T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ NESİL YÜKSEK MUKAVEMETLİ TWIP VE MARTENZİTİK ÇELİK SAC MALZEMELERİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANIM ALANLARININ GELİŞTİRİLMESİ, MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

EMRE YİĞİTOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. ADEM BAKKALOĞLU

İSTANBUL, 2016

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ NESİL YÜKSEK MUKAVEMETLİ TWIP VE MARTENZİTİK ÇELİK SAC MALZEMELERİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANIM ALANLARININ GELİŞTİRİLMESİ, MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Emre YİĞİTOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 19.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Erdem DEMİRKESEN

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca bilgi, tecrübe ve önerileriyle çalışmalarıma yön veren, hiçbir zaman bilgi ve yardımlarını esirgemeyen, gerekli anlarda bana her türlü desteği sağlayan Prof.Dr. Adem BAKKALOĞLU hocama teşekkürlerimi sunarım.

Üniversite eğitimimim süresince şu an bulunduğum pozisyona gelmemi sağlayan Müzeyyen Marşoğlu, Ahmet Karaaslan, Ahmet Ünal, Ahmet Topuz, Ahmet Ekerim, Nurhan Cansever ve sayamadığım tüm akademisyen hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tübitakta çalıştığım süre boyunca laboratuvar çalışmalarımda, analiz imkânları sağlayan ve gelişebilmem için tüm bilgilerini aktarmaya çalışan başta Tarık Baykara, Volkan Günay, Alparslan Demirural, Serdar Sevik, Özgür Duygulu, Bilal Teymur ve Havva Kazdal Zeytin olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Coşkunöz Holding bünyesindeki çalışma yaşamıma başlamamdan itibaren tüm bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan Mesut Kaya' ya, beni her zaman tetikleyen ve bilgilerini aktaran Metin Çallı' ya ve özellikle bilgi ve becerilerini paylaşan mükemmel bir ekibe sahip olduğum tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tüm çalışmalarım boyunca laboratuvar araştırmaları desteği sunan, test sonuçlarını tartıştığımız, her görüşmemizde yeni bilgiler kazandığım Abu Dabi Petroleum Enstitüsü Fahrettin Öztürk ve Niğde Üniversitesi Serkan Toros hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarıma yön vererek yeni bilgiler kazanmamı sağlayan, tüm bilgilerini bizimle çekinmeden paylaşan Uludağ Üniversitesinden Ali Durmuş, Hakan Aydın, Mümin Tutar hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşantım boyunca her konuda ve kararımda yanımda olarak, benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen canım annem Dilek YİĞİTOĞLU ve kardeşim Elif YİĞİTOĞLU' na, yaşamımıza girdiğinden beri mutluluk vererek kardeşlik kavramını yaşatan ve gözümün arkada kalmayacağını hissettiren değerli kardeşim, ağabeyim Haluk Cenk Batur' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

2013 yılının bana en güzel hediyesi olan, onunla birlikte yepyeni bir yaşantımın başladığı, tez yazımımda çok büyük bir anlayışla desteklerini sunan, her kararımın arkasında tüm benliğiyle durarak yanımda olan en değerlim, biricik eşim Pınar YİĞİTOĞLU' na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yaşamımda olduğu süre boyunca onu rol alarak büyüdüğüm, kısa zaman içerisine çok büyük hatıralar sığdırdığım, her zaman çınarımız olan, o gittiğinden beri gölgesinin bile hala üzerimizde olduğu canım babam Nurettin YİĞİTOĞLU' nu hasretle anarak sevgilerimi sunarım.

Mart, 2016
Emre YİĞİTOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
ÇİZELGE LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
BÖLÜM 1
GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Hipotez 3
BÖLÜM 2
MALZEME SEÇİMİNİN ÖNEMİ 4
2.1 Malzeme Seçiminde Dikkate Alınacak Faktörler 5
BÖLÜM 3
OTOMOTİVDE KULLANILAN MALZEMELER 8
BÖLÜM 4
OTOMOTİVDE KULLANILAN ÇELİK MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI 11
4.1 Çift Fazlı Çelikler 13
4.2 Ferritik - Beynitik Çelikler 15
4.3 Kompleks Fazlı Çelikler 16
4.4 TRIP Çelikleri 17
4.5 Sıcak Şekillendirme Çelikleri 19
4.6 Martenzitik Çelikler 21
4.7 TWIP Çelikleri 22
BÖLÜM 5
OTOMOTİVDE YAN KAPI BARI PARÇASININ ÜRETİMİ 27

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR 31

6.1 Kimyasal Analiz ve Mekanik Özellikler 31
6.2 Mikroyapı 32
6.3 Malzeme Yoğunluğunun Hesaplanması 41
6.4 Çekme Testi 42
6.4.1 Çekme Deneyi Sonuçları 43
6.4.2 Anizotropi Değerlerinin Belirlenmesi 52
6.5 Geri Esneme Testi 58
6.6 Akma Yüzeylerinin Belirlenmesi 61
6.6.1 Hill-48 Kuadratik Akma Kriteri 65
6.6.2 Barlat-89 Akma Kriteri 66
6.6.3 Düzlem Gerilme Akma Fonksiyonu Yld2000-2d 66
6.6.4 Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi 68
6.6.5 Anizotropik Akma Fonksiyonların TWIP Çeliğine Uyarlanması 69
6.7 Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Belirlenmesi 82
6.8 Üç Nokta Bükme Testi ve Sanal Analiz Kıyaslamaları 89

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER 92

KAYNAKLAR 94

ÖZGEÇMİŞ 96

SİMGE LİSTESİ

Y	Akma Gerilmesi
Al	Aluminyum
C'	Anizotropik Sabit
C''	Anizotropik İkinci Sabit
σ	Asal Gerilme
N	Azot
B	Bor
m	Deformasyon oranı hassasiyeti
Fe	Demir
$\bar{\sigma}$	Efektif Gerilme
n	Eğrinin eğimi
K	Eğrinin sabiti
E	Elastisite modülü
α	Ferrit
C	Karbon
Cr	Krom
Mn	Mangan
m	Martenzit
Mo	Molibden
K	Mukavemet katsayısı
Nb	Niyobyum
n	Pekleşme üsteli
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
Zr	Zirkonyum

KISALTMA LİSTESİ

AHSS	Advanced High Strength Steel
ASAME	Automated Strain Analysis and Measurement Environment
BH	Bake Hardening
BMW	Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft
CP	Complex Phase
DP	Dual Phase
ECE	Economic Commission for Europe
FB	Ferrite Bainite
FLD	Forming Limit Diagram
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standards
HSLA	High Strength Low Alloy
IF	Interstitial Free
MPa	Mega Pascal
TE	Total Elongation
TiC	Titanyum Karbür
TiN	Titanyum Nitrür
TRIP	Transformation Induced Plasticity
TWB	Tailored Welded Blank
TWIP	Twinning Induced Plasticity
UE	Ultimate Elongation
UHSS	Ultra High Strength Steel

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3. 1 Otomotivde kullanılan malzemelerin yıllara göre dağılımı 8
Şekil 3. 2 Avrupa' daki araçlardaki ortalama malzeme ağırlık dağılımı 9
Şekil 4. 1 Çelik malzeme için uzama çekme grafiği değerleri 12
Şekil 4. 2 Otomotiv gövde malzemelerinin dağılımı 13
Şekil 4. 3 Çift fazlı çelik mikroyapısı 14
Şekil 4. 4 Ferritik – Beynitik fazlı çelik mikroyapısı 15
Şekil 4. 5 Uzama – Çekme değerleri tablosunda FB çelikleri 16
Şekil 4. 6 Kompleks fazlı çelik mikroyapısı 17
Şekil 4. 7 Trip çeliği mikroyapısı 18
Şekil 4. 8 Doğrudan ve dolaylı sıcak şekillendirme prosesi 20
Şekil 4. 9 Sıcak şekillendirme prosesi ve mikroyapı değişimi 20
Şekil 4. 10 Martenzitik çelik mikroyapısı 21
Şekil 4. 11 TWIP çeliği mikroyapısı 23
Şekil 4. 12 TWIP çeliğinin mikroyapısı ve deformasyon etkileri 24
Şekil 4. 13 Gecikmeli kırılma (Delayed Cracking) için test denemeleri 25
Şekil 4. 14 Amortisör kulesi bağlantı bölgesi 26
Şekil 4. 15 Tünel parçası bağlantı bölgesi 26
Şekil 5. 1 Araç kazaları dağılım oranları 27
Şekil 5. 2 Avrupa ve Amerika' daki çarpışma kriterleri 28
Şekil 5. 3 Araç yan kapı barı bağlantı bölgesi 29
Şekil 5. 4 Şekillendirme işlemi için sac plaka üzerinde test numuneleri konumlandırması 29
Şekil 5. 5 TWIP malzemeden üretilmiş araç yan kapı barı 30
Şekil 5. 6 Martenzitik çelik malzemeden üretilmiş yan kapı barı 30
Şekil 6. 1 TWIP 900CR – 1,30mm (X500 Nital) 32
Şekil 6. 2 TWIP 900CR – 1,30mm (X500 Pikral) 33
Şekil 6. 3 TWIP 980CR – 1,30mm (X500 Nital) 33
Şekil 6. 4 TWIP 980CR – 1,30mm (X500 Pikral) 34
Şekil 6. 5 TWIP 900CR – 1,30mm (X1000 Viella) 34
Şekil 6. 6 TWIP 900CR-1,30mm (0° Yönünde 20X Büyütme) 35
Şekil 6. 7 TWIP 900CR-1,30mm (0° Yönünde 50X Büyütme) 36
Şekil 6. 8 TWIP 900CR-1,30mm (90° Yönünde 20X Büyütme) 37
Şekil 6. 9 TWIP 900CR-1,30mm (90° Yönünde 50X Büyütme) 38
Şekil 6. 10 TWIP 900CR-1,30mm (Yüzey Görüntüsü 20X ve 50X Büyütme) 39

Şekil 6. 11 TWIP 900CR-1,30mm (Yüzey Görüntüsü 50X ve 100X Büyütme)..... 40
Şekil 6. 12 Hassas Yoğunluk Ölçme Cihazı..... 41
Şekil 6. 13 ASTM-E8 standardındaki çekme deney numunesinin boyutları..... 43
Şekil 6. 14 0° yönünde çekme testi sonuçları..... 44
Şekil 6. 15 0° yönünde çekme testi ortalama sonucu..... 44
Şekil 6. 16 45° yönünde çekme testi sonuçları..... 45
Şekil 6. 17 45° yönünde çekme testi ortalama sonucu..... 45
Şekil 6. 18 90° yönünde çekme testi sonuçları..... 46
Şekil 6. 19 90° yönünde çekme testi ortalama sonucu..... 46
Şekil 6. 20 Farklı yönler için elde edilmiş ortalama gerilme birim deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması..... 47
Şekil 6. 21 Maksimum çekme dayanımının malzeme yönüne göre değişimi..... 48
Şekil 6. 22 Akma dayanımının yöne bağlı olarak değişimi..... 48
Şekil 6. 23 Log gerilme-log birim şekil değişimi grafiği..... 49
Şekil 6. 24 Pekleşme üstelinin yöne bağlı olarak değişimi..... 50
Şekil 6. 25 Mukavemet katsayısının yöne bağlı olarak değişimi..... 50
Şekil 6. 26 Pekleşme değerinin yöne bağlı olarak değişimi..... 51
Şekil 6. 27 Pekleşme değerinin her bir yön için plastik deformasyon ile değişimi..... 52
Şekil 6. 28 Hadde yönüne belirli açı yapan çekme numunelerinin gösterimi..... 53
Şekil 6. 29 Tipik bir derin çekme işleminde malzeme üzerinde görülen deformasyon modları. B: Eğme, BS: İki eksenli gerdirme, D: Derin çekme, P: Düzlem birim deformasyon gerdirme, U: Düzeltme (tek eksenli)..... 54
Şekil 6. 30 Malzeme anizotropi değerinin birim deformasyon ile değişimi..... 55
Şekil 6. 31 Anizotropilerin belirlenmesinde kullanılan yöntem..... 57
Şekil 6. 32 Anizotropi değerlerinin yöne ve birim deformasyon miktarına göre değişimi 57
Şekil 6. 33 Malzemelerin geri esneme davranışının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan deneysel yöntemler..... 59
Şekil 6. 34 V-eğme için hazırlanmış deney kalıbı ve numune ölçüleri..... 60
Şekil 6. 35 TWIP çeliğinin geri esneme davranışının şematik olarak gösterimi..... 61
Şekil 6. 36 Deneysel olarak elde edilmiş akma yüzeyi..... 62
Şekil 6. 37 Düzlemsel gerdirme deneyinin şematik görüntüsü..... 62
Şekil 6. 38 Örnek bir akma yüzeyi..... 64
Şekil 6. 39 Hill 48 akma yüzey fonksiyonunun farklı ön birim deformasyonu için değişimi..... 70
Şekil 6. 40 Hill 48 akma yüzey fonksiyonunun farklı ön birim deformasyonu için değişimi..... 71
Şekil 6. 41 Hill 48 akma yüzey fonksiyonunun farklı ön birim deformasyonu için değişimi..... 71
Şekil 6. 42 Normalize edilmiş akma gerilmesi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Hil-48 ile modellenmesi..... 72
Şekil 6. 43 Anizotropi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Hil-48 ile modellenmesi..... 73
Şekil 6. 44 Barlat 89 ile belirlenen akma yüzeyleri..... 74
Şekil 6. 45 Barlat 89 ile belirlenen akma yüzeyleri..... 74
Şekil 6. 46 Barlat 89 ile belirlenen akma yüzeyleri..... 75

Şekil 6. 47 Normalize edilmiş akma gerilmesi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Barlat-89 ile modellenmesi 76
Şekil 6. 48 Anizotropi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Barlat-89 ile modellenmesi..... 76
Şekil 6. 49 Yld2000 ile belirlenen akma yüzeyleri 77
Şekil 6. 50 Yld2000 ile belirlenen akma yüzeyleri 78
Şekil 6. 51 Yld2000 ile belirlenen akma yüzeyleri 78
Şekil 6. 52 Normalize edilmiş akma gerilmesi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Yld2000 ile modellenmesi 79
Şekil 6. 53 Anizotropi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Barlat-89 ile modellenmesi..... 79
Şekil 6. 54 Normalize edilmiş akma gerilmesi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin farklı akma kriterleri için karşılaştırılması 80
Şekil 6. 55 Anizotropi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin farklı akma kriterleri için karşılaştırılması 81
Şekil 6. 56 Farklı akma kriterleri kullanılarak oluşturulmuş akma yüzeylerinin karşılaştırılması 81
Şekil 6. 57 Farklı akma kriterleri kullanılarak oluşturulmuş akma yüzeylerinin karşılaştırılması 82
Şekil 6. 58 Farklı yağlayıcılar için kubbe yüksekliklerinin karşılaştırılması 83
Şekil 6. 59 Malzeme üzerindeki gridlerin okunma şekli 84
Şekil 6. 60 ASAME programı ara yüzü ve örnek uygulaması 84
Şekil 6. 61 Grid uygulanmış TWIP çeliği 85
Şekil 6. 62 Gres ile yapılan şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen ölçüm değerlerinin FLD üzerindeki yeri 86
Şekil 6. 63 Teflon ile yapılan şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen ölçüm değerlerinin FLD üzerindeki yeri 87
Şekil 6. 64 Farklı yağlayıcılara göre elde edilmiş büyük ve küçük birim deformasyonlar…. 88
Şekil 6. 65 MK model ile f=0,99 için belirlenmiş TWIP çeliğine ait FLD..... 89
Şekil 6. 66 Fiziksel Yorulma Test Düzeneği..... 90
Şekil 6. 67 Yan Kapı Barı Sınır Koşulları 90
Şekil 6. 68 Yan Kapı Barı Sanal ve Fiziksel Analizlerin Karşılaştırması [TWIP 900 Malzeme]..... 91
Şekil 6. 69 Yan Kapı Barı Sanal ve Fiziksel Analizlerin Karşılaştırması [Martenzitik 1500M Malzeme]..... 91
Şekil 7. 1 Sanal Analiz Sonuçlarının Prototip Ürün Üzerinde Gösterimi 93

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Malzeme Seçimi Faktörleri 6
Çizelge 6. 1 TWIP çeliği kimyasal kompozisyon değerleri 31
Çizelge 6. 2 Martenzitik çelik ve TWIP çeliği için üretici mekanik değerleri 31
Çizelge 6. 3 TWIP çeliğin mekanik özelliklerini gösteren tablo 52
Çizelge 6. 4 TWIP çeliğinin anizotropi değerlerinin değişimi 58

ÖZET

YENİ NESİL YÜKSEK MUKAVEMETLİ TWIP VE MARTENZİTİK ÇELİK SAC MALZEMELERİN OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANIM ALANLARININ GELİŞTİRİLMESİ, MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Emre YİĞİTOĞLU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

Otomotiv sektöründe karbon emisyonlarının düşürülmesi için yapılan hafifletme çalışmaları doğrultusunda mevcut malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Otomotiv endüstrisi bu doğrultuda yüksek mukavemetli çeliklere odaklanmıştır.

Bu tez çalışmasında, malzemenin kullanılacağı yere göre yüksek verim ve düşük maliyet öneminin üzerinde durularak bir otomotiv parçasının tasarım ve üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yüksek mukavemetli malzemelerin kullanım yerlerine bakıldığında, çoğunluk olarak otomotivde yüksek dayanım beklentilerinin oluştuğu güvenlik parçalarında kullanıldığı görülmektedir. Güvenlik parçaları, kaza anında ortaya çıkan çarpışma enerjisini sönümleyerek aracın, sürücünün ve yolcuların zarar görmesini önlemek için tasarlanmış yapısal elemanlardır. Bazı otomotiv parçaları düşük şekil alma kabiliyetine sahip malzemelerden birçok parçanın bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Şekillendirilebilirliği yüksek olan malzeme seçimiyle tek parça şeklinde üretimler gerçekleştirilebilmektedir. Bu amaçla yüksek mukavemet ve yüksek şekil alma kabiliyetine sahip olan TWIP çelikleri geliştirilmiştir. Yeni nesil olarak geliştirilen bu malzemelerin mekanik karakteristiklerinin literatüre kazandırılması gerekmektedir.

Çeliklerde yüksek mukavemetler elde edildiği takdirde uzama değerlerinde düşüşler gözlemlenmektedir. Bu çalışma da martenzitik çeliğin yapısındaki martenzitlerin yüksek

mukavemete etkisinin yanı sıra, yüksek mukavemet ve uzama değerine sahip olan TWIP çeliğinin yapısında oluşan ikizlenme mekanizmasının da mukavemet değerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Mikroyapı çalışması ve kimyasal analizlerle malzemenin metalürjik özellikleri incelenmiştir. Hadde yönüne bağlı olarak oluşan enerji emilim değerleri kıyaslanmıştır. Yüksek mukavemetli malzemelerin karakteristik özellikleri incelenmiş olup, hadde yönüne bağlı olarak değişen dayanım değerleri göz önünde bulundurularak uygun sac açınımları ile sac rulosu üzerinde yerleştirmeler yapılarak en az maliyet ile parça üretimi yapılmıştır. TWIP malzemesinin şekillendirilebilme yeteneği için akma kriterleri belirlenmiştir ve TWIP için şekillendirme sınır diyagramı yüksek çözünürlüklü kamera kullanılarak oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: TWIP Çeliği, Martenzitik Çelik, Geri Esneme, Akma Kriterleri, Şekillendirme Sınır Diyagramları, Üç Nokta Bükme Testi

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF APPLICATIONS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY AND RESEARCH OF THE MICROSTRUCTURAL & MECHANICAL PROPERTIES FOR ADVANCED HIGH STRENGTH TWIP AND MARTENSITIC STEELS

Emre YİĞİTOĞLU

Department of Metallurgical and Material Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

Existing materials used in automotive industry should be developed for the weight reduction in terms of CO2 emission. Automotive industry focuses on the high strength steels in order to meet the requirements.

In this thesis, design and manufacturing studies of an automotive part have been performed considering high efficiency and low price. It is seen that high strength steels are commonly preferred for security parts which need high endurance requirements in the automotive. Security parts are structural elements which prevent driver and passengers from injuries absorbing crash energy. Many automotive products are manufactured with multi components which have low formability properties. These products can be redesigned as one-part solution with materials that have high formability. For this reason, TWIP steels which have high elongation and high endurance skills have been developed. Mechanical characteristics of these new generation materials should be added into the literature.

Elongation values for steels are reduced due to increase of the strength. In this study, as well as the effect of martensite on the high strength, it is observed that twinning mechanism in the TWIP steel with high elongation&strength increase the strength values.

Microstructure study and metallurgical properties of TWIP steels with chemical compositions are investigated, energy absorption values have been compared according to rolling directions as well. Characteristics of the high strength steels have been examined. In addition to this, component production has been performed with optimized blank sheet shapes on steel coil considering the endurance values changed depending on rolling direction. Yield criterions for the formability skill of twinning induced plasticity steel are identified and forming limit diagram is created for TWIP using high resolution camera.

Keywords: TWIP (Twinning Induced Plasticity) Steels, Martensitic Steels, Springback, Yield Criteria, Forming Limit Diagram, Three Point Bending

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Malzeme bilimi, geliştirilen yeni teknolojilerle ekonomideki tüm faaliyetlere girdi sağlayan temel alanların en önemlilerinden biridir. Savunma Sanayi, havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılacak yeni nesil malzemeler, müşteri beklentisi ve yasal gereklilikleri sağlayacak şekilde geliştirilerek ve kullanım alanı oluşturmaktadır [1]. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu' nun "Ulusal Bilim ve Teknoloji Politikaları 2023 Strateji Belgesi" raporundaki bilgiler doğrultusunda ARGE olanaklarının yeniden yapılandırılması ve metal şekillendirme enstitülerinin kurulması gibi birçok maddenin olduğu hedefler belirlenmiştir [2]. Bu hedefler ile birlikte;

- Bir rekabet üstünlüğü kazanılarak uluslararası ticaretten ciddi bir pay alması,
- Yaşam kalitesinin arttırılması,
- Sürdürülebilirlik ile kalkınmanın sağlanması,
- Bilginin üretilerek faydaya dönüştürülebilmesi

maddelerinin stratejik bir öneme sahip olduğu kanısına varmışlardır. Dünyada rekabet üstünlüğü kazanılmasında malzeme teknolojilerinin geliştirilebilmesi hedeflenmektedir. Yaşam kalitesinin arttırılmasında sağlıklı ve çağdaş bir yaşam kurma yeteğenin kazandırılması hedeflenmektedir. Sürdürülebilirlikle kalkınmanın sağlanmasında doğal kaynakların değerlendirilerek enerji tekonolojilerinin yükseltilmesi hedeflenmektedir. Bilginin üretilerek faydaya dönüştürülebilmesinde teknolojik altyapının güçlendirilmesi hedeflenmektedir [1]. Özellikle otomotiv endüstrisin de yeni yasal gerekliliklere uyum ve sera gazı etkisinin azaltılması amacıyla araç bileşenleri üzerinde ağırlık azaltma çalışmalarına odaklanılırken, aynı zamanda araç bileşenlerinin emniyetinden ödün

vermeyecek şekilde farklı geometriler, prosesler ve yeni nesil malzemeler üzerine çalışılmaktadır. Ağırlık hafifletme çalışmalarında ele alınan en önemli parametrelerden bir tanesi de yüksek mukavemetli malzeme kullanımlarıdır. Yüksek mukavemetli malzeme kullanımları ile birlikte malzeme kalınlıkları düşürülebilmektedir [3]. Fakat çelik malzemelerde mukavemet değerleri yükseldikçe şekillendirilebilme özellikleri düşmektedir. Bu özellikler doğrultusunda yüksek mukavemetin yanında şekillendirilebilme özelliği düşük olan martenzitik çelikler, şekillendirilebilme özelliği düşük olan otomotiv bileşenlerinde kullanılmaktadır. Bu malzemelerin yanı sıra yüksek mukavemet değeri ile birlikte şekillendirilebilme özelliği arttırılan ikinci nesil çelik malzemeler geliştirilmektedir. Bu üstün özelliklerin bir arada bulunduğu TWIP çelikleri otomotiv sektöründe yeni yeni yer almaktadır. İkizlenme ile birlikte plastisite kazanan yüksek mangan içeren TWIP (TWinning Induced Plasticity) çelikleri, şekillendirme esnasında sertleşerek mukavemeti artmaktadır. Bu özelliği sayesinde çarpışma anında darbe emilimi gösterecek parçalarda kullanım alanı bulmaktadır.

Avrupa'daki karbon emisyonu hedefleri 2015 yılında 130 g/km olurken 2020 yılında bu değerin 95 g/km değerlerine hatta daha da düşmesi sonucu araç üreticilerinin ağırlık hafifletme çalışmalarına katkı sağlaması adına bu malzemelerin kullanımını arttırması beklenmektedir [4].

1.1 Literatür Özeti

Yüksek mangan içeren östenitik TWIP çeliği ilk kez 1888 yılında Sir Robert Hadfield tarafından keşfedilmiştir. TWIP çelikleri yüksek mangan içeriği ve alüminyum elementlerinin eklenmesiyle, serbest yığın enerjisini (Stacking Fault Energy, SFE) düşürüp ikizlenme sistemi göstererek, yüksek mukavemet değerlerinde üstün plastisite özelliği göstermektedirler. Günümüze kadar Fe-Mn-C, Fe-Mn-C-Al, Fe-Mn-Si-Al bileşikleri olan üç ayrı içerikte TWIP çeliği üretilmiştir. Alüminyum eklenmesiyle çeliğin yoğunluğu 6,8 -7,3 g/cm^3 aralığına kadar inmektedir. Bu özelliğin etkisi de otomotiv sektöründe karbon emisyon değerleri ve yakıt kullanımında pozitif bir etki olarak ortaya çıkmaktadır. TWIP çelikleri oda sıcaklığında genellikle tüm yapısında östenitik bir faz bulundururlar. Yüksek manganlı çeliklerde sıcak süneklik özelliğini geliştirmek

için alüminyum eklentisinin yanı sıra B, Ti ve Zr çok az miktarda eklenmektedir. Silisyum ve alüminyum eklentisi serbest yığın enerjisinin kontrolünde etkilidirler [5].

Çelik üreticileri tarafından farklı özelliklerde TWIP çelikleri üretilmektedir. Otomotiv uygulaması için soğuk şekillendirilmiş, alüminyum eklenmiş TWIP çeliği Posco tarafından ilk kez 1994 yılında geliştirilmiştir. Fe-Mn-C içerikli TWIP çeliğine alüminyum eklenmesiyle, içermeyene göre daha yüksek akma dayanımı ve uzama değeri gösteren TWIP çeliğinin deformasyon sertleşmesi de uygun değerlere ulaşmıştır. Alüminyum eklenmiş TWIP çeliklerinde, gecikmeli kırılma (delayed fracture) ve çinko kaplanabilirlik özelliklerinin üstün olduğu görülmektedir. Ayrıca ArcelorMittal ve ThyssenKrupp firmaları geliştirilen TWIP çeliklerinin otomotiv sektöründe kullanılacağını 2005 yılındaki bir röpartajlarında belirtmektedirler. TWIP çeliğinin yapısında martenzitik gibi diğer bir ikinci faz bulunmadan tamamıyla östenitik bir fazdan oluşmaktadır [6].

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı; otomotivde kullanılan çelik malzemelerin daha yakından tanınması ve özellikle ikinci nesil olarak geliştirilen TWIP çeliklerinin mekanik karakterizasyon çalışmalarının yapılarak literatüre kazandırılmasıdır. Birinci nesil olarak üretilen yüksek mukavemetli çelikler yerine, daha yüksek mukavemetli çelik malzeme beklentilerinden dolayı üretim çalışmaları yapılan TWIP çeliği malzemelerinin şekillendirilebilme kabiliyetleri ve enerji emilimleri gibi özelliklerin bilinememesinden dolayı çalışmalar bu alanda ilerletilmiştir. Kimyasal analiz ile içeriği belirlenen malzemenin mekanik dayanımlarının belirlenmesi için testler yapılacak ve malzemenin araç üzerinde en faydalı olacağı parça seçimi yapılacaktır.

1.3 Hipotez

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik grubunda yer alarak üretilen, ikinci nesil çelik sınıfında yer alan TWIP çeliğinin mukavemet değerleri 1000 MPa seviyelerine yaklaşırken uzama miktarı da % 50 seviyelerinde bulunabilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı yüksek mukavemet beklentisiyle üç ya da dört parçadan oluşan bir otomotiv parçası yüksek şekillendirilebilirlikden dolayı tek parça olarak üretilmesi düşünülmektedir.

BÖLÜM 2

MALZEME SEÇİMİNİN ÖNEMİ

Bir parça tasarımında malzeme seçimi önemli bir konudur. Malzeme seçiminde ise yetmiş bini demir esaslı olan yüz binin üzerinde malzemeden yararlanılmaktadır. Çevremizde kullandığımız araçlara baktığımızda yaklaşık olarak; traktörde yirmi bin, otomobilde yirmibeş bin, tankta kırk bin, uçakta yüz bin, denizaltıda ise yüz yirmi bin parça kullanılmaktadır. Bu araçlarda kullanılan her bir parçada seçilen malzemenin ayrı ayrı görevi olduğundan, bulundukları yerlerdeki şartlara uygun olarak seçilmiş olması çok önemlidir. Yanlış seçilen bir malzeme çok kötü sonuçlar ortaya çıkarabilir. Bir otomobilde seçilecek yanlış bir malzeme aracın üzerindeki yükleri karşılayamayacak ve beklenilenden önce parçanın hasar görmesine neden olacaktır. Bu yanlış seçilen malzemeden dolayı hasar gören parça, otomobil üreticisine beklenmedik sonuçlar ortaya çıkaracaktır. Aslında bir otomobilden beklenen temel özellikler; ekonomik yakıt kullanımı, geri dönüşülebilik, düşük emisyon değerleri, emniyet ve konfor gibi özelliklerdir. Bu özelliklerden yola çıkılarak yakıt ekonomisinin iyileştirilmesi diğer tüm özelliklerin iyileştirilmesi anlamına geliyor diye düşünülebilir. Araçta kullanılan bir malzemenin mukavemetinin arttırılmasıyla kullanılan kalınlığın düşürülebilmesini sağlayacaktır. Ağırlığı azalan aracın ise yakıt ekonomisi iyileşecektir. Bu sonuçla daha güvenli ve düşük yakıt kullanımı olan bir araç ortaya çıkmış olacaktır. Otomotivin yanı sıra uçak sektöründe de bir parçanın hafiflemesi ile yakıt tasarrufu sağlanacak ve alınan yol mesafesi artmış olacaktır [7].

Günümüzde daha güvenli ve konforlu bir kullanım hedefiyle çıkılan tasarım çalışmaları, araç üzerinde ek ağırlıkları ortaya çıkarmaktadır. Bu ağırlıklar ise yakıt tüketiminin

artmasına neden olmaktadır. Araç performansında bir azalmaya neden olmadan ağırlığı azaltmak için yapılacak tüm çalışmalar bu anlamda çok değer kazanacaktır.

Malzeme seçimi aslında bir problem çözme işi olarak adlandırılabilir. Problem çözme işinde bir problem tamamen irdelenerek analiz edilmelidir. Çözümü için birçok çalışma yapılarak geliştirilmesi için çaba harcanmalıdır. Üzerinde çalışılan çözüm alternatifleri üzerinde çalışmalar tamamlanarak bir karara bağlanmalıdır. Problem çözme işi malzeme seçimine uyarlandığında ise kullanılacak parçanın özelliklerinin iyi şekilde derinlemesine analiz edilmesi gerekmektedir. İhtiyaç duyulan özelliklere göre malzemelerin seçiminin yapılması gerekmektedir. Seçilen malzemelere göre özellikler daha iyi şekilde irdelenerek, gerekli özelliklere uyan malzemenin seçimi ile süreç tamamlanmaktadır. Günlük hayatımıza bakıldığında ise; "bu tip malzemelerde her zaman bu malzeme kullanılır" mantığı ve yalnızca belli özelliklerine göre yapılacak seçimler, bizleri yanlış malzeme seçimi yapmaya yöneltmektedir. Yanlış malzeme seçiminin önüne geçmek için;

- Parçadan istenilen özelliklerin analiz edilmesi,
- İhtiyaç duyulan malzemelerin seçilmesi,
- Malzeme özellikleri ve beklentilerin irdelenmesi,
- İhtiyaca uygun malzemenin belirlenmesi,

yapılarak ilerlemeden vazgeçilmemelidir [7].

2.1 Malzeme Seçiminde Dikkate Alınacak Faktörler:

Malzeme seçiminde dikkate alınacak faktörler tablo 2.1' de gösterilmektedir. Tablodaki bütün bu faktörleri kullanmak için birçok uygulama gerekrmektedir. Malzemelerin davranışlarını; çalışma koşulları ve birbirleri ile etkileşimleri etkilemektedir. Malzemenin seçiminde; parçanın üretiminde karşılaşılan durumlar, çalışma şartlarındaki etkileşimler ve çevresel faktörlerin etkileri tamamen irdelenerek yapılması gerekmektedir. Malzeme seçiminde yapılacak en doğru test gerçek çalışma koşullarının uygulanmasıyla ortaya çıkan sonuçlardır [7].

Çizelge 2.1 Malzeme Seçimi Faktörleri

Mukavemet	Süneklik	Kararlılık
Elde Edilebilirlik	İmal Edilebilirlik	
Korozyon Direnci	Isı Transfer Özelliği	Maliyet

Malzeme seçiminde mukavemetin etkisi; seçilmesi düşünülen malzemenin çalışma şartlarında oluşacak yük ve gerilmelere dayanımı ile açıklanabilir. İhtiyaç duyulan mukavemet değerinden daha yüksek mukavemete sahip malzeme kullanıldığında ise diğer şartlar araştırılmamış ve yanlış seçim yapılmış olacaktır. Yorulma dayanımı gibi parametrelerde eklenerek yapılan irdeleme sonucunda ise daha doğru karar verilmiş olacaktır. İstenilen minumum mukavemet değerinde ve diğer parametrelerinde istenilen minumum değerlerde yakalanmasıyla, doğru bir karar verilmiş olacaktır.

Süneklik etkisi; malzemenin çalışma şartlarındaki istenilen yüksek değerin mukavemet değerinden yapılacak fedakârlık değeri ile açıklanabilir. Fazla istenilen bir özellik olmamasıyla beraber üretim proseslerinde beklenen bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır.

Malzemenin kararlı olması; malzemenin çalışma zaman aralığında karşılaşılan bir kıstastır. Çalışma süresine göre devamlılık olması etkili bir kavramdır. Kararlılık kavramında sıcaklık ve dalgalanmalar malzemeyi etkilemektedir.

Elde edilebilirlik kavramı; malzemenin bulunabilirliği, imalat yöntemi ve fiyatı kavramlarında etkili rol oynamaktadır. Malzemenin bulunabilirliği konusunda zorluk yaşanılacağı düşünülüyorsa tasarım aşamasında bu malzeme seçilmemelidir. Malzeme tek bir yöntem kullanılarak üretiliyorsa bu konuda ki zorluk kavramı devam etmektedir. Ayrıca temin konusunda yurtdışına muhtaç kalındığında ise savaş zamanında çok büyük zorluklar karşımıza çıkaracaktır. Üretim metodları, üretim yeri, bulunabilirliği bu kavram içerisindeki dikkat edilecek konular arasında yer almaktadır.

İmal edilebilirlik; bu konu temin konusuyla beraber düşünülmelidir. İstenilen adet miktarı ile üretim metodu kıyaslanarak maliyet konularında bu değerlendime

yapılmalıdır. Düşük adetlerde maliyet yükselecektir fakat üretim yöntemi değiştirilerek maliyet düşürülebilmektedir.

Korozyon direnci; tasarım aşamasında çalışma alanı düşünülerek bir seçim yapılmalıdır. Çevresel faktörler burada çok önemli rol oynamaktadır.

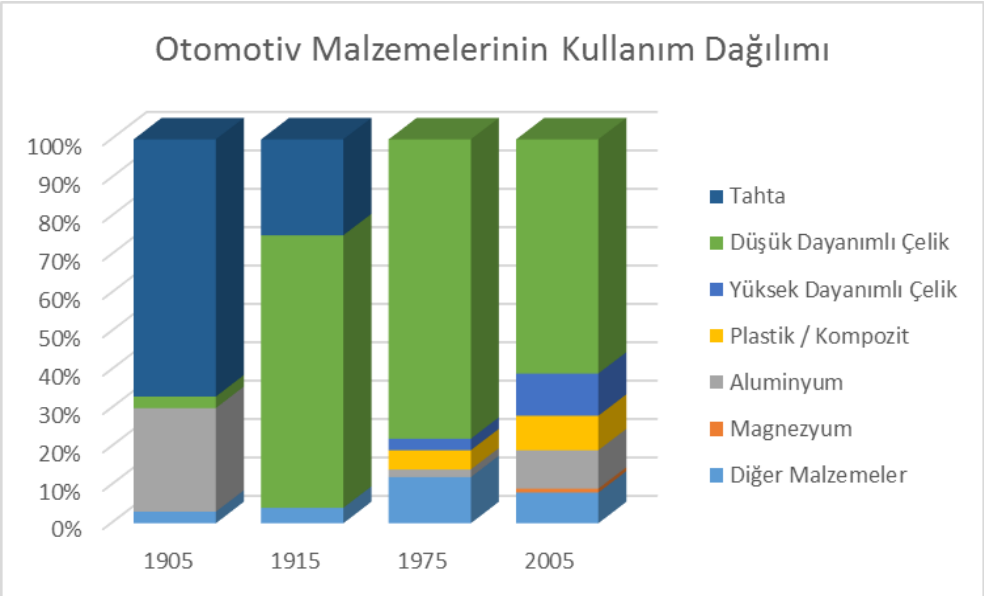
Tasarım konusundaki malzeme seçiminde ise yorulma testlerinde oluşacak hataların % 90' ı tasarım ve üretim hatalarından, % 10' u ise malzeme seçiminden ya da yapılan ısıl işlemden kaynaklanmaktadır.

Maliyet, tasarım aşamasının en son kısmında karşımıza çıkması daha doğru olacaktır. Seçilen malzeme eğer gereğinden fazla özellik taşıyorsa maliyeti yüksek olacaktır ve malzeme seçimi tekrar yapılmalıdır [7].

BÖLÜM 3

OTOMOTİVDE KULLANILAN MALZEMELER

Avrupa' daki yönetmeliklerden dolayı otomotiv üreticilerinden çevre koşullarına duyarlı, yakıt tüketimi sağlayan, güvenlik şartları üst seviyede ve ekonomik düzeyde olan malzeme kullanımı beklenmektedir. Güvenlik şartları arttırıldıkça araç ağırlığıda artmaktadır. Araç tasarımcıları günümüzde modern mühendislik malzemelerinin gelişimini yakından izleyerek malzeme seçiminde kullanacak şekilde kendilerini geliştirmelidir. Şekil 3.1' de görüldüğü üzere otomotivde kullanılan malzemelerin yıllara göre kullanım dağılımları belirtilmektedir. 1900' lü yıllarda ilk olarak üretilen araçlarda ağaç kullanımı görülürken, günümüze soğru dayanım beklentilerinden ve ucuz maliyetinden dolayı çelik kullanımlarının arttığı gözlenmektedir.

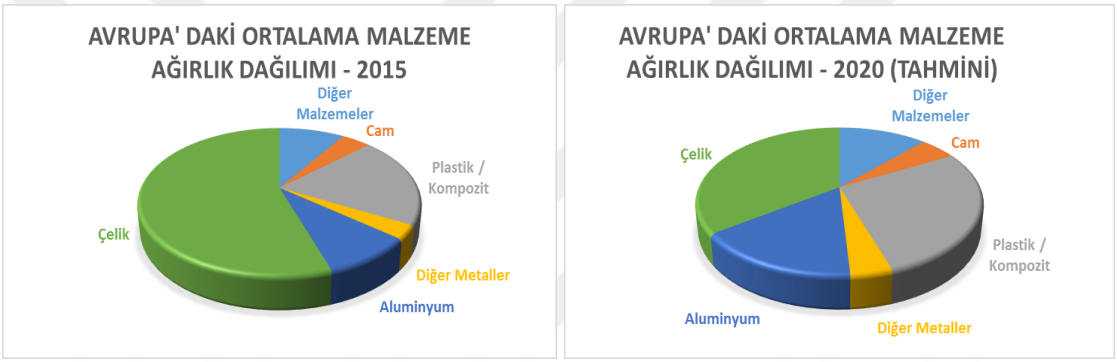


Şekil 3.1 Otomotivde kullanılan malzemelerin yıllara göre dağılımı

Otomotiv sektöründe kullanılan malzemeler aşağıdaki ana başlıklardan oluşmaktadır;

- Metaller ve alaşımları,
- Seramikler ve camlar,
- Polimerler,
- Modern kompozitler.

Aracın tasarımı aşamasında bu malzemelerin tümünden yararlanılmaktadır. Fakat bu malzemelerin kullanımı ise; tüketici talebinin karşılanması, maliyetlerinin kabul edilebilir seviyede olması ve çevre sorunlarının göz önünde bulundurulması ile olmaktadır.



Şekil 3.2 Avrupa' daki araçlardaki ortalama malzeme ağırlık dağılımı (2015 – 2020)

Otomotivde statik ve dinamik yüklemeler karşısında; mukavemeti, rijitliği ve sünekliği uygun olan malzemeler kullanılmaktadır.

Metaller; üretim metodlarının çeşitliliği, kullanım koşullarının genişliği ve geri dönüşebilirlik özelliklerinden dolayı malzeme seçiminde başrol oynamaktadır. Hafiflik ve düşük maliyet istenildiğinde ise polimerler, cam ve seramiklerin kullanılabilirliği öne çıkmakta fakat dayanım ve kırılganlık özelliklerinden dolayı kullanımları kısıtlı kalmaktadır. Bu malzemelerin yanı sıra maliyetlerden dolayı günümüzde kısıtlı bir kullanım alanına sahip modern kompozitlerin kullanım miktarlarının ise önümüzdeki dönemde üst sıralara çıkması beklenmektedir.

Polimer grubunda olan kauçukların kullanım alanlarının çok büyük bir oranı otomotiv alanında yer almaktadır. Termoset ve termoplastik gibi polimerler ile otomotiv üzerindeki polimer kullanım alanı çok yüksek seviyelere çıkmaktadır.

Yüksek ısı ve korozyon dayanımlarının gerektiği motor gibi parçalarda seramik malzeme ve kaplama ihtiyaçları oluşmaktadır. Kullanım yerlerinde ise kırılganlığa dikkat edilmelidir.

Camlar aracın görünürlüğü için gerekmekte, aynı zamanda da ayna ve ekranlarda kullanılabilmektedir.

Kompozit malzemeler ise yüksek mukavemet beklentileri dâhilinde kullanılabilmektedir. Yüksek maliyetlerinden dolayı otomotiv sektörü için daha çok yeni olsa da önümüzdeki dönemde vazgeçilmez malzemelerin içerisinde yer alacağı düşünülmektedir [8].

BÖLÜM 4

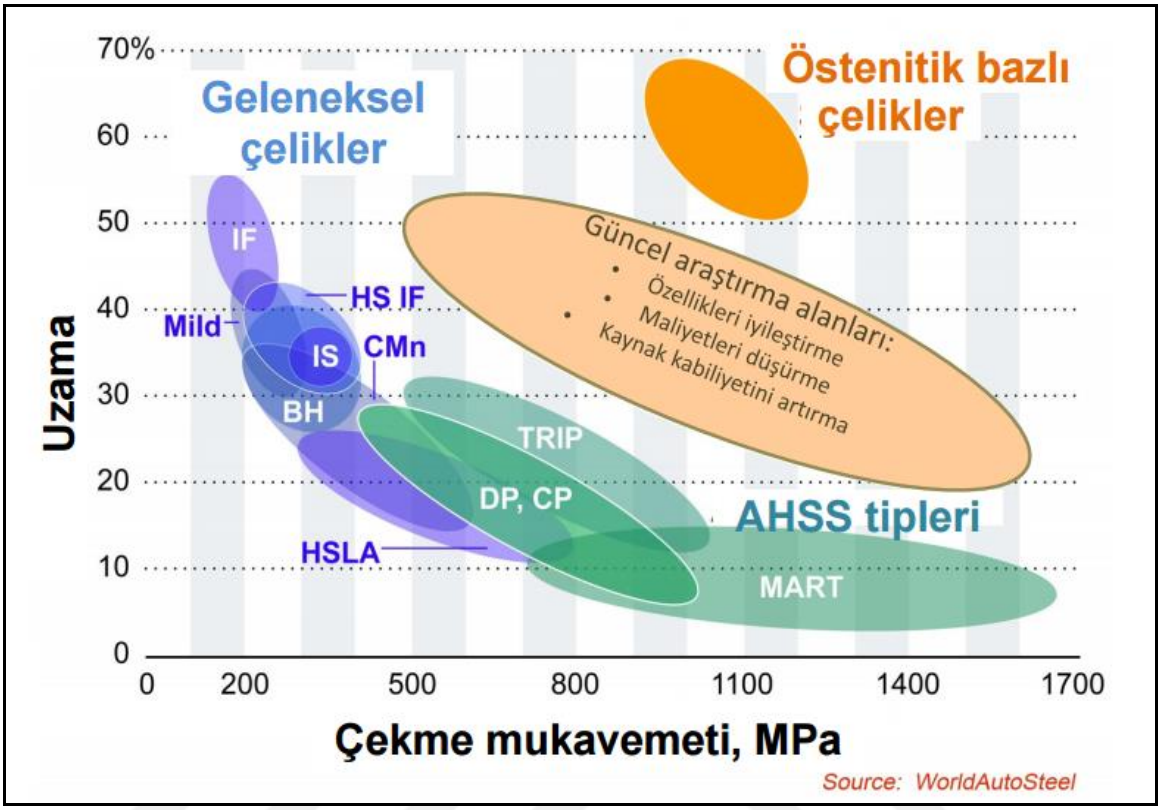
OTOMOTİVDE KULLANILAN ÇELİK MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Otomotiv sektöründe araç güvenliği, yakıt ekonomisi ve performans standartlarındaki artışlar için yeni geliştirilmiş çelik malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Büyük ölçekteki çelik üretim firmaları, otomotiv endüstrisine hizmet edebilmek adına ve maliyeti düşürmek kaydıyla yeni nesil çeliklerin geliştirilmeleriyle yakından ilgilenmektedirler [9,10].

Otomotiv uygulamaları için malzeme seçiminde güvenlik, yakıt verimliliği, çevrecilik, üretilebilirlik, dayanıklılık ve kalite gibi birçok faktör mevcuttur. Yüksek bir rekabet gücünün olduğu otomotiv sektöründe, malzeme seçiminde maliyet son derece önemlidir. Malzeme seçiminde dayanım ve maliyet gibi istekler olduğunda kullanılacak malzeme çelik malzeme olarak istekler karşılanmaya çalışılmaktadır. Bundan dolayı otomotivde kullanılan malzemelerin büyük bir çoğunluğunu çelik malzemeler oluşturmaktadır. Otomotivde yumuşak çelik kullanımı ile başlayan süreç yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımıyla devam etmektedir. Güvenlik ile ilgili kriterlerin artmasıyla da AHSS (Advanced High Strength Steel) diye adlandırılan geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerin araçta kullanım miktarları yükselmektedir [9,11].

Öncelikle geleneksel yumuşak çelikler, basit ferritik mikroyapısına sahiptir. Yumuşak çelikler, IF (Interstitial Free) çelikleri, BH (Bake Hardening) çelikleri ve HSLA (High Strength Low Alloy) çeliklerinin akma değerleri genellikle 550 MPa değerinin altında yer almaktadır. Otomotivde artan istekler doğrultusunda akma değerleri de yukarı doğru çıkmaya başlamıştır. Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik diye adlandırılan grubun

dayanım ve süneklik değerleri iyileştirilmiş, şekillenebilirliği ise üst seviyelere çıkartılmıştır [3, 12].



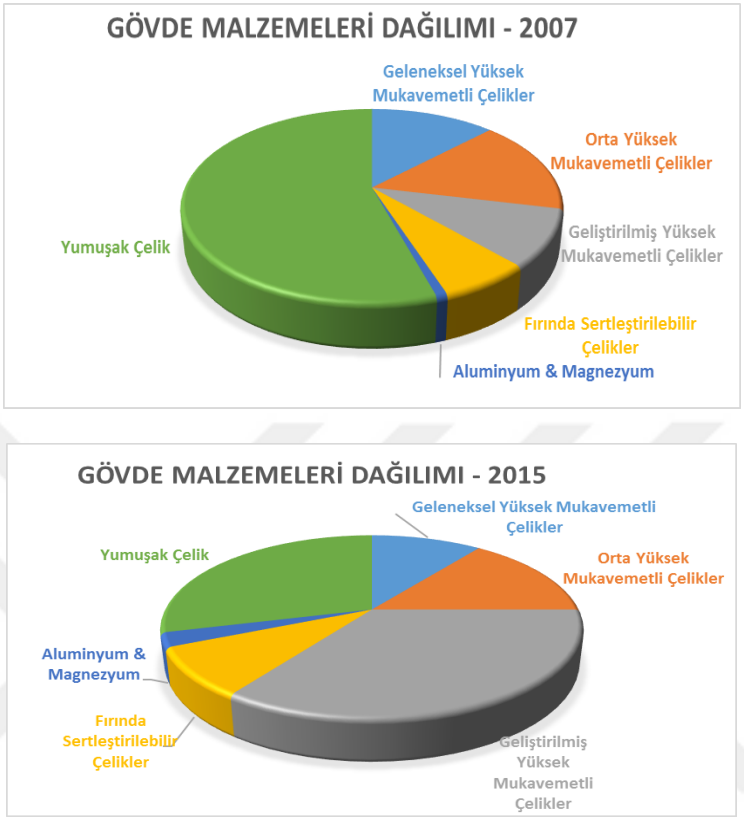
Şekil 4.1 Çelik malzeme için uzama çekme grafiği değerleri [9]

Ferrit bazlı ana yapıya sahip olan birinci nesil geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik grubu birçok karmaşık mikroyapılara kontrollü soğutmalar sayesinde ulaşmaktadır. Bu çeliklerin formlama ve dayanım değerleri yüksektir [13]. Bu çelikler;

- Çift Fazlı Çelikler;
- Ferritik – Beynitik Çelikler;
- Kompleks Fazlı Çelikler;
- Trip Çelikleri;
- Martenzitik Çelikler;
- Sıcak Şekillendirme Çelikleri

gruplarından oluşmaktadır [9].

İkinci nesil çelik grubunda ise TWIP (TWinning Induced Plasticity) çelikleri yer almaktadır [9]. TWIP çelikleri oda koşullarında tamamen östenik bir yapı özelliği göstermektedir.



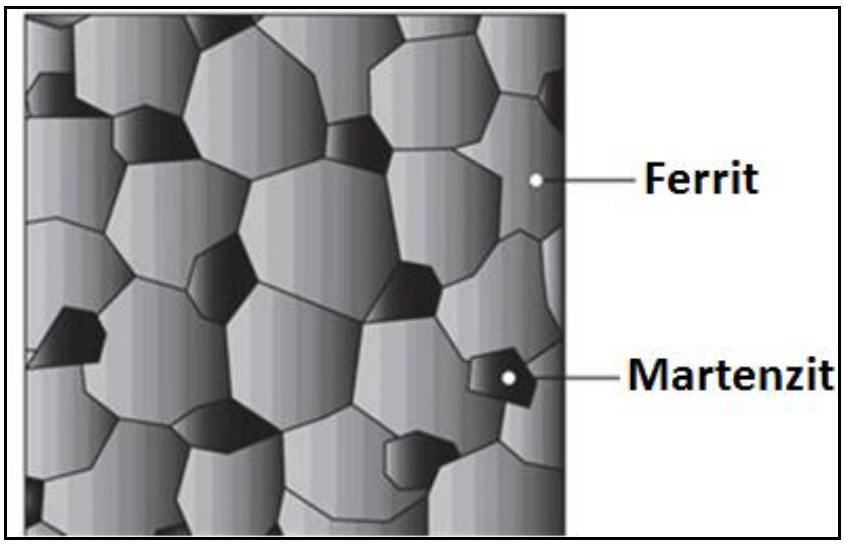
Şekil 4.2 Otomotiv gövde malzemelerinin dağılımı [14]

4.1 Çift Fazlı Çelikler

Çift fazlı çelik kavramı, 1937 yılında Grabe'nin, yeni bir yatak malzemesinin üretimi için % 0,25 karbonlu bir çeliği kritik sıcaklıklar arasındaki bölgeden soğutması sonucunda çift fazlı yapıyı elde etmesi ve patent almasıyla tanınmıştır. Grabe' nin ardından Herres ve Lorig, çift fazlı çelik üretimini kısmi östenitleştirme işlemi olarak nitelemiş bu işlemin yüksek alaşımlı östenit adalarının oluşumuna ve ardından martenzit oluşumuna yol açtığını 1947 yılında söylemişlerdir [15]. 1970' li yıllarda otomotiv endüstrisindeki; ağırlık azaltma, çarpışma dayanımını iyileştirme ve maliyet düşürme gibi beklentilerden dolayı yüksek dayanımlı çelik ihtiyacını karşılamak için tekrar gün yüzüne çıkmıştır. Çeşitli yollarla geniş bir kimyasal kompozisyonla üretiminden dolayı yüksek bir ticari değeri olan çelik malzeme grubudur [16].

Çeliğe uygulanan çeşitli ısıl işlemlerle çift fazlı mikroyapı elde edilir. Çift fazlı çelikler sünek bir ferrit (α) yapı içinde odacıklar biçiminde dağılmış % 10-20 dolayında martenzit (m) fazı içeren çeliklerdir. Çift fazlı çelikler üstün özelliklerini; martenzitin yüksek mukavemete, ferritin iyi bir sünekliğe sahip olmasından almaktadır [17]. Çift fazlı çelikler bünyesinde küçük miktarlarda beynit, perlit ve kalıntı östenit yapılarını da barındırmaktadır [16]. Aynı mukavemet değerlerine sahip olan yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklere göre daha yüksek süneklik göstermektedirler. Enerji absorblama değeri yüksek olan bu çelikler tane sınırlarındaki martenzitlerden dolayı yüksek mukavemete sahip olmaktadırlar. Fırında sertleştirme özellikleri iyidir. Sıcak haddelenmiş ürünün soğutması dikkatli ve kontrollü bir şekilde yapıldığında östenit yapıdan martenzit dönüşümü sağlanarak ferrit yapısı ile birlikte sağlanmış olur. Yumuşak ferrit yapısı ve sert martenzit adacıklarından oluşan bu yapı etkin bir uzama değeri ile yüksek deformasyon sertleşmesi ve yorulma dayanımına sahiptir [9].

Çift fazlı çelikler geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler sınıfında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Otomotivde görünür gövde parçaları, kapı, tavan ve ön ve arka kirişlerde kullanılmaktadır. Travers, motor beşiği, b direği, amortisör kulesi, çarpışma braketi ve tekerlek jantlarında kullanım potansiyelleri vardır. Çift fazlı çelikler için form verme, parça geometrisi, kalıp geometrisi, analiz çalışmaları, geri yaylanma çalışmaları gibi birçok çalışma tamamlanarak öğrenilen bilgiler literatüre kazandırılmıştır [9,18].

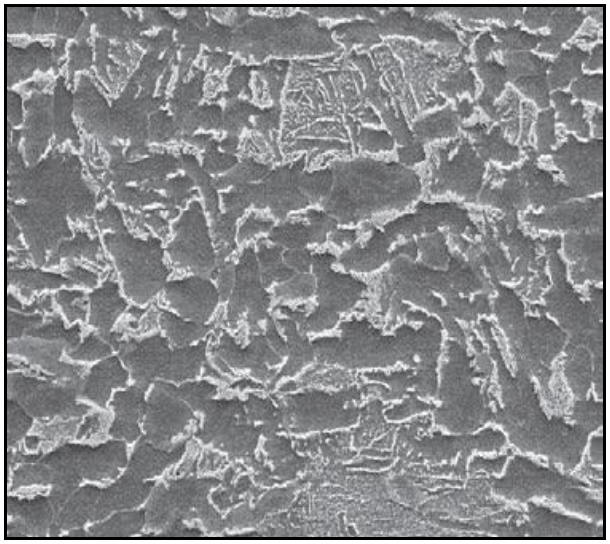


Şekil 4.3 Çift fazlı çelik mikroyapısı [9]

Genel olarak bu çelikler % 0,1 in altındaki C içeriği ile nokta kaynak uygulamalarına olanak sağlar. Burada % 1-1,5 oranında ki Mn ise hızlı soğutma sırasında martenzite dönüşümüne yardımcı olur. Cr ve Mo ise maksimum % 0,6 oranındadır. Krom ve molibden interkritik tavlama sıcaklığını ve martenzit dönüşüm sıcaklığını çok etkiler. Krom ve molibden bu çeliklerin çok düşük soğutma hızlarında dahi martenzitik dönüşüme yardım eder. Si ise burada katı eriyik sertleştiricisi olarak bulunur. Bunların dışında çok küçük oranlarda atılan V, Nb ve Ti ise çökelti sertleşmesini sağlar ve/veya tane boyutunu kontrol eder. N ise V' un oluşturduğu çökelti sertleşmesi etkisini yoğunlaştırmak için eklenebilir [9,18].

4.2 Ferritik – Beynitik Çelikler

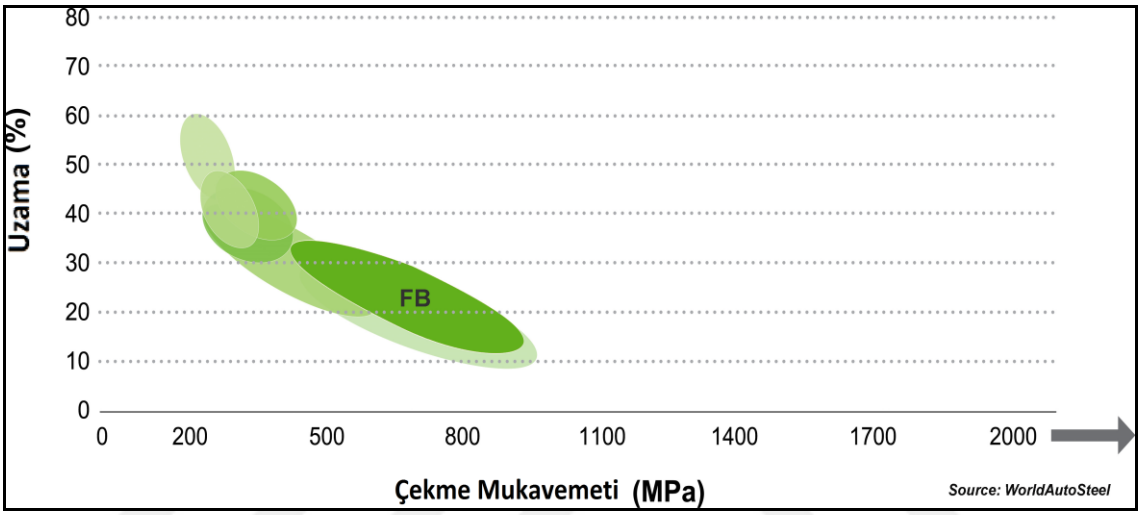
Ferritik – Beynitik Çelikler yumuşak ferrit ve sert beynitlerden oluşmaktadırlar. Mikroyapısı çift fazlı çeliklere göre daha iyidir. Delik genişletme testi çift fazlı çeliklere göre daha iyidir. Ferritik – Beynitik çelikler dinamik yük altında iyi bir performans göstermektedirler. Titreşim yüklerini iyi karşılamaktadırlar. Özel birleştirilen sac metaller (Tailored Welded Blank) için gerilme ve kenar kesme özellikleri mükemmel bir tercih olarak gün yüzüne çıkmaktadır [9]. Düşük gerinimlerde yüksek deformasyon sertleşmesi özelliği göstermektedirler. Yüksek dayanım özelliğine göre iyi bir soğuk şekillendirilebilirliğe sahiptir. Sıcak şekillendirme operasyonları için uygun değildir. Diğer çeliklerle kaynak edilebilirlik özellikleri iyidir [19].



Şekil 4.4 Ferritik – Beynitik fazlı çelik mikroyapısı [9]

Genellikle süspansiyon ve şasi parçalarında kullanımları önerilmektedir. Mekanik parçalar, profiller, travers ve jant uygulamaları önerilmektedir. Çünkü dinamik yük altında iyi bir yorulma dayanımı özelliği göstermektedirler. Ayrıca salıncak kolu parçasında aktif olarak kullanılmaktadır [9].

Oksijen giderimi yapılarak iyi bir tane yapısı elde etmek için en az % 0,015 oranında alüminyum içermesi gerekmektedir. %0,18 civarında Karbon ve %1' in üzerinde mangan içermelidirler [19].



Şekil 4.5 Uzama – Çekme değerleri tablosunda FB çelikleri [19]

4.3 Kompleks Fazlı Çelikler

Kompleks fazlı çelikler ferrit/beynit içeriğinde martenzit, kalıntı östenit ve perlit fazlarından oluşmaktadırlar. Geciktirilmiş rekristalizasyon ile küçük tane yapılarıyla çok iyi bir mikroyapıya sahiptirler. Benzer çekme dayanımına sahip çift fazlı çelikler ile kompleks mikroyapıya sahip olan kompleks fazlı çelikler yüksek akma dayanımı ve uzama değerine sahiptirler. İyi bir kenar gerilebilirlik, aşınma direnci, yorulma dayanımı ve fırında sertleşebilme özelliklerine sahiptirler [9].



Şekil 4.6 Kompleks fazlı çelik mikroyapısı [9]

Çift fazlı çeliklere göre karbon ve mangan miktarı daha yüksektir. %2' nin üzerinde mangan, %1 civarında krom + molibden, %1 civarında alüminyum içermektedirler. Kükürt değeri %0,015 civarında olduğundan çok iyi soğuk şekillendirilebilme özelliğine sahiptirler. Mikroalaşımlama elementlerinden titanyum ve niyobyum çökelme sertleşmesini sağlamaktadır. Toplam değeri %0,2'nin altında olmalıdır. Bu çökeltiler ile mukavemet attırılmaktadır. Yüksek deformasyon sertleşmesi hızı ile hafif şekillendirme operasyonlarında kullanılmaya uygundurlar [13].

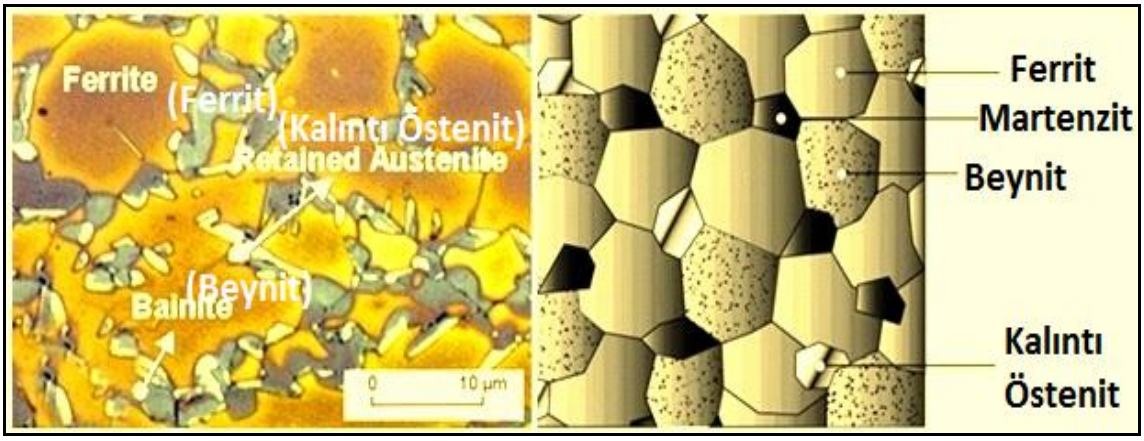
Kompleks fazlı çelikler otomotiv sektöründe gövde yapıları, süspansiyon ve şasi parçalarında kullanılmaktadırlar. Yüksek akma ve uzama değerine sahip olan yapı yüksek enerji emme özelliği göstermektedir. Çarpışma dayanımı için tampon kirişi, yan kapı barı ve b direği gibi parçaların iyi bir seçim olacağı belirtilmektedir. BMW arka çarpışma dayanımını arttırmak için bazı parçalarında kompleks fazlı çeliği kullanmaktadır [9].

4.4 TRIP Çelikleri

Trip çelikleri kompleks fazlı çeliğin mikroyapısına benzer olarak yumuşak ferrit fazı ile sert martenzit fazı, kalıntı östenit ve beynit fazlarından oluşmaktadır. Kalıntı östenit fazı deformasyon sırasında martenzit fazına dönüşebilmektedir. Yüksek darbe enerjisi

emme ve uzun yorulma ömrü ile otomotivde birçok parçada kullanım alanına sahiptir. Yüksek mukavemet ve uzama değerlerine ulaşılması için karbon değerinin arttırılması gerekmektedir. Fakat karbon değerinin %0,25 üzerine çıkıldığında kaynaklanabilirlik düşeceğinden bu etki titanyum, niyobyum ve vanadyum eklentisiyle oluşturulmaktadır [13]. TRIP çeliklerinde iki ana ısıl işlem uygulanır; 780-880°C aralığında interkritik tavlama, soğutma ve 350-450 °C aralığında bir diğer izotermal tavlama ve en son oda sıcaklığına soğutma yapılmaktadır. İnterkritik tavlama sonrası TRIP çeliklerinin mikroyapısı neredeyse aynı oranda ferrit ve östenit içermekte olup, sıcak haddelenmiş TRIP çeliklerinin mikroyapısına göre ferrit tavlama öncesi mikroyapıda bulunmaktadır, soğutma sırasında oluşmamaktadır. Oda sıcaklığına soğutmadan önce, beynit oluşum sıcaklıklarında soğutma bir süre için durdurulmaktadır. İkinci izotermal tutma sırasında östenit çoğunlukla beynite dönüşmekte ve son mikroyapı % 50-60 ferrit, % 25-40 beynit, % 5-15 kalıntı östenitten oluşmaktadır [20].

Kompleks fazlı çelikler ile benzer özellikler göstermesine rağmen trip çeliklerinin bükülebilirliği daha iyi ve boyun verme başlangıç dayanımı daha yüksektir. Mükemmel fırında sertleştirme özelliği göstermektedir. Kaynak edilebilirliği alaşımlama ile iyileştirilmiştir [9].



Şekil 4.7 Trip çeliği mikroyapısı [9]

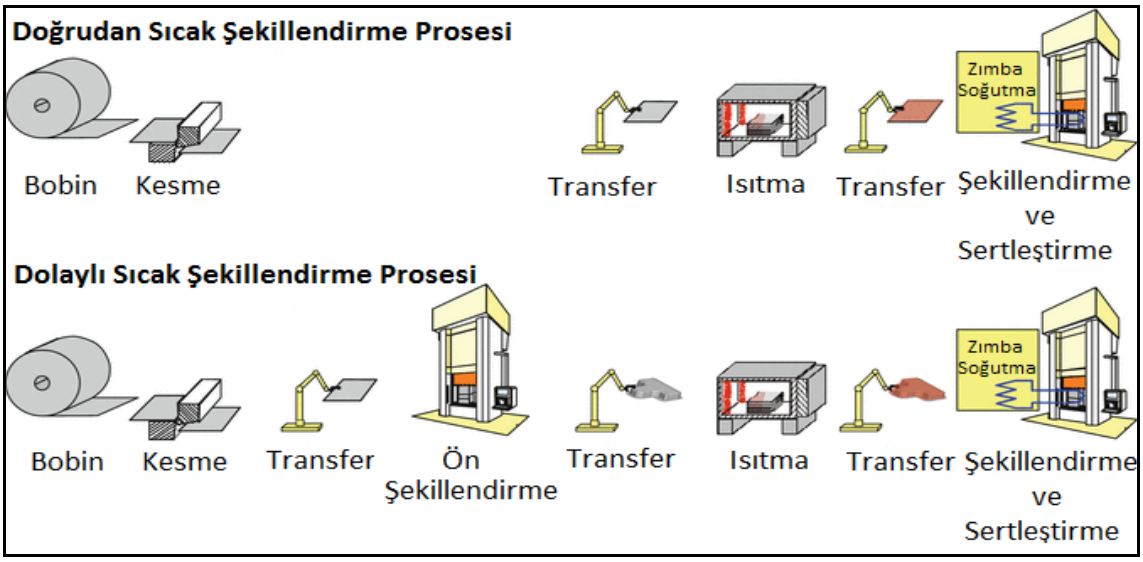
Karbon elementi interkritik tavlamada faz dağılımını ve östenitin hacim oranını ve stabilitesini belirler. Martenziti sertleştirmektedir. Mangan ferritin mukavemetini düşürür. Östenitin sertleşebilirliğini arttırır. Ferritteki karbon çözünürlüğünü düşürür. Silisyum ferriti kararlı kılar ve demir karbür içerisinde çözünmez. Niyobyum tane

büyümesini, sıcak deformasyon sırasında yeniden kristalleşme sürecini ve soğuk haddelenmiş trip çeliklerinde östenitten ferrite dönüşümü geciktirir. Vanadyum ise dönüşüm davranışını kontrol etmede kullanılır. Titanyum TiN çökeltisini oluşturarak östenit tane kabalaşmasını engeller. TiC çökeltileri sıcak haddeleme süresince yeniden kristalleşmeyi geciktirmektedir [13].

Otomotiv sektörü için çok yeni geliştirilen bir çelik türü olmasına rağmen birçok üretici bu çelikleri otomotiv uygulamalarında kullanımını önermektedirler. Geniş bir alanda düşük maliyet potansiyeli ile yer almaktadır. Yüksek enerji emme özelliği istenilen parçalarda önerilmektedirler. 2007 Honda modelinde takviye elemanı olarak kullanmışlardır [20].

4.5 Sıcak Şekillendirme Çelikleri

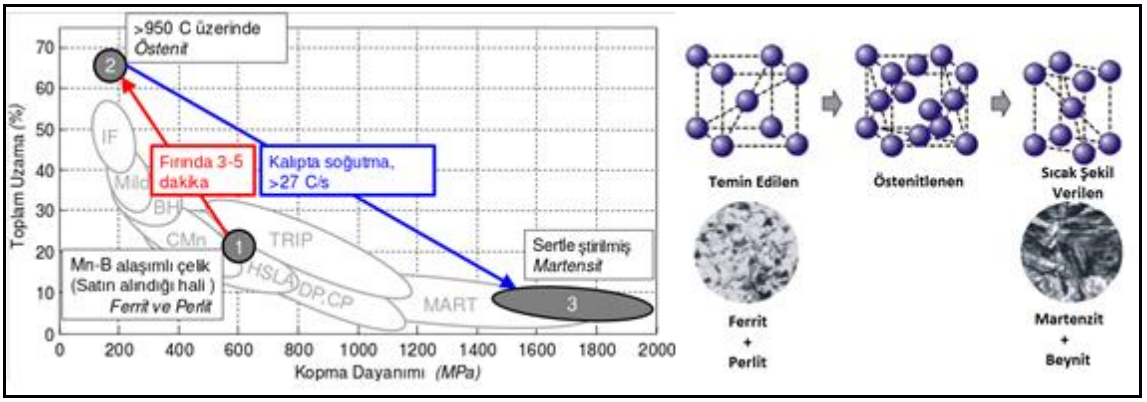
1977 yılında bir İsveç firması olan Plannja tarafından sıcak şekillendirme prosesi patentlenmiştir. Araçlarda ise ilk olarak 1984 yılında SAAB tarafından Saab 9000 aracında kullanılmıştır. 1987 yılında 3 milyon parça üretilirken, 1997 yılında bu sayı 8 milyona çıkmış, 2007 yılına gelindiğinde ise 107 milyona çıktığı görülmektedir [18]. Sıcak şekillendirme çelikleri %0,002 – 0,005 arasında bor içermektedir. Bundan dolayı da borlu çelikler olarak anılmaktadır. Şekillendirilmesi tamamlanmış ürün tamamen martenzitik bir faza sahip olmaktadır. Doğrudan (direct) ya da dolaylı (indirect) sıcak şekillendirme esnasında, sıcaklık östenitik sahaya kadar çıkarılarak oda sıcaklığına hızlı soğutma ile son işlemler yapılarak proses tamamlanmaktadır. Bu sayede mekanik dayanım arttırılmakta uzama değeri düşmektedir. Doğrudan ve dolaylı sıcak şekillendirme prosesi şekil 4.8’ de gösterilmektedir [9].



Şekil 4.8 Doğrudan ve dolaylı sıcak şekillendirme prosesi [21]

Doğrudan sıcak şekillendirme prosesinde sac malzeme fırında östenitleme sahasına kadar ısıtılarak kalıpta şekil verme operasyonuna gönderilmektedir. Burada aynı anda kesme ve şekil verme operasyonlarının yanı sıra hızlı soğutma işlemi ile martenzitik yapının oluşması sağlanmaktadır.

Dolaylı sıcak şekillendirme prosesinde borlu çelik oda sıcaklığında ön şekil verildikten sonra östenitleme için yeterli olan sıcaklığa ısıtılmaktadır. Daha sonra form verme kalıbına alınarak martenzit mikroyapısının oluşturulması için form verilerek hızlı bir şekilde soğutulması sağlanmaktadır. Oda sıcaklığında düşük mukavemet ve yüksek uzamaya sahip olan borlu çelikten üretilen parça ile birlikte yüksek mukavemette düşük uzamaya sahip olan parça üretilmektedir [9].



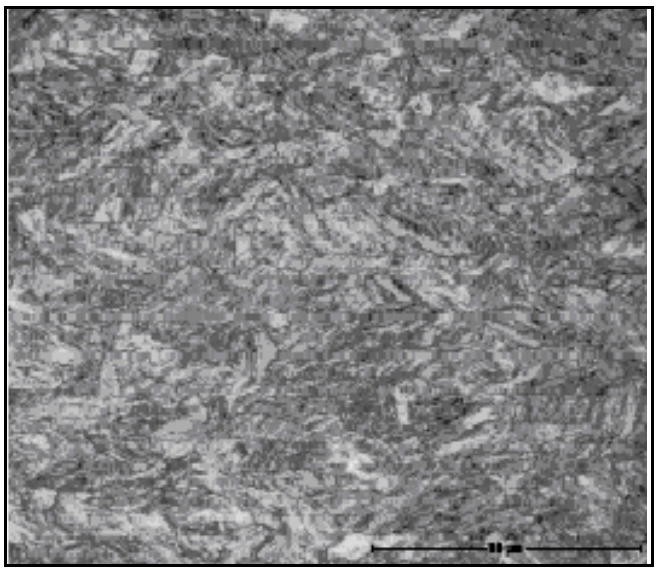
Şekil 4.9 Sıcak şekillendirme prosesi ve mikroyapı değişimi [21]

Kaynaklanabilirliği iyidir. Çok ince taneli olan bu yapıda alüminyum oranı %0,015' i geçmemekte ve karbon eşdeğeri en çok 0,54 olacak şekilde bir alaşımlama yapılmaktadır. Mangan miktarı %1,4 civarlarında bulunmaktadır.

Avrupa' da otomotiv üreticileri bu malzeme ile şekillendirme konuları hakkında çalışmaktadırlar. Korozyon dayanımı için farklı kaplamalar hakkında araştırmalar yapmaktadırlar. Hatta farklı yöntemlerle şekil verme, ısıtma ve kalıp teknolojilerinin kullanımları hakkında yeni teknolojileri kullanma konusunda araştırmalarını sürdürmektedirler. Otomotivde A ve B direği, tavan takviye, yan kapı barı, tünel parçası ve çarpışma beklentisi olan tüm parçalarda kullanılmaktadır. Özellikle karmaşık şekilli parçaların şekillendirilmesi konusunda bir çözüm olarak kullanımı tavsiye edilmektedir. Volvo ilk olarak C70 aracı ile başlayarak tüm araçlarında bu teknolojiyi kullanıma geçirmiştir [9].

4.6 Martenzitik Çelikler

Martenzitik çelik malzemeler östenit fazın tamamen martenzit fazını oluşturmasıyla oluşmaktadır. Kimyasal bileşim oranına göre yapısında beynit ve kalıntı östenit içerebilmektedir. Bu çelikler termomekanik koşullar altında sıcak haddeleme yapılarak yüksek dayanımlı malzemeler üretilmektedir. Morfolojik yapıya göre soğuk haddeleme ile birlikte çok iyi bir kaynaklanabilirlik özelliğine sahip olabilmektedir [13].



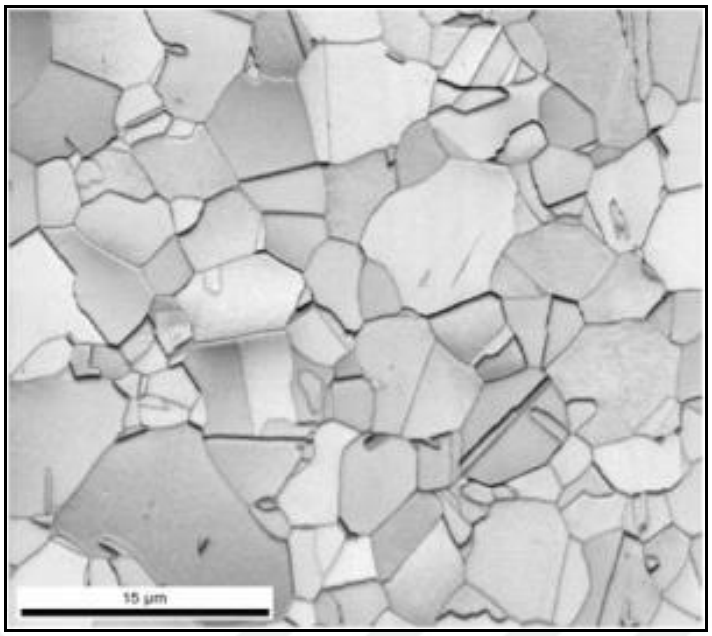
Şekil 4.10 Martenzitik çelik mikroyapısı [9]

Bünyedeki karbon miktarının artması dayanım ve sertliği arttırmaktadır. Dikkatli bir şekilde hazırlanacak silisyum, krom, mangan, bor, nikel, molibden ve vanadyum oranı ile sertleşebilirlik arttırılabilmektedir. Günümüzde çekme dayanımı 2 GPa' ın üzerine çıkılarak arge çalışmaları sürdürülmektedir. Bu dayanım değeri arttıkça şekillendirilebilme özelliği azalmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı roll form ile şekil verme işlemleri yapılarak parçalar üretilebilmektedir [9].

Otomotivde aşınmaya dirençli parça üretiminde tercih edilmektedir. Kapı barı, tampon kirişi, tavan takviye parçalarında özellikle hafifletmenin sağlanacağı karmaşık olmayan şekle sahip parçalarda kullanılabilmektedir [13]. 2007 yılında Honda'nın Acura modelinde ön tampon kirişinde kullanılarak çarpışma dayanımı iyileştirilmiştir. Ağırlık azaltması daha ince malzeme kullanımı ile gerçekleşmekte ve bu durum maliyet düşürme çalışmalarında kullanılmaktadır [9]. Mukavemet değeri yükseldikçe malzeme üzerindeki kaplamalarda bazı sıkıntılar ortaya çıkmaktadır. Galvanizleme yerine elektrogalvanizleme işlemi yapılmaktadır. Fakat daha da yüksek dayanımlı malzemelerde ise bu kaplamalar günümüzde arge çalışmasından ileriye gidememektedir [22].

4.7 TWIP Çelikleri

TWIP çelikleri ikinci nesil çelik grubuna girmektedir. Birinci nesil çelik grubuna göre yüksek mukavemet değerlerinde çok daha yüksek uzama miktarı sergilemektedirler. Deformasyon etkisiyle ikizlenme sınırlarının oluştuğu bu yapıdan dolayı TWIP çeliği adı verilmektedir [9].



Şekil 4.11 TWIP çeliği mikroyapısı [9]

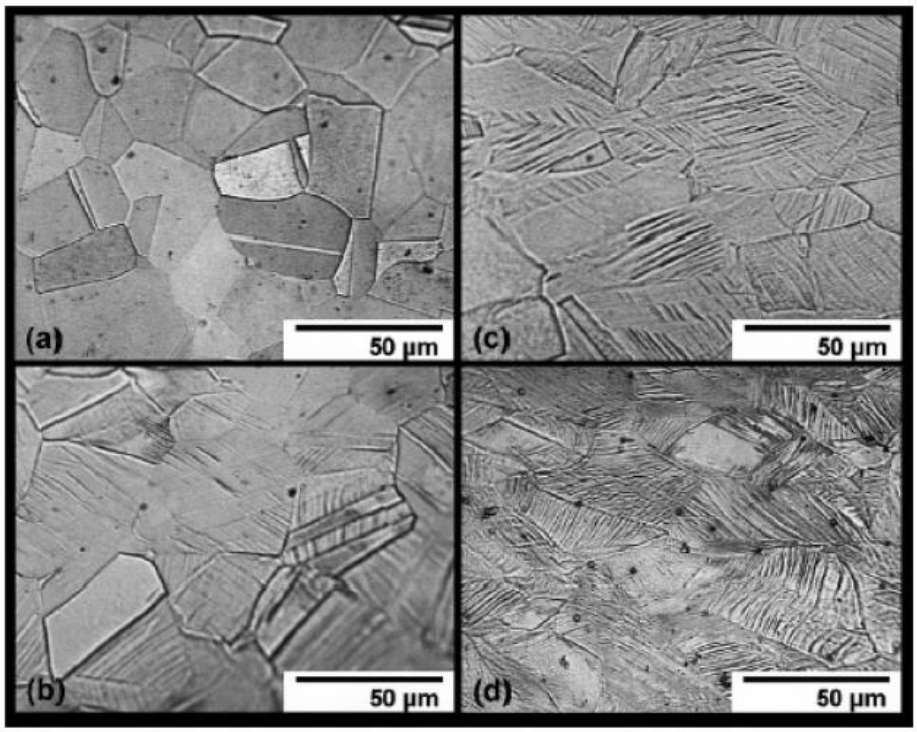
1800'lü yılların sonunda Sir Robert Hadfield tarafından yüksek manganlı çelikler üzerinde yaptığı çalışmalar, son dönemlerde daha da geliştirilerek, oluşan fırsatların değerlendirilebilmesi doğrultusunda TWIP çeliklerinin üretim çalışmalarının başlatılmasına yol açmıştır. Dizayn, performans, korozyon, düşük maliyet ve yakıt tasarrufu gibi müşteri beklentilerinin yanı sıra emisyon, çevresel düzenlemeler ve kaza güvenliği gibi diğer gerekliliklerin ortaya çıkması sonucu daha da yüksek muakvemetli malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. İkinci nesil olarak geliştirilen bu çelikler, yüksek mukavemet ve mükemmel şekil alabilirliğinden dolayı tercih edilmektedirler. Sahip oldukları yüksek çekme mukavemeti – süneklik kombinasyonuyla çevre dostu ve güvenilir olduğu ortaya çıkmaktadır. % 15-30 arası yüksek mangan içeriğinin yanı sıra alüminyum, silisyum ve karbon gibi alaşım elementleri katılarak mekanik özelliklerin kontrolü sağlanmaktadır. Yüksek ikiz miktarıyla birlikte tek fazlı bir östenitik yapıya sahiptirler. Bu ikiz sınırları, dislokasyon hareketini önleyerek yüksek mukavemete sahip olmasını sağlamaktadır [4].

TWIP çeliklerinin önümüzdeki yıllarda araç gövdesindeki malzeme kullanımının %15' i seviyelerine çıkacağı düşünülmektedir. TWIP çeliğinin yüksek uzama özelliğinin yanında en büyük özelliklerinden biri de özgül ağırlığının çelik malzemenin özgül ağırlığına göre daha düşük olarak yaklaşık 7,3 gr/cm3 olduğu bilinmektedir. Bu yoğunluğun

azalmasının nedeni çelik içerisindeki alüminyum oranı ile açıklanmaktadır. Bu malzemenin kullanımı ile araç hafifletmelerde avantaj sağlayacağı apaçık görülmektedir [23].

TWIP çeliğinin en önemli özeliklerinden biri de yapısında bulundurduğu ikizlenme mekanizmasıdır. Deformasyon ikizlenmesi yüksek ve artan deformasyon sertleşmesi özelliği nedeniyle çok tercih edilen bir sistemdir. Bu sistemde malzemenin deformasyonu sırasında mekanik ikizlenmeler oluşturarak malzemenin mükemmel mekanik özelliklere sahip olması sağlanmaktadır. Ayrıca ikiz oluşumu, akma mukavemetinde artışa sebep olarak çeliğe yüksek mukavemet kazandırmaktadır.

Deformasyon miktarı arttıkça tanelerde meydana gelen mekanik ikizlenme çok açık bir şekilde şekil 4.12' te görülmektedir. Deformasyonla birlikte mukavemette artmaktadır. Çok ince ikiz lamelleri tane içinde ekstra engeller oluşturarak dislokasyon hareketlerini engellerler (burada tane incelmesi olayı Hall – Patch bağıntısı (Tane boyutu ile akma mukavemeti arasındaki bağıntı) ile açıklanabilir) [4, 13].



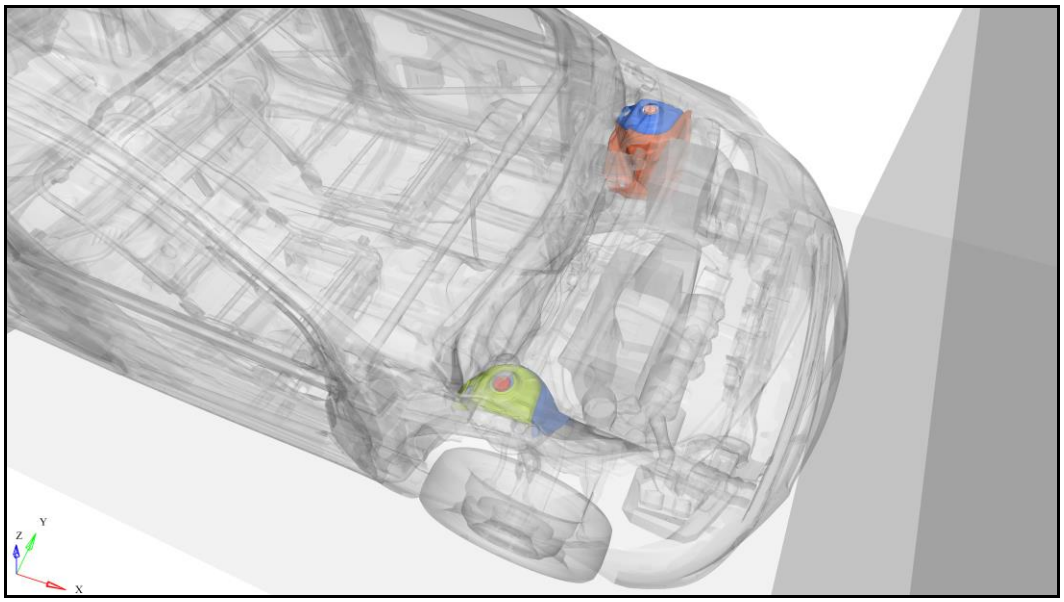
Şekil 4.12 TWIP çeliğinin mikroyapısı (a) deforme olmamış, (b) %18, (c) %26, (d) %34 deformasyon [4]

TWIP çeliğinin üretim sonrasında karşılaşılan en büyük hata parametrelerinden biri de gecikmeli kırılma (delayed cracking) mekanizmasıdır. Malzeme kullanımı ile parça üretiminden sonra bekleme aşamasında olumsuz bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu olumsuz özellik, malzeme üreticisi tarafından yapılan çalışmalar sonucunda alüminyumun %5 civarlarında eklenmesiyle, gecikmeli kırılmanın önüne geçtiği gözlemlenmektedir.



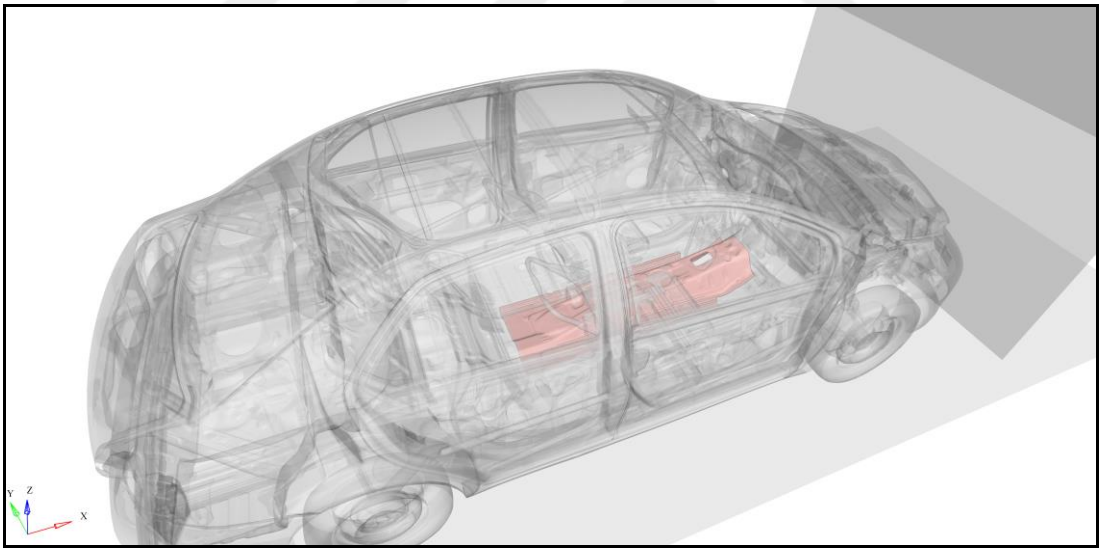
Şekil 4.13 Gecikmeli kırılma (Delayed Cracking) için test denemeleri [4]

Soğuk şekillendirme yapılarak karmaşık şekle sahip olan otomotiv parçalarında kullanımı önerilmektedir. Mükemmel bir şekillenebilirliğe sahiptir. Üç dört parçadan oluşan amortisör kulesi parçasının TWIP çeliği ile tek parçadan üretilebileceği önerilmektedir [4]. Amortisör kulesinin araç üzerindeki bağlantı bölgesi şekil 4.14’ de gösterilmektedir.



Şekil 4.14 Amortisör kulesi bağlantı bölgesi

Amortisör kulesinin yanı sıra yüksek mukavemet beklentisi olan ve derin çekme işlemi yapılan tünel parçası da şekil 4.15’ de gösterilmektedir.



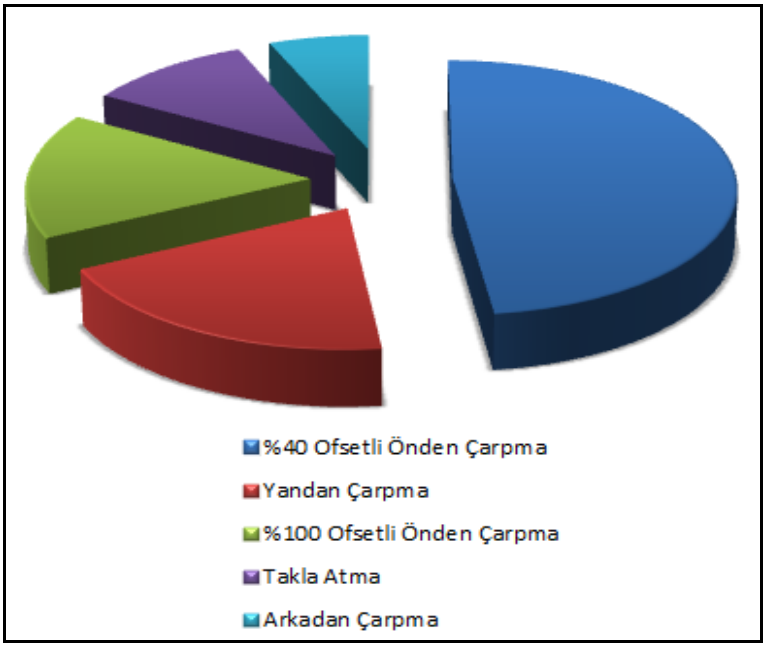
Şekil 4.15 Tünel parçası bağlantı bölgesi

BÖLÜM 5

OTOMOTİVDE YAN KAPI BARI PARÇASININ ÜRETİMİ

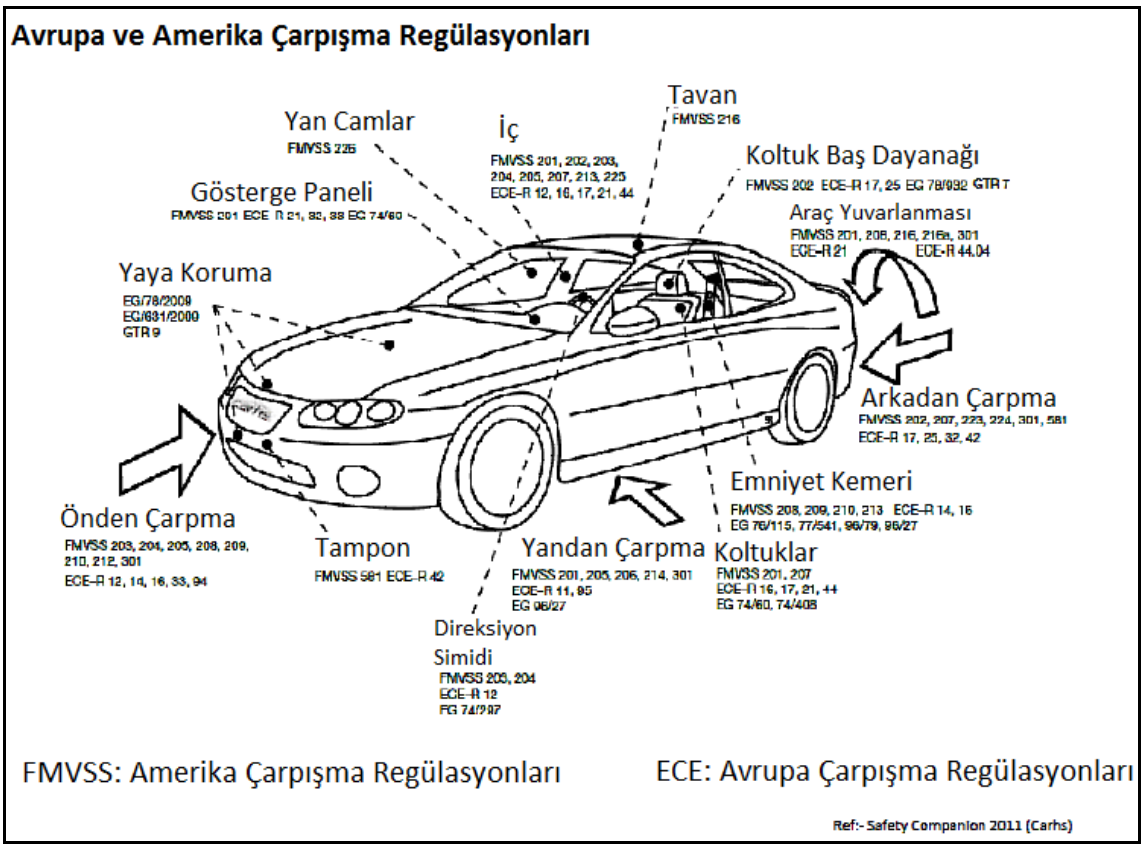
Araç kazalarının %19,4'ü yandan çarpma şeklinde oluşmakta ve bu durum sonucu oluşan ölümcül kazalar, ikinci sırada yer almaktadır. Dolayısıyla otomotiv üreticileri, bu tür kazalarda sürücü ve yolcuların güvenliğini arttırmak için yoğun çaba harcamaktadırlar.

Yandan gelen darbeler ise genellikle %100 ofsetli ya da direğe çarpma şeklinde oluşmaktadır. Sürücü ve yolcu güvenliğinin üst seviyelerde tutulması istendiğinden dolayı yan kapı içerisinde yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımı tercih edilmektedir [24].



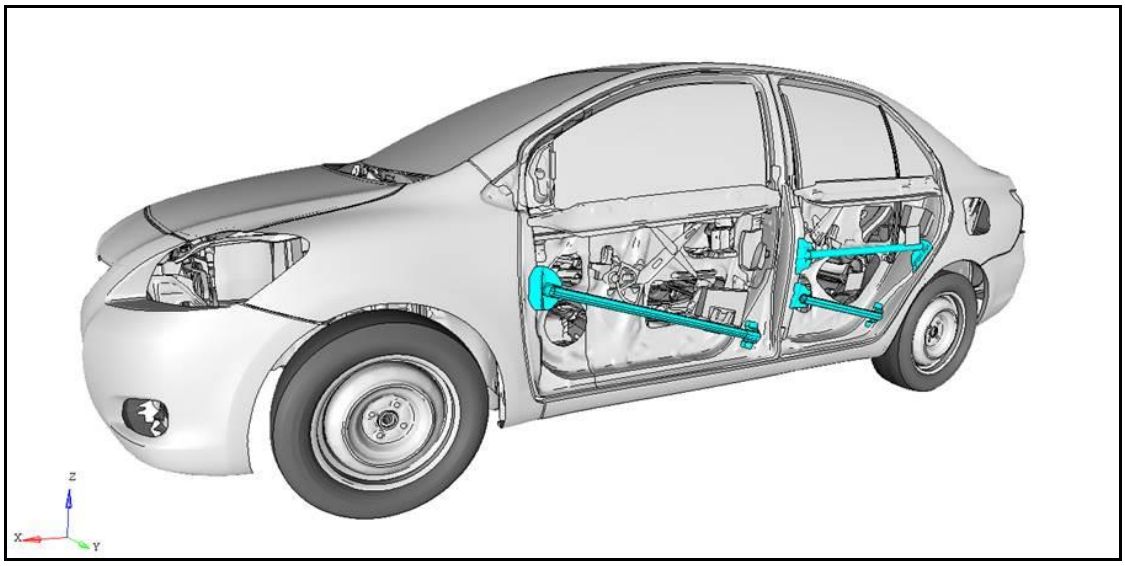
Şekil 5.1 Araç kazaları dağılım oranları [24]

Otomotiv kapı barının güvenlik gereksinimlerinin test edildiği platformların kodları şekil 5.2‘ de gösterilmektedir. Yan kapı barının testinin yapıldığı FMVSS 201, 205, 206, 214, 301; ECE – R 11, 95; EG 96/27 kodlar mevcuttur. Bu krtiterler doğrultusunda testler yapılmaktadır [25].



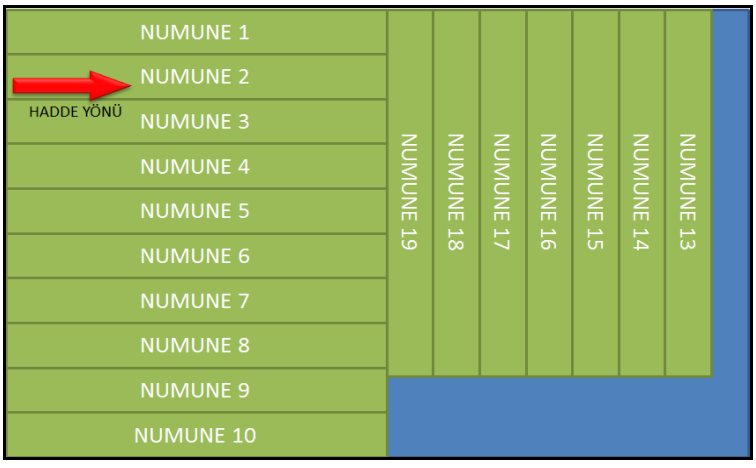
Şekil 5.2 Avrupa ve Amerika’ daki çarpışma kriterleri

Otomobil kapı barı, çarpışma esnasında sürücü ve yolcuları korumak amacıyla tasarlanan ve çarpışma esnasında oluşacak enerjiyi emme fonksiyonu olan bir emniyet parçası olarak kapı içerisinde yer almaktadır. Yan kapı barları, genelde çelik ve alüminyum malzemelerden hatta son yıllarda kompozit malzemelerden üretilmeye başlamıştır [26].



Şekil 5.3 Araç yan kapı barı bağlantı bölgesi

Coşkunöz Metal Form A.Ş. bünyesinde bulunan 800 Ton kapasiteli yüksek tonajlı presler yardımıyla üretilen metal yan kapı barı parçalarında yüksek mukavemetli malzemeler kullanılmıştır. TWIP ve martenzitik çeliklerin, hadde yönünde (0°) ve hadde yönüne dik (90°) olarak sac plakalardan kesimi lazer yardımıyla yapılmıştır. Bu plakalardan kapı barı çizimleri gerçekleştirilmiştir ve şekil 5.4' de görüldüğü üzere 0° ve 90° yönlerinde kesilerek isimlendirmeleri yapılmıştır. Yüksek mukavemete sahip olan martenzitik çeliklerde ilk aşamada yırtılmalar gözlemlenmiştir. Yağlı üretim denemelerinde kalıp alışıtırılmış ve martenzitik çelik ile parka üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen kapı barları ise yorulma test sistemi yardımıyla üç nokta bükme testlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.4 Şekillendirme işlemi için sac plaka üzerinde test numuneleri konumlandırması



Şekil 5.5 TWIP malzemeden üretilmiş araç yan kapı barı



Şekil 5.6 Martenzitik çelik malzemeden üretilmiş araç yan kapı barı

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Kimyasal Analiz ve Mekanik Özellikler

TWIP malzemesi için yapılan kimyasal analiz sonuçları aşağıdaki çizelge 6.1 tablosunda belirtilmektedir. Gecikmeli kırılmayı önlemek amacıyla katılan alüminyum değeri % 5 civarlarında olduğu tabloda gözükmektedir.

Çizelge 6.1 TWIP çeliği kimyasal kompozisyon değerleri

KİMYASAL ANALİZ														
Numune	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Al	As	Alsol	Alins
1-TWIP 900CR-1,30mm	0,37	20,96	0,01	0,01	0,17	0,06	0,46	0,01	0,05	0,01	4,80	0,01	4,80	0,00
2-TWIP 980CR- 1,30mm	0,36	22,27	0,01	0,01	0,17	0,06	0,45	0,01	0,03	0,01	5,93	0,01	5,93	0,00
Numune	Ca	N	Nb	V	W	Co	Pb	B	Ti	Ta	Zr	Zn	Sb	Bi
1-TWIP 900CR-1,30mm	0,00	0,01	0,02	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
2-TWIP 980CR- 1,30mm	0,00	0,01	0,02	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,06	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00

Martenzitik çelik ve TWIP çeliği için malzeme üreticisinden alınan mekanik değerler sonucu aşağıdaki çizelge 6.2 tablosunda gösterilmektedir.

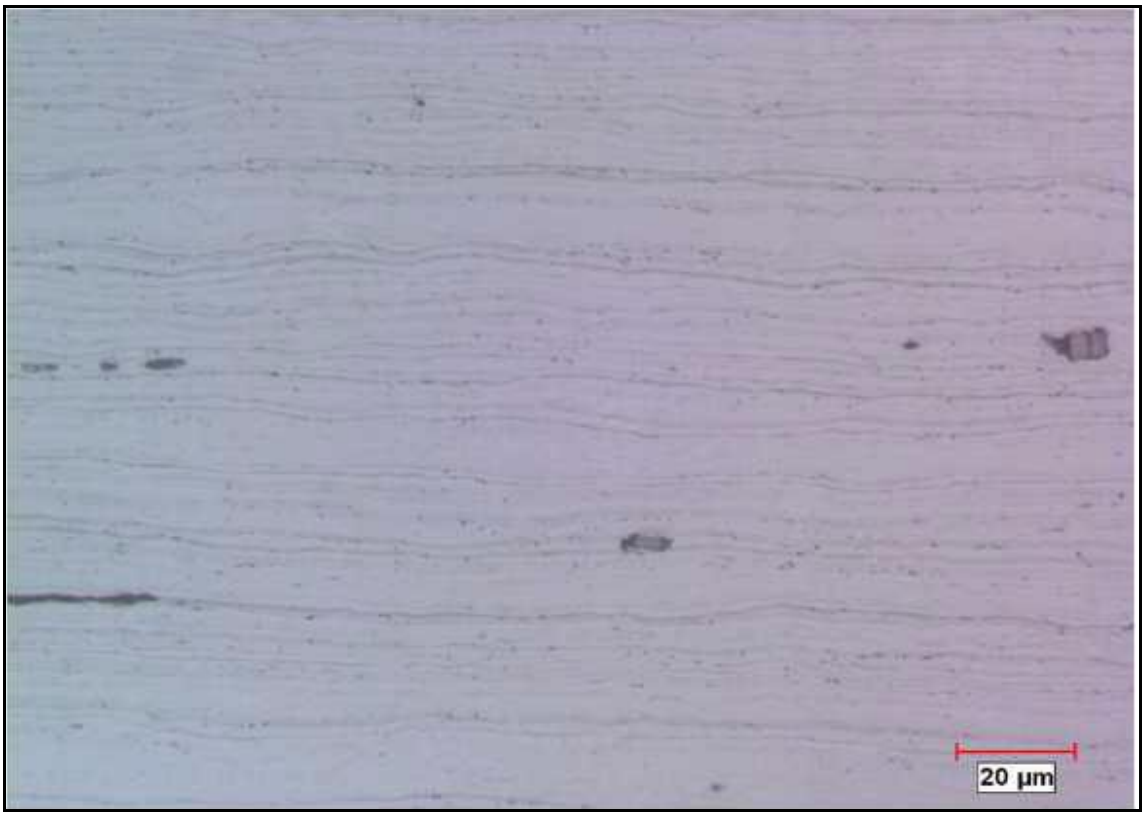
Çizelge 6.2 Martenzitik çelik ve TWIP çeliği için üretici mekanik değerleri

Malzeme Adı	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	% Uzama
TWIP 900	550	900	35
Martenzitik 1500M	1200	1500	3

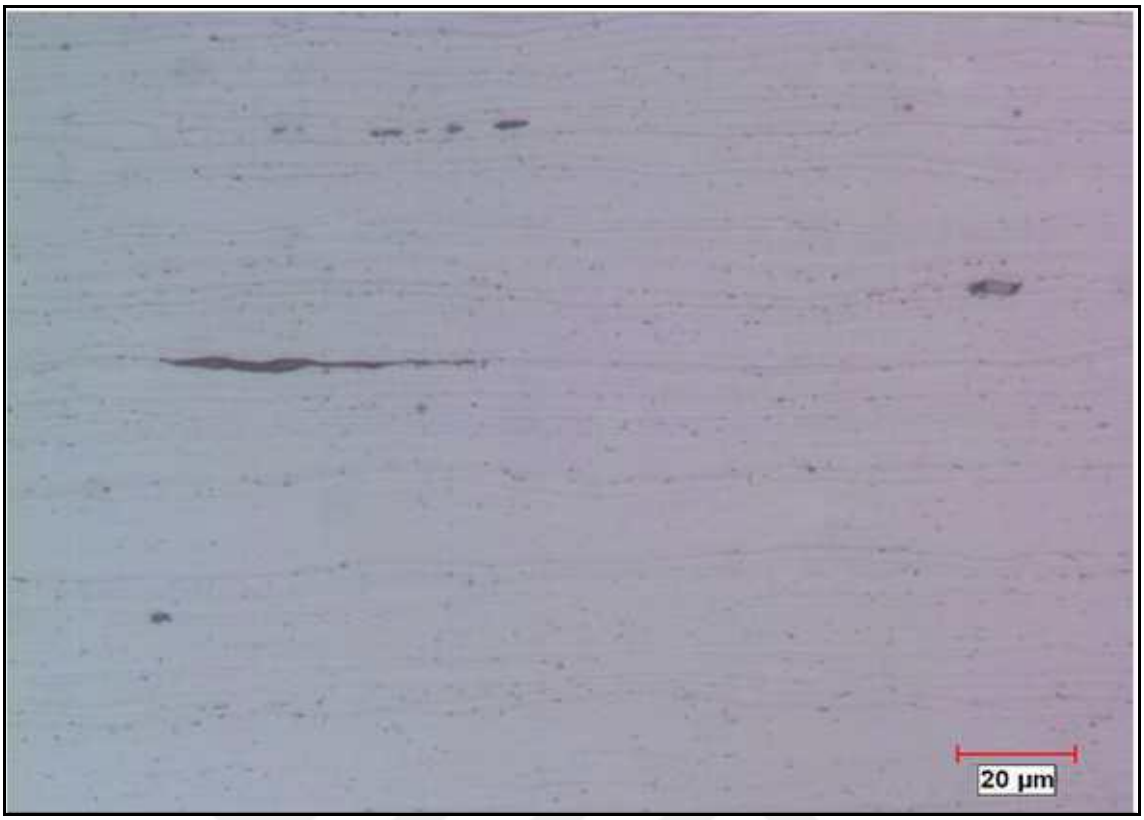
TWIP çeliği için ayrıca mekanik değerleri belirleme işlemleri için araştırmalar yapılmış ve ilerleyen sayfalarda test sonuçları açıklanmaktadır.

6.2 Mikroyapı

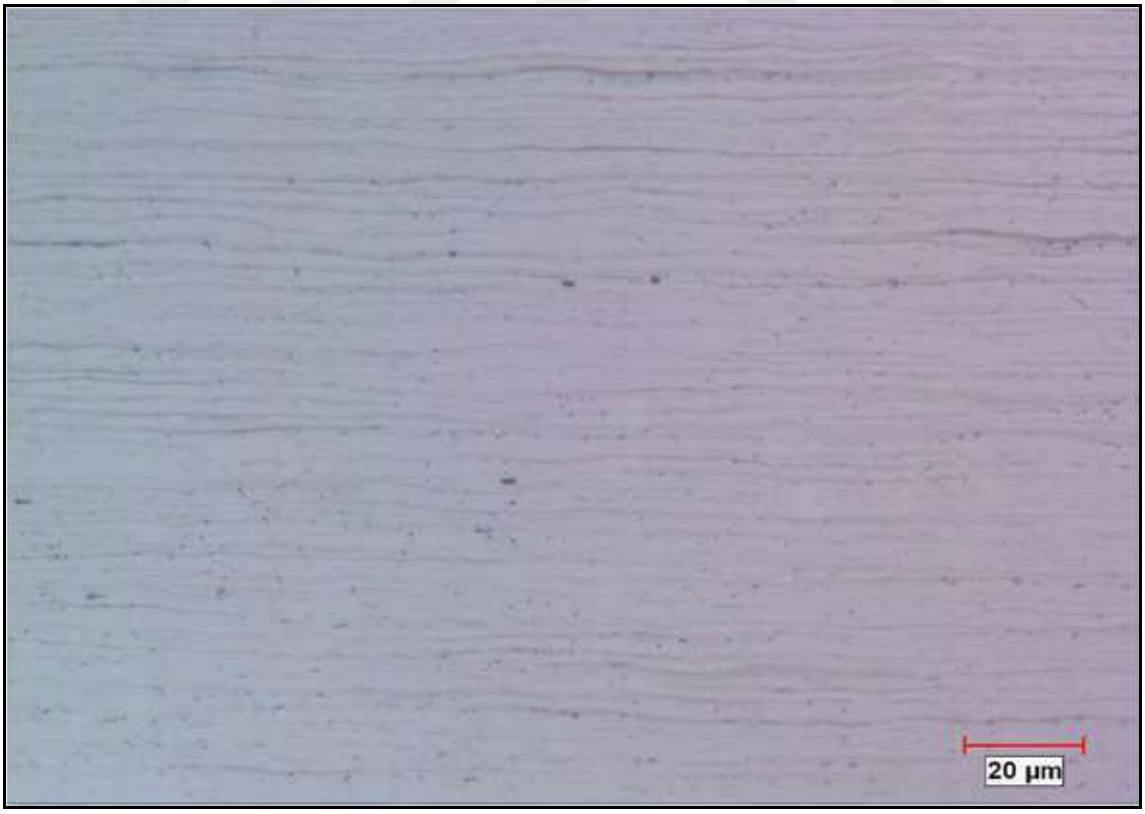
Mikroyapı özelliklerine bakılan TWIP çeliğinin nital, pikral ve viella çözeltileriyle Ereğli Demir Çelik Fabrikaları Arge Merkezi Metalografi Laboratuvarı tarafından hazırlanmış numune görüntüleri şekil 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 ve 6.5‘ de gösterilmektedir. Yönlenmeler nital ve pikral ile hazırlanan numunelerde gözlemlenmekte ve ayrıca 1000 büyütme yapılan viella çözeltisiyle hazırlanmış numune görüntülerinde ise daha net bir şekilde gözlemlenmektedir.



Şekil 6.1 TWIP 900CR-1,30mm (X500 Nital)



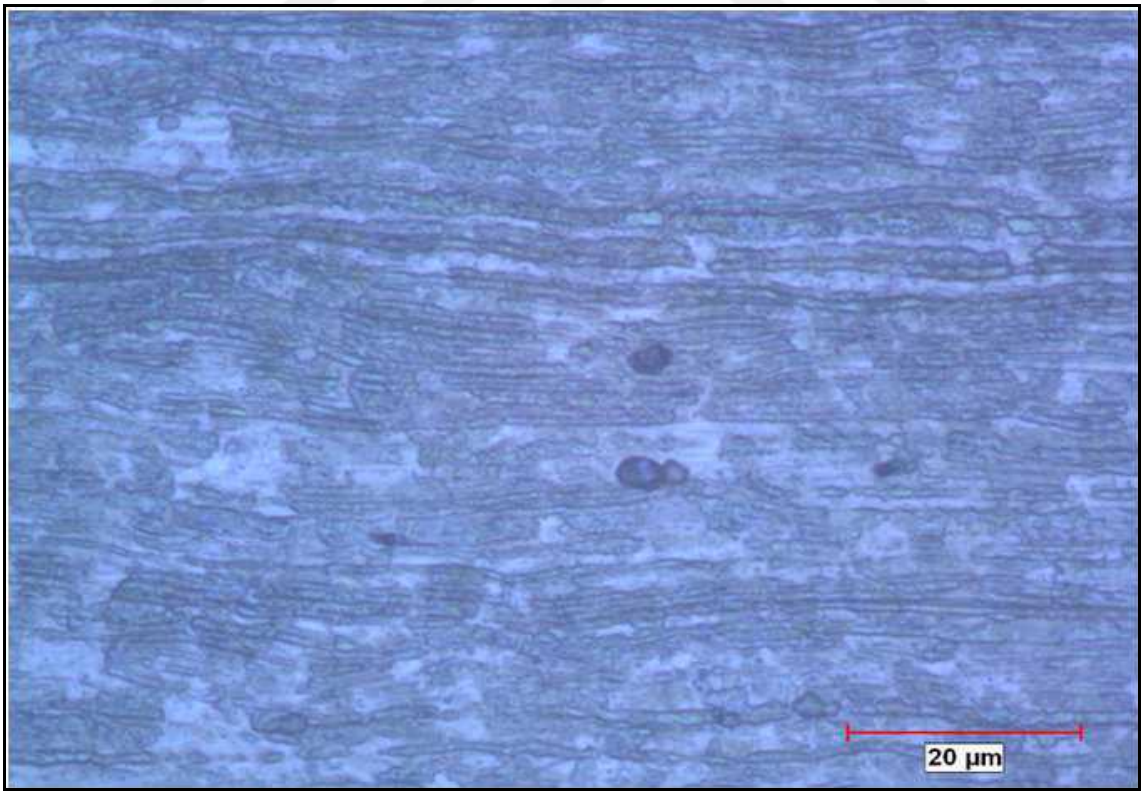
Şekil 6.2 TWIP 900CR-1,30mm (X500 Pikral)



Şekil 6.3 TWIP 980CR-1,30mm (X500 Nital)

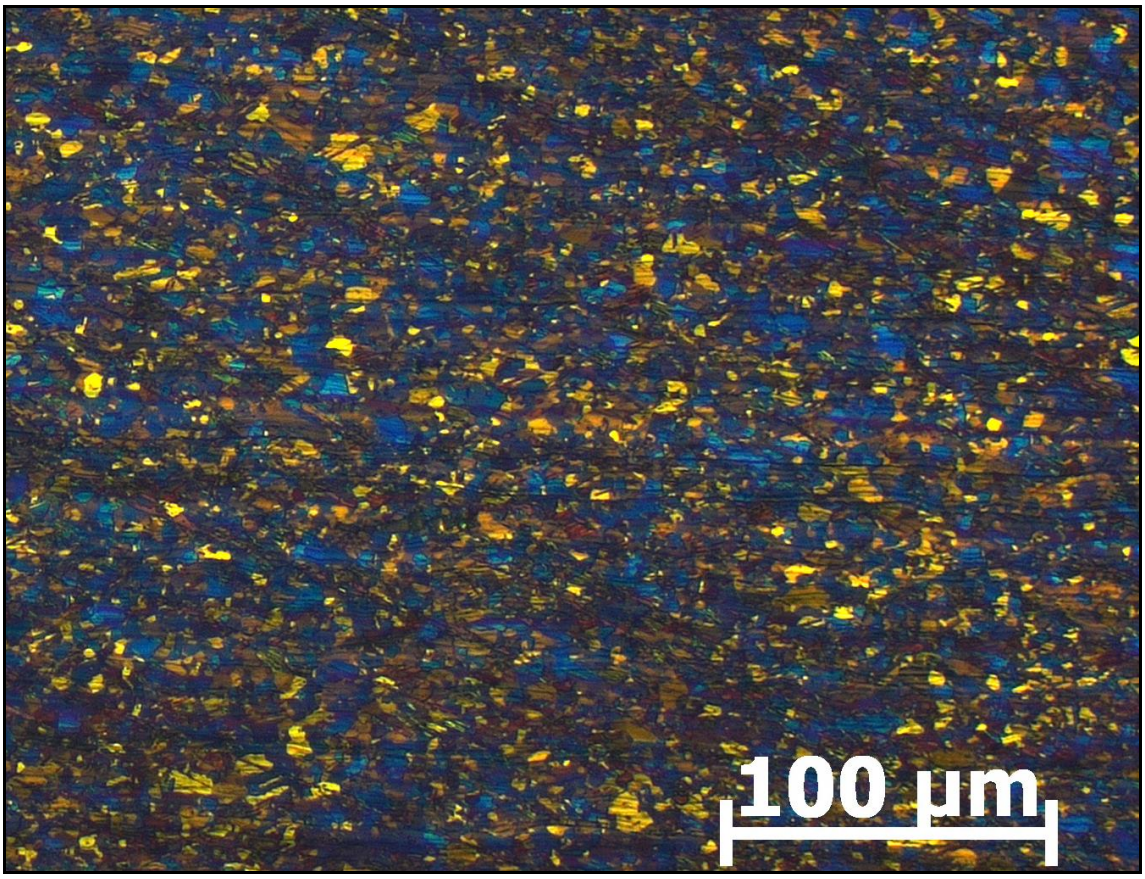


Şekil 6.4 TWIP 980CR-1,30mm (X500 Pikral)

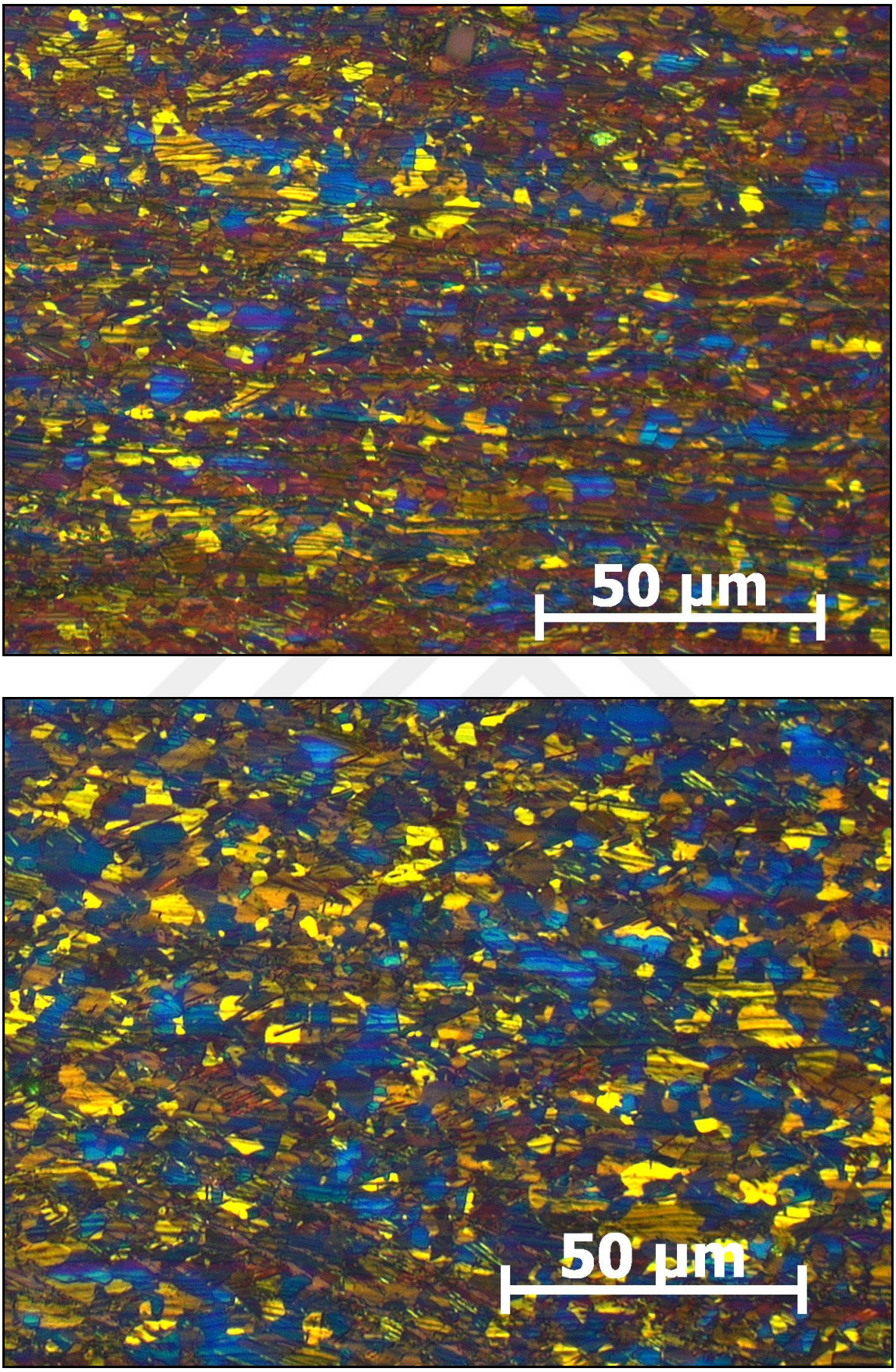


Şekil 6.5 TWIP 900CR-1,30mm (X1000 Viella)

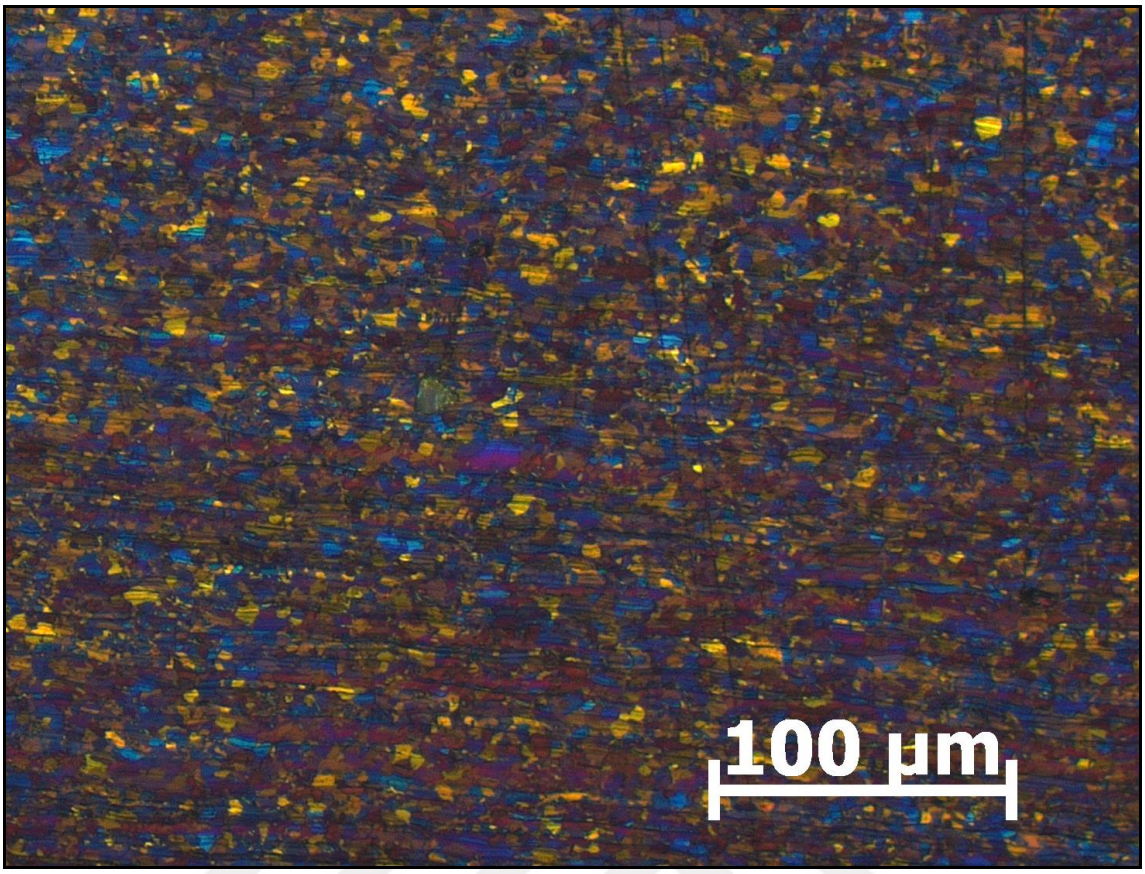
TWIP 900CR malzemesinden hadde yönünde, hadde yönüne dik ve yüzey görüntüleri olmak üzere üç yönde numune alınarak Tübitak MAM Malzeme Enstitüsü Metalografi Laboratuvarında numune hazırlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Mikroskop ile inceleme işlemleri de aynı birimde yapılmıştır. Şekil 6.6 ile 6.11 arasındaki görsellerde incelemeler gösterilmektedir.



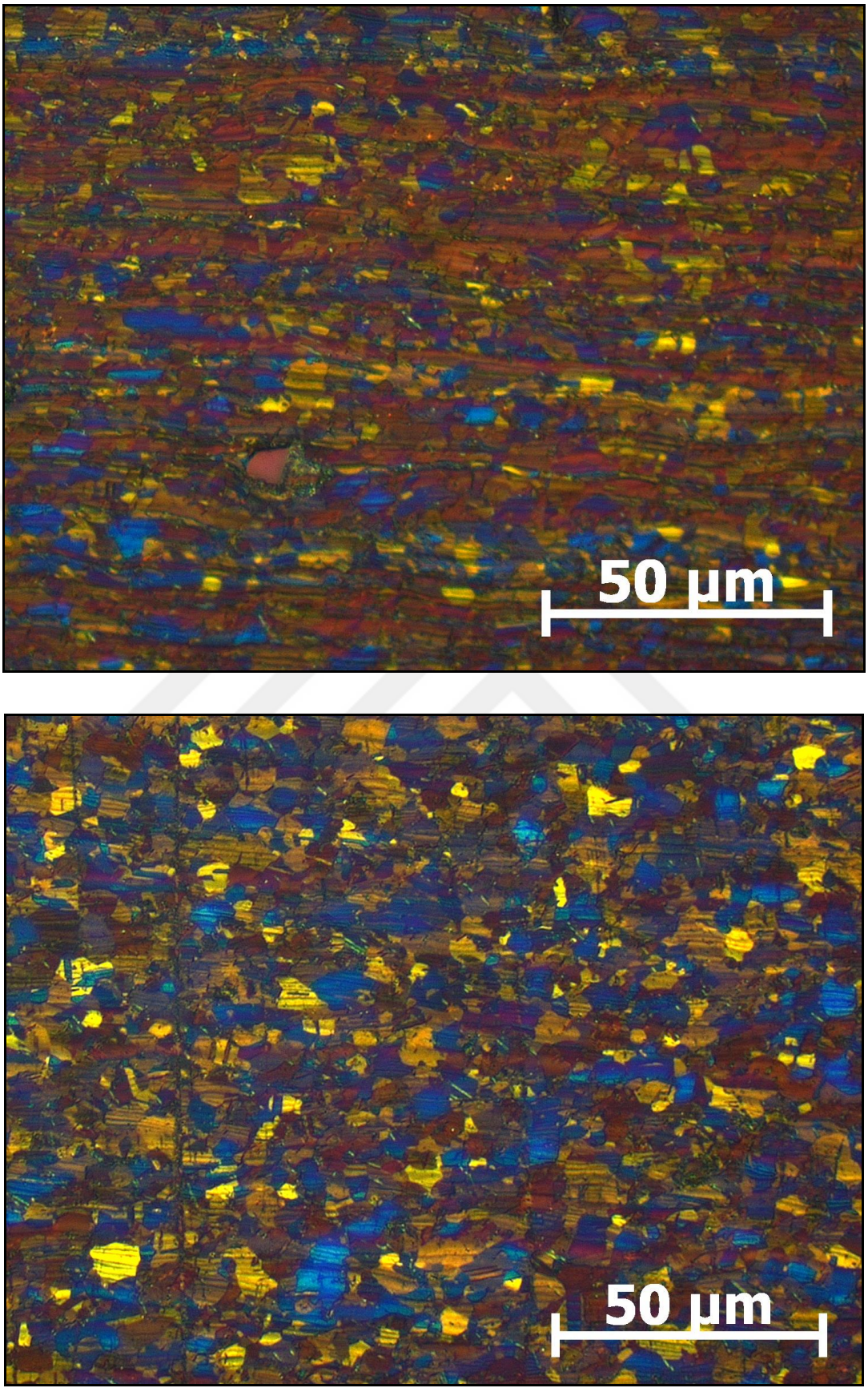
Şekil 6.6 TWIP 900CR-1,30mm (0° Yönünde 20X Büyütme)



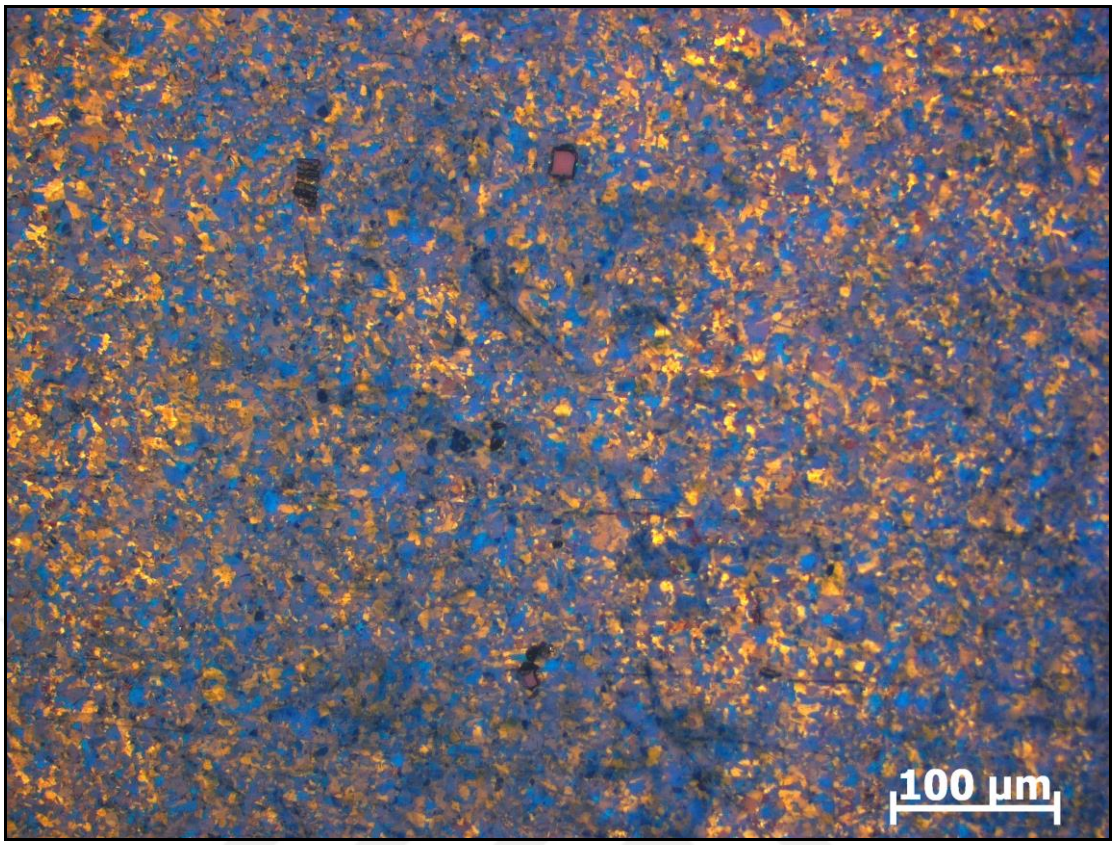
Şekil 6.7 TWIP 900CR-1,30mm (0° Yönünde 50X Büyütme)

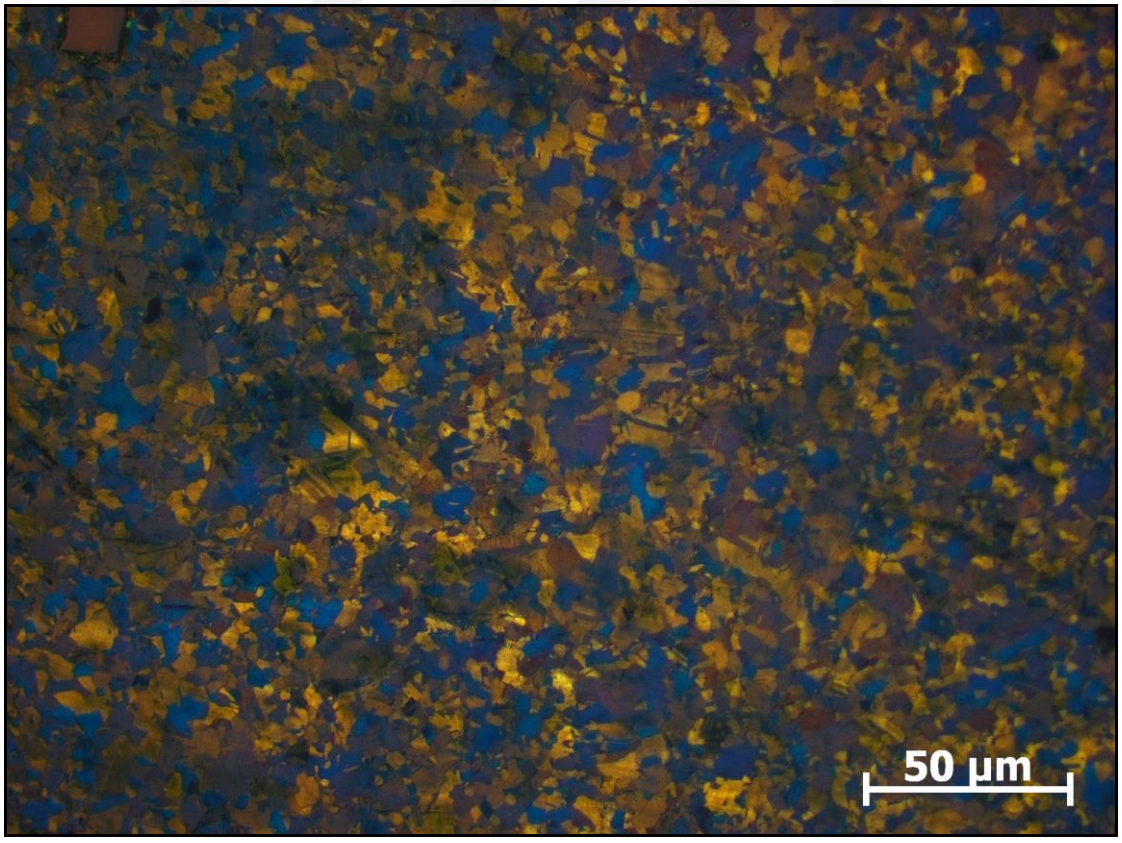


Şekil 6.8 TWIP 900CR-1,30mm (90° Yönünde 20X Büyütme)

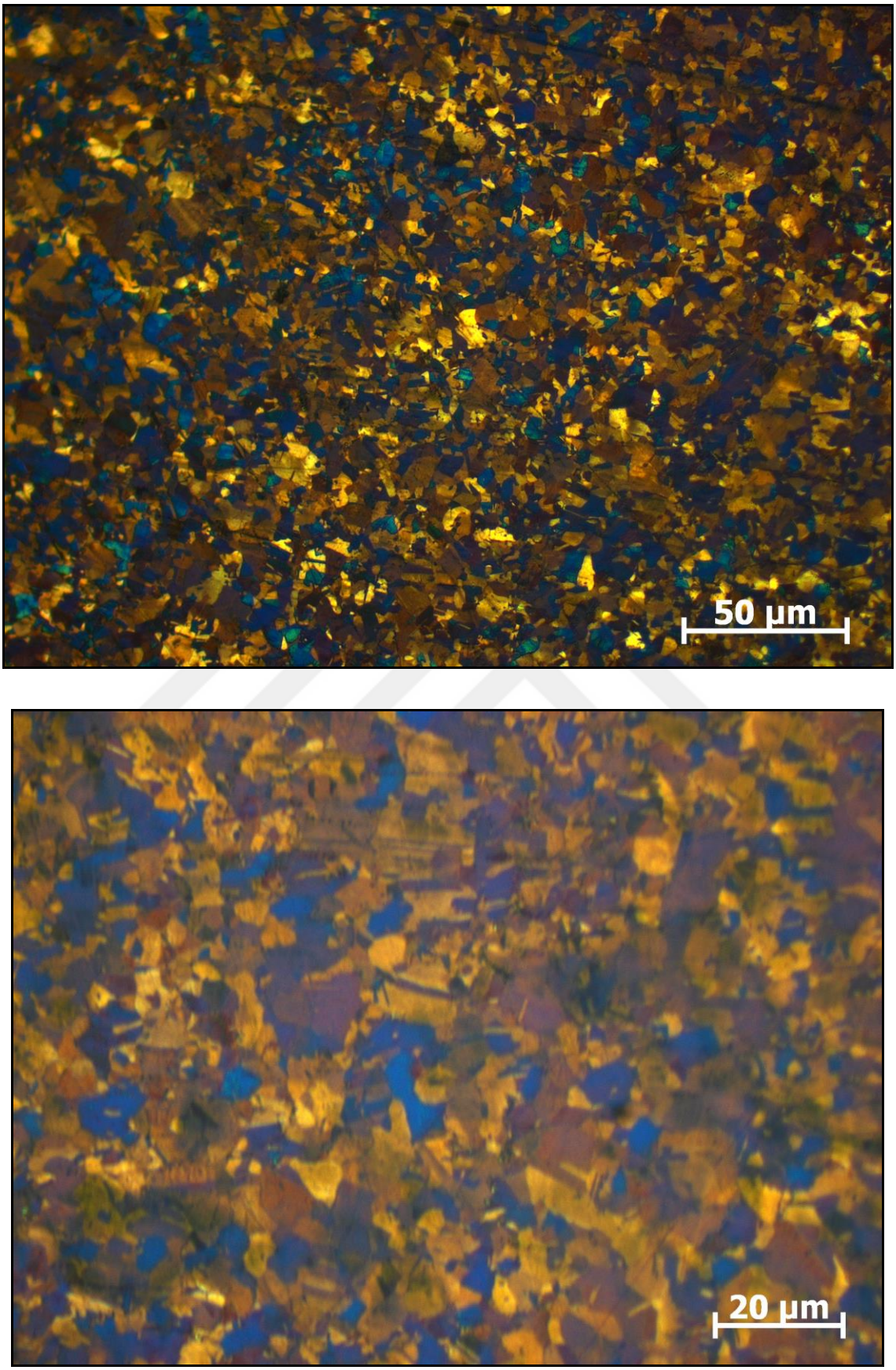


Şekil 6.9 TWIP 900CR-1,30mm (90° Yönünde 50X Büyütme)





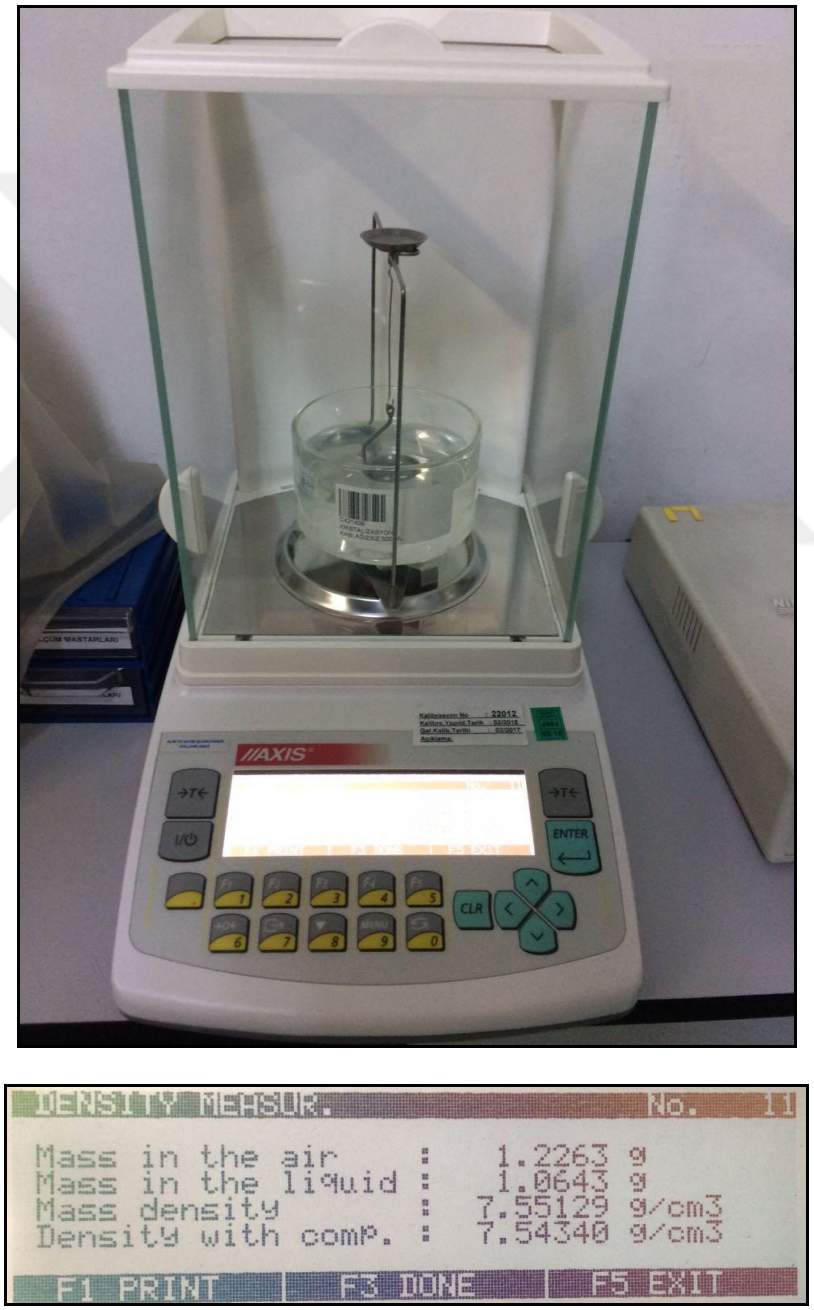
Şekil 6.10 TWIP 900CR-1,30mm (Yüzey Görüntüsü 20X ve 50X Büyütme)



Şekil 6.11 TWIP 900CR-1,30mm (Yüzey Görüntüsü 50X ve 100X Büyütme)

6.3 Malzeme Yoğunluğunun Hesaplanması

TWIP çeliği çelik malzemelere göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğu literatür özetinde açıklanmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan TWIP 900CR malzemesinin yoğunluğunun tespit edilebilmesi için Coşkunöz Holding – Belka Kauçuk firması test laboratuvarında bulunan şekil 6.12'de gösterilen AXIS marka hassas yoğunluk ölçme cihazı kullanılmıştır. TWIP 900CR malzemesinin yoğunluğu 7,5434 gr/cm^3 olarak hesaplanmıştır.



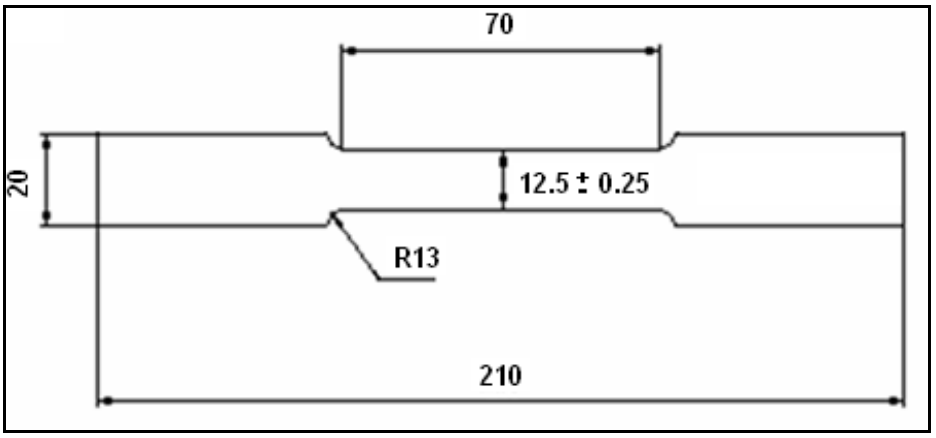
Şekil 6.12 Hassas Yoğunluk Ölçme Cihazı

6.4 Çekme Testi

Malzemelerin öncelikli olarak mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan deney yöntemi tek eksenli çekme deneyidir. Malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyeti hakkında önemli bilgiler veren bu deneyden elde edilen verilerden bazıları daha sonra gerçek parçaların şekillendirme simülasyonlarında kullanılmaktadır. Bu veriler;

- Akma dayanımı (Plastik deformasyon başlangıç anı)
- Çekme dayanımı (Boyun verme öncesi elde edilen maksimum kuvvet)
- Uniform plastik şekil değişimi (Boyun verme öncesi elde edilen plastik şekil değişimi)
- Elastisite modülü "E"
- Pekleşme üsteli "n"
- Mukavemet katsayısı "K"
- Lankford parametreleri (R_0, R_{45}, R_{90})
- Deformasyon oranı hassasiyeti "m" (Farklı deformasyon hızlarında malzemenin gerilme değerindeki değişim)

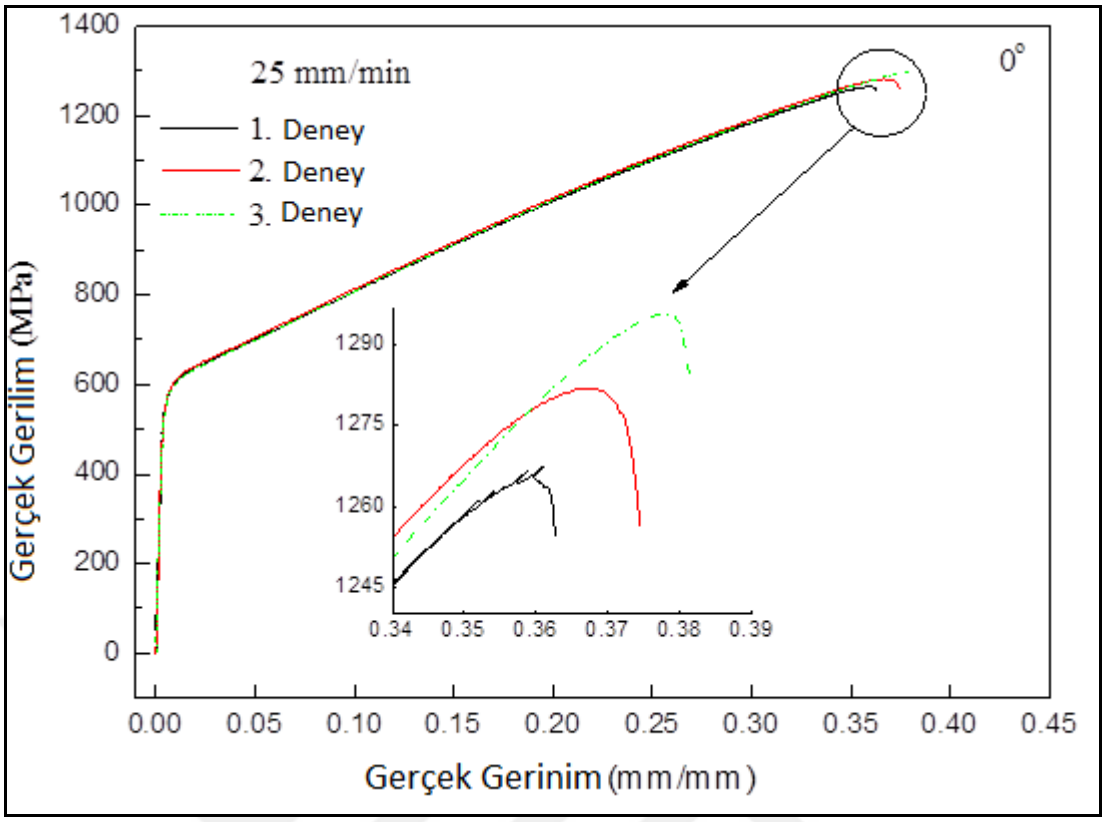
Çalışma kapsamında çekme deneyleri TWIP çeliğinin anizotropik özelliğinin tayini için farklı yönlerde hazırlanmış deney numunelerine uygulanmış ve deneyler her bir yön için 3'er kez tekrarlanmıştır. Yönlerin tayininde daha sonra değinilecek olan akma yüzeylerinin modellenmesinde gerekli anizotropi değerlerinin elde ediliş yönlerine göre belirlenmiştir. Bu yönler Haddeleme yönü "0°", diagonal yön "45°", ve haddeleme yönüne dik "90°" olarak belirlenmiştir. Deneyler ASTM-E8 standardına göre su jeti ile hazırlatılmıştır. Şekil 6.6' da deney numunesinin boyutları gösterilmiştir.



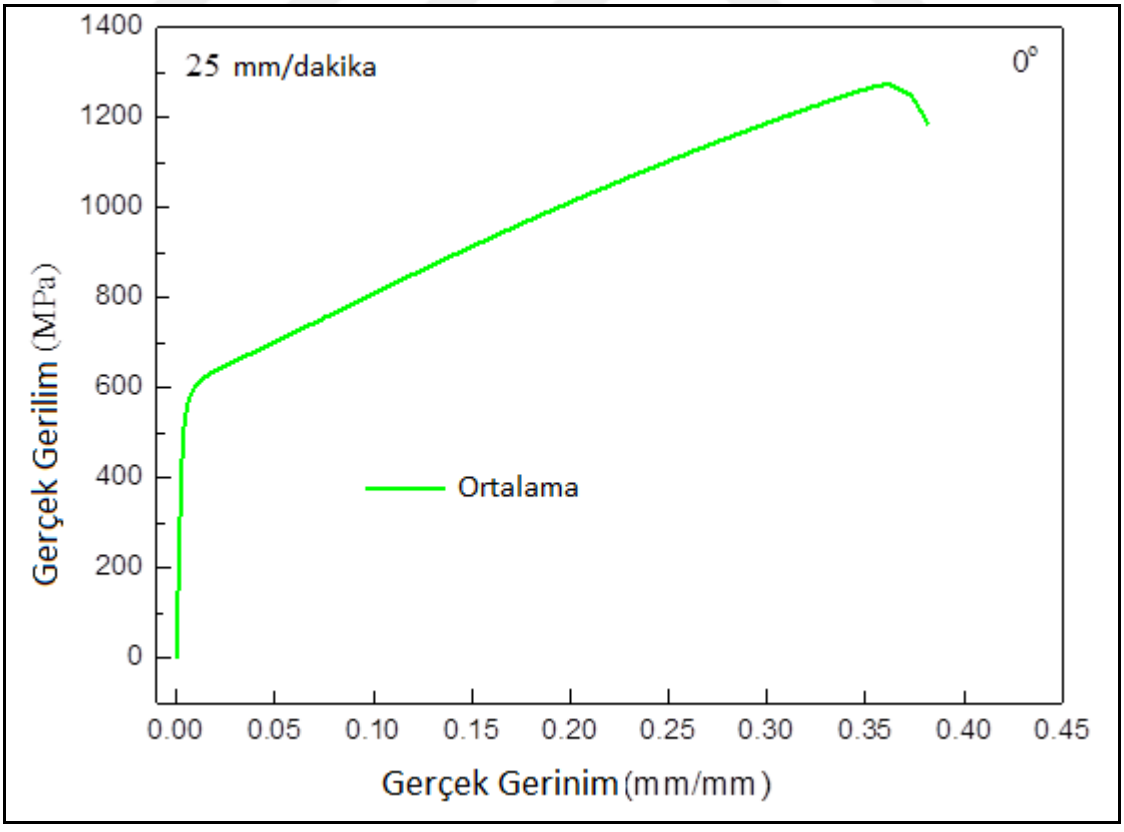
Şekil 6.13 ASTM-E8 standardındaki çekme deney numunesinin boyutları

6.4.1 Çekme Deneyi Sonuçları

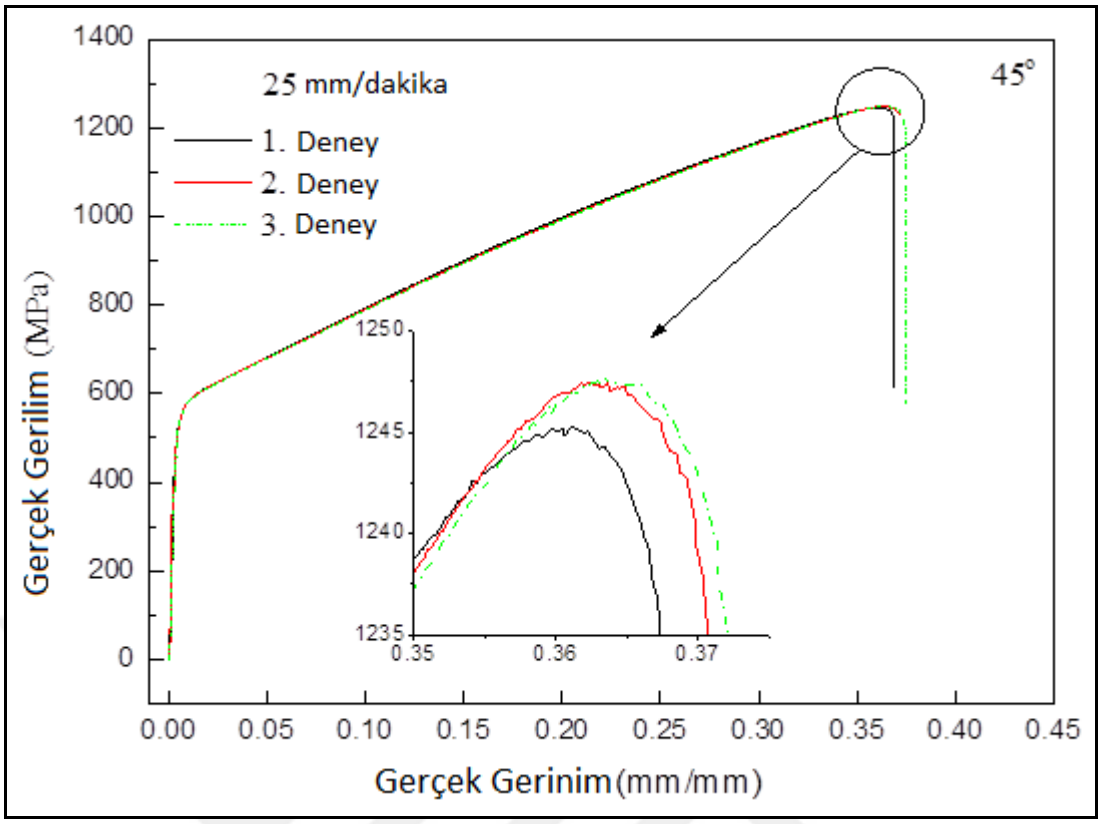
Farklı yönlerde hazırlatılmış deney numunelerine uygulanmış çekme deneyi neticesindeki gerilme birim deformasyon grafikleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Her yönde üç kere tekrarlı bir şekilde uygulanan çekme testi sonuçları ilk şekilde belirtilmiştir. İkinci resimde ise yapılan test sonuçlarının ortalaması verilmektedir. Gerçek gerinim – gerilim eğrisi şekillerde paylaşılmaktadır. Ayrıca elde edilen grafiklerin her bir yön için ortalamaları alınarak şekil 6.13'de karşılaştırılmıştır. Deneyler 25 mm/dk' lık deformasyon hızlarında gerçekleştirilmiştir.



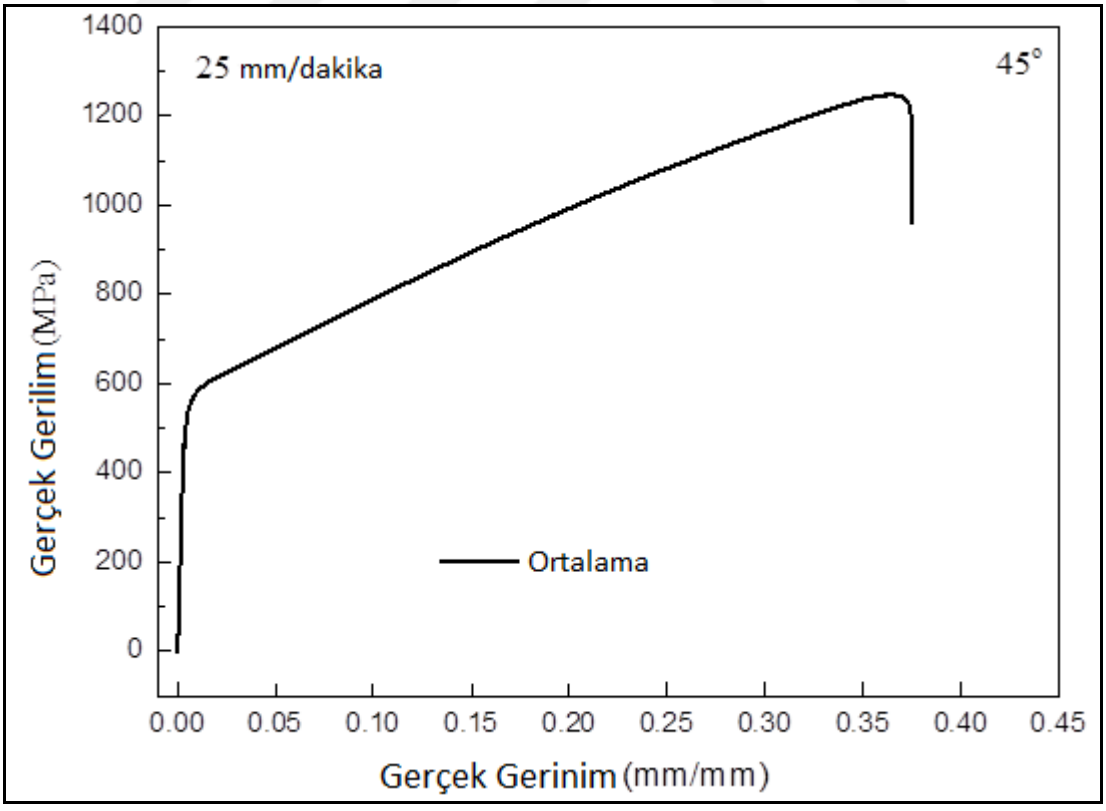
Şekil 6.14 0° yönünde çekme testi sonuçları



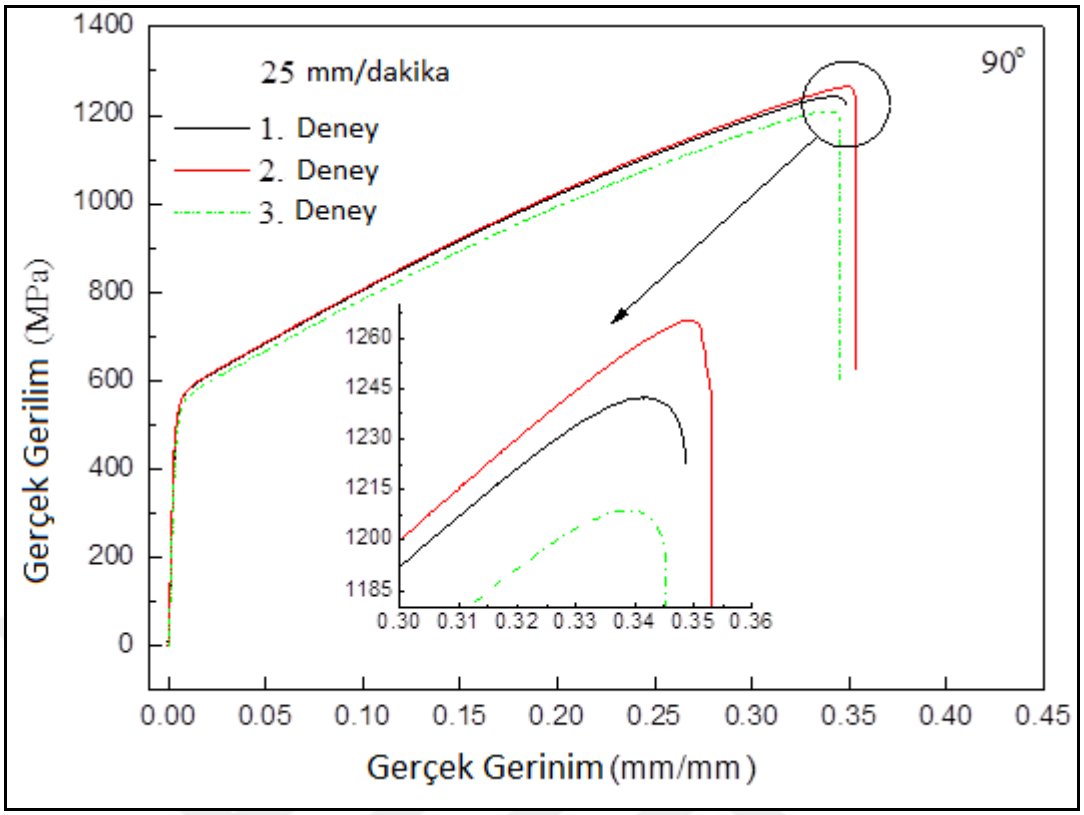
Şekil 6.15 0° yönünde çekme testi ortalama sonucu



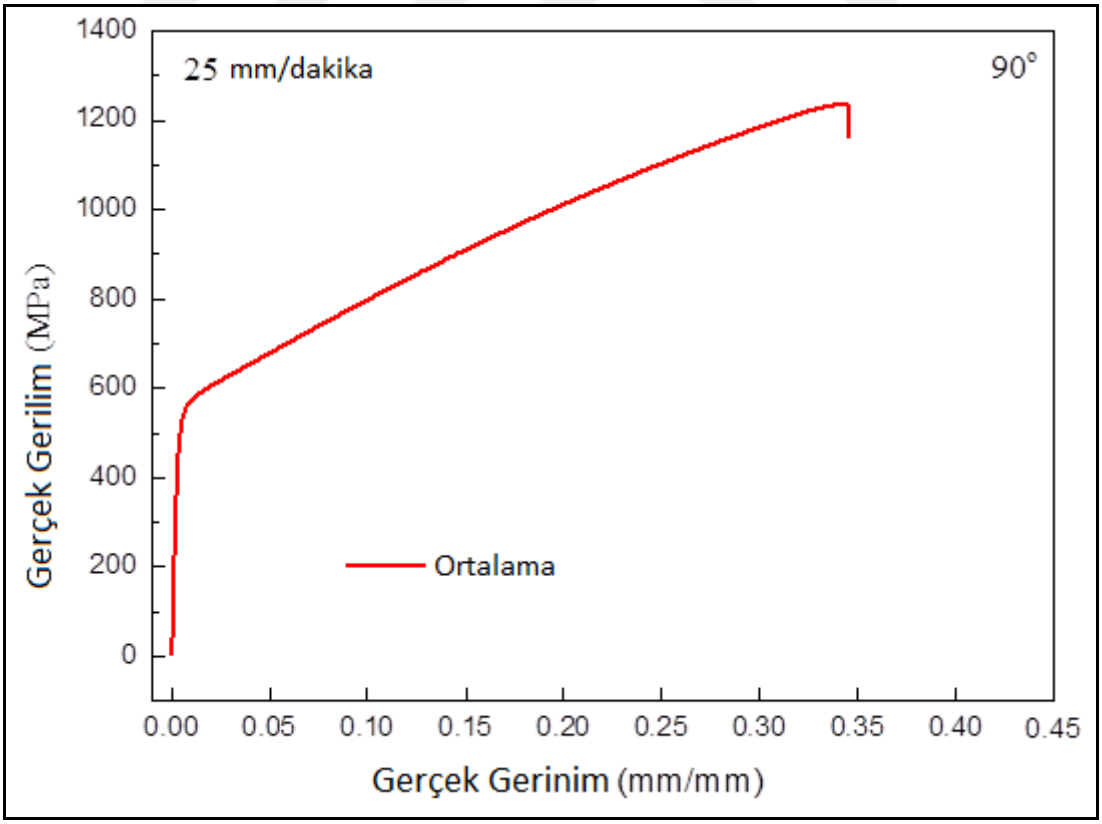
Şekil 6.16 45° yönünde çekme testi sonuçları



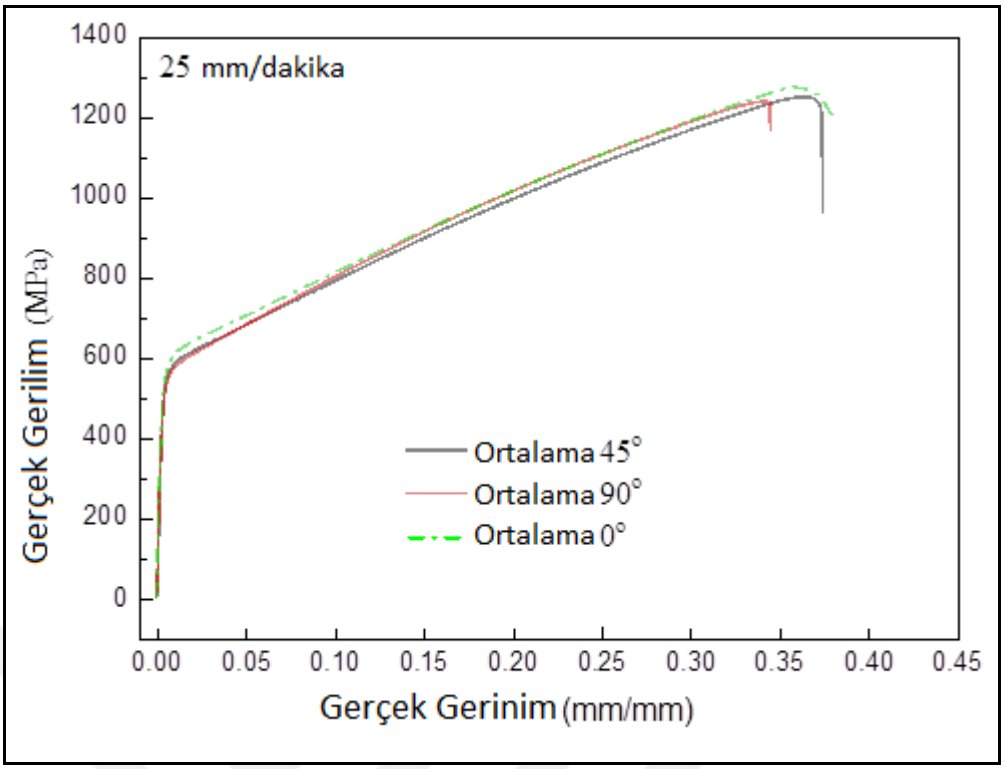
Şekil 6.17 45° yönünde çekme testi ortalama sonucu



Şekil 6.18 90° yönünde çekme testi sonuçları

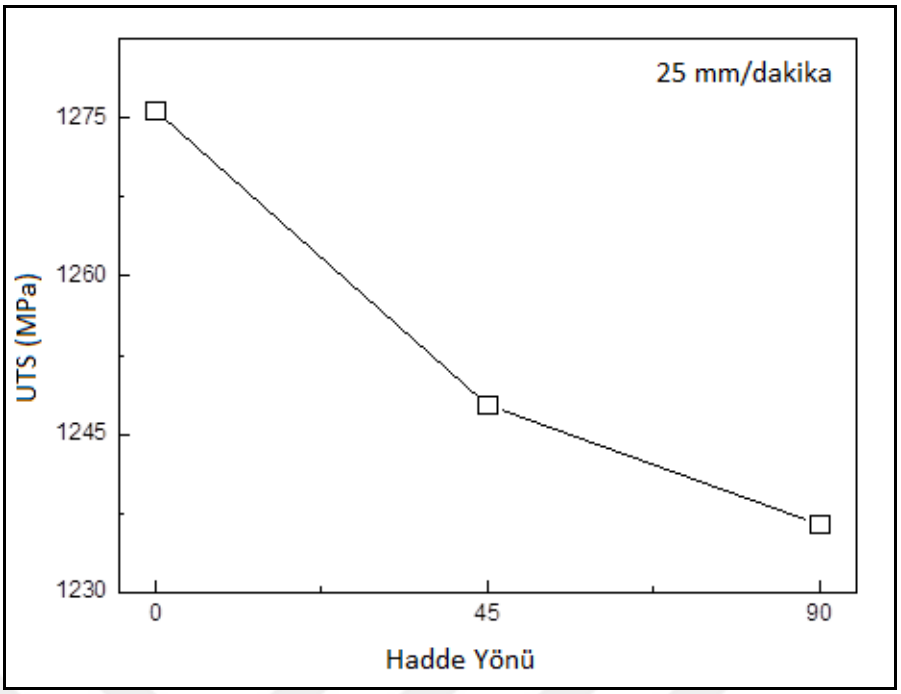


Şekil 6.19 90° yönünde çekme testi ortalama sonucu



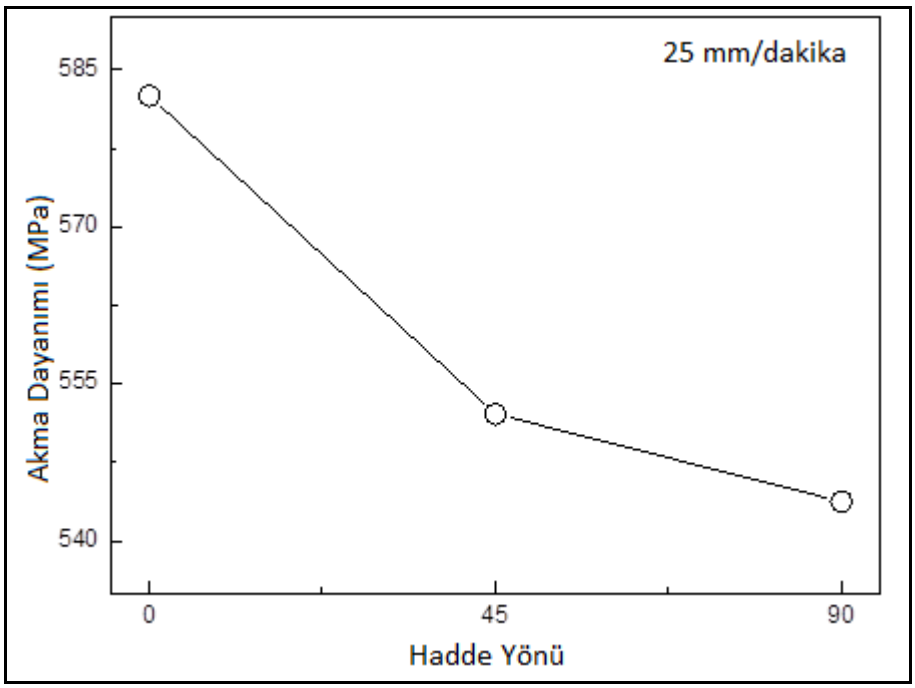
Şekil 6.20 Farklı yönler için elde edilmiş ortalama gerilme birim deformasyon eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 6.20' den de görüleceği üzere TWIP çeliğinin gerilme değerlerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. Bununla birlikte uniform uzama miktarında da önemli bir farklılık bulunmamaktadır. Çekme deneyinden elde edilen mekanik özellikler aşağıda grafiklendirilmiştir. Şekil 6.21' de TWIP çeliğinin farklı yönlerdeki maksimum dayanımları gösterilmiştir. Haddeleme yönünden haddeleme yönüne dik doğrultuya doğru malzemenin dayanımı azalmaktadır.



Şekil 6.21 Maksimum çekme dayanımının malzeme yönüne göre değişimi

Bununla birlikte malzemede gözlemlenen akma dayanımı da maksimum çekme dayanımına benzer olarak azalma göstermiştir. Akma dayanımının yöne bağlı olarak değişimi ise şekil 6.22'de verilmektedir. Malzememize ait akma gerilme değerleri plastik bölgeye geçiş noktasının tam olarak belli olmamasından dolayı % 0.2 öteleme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.



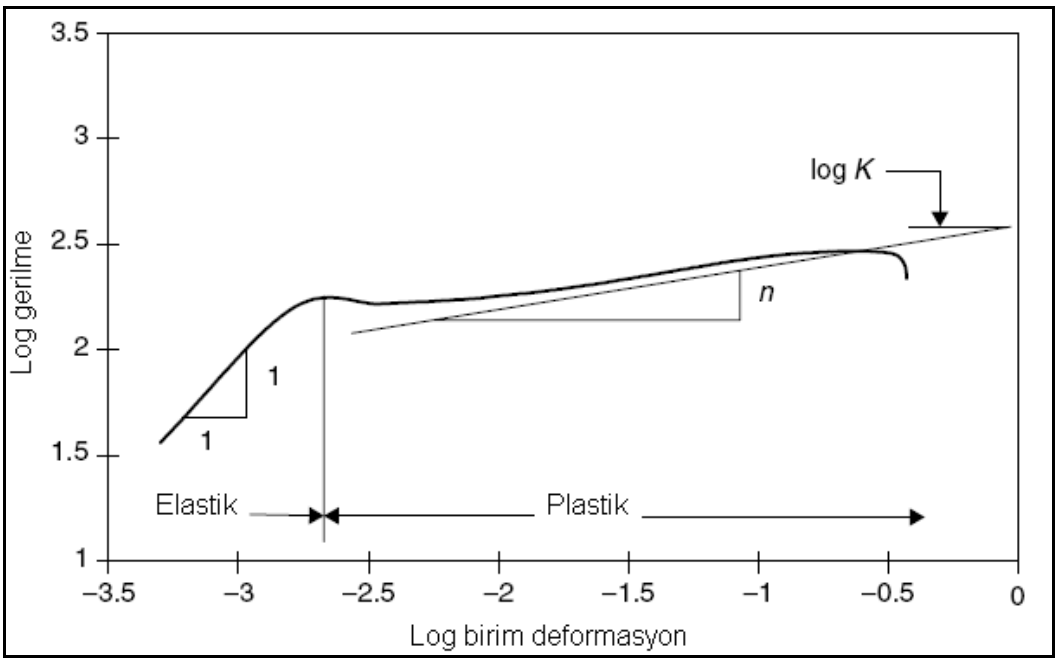
Şekil 6.22 Akma dayanımının yöne bağlı olarak değişimi

Malzemelerin mekanik özelliklerinden bir diğer önemli parametre ise pekleşme kabiliyetleridir. Malzemelerdeki bu özellik şekillendirilebilirliğin bir göstergesi olup büyük olması durumunda şekillendirilebilme kabiliyeti de yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Genelde bu değer literatürde haddeleme yönüne paralel olarak hazırlanmış deney numunelerinden elde edilen verilerdir. Bununla birlikte akma ve çekme dayanımı gerilmelerinin arasındaki farkında bir göstergesidir. Şekil 6.23 incelendiğinde bu değerinde yöne bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Öyle ki malzememizin çekme diyagramları da incelendiğinde küçükte olsa çekme ve akma dayanımları arasında bir fark bulunmaktadır.

Eşitlik 6.1' de şekil değişimi pekleşmesinin hesaplanması verilmektedir.

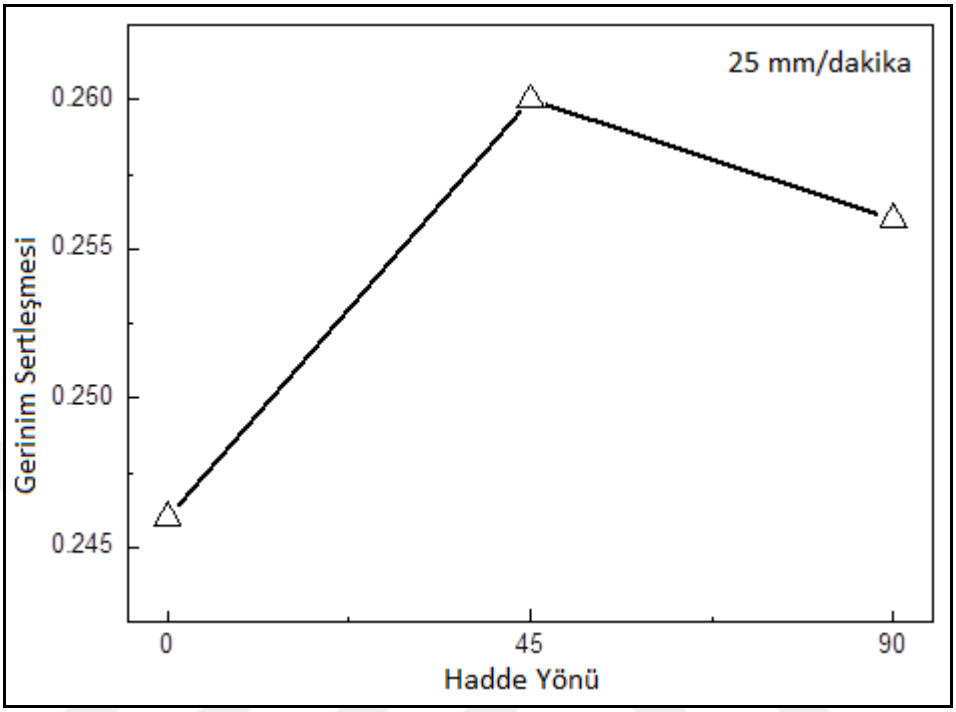
$$\log \sigma = \log K + n \cdot \log \varepsilon^{pl} \tag{6.1}$$

Burada çekme deneyinden elde edilen gerilme-birim deformasyon verilerinden akma gerilmesi ile maksimum çekme dayanım gerilmesi arasında kalan gerilme ve birim deformasyon verileri alınarak logaritmik olarak hesaplatılır. Daha sonra bu verilere lineer bir eğri uydurularak eğrinin eğimi "n", sabiti ise "K" değeri olarak tayin edilmektedir. Bu değerlerin hesaplatılmasında kullanılan yöntem şematik olarak Şekil 6.23' de gösterilmektedir.

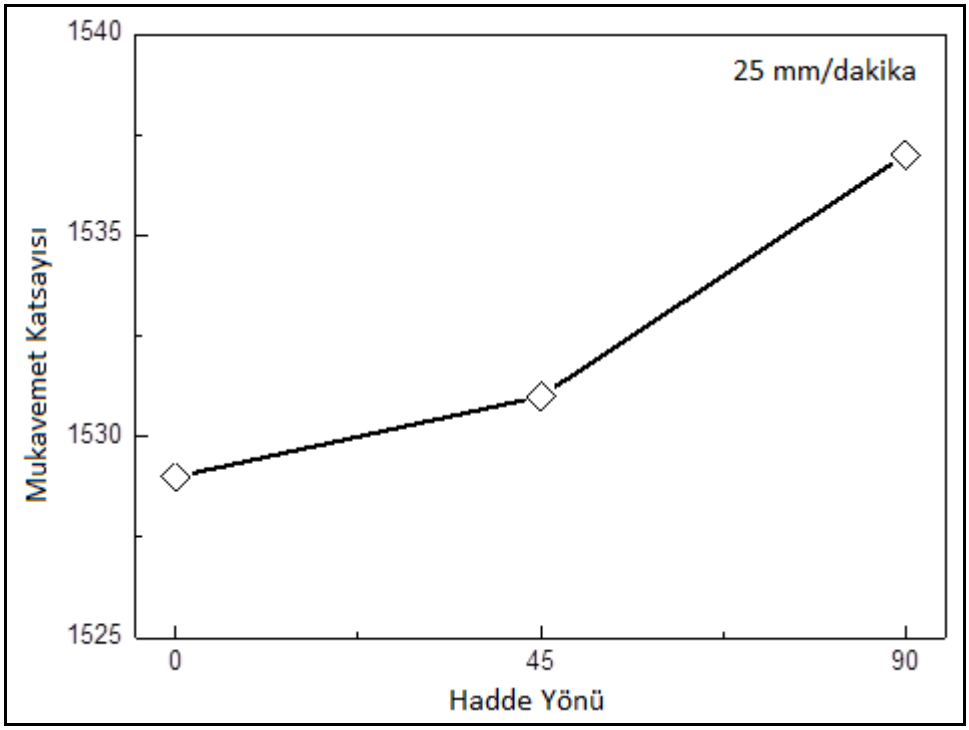


Şekil 6.23 Log gerilme-log birim şekil değişimi grafiği

Yönlere bağlı olarak çekme deneylerinden elde edilmiş pekleşme “n” ve mukavemet katsayısı “K” değerleri sırası ile şekil 6.24 ve 6.25’de gösterilmiştir.



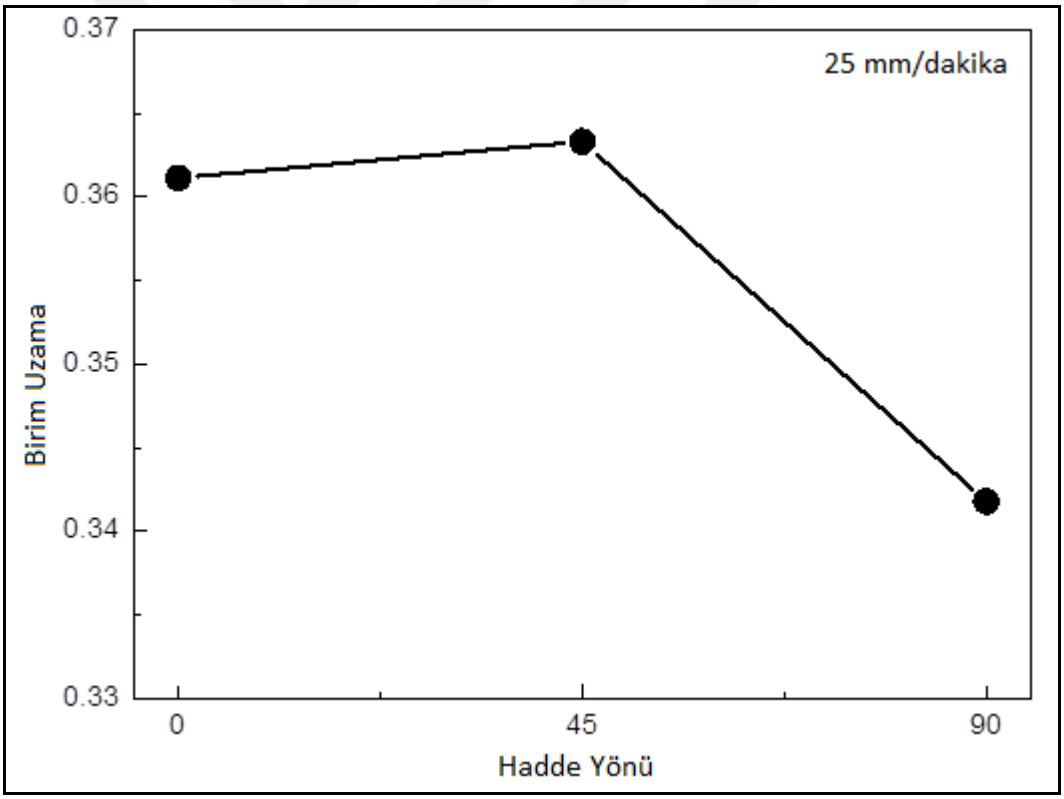
Şekil 6.24 Pekleşme üstelinin yöne bağlı olarak değişimi



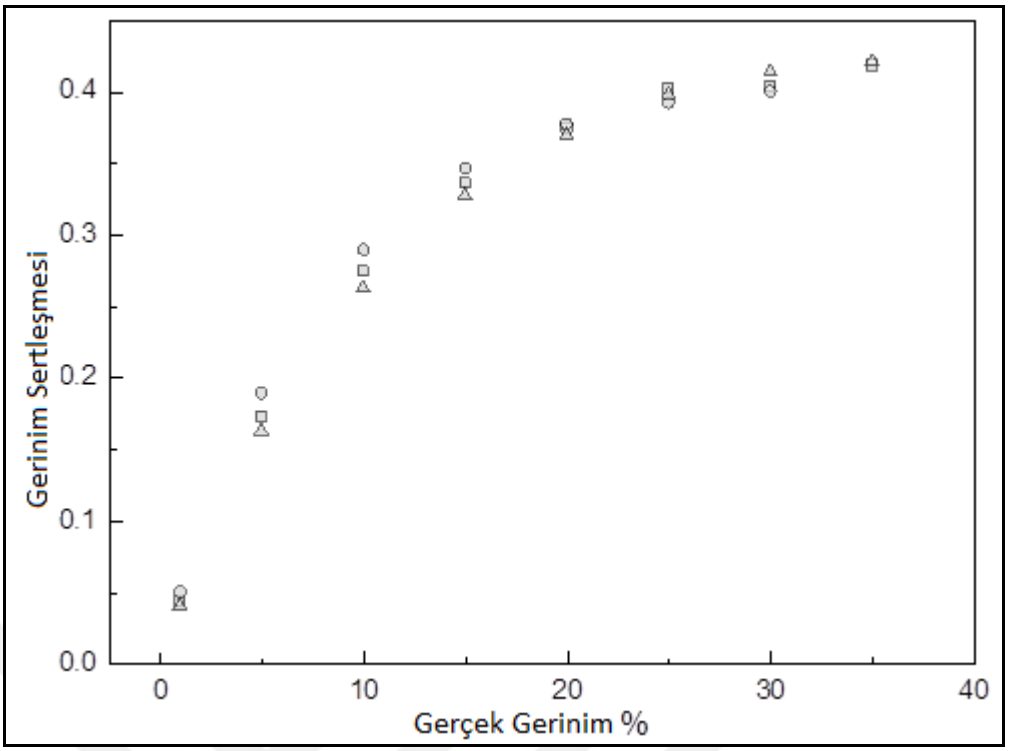
Şekil 6.25 Mukavemet katsayısının yöne bağlı olarak değişimi

Çekme diyagramları incelendiğinde TWIP çeliğinin toplam uzama değerleri ile uniform uzama değerleri arasında çok büyük fark bulunmamaktadır. Yani malzemede boyun verme uzaması oldukça düşük olmaktadır. Malzemenin pekleşme üstelinin değişimi ile aynı şekilde değiştiği gözlemlenmektedir. Bu durum pekleşme değerinin şekillendirme üzerindeki etkisini göstermektedir.

Malzemelerin pekleşme değerleri literatürde şekil 6.26' da olduğu gibi tek bir değer olarak ifade edilmektedir. Esasında bu değer uygulanan deformasyon ile birlikte değişkenlik gösterebilmektedir. Şekil 6.27' de ise bu değerin deformasyon ile değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere bu değer deformasyon ile birlikte her yön için artış göstermiş bulunmaktadır. Malzemelerin akma eğrilerinin modellenmesi işleminde bu değerin değişken olarak tanımlanması neticesinde gerilme değerleri daha iyi belirlenecektir.



Şekil 6.26 Pekleşme değerinin yöne bağlı olarak değişimi



Şekil 6.27 Pekleşme değerinin her bir yön için plastik deformasyon ile değişimi

Yukarda verilen grafiklerde yer alan veriler çizelge 6.3' de özetlenmiştir.

Çizelge 6.3 TWIP çeliğin mekanik özelliklerini gösteren tablo

TWIP	AKMA	ÇEKME	K	n	T.E	U.E
0	582,54	1275,71	1529	0,246	0,38	0,36
45	552,14	1247,75	1531	0,26	0,37	0,36
90	543,76	1236,43	1537	0,256	0,34	0,34

6.4.2 Anizotropi Değerlerinin Belirlenmesi

Malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyetlerini belirleyen bir diğer önemli parametre ise anizotropik özellikleridir. Malzemelerin mekanik özelliklerinin yöne bağlı olarak değişmesi anizotropi olarak isimlendirilmekte ve R sembolü ile gösterilmektedir. Anizotropi, şekillendirme esnasında malzemenin genişliğinde oluşan birim şekil değişiminin $\varepsilon w=\ln(w/w_0)$, kalınlıktaki birim şekil değişimine $\varepsilon t=\ln(t/t_0)$ oranı şeklinde ifade edilmektedir. Bazı durumlarda ölçümlerde malzemenin boyundaki ve

genişliğindeki birim şekil değiştirmeler belirlenerek kalınlıktaki değişimler hacmin korunumu prensibine göre eşitlik 6.2 veya 6.3' den hesaplanabilmektedir.

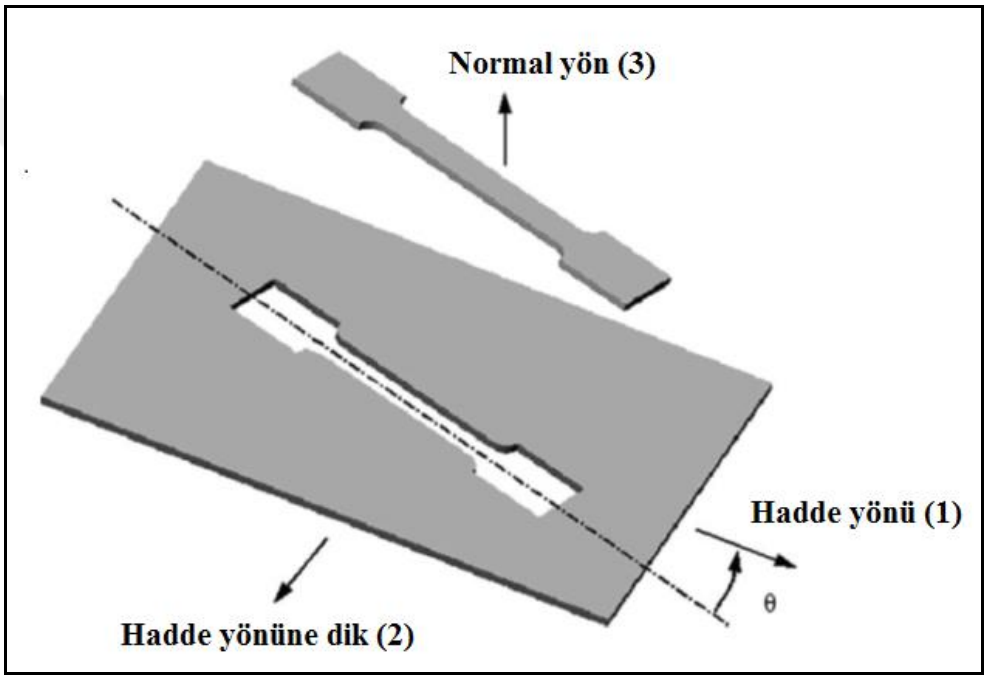
$$wtl = w_0 t_0 l_0 \quad (6.2)$$

veya

$$t/t_0 = (w_0 l_0)/(wl) \quad (6.3)$$

Bu durumda malzemenin anizotropi değeri Eşitlik 6.4 kullanılarak belirlenebilmektedir.

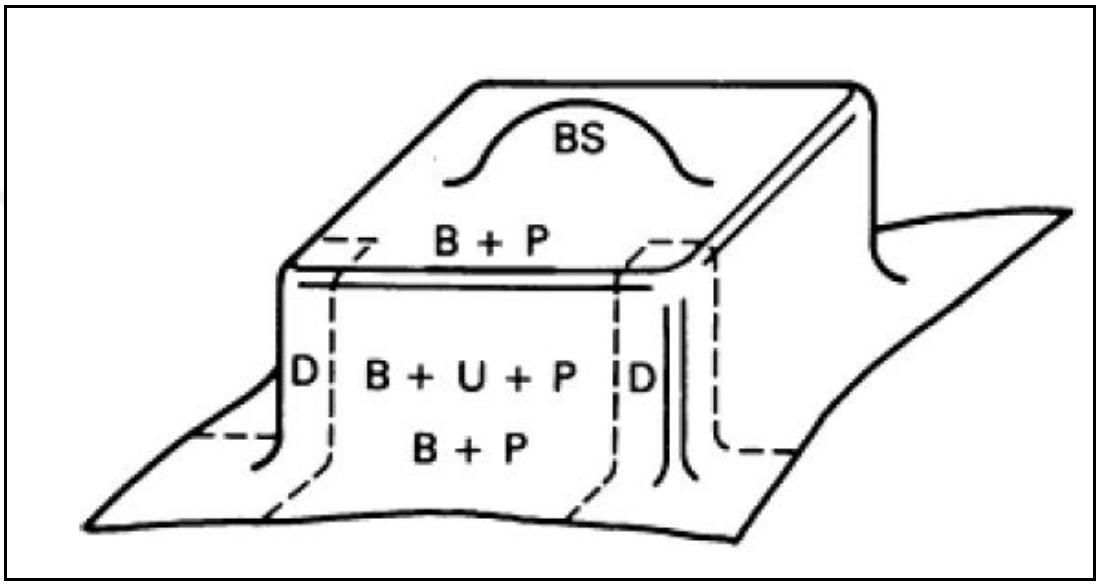
$$R = \ln(w/w_0) \,/\, \ln(w_0 l_0 / wl) \quad (6.4)$$



Şekil 6.28 Hadde yönüne belirli açı yapan çekme numunelerinin gösterimi [27]

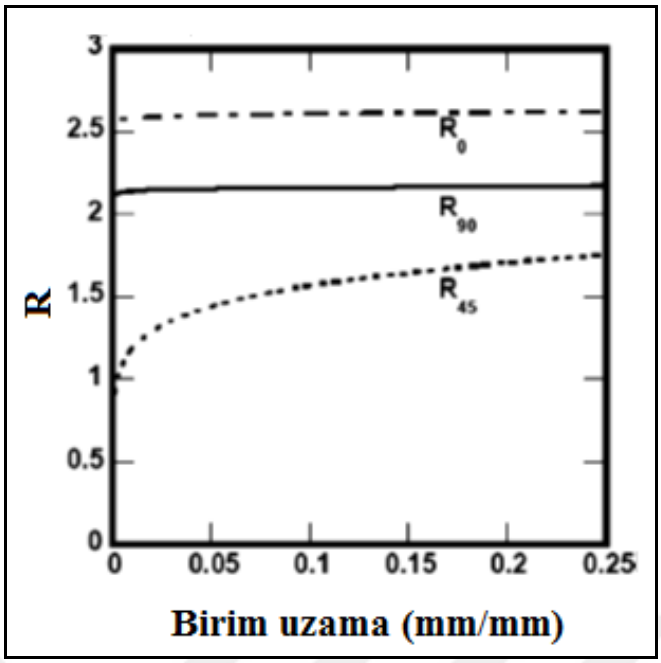
Özellikle haddeleme işlemi ile üretilen sac malzemelerde içyapıda tanelerin farklı yönlenmeleri neticesinde anizotropi özelliği gösterirler. Malzeme içyapısındaki tanelerin hadde yönünde deforme edilmesi ve bu yöne bağlı olarak içyapıda başlangıçtaki dislokasyonların haddeleme yönüne bağlı olarak değişmesi malzemenin mekanik özelliklerinin farklı olmasına sebep olmaktadır. Bu anlamda genel olarak bir malzemenin anizotropik özelliklerinin belirlenmesi için şekil 6.28 de gösterilen bir sac numuneden farklı yönlerde (Genel itibari ile literatürde bu özelliklerin belirlenmesi için geliştirilen modeller hadde yönü 0°, diyagonal yön 45° ve hadde yönüne dik 90°

doğrultularda hazırlanmış deney numunelerini kullanmaktadır) hazırlanmış çekme deneyi numuneleri hazırlanmaktadır. Böylelikle bu yönlerde hazırlanmış deney numunelerine çekme deneyi uygulanarak malzemelerin akma gerilmeleri, dayanımları, birim şekil değiştirme oranları, anizotropik katsayıları belirlenmektedir. Gerçek bir sac şekillendirme işleminde deformasyonlar sadece malzemenin tek bir doğrultusunda meydana gelmeyebilir. Şekil 6.29'da bir derin çekme işleminde malzeme üzerinde oluşabilecek gerilme tipleri gözlemlenmektedir.



Şekil 6.29 Tipik bir derin çekme işleminde malzeme üzerinde görülen deformasyon modları. B: Eğme, BS: İki eksenli gerdirme, D: Derin çekme, P: Düzlem birim deformasyon gerdirme, U: Düzeltme (tek eksenli) [27]

Malzemelerin genişliğindeki değişim testler boyunca ölçülürse R değeri sürekli bir şekilde elde edilebilir. Ancak R değerlerinde deformasyonla birlikte bir takım farklılıklar gözlemlenebilir bunun için genel de mühendislik uzamasının %15'ine denk gelen değer malzemenin anizotropi değeri olarak kabul edilmektedir.



Şekil 6.30 Malzeme anizotropi değerinin birim deformasyon ile değişimi

Şekil 6.28' de farklı yönlerde hazırlanan çekme deneyi numunelerinin sembolik olarak bir gösterimi yer almaktadır. Malzemelerin mekanik özelliklerinin yöne bağlı olarak değişip değişmediğini genelde farklı yönlerde hazırlanmış deney numunelerine çekme deneyi uygulayarak belirlenebilir ve bu deney numuneleri genel olarak hadde yönü, diyagonal ve hadde yönüne dik doğrultulardan hazırlanmış numunelerden belirlenmektedir [27]. Bu yöne bağlı değişimin hassasiyetinin artırılması adına daha dar aralıklarda numunelerin hazırlanıp anizotropi değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yöne bağlı olarak değişen anizotropi değerleri genelde R_0, R_{45} ve R_{90} olarak gösterilirler ve bunlarda sırası ile hadde yönü, diyagonal ve hadde yönüne dik olarak hazırlanmış numunelerin anizotropi değerlerini ifade etmektedirler. Eğer deneyleri yapılacak bir sac malzeme için bu değerler birbirinden farklı iseler planar (düzlemsel) anizotropiyi gösterdiği söylenebilir ve en genel ifadesi eşitlik 6.5' te verilmiştir.

$$\Delta R=(R_0+R_{90}-2R_{45})/2 \qquad (6.5)$$

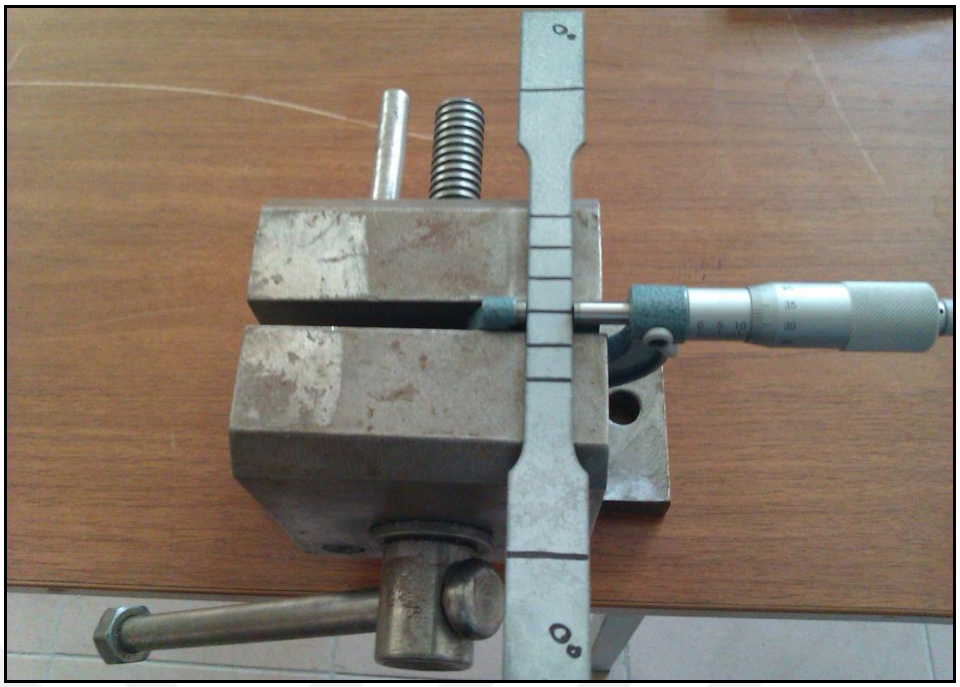
Eğer ölçülen anizotropi değeri birimden bağımsız ise, bu malzemelerin kalınlık ve genişliğindeki farklılıkları göstermekte olup normal (plastik) anizotropi oranı olarak tanımlanır ve eşitlik 6.6 ile belirlenmektedir.

$$R=(R_0+R_{90}+2R_{45})/4 \quad (6.6)$$

Düzlemsel anizotropi değeri pozitif veya negatif yönde büyük olursa şekillendirilen malzemelerde asimetriklik ve kulaklanma hataları büyük oranda gözlemlenebilmektedir. Eğer normal anizotropi oranı büyük değere sahip olursa çekme deneylerinde gözlemlenen genişlikteki deformasyonun kalınlıktaki deformasyondan büyük olduğunu göstermektedir. Bu ise malzemenin kalınlık yönünde büyük mukavemet göstermesi ile ilişkilendirilebilmektedir ve bu özellik derin çekme işlemlerinde malzemenin incelmeye karşı dayanımının artmasını ve daha derin parçaların elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca bu özellik şekillendirilen parçalarda kırışıklık ve malzeme yüzeyinde dalgalanma oluşma olasılığını da azaltmaktadır.

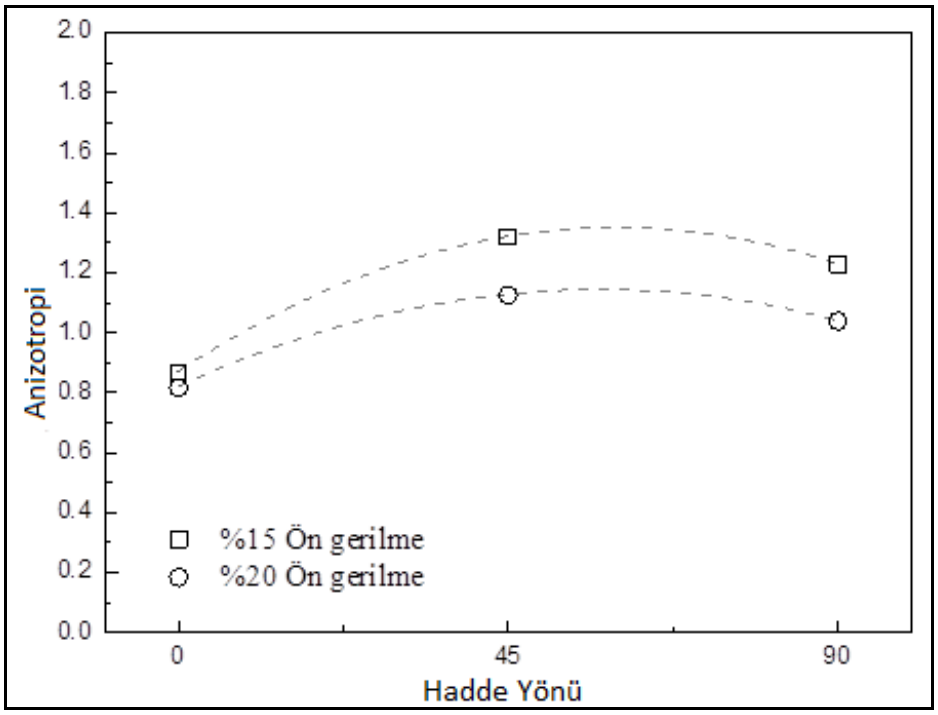
Daha öncede belirtildiği üzere malzemelerin anizotropi değerleri %15 mühendislik uzamasına tekabül eden değer olarak seçilmektedir. Bu çalışma kapsamında ise malzemede meydana gelen şekil değişimi büyük olmasından ötürü bir de %20 mühendislik uzamasında denk gelen anizotropi ölçümü de gerçekleştirilmiştir.

Malzemenin çekme deneyi süresince boyundaki ve enindeki boyutsal değişimler mekanik deformasyon ölçer (strain gage) veya video tipi deformasyon ölçer gibi çeşitli cihazlar kullanılarak belirlenebilmektedir. Yapılan çalışma kapsamında deney numunesinin boyunda ki değişim video tipi deformasyon ölçer kullanılarak belirlenmiştir. Ancak enindeki daralma ise malzemenin deformasyon bölgesine belirli aralıklarda çizilmiş çizgilerin mikrometre vasıtası ile ölçülmesiyle belirlenmiştir (şekil 6.31). Bunun için malzemelere belirli oranda ön birim deformasyon verilmiş daha sonrasında malzeme çenelerden alınarak aşağıdaki gösterilen biçimde ölçülmüştür.



Şekil 6.31 Anizotropilerin belirlenmesinde kullanılan yöntem [27]

Ölçüm sonucunda elde edilen veriler her bir yön ve ön birim deformasyon miktarı için Şekil 6.32' de gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere anizotropi değerleri açı ve birim deformasyon miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca veriler Tablo 1.2'de verilmiştir.



Şekil 6.32 Anizotropi değerlerinin yöne ve birim deformasyon miktarına göre değişimi.

Çizelge 6.4 TWIP çeliğinin anizotropi değerlerinin değişimi

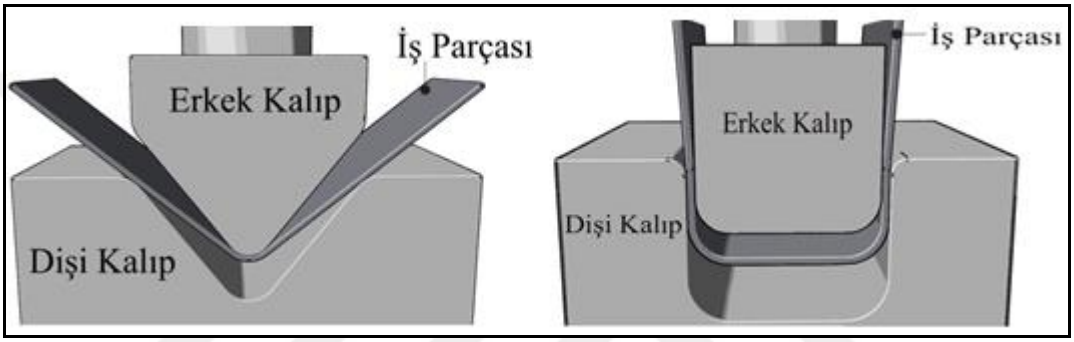
TWIP-ANİZOTROPİ	%15 Ön Gerilme	%20 Ön Gerilme
90	1,228173	1,038823
45	1,318775	1,125775
0	0,866968	0,816443

6.5 Geri Esneme Testi

Malzemelerde geri esneme şekillendirme esnasında kullanılan takımların uyguladığı yükün malzeme üzerinden kaldırılması neticesinde oluşan elastik şekil değişimi olarak tanımlanabilmektedir. Esasında bu durum şekillendirme işlemi neticesinde oluşan gerilme hallerinden kaynaklanan karmaşık bir fiziksel olaydır. Ürün geometrisine ve deformasyon işlemine bağlı olarak sac metal şekillendirme işlemlerinde eğilme, membran, çarpılma ve hem eğilme hem de çarpılmanın birlikte oluştuğu geri esneme türleri mevcuttur. Saf bükme geri esnemesi genelde düzlem birim deformasyon altında yapılan eğme işlemi neticesinde oluşur ki tez kapsamında da bu tip geri esnemenin deneysel ve sonlu elemanlarda ki tahmininin çalışması gerçekleştirilmiştir. Membran tip geri esneme ise düzlem içi gerilme veya basma hali oluşan malzemelerin yük boşalması esnasında oluşmaktadır. Çarpılma tipli geri esneme durumu ise numune üzerinde şekillendirme işlemi ile oluşan plastik birim deformasyon miktarlarının çok farklı olduğu durumlarda oluşmaktadır. Eğme ve membran tipli geri esneme davranışın birlikte oluştuğu durum endüstriyel uygulamalarda daha sık görülmektedir. Ürün geometrisi genelde çok karmaşık bir haldedir ve bu geometrilerde genelde germe ve basma gerilmeleri aynı anda oluşabilmektedir.

Malzemelerde geri esneme şekillendirme esnasında kullanılan takımların uyguladığı yükün malzeme üzerinden kaldırılması neticesinde oluşan elastik şekil değişimi olarak tanımlanabilmektedir. Esasında bu durum şekillendirme işlemi neticesinde oluşan gerilme hallerinden kaynaklanan karmaşık bir fiziksel olaydır. Ürün geometrisine ve deformasyon işlemine bağlı olarak sac metal şekillendirme işlemlerinde eğilme, membran, çarpılma ve hem eğilme hem de çarpılmanın birlikte oluştuğu geri esneme türleri mevcuttur. Saf bükme geri esnemesi genelde düzlem birim deformasyon altında

yapılan eğme işlemi neticesinde oluşur ki tez kapsamında da bu tip geri esnemenin deneysel ve sonlu elemanlarda ki tahmininin çalışması gerçekleştirilmiştir. Membran tip geri esneme ise düzlem içi gerilme veya basma hali oluşan malzemelerin yük boşalması esnasında oluşmaktadır. Çarpılma tipli geri esneme durumu ise numune üzerinde şekillendirme işlemi ile oluşan plastik birim deformasyon miktarlarının çok farklı olduğu durumlarda oluşmaktadır. Eğme ve membran tipli geri esneme davranışın birlikte oluştuğu durum endüstriyel uygulamalarda daha sık görülmektedir. Ürün geometrisi genelde çok karmaşık bir haldedir ve bu geometrilerde genelde germe ve basma gerilmeleri aynı anda oluşabilmektedir.



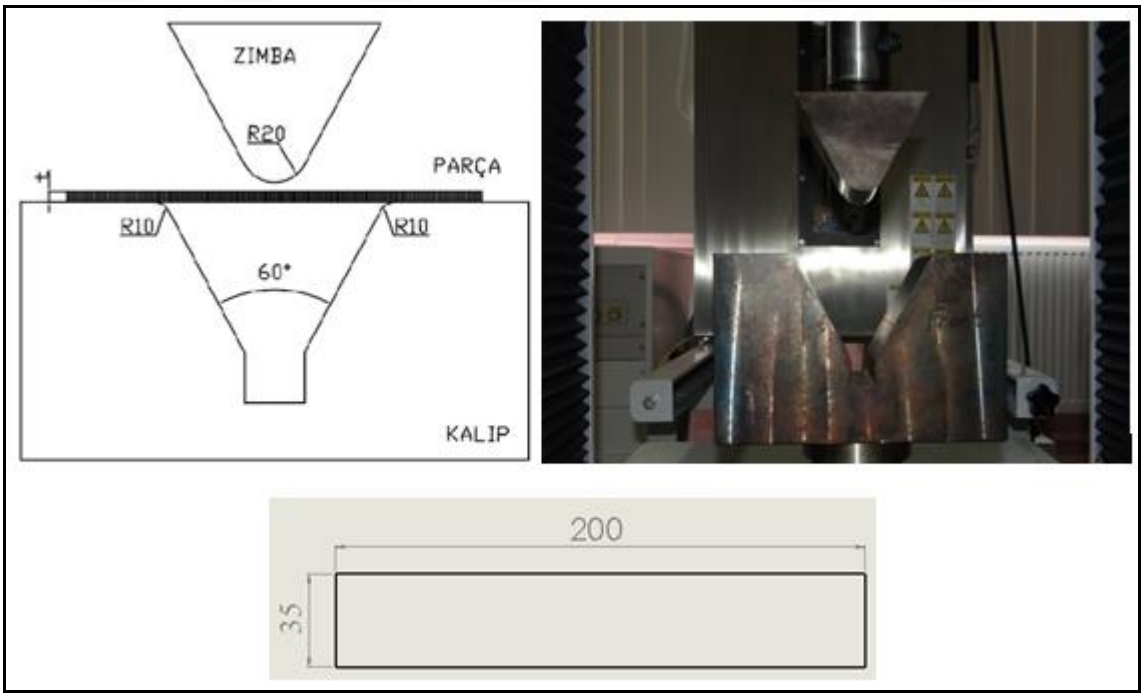
Şekil 6.33 Malzemelerin geri esneme davranışının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan deneysel yöntemler [27]

Geri esneme davranışının doğru bir şekilde modellenebilmesi için bu durumun iyi bir şekilde anlaşılması gerekmektedir. Malzemelerin geri esneme davranışlarının bir takım işlem parametrelerine olan bağımlılığını belirleyebilmek adına basit deneyler uygulanmaktadır. Bu deneyler içerisinde en popüler ve yaygın olanları silindirik eğme, U-eğme, V-eğme ve flanşlama'dır. Bu metotlar geri esnemenin büyük ve ölçümünün kolay olmasından dolayı oldukça çekicidir. Bu deneyler için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinde elde edilen verilerin deneysel sonuçlara olan yakınsama miktarı seçilen modeller ve malzeme parametreleri belirlenerek gerçek geometrilere uyarlanabilmektedir. Sonlu elemanlar analizi esnasında seçilen malzeme modellerinin uygunluğu ve güvenilirliği bu basit deneyler için belirlendikten sonra gerçek kalıplarda yapılan şekillendirme işlemlerinden elde edilen verilere olan güvenilirlikte artmaktadır. Daha sonrasında elde edilen bu verilere göre kalıplar tekrar tasarlanarak ve/veya işlem

parametreleri tekrar düzenlenerek malzemelerdeki geri esneme durumu büyük oranda elimine edilebilmektedir.

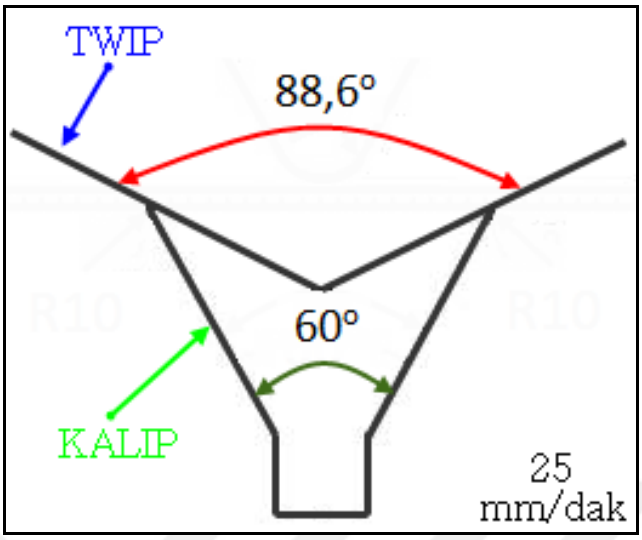
Malzemelerde şekillendirme işlemi neticesinde oluşan geri esneme davranışı; akma dayanımı, maksimum çekme dayanımı, elasitisite modülü, anizotropi değerleri vs. gibi malzeme özelliklerine, deformasyon hızı ve sıcaklığı gibi şekillendirme işleminin özelliklerine ve iş parçası kalınlığı, kullanılan kalıplardaki köşe bölgelerdeki çaplama oranları gibi iş parçası ve kalıp geometrileri gibi birçok parametreye bağlı bulunmaktadır. Elde edilen simülasyon sonuçlarının büyük oranda deneysel geri esneme değerlerine yakın sonuçlar verebilmesi için sistemin ve malzemelerin iyi bir şekilde modellenmesi gerekmektedir.

Çalışma kapsamında V-eğme şeklindeki geri esneme kabiliyetinin belirlenmesi adına 60°'lik V kalıbında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler Shimadzu marka çekme/basma cihazında şekillendirme mesafesi kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sistemine ait kalıp geometrileri, deney düzeneği ve deneyler için kestirilmiş numunelerin teknik çizimi şekil 6.34' de gösterilmiştir. Numuneler 200 x 35 x 1.3mm ebatlarında haddeleme yönüne paralel olarak kestirilmiştir.



Şekil 6.34 V-eğme için hazırlanmış deney kalıbı ve numune ölçüleri [27]

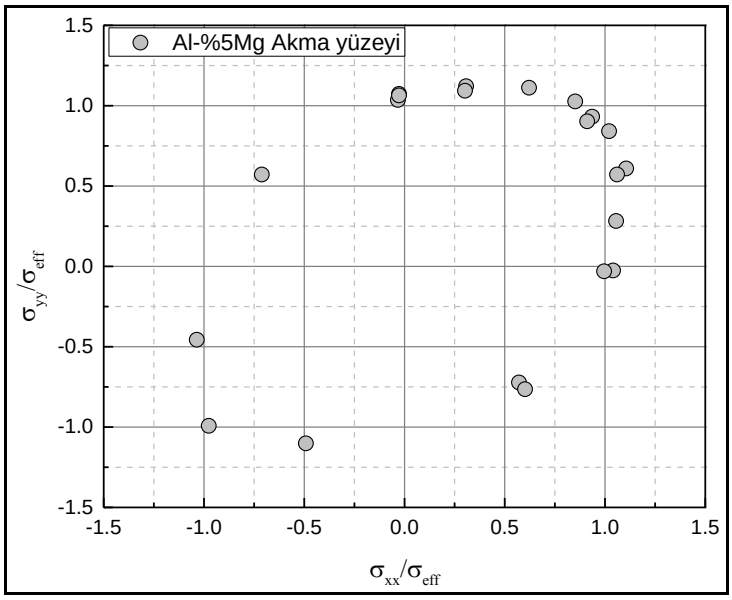
Gerçekleştirilen deney neticesinde TWIP çeliğinde toplam 28,6°'lik bir geri esneme açısı elde edilmiş olup şematik olarak şekil 6.35'de gösterilmiştir.



Şekil 6.35 TWIP çeliğinin geri esneme davranışının şematik olarak gösterimi

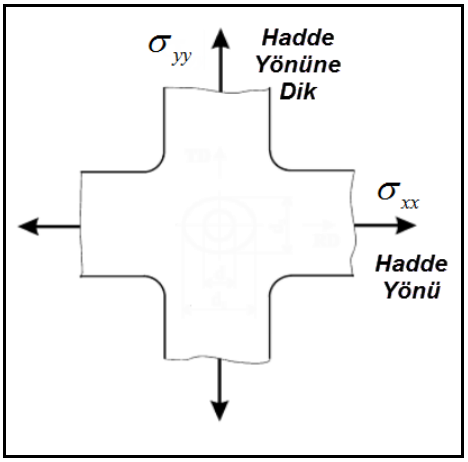
6.6 Akma Yüzeylerinin Belirlenmesi

Malzemelerde akma yüzeyi, üzerlerine uygulanan yük neticesinde oluşan gerilme dağılımlarının hangi kombinasyonunda plastik şekil değişimine başlayacağını gösteren diyagramlar olarak tanımlanabilmektedir. Tek eksenli çekme deneylerinde malzemenin plastik deformasyon başlangıcı, elde edilen gerilme birim deformasyon eğrisinden kolaylıkla belirlenebilirken, gerçek şekillendirme işlemlerinde olduğu gibi çok eksenli gerilme halinde plastik deformasyonun başlangıcını gösterir bir gerilme birim deformasyon eğrisi bulunmamaktadır. Bunun yerine malzeme üzerinde oluşan gerilmelerin kullanılması vasıtası ile belirlenen iki eksenli gerilme diyagramları oluşturulmaktadır (Şekil 6.36).



Şekil 6.36 Deneysel olarak elde edilmiş akma yüzeyi

Şekil 6.36' de farklı yönlerde eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiş yüklemeler neticesinde elde edilmiş Al alaşımına ait bir deneysel akma yüzeyi bulunmaktadır. Bir akma yüzeyi diyagramı tek eksenli çekme halini, iki eksenli çekme halini (aynı ve farklı oranlarda), basma halini ve saf kayma hallerinin hepsini ihtiva etmektedir. Ancak literatürde ağırlıklı olarak akma yüzeyleri tek ve iki eksenli gerdirme deneylerinden elde edilen veriler ($\sigma_{xx} \geq 0,\ \sigma_{yy} \geq 0$) kullanılarak oluşturulmaktadır. Tek eksenli akma gerilmeleri basit çekme deneyleri ile gerçekleştirilirken, iki eksenli gerdirme deneyleri ise düzlem gerdirme (Şekil 6.37), şişirme ($\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$) veya disk basma deneyleri neticesinde elde edilebilmektedir.



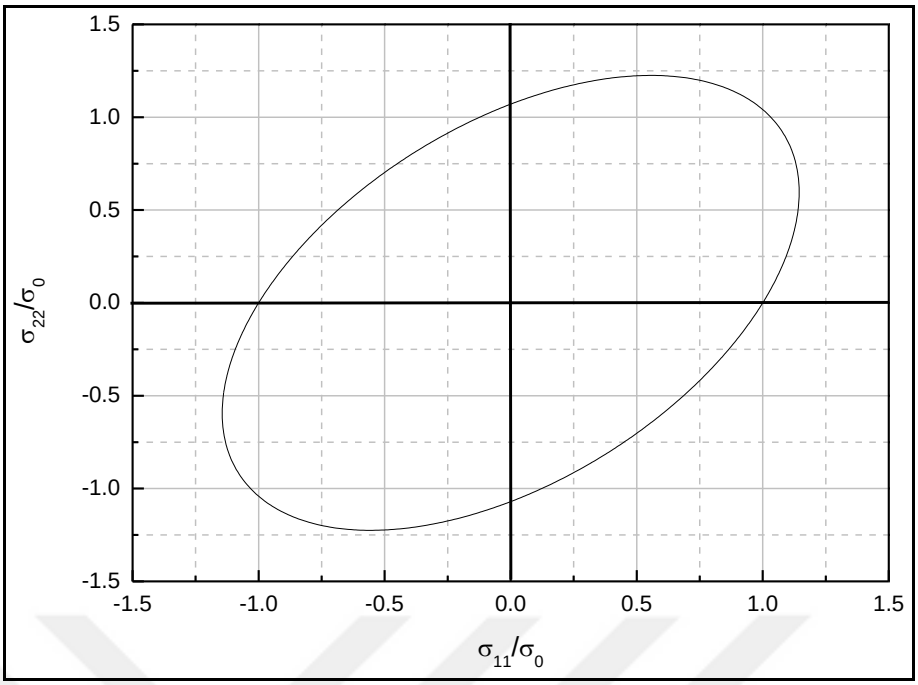
Şekil 6.37 Düzlemsel gerdirme deneyinin şematik görüntüsü

Yukarda belirtilen deney düzeneği ile iki ayrı yönde uygulanan gerilme oranları birbirlerinden farklı miktarlarda uygulanabilmektedir. Böylelikle pozitif bölge için kapsamlı deneysel veriler elde etmek mümkün olmaktadır. Bununla birlikte literatürde tez kapsamında da uygulanmış iki eksenli şişirme deneyi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu deney ile malzeme üzerinde düzlemsel olarak farklı iki yönde meydana gelen gerilmelerin eşit olması durumunda ki plastik akmanın başlangıç noktası belirlenebilmektedir. Benzer durum negatif bölge için disk basma deneyinden de elde edilebilmektedir. Malzemelerin çekme ve basma davranışlarının izotropik olduğu kabulünün yapılması ile bu deney ile elde edilmiş veriler akma yüzey diyagramının pozitif bölgesi içinde kullanılabilmektedir.

Daha önce de değinildiği üzere çok eksenli gerilme durumu altında malzemenin elastik bölgeden plastik bölgeye olan geçiş anını belirlemek çok zor olmaktadır. Bu anlamda yükleme durumunda malzeme üzerinde oluşan asal gerilmelerin eşitlik 6.7' de verilen koşulu sağlaması gerekmektedir.

$$f(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3,Y)=0 \tag{6.7}$$

Burada $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$ asal gerilmeler olup Y ise basit bir deneyden (çekme deneyi, basma deneyi veya kayma deneyi) elde edilmiş akma gerilmesidir. Eşitlik 6.7 asal gerilmelerin oluşturduğu üç boyutlu uzaydaki bir yüzeyin matematiksel formu olarak yorumlanabilmektedir. Bu yüzey kapalı, düzgün ve konveks yapıda olmalıdır. Şekil 6.38' de örnek bir akma yüzeyi gösterilmektedir. Bu akma yüzeyi düzlem gerilme halinin (sac malzemelerde kalınlık yönünde oluşan gerilmeler 0 olarak kabul edilmektedir.) olması durumunda elde edilen bir yüzeydir.



Şekil 6.38 Örnek bir akma yüzeyi

Şekilden de görüleceği üzere yukarda belirtilen özellikler akma yüzeyinde mevcut bulunmaktadır. Bu eğri içerisinde kalan her bölge henüz plastik akmanın başlamadığını, dışı ise plastik şekil değişiminin başladığını göstermektedir.

Akma yüzeylerinin basit deneysel verilerden elde edilen bir takım parametrelerinin kullanılması ile tahmin edilmesine yönelik çalışmalar oldukça yaygın olarak literatürde çalışılmaktadır. Genel itibari ile farklı yönlerde hazırlatılmış çekme deney numunelerine uygulanan basit tek eksenli çekme deneyleri ile elde edilen akma gerilmeleri ve devamında belirlenen anizotropi oranları kullanılarak malzemelerin akma yüzeyleri tahmin edilebilmektedir. Akma yüzeylerinin modellenmesi malzemelerin plastik şekil değişiminin tanımlanması adına oldukça önemli olmaktadır. Özellikle son yıllarda sonlu elemanlar analiz programlarında geri esneme ve şekillendirme gibi malzeme karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılan modellerin başında akma kriterleri gelmektedir. Sonlu elemanlar analiz programlarında kullanılan akma fonksiyonları deformasyon sonucunda oluşan iç gerilmelerin belirlenmesinde kullanılan önemli bir parametredir.

Bu çalışmada TWIP çeliğinin akma yüzeyinin belirlenmesinde, sonlu elemanlar yazılım programlarında gerçekleştirilen şekillendirme ve geri esneme simülasyonlarında sıkça

kullanılan kuadratik Hill-48, kuadratik olmayan Barlat-89 ve Barlat-2000 akma kriterlerinin etkinliği karşılaştırılmıştır.

6.6.1 Hill-48 Kuadratik Akma Kriteri

Sac malzemeler büyük çoğunlukla haddelemenin etkisi ile içyapıda tanelerin farklı yönlerde farklı oranlarda uzamasından dolayı anizotropik özellik göstermektedirler. Bu anlamda sac metal şekillendirme işlemlerinin simülasyonlarında anizotropik özelikleri kullanan modellerin kullanılması, elde edilen sonuçların daha doğru olmasını sağlamaktadır. Simülasyon programlarında kullanılan en yaygın anizotropik akma kriterlerinden biri olan Hill-48 (Hill, 1948) akma fonksiyonu eşitlik 6.8' de ifade edilmiştir.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (6.8)$$

Burada F, G, H, L, M ve N anizotropi sabitleri olup deneysel olarak elde edilmiş anizotropi katsayıları kullanılarak belirlenebilmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere sac metal şekillendirme işlemlerinde büyük çoğunlukla düzlem gerilme hali kabulü yapılmaktadır. Yani bir yönde meydana gelen gerilme değeri diğer yönlerde meydana gelen gerilme değerlerine nazaran oldukça küçük olduğundan dolayı ihmal edilmektedir. Sac malzemelerde bu anlamda kalınlık yönünde oluşan gerilmeler ihmal edilmektedir. Bu durum ilgili hesaplamalarda büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Düzlem gerilme altında Hill-48 akma fonksiyonu eşitlik 6.9' daki gibi yazılabilir;

$$2f(\sigma_{ij}) = (G+H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H+F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (6.9)$$

Eşitlik 6.9' daki F, G, H ve N parametreleri, deneysel olarak ve sac üzerinde farklı yönlerde hazırlanmış çekme deney numunelerinden elde edilen r_0, r_{45}, r_{90} anizotropi değerleri cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$F = \frac{r_0}{r_{90}(1+r_{90})},\ G = \frac{1}{(1+r_0)},\ H = \frac{r_0}{(1+r_0)},\ N = \frac{(r_0+r_{90})(1+2r_{45})}{2r_{90}(1+r_0)} \quad (6.10)$$

Bununla birlikte Hill-48 akma kriteri, normal gerilmeler cinsinden Eşitlik 6.11' deki şekli ile ifade edilebilmektedir.

$$\sigma_{11}^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_{11}\sigma_{22} + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_{22}^2 + \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)}(2r_{45}+1)\sigma_{12}^2 = \sigma_0^2 \quad (6.11)$$

Asal gerilmeler cinsinden yazılacak olursa, σ_{12} = 0 olmaktadır ve eşitlik 6.11, eşitlik 6.12 şeklinde yazılabilmektedir.

$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2^2 = \sigma_0^2 \quad (6.12)$$

6.6.2 Barlat-89 Akma Kriteri

Barlat ve Lian (1989) tarafından geliştirilen kuadratik olmayan anizotropik akma kriteri aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir;

$$\phi = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m = 2\sigma_y^m \quad (6.13)$$

Burada σ_y tek eksenli çekme deneyinden elde edilen akma gerilmesi değeridir. K_1 ve K_2 ler ise aşağıdaki şekilde eksen gerilmeleri cinsinden ifade edilebilmektedir.

$$K_1 = \frac{\sigma_x + h\sigma_y}{2}, \qquad K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + h\sigma_y}{2}\right)^2 + p^2\tau_{xy}^2} \quad (6.14)$$

$$a = 2 - c = 2 - 2\sqrt{\frac{r_0}{1+r_0}\frac{r_{90}}{1+r_{90}}}, \; h = \sqrt{\frac{r_0}{1+r_0}\frac{1+r_{90}}{r_{90}}} \quad (6.15)$$

Anizotropik malzeme sabitleri olan a, c ve h değerleri anizotropi değerleri cinsinden r_0, r_{45} ve r_{90}, eşitlik 6.15' deki gibi ifade edilebilmektedir. Uygulanan tek eksenli çekme deneyinde kayma gerilmesi olmadığından dolayı p değeri önemsiz olmaktadır. Bununla birlikte p değeri Newton'un iteratif yöntemi ile de belirlenebilmektedir.

6.6.3 Düzlem Gerilme Akma Fonksiyonu Yld2000-2d

Haddelenmiş sac malzemelerin anizotropik davranışını karakterize etmek için, bir diğer akma yüzeyi fonksiyonu Barlat vd. (2003) tarafından düzlem gerilme durumu için oluşturulmuştur. Literatürde bu fonksiyon Yld2000-2d olarak anılmaktadır. Barlat89 gibi daha önce sunulan akma kriteri ile karşılaştırıldığında bu akma fonksiyonda

malzemenin anizotropik özelliğinin karakterize eden 8 adet parametre yer almaktadır. Bu 8 parametre deneysel olarak belirlenen farklı yönlerdeki akma gerilmeleri (σ_0, σ_{45}, σ_{90}, σ_b) ve anizotropi (r_0, r_{45}, r_{90}, r_b) değerleri sayesinde belirlenebilmektedir. Burada σ_b ve r_b değerleri dengelenmiş iki eksenli gerilme ($\sigma_{11} = \sigma_{22}$) durumunda elde edilmektedir ki elde ediliş yöntemleri daha önce tanımlanmıştır. Bununla birlikte iki eksenli anizotropi değeri literatürden 0,7 olarak belirlenmiştir.

Yld2000-2d akma fonksiyonu en genel halde aşağıdaki gibi verilebilir;

$$f^{\frac{1}{M}} = \left\{\frac{\phi}{2}\right\}^{\frac{1}{M}} = \bar{\sigma} \tag{6.16}$$

Burada $\bar{\sigma}$ efektif gerilme, M değeri malzemelerin kristalografik yapısına göre belirlenen bir katsayı olup Hosford (1972) yapmış olduğu çalışmalara göre HMK yapıya sahip malzemeler için önerisi olan 6 değeri kullanılmıştır ve ϕ ifadesi ise;

$$\phi = \left|\tilde{S}'_I - \tilde{S}'_{II}\right|^M + \left|\tilde{S}'_I + 2\tilde{S}'_{II}\right|^M + \left|2\tilde{S}'_I + \tilde{S}'_{II}\right|^M \tag{6.17}$$

burada $\tilde{S}'_k$ and $\tilde{S}''_k$ (k=1,2) deviatorik deviatorik gerilme tensörü s̃'in asal değerleri olup iki lineer dönüşüm uygulayarak elde edilmektedir;

$$\tilde{s}' = C' \cdot s = C' \cdot T \cdot \sigma = L' \cdot \sigma \tag{6.18}$$

$$\tilde{s}'' = C'' \cdot s = C'' \cdot T \cdot \sigma = L'' \cdot \sigma \tag{6.19}$$

Burada C' and C'' anizotropik sabitleri ihtiva etmekte olup T, Cauchy gerilme tensörü olan σ'yı deviatörü olan s tensörüne dönüştürmektedir. Bu dönüşüm için kullanılan iki lineer dönüşüm matrisi eşitlik 6.20 ve 6.21' de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} L'_{11} \\ L'_{12} \\ L'_{21} \\ L'_{22} \\ L'_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 & 0 \\ -1/3 & 0 & 0 \\ 0 & -1/3 & 0 \\ 0 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_7 \end{bmatrix} \tag{6.20}$$

ve

$$\begin{bmatrix} L''_{11} \\ L''_{12} \\ L''_{21} \\ L''_{22} \\ L''_{66} \end{bmatrix} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} -2 & 2 & 8 & -2 & 0 \\ 1 & -4 & -4 & 4 & 0 \\ 4 & -4 & -4 & 1 & 0 \\ -2 & 8 & 2 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_8 \end{bmatrix} \tag{6.21}$$

Burada yer alan α_1-α_8 değerleri anizotropik katsayıları vermektedir.

6.6.4 Anizotropi Katsayılarının Belirlenmesi

Normalde Hill-48 akma kriterinde bulunan F, G, H, L, M ve N anizotropi parametreleri malzemenin akma gerilmeleri değerleri veya daha önce de belirtildiği Lankford parametreleri r_0, r_{45}, r_{90} kullanılarak belirlenebilmektedir. Buna bağlı olarak malzemenin akma yüzeyi yukarıda verilen parametreler kullanılarak kolayca oluşturulabilmektedir ki bu çalışma kapsamında bu yöntemle belirlenen akma yüzeyi "Durum- I" olarak isimlendirilmiştir. Çalışma kapsamında bu duruma ilave olarak F,G,H ve N parametreleri bir hata fonksiyonu tanımlayarak ve tanımlanan bu hata fonksiyonunun minimizasyonunun yapılması sonucunda da belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan bu çalışma ise "Durum-II" olarak isimlendirilmiştir. Bu çalışmadaki temel amaç ise akma yüzey fonksiyonları kullanılarak farklı yönler için hesaplanan akma gerilmelerinin ve anizotropi değerlerinin daha hassas bir şekilde hesaplanmasını sağlayacak katsayıların belirlenmesidir. Hata fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır;

$$\varepsilon(parametre) = \sum_{i=1}^{k}\left(\frac{Y_{\varphi i} - \sigma_{\varphi i}^{den}}{\sigma_{\varphi i}^{den}}\right)^2 + \sum_{i=1}^{k}\left(\frac{\bar{r}_{\varphi i} - r_{\varphi i}^{den}}{r_{\varphi i}^{den}}\right)^2 = Min \tag{6.22}$$

Burada φ_i hadde yönüne göre hazırlanmış malzeme açısını göstermektedir. Fonksiyonda ki Y_{φ_i} ve $\bar{r}_{\varphi_i}$ ifadeleri ise sırası ile farklı yönler için hesaplanan akma gerilmelerini ve anizotropi değerlerini göstermektedir ki Eşitlik 6.23 ve 6.24 kullanılarak belirlenmiştir.

$$Y_{\varphi} = \frac{\bar{\sigma}}{F_{\varphi}} \tag{6.23}$$

$$\bar{r}_{\varphi} = \frac{\bar{\sigma}}{Y_{\varphi}\left(\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma_{11}} + \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\sigma_{22}}\right)} - 1 \tag{6.24}$$

Bu değerlerin hesaplatılmadan önce efektif gerilme fonksiyonunda tanımlanan gerilme değerleri haddeleme açısının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmelidir.

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= Y_{\varphi}\cos^2(\varphi)\\ \sigma_{22} &= Y_{\varphi}\sin^2(\varphi)\\ \sigma_{12} &= Y_{\varphi}\sin(\varphi)\cos(\varphi)\end{aligned} \tag{6.25}$$

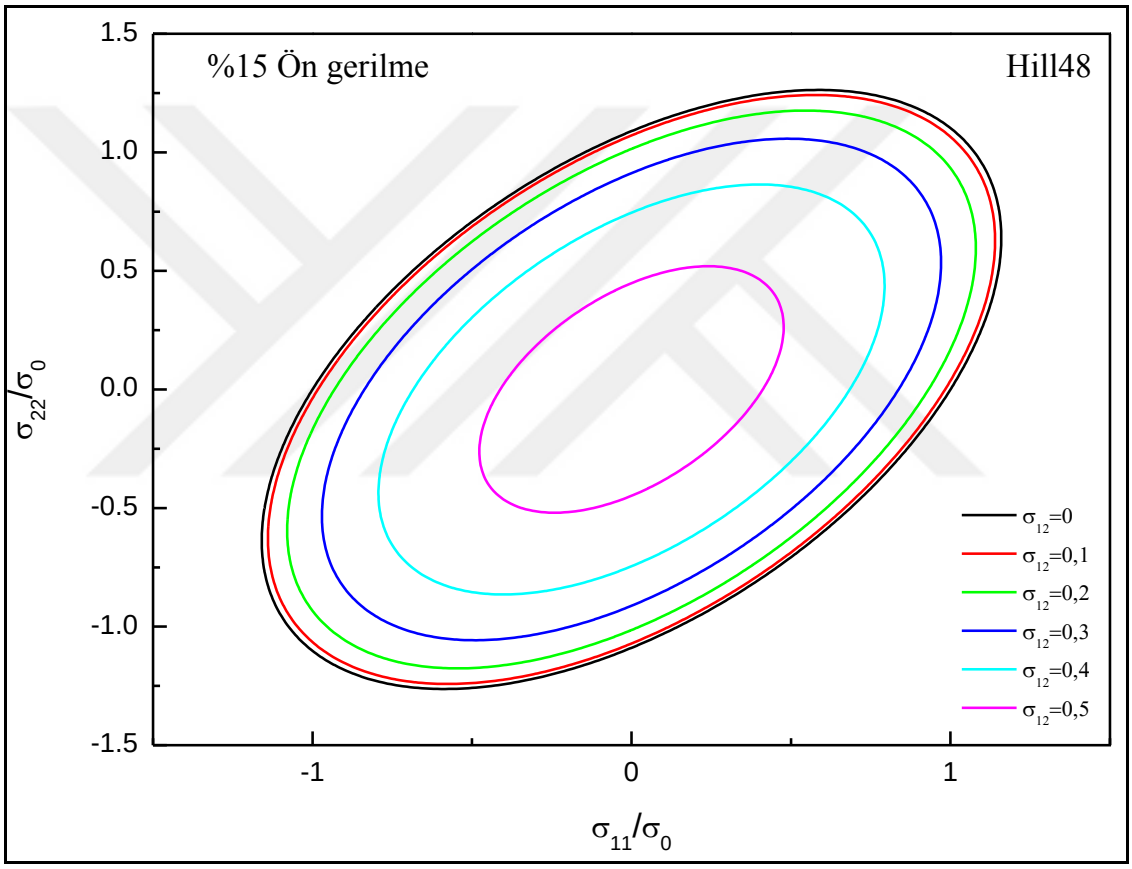
Eşitlik 6.25 daha sonra efektif gerileme ifadesinde yazıldıktan sonra buradan Y_{φ} çekilebilmektedir. Yukarda belirtilen minimizasyon yöntemi ayrıca Barlat-89 akma kriterinin anizotropik katsayılarının belirlenmesi için de kullanılmıştır.

6.6.5 Anizotropik Akma Fonksiyonların TWIP Çeliğine Uyarlanması

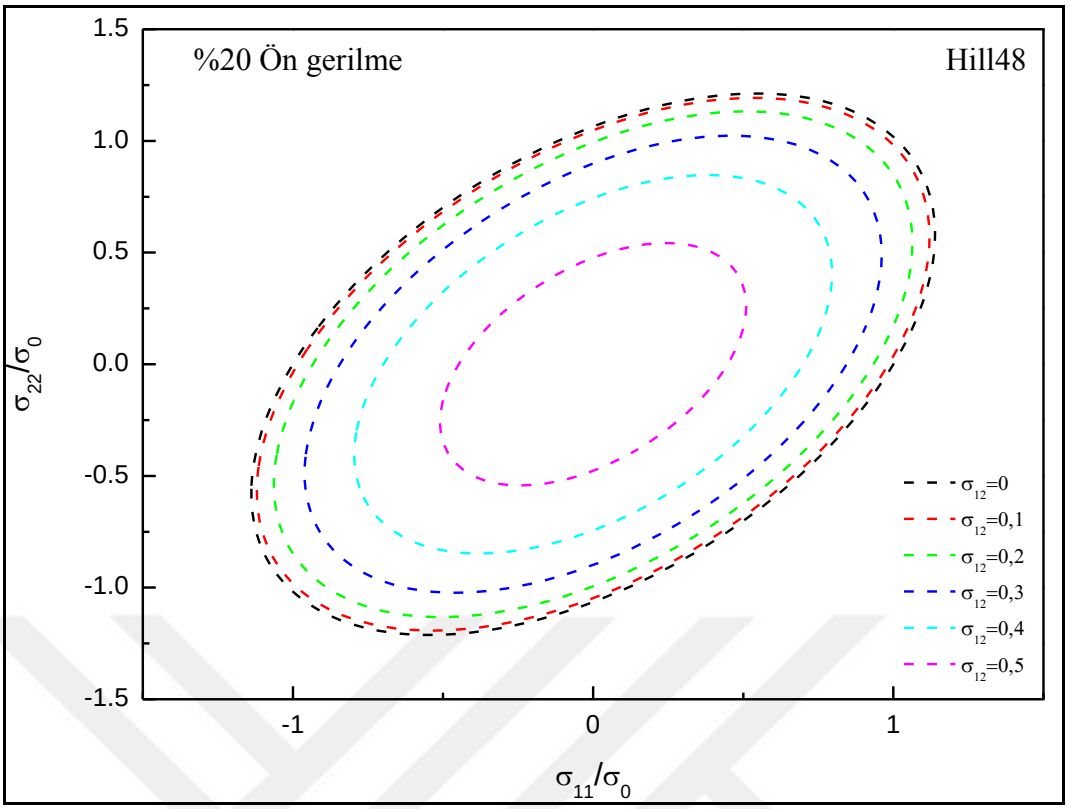
Bu çalışmada, akma yüzeyi fonksiyonlarının TWIP çeliği için temsil etme kabiliyeti Eşitlik 6.23 ve 6.24' de verilen fonksiyonların kullanılması ile hesaplanan akma gerilmesi ve anizotropi değerlerinin farklı yönler için değişiminin deneysel verilerle uyuşup uyuşmadığının kontrolü yapılarak tespit edilebilmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere TWIP çeliğinin farklı plastik şekil değişimlerine karşılık gelen anizotropi

değerlerinin her biri için akma yüzeyleri ayrı ayrı oluşturulmuş, akma yüzeyleri aşağıda verilmiştir.

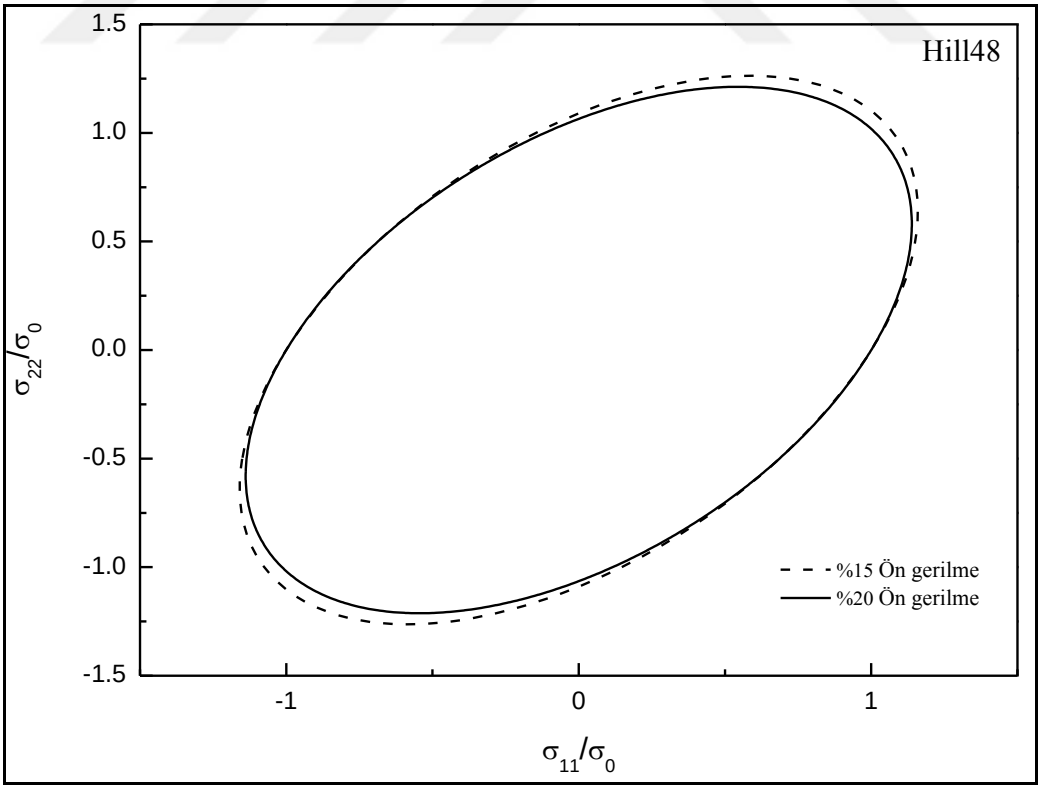
Şekil 6.39, 6.40, 6.41' de farklı ön birim deformasyon değerlerinden elde edilmiş anizotropi değerleri kullanılarak belirlenmiş akma yüzeyleri gösterilmektedir. Ayrıca bu akma yüzeyleri malzemede oluşan farklı kayma değerleri için ($\tau_{12} = 0, 0.1.0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) çizdirilmiştir. Sistemde kayma gerilmesi değeri arttıkça akma yüzeyi daralmaktadır. Bu durum ise sistemde plastik deformasyonunu daha erken gerilme değerlerinde oluşacağını göstermektedir.



Şekil 6.39 Hill 48 akma yüzey fonksiyonunun farklı ön birim deformasyonu için değişimi

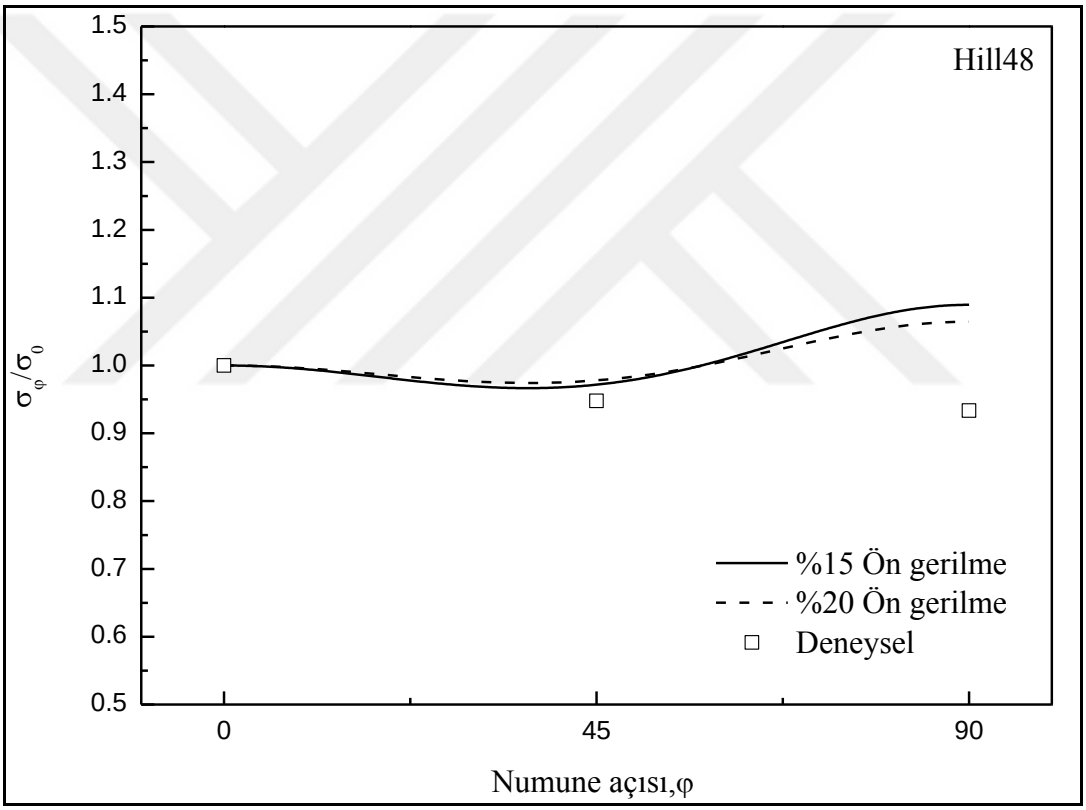


Şekil 6.40 Hill 48 akma yüzey fonksiyonunun farklı ön birim deformasyonu için değişimi

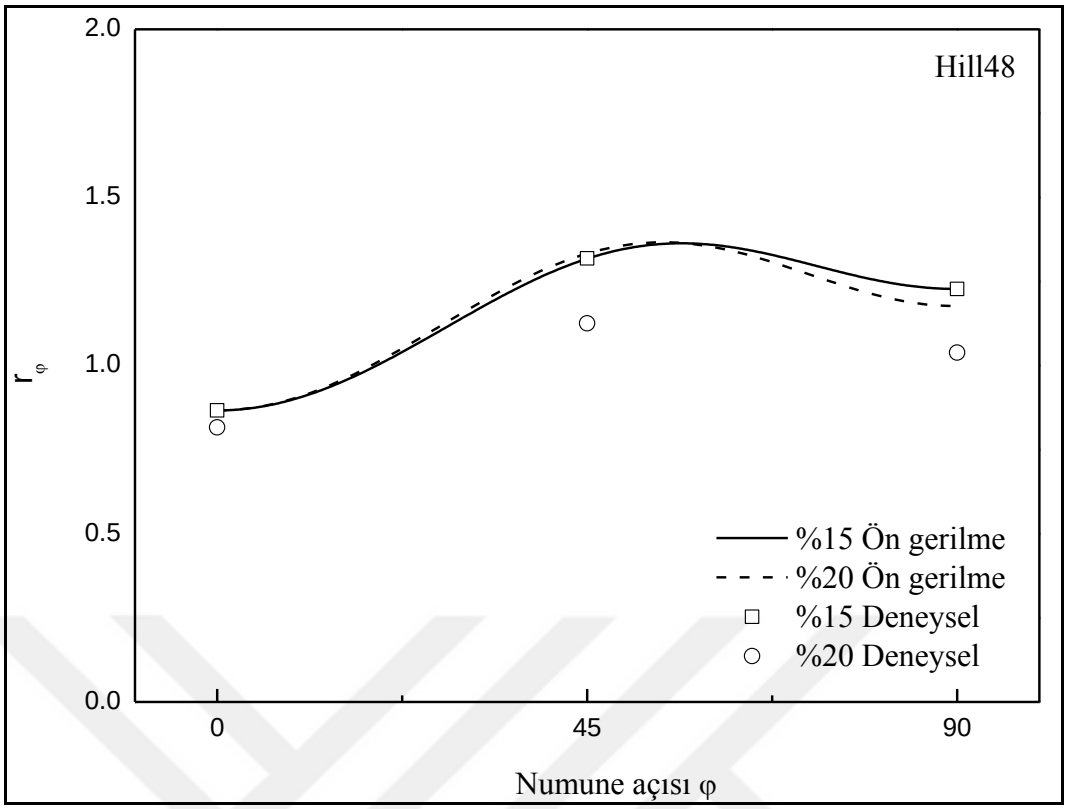


Şekil 6.41 Hill 48 akma yüzey fonksiyonunun farklı ön birim deformasyonu için değişimi

Hill-48 anizotropik akma yüzey fonksiyonu kullanılarak malzemeye ait akma gerilmesi ve anizotropi değerlerinin malzemenin yönüne bağlı olarak değişimi her bir ön birim deformasyondan elde edilmiş anizotropi değerleri için kıyaslamalar, sırası ile şekil 6.42 ve 6.43' de gösterilmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere Hill-48 deneysel verileri tahmin etmede başarılı olamamaktadır. Bu durum ise modelin malzemeyi temsil etmede başarılı olamadığı anlamına gelmektedir. Akma gerilme değerlerinin malzeme yönüne bağlı olarak değişiminin hesaplatılmasında ve akma yüzeylerinin gösterilmesinde şekilden de görüleceği üzere normalize edilmiş değerlere göre çizdirilmiştir. Burada her bir gerilme değeri haddeleme yönünden elde edilmiş akma gerilmesi değerine bölünerek hesaplatılmıştır.

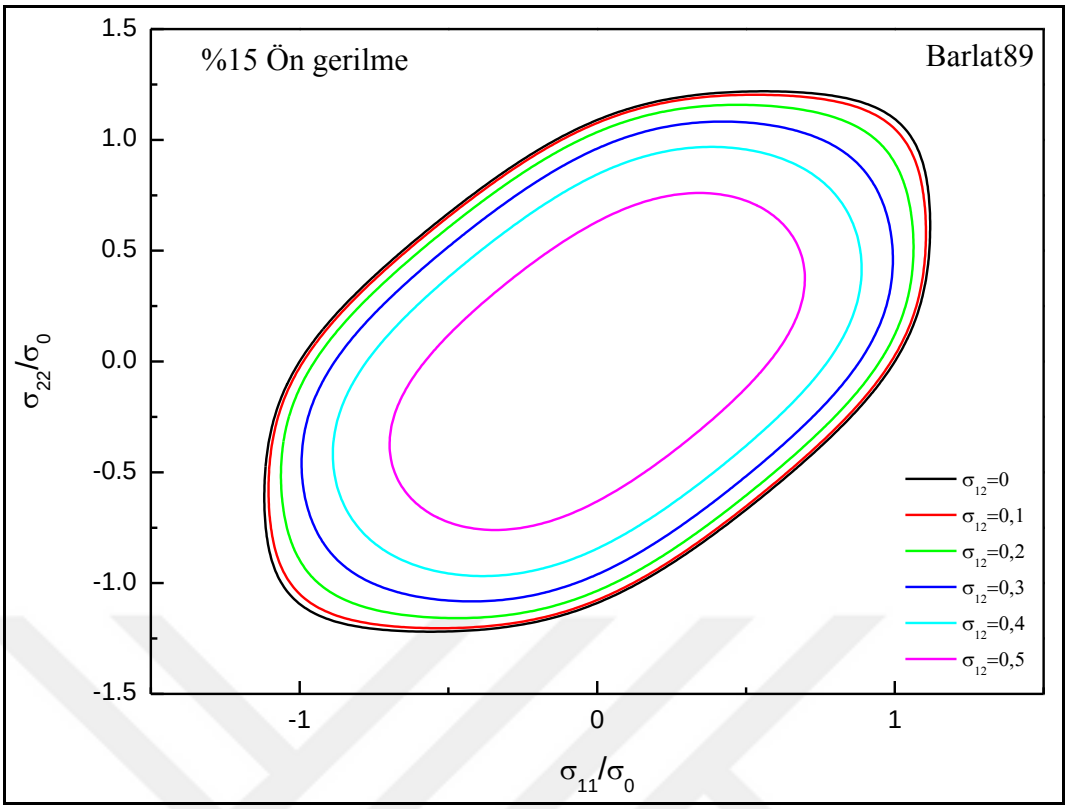


Şekil 6.42 Normalize edilmiş akma gerilmesi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Hil-48 ile modellenmesi

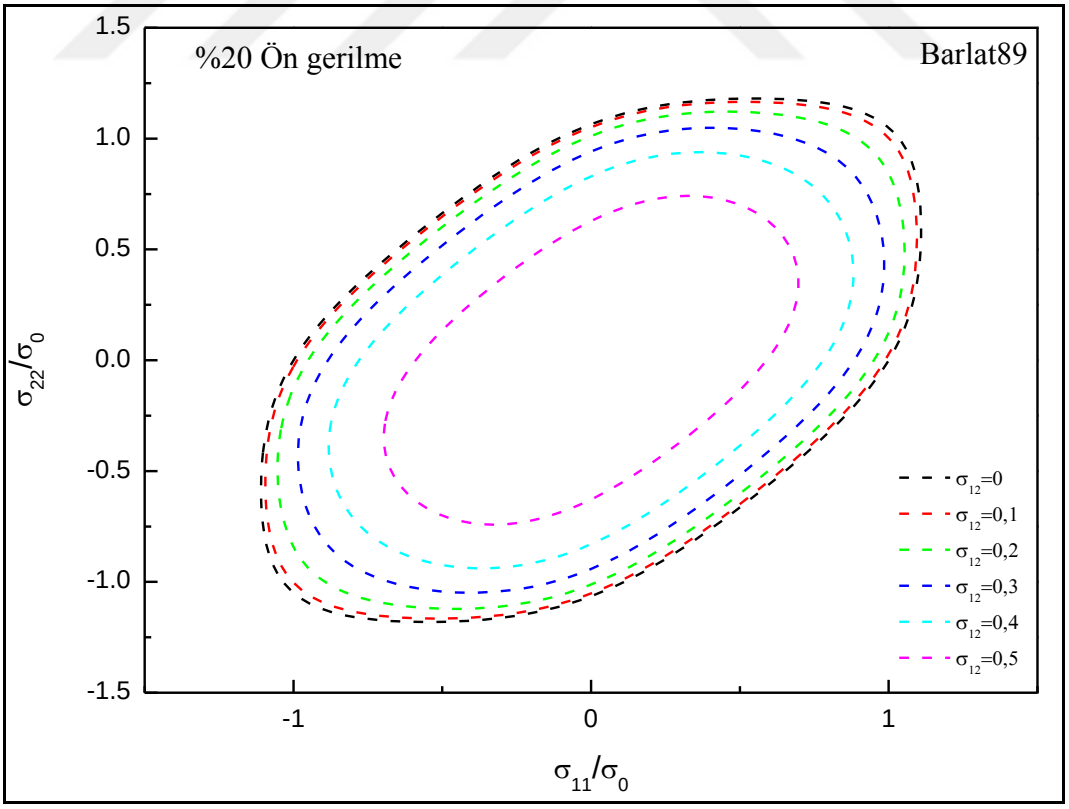


Şekil 6.43 Anizotropi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Hil-48 ile modellenmesi

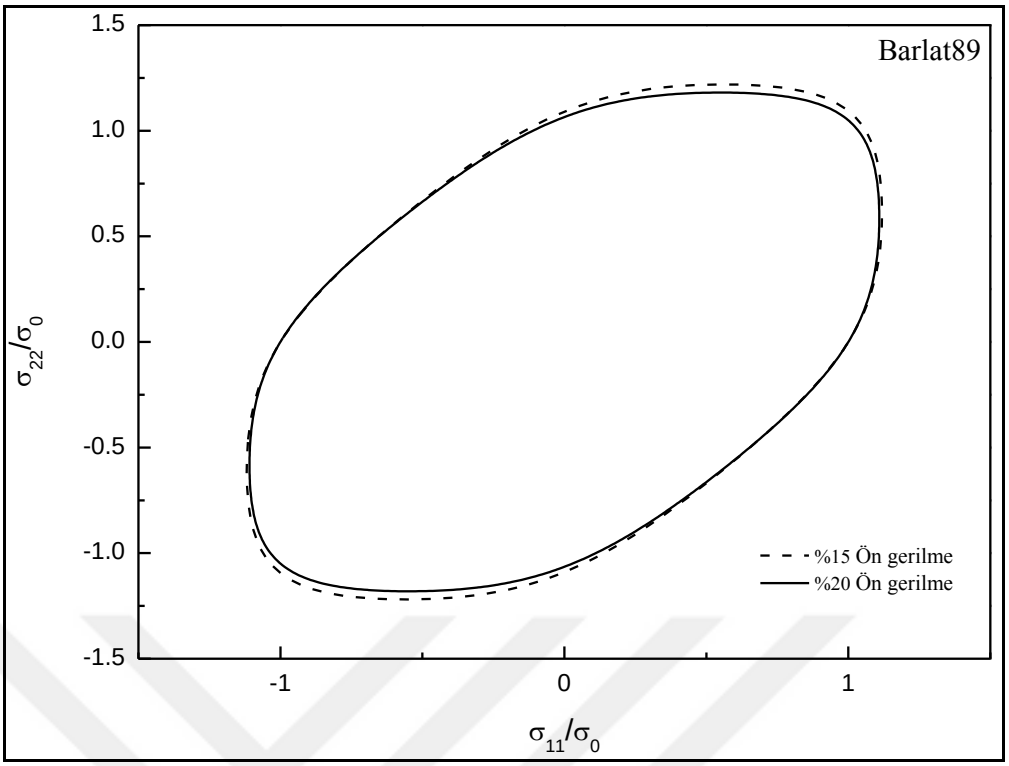
Barlat-89 anizotropik akma yüzeyi fonksiyonu ile aynı durum için elde edilen sonuçlar ise aşağıda verilmiştir. Şekil 6.44 ile 6.45' de farklı ön birim deformasyonlardan elde edilmiş anizotropi değerlerinin kullanılması ile oluşturulan yüzeyler ve şekil 6.46' da ise kayma gerilmesi değerinin 0 olduğu durum için elde edilmiş yüzeylerin karşılaştırmaları gösterilmektedir. Şekil 6.46 incelendiğinde %15 ön birim deformasyondan elde edilmiş akma yüzeyi iki eksenli çekme ve basma gerilmeleri için daha büyük olmaktadır. Bu durum Hill-48 içinde benzer olarak elde edilmiştir. Öyle ki bu durum elastik enerji miktarını da etkilediğinden dolayı hesaplatılan geri esneme sonuçlarını da etkileyebilecektir.



Şekil 6.44 Barlat 89 ile belirlenen akma yüzeyleri

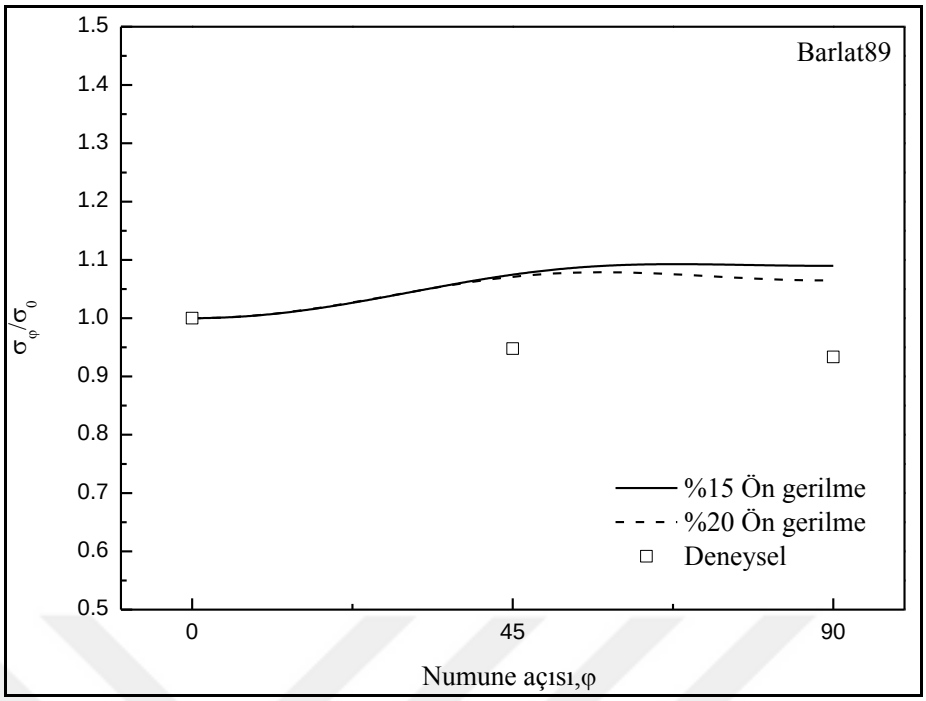


Şekil 6.45 Barlat 89 ile belirlenen akma yüzeyleri

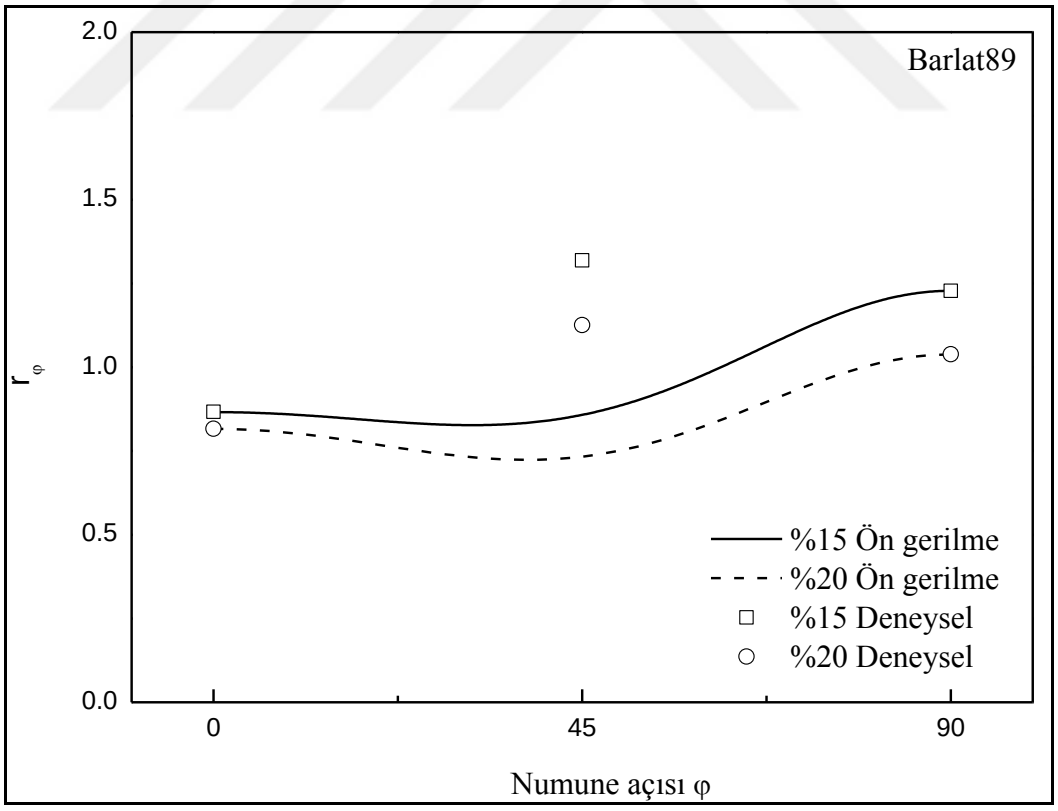


Şekil 6.46 Barlat 89 ile belirlenen akma yüzeyleri

Şekil 6.47 ve 6.48' de ise normalize edilmiş akma gerilmelerinin ve anizotropi değerlerinin malzeme yönüne bağlı olarak değişimi ile Barlat 89 anizotropik akma yüzeyi fonksiyonu ile yapılan tahmin gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre de Barlat-89 akma kriteri malzemenin bu özelliklerini karakterize etmede başarılı olamamıştır.

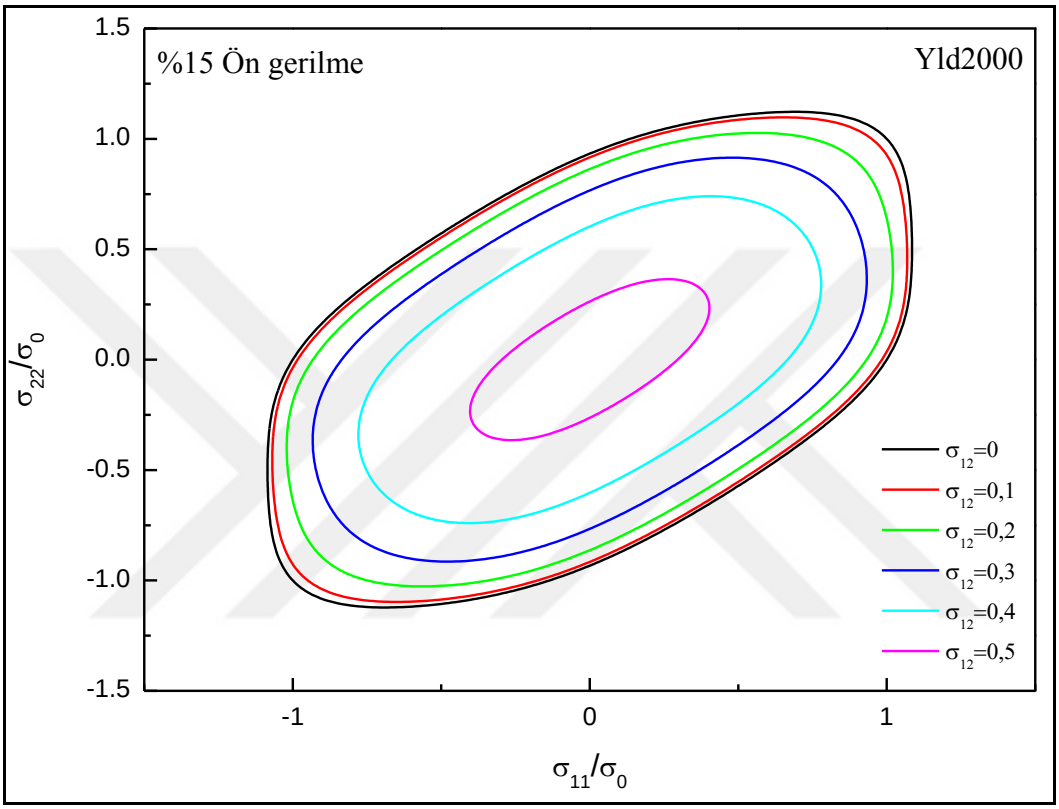


Şekil 6.47 Normalize edilmiş akma gerilmesi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Barlat-89 ile modellenmesi

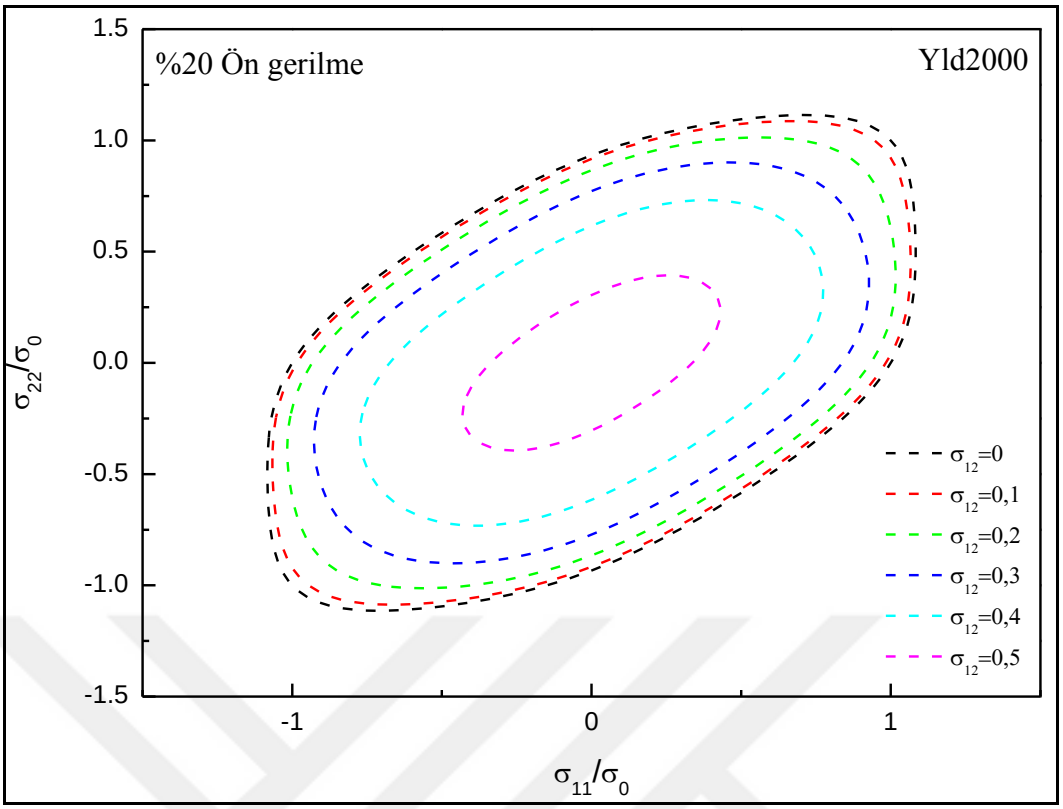


Şekil 6.48 Anizotropi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Barlat-89 ile modellenmesi

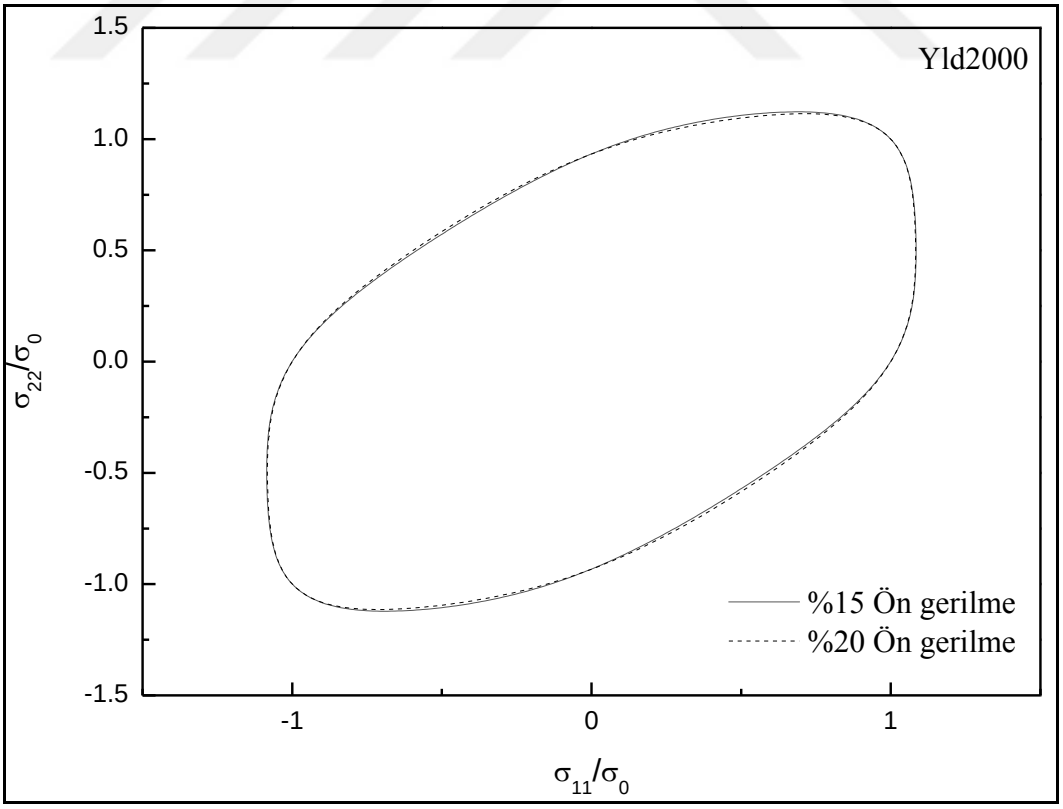
Çalışma kapsamında son olarak yine Barlat tarafından geliştirilen YLD2000 akma kriteri de malzemenin akma yüzeyini karakterize etmede kullanılmıştır. Malzemenin akma gerilme değerlerinin ve anizotropi değerlerinin farklı açı değerleri için yaptığı tahminlerde en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir. Bunun temel sebebi ise model içerisinde yer alan anizotropi sabitlerinin malzemenin hem akma hem de anizotropi değerlerinin referans alınarak belirlenmesinden kaynaklanmaktadır.



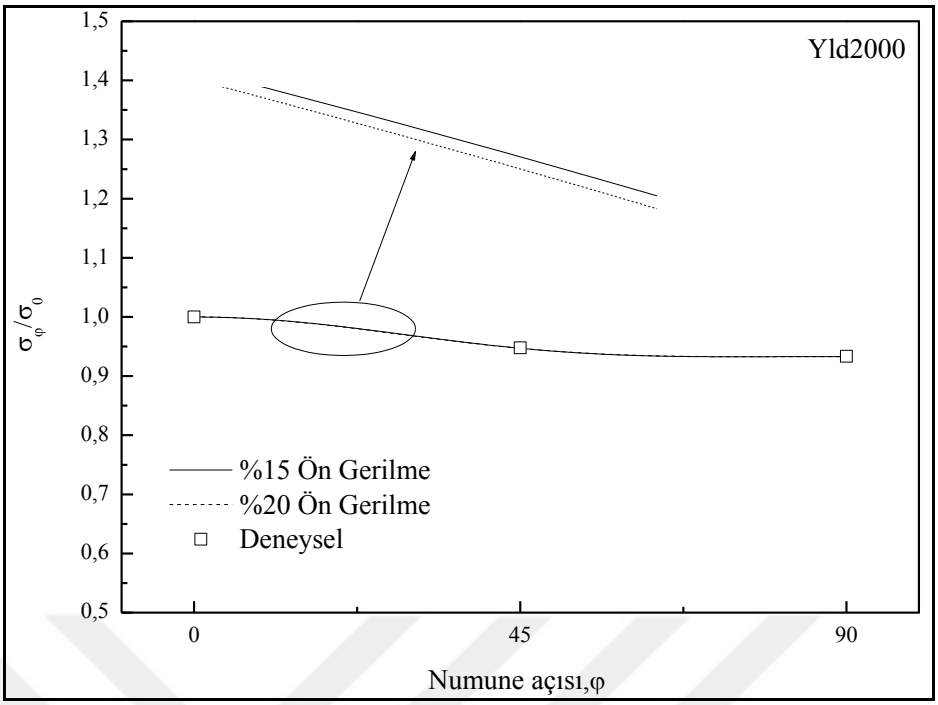
Şekil 6.49 Yld2000 ile belirlenen akma yüzeyleri



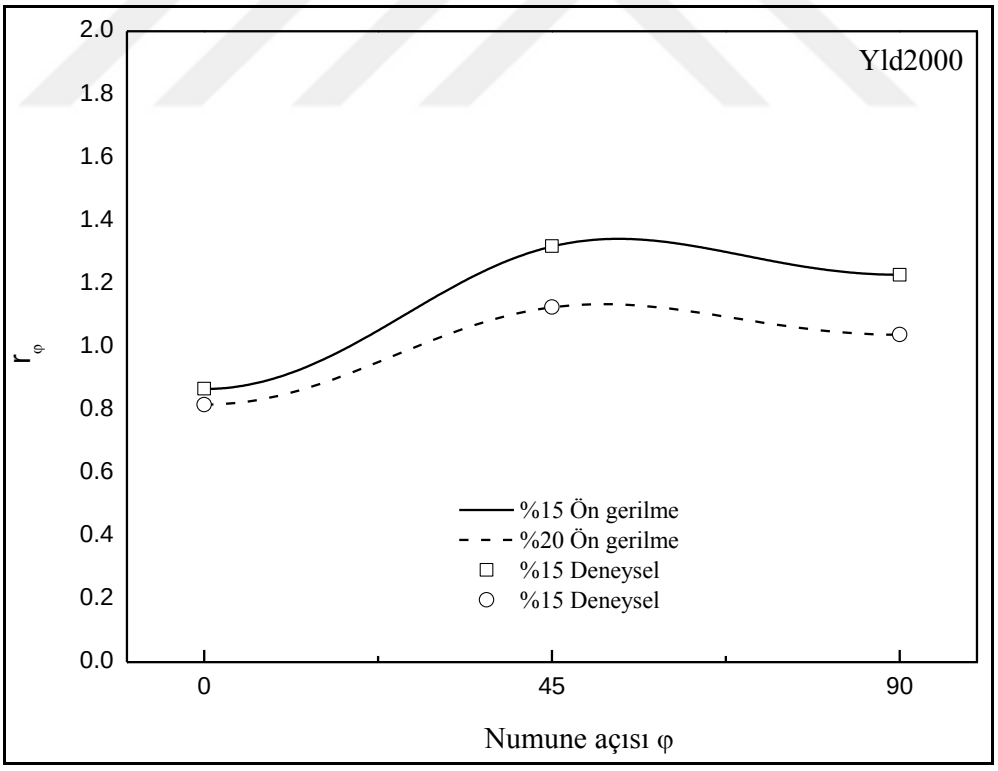
Şekil 6.50 Yld2000 ile belirlenen akma yüzeyleri



Şekil 6.51 Yld2000 ile belirlenen akma yüzeyleri

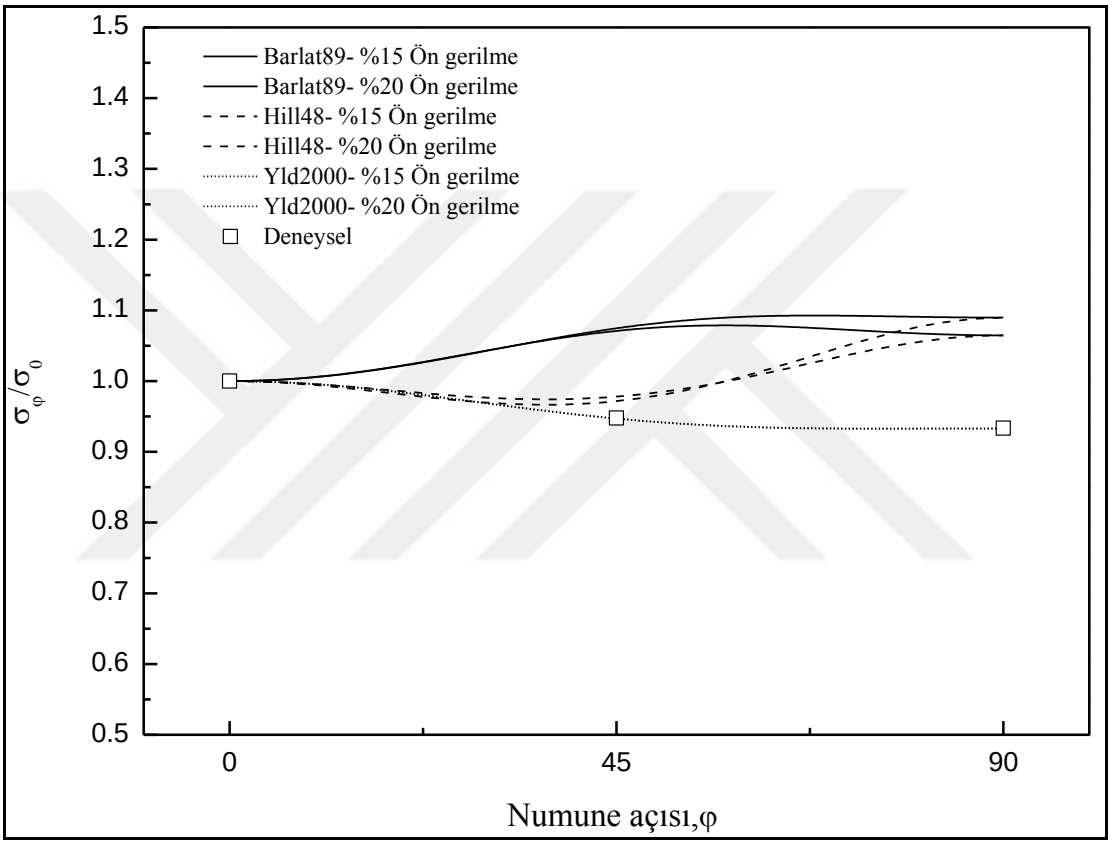


Şekil 6.52 Normalize edilmiş akma gerilmesi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Yld2000 ile modellenmesi

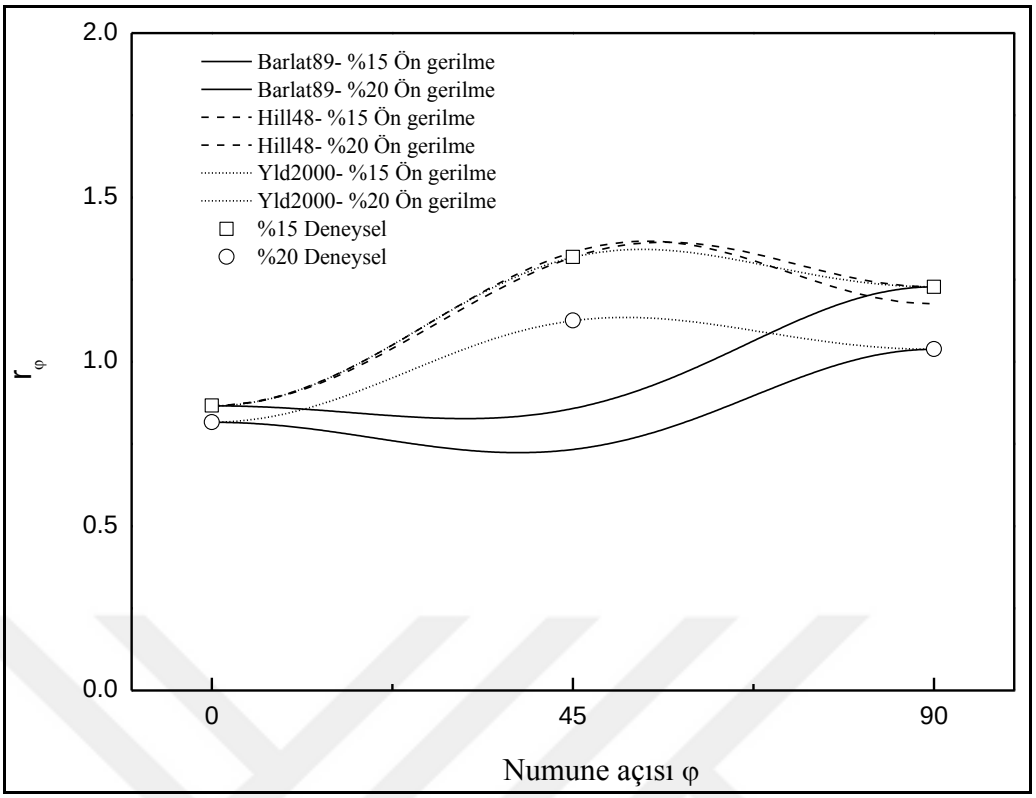


Şekil 6.53 Anizotropi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin Barlat-89 ile modellenmesi

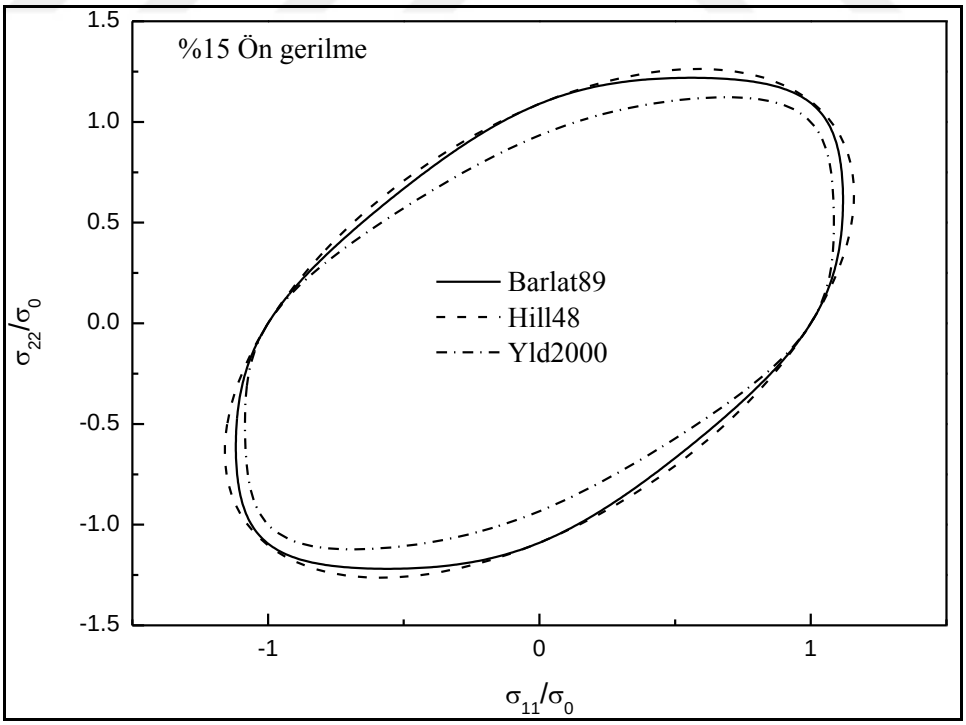
Çalışma kapsamında bunlara ilave olarak model sonuçları aşağıda sırası ile akma yüzeyleri, akma dayanımlarının yön ile değişimi ve anizotropi değerlerinin yön ile değişimleri iki farklı ön birim deformasyon değerleri için karşılaştırılmıştır. Akma gerilmesi ve anizotropi değerlerinin açı ile değişim grafikleri incelendiğinde en iyi sonucun Yld2000 ile belirlendiği gözlemlenmiştir. Bu durumda bu kriter ile belirlenen akma yüzeyleri ve bu fonksiyon kullanılarak hesaplanan deformasyon miktarları daha doğru olacaktır.



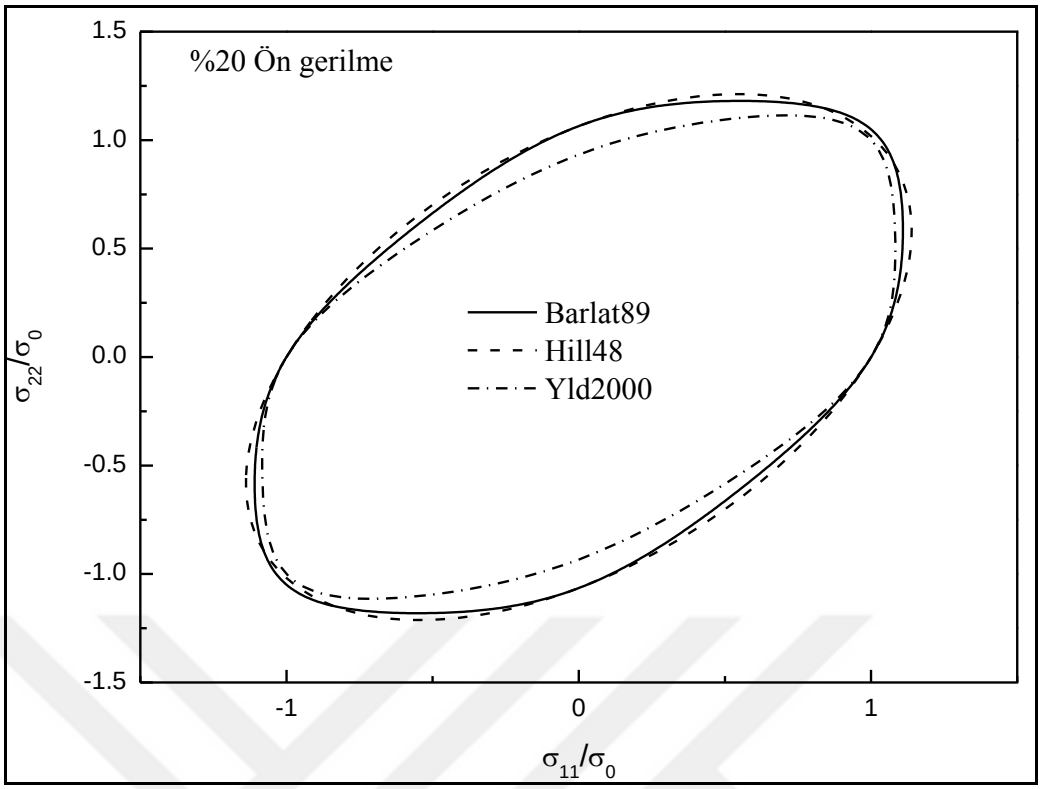
Şekil 6.54 Normalize edilmiş akma gerilmesi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin farklı akma kriterleri için karşılaştırılması



Şekil 6.55 Anizotropi değerinin yöne bağlı olarak değişiminin farklı akma kriterleri için karşılaştırılması



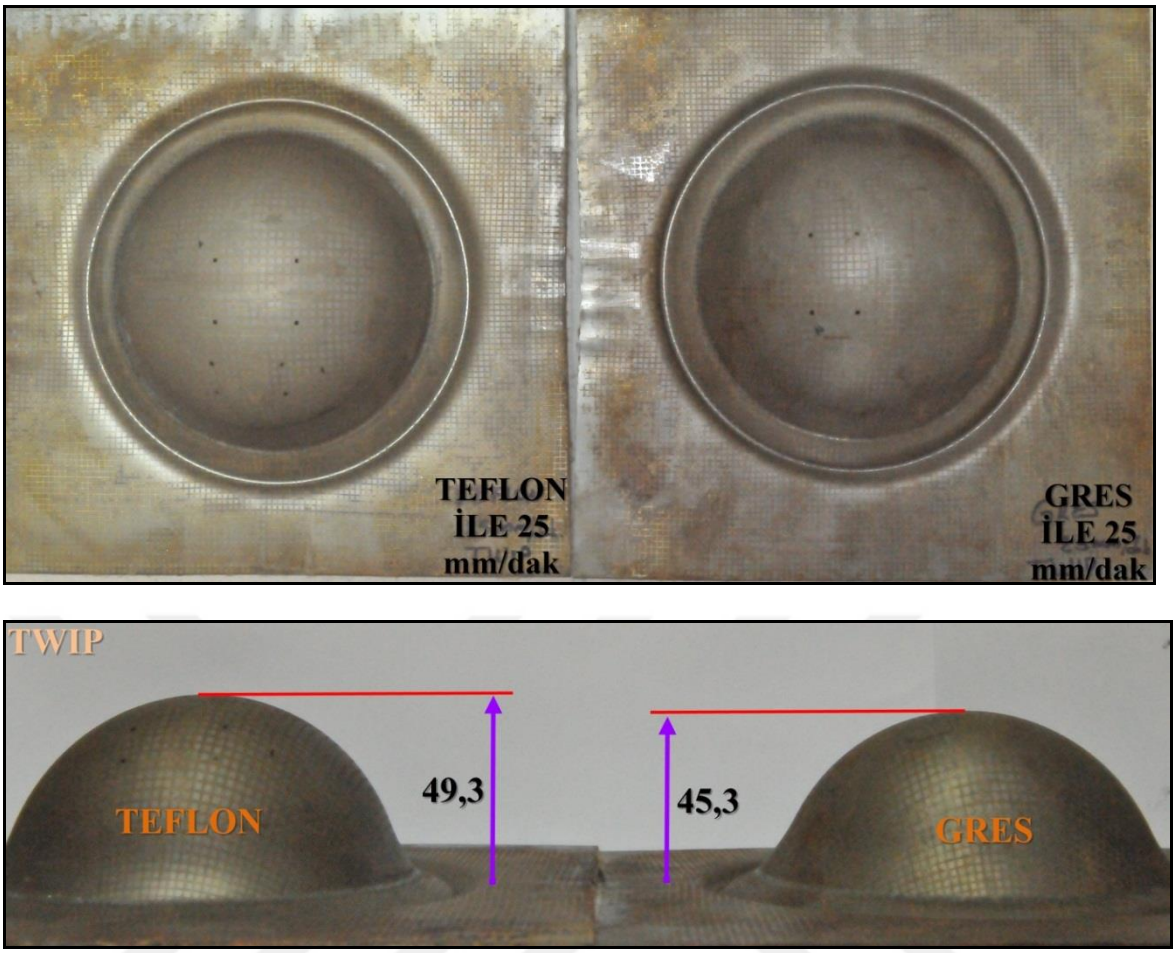
Şekil 6.56 Farklı akma kriterleri kullanılarak oluşturulmuş akma yüzeylerinin karşılaştırılması



Şekil 6.57 Farklı akma kriterleri kullanılarak oluşturulmuş akma yüzeylerinin karşılaştırılması

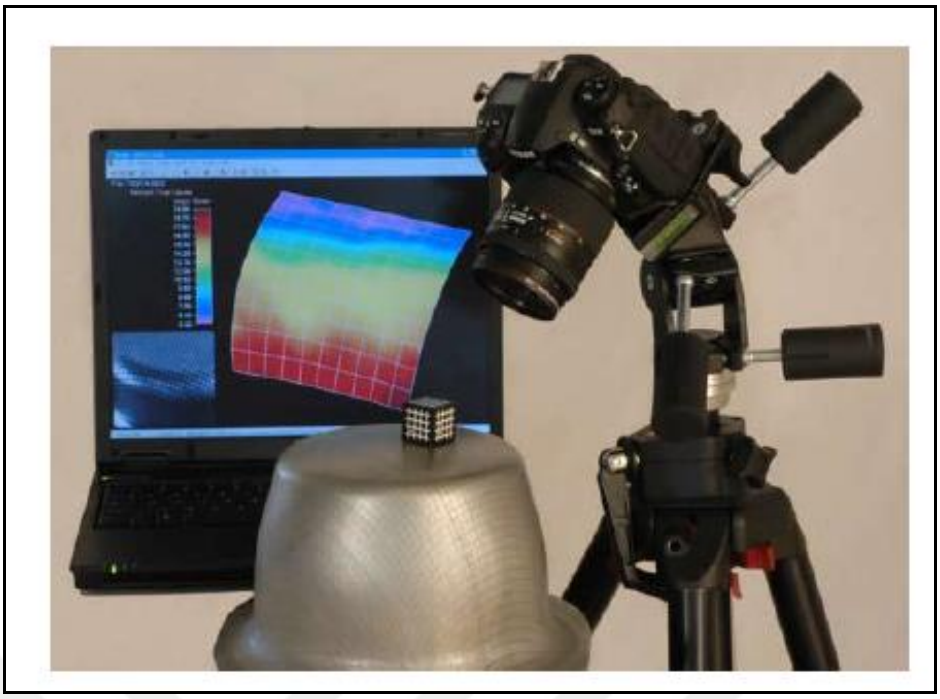
6.7 Şekillendirme Sınır Diyagramının Belirlenmesi

Çalışma kapsamında TWIP çeliği, küresel bir zımba ile şekillendirme işlemine tabi tutulmuştur. Şekillendirme esnasında iki farklı yağlayıcı zımba ve sac arasındaki yüzeye tatbik edilmiş yağlayıcı tipinin de etkisi incelenmiştir. Şekillendirme işlemleri 25 mm/dk deformasyon hızında uygulanmıştır. Şekil 6.58' de her iki durum neticesinde elde edilmiş şekiller gösterilmektedir. Teflon ile yapılmış şekillendirme işleminde daha büyük şekillendirme elde edilmiş olup kubbe yükseklikleri teflon ve gres için sırası ile 49,3 ve 45,3 mm'dir. Deney esnasında tam bir gerdirme elde edebilmek için malzemeler süzdürme çubukları ile kalıplar arasında sıkıştırılmıştır.



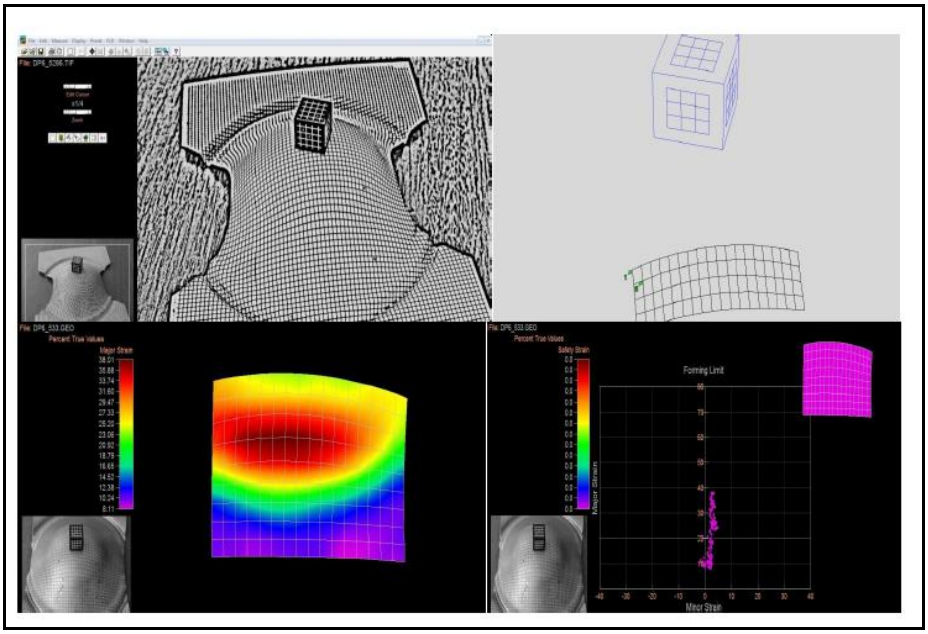
Şekil 6.58 Farklı yağlayıcılar için kubbe yüksekliklerinin karşılaştırılması.

Bu çalışmanın yanı sıra şekillendirme öncesi malzeme üzerine deformasyonların ölçülebilmesi için elktrokimyasal yöntemle grid (kare motif) uygulanmıştır. Şekillendirme sonrası deformasyona uğramış kare motiflerin ölçülmesinde, bilgisayar ortamında yapılan analiz için ASAME (Automated Strain Analysis and Measurement Environment) teknolojilerinden Target Model yöntemi kullanılmıştır (ASAME Technology LLC, 2008). Target Model yöntemi, referans küpünü esas alarak grid üzerindeki deformasyonu ölçme temeline dayanmaktadır. Şekil 6.59' de ölçümlerde kullanılan referans küpü ve ölçüm şekli gösterilmektedir.



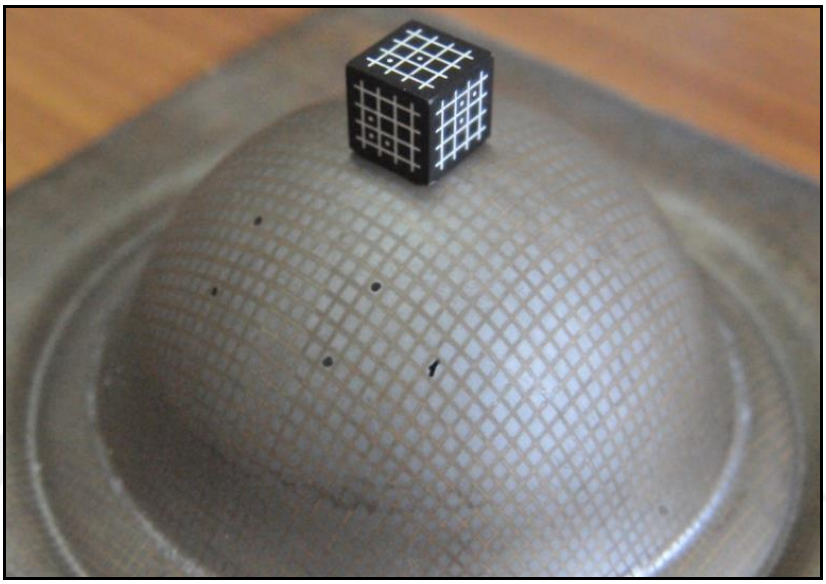
Şekil 6.59 Malzeme üzerindeki gridlerin okunma şekli [27]

Şekil 6.60’ de ise deformasyonların ölçülmesinde kullanılan programın ara yüzü ve birde uygulaması yer almaktadır. Şekilden de görüldüğü üzere malzemelerin ŞSD’lerinin belirlenmesi esnasında malzemenin bütün bölgesinin değil kırılma veya boyun verme bölgesinin veya bu bölgelerin karşı bölgesinde bulunan gridlerin deformasyon miktarları belirlenmektedir.



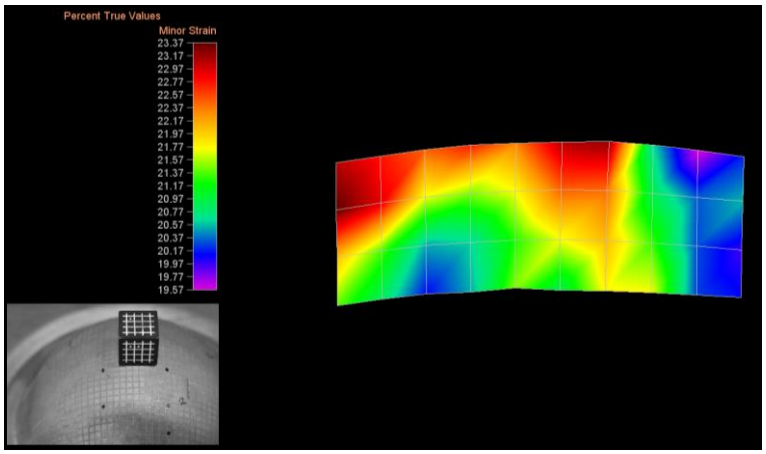
Şekil 6.60 ASAME programı ara yüzü ve örnek uygulaması [27]

Malzemelerin şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesinde 8 farklı geometride numuneler kullanılmaktadır. Bunda ki temel amaç şekillendirme esnasında malzeme üzerinde oluşabilecek muhtemel deformasyon oranlarının ve bu oranlardaki sınır uzama değerlerinin belirlenmesidir. Çalışma kapsamında sadece bir tek kare numune bulunmasından ötürü tek bir deformasyon oranı oluşturulmuş ve elde edilen deformasyonlar aşağıda gösterilmiştir. Şekil 6.61' de öncelikli olarak grid uygulanmış ve şekillendirilmiş TWIP malzemenin referans küp ile bir görüntüsü yer almaktadır. Şekil üzerinde gösterilen noktalar ölçüm alınan bölgeyi göstermektedir.

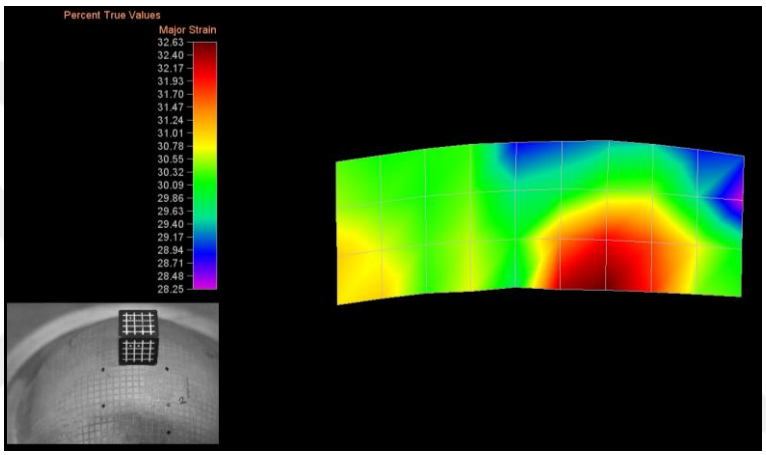


Şekil 6.61 Grid uygulanmış TWIP çeliği

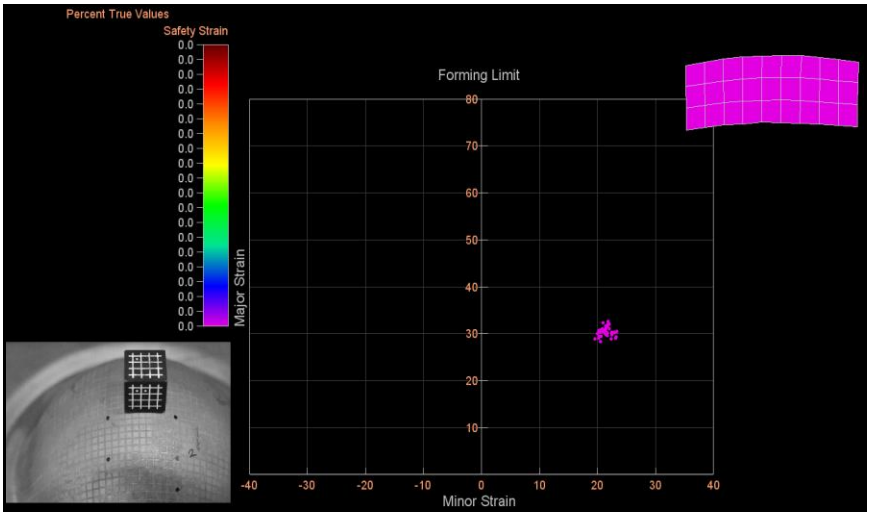
Farklı yağlayıcılar ile deneyleri gerçekleştirilmiş TWIP çeliğinin üzerinden alınan resimlerin ASAME ile analizleri ise gres ve teflon yağlayıcıları için sırası ile şekil 6.62 (a-c) ve şekil 6.63 (a-c)'de gösterilmiştir.



Küçük birim deformasyon (a)

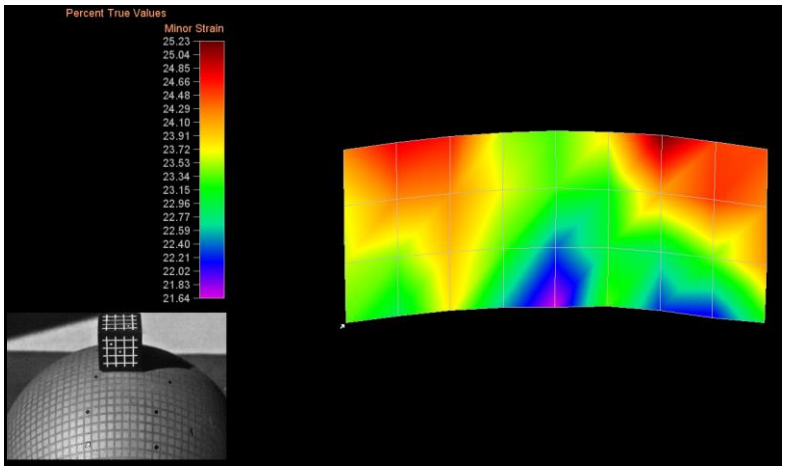


Büyük birim deformasyon (b)

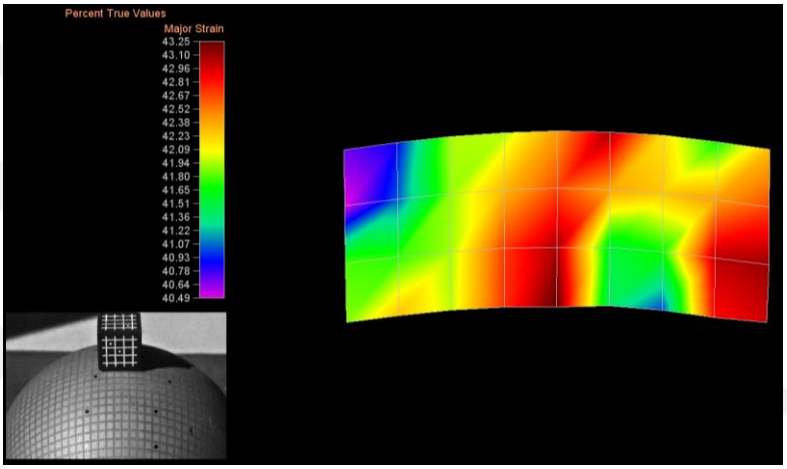


Deformasyon noktalarının FLD üzerindeki yeri (c)

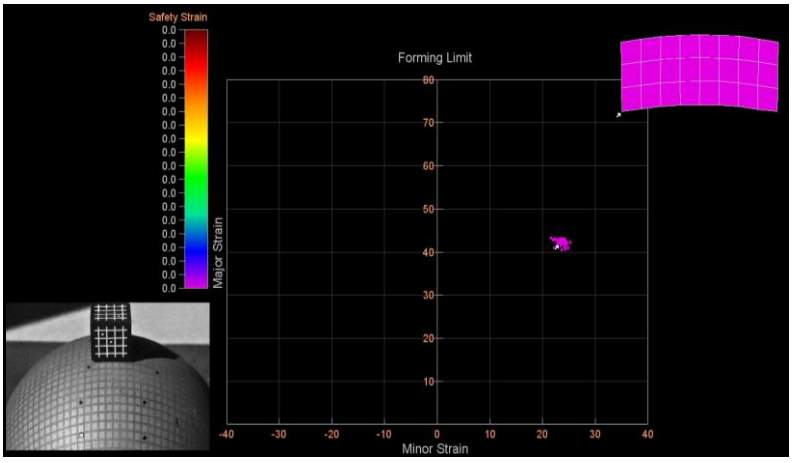
Şekil 6.62 Gres ile yapılan şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen ölçüm değerlerinin FLD üzerindeki yeri



Küçük birim deformasyon (a)



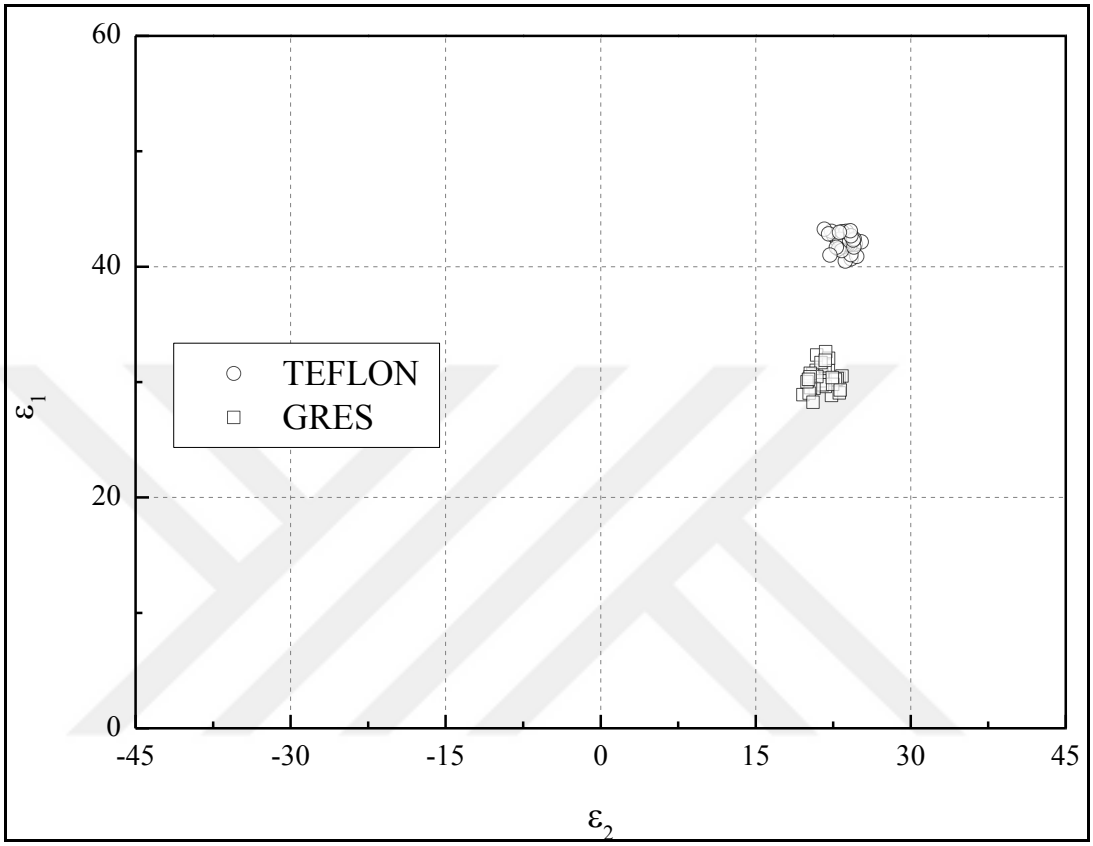
Büyük birim deformasyon (b)



Deformasyon noktalarının FLD üzerindeki yeri (c)

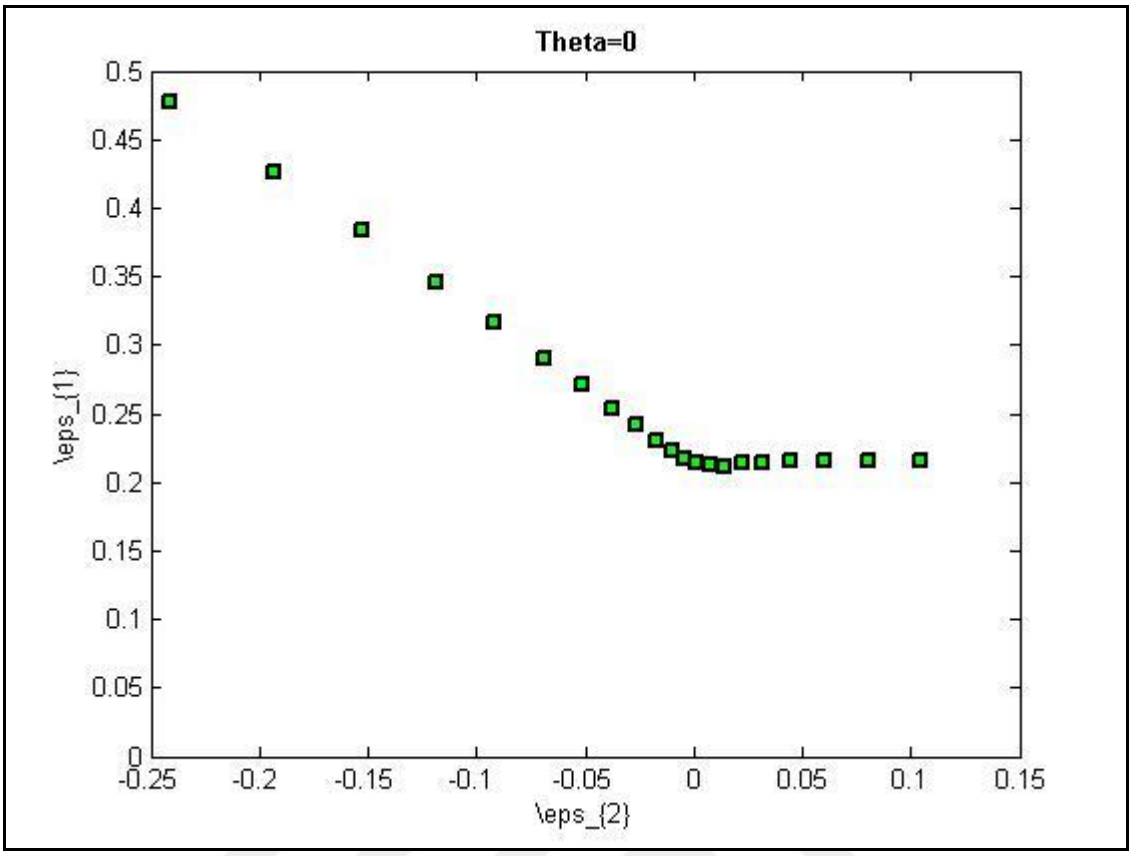
Şekil 6.63 Teflon ile yapılan şekillendirme işlemi neticesinde elde edilen ölçüm değerlerinin FLD üzerindeki yeri

Şekil 6.64’ de ise farklı yağlayıcılardan elde edilmiş verilerin karşılaştırılması görülmektedir. Kubbe yüksekliğinde olduğu gibi teflon yağlayıcı ile elde edilmiş büyük birim deformasyon değerleri gres ile elde edilenlerinkine göre daha büyüktür. Bu durum teflon ile şekillendirilmenin daha iyi yapılabileceğini göstermektedir.



Şekil 6.64 Farklı yağlayıcılara göre elde edilmiş büyük ve küçük birim deformasyonlar

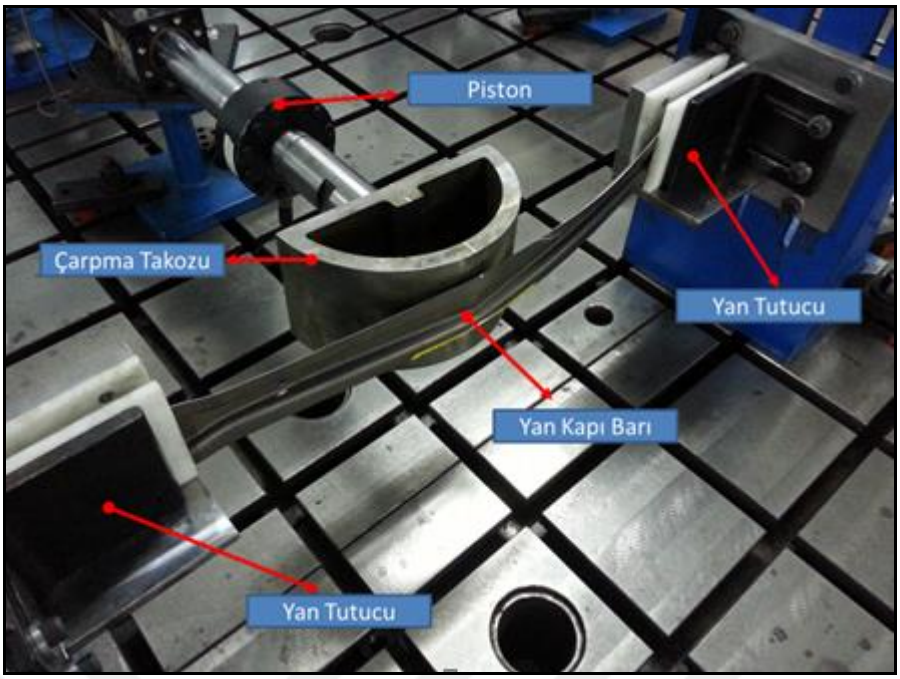
Buna ilave olarak TWIP çeliğinin şekillendirme sınır diyagramı MK kararsızlık modeli kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Mekanik özellikleri en iyi Yld2000 akma kriteri vermesinden dolayı FLD çalışmasında da bu kriter dikkate alınmıştır. Elde edilen FLD Şekil 6.65’ de verilmiştir.



Şekil 6.65 MK model ile f=0,99 için belirlenmiş TWIP çeliğine ait FLD

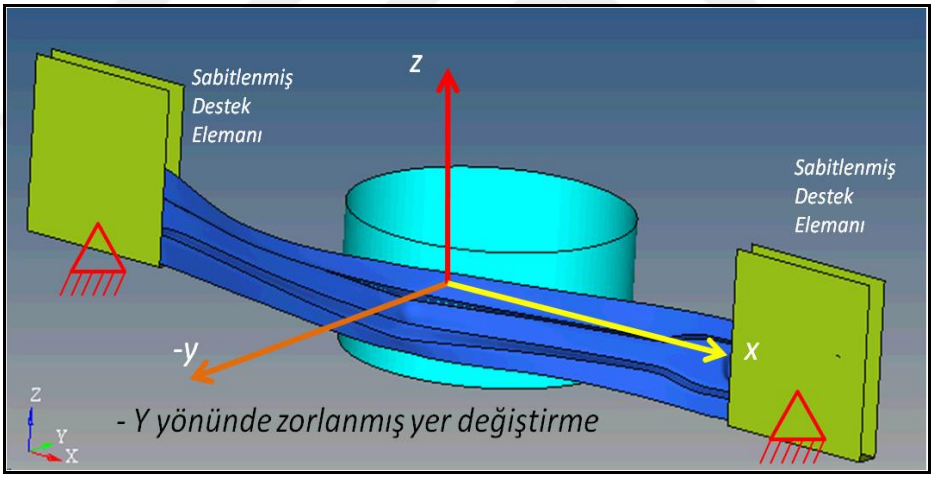
6.8 Üç Nokta Bükme Testi ve Sanal Analiz Kıyaslamaları

Yan kapı barı sanal analizlerinin sonlu elemanlar modellenmesinde Hyperworks ürün grubunun Hypermesh ve Hypercrash ara yüzü, çözümünde ise Radioss çözücüsü kullanılmıştır. Yan kapı barı sanal analizlerinin sonlu elemanlar modellenmesinde Hyperworks ürün grubunun Hypermesh ve Hypercrash ara yüzü, çözümünde ise Radioss çözücüsü kullanılmıştır.



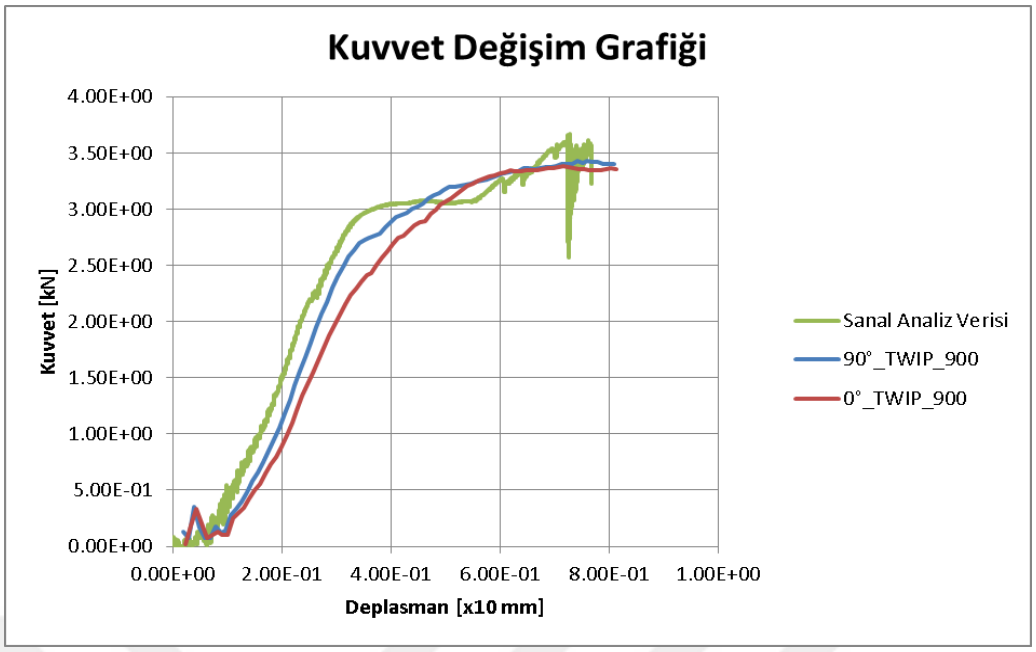
Şekil 6.66 Fiziksel Yorulma Test Düzeneği

Yan kapı barı parçasının sınır koşulları şekil 6.67’ ta gösterilmektedir.

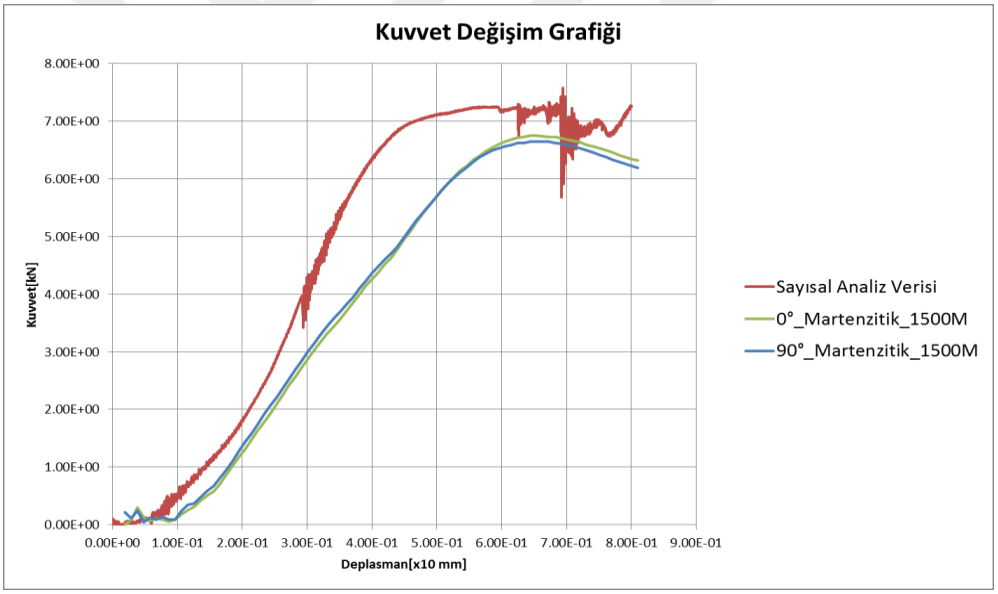


Şekil 6.67 Yan Kapı Barı Sınır Koşulları

Sanal analiz sonuçları ile fiziksel testlerin sonuçları karşılaştırıldığında; destek elemanlarının ve çarpma takozunun katı bir hal almasını sağlayan rijit RBE2 elemanları kullanımı yapının katılığını arttırmış ve buna bağlı olarak da kuvvet değişimindeki eğim her iki malzeme için de artmıştır. Malzeme tanımlarında kullanılan ve Hill ayrıklaştırma denklemlerini baz alan malzeme modeli TWIP malzeme için daha iyi sonuç verirken martenzitik malzeme için şekilsel olarak doğrulama sağlamasına rağmen kuvvet değişimini doğrulamakta yetersiz kalmıştır.



Şekil 6.68 Yan Kapı Barı Sanal ve Fiziksel Analizlerin Karşılaştırması [TWIP 900 Malzeme]



Şekil 6.69 Yan Kapı Barı Sanal ve Fiziksel Analizlerin Karşılaştırması [Martenzitik 1500M Malzeme]

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar sonucu öncelikle TWIP malzemesinin çok yüksek miktarda mangan içerdiği belirlenmiştir. Maliyet konusunda etkili olmaktadır. İlerleyen dönemlerde malzemenin üretimi için ülkemizde ki çalışmalar içerisinde yer alması planlanmaktadır. Gecikmeli kırılma sorunu aluminyum eklentisiyle çözümlendiği bildirilmektedir. Aluminyum eklemesiyle ayrıca yoğunluğun düşürüldüğü belirlenmektedir.

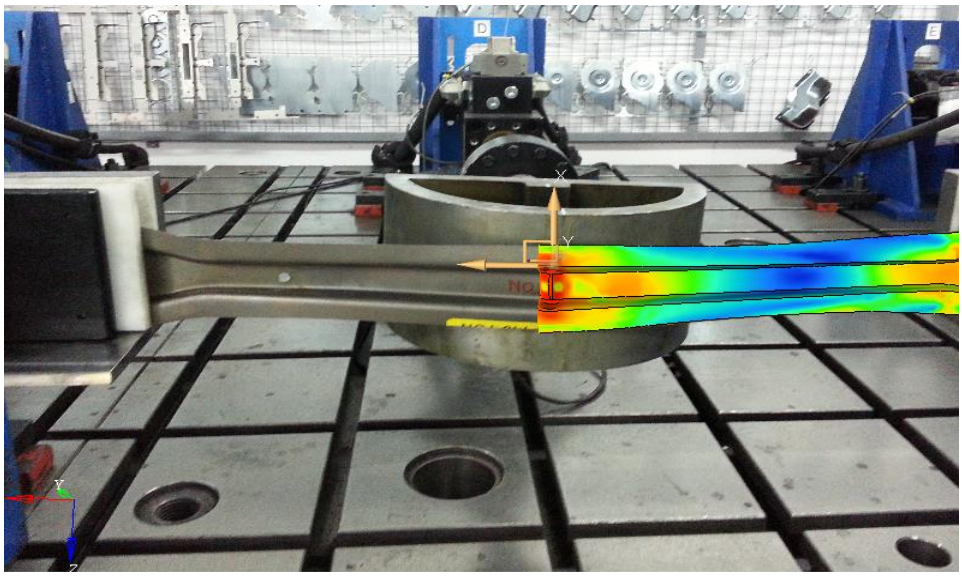
Mikroyapı incelemesinde ikizlenmeler açıkça gözlemlenmektedir.

Geri esneme çalışmasında yüksek bir geri esneme açısı hesaplanmış ve tasarım çalışmalarında bu değerin göz önünde bulundurulması önerilmiştir.

Şekillendirilebilirlik konusunda ihtiyaç duyulan akma kriterleri belirlenmiş ve kıyaslamaları yapılmıştır. Ayrıca şekillendirme sınır diyagramları için farklı şekillendirme işlemleri yapılmış ve grafik elde edilmiştir.

Ayrıca yüksek mukavemet değerlerine sahip olan bir otomobil kapı yan barının sanal analiz programında üç nokta bükme testleri gerçekleştirilmiş, prototip ürün elde edilmiş ve gerçek sonuçlar ile sayısal analizde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Farklı hadde yönlerinde şekillendirilen malzemeler kullanılarak üretilen parçalardaki enerji emilim değerlerinin hadde yönüne bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Hadde yönündeki martenzitik çelik malzemenin 90° yöndekine göre enerji emiliminin daha yüksek olduğu gözlenirken TWIP gibi yüksek mukavemet ve yüksek şekillendirmeye sahip östenitik çeliklerde ise aksi durum olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca TWIP malzemesinin 0° ve 90° yönündeki farklar yeni tasarımlarda dikkate alınacaktır.



Şekil 7.1 Sanal Analiz Sonuçlarının Prototip Ürün Üzerinde Gösterimi

Sanal analiz sonuçları ile fiziksel testlerin sonuçları karşılaştırıldığında ise; malzeme tanımlarında kullanılan ve Hill ayrıklaştırma denklemlerini baz alan malzeme kartı TWIP malzeme için daha iyi sonuç verirken martenzitik malzeme için şekilsel olarak doğrulama sağlamasına rağmen kuvvet değişimini doğrulamakta yetersiz kalmıştır.

TWIP çelikleri daha da yüksek mukavemetlere sahip olarak geliştirilmeye devam etmektedir. Tübitak bünyesinde oluşturulan yeni proje çağrıları ile birlikte ülkemizde üretilebilmesi için ön hazırlık çalışmaları yapılmaktadır. Bu özelliklere sahip olan malzemenin ülkemizde şartlarında üretilmesi ile 2023 hedefleri kapsamında geliştirilmesi planlanan yerli otomotiv parçalarında kullanılma potansiyeli ortaya çıkacaktır.

KAYNAKLAR

[1] TÜBİTAK, (2004) Ulusal Bilim ve Teknoloji Politikaları 2003-2023 Strateji Belgesi, Versiyon 19, Ankara.

[2] TÜBİTAK, (2003) Vizyon 2023 Projesi, Makina ve Malzeme Paneli, Teknoloji Öngörüsü Raporu, Sürüm 2.1, Ankara.

[3] Öztürk, F., (2009). "Otomotiv Endüstrisinde Yüksek Mukavemetli Çeliklerin Kullanımının İncelenmesi", TMMOB Makina Mühendisleri Odası 11. Otomotiv Sempozyumu, Bursa.

[4] Yiğitoğlu, E., (2015). "İkizlenme Mekanizmasina Sahip Yüksek Mukavemetli TWIP Çelikleri ve Otomotivde Kullanımlarının Geliştirilmesi", XIII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul.

[5] Chen, L., (2013). "Some Aspects of High Manganese Twinning-Induced Plasticity (TWIP) Steel, A Review", Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 26 (1): 1 – 15.

[6] Kim, S.K., (2006). "The Development of TWIP Steel for Automotive Application", Posco Technical Report, 10 (1): 106 – 114.

[7] Fındık, F., (2008). Malzeme Seçimi ve Uygulamaları, Sakarya Yayıncılık, Adapazarı.

[8] Otomotiv Malzemeleri, http://documents.tips/documents, 04 Aralık 2014

[9] Tamarelli, C. M., (2011). AHSS 101: The Evolving Use of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications, 2000 Town Center Suite 320 I, Southfield.

[10] Keeler, S., (2014). Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0, WorldAutoSteel, United States OH.

[11] Anonim, (2009). "Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların (Advanced High Strength Steel, AHSS) Şekillendirilmesinde Takım Çeliklerinden Beklenen Özellikler", TMMOB Makina Mühendisleri Odası 11. Otomotiv Sempozyumu.

[12] Aslan, Y.; (2014). "V Bükmede Geri Esneme Davranışları", Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji, 2(3):255-263.

[13] TÜBİTAK MAM, (2008) Otomotiv Endüstrisi ve Çelik: Yeni Nesil Çelikler 57H5501 (Proje Sonuç Raporu), Kocaeli.

[14] Nikolaevich, S. S., (2014). “Advanced Materials Of Automobile Bodies In Volume Production”, European Transport, 56 (10).

[15] Ulu S., (2009). “Çift Fazlı Çelikler”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 6 (3): 100-113.

[16] Tsipouridis, P., (2006). Mechanical Properties of Dual Phase Steel, Doktora Tezi, Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik mit Materialprüfamt für den Maschinenbau, Technische Universitat München, München.

[17] Çetinel, H., (2004). “Çift Fazlı Çelik Saclarda Şekil Alabilirlik” DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 6 (2): 73-80.

[18] Aydın, H., (2006). Çelik Sacların Çift Faz Isıl İşlemi Sonrası Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerinin Değişimi Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[19] ThyssenKrupp Steel, (2008) Ferrite-bainite-phase steels FB-W, Duisburg.

[20] Talapatra, A., (2013). “Structure-Properties Relationship of TRIP-assisted Steels by Non-destructive Testing Method” Chemical and Materials Engineering 1(1): 18-27.

[21] Karbasian, H., (2010). “A review on hot stamping” Journal of Materials Processing Technology 210 (2010): 2103–2118.

[22] ArcelorMittal, (2013) Martensitic Steel Data Sheet, Chicago.

[23] Kılıç, S., (2015). “Effects of Pre-strain and Temperature on Bake Hardening of TWIP900CR Steel” Journal Of Iron And Steel Research, International. 22(4): 361 – 365.

[24] Yiğitoğlu, E., (2014). “Otomobil Kapı Barı Parçasının Yüksek Mukavemetli Malzemelerden Üretimi Ve Test Değerlerinin Karşılaştırılması” OTEKON 14, 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.

[25] Indian Institute of Technology Delhi, Safety Companion 2011 (Carhs), www.iitd.ac.in, 28.11.2015

[26] Elbeyli, N. Ü., (2005) “Otomotiv Sanayiinde İleri Malzemelerin Kullanımına Yönelik Bir Öngörü Çalışması” Taysad Dergisi, Şubat:16-35.

[27] Toros, S., (2013). TRIP800 Çeliğinin Şekillendirme Kabiliyetinin İncelenmesi ve Modellenmesi, Doktora Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emre YİĞİTOĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri : 07.05.1985 / Bursa

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : emreyigitoglu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Y. Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ABD / Malzeme	Yıldız Teknik Üniversitesi	2016
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Bursa Anadolu Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2012 – …	Coşkunöz Holding Arge Birimi	Malzeme Mühendisliği Sorumlusu
2009 – 2011	Tübitak MAM Malzeme Enstitüsü	Araştırmacı
2008 – 2009	Tübitak MAM Malzeme Enstitüsü	Stajyer

YAYINLARI

Bildiri

1. Yiğitoğlu, E., (2016). "Yüksek Manganlı TWIP Çeliklerinin Otomotiv Ağırlık Azaltma Çalışmalarındaki Kullanım Alanları" 18. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, (baskıda).

2. Yiğitoğlu, E., (2015). "İkizlenme Mekanizmasina Sahip Yüksek Mukavemetli TWIP Çelikleri ve Otomotivde Kullanımlarının Geliştirilmesi", XIII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul.

3. Yiğitoğlu, E., (2015). "Otomotivde Kompozit ve Plastik Malzemelerin Birleştirilmesi İçin Lazer Kaynak Uygulamaları", XIII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu ve Sergisi, İstanbul.

4. Yiğitoğlu, E., (2015). "Al-Mg-Si Alaşımlarının Boya Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", 7. Aluminyum Sempozyumu, İstanbul.

5. Yiğitoğlu, E., (2015). "6016-Al Alaşımının Şekillendirilebilme ve Geri Esneme Özelliklerinin Deneysel ve Nümerik İncelenmesi", 7. Aluminyum Sempozyumu, İstanbul.

6. Yiğitoğlu, E., (2015). "A Study On Doe Of Tubular Rear Axle Twist Beam Using Hyperstudy", European Technology Conference, Paris.

7. Yiğitoğlu, E., (2015). "Otomotivde Kompozit Malzemelerin Kullanımı" Türkiye Otomotiv Sektöründe 4. Ar-Ge Proje Pazarı ve 4. Komponent Tasarım Yarışması, Bursa.

8. Yiğitoğlu, E., (2015). "Karbon Fiber İle Rtm Üretim Teknolojisi İle Üretilmiş Arka Aks" Otomotiv Proje Pazarı, Bursa.

9. Yiğitoğlu, E., (2014). "Otomobil Kapı Barı Parçasının Yüksek Mukavemetli Malzemelerden Üretimi Ve Test Değerlerinin Karşılaştırılması" OTEKON 14, 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa.

ÖDÜLLERİ

1. 2016	OIB; 5. Geleneksel Otomotiv Komponent Tasarım Yarışması, Profesyoneller Türkiye İkinciliği. (Sıcak Şekillendirilmiş Hafif Otomobil Salıncak Kolu)
2. 2015	Kompozit Sanayicileri Derneği, Otomotiv Parçası Dalında En İnovatif Parça Ödülü (Kompozit Salıncak Kolu Parçası).
3. 2015	Yıldız Teknik Üniversitesi Otomotiv Sektöründe Yeni Gelişen Teknolojiler Proje Pazarı, 3.lük Derecesi (Karbon Fiber Takviyeli ve Termoset Reçine Matrisli Kompozit Malzemeden Otomotiv Salıncak Kolu Üretimi).