilir. Bu sonuç otomobil üretiminde hayati bir öneme sahiptir. Diğer bir çalışmada ise Uenishi 2000, otomobillerde ön taraf ve yan kapı konsollarında kullanıldığını belirttiği çeliklerinin TRIP çeliği ile karşılaştırılmalı olarak % 0 ve % 5 ön yüklerde çarpma (darbe) testi yapmıştır. Deney sonucunda TRIP çelikleri diğer otomotiv çelikleriyle kıyaslandığında çarpmaya en dayanıklı (yaklaşık 8 ila 9 kJ arası) çelik olmuştur [58].

Otomobiller çekme ve darbelere maruz kalmakla birlikte yorulmaya da maruz kalabilen araçlardır. Takahashi 2003, yapmış olduğu çalışmada bu çeliklerin yorulma dayanımı incelemiştir (Şekil 12) [60].



Şekil 12. Otomotiv çeliklerinin yorulma dayanım özellikleri (Fatigue strength characteristics of automotive steels) [60].

Bu çalışmada farklı akma gerilmesi çevrimlerinde çift fazlı çeliklerle TRIP çeliklerinin yorulma sınırlarının nasıl değiştiği analiz edilmiştir. Bilindiği gibi çift fazlı çelikler yorulma dayanımı yüksek olmasıyla bilinen gelişmiş bir çeliktir. Bu çalışma sonucunda TRIP çeliklerinin çift fazlı çeliklerden daha yüksek yorulma sınırlarına ve dayanımına sahip olduğu bildirilmiştir.

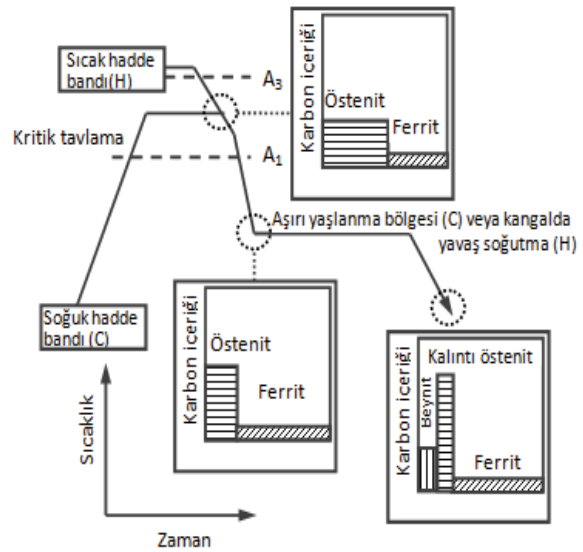
Biçimlendirilebilirlik sacın hasara uğramadan istenen şekli alma yeteneği olarak tanımlanır. Biçimlenebilirlik açısından TRIP çeliği incelenecek olursa iki özelliğin R değeri derin çekme, n değeri de germe değerlerinin aynı anda iyi olması istenir. Bu açıdan Tablo 1'de verilen sonuçlar incelendiğinde TRIP çeliğinin n değerinin 0,24, r değerininse 0,9 olduğu belirlenmiştir. TRIP çeliği deformasyon sertleşmesi en yüksek olan çeliktir. Diğer çeliklerle karşılaştırıldığında değerlerin yüksek olduğu yani malzemenin şekillendirilebilme kabiliyetinin iyi olduğu söylenebilir. Tablodaki tüm çelikler (kombine dayanım) ele alındığında TRIP çeliğinin özelliklerinin

diğer çeliklerinden daha üstün özelliklerde olduğu görülmektedir.

Bütün bu literatür bilgilerine dayanan deney sonuçları irdelenecek olursa TRIP çeliklerinin diğer otomotiv çeliklerine göre her açıdan üstün mikroyapı ve mekanik özelliklere sahip olduğu düşünülebilir.

3.1. TRIP Çeliğinin Üretimi ve Ülkemizde Üretilirliği (TRIP Steel Production and Producibility in Our Country)

Yüksek mukavemetli çeliklerin üretim ısıl işlem rotaları benzer özelliğe sahiptir. TRIP çeliğinin üretim prensibi ve oluşan fazlar Şekil 13'te verilmiştir.

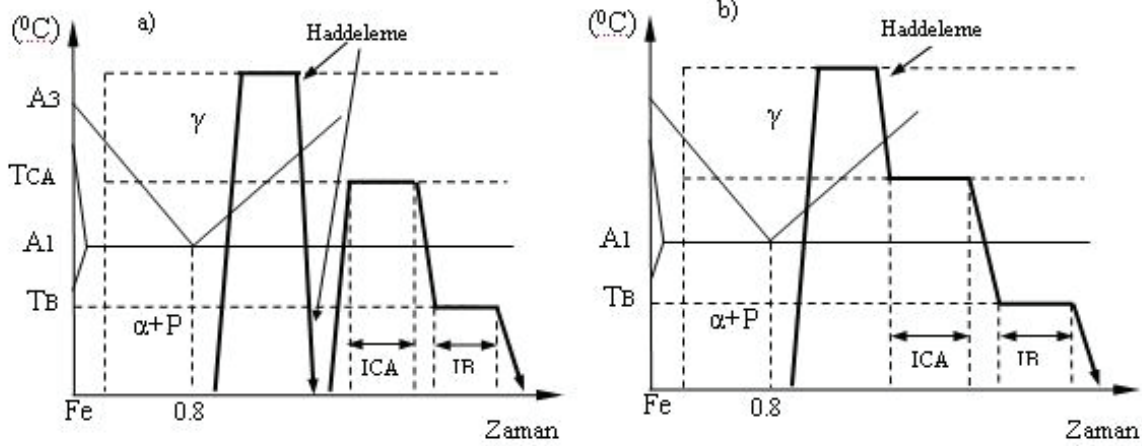


Şekil 13. Kalıntı östenitin karbonca zenginleştirme yoluyla oluşum mekanizması (The formation mechanism of retained austenite by means of carbon enrichment) [61].

Dünya çelik üreticilerinin TRIP çeliği hakkındaki araştırma ve geliştirme çalışmaları artmakta, üretim kapasitesi her geçen gün çoğalmaktadır. Sıcak haddeleme sıcaklığını çok yakından kontrol etmedeki başarı ve soğuk haddelemedeki son teknolojik gelişmeler, karbon, silisyum, mangan ve diğer rölatif olarak düşük fiyatlı elementlerin eklendiği TRIP çeliklerinin imalatına giden yolu açmıştır ve Japonya'da otomobillerin üretim maliyetlerinin düşmesine yardım etmiştir. Modern TRIP çelikleri iki şekilde üretilir: birincisi; sıcak hadde bantlarında veya soğuk hadde batlarında üretim, ikincisi ise tavlama ile üretilir. Şekil 14'te sıcak hadde bantlarında TRIP çeliğinin üretim şeması gösterilmiştir.

Grafikte'de görüleceği gibi hesaplanması gereken önemli kritik sıcaklık noktaları vardır. Bunlar A₁, A₃ ve Ms sıcaklıklarıdır. Kritik tavlama sınır sıcaklıkları (A₁ ve A₃), Andrews [63] tarafından geliştirilen formül kullanılarak tespit edilmektedir.

$$A_1(^{\circ}\text{C})=(723)-(10,7\text{Mn})-(16,9\text{Ni})+(29,1\text{Si})+(16,9\text{Cr})+(290\text{As})+(6,38\text{W}) \quad (2)$$



Şekil 14. TRIP çeliklerinin üretim şemaları a) Levha üretim şeması, b) Sıcak şerit-bant üretim şeması (TRIP steels production schemes, a) Sheet production schema, b) Hot strip-band production schema) [62]

$$A_3(^{\circ}\text{C}) = (910) - (203 \sqrt{C}) - (15,2\text{Ni}) + (44,7\text{Si}) + (104\text{V}) + (31,5\text{Mo}) + (13,1\text{W}) \quad (3)$$

Ms ise martensit dönüşüm başlangıç sıcaklığıdır. Düşük ve orta alaşımlı çeliklerin Ms sıcaklığı şu bağıntı ile hesaplanabilir [64].

$$Ms (^{\circ}\text{C}) = 550 - (350C) - (40\text{Mn}) - (20\text{Cr}) - (10\text{Mo}) - (17\text{Ni}) - (8\text{W}) - (10\text{Cu}) + (15\text{Co}) + (30\text{Al}) \quad (4)$$

TRIP çeliğinin üretimi için kritik öneme sahip östenit fazı, A_1 sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda kararlı olan fakat oda sıcaklığında kararsız olan bir fazdır. Fakat TRIP çeliğinde karbonca zenginleştirilmiş östenit, kararlı faz durumdadır [61]. TRIP çelikleri ara sıcaklıkta izotermal tutulma ile bir miktar beynit oluşturularak üretilirler [65,66]. TRIP çeliklerinde yüksek silisyum ve karbon miktarları son mikroyapıda yüksek hacim oranlarında artık östenite sebep olur. Bütün AHSS'ler östenit veya östenit + ferrit fazından başlayarak kontrollü soğutmayla sıcak haddelenmiş ürünler için haddelenme sırasında, kaplama veya tavlama yapılmış ürünler için tav fırınlarında üretilirler [67].

TRIP çeliklerinin üretiminde çift fazlı çeliklerden farklı olarak en önemli etken sürekli tavlama (CAL: continuous annealing line) hatlarında beynitik dönüşümün oluşması için malzemelerin sabit sıcaklıkta belli sürelerde bekletilme işlemidir. Bu açıdan ticari çelik sacların arzu edilen özellikleri (yüzey temizliği, üniform özellikler vb.) için CAL (sürekli tavlama hatları) hatlarında üretim tercih edilir. Sürekli tavlama hatları 30-40 yıldır saçak daldırma ile galvanizlenmiş çelikler, ince levhalar, yönlendirilmiş elektrik çelikleri ve paslanmaz çelik saclar ve yaklaşık 20 yıldır da çift fazlı çelik sac üretiminde kullanılmaktadır.

TRIP çeliğinin üretimi ile ilgili bazı çalışmalar şu şekilde olmuştur. Arif Basuki ve diğerleri 1999 [35], % 0,39 C, 1,37 Si ve 1,45 Mn kimyasal bileşimine sahip çelikte 420°C ' de süreyi 240 s olarak belirtmiştir. Bir diğer çalışmada ise A. Wasilkowska vd., 2004 [65], beynitik dönüşümü tespit etmek amacıyla kritik tav sıcaklık aralığında (" $\alpha + \gamma$ " yaklaşık 800°C) tavlama yaparak östenitik dönüşümü sağlamışlardır. Ardından numuneleri hızlı bir şekilde $700-650^{\circ}\text{C}$ sıcaklığına kadar soğutmuşlardır. Düşük Si içeriğine sahip çelik için $400^{\circ}\text{C}/400$ s ve yüksek Si içeriğine sahip çelik için $T = 300, 350$ ve 400°C sıcaklıklarda $t = 60, 120, 240$ ve 480 s sürelerinde çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucunda değişik parametrelerde TRIP çeliği elde edilen yüksek Si içeriğine sahip çelikte tavlama sıcaklığının ve süresinin düşüşünün, % östenitik dönüşüm ve % uzama miktarlarını arttırdığını rapor etmişlerdir. Xicheng Wei ve arkadaşları 2007 [66], çalışmasında kimyasal bileşimini verdiği çelik için 400°C 'de 5dk.'nin dönüşüm için yeterli olduğunu rapor etmiştir.

Bir başka çalışmada ise Sung-Joon Kim vd., 2007 [67], kimyasal bileşimini vermiş olduğu çelikte beynitik dönüşüm için numuneyi 430°C 'de 1 dk'dan 20 dk'ya kadar artan sürelerde 1'er dk arayla ısıl işleme tabi tutmuştur. Dönüşümün mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda süre artışıyla kalıntı östenitin miktarının arttığı 5 dk'dan sonra ise kalıntı östenitin miktarının azaldığı rapor edilmiştir. Aynı şekilde akma, çekme ve % uzama değerlerinin de 5 dk'ya kadar arttığı bildirilmiştir.

TRIP çeliklerin kimyasal bileşimleri incelendiğinde ise; Sung-Joon Kim [67], dayanım süneklik ilişkisi çerçevesinde tipik TRIP çeliklerin kimyasal bileşimini 0,2-0,4% C, 1,0-2,5% Mn ve 1,2-2,0% Si olabileceğini bildirmektedir. Sourabh Chatterjee [50], ise TRIP çeliklerinin kimyasal bileşiminin % 0,2 C, %1,5 Mn ve %1 ile 2 oranında Si içerebileceğini rapor etmiştir. Fakat 2008 yılı itibarı ile dünyanın ikinci

büyük Demir-Çelik üreticisi konumunda olan Nippon Steel genel anlamda sıcak ve soğuk haddelenmiş olarak üretilen TRIP çeliklerinin kimyasal bileşimlerini ve mukavemet değerlerini Tablo 3'deki gibi vermiştir [61].

Tablo 3. TRIP çeliklerinin geleneksel üretim özellikleri (Traditional production characteristics of TRIP steels) [61].

Tip	Kalınlık (mm)	%C	%Si	%Mn	Akma noktası (N/mm ²)	Çekme muk. (N/mm ²)	Toplam uzama (%)
Soğuk haddeli	1,0	0,11	1,18	1,55	339	614	37
Soğuk haddeli	1,2	0,14	1,74	1,49	411	695	33
Soğuk haddeli	0,8	0,15	1,98	1,64	460	833	29
Sıcak haddeli	1,4	0,11	1,45	1,47	470	647	36
Sıcak haddeli	2,3	0,14	1,74	1,49	536	753	34
Sıcak haddeli	2,3	0,15	1,98	1,64	571	806	30
Sıcak haddeli	1,6	0,21	2,05	2,21	855	1083	22

Sonuç olarak; Türkiye TRIP çeliği üretebilecek endüstriyel kapasiteye sahiptir. Türkiye'de öncü otomobil firmalarının da bulunduğu 17 otomobil üreticisi fabrikalarında üretim yapmaktadır. Özellikle AB ile bütünleşme süreci içerisinde, Türkiye'nin, İspanya'nın ardından, AB'nin "otomotiv yan sanayi" üslerinden birisi haline gelmesi çok kuvvetle muhtemel görüldüğü **Özel İhtisas Komisyonu "Dokuzuncu Kalkınma Planı, 2007-2013"** raporunda vurgu yapılmıştır. **TÜBİTAK "2003-2023 Strateji"** belgesinde düşük emisyonlu, uygun, hafifletilmiş taşıt araçları (otomotiv, demiryolu, vb.) sektöründe AB'nin en yüksek kapasiteli tasarım, geliştirme ve üretim gücüne ulaşma hedefini koymuştur. Ayrıca TÜBİTAK otomotiv endüstrisinde yıllık 10 milyar \$'lık ihracat geliri ile dünyadaki ilk 8 ülke arasında olma hedefi koymuştur. Belirlenen bu hedeflere ulaşabilmek için ülkemizde gelişmiş yüksek mukavemetli çelik (TRIP, TWIP) üretilmesi itici güç olabilir.

Ülkemizde TRIP çeliği üretilmemektedir. Türkiye yassı çelik sektöründe tek entegre üretici olan Erdemir T.A.Ş.'in 2005 yılında başlayan ve 2006'da tamamlanan özelleştirme süreci ile birlikte, kamu kesimi, yassı demir-çelik sektöründen tümüyle çekilmiştir. Ayrıca İskenderun D.Ç Fabrikasına son yıllarda yapılan yatırımların bu yöne yönlendirilmesi mümkün olabilir. Diğer taraftan çift fazlı çelik üretimi Erdemir T.A.Ş. tarafından gerçekleştirilmektedir. Dünyada 2009 yılı itibarıyla Demir-Çelik üretiminde uzak ara önde olan ArcelorMittal [68] ve dördüncü

sırada olan Nippon Steel [68] TRIP çeliğini üretmekte ve satmaktadır. Özellikle son yıllarda bu çeliklerle ilgili yatırımları artarak devam etmektedir. Son olarak teknolojik ilerleme ve geliştirme çabaları sonucunda Dünyanın öncü Demir-çelik üreticisi ArcelorMittal [32] 2007 yılında DP 1200 ve TRIP 1200 kalite çeliklerinin üretimine başlamıştır. Bu açıdan soğuk haddeli ve galvaniz kaplanmış çelik üreterek sınıf atlayan Erdemir T.A.Ş. Dünya Demir-Çelik piyasasında 2009 yılında 30. sırada yer bulmuştur [68]. Bu açıdan yerini sağlamlaştırmak ve üst sıralara çıkmak amacıyla gelişmiş yüksek mukavemetli çelik üretimine TRIP çeliğiyle hız verme yoluna gidebilir.

Türkiye Dünya Demir-Çelik endüstrisinde stratejik bir öneme sahiptir. Dünyanın bir numaralı Demir-Çelik üreticisi ArcelorMittal [32] 2007 raporunda Türkiye'nin Akdeniz, Orta Avrupa ve Ortadoğu ülkeleri arasında stratejik bir noktada olduğuna vurgu yaparak stratejik avantajlarının kullanılması gerektiğini bildirmiştir. Bu noktada TRIP çeliğiyle birlikte yüksek mukavemetli çelik üretimi Türkiye'nin pazarda elini kuvvetlendirerek ekonomik büyümeye büyük oranda katkı sağlayacaktır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

- Dünyada TRIP çeliği kullanımı çevreye duyarlılığı, yakıt tasarrufu sağlaması, kazalara karşı güvenirliliği vb. gibi etkenlerden dolayı yakın gelecekte artarak devam edecektir.
- Ülkemizde gelişmiş yüksek mukavemetli çelik üretimi (TRIP); ülke ekonomisinin büyütülmesi, geliştirilmesinde hayati öneme sahiptir. TRIP çeliği üretimi Demir-Çelik endüstrisine ve otomotiv endüstrisine Dünya ile rekabet üstünlüğü kazandırarak, istihdam olanakları sunması açısından kritik bir teknolojidir.
- Ülkemizde yüksek mukavemetli çelik üretimi projesi bu bakımdan öncelikli bir proje olma özelliğine sahiptir. Türkiye'de hafifletilmiş araç üretimi ve geliştirme konsepti, Dokuzuncu Kalkınma Planı, 2007-2013, "Ana Metal Sanayi" Raporu ve TÜBİTAK "2003-2023 Strateji" belgesinde yer almıştır.
- Ülkemiz bu çeliği üretecek endüstriyel kapasite ve bilgi birikime sahiptir. Erdemir CAL (continuous annealing line: sürekli tavlama hattı) hatlarıyla birlikte diğer bazı ünitelere yapacağı yatırımlarla TRIP çeliğini üretebilir duruma gelebileceği düşünülebilir.
- Ülkemizde TRIP çeliği üretimiyle yassı demir çelik üretimi aleyhine olan mevcut yassı/uzun ürün üretim dengesinin düzelmesine hizmet edilecektir. Bu nedenle TRIP çeliğinin üretimine yönelik yatırımların ivedilikle yapılması ve üretime geçilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Dokuzuncu Kalkınma Planı, 2007-2013, “Ana Metal Sanayi”, **Özel İhtisas Komisyonu Raporu**, Ankara 2007.
2. “Türk Demir Çelik Sektörü”, **Türkiye Demir-Çelik Üreticileri Derneği**, 2009. (<http://www.dcdud.org.tr/dcs.aspx>).
3. Tetsuya, M., Hasegawa, K., Kawabe, H., “UHSS Sheets for Bodies, Reinforcement Parts, and Seat Frame Parts of Automobile Ultra High-Strength Steel Sheets Leading to Great Improvement in Crashworthiness” **JFE Technical Report**, Vol 4, 38-43, 2004.
4. Manuel, F., Christoph, M.S., Colin, V., “A Regression on Climate Policy: The European Commission’s Legislation to Reduce CO₂ Emissions from Automobiles”, **Transportation Research Part A**, 2010. doi:10.1016/j.tra.2009.12.001
5. Volkan, E.E., Arısoy, C.F., Kelami, Ş., “Otomotiv Endüstrisinde Çelikten Vazgeçilebilir Mi?”, **Metal Dünyası**, Vol 125, 74-81, 2003.
6. Ushioda, K., “Recent Developments in Steel Sheers”, **Scandinavian Journal of Metallurgy**, Vol 28, 33-39, 1999.
7. SSAB Swedish Steel, “Lighter Strength-Lower Weight: Educing the Body Weighty Using Extra and Ultra Hight Strength Steel”, **GB 2000 Lygner Form& Tryck** 2004.
8. “21st Century Steel”, **World Steel Assosiation**, 2008-2009 Update, 1-32, 2009. (<http://www.worldsteel.org/pictures/publicationfiles/21st%20century%20steel.pdf>)
9. Lindsay, B., Harry, E., “Automakers and Suppliers Accelerate Their Efforts to Reduce Vehicle Weight by Engineering Them for Greater Use of Lighter, Stronger Materials”, **Mass Reduction Special Report**, 16 March 2009.
10. Akay, D., Kurt, M., “Otomobil Emniyet Kemerli Kullanılabilirlik Testi”, **Gazi Üniversitesi. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Cilt 21, No 1, 183-191, 2006.
11. AISI Market Development, “An Investment in Steel’s Future”, **American Iron and Steel Institute**, 2002– 2003, Progress Report 2003.
12. “Advanced High-Strength Steels–A Collision Repair Perspective”, **Technical Information for the Collision Industry**, June 12, 2006. (www.i-car.com)
13. “New Study Finds Increased Use of Advanced High-Strength Steels Helps Decrease Overall Vehicle Weight”, **Automotive Applications Council**, 2010. (http://www.steel.org/AM/Template.cfm?Section=Press_Releases9&TEMPLATE=/CM/ContentDisplay.cfm&CONTENTID=32077)
14. “Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines”, **World Auto Steel**, Version 4.1, 1-171, 08 June 2009. (www.worldautosteel@org).
15. Hayat, F., Demir, B., Acarer, M., Aslanlar, S., “Effect of Weld Time and Weld Current on the Mechanical Properties of Resistance Spot Welded IF (DIN EN 10130–1999) Steel”, **Kovove Materials**, Vol 47, No 1, 11-17, 2009.
16. Hayat, F., Demir, B., Aslanlar, S., “IF 7315 Çeliklerinin Yapıştırılmalı Nokta Direnç Kaynaklı Birleştirmelerinin İncelenmesi”, **14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 16-18 Ekim 2008.
17. Hayat, F., Demir, B., Aslanlar, S., “Nokta Direnç Kaynak Süresinin IF 7114 Çeliği Birleştirmelerinin Mekanik Özelliklerine Etkisi”, **IV. Demir Çelik Kongresi**, Karabük, 243-250, 1-3 Kasım 2007.
18. Hayat, F., Demir, B., Acarer, M., “0,067C ve 1,74 Mn’lı Çift Fazlı Çeliklerin Mikroyapı-Dayanım İlişkisi ve Kırılma Davranışları”, **Teknoloji Dergisi**, Cilt 10, Sayı 1, 111-120, 2007.
19. Speich, GR., “Dual Phase Steels”, Heat Treating, **ASM Handbook**, fifth printing, 424-429, 1997.
20. Speich, GR., Miller, RL., “Mechanical Properties of Ferrite-Martensite Steels” **In: Kott RA, Morris JW, editors, “Structure and Properties of Dual-Phase Steels”**, New York: AIME, 1-45, 1979.
21. Erdoğan, M., “The Effect of New Ferrite Content on Tensile Fracture Behaviour of Dual Phase Steels”, **Journal of Materials Science**, Vol 37, No 17, 3623-3630, 2002.
22. Erdoğan, M., Priestner, R., “Effect of Martensite Content, its Dispersion and Epitaxial Content on Bauschinger Behaviour of Dual Phase Steel”, **Materials Science and Technology**, Vol 15, No 11, 1273-1284, 1999.
23. Kim, K.J. Chang, G.L., Sunghak L., “Effects of Martensite Morphology on Dynamic Torsional Behaviour in Dual Phase Steels”, **Scripta Materialia**, Vol 38, No 1, 27-32, 1997.
24. Davies, R.G., “Influence of Martensite Composition and Content on The Properties of Dual-Phase Steels”, **Metallurgical Transactions**, Vol 18A, 671-679, 1978.
25. The UltraLight Steel Auto Body Programme, “UltraLight Steel Auto Closures” Final Report, **Porsche Engineering Services**, Inc. May 2001. (www.ulsab-avc.org).
26. Kayalı, E.S., Ensari, C., Silahtaroglu, S., “Derin Çekme Kalitesindeki Saclarda Özellikleri Etkileyen Faktörler”, **3. Ulusal Metalurji Kongresi**, ODTÜ, Ankara, 581-586. Aralık 1979.
27. Öztürk, T., Bor, Ş., Atasoy, E., Alpas, T., “Erdemir 6114 Saclarının Derin Çekme Özelliklerini Etkileyen Faktörler”, **Doğa Mühendislik ve Çevre Dergisi**, Vol 1, 318-322, 1987.

28. "New Study Finds Increased Use of Advanced High-Strength Steels Helps Decrease Overall Vehicle Weight", **American Iron and Steel Institute**, 2009.
29. "Environmental Case Study Automotive: an Advanced High-Strength Steel Family Car", **World Steel Association**, 2006. (www.worldsteel.org).
30. Corus Research, Dev.&Technology, Corporate Responsibility Report 2007/08.
31. ArcelorMittal, "How Will We Achieve: Safe Sustainable Steel?", **Corporate Responsibility Report**, 2008.
32. Flat Carbon Europe, "Client Magazine", **ArcelorMittal**, September, 2007. (www.arcelormittal.com/fce/repository/Update/EN_UpdateFCE_aug07.pdf)
33. "Arcelor Body Concept", **Arcelor Auto**, Arcelor Group.
34. "50 Years as Steel Supplier to Volvo", **Corus Research**, No. 1, February 2007. (<http://www.productrange.nl/uploadz/m20071026115451.pdf>)
35. Basuki, A., Aernoudt, E., "Influence of Rolling of TRIP Steel in the Intercritical Region on the Stability of Retained Austenite", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol 89, No 1, 37-43, 1999.
36. Furne'mont, Q., Kempf, M., Jacques, P.J., Gorken, M., Delannay, F., "On the Measurement of the Nanohardness of the Constitutive Phases of TRIP-assisted Multiphase Steels", **Materials Science and Engineering A**, Vol 328, No 1, 26–32, 2002.
37. Berrahmoune, M.R., Berveiller, S., Inal, K., Moulin, A., Patoor, E., "Analysis of the Martensitic Transformation at Various Scales in TRIP Steel", **Materials Science and Engineering A**, Vol 378, No 1, 304–307, 2004.
38. Hutchinson, B., "Texture in Hot Rolled Austenite and Resulting Transformation Products", **Materials Science and Engineering A**, Vol 257, No 1, 9–17, 1998.
39. Zhao, L., Dijk, N.H., Brück, E., Sietsma, J., Zwaag, S., "Magnetic and X-ray Diffraction Measurements for the Determination of Retained Austenite in TRIP steels", **Materials Science and Engineering A**, Vol 313, No 1, 145–152, 2001.
40. Li, L., Wollants, P., He, Y.L., Coomman, B.C., Wei X.C., Xu, Z.Y., "Review and Prospect of High Strength Low Alloy TRIP Steel", **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)** Vol 16, No 6, 457-465, 2003.
41. Hoon, H., Kim, S.B., Song, J.H., and Lim, J.H., "Dynamic Tensile Characteristics of TRIP-type and DP-type Steel Sheets for an Auto-Body", **International Journal of Mechanical Sciences**, Vol 50, No 5, 918–931, 2008.
42. Dan, W.J., Li, S.H., Zhang, W.G., Lin, Z.Q., "The Effect of Strain-Induced Martensitic Transformation on Mechanical Properties of TRIP Steel", **Materials and Design**, Vol 29, No 4, 604-612, 2008.
43. Yinghui, Z., Yonli, M., Yonglin, K., Hao, Y., "Mechanical Properties and Microstructure of TRIP Steels Produced Using TSCR Process", **Journal of University of Science and Technology**, Beijing Vol 13, No 5, 416-421, 2006.
44. WU, D., Zhuang, L., Hui-sheng, L., "Effect of Controlled Cooling After Hot Rolling on Mechanical Properties of Hot Rolled TRIP Steel", **Journal of Iron and Steel Research, International**, Vol 15, No 2, 65-70, 2008.
45. Koh-Ichi, S., Toshiki, M., Shun-Ichi H., Yoichi, M., "Formability of Nb Bearing Ultra High-Strength TRIP-aided Sheet Steels", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol 177, No 1, 390–395, 2006.
46. Skoalova, L., Divišová, R., Jandová, D., "Thermo-Mechanical Processing of Low-Alloy TRIP steel", **Journal of Materials Processing Technology**, Vol 175, No 1, 387–392, 2006.
47. Wen, S., Lin L., Cooman, B.C.D., Wollants, P., Yang, C., "Thermal Stability of Retained Austenite in TRIP Steel After Different Treatments", **Journal of Iron and Steel Research, International**, Vol 15, No 1, 61-64, 2008.
48. Zhuang, L., Di, W., Rong, H., "Austempering of Hot Rolled Si-Mn TRIP Steels", **Journal of Iron and Steel Research, International**, Vol 13, No 5, 41-46, 2006.
49. Xiaodong, Z., Zhaohui, M., Wang L., "Current Status of Advanced High Strength Steel for Auto-making and its Development in Baosteel", **Baosteel Research Institute, Shanghai**, 201900, 1-8, China.
50. Chatterjee, S., "Transformations in TRIP-assisted Steels: Microstructure and Properties", **Darwin College, University of Cambridge**, November, 2006.
51. Hanzaki, A.Z., Hodgson P.D., Yue, S., "Hot Deformation Characteristics of Si-Mn TRIP Steels With and Without Nb Microalloy Additions", **ISIJ International**, Vol 35, No 4, 324-330, 1995.
52. La-Neuve, P. Jacques, PhD Thesis, Université' **Catholique de Louvain**, Belgium, 1998.
53. Basuki, A., and Aernoudt, E., "Effect of Deformation in the Intercritical Area on the Grain Refinement of Retained Austenite of 0.4C TRIP Steel", **Scripta Materialia**, Vol 40, No 9, 1003–1008, 1999.
54. Cooman, B.C.D., "Structure–Properties Relationship in TRIP Steels Containing Carbide-Free Bainite", **Current Opinion in Solid State**

- and Materials Science**, Vol 8, No 4, 285–303, 2004.
55. Oliver, S. Jones, T.B., Fourlaris, G., “Dual Phase Versus TRIP Strip Steels: Microstructural Changes As a Consequence of Quasi-Static and Dynamic Tensile Testing”, **Materials Characterization**, Vol 58, No 4, 390-400, 2007.
 56. Hilditch, T.B., Speer, J.G., Matlock, D.K., “Effect of Susceptibility to Interfacial Fracture on Fatigue Properties of Spot-Welded High Strength Sheet Steel”, **Materials and Design**, Vol 28, No 10, 2566–2576, 2007.
 57. Liu, Q., Tang, D., Jiang, H., Liu, R., Tang, X., “Research and Development of 780 MPa Cold Rolling TRIP-aided Steel”, **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, Vol 16, No 4, 399-406, 2009.
 58. “Material assessment for crash”, **Corus Research**, MEP/02-2002, (http://www.corusautomotive.com/file_source/StaticFiles/Microsites/Automotive/Publications/Auto%20Apps%20PDFs/2008%20PDFs/Material%20assessment%20for%20crash_20071101.pdf)
 59. Uenishi, A., Kuriyama, Y., Takahashi, M., “High-Strength Steel Sheets Offering High Impact Energy-Absorbing Capacity”, **Nippon Steel Technical Report**, (Japan), 81, 17, 2000.
 60. Takahashi, M., Kawano, O., Hayashida, T., Okamoto, R., Taniguchi, H., “High Strength Hot-Rolled Steel Sheets for Automobiles”, **Nippon Steel Technical Report**, 88, 2-7, 2003.
 61. Sakuma, Y., Kimura, N., Itami, A., “Next-Generation High-Strength Sheet Steel Utilizing Transformation-Induced Plasticity (TRIP) Effect”, **Nippon Steel Technical Report**, no.64 March 1995.
 62. Parish, C.M., “Fundamental Study of Phase Transformations in Si-Al TRIP Steels”, Bs in **Material Science and Engineering A**, NCS University, 2000.
 63. Andrew, K.W., “Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures”, **Journal of the Iron and Steel Institute**, Vol 203, 721-727, 1965.
 64. Topbaş, M.A., “**Isıl İşlemler**”, Prestij Yayıncılık, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1993.
 65. Wasilkowska, P., Tsipouridis, E.A., Werner, A., Pichler, S., Traint “Microstructure and Tensile Behaviour of Cold-Rolled TRIP-aided Steels”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol 157–158, No 1, 633–636, 2004.
 66. Wei, X., Renyu, F., Li L., “Tensile Deformation Behavior of Cold-Rolled TRIP-aided Steels Over Large Range of Strain Rates”, **Materials Science and Engineering A**, Vol 465, No 1, 260–266, 2007.
 67. Kim, S.J., Chang G.L., Lee, T.H., Oh, C.S., “Effect of Cu, Cr and Ni on Mechanical Properties of 0.15 wt.% C TRIP-aided Cold Rolled Steels”, **Scripta Materialia**, Vol 48, Vol 5, 539–544, 2003.
 68. “Top Steel Producer Companies”, **World Steel Assosiation**, 2009. (<http://www.worldsteel.org/?action=programs&id=53>)