



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇİFT FAZLI VE MARTENZİT
ÇELİKLERİN DELİK GENİŞLETME ORANINA ZIMBA KONİK
AÇISININ VE İLK DELİK ÇAPININ ETKİSİ**

NECATİ BEKTAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. NURİ ŞEN**

DÜZCE, 2022

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇİFT FAZLI VE MARTENZİT
ÇELİKLERİN DELİK GENİŞLETME ORANINA ZIMBA KONİK
AÇISININ VE İLK DELİK ÇAPININ ETKİSİ

Necati BEKTAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Nuri ŞEN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Nuri ŞEN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. İlyas UYGUR

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Vedat TAŞDEMİR

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 30/06/2022

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

30 Haziran 2022

Necati BEKTAŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Nuri ŞEN'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen eş danışmanım Doç. Dr. Nuri ŞEN'e de şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Arş. Gör. Tolgahan CİVEK'e de şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2020.06.05.1113 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

30 Haziran 2022

Necati BEKTAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	iii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	v
KISALTMALAR.....	vi
SİMGELER.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	6
1.1.1. Delik Genişletme Oranı (Hole Expansion Ratio) Etkileyen Parametreler	6
1.1.1.1. Delik Oluşturma İşlemi ve Kesim Alanı Pürüzlülüğü.....	7
1.1.1.2. Malzeme Yapısı.....	9
1.1.1.3. Zimba Geometrisi.....	9
1.2. TEZİN AMACI.....	11
2. SAC MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRME KABİLİYETLERİNİN İNCELENMESİ İÇİN UYGULANILAN TEST YÖNTEMLERİ.....	12
2.1. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMI (SSD).....	12
2.2. ÇEKME TESTİ.....	13
2.3. GERİ ESNEME DAVRANIŞI.....	14
2.4. DELİK GENİŞLETME TESTİ (HOLE EXPANSION TEST).....	16
3. GELİŞMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ DP VE MART ÇELİKLERİ.....	19
3.1. ÇEKME DENEYLERİ.....	24
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
4.1. KALIP VE ZIMBA TASARIMI.....	28
4.2. DENEY YÖNTEMİ.....	31
4.3. NUMUNELERİN ÇAP ÖLÇÜMÜ.....	33
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
5.1. DE MEET 400 ÖLÇÜM CİHAZINDAN ALINAN DEĞERLER.....	38
5.2. DP600 VE DP800 ÇELİKLERİNİN DGO.....	40
5.3. MART1200 VE MART1400 ÇELİKLERİNİN DGO.....	42
5.4. KUVVET-YER DEĞİŞTİRME EĞRİLERİNİN YORUMLANMASI.....	46
5.5. MİKROYAPI İNCELEMESİ.....	48
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	51
7. KAYNAKLAR.....	53

ÖZGEÇMİŞ..... 57



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Araç Yaşam Döngüsü.....	1
Şekil 1.2. Birinci dünya savaşında kullanılan bir araç.....	3
Şekil 1.3. Günümüz üretim yöntemleri ile üretilmiş Lykan Hypersport.	3
Şekil 1.4. Modern Bir Araba Gövdesi Yapısında Gelişmiş Çelik Uygulamaları.	4
Şekil 1.5. Gövde ve kaplamalar için Kuzey Amerika hafif araç malzeme karışımı ve gelecek yıllara göre tahmini.	5
Şekil 1.6. Kesme işlemi gören sac malzemedeki kesme yüzeyinde oluşan bölgeler.....	8
Şekil 2.1. Az karbonlu çeliğe ait şekillendirme sınır diyagramı.....	12
Şekil 2.2. Normalize Edilmiş a) düşük karbonlu b) yüksek karbonlu çeliklerin Gerinim-Uzama eğrisi.	14
Şekil 2.3. Sac malzeme üzerinde ölçülerin ve etkim altında kalan bölgeler.	15
Şekil 2.4. a) V bükme ve b) U bükme şematik aşamalı gösterimi.....	15
Şekil 2.5. V bükme türleri a) alt bükme ve b) serbest bükme şematik gösterimi.	16
Şekil 2.6. Delik genişletme testi için numune, kalıp ve zımba (ölçüler mm cinsinden)	17
Şekil 2.7. Test Parçası Boyutları.....	18
Şekil 3.1. Mevcut ve gelişmekte olan çelik kalitelerinin mukavemetini ve uzamasını karşılaştıran küresel şekillendirilebilirlik diyagramı.....	19
Şekil 3.2. DP çeliğinin mukavemet ve uzama diyagramı.	20
Şekil 3.3. DP çeliklerinin mikroyapısının model görünümü.	20
Şekil 3.4 DP çeliğinin iç mikroyapısı.	20
Şekil 3.5. HSLA 350/450 ve DP 350/600 'ün statik gerilme-gerinim kıyaslaması.....	21
Şekil 3.6. MS çeliğinin mukavemet ve uzama diyagramı.	22
Şekil 3.7. DP çeliklerinin mikroyapısının şematik görünümü.....	22
Şekil 3.8. MS çeliğinin iç mikroyapısı.	23
Şekil 3.9. Temperlenmemiş martenzitte karbon içeriği-çekme dayanımı ilişkisi.....	23
Şekil 3.10. Çekme testi numunesi teknik resmi.....	25
Şekil 3.11. Çekme testi numunesinin haddeleme yönünün gösterimi.	25
Şekil 3.12. Çekme cihazı görünümü.....	26
Şekil 4.1. a) Çalışma için hazırlanan delik genişletme testinin şematik gösterimi, $\emptyset dp$, $\emptyset di$, $\emptyset di$, rd , αi sırasıyla zımba çapı, başlangıç delik çapı, kalıp boşluğu çapı, kalıp radius yarıçapı, konik zımba açısı belirtir. b) Delik genişletme deney düzeneği	29
Şekil 4.2. 30° konik zımba teknik resmi.....	30
Şekil 4.3. 60° konik zımba teknik resmi.....	30
Şekil 4.4. 90° konik zımba teknik resmi.....	31
Şekil 4.5. a) 30° konik zımba b) 60° konik zımba c) 90° konik zımba	31
Şekil 4.6. Düzce Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarı deney düzeneği.....	32
Şekil 4.7. a) De Meet 400 cihazı, b) De Meet 400 şematik gösterimi.....	33
Şekil 4.8. 60° konik açılı zımba ile şekillendirilmiş, başlangıç delik çapı 18 mm MART1400 çeliğinin delik genişletme işlemi sonrasında ölçüm almak için atanan nokta konumlarının şematik gösterimi.	34
Şekil 4.9. De Meet 400 cihazından parça iç çap yüzeyi ile eşleşmiş çapın gösterimi. ...	34
Şekil 4.10. De Meet 400 cihazından çatlat üzerinden geçen çapın gösterimi.	35
Şekil 4.11. De Meet 400 cihazında alınan çatlak görseli.....	36
Şekil 4.12. De Meet 400 cihazından parça dış çap yüzeyi ile eşleşmiş çapın gösterimi.	

.....	37
Şekil 5.1. DP600 çeliğinde konik zımba açısının ve başlangıç delik çapının DGO davranışını üzerindeki etkisi.....	40
Şekil 5.2. DP600 Çeliği test numunelerinin delik genişletme testlerinden sonraki görüntüleri.	41
Şekil 5.3. DP800 çeliğinde konik zımba açısının ve başlangıç delik çapının DGO davranışını üzerindeki etkisi.....	41
Şekil 5.4. DP600 Çeliği test numunelerinin delik genişletme testlerinden sonraki görüntüleri.	42
Şekil 5.5. MART1200 çeliğinde konik zımba açısının ve başlangıç delik çapının DGO davranışını üzerindeki etkisi.....	43
Şekil 5.6. MART1200 Çeliği test numunelerinin delik genişletme testlerinden sonraki görüntüleri.	44
Şekil 5.7. MART1400 çeliğinde konik zımba açısının ve başlangıç delik çapının DGO davranışını üzerindeki etkisi.....	45
Şekil 5.8. MART1400 Çeliği test numunelerinin delik genişletme testlerinden sonraki görüntüleri	45
Şekil 5.9. DP600 malzemesi için 14 mm başlangıç delik çapı için farklı konik zımba açılara göre kuvvet-yer değiştirme eğrileri	46
Şekil 5.10. MART1400 malzemesi için 14 mm başlangıç delik çapı için farklı konik zımba açılara göre kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	47
Şekil 5.11. a) DP600 çeliklerinin mikroyapı görüntüleri b) DP800 çeliklerinin mikroyapı görüntüleri.....	48
Şekil 5.12. a) MART1200 çeliklerinin mikroyapı görüntüleri b) MART1400 çeliklerinin mikroyapı görüntüleri.....	49

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1. Farklı malzeme sınıflarının ton başına enerji tüketimi.	2
Çizelge 3.1. Çift Fazlı (DP600 ve DP800) Çeliklerin Kimyasal Bileşimi.	24
Çizelge 3.2. Martenzitik (MART1200 ve MART1400) Çeliklerin Kimyasal Bileşimi.	24
Çizelge 3.3. OS ve 0.005 s ⁻¹ gerinim hızında DP600 ve DP800 çeliklerinin akma ve çekme mukavemetleri.	26
Çizelge 3.4. OS ve 0.005 s ⁻¹ gerinim hızında MART1200 ve MART1400 çeliklerinin akma ve çekme mukavemetleri.	27
Çizelge 4.1. Deneysel kalıp sisteminin boyutları	28
Çizelge 5.1. DP600 çelik deney numunelerinden alınan ölçümler.	38
Çizelge 5.2. DP800 çelik deney numunelerinden alınan ölçümler.	39
Çizelge 5.3. MART1200 çelik deney numunelerinden alınan ölçümler.	39
Çizelge 5.4. MART1400 çelik deney numunelerinden alınan ölçümler.	39

KISALTMALAR

AHSS	Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler
BDC	Başlangıç Delik Çapı
CP	Complex Phase
DGO	Delik Genişleme Oranı
DGT	Delik Genişletme Testi
DP	Çift-Fazlı Çelik (Duel Phase)
HER	Hole Expansion Ratio
ISO	International Organization for Standardization
MPa	Megapaskal
MS	Martenzit (Martensitic)
OS	Oda Sıcaklığı
ŞSD	Şekillendirme Sınır Diyagramı
TRIP	Transformation Induced Plasticity
TWIP	Twining Induced Plasticity

SİMGELER

M
 α
 σ

Martenzit
Ferrit
Gerilme



ÖZET

YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇİFT FAZLI VE MARTENZİT ÇELİKLERİN DELİK GENİŞLETME ORANINA ZIMBA KONİK AÇISININ VE İLK DELİK ÇAPININ ETKİSİ

Necati BEKTAŞ
Düzce Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç. Dr. Nuri ŞEN
Haziran 2022, 56 sayfa

Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), imal edilen araçların yüksek mukavemetlerinden dolayı hem güvenliğini artırırken hem de daha düşük kalınlıklarda üretilebilmesine olanak sağlamıştır. Kalınlıktaki düşüş aracın ağırlıklarının azalmasına buda yakıt ekonomisinin iyileşmesinde önemli bir rol oynamıştır. Yüksek mukavemet-ağırlık oranları nedeniyle son yılda otomotiv endüstrisinde çok fazla ilgi çekmiştir. Fakat bu sacların yüksek mukavemetleri çeşitli şekillendirme problemlerini ortaya çıkarmıştır. Özellikle DP ve MART tipi AHSS çeliklerinin şekillendirme işlemleri sırasında kenar çatlama hatalarına ciddi bir eğilimi olduğu bilinmektedir. Sac malzemelerin kenar çatlama davranışları sıklıkla ISO 16630 standardında belirtildiği üzere 10 mm'lik sabit bir iç delik çapının 60°'lik bir konik zımba ile genişletilmesi ile test edilir. Fakat, bu çalışmada DP ve MART çeliklerinin kenar çatlama davranışlarını gözlemlemek amacıyla üç farklı başlangıç delik çapına sahip olan (14, 16, 18 mm) DP ve MART sac malzemeler üç farklı açıdaki (30°, 60° ve 90°) konik zımbalar ile delik genişletme testleri (DGT) yapılmıştır. DP ve MART saclarının konik zımba açısının ve ilk başlangıç delik çapındaki değişimlerin delik genişletme oranlarına olan etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre DP ve MART çeliklerinin delik genişletme oranlarının (DGO), konik zımba açısı ve başlangıç delik çapları ile önemli bir seviyede değişmediği gözlemlenmiştir. Bu durum DP ve MART çeliklerinin sahip oldukları düşük kırılma geriniminden kaynaklanmış olabileceği düşünülmüştür. DP ve MART çeliklerin kenar çatlama davranışlarındaki önemli faktörün konik zımba açıları ve ilk delik çapından ziyade mikroyapı bileşiminin daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar sözcükler: Delik genişletme testi, Delik genişleme oranı, DP çelikleri, Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler, MART çelikleri.

ABSTRACT

EFFECT OF PUNCH TAPER ANGLE AND FIRST HOLE DIAMETER ON HOLE EXPANSION RATIO OF HIGH STRENGTH DUAL PHASE AND MARTENZITE STEELS

Necati BEKTAŞ

Düzce University

Institute of Graduate Studies, Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Doç. Dr. Nuri ŞEN

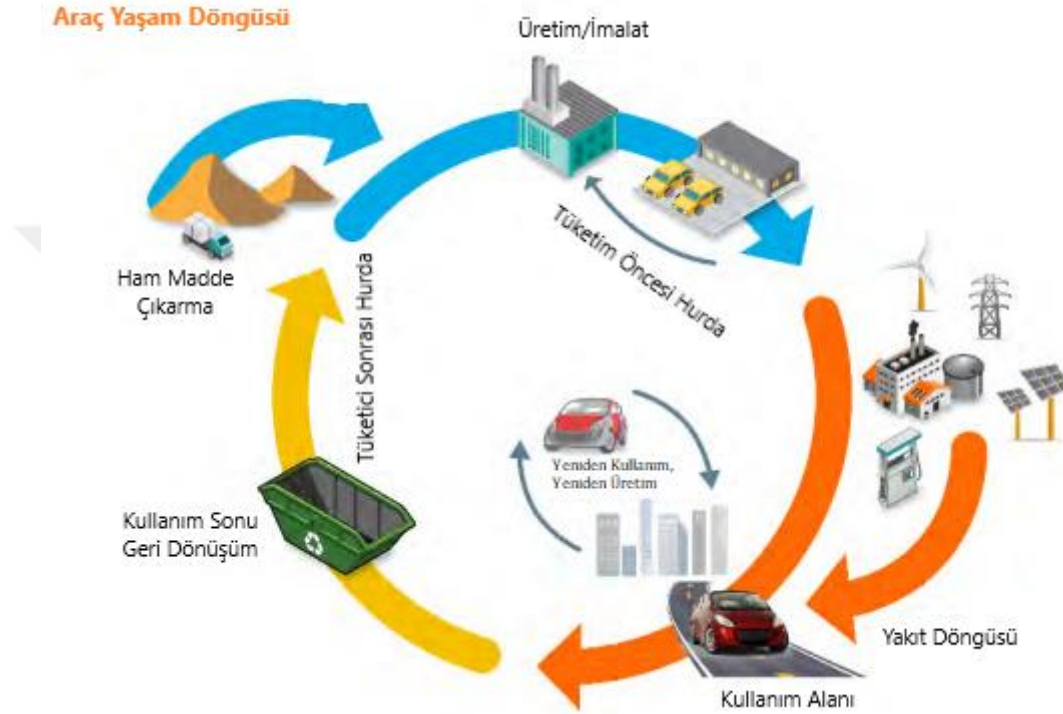
June 2022, 56 pages

Advanced high-strength steels (AHSS) both increase the safety of the manufactured vehicles due to their high strength and allow them to be produced in lower thicknesses. The decrease in thickness played an important role in the reduction of the vehicle's weight and thus the improvement of fuel economy. Due to its high strength-to-weight ratios, it has attracted a lot of attention in the automotive industry in recent years. However, the high strength of these sheets has revealed various forming problems. It is known that especially DP and MART type AHSS steels have a serious tendency to edge cracking errors during forming processes. The edge cracking behavior of sheet materials is often tested by expanding a fixed inner hole diameter of 10 mm with a 60° conical punch as specified in the ISO 16630 standard. However, in this study, in order to observe the edge cracking behavior of DP and MART steels, DP and MART sheet materials with three different initial hole diameters (14, 16, 18 mm) were drilled with conical punches at three different angles (30°, 60° and 90°) hole expansion tests (HET) were performed. The effects of conical punch angle and initial hole diameter changes on hole expansion rates of DP and MART sheets were investigated. According to the results obtained, it was observed that the hole expansion ratios (HER) of DP and MART steels did not change significantly with the conical punch angle and initial hole diameters. This situation was thought to be due to the low fracture strain of DP and MART steels. It was concluded that the most important factor in the edge cracking behavior of DP and MART steels is the microstructure composition rather than the cone punch angles and the initial hole diameter.

Keywords: Advanced high strength steel, DP steels, Hole expansion test, Hole expansion ratio, MART steels.

1. GİRİŞ

Gelişen dünya ile birlikte gelişerek her koşul ve durumda yerini korumayı başaran çelik malzemeler, avantajları ile tercih edilen bir malzeme olmuştur. Dayanıklılıkları, şekillenebilirlikleri, geri dönüşü kolaylığı gibi birçok özellikten dolayı avantajlı durumdadırlar.



Şekil 1.1. Araç Yaşam Döngüsü [1].

Otomobiller dünyadaki salınan karbondioksitin %20'sini üretmektedir ve otomotiv endüstrisi, küresel ısınmaya rol oynayan sera gazı emisyonlarının %77'sinden sorumlu. Sonuç olarak, Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri'nde araç karbondioksit emisyonlarını azaltmak için yasal çıkarmaktadır [2].

Devletlerin getirdiği kanunlar ve oluşturulan standartlar ile otomotiv endüstrisi araçlarda verimliliği arttırmak ve karbon emisyonlarını azaltmak için uğraşmaktadır. Sadece karbon salınımı olarak düşünmek yetersiz kalır. Daha geniş bir bakış açısı ile karbon ayak izinin azaltılması için çalışılmaktadır. Bir aracın hammaddelerinden, geri dönüşümüne kadar tüm döngüyü kapsayan bir çalışmadır. Tek odak noktalı çalışmalar istenilen hedefe ulaşmış olsa da net bir azalma elde edilmiş olunmayabilir. Araçlarda elde edilecek hafifliğin üretiminden kaynaklı gelen bir zarar olabilir. Bu yüzden Çalışmalar bir döngü

olarak yapılmalıdır. Şekil 1.1 dikkate alındığında araçlarda kullanılan çeliklerin her aşamada geri dönüşüm olanağı sağladığı görülmektedir.

Otomobil sektöründe, malzeme seçimi maliyet için en önemli faktördür. Tasarım maliyetleri, hammadde maliyetleri, üretim maliyetleri ve ürün test maliyetlerinin tümü maliyete dahildir [3].

Diğer metal ve alaşımlarla karşılaştırıldığında en büyük avantajı bol ve ucuz hammadde temini, iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan imalat süreçleri ve düşük malzeme maliyetleridir. Çeliğin geri dönüştürülebilirliği ve yüksek kaynaklanabilirliği, ona önemli bir maliyet avantajı sağlar [4].

Çeliğin kilogram fiyatı, düşük malzeme maliyeti nedeniyle, günümüzde alternatif metal olma olasılığı en yüksek olan alüminyumun kilogram fiyatı, düşük özgül ağırlığı nedeniyle çeliğe kıyasla daha pahalıdır. Bunun sebebi cevherden bir malzemenin üretimi sırasında birim miktar başına ihtiyaç duyulan enerji, maliyetini etkileyen en önemli unsurdur. Bugün dünyanın en ciddi sorunlarından biri olan enerji krizi, bu yönün önemini daha da vurgulamaktadır [4], [5]. Çizelge 1.1’de farklı malzeme sınıflarının ton başına enerji sarfıyatı gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Farklı malzeme sınıflarının ton başına enerji tüketimi [5].

TON BAŞINA ENERJİ TÜKETİMİ	
MALZEME	kWh
Sıcak çekilmiş çelik	6351
Hurdadan üretilmiş kütük	1412
Yüksek alaşımlı takım çeliği, kütük	4058
Bakır, primer metal, sıcak çekilmiş tel	1450
Alüminyum, primer metal, levha	23300
Alüminyum, sekonder metal, inoks	2000
Plastik, polietilen	15500

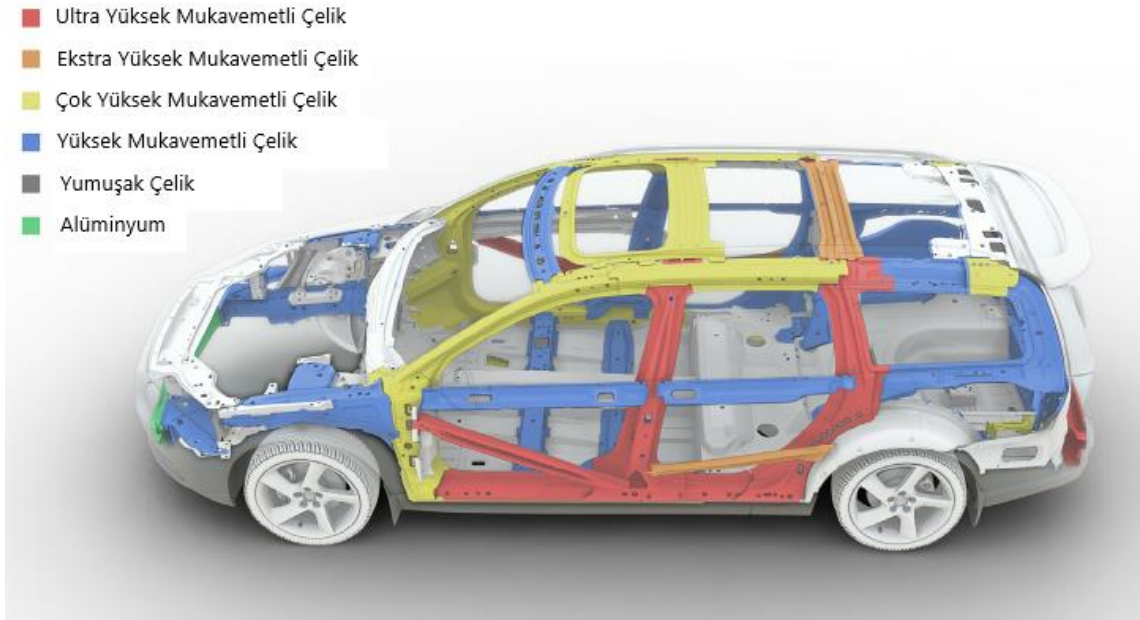


Şekil 1.2. Birinci dünya savaşında kullanılan bir araç [6].

Sac metal malzemeler şekillenebilirlik önemli bir parametredir. Geçmişten günümüze sac malzemelerin kullanımı yüksek oranda artmıştır. Şekil 1.2’de eskiden şekillendirme işlemi yapılması zor iken düz sac levhalar ya da sade geometrilere sahip sac levhalar kullanılırdı. Günümüzde ise Şekil 1.3’de ki gibi daha karmaşık geometrilerde sac malzemelerin imalatı yapılmaktadır.

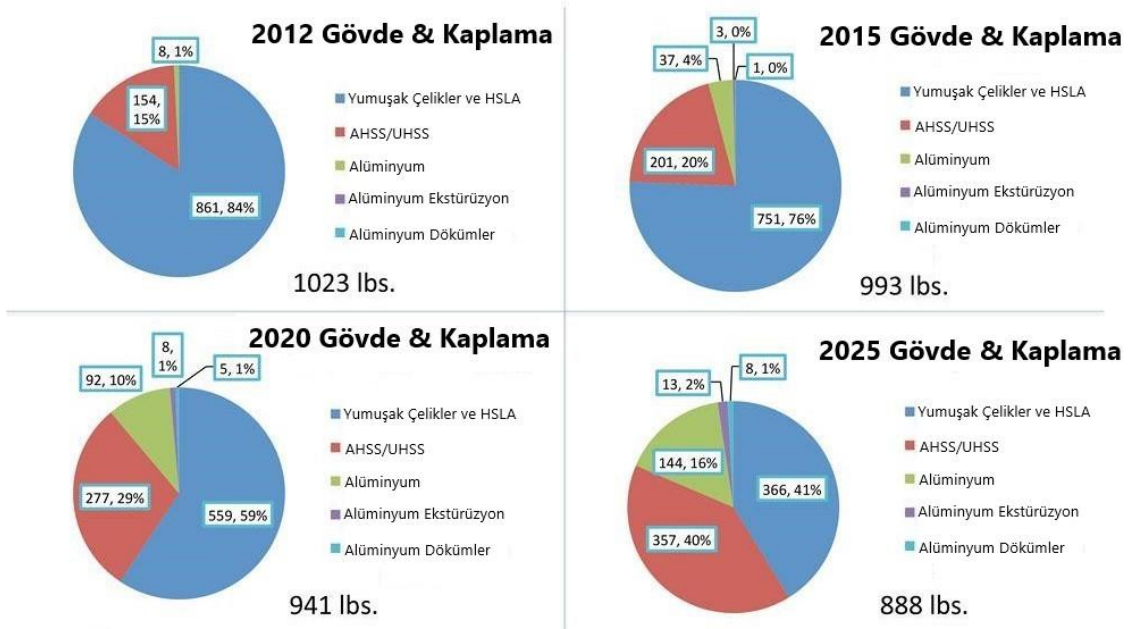


Şekil 1.3. Günümüz üretim yöntemleri ile üretilmiş Lykan Hypersport [7].



Şekil 1.4. Modern Bir Araba Gövdesi Yapısında Gelişmiş Çelik Uygulamaları [8].

Daha düşük CO₂ emisyonu ve hava kirliliğini en aza indirmek için, otomobil endüstrisi son zamanlarda gelişmiş yüksek mukavemetli çelik (AHSS) saclar kullanarak hafif bir gövde yapısı oluşturmaya odaklanmıştır. AHSS, araç endüstrisinin taleplerini karşılamak için olağanüstü çekme niteliklerine, yüksek mukavemet ve yüksek uzama kabiliyetine sahip iyi bir karışımına sahiptir. Çift fazlı (DP), deformasyon kaynaklı plastisite (TRIP) ve ikizleme kaynaklı plastisite (TWIP) çelikler AHSS örnekleridir. Gelişmiş muakvemet özellikleri, AHSS'nin otomotiv endüstrisinde kullanımı, arayer atomsuz (IF) ve yüksek mukavemetli arayüzsüz (HIF) çelikler gibi geleneksel düşük mukavemetli çelik levhalarla karşılaştırıldığında bükülme-flanşlanabilirliği nedeniyle kullanım yerlerinde farklılık vardır. Otomotiv endüstrisinde gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler, geleneksel yumuşak çeliklerin yerini yavaş yavaş almaktadır.



Şekil 1.5. Gövde ve kaplamalar için Kuzey Amerika hafif araç malzeme karışımı ve gelecek yıllara göre tahmini [9].

Son on yılda, AHSS araç içeriğinde büyük ilerlemeler kaydetti ve otomotiv uygulamalarında kullanımı diğer tüm malzemelerden daha hızlı büyümektedir. Bu genişleme, AHSS'nin değişen koşullara uyum sağlama yeteneğinden kaynaklanmaktadır. AHSS, alüminyum, karbon fiber veya magnezyum gibi diğer düşük yoğunluklu malzemelerin aksine, otomobil üreticilerinin ve tedarikçilerin çok küçük değişikliklerle şekillendirme, kaynaklama ve boyama gibi mevcut üretim süreçlerini kullanmaya devam etmelerine olanak tanır. Şekil 1.5'de Kuzey Amerika araçlarında kullanılan malzeme karışımı ve gelecek yıllardaki tahminleri gösterilmektedir. Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler, toplamda %40 oranında büyüyeceği düşünülmektedir [9].

Sac metal bükülme-flanşlanabilirliği genellikle delik genişleme testi (DGT) kullanılarak deneysel olarak değerlendirilebilen delik genişleme oranı (DGT) ile ifade edilir.

Delik genişleme testi (DGT), bir malzemenin karmaşık şekilli bir bileşen üretme kapasitesini ölçer ve esneklik-flanşlanabilirliği belirlemek için kullanılır. Otomotiv uygulamalarında gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerin uygunluğu bilinmesine rağmen, esneklik-flanşlanabilirlik daha az bilinen bir sac metal şekillendirme özelliğidir.

Delik genişletme, otomobil endüstrisinde çeşitli otomobil bileşenleri oluşturmak için üretim alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Endüstride sık olarak karşılaştığımız bileşenler alt kol, arka kol, kontrol kolu ve şasi parçalarıdır. Çelik sacların yüksek

mukavemeti ve düşük şekillendirilebilirliği nedeniyle, 3. nesil gelişmiş yüksek mukavemetli saclar için delik genişletme testin incelenmesi, çekici bir araştırma konusudur.

1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sac malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli ve yüksek korozyon direncine sahip sac malzemelere olan talebin yanı sıra, şekillendirme verileri olan kırılma, buruşma ve şekillendirme sınır değerlerine olan bilgi ihtiyacı da gün geçtikçe artmaktadır [10]–[12].

Sac malzemelerin şekillendirilmesindeki en çok rastlanan sorun biçimleri buruşma, kulaklama, düzensiz şekillendirme, çizilme, yanma ve kırılmadır [13]. Araştırmacılar ve üreticiler sac malzeme üretirken bu tür sorunları ortadan kaldırmak için çalışmaktadırlar. Sonuç olarak, sac malzemelerin şekillendirilebilirliği geniş çapta araştırılmıştır. Hem üreticiler hem de tüketiciler, sac malzemelerin şekillendirilmesi sırasında ortaya çıkan zorlukların üstesinden gelmek için şekillendirilebilirlik verilerine ihtiyaç duyar. Malzemelerin şekillendirilebilirlik ve plastik deformasyon nitelikleri, üretilen ürüne uygun en iyi malzemeyi seçmek için sac malzeme seçim sürecinde çalışan mühendislerine rehberlik eder [10]. Malzemelerin mekanik davranışlarını incelemek yapılarıyla özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemek için farklı mekanik deneyler yapılır. Bu deney yöntemlerinden arasında en yaygın olarak kullanılanları Bölüm 2 paylaşılmıştır. Ancak bu deneylerden elde edilen veriler delik genişletme oranındaki asıl etkenleri belirtecek verilere sahip değildir.

1.1.1. Delik Genişletme Oranı (Hole Expansion Ratio) Etkileyen Parametreler

Üreticiler, gelişmiş güvenlik ve ağırlık azaltma ile AHSS'lerin otomobil sektöründe konuşlandırılmasından büyük ölçüde yararlandı ve zorlu Avrupa emisyon standartlarına daha iyi uymalarını sağladı. Bununla birlikte, AHSS'lerin yüksek mukavemet seviyeleri, sınırlı kenar esneme yeteneği gibi ek şekillendirilebilirlik sorunlarına neden olmuştur [14]. Genel olarak, malzemelerin kenar esneme kabiliyeti, 60° konik zımba açısı kullanılarak başlangıç çapı 10 mm olan bir delik genişletilerek incelenir. Üretimdeki şekillendirme uygulamasına bağlı olarak, flanş yapmak için farklı bir açığa veya farklı bir başlangıç delik çapına sahip üretim sistemleri kullanılabilir.

Parça kenar durumu, delik oluşturma yöntemi, malzeme mikro yapısı, zımba geometrisi ve başlangıç deliği çapının tümü, AHSS'lerde delik genişletme kabiliyetini etkileyen değişkenlerdir [15]–[17].

[18], araştırmalara göre delik genişletme testi sırasında delik kenarına yakın tek eksenli çekme deformasyonu olduğu gözlemlendi. Ancak, tek eksenli çekme testi delik genişletme oranını belirlemek için doğrudan kullanılamaz.

1.1.1.1. *Delik Oluşturma İşlemi ve Kesim Alanı Pürüzlülüğü*

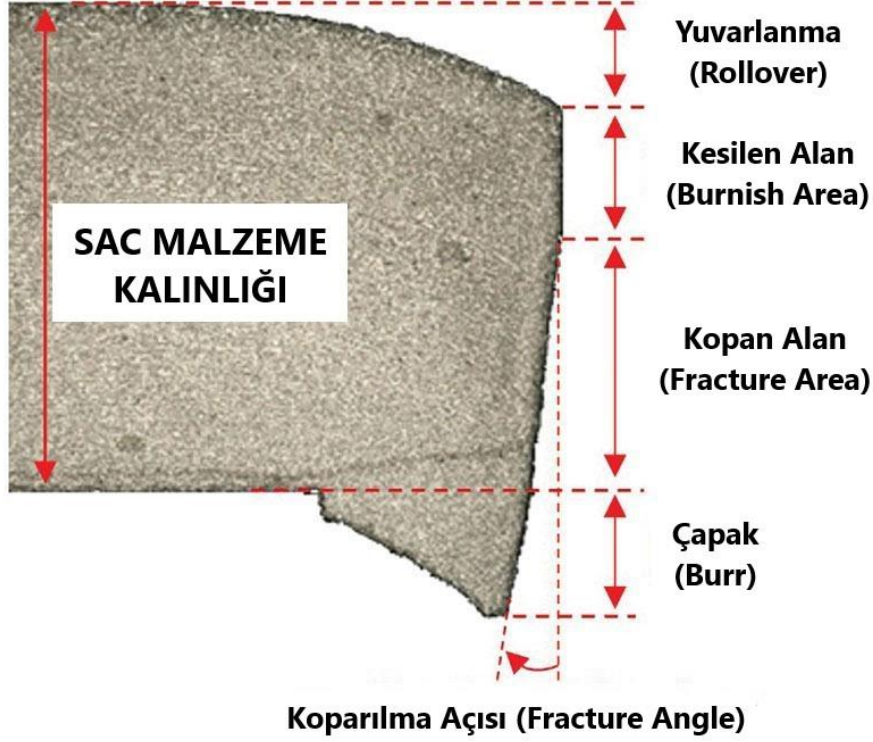
Delik kenarına erken hasar verilmesi nedeniyle, deliğin ilk kenar durumu, malzemenin delik genişletme oranı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [19]–[22]. Sonuç olarak, diğer uygulamaların yanı sıra kesme, işleme, ince kesme, su jeti ile kesme, lazerle kesme, tel erozyon ve elektrik deşarjlı işlemede yaygın olarak kullanılır. Aynı malzeme için, başlangıç deliğini hazırlamanın farklı yolları, büyük ölçüde değişen delik genişletme oranı değerleriyle sonuçlanır [23]–[26].

Delme işlemi, delik genişletme testi (DGT) numunesinin merkez deliğini oluşturmak için yaygın olarak kullanılır, bu da merkezi deliğin kayma kenarı boyunca mikro çatlaklar ve çukurlar oluşması ile sonuçlanır. Araştırmalar [18] delik genişletme oranının (DGO) bir kırılma parametresi olarak tanımladılar ve kırılma tokluğu ile ilişkilendirildi.

Paul, yaptığı araştırmalarda homojen tek eksenli çekme verilerinin delik genişletme oranını açıklamakta yetersiz olduğunu, delik yüzeyindeki deformasyonlardan kaynaklı malzemenin hataların büyümesine karşın gösterdiği direnç olarak yorumladı. Bu sebeple, delik kenarındaki hasarların delik genişletme oranında düşmeye neden olduğunun açıklamıştır.

[27], farklı otomotiv çeliklerinin kenar şekillenebilirlik özelliklerin kesim yöntemleri ile ilişkilendirebilmek için araştırma yaptı. Kullandığı malzemeleri IF, DP 980, 204, 410 AN ve 429 MOD olarak belirtti. Numunede delik oluşturmak için su jeti ile kesme, lazer kesim, delme işlemi ve işleyerek deliklerin oluşması sağlanmıştır. Delik genişletme testi uygulanan numunelerden şu sonuçları çıkarmıştır; DP980 ve 204 numunelerinde delme işlemi ile diğer delik oluşturma işlemleri arasında fark olduğu standart delik delme işleminde delik genişletme oranının düşük çıktığı, alternatif delik oluşturma yöntemlerinde iyi bir iyileştirme olduğunun gözlemledi. IF, 410 AN ve 429 MOD delme işlemi ile hazırlanmış numunelerde iyi sonuçlar gösterdi. Alternatif yöntemlerde ise sadece küçük iyileştirmeler sağladı. Araştırmasından delik genişletme oranının hem

malzemenin haddelme yönü hem de delik imalat yöntemleri ile ilişki olduğu sonucuna vardı.



Şekil 1.6. Kesme işlemi gören sac malzemedeki kesme yüzeyinde oluşan bölgeler [28].

Kesme açıklığı, levhanın kesilmiş kenarının dört temel bölgesini, yuvarlanma (rollover), kesilen alan (burnish area), kopan alan (fracture area) ve çapak (burr) bölgeleri etkiler ve bu nedenle HER değerlerinin tanımlanmasında önemli bir rol oynar [29]–[34]. Şekil 1.6’de sac malzeme kalınlığındaki kesme sonrası oluşan bölgeler gösterilmiştir. Malzemelerin kesilmiş kenar sünekliğini etkileyen parametrelerden biri, kesilmiş kenar üzerinde kesilen bölgenin kopan bölgesine oranıdır. Kopan bölge, zımbalama işlemi tarafından oluşturulan mikro boşlukların çoğunu içerdiğinden, kesilen bölgenin kopan bölgesine oranının artırılması, sac metal kenarının şekillendirilebilmesini önemli ölçüde artırır [33]. Deformasyon sırasında, bu mikro boşluklar veya kırıklar malzeme boyunca yayılır ve nihai kalınlık boyunca çatlak oluşumuna neden olur.

[35], kesme açıklığının ve kesme açısının QP980 çelik kesme kenarlarının kalitesi ve çekme özellikleri üzerindeki etkisini araştırdı ve daha küçük kesme açıklığının, iyi ve kararlı kesme kenarı kalitesi ve gerilim performansı gösterdiği sonucuna vardı. Kesme açıklığını azaltmanın da bir dizi çalışmada DGO’nu iyileştirdiği gösterilmiştir [30].

DGO'nu iyileştirmek için kesme açıklığı azaltılabilse de kesmenin neden olduğu ilk hasar nedeniyle iyileştirme miktarı sınırlıdır, bu nedenle işleme, lazerle kesme ve su jeti ile kesme gibi delik kenarında sifira yakın hasara neden olan yöntemler üretir [25], [34], [36].

1.1.1.2. *Malzeme Yapısı*

DP çeliklerinin kendine özgü mikro yapısı, düşük DGO'nun temel nedenlerinden biridir. Ferrit ve martenzit fazlar DP çeliklerinde bulunur. Martenzit fazı, DP çeliğinin yüksek mukavemetine katkıda bulunurken, ferrit fazı şekillendirilebilirliğine katkıda bulunur. Bununla birlikte, sertlikteki ani değişiklik nedeniyle, oldukça farklı sertlik değerlerine sahip bu fazların kombinasyonu, fazlar arasında gerilme yığılma bölgelerine neden olur ve kenar gerdirme sırasında faz sınırları boyunca çatlaklar hızla yayılır [37]. Daha düzgün bir mikro yapı elde ederek DP çeliklerinin kenar esneme kabiliyetini artırma girişiminde birçok deney yapılmıştır. [33], çeşitli işleme süreçleri kullanılarak üretilen birkaç DP çelik serisinin mikro yapısının, çekme özelliklerini ve delik genişleme davranışını inceledi. Fazlar arasında daha büyük sertlik farkı olan DP çeliklerinin, fazlar arasında daha düşük sertlik farkı olan DP çelikleriyle karşılaştırıldığında, fazlar arasında daha düşük sertlik farkı olan DP mikro yapısının çok daha yüksek HER değerleri ile sonuçlandığını keşfettiler. Benzer şekilde [38] ve [39], DP çeliklerinde ferrit ve martenzit fazlar arasındaki sertlik farkının azalmasının daha yüksek HER değerlerine yol açtığını buldu.

[18] yaptığı deney sonuçlarında, çentikli numuneden elde edilen çekme verilerinin delik genişletme oranı ilişkili olduğunu gözlemledi. Kullandığı malzemeler arasındaki farklılıkları şu şekilde açıkladı; HIF, DP ve TWIP çeliklerin uzamaları sırasıyla %26, %17,5 ve %50 olarak buldu. Delik genişletme oranları ise sırasıyla %74, %27 ve %35 olarak belirledi.

1.1.1.3. *Zımba Geometrisi*

DGO üzerindeki malzeme nitelikleri ve kenar koşullarının etkilerinin yanı sıra, kenar esneme kabiliyetinde zımba geometrisinin önemli bir belirleyici olduğu bulunmuştur [40]–[42]. Farklı zımba geometrileri için sac numune üzerinde çeşitli deformasyon şekillerinin oluşması, farklı zımba geometrileri için DGO değerinin değişmesinde temel nedenidir.

[40], değişken başlangıç kenar koşullarına sahip DP ve CP çeliklerinde delik genişletme

testi için konik ve düz tabanlı zımbalar kullanmıştır. Delik genişletme işlemi için düz bir zımba kullanıldığında, delik konik bir zımba kullanıldığında olduğundan daha az genişler. Şekillendirilebilirlik farkı, her testte oluşturulan gerinim durumları ile ilgilidir; düz zımba testinde, delik kenarından uzakta düzleme yakın gerilme altında kırılma meydana geldiğini ancak konik zımba testinde, tek eksenli gerilme altında her zaman bir kenar kırılması tespit etmiştir. Kesmeden etkilenen bölgeden uzakta kırılmaların başlaması nedeniyle, düz zımbanın kesmeden etkilenen bölge üzerinde daha düşük bir etkisi olduğunu gösterdi. DGO ise, konik zımba testi sırasında çatlaklar kenara yakın başladığı için kenar durumundan etkilenir. Konik bir zımba kullanıldığında, alt çapak konumu, üst çapak konumundan daha büyük bir DGO sağlar. Bununla birlikte, düz bir zımba kullanılırken, düzlem içi kenar gerdirme zımba teması olmadan gerçekleştiğinden, çapak yönlendirmenin DGO üzerinde hiçbir etkisi olmadığını açıklamıştır.

[42] düz tabanlı, yarı küresel ve konik zımba gibi farklı zımba tasarımlarının neden farklı DGO değerlerine ve başlangıç çatlama bölgelerine sahip olduğunu açıklamak için sonlu elemanlar analizi kullanmıştır. Yazara göre, konik tip zımbalarda delik kenarında tek eksenli şekil değiştirme meydana gelirken, düz tabanlı zımbada düzlemsel şekil değiştirme delik kenarından belli bir mesafede meydana gelir iken benzer şekilde yarı küre zımbada tek eksenli-iki eksenli düzlemde şekil değiştirme, delik kenarından belli bir mesafede meydana gelmektedir. Sonuç olarak, düz tabanlı ve yarı küresel zımba, delik kenarından belirli bir mesafede çatlakların başlamasının da düzlem-gerinim koşulundan kaynaklandığı sonucuna varmıştır. Bu sonuç ile yazar düz tabanlı ve yarı küresel zımbalarda daha düşük DGO değerleri ile karşılaşılacağına sonucuna varmıştır. Oysaki DGT numune üzerinde çatlaklar delik kenarından başlar. Tek eksenli tip gerinim deformasyonu nedeniyle, zımba şekli konik olması gerekir. İstenen özelliklere ait malzemenin seçilmesi amacıyla yapılacak olan deneme yanılma uygulamasını azaltmak için DGT doğru yapılması hayati önem taşır. Öte yandan, sınır çekme diyagramı (FLD), kenar çatlama arızasını öngöremez. Sonuç olarak, Akinobu ve arkadaşları [17], kenar-şekil değiştirme hatası için bir kırılma kriteri olarak radyal ve ana gerinim gradyanlarının etkilerini araştırmak için çeşitli başlangıç delik boyutları ile delik genişletme deneyleri gerçekleştirdi. Başlangıç delik çapı arttıkça kırılma için kritik ana stres miktarı düştü ve dolayısıyla daha büyük ilk delik çapları daha düşük HER değerleriyle sonuçlandığını

bulmuştur.

1.2. TEZİN AMACI

Literatür araştırmalarında fark edildiği üzere delik genişletme oranında zımba geometrisi sac malzemeye uyguladığı gerinim türleri ile ilişkilendirilmiştir. Fakat kullanılan zımbalar farklı tıp zımba başı geometrilerini içermektedir. Konik zımbalardaki açı farklılıklarının incelenmesi yönünde önemli bir eksiklik olduğu gözlemlenmemiştir. Araştırmada kullanılan malzemelerden DP çeliklerinin DGT için literatürde kısıtlı çalışmalar yapıldığı, MART çeliklerinin DGT için ise literatürde önemli bir eksikliğinin olduğu gözlemlenmiştir. Otomotiv sektöründeki bu önemli çeliklerin hakkında çok az sayıda çalışma görölmüştür. Yukarıda belirtilen literatürdeki eksikliklerin giderilmesi amacı ile bu çalışmada yüksek mukavemetli çelik olan DP600 ve DP800, ultra yüksek mukavemetli çelik olan MART1200 ve MART1400 çeliklerinin farklı açılı konik zımba geometrilerinin ve ilk delik çaplarının delik genişletme oranına etkisi incelenmiştir.

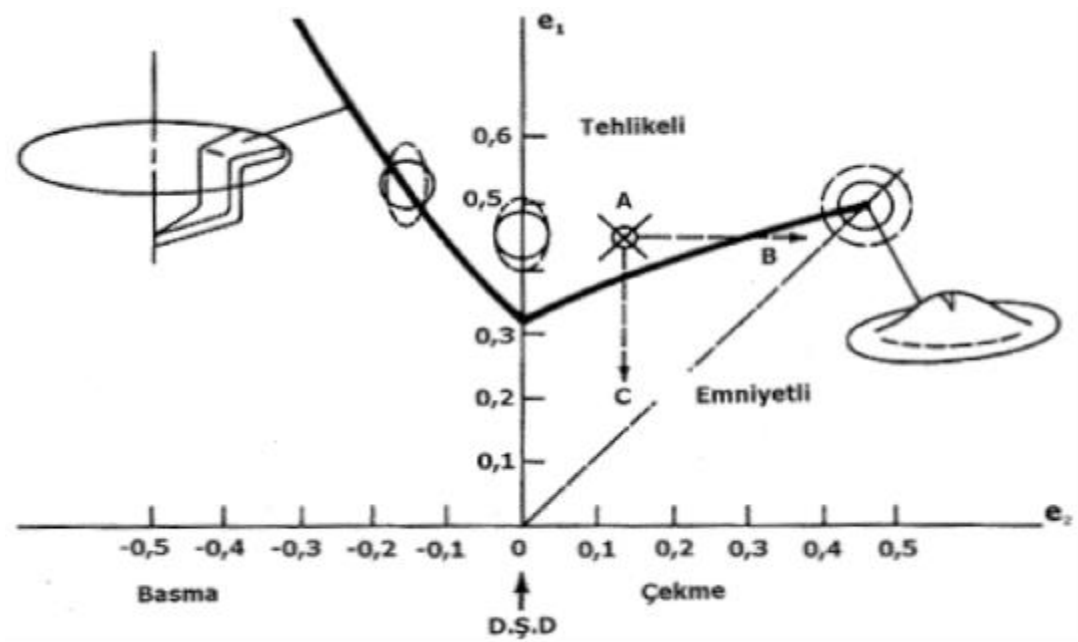


2. SAC MALZEMELERİN ŞEKİLLENDİRME KABİLİYETLERİNİN İNCELENMESİ İÇİN UYGULANILAN TEST YÖNTEMLERİ

2.1. ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMI (ŞSD)

Şekillendirme Sınır Diyagramı, derin çekme ve gerdirmeli biçimlendirmeye tabi tutulduğundaki, farklı şekillendirme durumlarında şekillendirme sınırlarını majör ve minör birim şekil değiştirme oranları cinsinden ifade eder. Sac malzemelerin davranışını gösterir. Çeşitli geometrilere üretilmiş sac numunelere özelleştirilmiş ağlar (mesh) uygulanması ve deformasyon sonrası bu ağlardaki (mesh) boyutların değerlendirilmesi, bir malzemenin şekillendirme sınır diyagramını verir. İki boyutta çekme ve basma testine maruz kalan sac malzemelerin davranışı, Şekillendirme Sınır Diyagramı kullanılarak değerlendirilebilir [10], [43].

Şekillendirme sınır diyagramı (ŞSD), çeşitli durumlarda malzemelerin uzamasını belirlemek için kritik bir araçtır. Keeler ve Goodwin 1960'larda bu fikri ilk öne sürenlerdi. Hecker ise ŞSD'nı yorumlamak için daha basit stratejiler oluşturmuştur. Son yıllarda sac malzemelerin şekillendirilebilirliğini olarak test etmek ve teorik tahminler geliştirmek için birçok araştırma yapılmıştır [10], [44].



Şekil 2.1. Az karbonlu çeliğe ait şekillendirme sınır diyagramı [43].

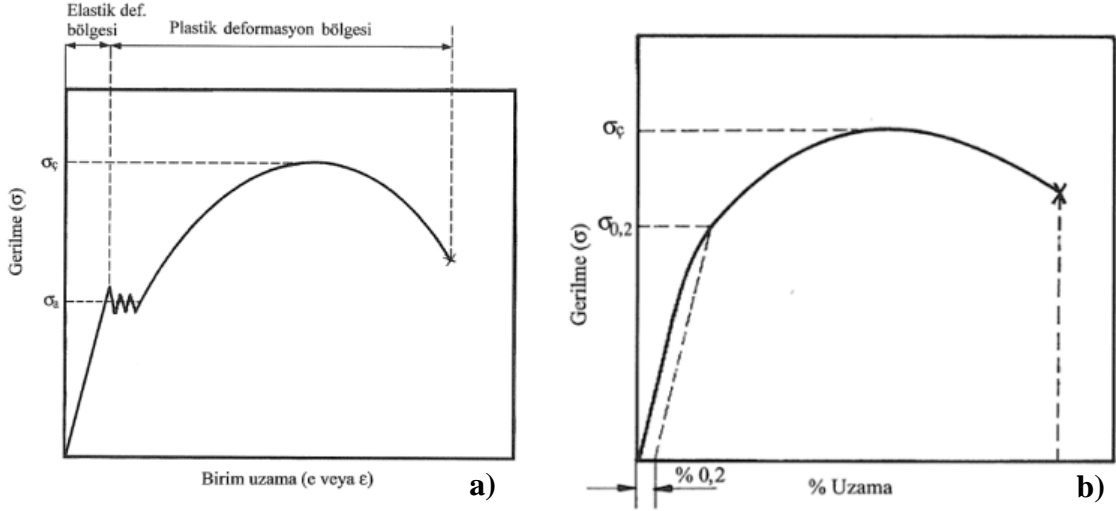
Derin çekme şekillendirme işlemiyle uğraşan üreticiler, sac malzemelerin plastik deformasyon özelliklerini temsil etmek için son zamanlarda kullanılan yaklaşımlardan biri olan ŞSD üzerinde sac malzemelerin plastik deformasyon özelliklerini ifade ederek sac malzemeler hakkında daha fazla bilgi sahibi olacaklar [10]. Buna rağmen sac malzemelerin plastik deformasyon nitelikleri sadece mekanik özelliklerle açıklanamaz.

2.2. ÇEKME TESTİ

Çekme testi, malzemelerin statik bir yüke maruz kaldığında elastik ve plastik özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Bunun için ölçütleri belirlenen yuvarlak veya dikdörtgen bir test parçası gereklidir; Çekme düzeneğine bağlanarak aksenal ve değişken kuvvetler uygulanır.

Hazırlanan numunenin çekme makinesinin çenelerine takılarak deney başlatılır. Test sırasında çekme numunesine sürekli artan bir çekme kuvveti verilir ve numune kırılıncaya kadar hem uygulanan kuvvet hem de numunenin uzaması kaydedilir.

Bu deney sonucunda kuvvet (F) ve uzama (Δl) eğrileri elde edilir. Ancak bu eğri kullanıldığı zaman ek olarak deneyde kullanılan numunenin boyutlarını da vermek gerekir. Bu nedenle, bu eğrinin kullanılması yerine Gerilim-Uzama eğrisi ise daha yaygın olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak, uygulanan kuvvet numunenin ilk kesit alanına ($\sigma = F/A_0$) bölünür, kuvvet verileri stres değerlerine dönüştürülür ve bir Gerilme-Uzama grafiği oluşturulur. Düşük karbonlu çeliklerde bu grafik akma bölgesinde bir dalgalanma olarak gösterir, ancak yüksek karbonlu çeliklerde düz bir çizgi olarak görünür. Sonuç olarak, sert çeliklerde akma alanının görsel tespiti zor olduğundan, elastik bölge çizgisinin yüzde 0,2 kaydığı ve ana çizgiyi kestiği nokta akma noktası olarak kabul edilir. Şekil 2.2'de normalize edilmiş haldeki düşük ve yüksek karbonlu çeliklerin Gerilme-Uzama eğrileri verilmiştir [45], [46].



Şekil 2.2. Normalize Edilmiş a) düşük karbonlu b) yüksek karbonlu çeliklerin Gerilim-Uzama eğrisi [45].

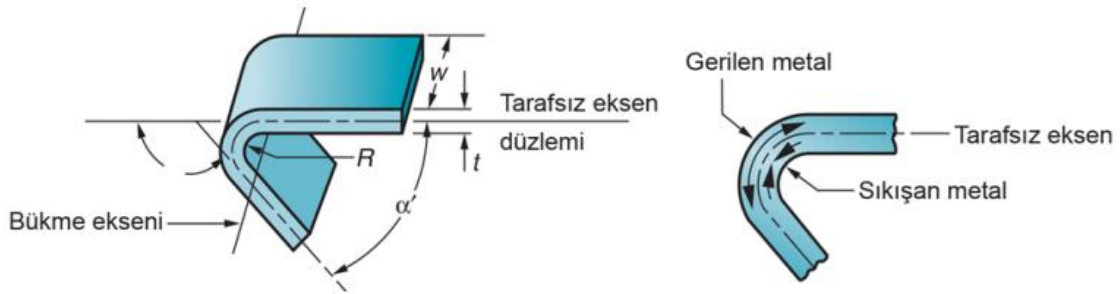
Çekme testi, malzemenin orantılılık sınırı, elastikiyet sınırı, akma sınırını ve çekme dayanımı gibi mukavemet değerleri ile kopma uzaması, kopma büzülmesi ve tokluk gibi süneklik değerlerini belirler. Bu özellikler malzemenin cinsine, kimyasal bileşimine ve metalografik yapısına bağlı değişiklik gösterir.

2.3. GERİ ESNEME DAVRANIŞI

Sac metallerin büyük çoğunluğu ya doğrudan büküm ile ya da büküm istasyonunda kalıplamada bir aşama olarak sac ürün üzerinde bir büküm elemanı oluşturularak yapılmaktadır. Sac metali, şekillendirmek için çekme ve basınç kuvvetleri altında merkez eksen etrafında bükme tekniğidir. Plastik deformasyon meydana gelir ve metalin şekli kalıcı olarak değiştirilir. Yük serbest bırakıldığında deformasyonun elastik kısmı geri yaylanmasına neden olur [47]. Bükme işlemi, özellikle bükme bölgesinde sac kalınlığını biraz inceltir. Bükme ürünleri, başta otomobil sektörü olmak üzere askeri, gıda, enerji, tıp, inşaat, mekanik, uzay ve havacılık endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [48].

Bükme, bir malzemenin ısıtılarak veya ısıtılmadan belirli bir eksen boyunca döndürülerek bükülmesi işlemidir. Bükme prosesinde talaş oluşmaz. Bükme kalıpları, istenilen parça şekline göre imal edilen, dışı kalıp ve zımbadan oluşan ve sac malzeme üzerinde kalıcı deformasyon oluşturan sistemlerdir [48], [49]. Şekil 2.3'de sac malzemenin bükme işlemlerinde kullanılan tanımlar ve ölçülerin gösterimi yapılmıştır aynı zamanda bükme

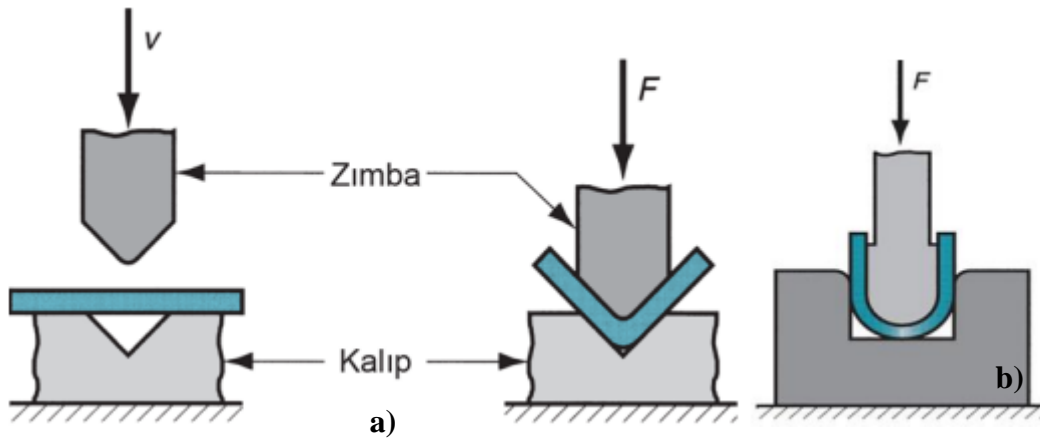
işleminde parçanın tarafsız eksen dışında kalan kısımda malzemede çekme görünürken iç kısımda basma görülmektedir.



Şekil 2.3. Sac malzeme üzerinde ölçülerin ve etkim altında kalan bölgeler [47].

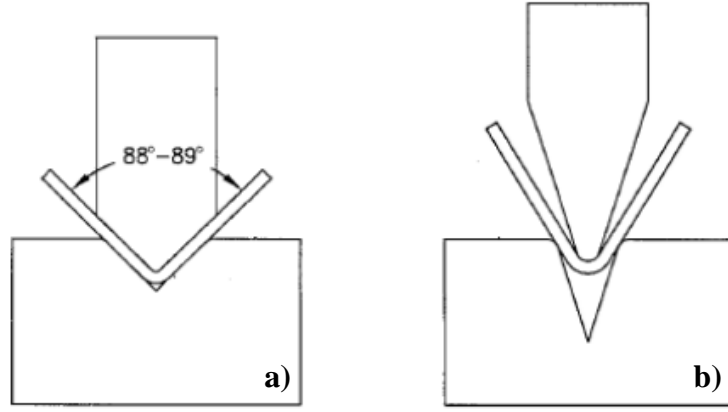
DIN 8580 standardına göre büküm iki kategoriye ayrılır: doğrusal kalıp hareketi ile büküm ve dairesel kalıp hareketi ile büküm olarak ayrılır. V bükme ve U bükme prosedürleri, iki temel doğrusal kalıp bükme tekniğidir. Şekil 2.4, V bükme ve U bükme işleminin bir gösterimini göstermektedir [48].

Ürünün şekline göre, bükme işlemi sekiz kategoriye ayrılır: şekillendirme, oluklu, kenarlama, ezme, birleştirme, kıvrırma, buruşturma ve dairesel şekillendirme [48], [50].



Şekil 2.4. a) V bükme ve b) U bükme şematik aşamalı gösterimi [47].

Alt bükme ve serbest bükme prosedürleri, iki tür V bükme işlemidir. Alt bükme tekniğinde zımba sac malzemeye kuvvet uygulayarak kalıp ile zımba arasındaki boşluğu doldurur ve sac malzeme şekillendirilir. Sac malzeme ise aşağı büküm işlemi sırasında asla kalıbı doldurmaz. Kalıp zımba, serbest büküm tekniğinde presin en alt noktasına ulaşmadan büküm işlemini gerçekleştirir. Şekil 2.5, V bükme prosedürlerinin bir resmini göstermektedir [47].



Şekil 2.5. V bükme türleri a) alt bükme ve b) serbest bükme şematik gösterimi [48].

Sac malzeme kuvvetler altında, şekillendirme işleminden sonra kuvvetler iş parçasından kaldırıldığı sırasında metal levha şeklindeki elastik kayma, geri yaylanma olarak bilinir. Genellikle sac malzemelerde istenmeyen bir olaydır. Aşamalı şekillendirme prosedürlerinde, geri yaylanma, tamamlanmış bileşenlerde değişkenlik ve daha fazla toleransa neden olur. Üretilen ürünlerin kalitesi ve görünümü bu sorunlar sonucunda zarar görmektedir [48], [51]. Malzeme kalınlığı, malzeme, sıcaklık ve proses yöntemleri malzeme üzerindeki zımba kuvvetinin uygulandığı zaman aralığı, kalıp boyutu ve uygulanan yük parametrelerinin tümü geri esneme üzerinde etkilidir [52].

Geri esnemede her ne kadar sac malzeme şekillendirebilirliği hakkında bilgi vermekte olsa da delik genişletme testlerinde şekillendirilen parçalarda çatlaklardan kaynaklı oluşan bir deformasyon gözlemlenmektedir. Bundan dolayı geri esneme verileri malzeme seçimlerinde karar alınabilmesi için tek başına yeterli bir test yöntemi değildir.

2.4. DELİK GENİŞLETME TESTİ (HOLE EXPANSION TEST)

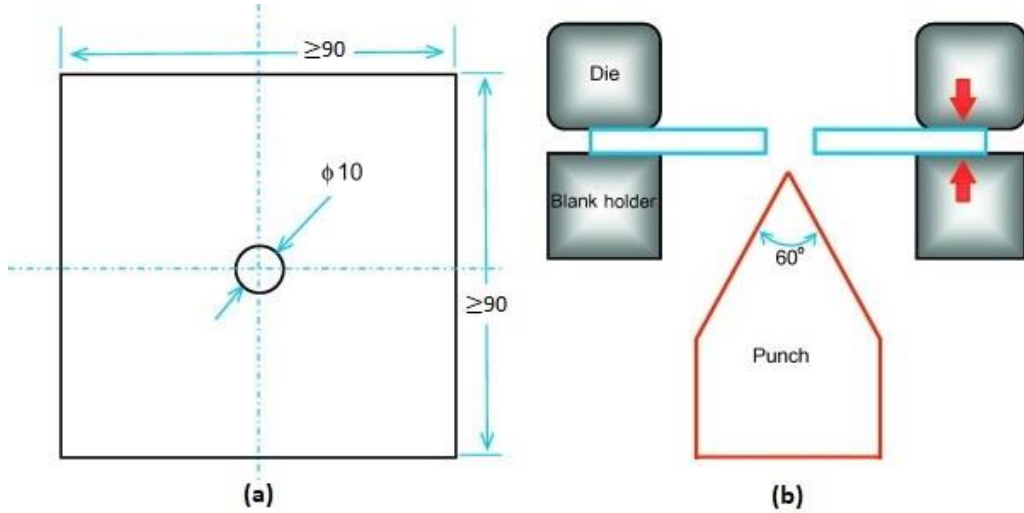
Delik genişletme testi, sac metal malzemelerin kenar şekillenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi için en iyi test yaklaşımlarından biridir. Kenar çatlak hassasiyetlerinin belirlenmesine yönelik bir testtir. Bu test ISO 16630 standardı kapsamında yapılmaktadır.

2009 yılında, ISO standardı ilk kez yayınlandı. Başlangıçta, tekerlek disklerinde ve delikli cıvata delikleri oluşturmak için kullanılan flanşlama ve diğer ilgili biçimlendirme prosedürleri için sac malzemelerin uygulanabilirliğini değerlendirmek için kullanıldı. [53]

Ekonomik ve çevresel amaçların bir sonucu olarak, hafif çelik konstrüksiyon, her

zamankinden daha fazla mukavemet ve daha ince levhalar kullanır hale gelmektedir. Bileşen geometrileri aynı zamanda giderek daha karmaşık hale gelmektedir. Sonuç olarak, delik genişletme testi, araç gövdesi bileşenlerinin üretimi sırasında damgalanmış metal levhaların kesik kenarlarının deforme olabilirliliğini ve kenar kırılmalarına karşı duyarlılıklarını belirlemek için daha popüler hale gelmektedir. [53]

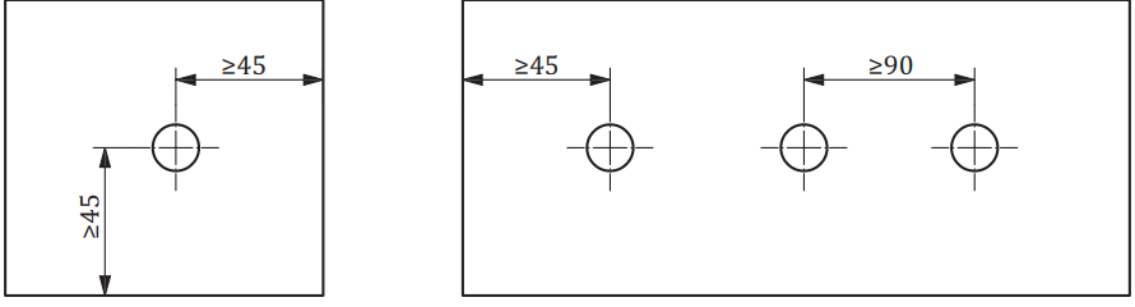
Delik genişletme testinde kullanılan sac metalin, 100 mm x 100 mm boyutlarında ve merkezinde 10 mm çapında bir delik olması gerekmektedir. Zımbanın çapı işlem uygulanacak parçanın delik kenarlarında çatlak oluşturabilecek şekilde büyük genişliğe sahip olmalıdır. Sac metal kalınlığı 1,2 mm ile 6 mm arasında olmalıdır. Sac metali şekillendirmek için 60° konik zımba kullanılmaktadır. Kalıbın köşe radüs yarı çapı 2 mm ile 20 mm arasında olmalıdır. Test esnasında sac malzemenin hareketi önlemek için sabit kalıp ve baskı kalıbı kullanılır [18], [54], [55].



Şekil 2.6. Delik genişletme testi için numune, kalıp ve zımba (ölçüler mm cinsinden)

[56]

Test aşamaları; uygun ölçülerdeki sac malzeme sabit kalıpta, zımba ekseniiyle merkezlenecek şekilde yerleştirilir. Sac malzeme baskı kalıbı ve sabit kalıp arasında hareketi önleyecek kadar sıkıştırma kuvveti uygulanır. Konik zımba delik genişletme işlemine başlatılır. Sac malzemedeki, delikte oluşan deformasyonlar incelenerek, delik iç yüzeyinde ilk oluşan çatlak ile birlikte test bitirilir.



Şekil 2.7. Test Parçası Boyutları [55].

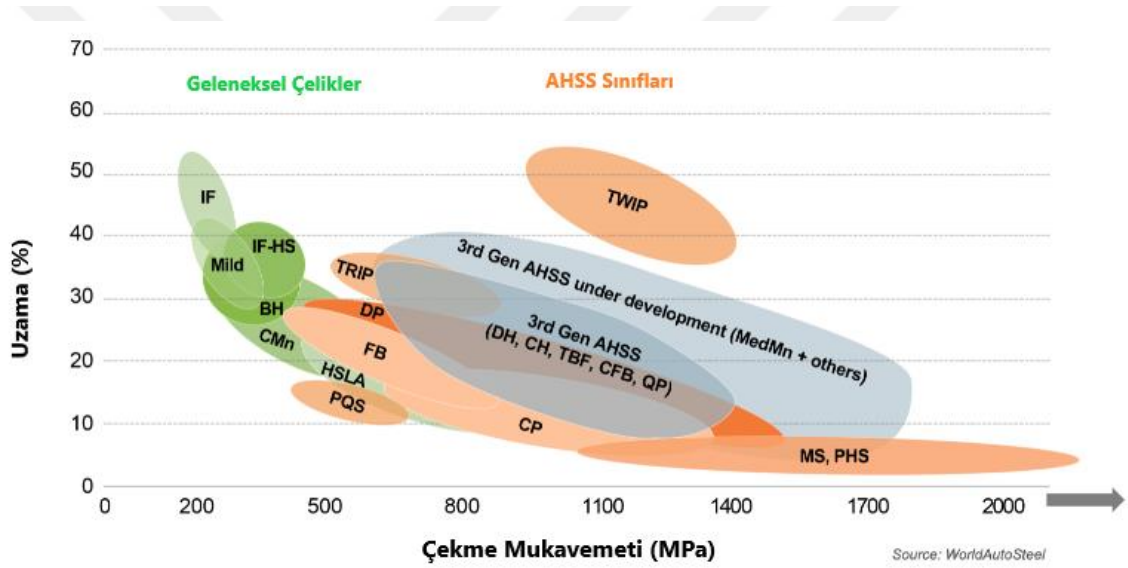
Delik genişletme oranı şu şekilde tanımlanır:

Delik kenarlarının son ve ilk çapları sırasıyla $\varnothing d_f$ ve $\varnothing d_i$ ile temsil edilir.

$$\%DGO = \frac{\varnothing d_f - \varnothing d_i}{\varnothing d_i} * 100 \quad (2.1)$$

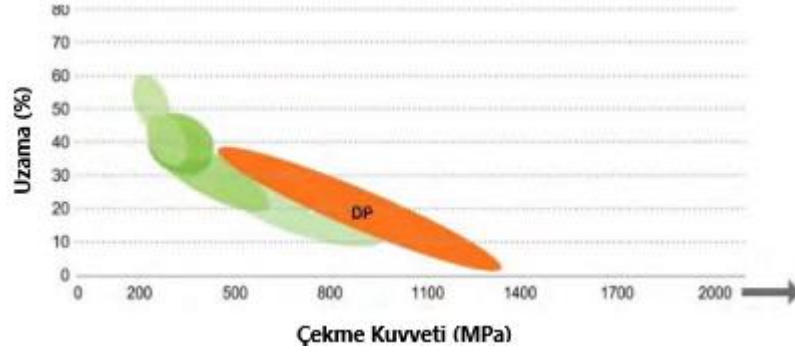
3. GELİŞMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ DP VE MART ÇELİKLERİ

Otomotiv sektörünün gelişmesi ve ilerlemesi için koyulan hedefler; ağırlık hafifletme, yüksek dayanım, güvenlik, geri dönüşüm, karbon salınımı ve işlenebilirlik gibi hedefleri karşılayabilen malzemeler çelikler olmuştur. Bu tanımlara uyan çelikler gelişmiş yüksek mukavemetli çeliklerdir. (Advanced High Strength Steel, AHSS) Bu sınıf içerisinde yer alan CP (Complex Phase) çelikleri, TRIP (Transformation Induced Plasticity) çelikleri, TWIP (Twining Induced Plasticity) çelikler, DP (Dual Phase) çelikleri, MS (Martensitic) çeliklerdir. Bu çelikler yüksek dayanımla birlikte süneklik özellikleri ile beklentileri karşılayabilmektedir. Şekil 3.1’de AHSS ve geleneksel çeliklerin mukavemetlerinin ve kıslaması görülmektedir.

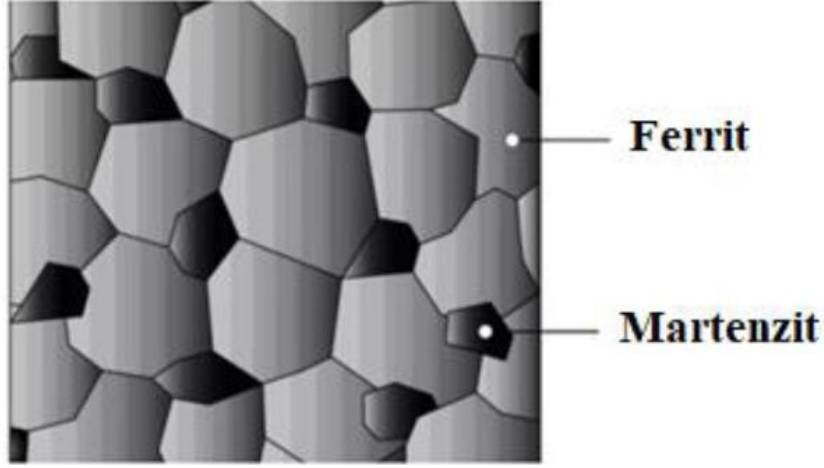


Şekil 3.1. Mevcut ve gelişmekte olan çelik kalitelerinin mukavemetini ve uzamasını karşılaştıran küresel şekillendirilebilirlik diyagramı [1].

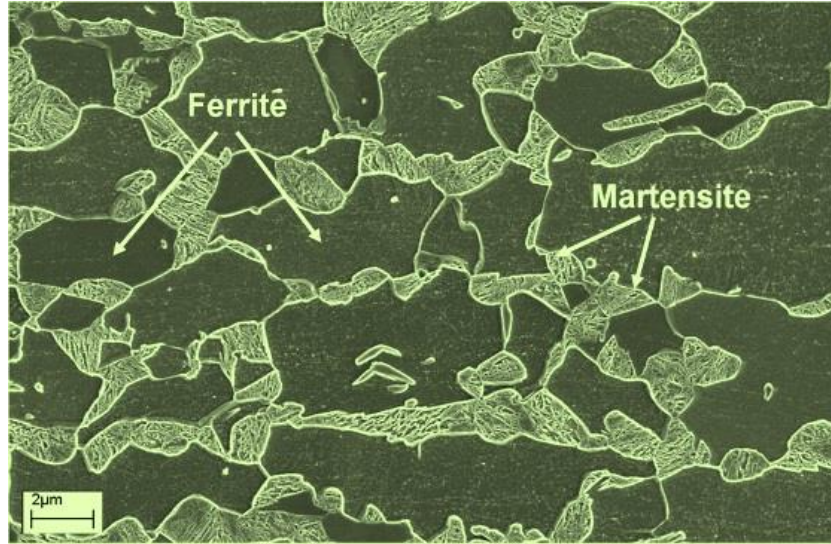
DP çelikleri özellikle otomotiv sektöründe en sık kullanılan AHSS çelikleri olmuştur. Bunun ana nedeni yapısında bulundurduğu ferrit fazı ve martenzit fazından kaynaklanmaktadır. Sert martenzit fazı, sünek ferrit matrisin içinde adacıklar halinde bulunur. Şekil 3.3’de ki gibi model olarak gösterilen bir mikro yapıya sahiptirler.



Şekil 3.2. DP çeliğinin mukavemet ve uzama diyagramı [1].



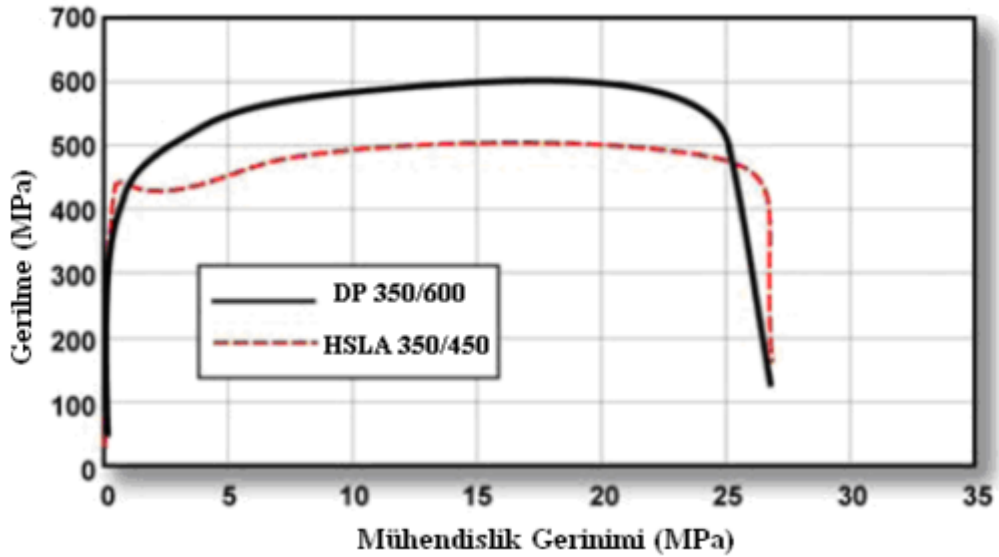
Şekil 3.3. DP çeliklerinin mikroyapısının model görünümü [57].



Şekil 3.4 DP çeliğinin iç mikroyapısı [58].

Ferritik bir matriste, adacıklar halinde sert martenzit faza sahip çelikler, çift fazlı çelikler olarak bilinir. Artan güçle, sert martenzit fazın hacim yüzdesi yükselir. Bazı durumlarda, sıcak haddelenmiş yüksek mukavemetli çeliklerin mikro yapısında önemli düzeyde

beynit bulunabilir. Şekil 3.4'de ferrit içindeki martenzit adalarını gösteren DP çeliğinin mikro yapısını göstermektedir. Yumuşak ferrit genellikle sürekli ve yapısal süneklik verir. Bu çeliklerdeki uzama, deforme olduklarında düşük gerilimlerde yoğunlaşarak onlara yüksek sertleşebilirlik sağlar. Aynı akma mukavemetinde, DP çelikleri, sertleşebilirlikleri ve üstün uzama özellikleri nedeniyle geleneksel çeliklerden önemli ölçüde daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Aynı akma mukavemetinde, DP çelikleri, sertleşebilirlikleri ve üstün uzama özellikleri nedeniyle geleneksel çeliklerden önemli ölçüde daha yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Aynı akma değerlerinde, Şekil 3.5, Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşım (HSLA) çelikler ile Çift Fazlı (DP) çeliklerin gerilme-gerinim eğrilerini karşılaştırır [59].

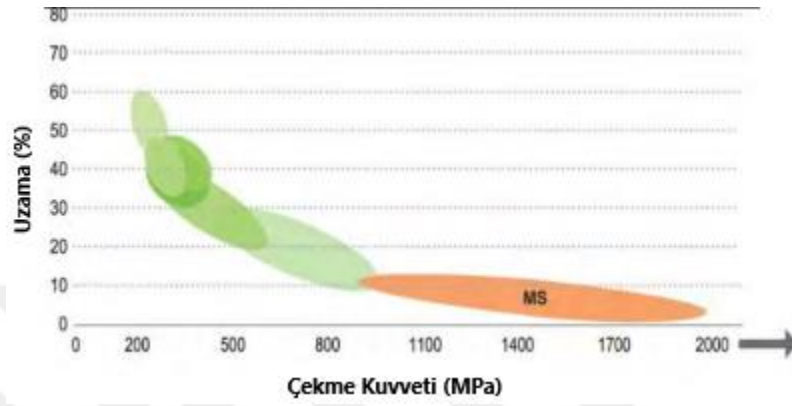


Şekil 3.5. HSLA 350/450 ve DP 350/600 'ün statik gerilme-gerinim kıyaslaması [59].

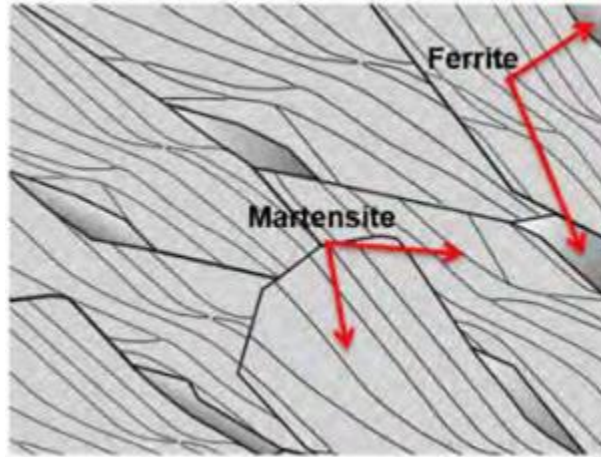
Ayrıca DP ve AHSS standart çeliklerine kıyasla fırın sertleştirme etkisine sahiptir. Fırın sertleşebilirlik etkisi, yüksek sıcaklıklarda ön gerilmeden sonra oluşan akma dayanımındaki artıştır. AHSS'deki çeliğin kimyası ve termal geçmişi, fırın sertleşebilirlik etkisinin verimliliğini etkiler. Karbon, DP çeliklerinin sertleştirilebilirliğini gerçekçi soğutma sıcaklıklarında artırarak martenzit oluşumuna izin verir. Manganez, krom, molibden, vanadyum ve nikel tek başlarına veya kombinasyon halinde eklendiğinde sertleşebilirliği artırır. Karbon gibi, silikon ve fosfor da martenziti güçlendirir. Homojen mekanik nitelikler ve yüksek nokta kaynaklanabilirliği için bu katkı maddeleri dikkatli bir şekilde dahil edilmiştir [59].

Martenzitik (Mart) Bileşimi Olan Çelikler Soğutma işlemi sırasında, sıcak haddeleme

veya tavlama sırasında oluşan östenit, tamamen martenzite dönüştürülerek martenzitik çelik elde edilir [3]. Şekillendirme işleminden sonra yapılan ısıl işlem de yapının elde edilmesi için kullanılabilir. Martenzitik olan çelikler, 1700 MPa'ya kadar çekme mukavemetine sahip olabilir. Sünekliliği artırmak için martenzitik çelikler genellikle su verme işleminden sonra temperlenir.



Şekil 3.6. MS çeliğinin mukavemet ve uzama diyagramı [1].

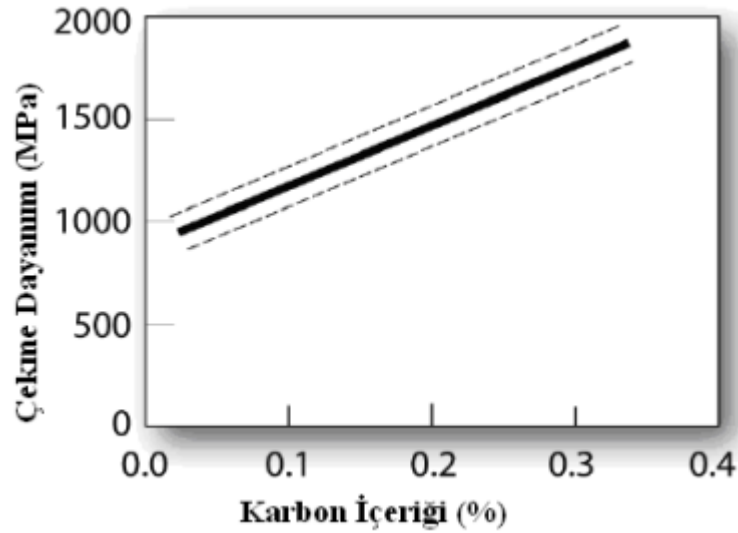


Şekil 3.7. DP çeliklerinin mikroyapısının şematik görünümü [1].



Şekil 3.8. MS çeliğinin iç mikroyapısı [1].

Sertleşebilirliğini ve gücünü artırmak için martenzite karbon eklenebilir. Temperlenmemiş martenzitte karbon içeriği-çekme mukavemeti bağlantısı Şekil 3.9'de görülmektedir. Sertleşebilirliği arttırmak için mangan, silisyum, krom, molibden, bor, vanadyum ve nikel eklenir.



Şekil 3.9. Temperlenmemiş martenzitte karbon içeriği-çekme dayanımı ilişkisi [59].

Bu araştırmada kullanılan sac metaller, İsveçli çelik üreticisi SSAB, 1 mm kalınlığında ticari DP600, DP800, MART1200 ve MART1400 AHSS'ler kullanılmıştır. Çeliklerin kimyasal bileşimlerini incelemek için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi analizi kullanıldı ve bulgular

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Çift Fazlı (DP600 ve DP800) Çeliklerin Kimyasal Bileşimi.

MALZEME	Fe	Mn	Si	C	Al	Nb	V	P	S	Ti
DP600	98,2	0,878	0,1951	0,108	0,0454	0,0160	0,0167	0,0129	0,0024	0,0008
DP800	97,9	1,489	0,1908	0,142	0,0389	0,0166	0,0124	0,0079	0,0039	0,0013

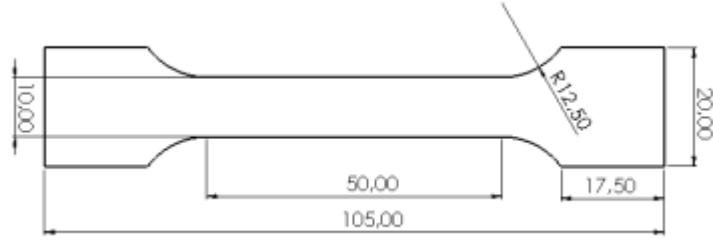
Çizelge 3.2. Martenzitik (MART1200 ve MART1400) Çeliklerin Kimyasal Bileşimi.

MALZEME	Fe	Mn	Si	C	Al	Nb	V	P	S	Ti
MART1200	97,8	1,593	0,2027	0,097	0,0458	0,0023	0,0140	0,0107	0,0039	0,0370
MART1400	98,1	1,201	0,1685	0,179	0,0384	0,0017	0,0184	0,0103	0,0043	0,0326

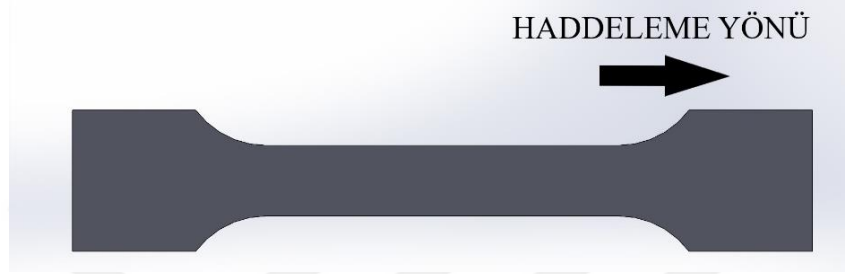
3.1. ÇEKME DENEYLERİ

Çekme testi, bir numuneye deformasyona uğrayıp kırılana kadar tek eksenli çekme kuvveti uygulamayı içeren temel bir malzeme bilimi testidir. Deney süresince ölçülen değerler kayıt edilir. Test bulguları, herhangi bir uygulama için malzeme seçmek, kaliteyi sağlamak ve malzemenin farklı kuvvetler altında nasıl tepki vereceğini tahmin etmek için kullanılır. Kayıt edilen verilerden grafikler elde edilir. Maksimum çekme gerilimi, maksimum uzama ve alandaki küçülmelerdir, bu veriler testten doğrudan elde edilir. Ardından malzemenin young modülü, poisson oranı, akma dayanımı ve sertleşme gibi özellikleri bu veriler kullanılarak belirlenebilir [60]. Bu test, homojen dağılmış malzeme kalitesine sahip ise ayırt edici davranışını değerlendirmek için tatmin edici sonuçlar verir [13].

Şekil 3.10'da boyutları verilen ve Şekil 3.11 haddelene yönü gösterilen çekme numuneleri, malzemeler üzerinde herhangi bir ısı etkisi yaratmamak için haddelene yönünde su jeti işlemi kullanılarak sac levhalardan kesilmiştir.



Şekil 3.10. Çekme testi numunesi teknik resmi.



Şekil 3.11. Çekme testi numunesinin haddeleme yönünün gösterimi.

Bu çalışma için, Zwick/Roell Z600 tek eksenli çekme test cihazı oda sıcaklığında (OS) çekme testlerini gerçekleştirmek için kullanıldı. Bu cihaz ile 600 kN yüke ve 1100 °C sıcaklığa kadar çekme testleri yapılabilmektedir. OS çekme testlerinin yapılmasında TS EN ISO 6892-1 standartı kullanılmıştır. Şekil 3.12’de, çalışmalarda kullanılan çekme mekanizmasının fotoğraflarını göstermektedir. Daha önce CİVEK [57] yaptığı çalışmada DP çelik malzemeleri için oda sıcaklığında (OS) ve $0,005 \text{ s}^{-1}$ gerinim hızında çekme testleri yapılmıştır. MART çelikleri için $0,005 \text{ s}^{-1}$ gerinim hız oranında OS çekme testleri yapmıştır. [57]



Şekil 3.12. Çekme cihazı görünümü [57]

DP600, DP800 ve MART1200, MART1400'ün mekanik özelliklerini belirlemek için 0.005 s^{-1} gerinim hızında tek eksenli çekme testleri ile elde edilen sonuçlar Çizelge 3.3 ve

Çizelge 3.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. OS ve 0.005 s^{-1} gerinim hızında DP600 ve DP800 çeliklerinin akma ve çekme mukavemetleri.

Malzeme	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama	Gerinim Sertleştirme Üssü (n)
DP600	425.6	646.6	0.20	0.15
DP800	550.3	851	0.19	0.16

Çizelge 3.4. OS ve 0.005 s^{-1} gerinim hızında MART1200 ve MART1400 çeliklerinin akma ve çekme mukavemetleri.

Malzeme	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama	Gerinim Sertleştirme Üssü (n)
MART1200	1137,188	1246,084	0,07	0,07
MART1400	1385,519	1455,968	0,07	0,04

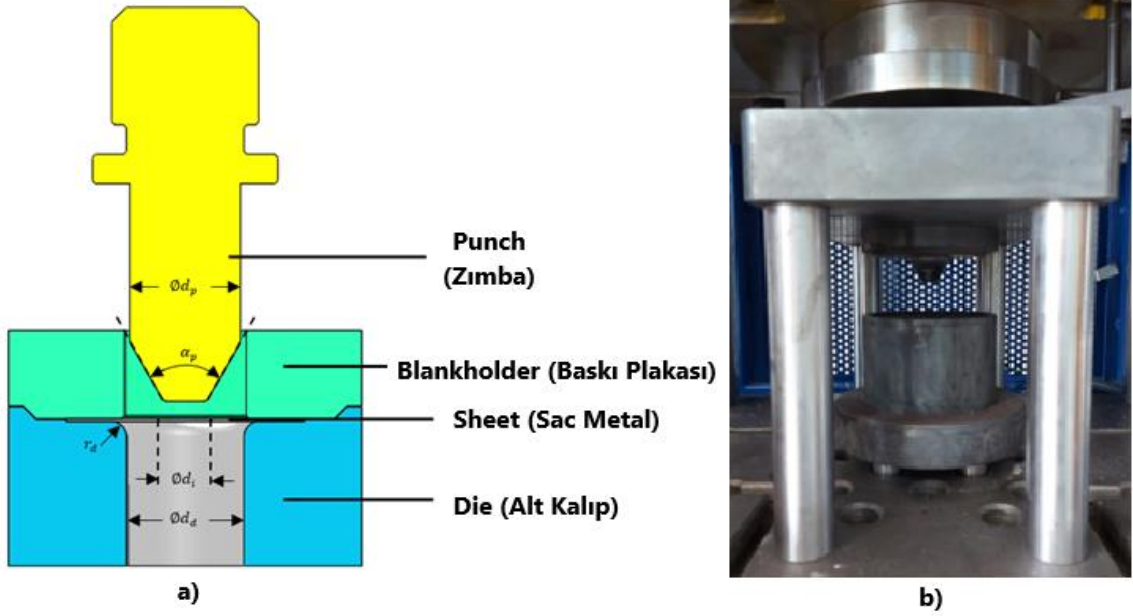
4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. KALIP VE ZIMBA TASARIMI

Bu çalışmada, delikleri genişletmek için farklı açılarda (30° , 60° ve 90°) üç farklı konik zımba kullanılmıştır. Şekil 4.2’ de 30° konik zımba, Şekil 4.3’de 60° konik zımba ve Şekil 4.4’de 90° konik zımbanın teknik resimleri verilmiştir. Zımbaların imal edilmiş gerçek görünüşleri Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Şekil 4.1’de deneysel ve gerçek kalıp kurulumlarının şematik bir gösterimini göstermektedir. Çizelge 4.1’de zımba çapı $\varnothing d_p$, başlangıç deliği çapı $\varnothing d_i$, kalıp boşluğu çapı $\varnothing d_d$, kalıp radüsü yarıçapı r_d ve konik zımba açısının α_i ile gösterilmiştir.

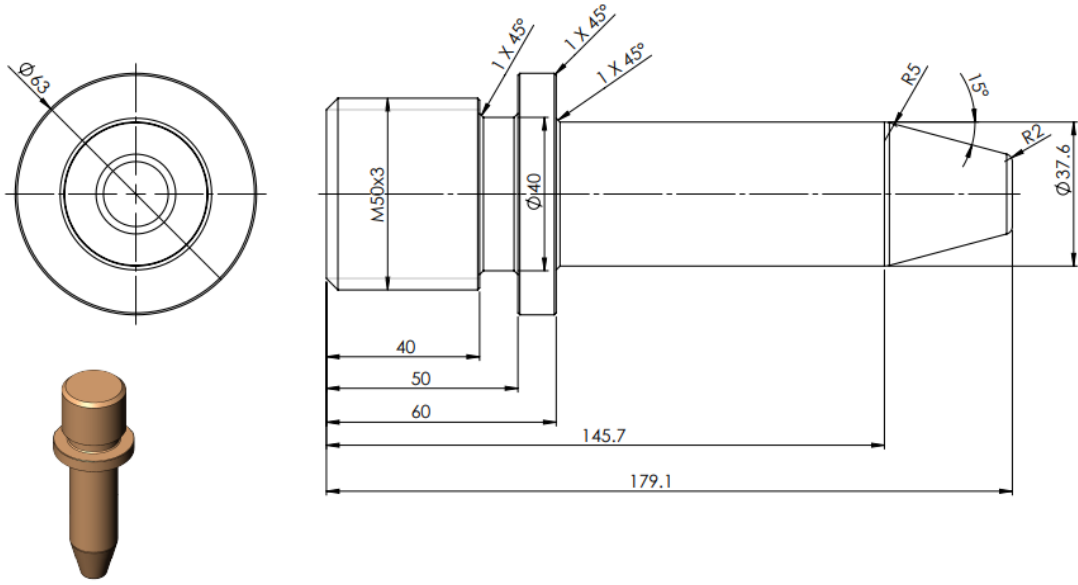
Çizelge 4.1. Deneysel kalıp sisteminin boyutları

TANIM	ÖLÇÜLER
Zımba çapı, $\varnothing d_p$	37.6 mm
Başlangıç delik çapı, $\varnothing d_i$	14, 16, 18 mm
Kalıp boşluğu çapı, $\varnothing d_d$	40.04 mm
Kalıp radüsü yarıçapı, r_d	5 mm
Konik zımba açısı, α_i	30° , 60° , 90°

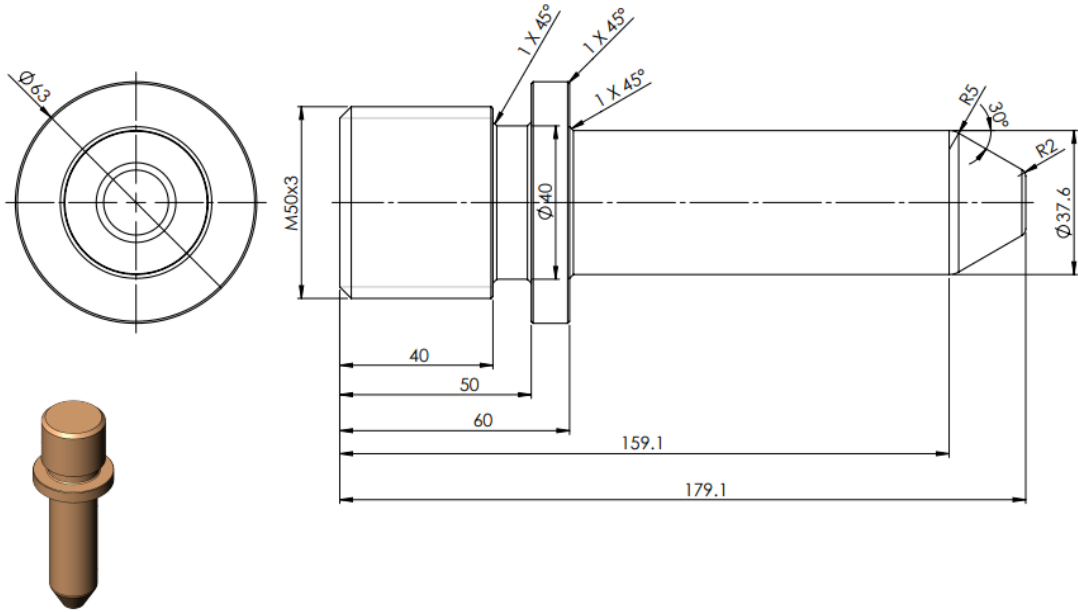


Şekil 4.1. a) Çalışma için hazırlanan delik genişletme testinin şematik gösterimi, ϕd_p , ϕd_i , ϕd_d , r_d , α_i sırasıyla zımba çapı, başlangıç delik çapı, kalıp boşluğu çapı, kalıp radius yarıçapı, konik zımba açısı belirtir. b) Delik genişletme deney düzeneği

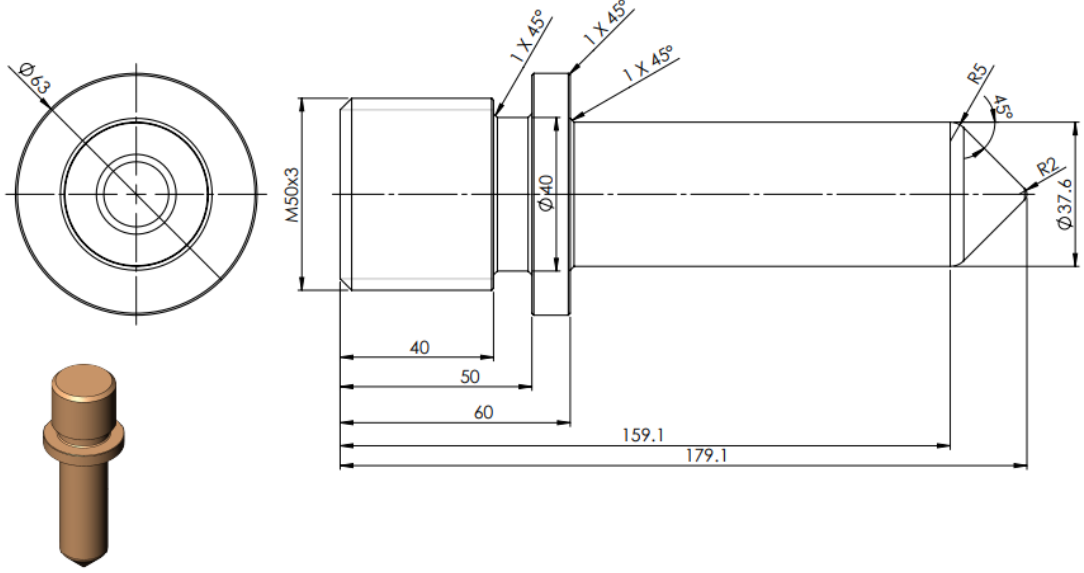
Çekme işlemi sırasında sac malzemenin kalıba akışına yardımcı olmak için, zımba ve dişi kalıp yarıçaplarının mümkün olduğu kadar büyük tutulması gerekir. Ancak zımba ve kalıp yarıçapları çok büyükse, baskı plakasının darbe yüzeyi küçülür, sac malzemenin baskı kalıbı ile temas etmeyen yüzeyi genişler ve sac malzemede istenmeyen kırışıklıklar oluşur. Zımba ve kalıp yarıçapları düşük tutulursa sac malzemenin kalıp içinde akışı için gerekli temas alanı düşürülecek, böylece takım bir kesme kalıbı gibi davranacak ve malzemenin yırtılması daha kolay olacaktır. [13]



Şekil 4.2. 30° konik zımba teknik resmi



Şekil 4.3. 60° konik zımba teknik resmi



Şekil 4.4. 90° konik zımba teknik resmi



Şekil 4.5. a) 30° konik zımba b) 60° konik zımba c) 90° konik zımba

4.2. DENEY YÖNTEMİ

Deney Düzce Üniversitesi laboratuvarında Yücel Makine Hidrolik Presinde yapılmıştır. Şekil 4.6'da pres makinası ve deney düzeneği görülmektedir. 14 mm, 16 mm ve 18 mm iç delik çaplarında ve 80 mm dış çapta delik genişletme test numuneleri, delik kenarlarında herhangi bir ısı ve ilk hasar etkisinden kaçınmak için su jeti ile kesme işlemi

kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmalarda, delikleri genişletmek için farklı açılarda (30°, 60° ve 90°) üç farklı konik zımba kullanılmıştır. Şekil 4.1’de deneysel ve gerçek kalıp kurulumlarının şematik bir gösterimini göstermektedir.

Sac malzemenin akışının önlenmesi için yaklaşık 60bar baskı plakası kuvvet verilmiştir. İlk olarak alt kalıba yerleştirilecek olan malzemenin iç delik çapının zımba ile temas edecek yüzeyine grafit sprej (Graphite 702) uygulanmıştır. Yağlayıcı uygulanan numeneler alt kalıba deney düzeneği ile eş merkezli olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sonrasın da oluşturulan test numunelerindeki deliklerin, DGO’nu hesaplamak için her bir ilerleyişteki numune iç çap kenarı izlenirken zımba darbesi adım adım artırılarak sırayla genişletildi. Her aşamadan sonra, delik kenarlarındaki hasar durumu gözlemlenerek sıradaki zımba ilerleyişi ona göre artışlar atanmıştır. Başlangıçta 6 ila 8 mm strok uygulandı, ardından delik kenarlarında aşırı çatlak açılmasını en aza indirmek için daha küçük stroklar kullanıldı. Daha sonra çatlak başlangıcını yakalamak için delik kenarlarında bir kararsızlığın ortaya çıktığı gözlemlendikten sonra strok değeri 1 mm'ye düşürülmüştür. Delik kenarında kalınlık boyunca bir kırılma görüldükten sonra, deney durduruldu.



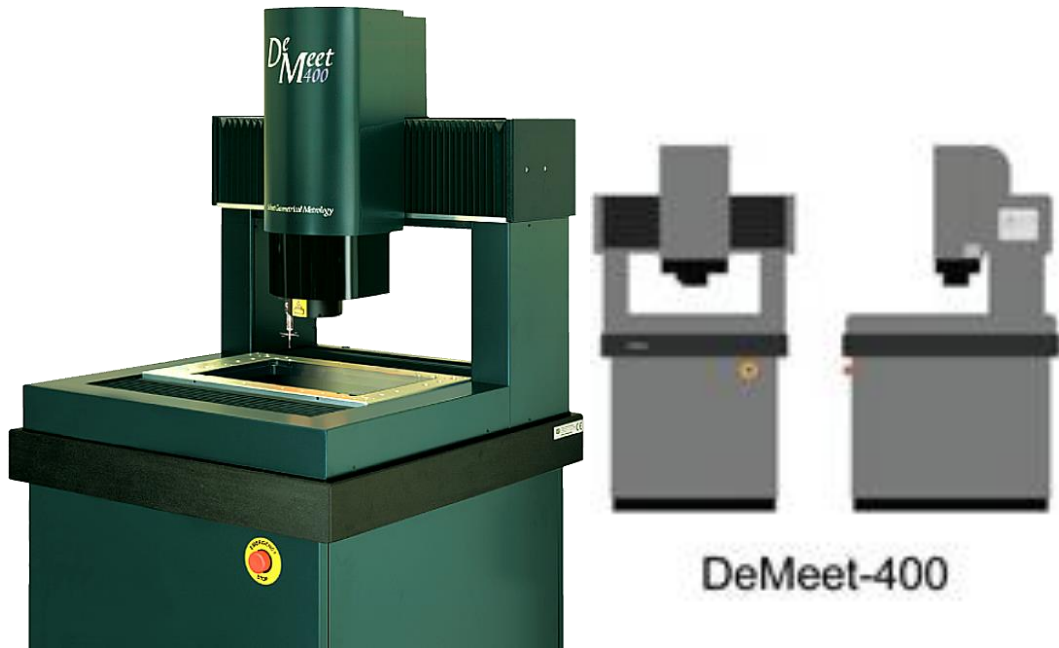
Şekil 4.6. Düzce Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarı deney düzeneği

4.3. NUMUNELERİN ÇAP ÖLÇÜMÜ

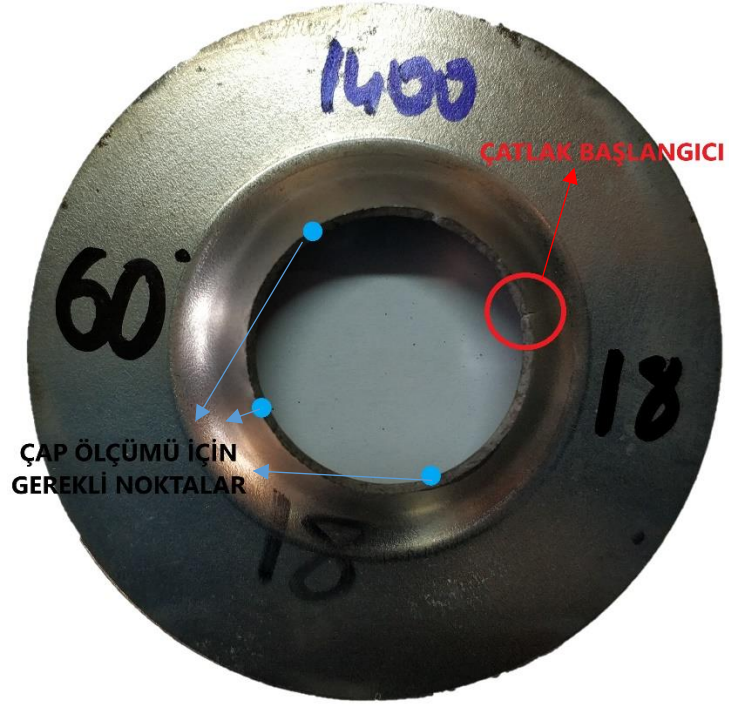
Şekillendirilmiş olan test numuneleri De Meet 400 Schut 3D CNC koordinat ölçüm cihazında (Şekil 4.7) çap değerinin ölçümü yapılmıştır. Parçalar, cihaza dik bir konumda siyah bir düzlem üzerinde yerleştirilmiştir. Cihaz, parça görüntüsünü 2x büyütürken daha net ve temiz bir görüntü ortaya çıkarmıştır.

Parçalardan alınan ölçüler şu şekildedir;

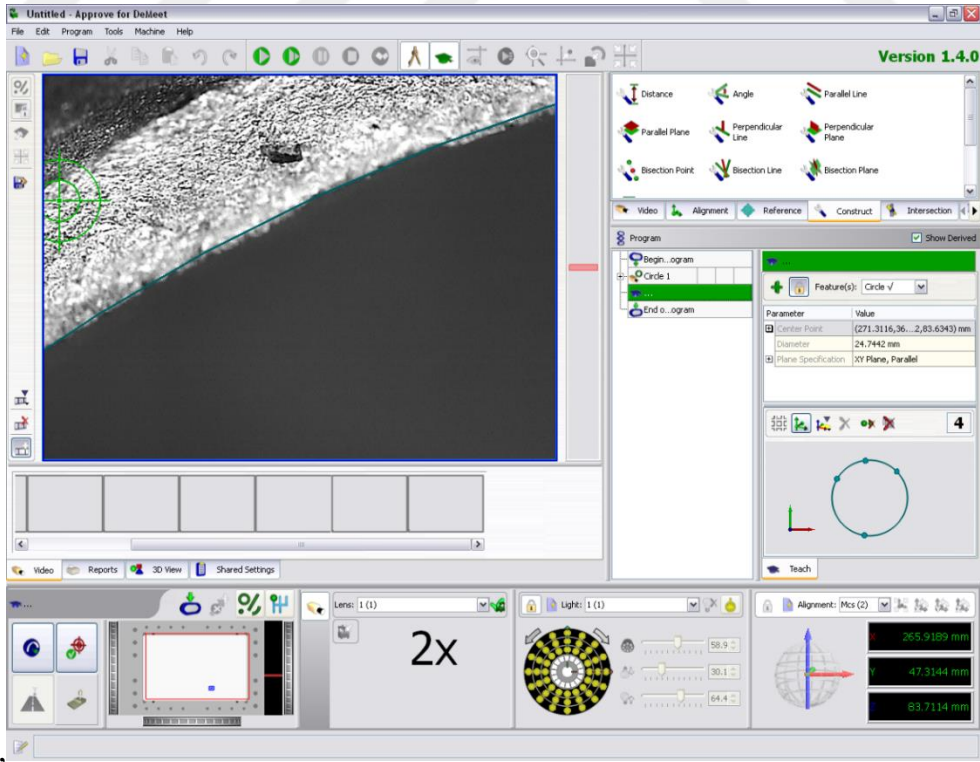
Çatlaktan kaynaklı ölçü değişikliğini minimuma düşürmek amacıyla çatlak bölgesinden uzakta, parçanın iç yüzeyindeki kenarlardan noktalar alınmıştır. Alınan noktalardan çap ölçüsü belirlenmiştir. Şekil 4.8’de çatlak başlangıcı ve buna göre çap ölçümü için alınan noktaların konumları şematik bir şekilde gösterilmiştir. Bu ölçü çatlağın ilk oluşma anına yaklaşık olan en yakın ölçüdür.



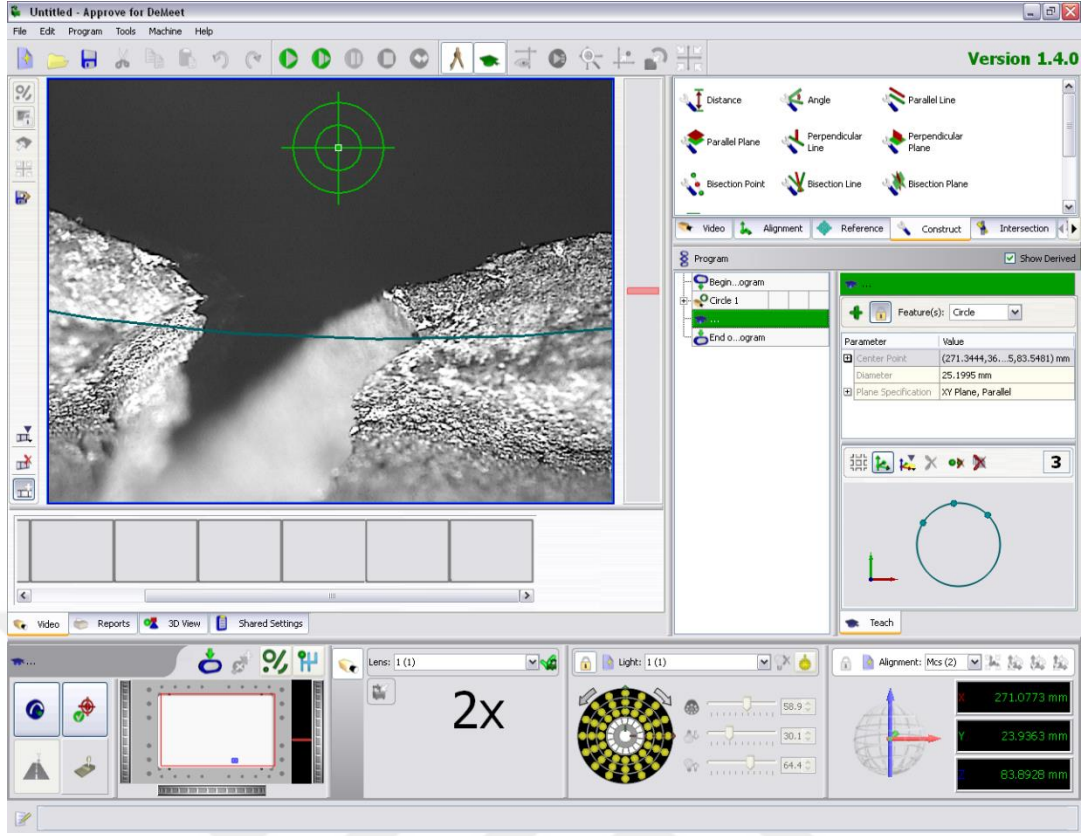
Şekil 4.7. a) De Meet 400 cihazı, b) De Meet 400 şematik gösterimi [61], [62].



Şekil 4.8. 60° konik açılı zımba ile şekillendirilmiş, başlangıç delik çapı 18 mm MART1400 çeliğinin delik genişletme işlemi sonrasında ölçüm almak için atanan nokta konumlarının şematik gösterimi.

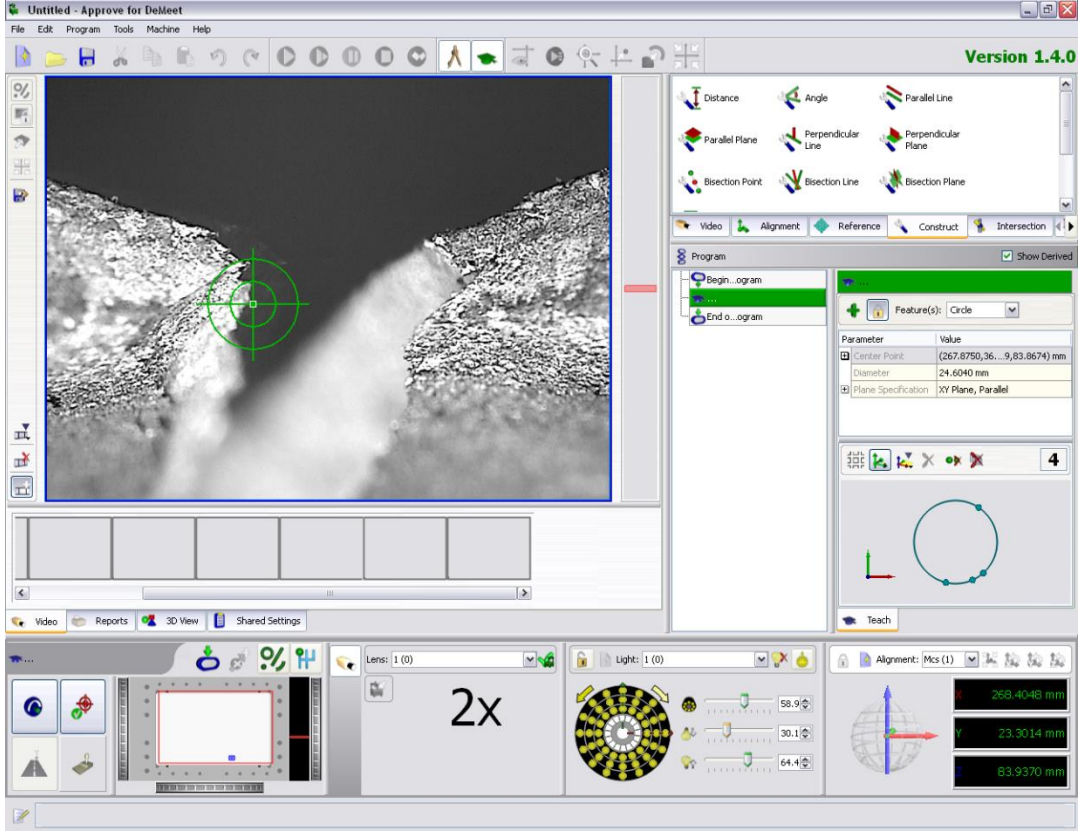


Şekil 4.9. De Meet 400 cihazından parça iç çap yüzeyi ile eşleşmiş çapın gösterimi.



Şekil 4.10. De Meet 400 cihazından çatlak üzerinden geçen çapın gösterimi.

Çatlakta oluşan esnmeden kaynaklı değişen çapın ölçümü yapılmıştır. İki nokta çatlakların yüzeylerinde diğer noktalar ise çatlağın olduğu yüzeyin zıt yönünden alınmıştır. Bu ölçü çizelgelerde esneme çapı olarak verilmiştir.

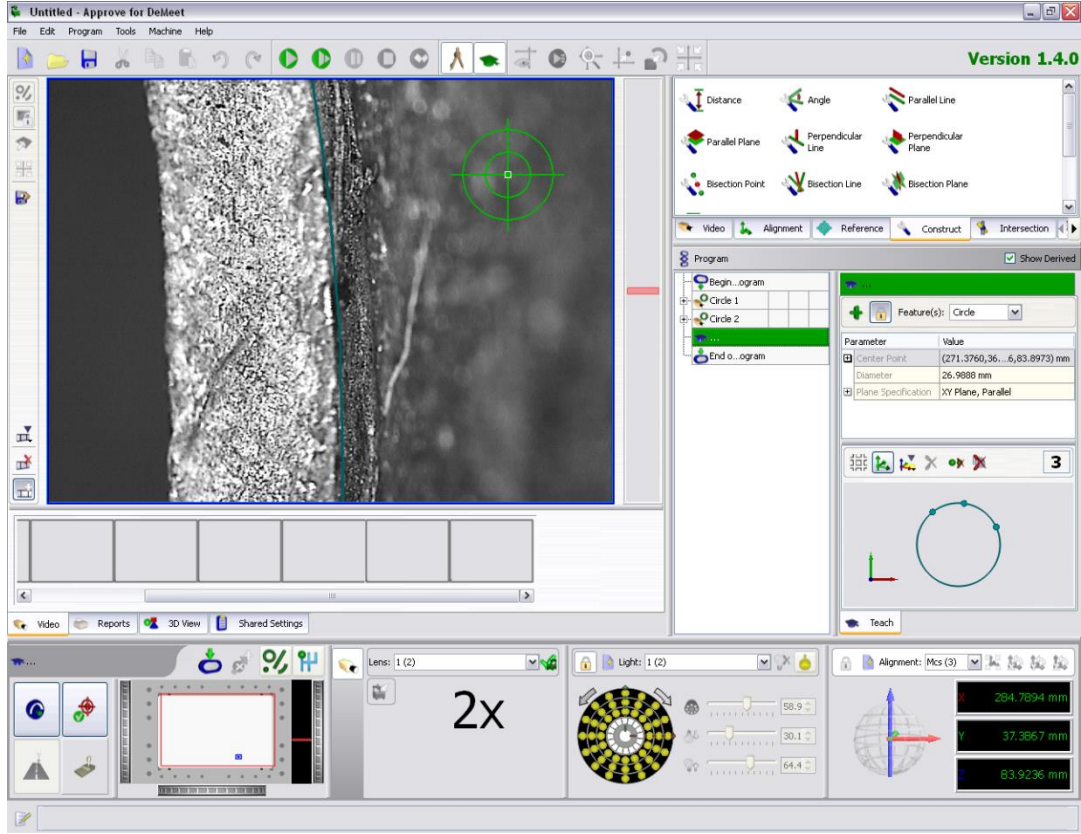


Şekil 4.11. De Meet 400 cihazında alınan çatlak görseli.

Şekillenmiş parçaların dış çap ölçüleri alınmıştır. Çatlaktan uzak yerlerde noktalar alınarak belirlenmiştir.

Alınan değerlerden ek olarak şekillenmiş parçanın deformasyona uğramış yüzeylerin et kalınlıkları belirlenmiştir.

Alınan değerler virgülden sonra iki basamak olarak alınmıştır. Değerler yuvarlanmıştır.



Şekil 4.12. De Meet 400 cihazından parça dış çap yüzeyi ile eşleşmiş çapın gösterimi.

Alınan ölçüler, noktalar belirlendikten sonra oluşan turkuaz renkli dairenin temas noktaları kontrol edilerek yapılan ölçümün doğruluğu teyit edilmiştir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.12’de yapılan işlem gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde dairenin parça yüzeyinde birbirine eş bir şekilde düzlemde yerleştiği görülmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Konik zımba açısı ile delik delme testi sırasında zımba açısı ne olursa olsun delik kenarında tek eksenli gerilme oluşur [42]. Ancak delik genişletme testleri sırasında, konik zımba açısındaki değişiklik, delik kenarında farklı gerilim gradyanları yaratır. Delik kenarındaki gerilme gradyanı ne kadar yüksek olursa, sac metal malzeme bir kenar şekillendirmesi o kadar düzgün deforme olur [63]. Delik kenarı çevresinde üç nokta oluşturularak, büyütülmüş deliklerin çapları De Meet 400 ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Yüzdelik DGO değerleri daha sonra Denklem (2.1) kullanılarak hesaplandı. Ancak bu araştırmada, DP çeliklerinde konik zımba açısının (30° , 60° ve 90°) ve başlangıç delik çaplarının (14 mm, 16 mm ve 18 mm) değiştirilmesinin DGO üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı keşfedildi.

5.1. DE MEET 400 ÖLÇÜM CİHAZINDAN ALINAN DEĞERLER

De Meet 400 ölçüm cihazından alınan ölçüm değerleri aşağıda belirtilmiştir.

Çizelge 5.1. DP600 çelik deney numunelerinden alınan ölçümler.

DP600									
	30°			60°			90°		
Başlangıç Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)
14	24,05	25,6	23,9	24,23	26,07	24,09	24,5	25,68	24,3
16	27,1	28,7	26,86	26,97	28	26,81	26,9	27,72	26,7
18	30,32	31,8	30,25	30,22	31,7	30,07	31,33	32,42	31,13

Çizelge 5.2. DP800 çelik deney numunelerinden alınan ölçümler.

DP800									
	30°			60°			90°		
Başlangıç Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)
14	22,23	23,4	21,81	21,9	23,56	21,81	20,1	21,41	19,84
16	25,68	27,6	25,2	22,64	24	22,46	25,28	26,42	24,9
18	26,45	28,1	26,25	28,7	29,72	28,36	27,12	28,16	26,9

Çizelge 5.3. MART1200 çelik deney numunelerinden alınan ölçümler.

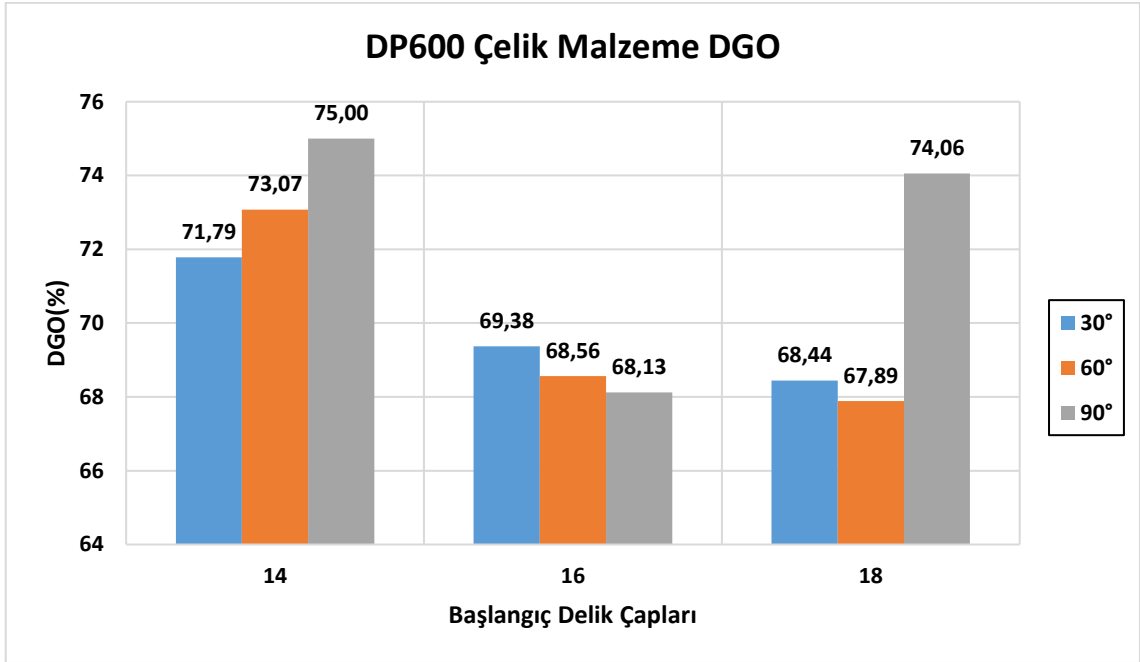
MART1200									
	30°			60°			90°		
Başlangıç Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)
14	22,28	23,69	21,87	22,58	24,4	22,23	22,88	25,01	22,4
16	24,56	26,32	24,51	25,42	27,45	25,29	26,37	28,68	26,34
18	27,53	28,94	27,42	29,79	31,16	29,47	30,22	32,05	30,12

Çizelge 5.4. MART1400 çelik deney numunelerinden alınan ölçümler.

MART1400									
	30°			60°			90°		
Başlangıç Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Esneme Çapı (mm)
14	20,52	21,36	19,95	21,74	23,79	21,73	20,42	23,12	20,12
16	23,42	25,18	23,12	24,73	27,05	24,54	25,44	27,74	25,22
18	25,89	27,04	25,22	27,98	29,69	27,92	28,38	30,26	28,26

5.2. DP600 VE DP800 ÇELİKLERİNİN DGO

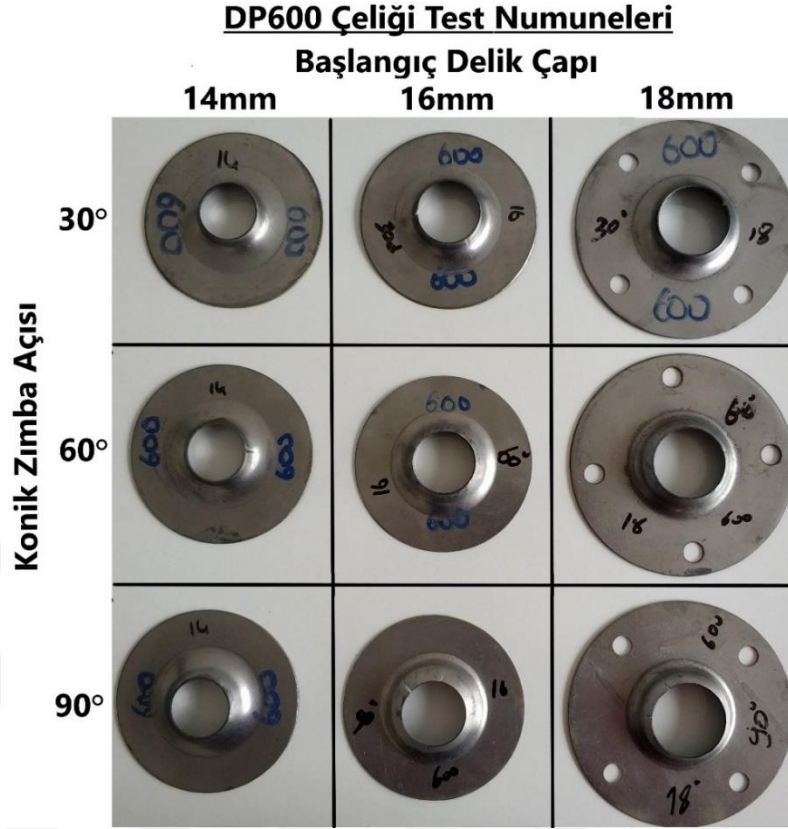
Şekil 5.1’de DP600 çeliğinin çeşitli konik zımba açılarında ve başlangıç delik çaplarındaki DGO değerleri gösterilmektedir. Başlangıç delik çapı (BDÇ) 14 mm olan deney numunelerinde konik zımba açısı artar iken DGO’da da bir artış olduğu görülmektedir. BDÇ 16 mm olan deney numuneleri için aynı gözlem yapılamamakta ve tam tersi bir durum görülmektedir. BDÇ 16 mm olan deney numunelerinde artan konik zımba açısı ile DGO oranlarında bir düşüş gözlemlenmiştir. BDÇ 18 mm olan deney numunelerinde ise doğrusal olmayan sonuçlar gözlemlendi.



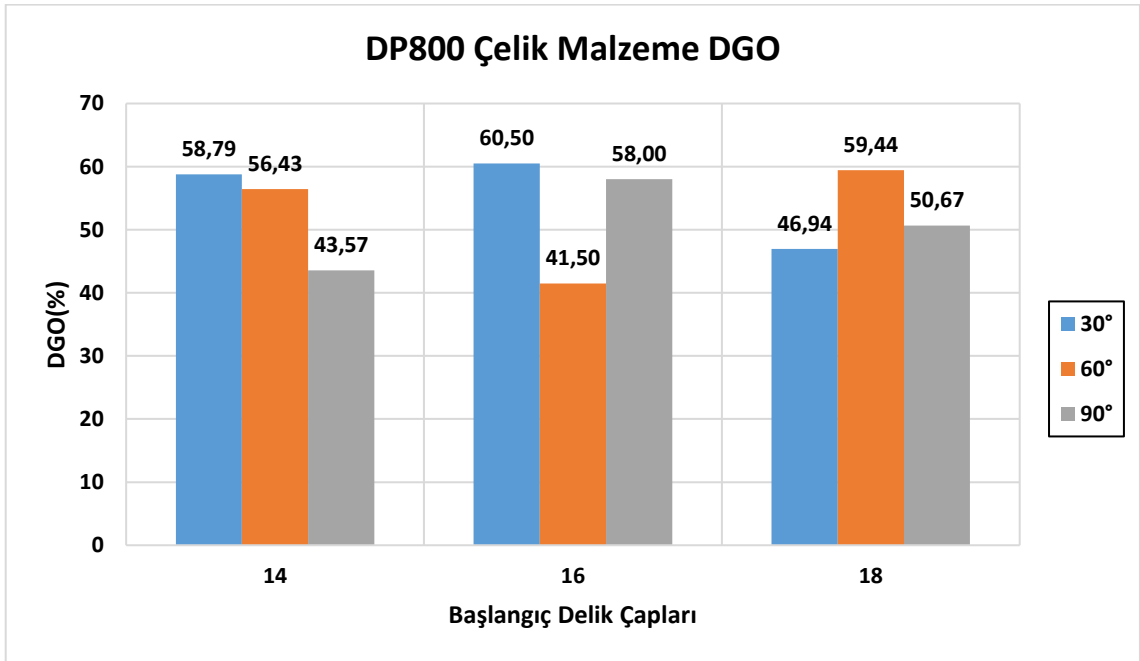
Şekil 5.1. DP600 çeliğinde konik zımba açısının ve başlangıç delik çapının DGO davranışını üzerindeki etkisi.

Şekil 5.2’de Delik genişletme testi sonrasında çatlak oluşumları gözlemlenen ve deneyi durdurulan DP600 çelik malzemeleri şematik bir biçimde gösterilmektedir.

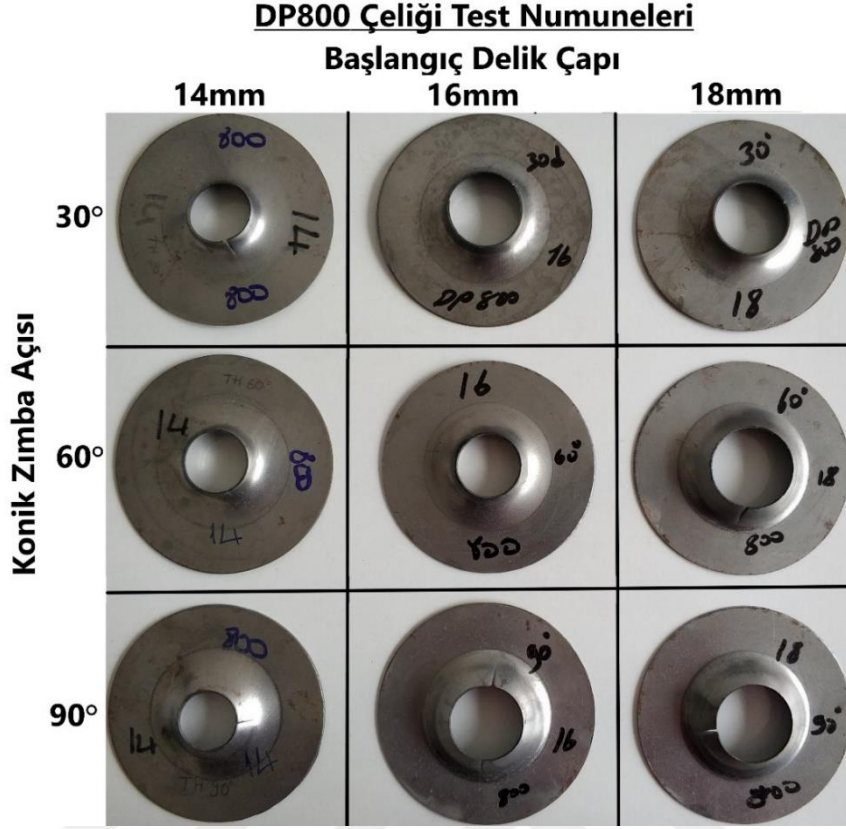
Şekil 5.3’de DP800 çeliğinin çeşitli konik zımba açılarında ve başlangıç delik çaplarındaki DGO değerleri gösterilmektedir. BDÇ 14 mm olan test numunelerinde artan konik zımba açısı ile birlikte azalan DGO gözlemlenmiştir. BDÇ 16 mm ve 18 mm olan deney numunelerinde ise doğrusal olmayan sonuçlar alınmıştır. Şekil 5.4’de Delik genişletme testi sonrasında çatlak oluşumları gözlemlenen ve deneyi durdurulan DP800 çelik malzemeleri şematik bir biçimde gösterilmektedir.



Şekil 5.2. DP600 Çeliği test numunelerinin delik genişletme testlerinden sonraki görünümleri.



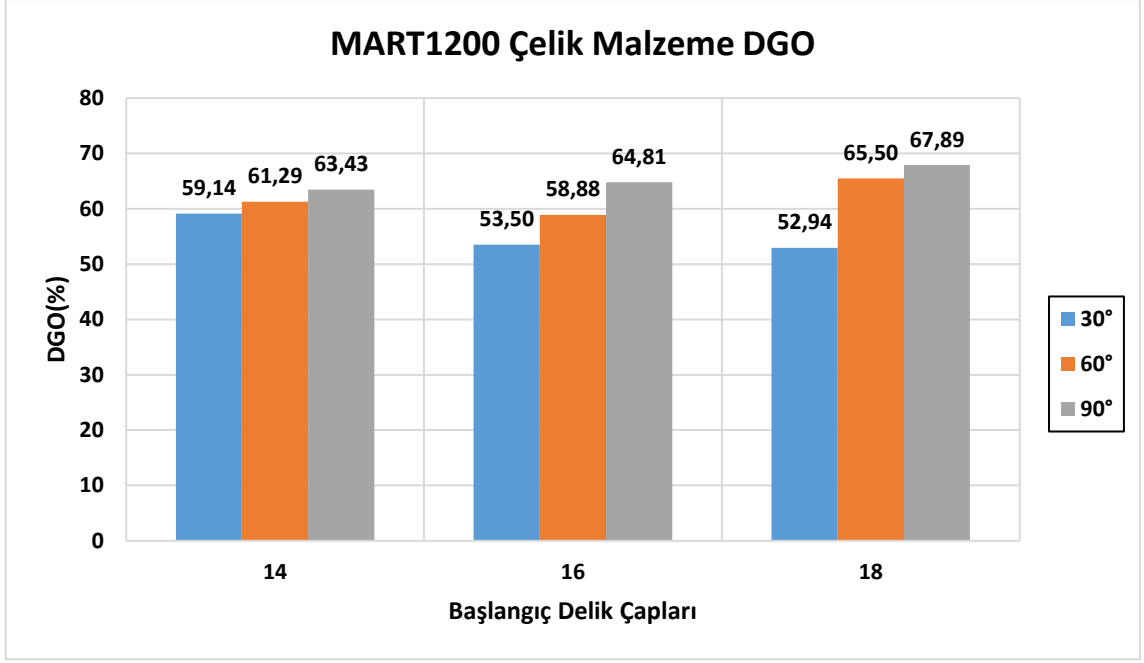
Şekil 5.3. DP800 çeliğinde konik zimba açısının ve başlangıç delik çapının DGO davranışını üzerindeki etkisi.



Şekil 5.4. DP600 Çeliği test numunelerinin delik genişletme testlerinden sonraki görünümleri.

5.3. MART1200 VE MART1400 ÇELİKLERİNİN DGO

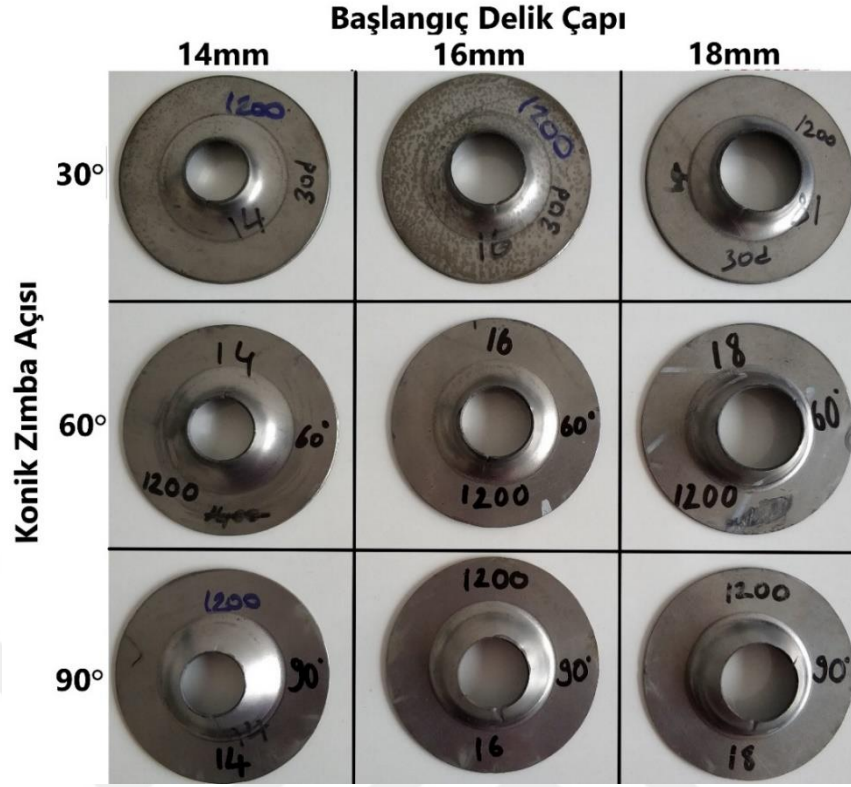
Şekil 5.5’de MART1200 çeliğinin çeşitli konik zımba açılarında ve başlangıç delik çaplarındaki DGO değerleri gösterilmektedir. MART1200 çelik numunelerinde farklı başlangıç delik çaplarında artan konik zımba açısı ile artan DGO’ları gözlemlenmiştir.



Şekil 5.5. MART1200 çeliğinde konik zımba açısının ve başlangıç delik çapının DGO davranışını üzerindeki etkisi.

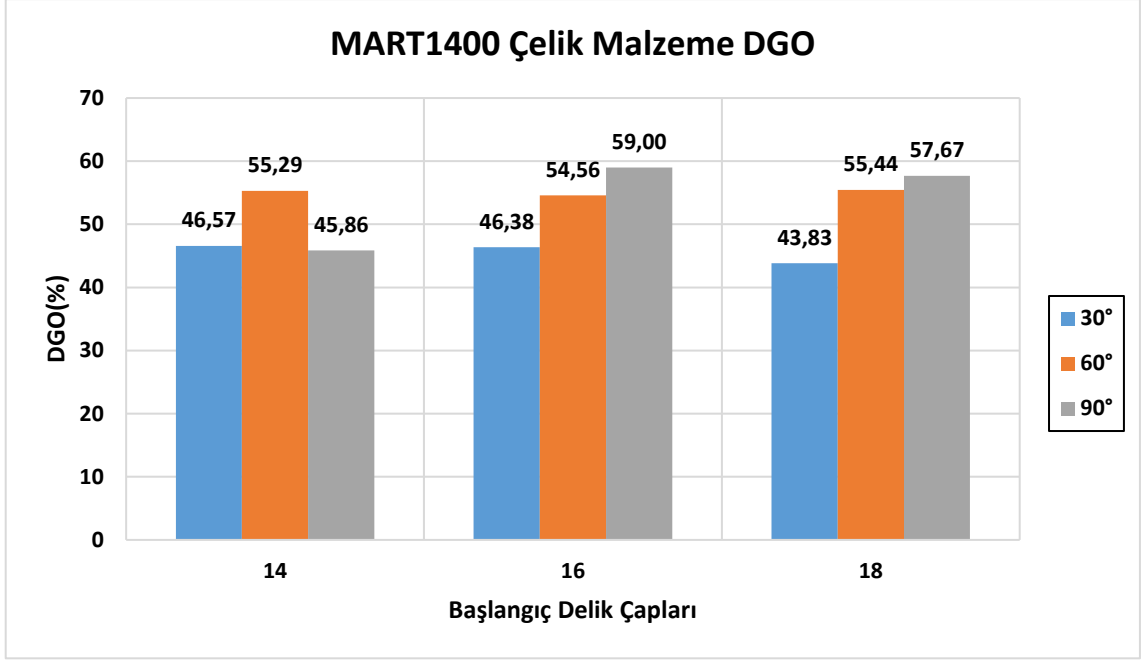
Şekil 5.6'da Delik genişletme testi sonrasında çatlak oluşumları gözlemlenen ve deneyi durdurulan MART1200 çelik malzemeleri şematik bir biçimde gösterilmektedir.

MART1200 Çeliği Test Numuneleri

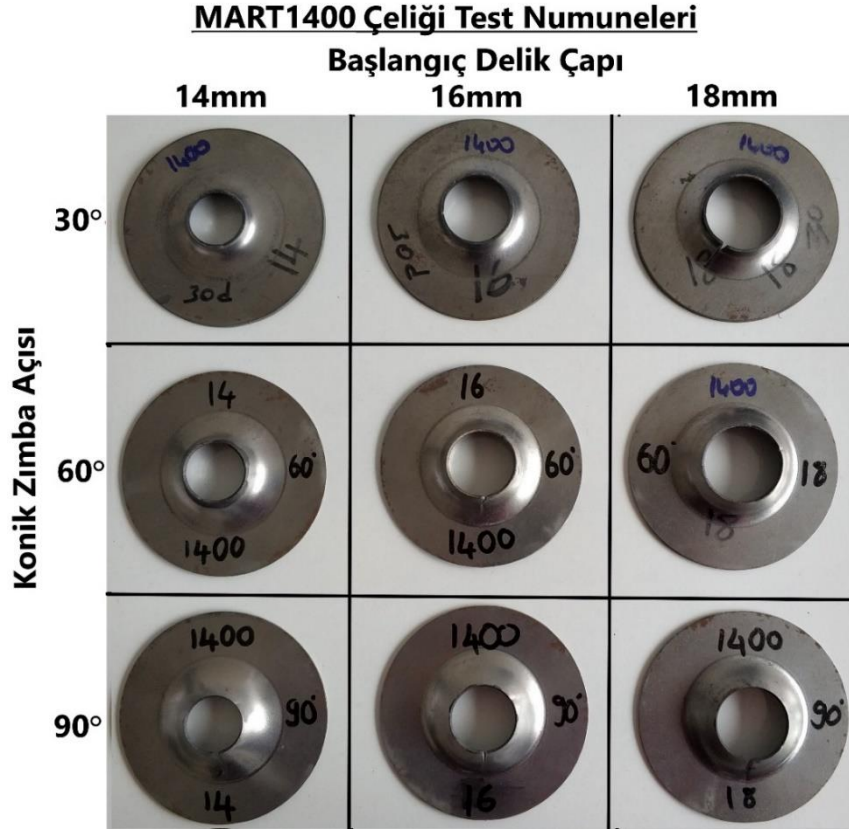


Şekil 5.6. MART1200 Çeliği test numunelerinin delik genişletme testlerinden sonraki görünümleri.

Şekil 5.7' de MART1400 çeliğinin çeşitli konik zımba açılarında ve başlangıç delik çaplarındaki DGO değerleri gösterilmektedir. BDÇ 14 mm olan test numunelerinde artan konik zımba açısı ile birlikte ise doğrusal olmayan sonuçlar alınmıştır. BDÇ 16 mm ve 18 mm olan deney numunelerinde ise konik zımba açısı artar iken DGO'da da bir artış olduğu görülmektedir. Şekil 5.8'de delik genişletme testi sonrasında çatlak oluşumları gözlemlenen ve deneyi durdurulan MART1400 çelik malzemeleri şematik bir biçimde gösterilmektedir.



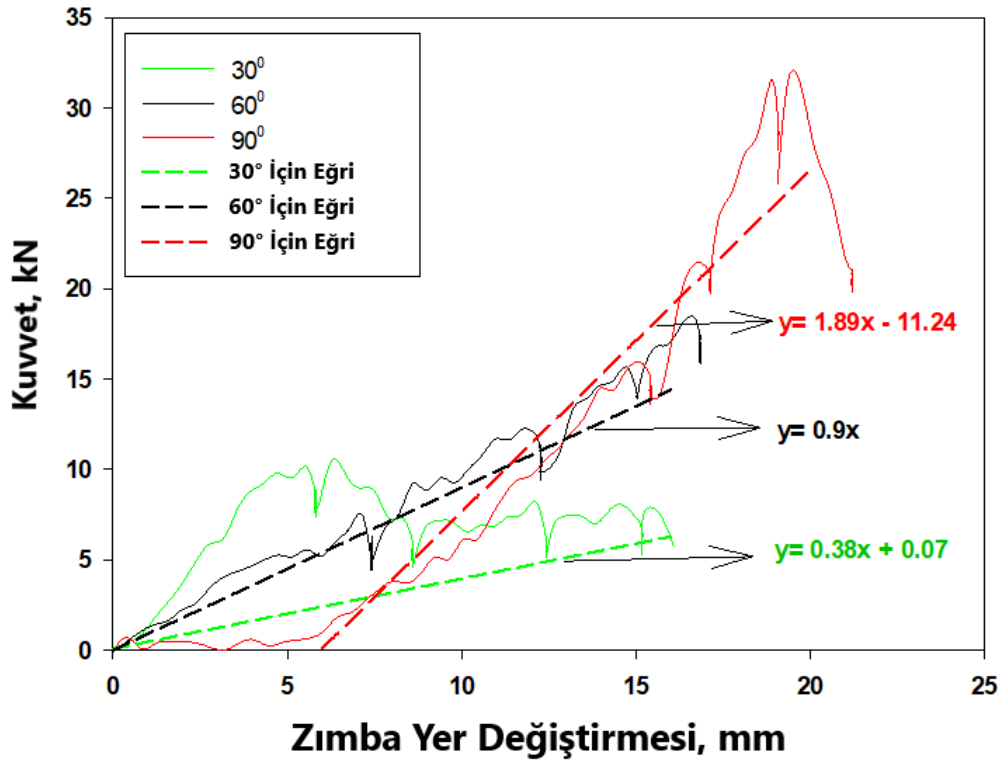
Şekil 5.7. MART1400 çeliğinde konik zimba açısının ve başlangıç delik çapının DGO davranışını üzerindeki etkisi.



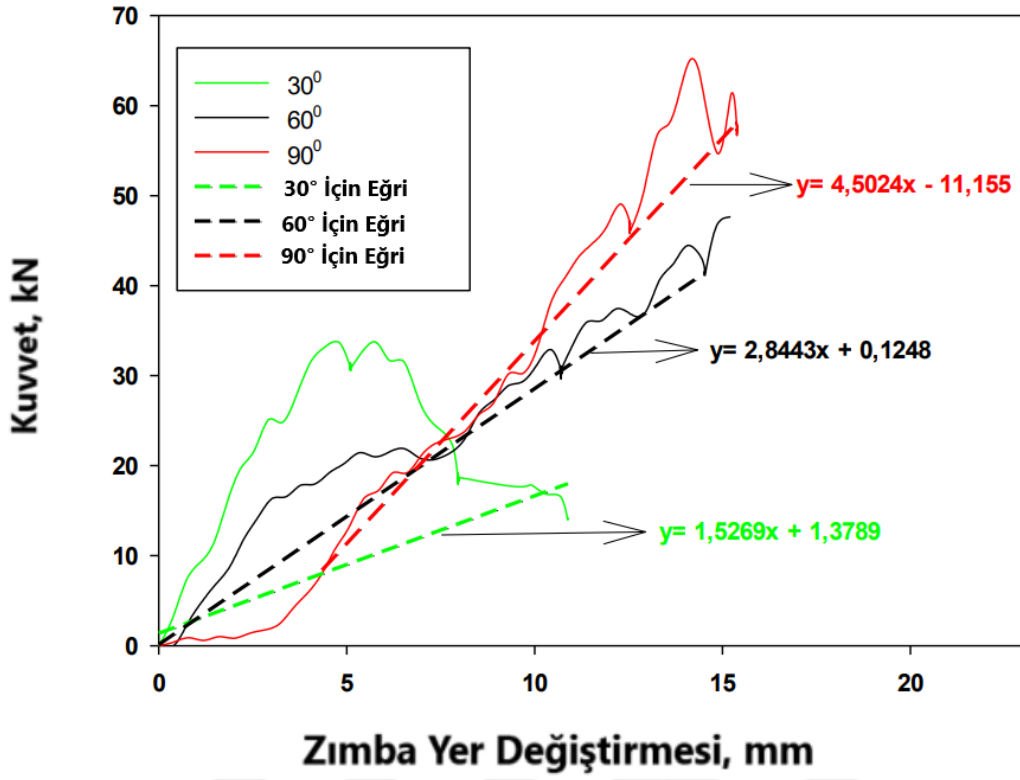
Şekil 5.8. MART1400 Çeliği test numunelerinin delik genişletme testlerinden sonraki görünümleri

DGT sonrasında test numunelerinde gözlemlenen DGO arasında ilişki kurulacak düzgün değişen bir parametre gözlemlenememiştir. DGO, koni zımba açısının ve başlangıç delik çapının değiştirilmesiyle oluşturulan delik kenarındaki gerilim gradyanındaki değişiklikten önemli ölçüde etkilenmez. Düşük gerçek kalınlıkta kesme gerilimi olan malzemeler için, Ito ve arkadaşlarına göre [63], konik zımba açısının DGO üzerindeki etkisi oldukça ihmal edilebilir. DP600, DP800, MART1200 ve MART1400 çelikleri için kırılma geriliminin, çeşitli konik zımba açıları için kırılma kalınlığı gerinimi değerlendirildiğinde DP600 ve DP800 çeliklerinde 0,2 ila 0,3 arasında çok daha düşük olduğu, MART1200 ve MART1400 çeliklerinde ise 0,11 ila 0,18 bulundu. Sonuç olarak, DP ve MART çeliklerinin DGO'larının konik zımba açılarındaki değişikliklere değişmez sonucu, delik genişlemesi sırasında görülen çok daha düşük kırılma gerinim değerleri ile açıklanabilir. Şekil 5.1, Şekil 5.3, Şekil 5.5 ve Şekil 5.7'de DGO'ları gözlenen sonuçların, kenar durumu, mukavemet, yüzey kalitesinin değişmesin vb. durumlardan dolayı meydana gelmiş olabilecek deneysel hatalardan kaynaklanmış olabilir.

5.4. KUVVET-YER DEĞİŞTİRME EĞRİLERİNİN YORUMLANMASI



Şekil 5.9. DP600 malzemesi için 14 mm başlangıç delik çapı için farklı konik zımba açılarına göre kuvvet-yer değiştirme eğrileri



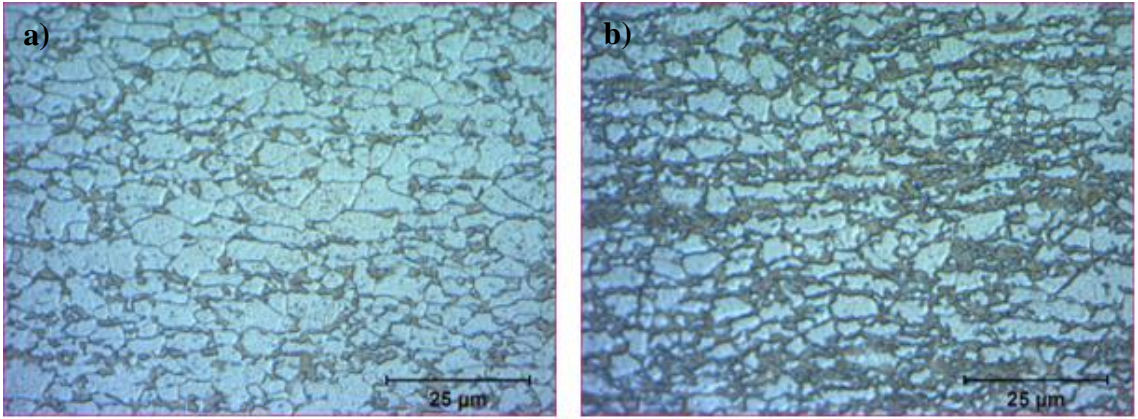
Şekil 5.10. MART1400 malzemesi için 14 mm başlangıç delik çapı için farklı konik zımba açılara göre kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Bununla birlikte, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da görüldüğü gibi, konik zımba açılarının şekillendirme kuvvetini nasıl etkilediğini görmek için, hidrolik pres makinesinin basınç ve yer değiştirme sensörlerinden zımba kuvveti ve yer değiştirme verileri alındı ve şekillendirme işlemi sırasında kaydedildi. Hidrolik pres makinesinin bar cinsinden ölçülen basınç değerleri kN cinsinden kuvvete çevrilmiştir. Bu veriler doğrultusunda, konik zımba açısının azaltılması, şekillendirme kuvvetlerinde önemli bir azalma ile sonuçlanmıştır. Bunun nedeni, 30° konik zımba açısı gibi daha keskin bir zımbanın deliğin daha yavaş büyümesine neden olması olabilir. Şekil 5.9'da 30° konik zımbanın 10 mm strokuna kadar kuvvet artışı olması ve sonrasında azalması, 30° konik zımbanın kenarı, levhaların başlangıç delik çapına sığacak kadar küçük olmadığından, levha kenarının ilk bükülmesinden dolayı meydana gelmiştir.

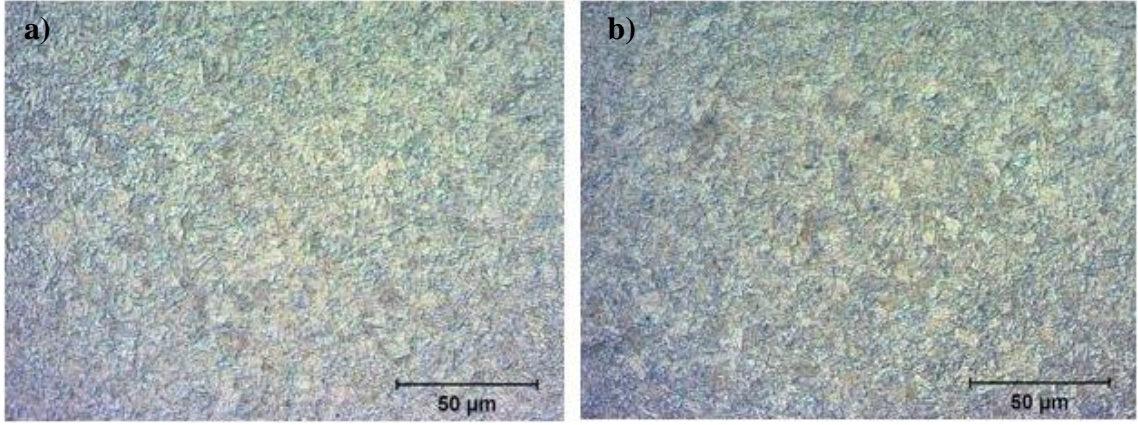
5.5. MİKROYAPI İNCELEMESİ

Çekme testlerinden sonra, 0.005 s⁻¹ gerinim hızında çekme testine tabi tutulan numunelerin haddeleme yönü ekseninde kırılma yüzeyinden 10 mm uzaklıkta parçalar kesilmiştir. Oda sıcaklığındaki çeliklerin mikro yapıları gözlemek için parçalar bakalit içerisine gömülmüştür. Metalografik inceleme için bakalit gömülü örnekleri hazırlamak için otomatik cihazlarda zımparalama ve parlatma yöntemleri kullanıldı ve ardından uygun kimyasal bileşenler ile dağlama yapıldı.

CEVİK [57], çeliklerin mikro yapısını incelemek için bir NIKON optik mikroskobu kullandı. Bu mikroskobu kullanılarak numune yüzeylerinin görüntüleri 1000 kez büyütülerek gözlemlenmiştir. Tane boyutları, değerlendirmek için Image J görüntü analiz uygulaması kullanılarak belirlendi. Analizden elde edilen verilere göre martenzitin alan oranı DP600 ve DP800 için sırasıyla yaklaşık %23,9 ve %54,2 olarak bulundu. Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü'nde tüm çekme testleri ve mikroyapı analizleri tamamlandı. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12' de DP ve MART çeliklerinin mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 5.11. a) DP600 çeliklerinin mikroyapı görüntüleri b) DP800 çeliklerinin mikroyapı görüntüleri [57].



Şekil 5.12. a) MART1200 çeliklerinin mikroyapı görüntüleri b) MART1400 çeliklerinin mikroyapı görüntüleri [57].

DP600 çeliğinin tipik ferrit tane boyutu 4,7 ila 5,7 mikron arasındayken, martenzit taneciklerinin boyutu 1,8 ila 2 mikron arasındadır. DP800 çeliğinde tipik ferrit tanecik boyutu 4 ila 4,9 mikron arasında değişirken, martenzit tanecik boyutu 1,7 ila 2,1 mikron arasında değişir. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de, DP600 çeliğinin ferrit taneleri arasına sıkıştırılmış küçük martenzit adacıklarından oluştuğunu, DP800 çeliğinin ise uzun, bağlantılı martenzit taneleri arasına sıkıştırılmış ferrit tanelerinden oluştuğunu göstermektedir. İki çelik türünün mikro yapısındaki çeşitlilik, farklı mekanik performanslarını açıklayan en kritik faktörlerden biridir.

Ferrit ve martenzit taneleri arasındaki daha büyük tane sınırı uzunluğu, boşluk oluşumu potansiyelini artırarak şekillendirilebilirliğin azalmasına neden olur. Ayrıca, DP800 çeliğinde daha yüksek karbon içeriğinin olumu, martenzit ve ferrit taneleri arasındaki sertlik farkını artırarak deformasyon sırasında erken boşluk oluşumuna neden olabilir [57].

Konik tip zımbalarda, mikroyapısal parametrelerin DP ve MART tipi çelikler için geometrik hususlardan daha alakalı olduğu görülmektedir. Görülebileceği gibi, DP800’ün DGO değerleri, DP600’ün değerlerinden önemli ölçüde düşüktür, ortalama olarak yaklaşık %25 oranındadır. DP800 için DGO değeri yaklaşık yüzde 52 iken, DP600 için DGO değeri yüzde 70’in üzerindedir. Önemli miktarda martenzit bileşiminin yanı sıra mikro yapıdaki uzamsal dağılımı, DP600’e kıyasla DP800’ün daha düşük DGO’na sahip olmasının temel nedenleri olabilir. MART1200 için DGO değeri yaklaşık yüzde 60 iken, MART1400 için DGO değeri yaklaşık yüzde 51 olarak hesaplanmıştır. MART1400’ün

DGO değerleri, MART1200 değerlerinden ortalama olarak yaklaşık %18 oranında daha dūşüktür. Deneylerden elde edilen en yüksek delik genişletme %75 oranı DP600 çeliğinin 14 mm başlangıç yarı çapında görölmüştür. En düşük delik genişletme oranı %41.5 ise DP800 çeliğinin 16 mm BDC görölmüştür.

Şekil 5.11'da DP800'ün, fazlar arasında DP600'den daha fazla miktarda tane sınırı alanına sahip olduğunu ve bunun DGT sırasında daha kolay kırılma yayılmasına neden olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, delik genişlemesi sırasında ferrit ve martenzit fazlar arasındaki yüksek gerilimi azaltmak için yeni kenar germe stratejileri araştırılabilir, bu da DP çelikleri için gelişmiş kenar esneme yetenekleri sağlar. Şekil 5.12'de MART çeliklerinde faz yapısı homojen bir şekilde dağılmış martenzit yapılarından oluştuğu görölmektedir. MART çelikleri içindeki sert martenzit yapısına ve yüksek mukavemetlerine rağmen DP çeliklerine yakın bir DGO değeri göstermiştir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, üç farklı başlangıç delik çapı için DP ve MART çeliklerinin delik genişletme testleri için farklı açılara sahip konik zımbalar kullanılmış ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Konik zımba açılarının ve ilk delik çaplarının değişimi, DP ve MART çeliklerinin DGO değerlerinde önemli bir değişiklikle sonuçlanmamıştır. Bu sonuçlar, delik genişleme testlerinden sonra gözlemlenen DP ve MART çeliklerinin düşük kırılma gerilimine ilişki olduğuna bağlanmıştır.
- Konik zımba açısının azalması, delik genişletme testi sırasında başlangıç deliklerin daha yavaş genişlemesi nedeniyle şekillendirme kuvvetlerini önemli ölçüde azaltmıştır.
- DP çelikleri için mikroyapısal faktörlerin DGO üzerindeki etkisinin, konik zımba açıları gibi geometrik faktörlere kıyasla daha önemli bir etken olduğu bulunmuştur. DP800 için ortalama DGO değerinin, DP800 çeliğinde daha yüksek miktarda martenzit fazına atfedilen DP600'den %25 daha düşük olduğu bulunmuştur, bu da martenzit ve ferrit arasında daha yüksek bir tane sınırı alanı olduğunun ve bu nedenle daha kolay bir çatlak yayılımı görülmüştür.
- MART çelikleri içinde DP çeliklerinde olduğu gibi zımba açılarından çok mikroyapısal etkenlerin daha önemli olduğu bulunmuştur. MART1400'ün ortalama DGO, MART1200 göre %18 daha düşük olduğu bulunmuştur. Bu da MART1400'ün, MART1200 göre daha yüksek sertliğinden kaynaklandığı görülmüştür.
- DP ve MART çeliklerine yapılan deneylerde gözlemlenen en düşük DGO %41,5 iken en yüksek DGO %75'dir.
- DP çeliklerindeki faz farklılıklarından dolayı tane sınırları fazladır. DGT sırasında daha kolay çatlak yayılmasına neden olur. Bu nedenle, DGT sırasında ferrit ve martenzit fazları arasındaki yüksek gerilimi azaltabilecek ve böylece DP çelikleri için daha iyi bir DGO ile sonuçlanabilecek yeni kenar kesme ve oluşturma

yöntemleri araştırılabilir.

- MART çeliklerindeki kısıtlı literatür kaynakları için ISO 16630 standartı ile DGT yapıp literatüre katkıda bulunabilir.



International Journal of Mechanical Sciences, c. 105, ss. 348–359, Ocak. 2016.

- [16] K. ichiro Mori, Y. Abe, ve Y. Suzui, “Improvement of stretch flangeability of ultra high strength steel sheet by smoothing of sheared edge,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 210, s. 4, ss. 653–659, Mar. 2010.
- [17] Ishiwatari Akinobu, Urabe Masaki, ve Inazumi Toru, “Press forming analysis contributing to the expansion of high strength steel sheet applications,” *JFE Technical Report*, c. 18, ss. 96–102, Mart. 2013.
- [18] S. K. Paul, “Correlation between hole expansion ratio (HER) and notch tensile test,” *Manufacturing Letters*, c. 20, ss. 1–4, Nisan. 2019.
- [19] M. D. Taylor *et al.*, “Correlations between nanoindentation hardness and macroscopic mechanical properties in DP980 steels,” *Materials Science and Engineering A*, c. 597, ss. 431–439, Mart. 2014.
- [20] L. Chen, J. K. Kim, S. K. Kim, G. S. Kim, K. G. Chin, ve B. C. de Cooman, “Stretch-flangeability of high Mn TWIP steel,” *Steel Research International*, c. 81, s. 7, ss. 552–568, Temmuz. 2010.
- [21] J. I. Yoon *et al.*, “Correlation between fracture toughness and stretch-flangeability of advanced high strength steels,” *Materials Letters*, c. 180, ss. 322–326, Ekim. 2016.
- [22] K. Prasad, B. Venkatesh, H. Krishnaswamy, D. K. Banerjee, ve U. Chakkingal, “On the interplay of friction and stress relaxation to improve stretch-flangeability of dual phase (DP600) steel,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, c. 32, ss. 154–169, Ocak 2021.
- [23] J. Krawczyk, Z. Gronostajski, S. Polak, K. Jaśkiewicz, W. Chorzępa, ve I. Pęczak, “The influence of the punch shape and the cutting method on the limit strain in the hole expansion test,” in *Key Engineering Materials*, 2016, c. 716, ss. 129–137.
- [24] S. K. Paul, “A critical review on hole expansion ratio,” *Materialia (Oxf)*, c. 9, Mart 2020,
- [25] A. Karelova, C. Kremaszky, E. Werner, T. Hebesberger, ve A. Pichler, “Hole expansion of dual-phase and complex-phase AHS steels-effect of edge conditions,” *Steel Research International*, ss.1, Kasım, 2008
- [26] V. Balisetty, U. Chakkingal, ve S. Venugopal, “Evaluation of stretch flangeability of dual-phase steels by hole expansion test”.
- [27] B. M. Hance, R. J. Comstock, ve D. K. Scherrer, “The Influence of Edge Preparation Method on the Hole Expansion Performance of Automotive Sheet Steels,” in *SAE Technical Papers*, Nisan. 2013, s. 2.
- [28] S. Golovashchenko, “Engineering angle: controlling edge splitting in sheet metal part production,” *Stamping Journal*, Nisan, 01, 2021. Erişim : <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/engineering-angle-controlling-edge-splitting-in-sheet-metal-part-production>.
- [29] B. S. Levy ve C. J. van Tyne, “Review of the shearing process for sheet steels and its effect on sheared-edge stretching,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, c. 21, s. 7. ss. 1205–1213, Temmuz 2012.
- [30] J. Chintamani ve S. Sriram, “Sheared Edge Characterization of Steel Products used for Closure Panel Applications.” *SAE Technical Paper*, c. 115, s. 5, ss. 968-973, 2006
- [31] R. Hambli ve S. Richir, “Damage mechanics approach in crack growth simulation during

- the fine blanking process.” *International Journal of Materials and Product Technology*, c. 19, s. 6, ss. 466-478, 2003
- [32] Y. Chang, S. Han, X. Li, C. Wang, G. Zheng, ve H. Dong, “Effect of shearing clearance on formability of sheared edge of the third-generation automotive medium-Mn steel with metastable austenite,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 259, ss. 216–227, Eylül 2018.
- [33] Y. Wu, J. Uusitalo, ve A. J. DeArdo, “Investigation of the critical factors controlling sheared edge stretching of ultra-high strength dual-phase steels,” *Materials Science and Engineering A*, c. 828, Kasım 2021.
- [34] N. Şen, F. Helimergin, ve V. Taşdemir, “Effects of fine blanking process on cutting surfaces of high-strength DP600 and DP800 sheets,” *Ironmaking and Steelmaking*, c. 48, s. 9, ss. 1083–1088, 2021.
- [35] M. Zhou, Y. Li, Q. Hu, X. Li, ve J. Chen, “Investigations on edge quality and its effect on tensile property and fracture patterns of QP980,” *Journal of Manufacturing Processes*, c. 37, ss. 509–518, Ocak 2019.
- [36] B. M. Hance, R. J. Comstock, ve D. K. Scherrer, “The influence of edge preparation method on the hole expansion performance of automotive sheet steels,” in *SAE Technical Papers*, c. 2, 2013.
- [37] Y. G. Deng, H. S. Di, ve J. C. Zhang, “Effect of heat-treatment schedule on the microstructure and mechanical properties of cold-rolled dual-phase steels,” *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, c. 28, s. 9, ss. 1141–1148, Eylül 2015.
- [38] K. Hasegawa, K. Kawamura, T. Urabe, ve Y. Hosoya, “Effects of microstructure on stretch-flange-formability of 980 MPa grade cold-rolled ultra high strength steel sheets,” *ISIJ International*, c. 44, s. 3, ss. 603–609, 2004.
- [39] X. Hu, X. Sun, K. Raghavan, R. J. Comstock, ve Y. Ren, “Linking constituent phase properties to ductility and edge stretchability of two DP 980 steels,” *Materials Science and Engineering A*, c. 780, Nisan 2020.
- [40] N. Pathak, C. Butcher, ve M. Worswick, “Assessment of the Critical Parameters Influencing the Edge Stretchability of Advanced High-Strength Steel Sheet,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, c. 25, s. 11, ss. 4919–4932, Kasım 2016.
- [41] C. Chiriac, “A Study of the Plastic Deformation of Sheared Edges of Dual Phase 780 Steel,” 2010.
- [42] S. K. Paul, “Effect of punch geometry on hole expansion ratio,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, c. 234, s. 3, ss. 671–676, Şubat 2020.
- [43] G. Çoskun. Ocak 25 2013. “Biçimlendirme Sınır Diyagramı,” *Deformasyon bölgesi*. Erişim: <http://deformasyonbolgesi.blogspot.com/2013/01/normal-0-false-false-false-en-us-ja-x.html>.
- [44] R. Narayanasamy ve C. Sathiya Narayanan, “Forming limit diagram for interstitial free steels supplied by Ford India Motors,” *Materials and Design*, c. 28, s. 1, ss. 16–35, 2007,
- [45] Necati Bektaş, “Çekme deneyi,” *Ders Notları*, 2017.
- [46] Necati Bektaş, “Çekme testi,” *Ders Notları*, 2016.
- [47] M. E. Erdin, “Sac şekillendirme işlemleri,” Çorum, 2017.

- [48] Y. Arslan ve İ. Karaağaç, “V bükmede geri esneme davranışları,” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. C, ss. 255–263, Eylül 2014.
- [49] Ö. Tekaslan, N. Gerger, ve U. ŞEKER, “V bükme kalıplarında bakır sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti,” *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, c. 23, s. 1, ss. 231–238, Ocak 2008.
- [50] Z. Tekiner, “An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 145, s. 1, ss. 109–117, Ocak 2004,
- [51] R. H. Wagoner, H. Lim, ve M. G. Lee, “Advanced issues in springback,” in *International Journal of Plasticity*, 2013, c. 45, ss. 3–20.
- [52] Ö. Tekaslan, U. Şeker, ve A. Özdemir, “Determining springback amount of steel sheet metal has 0.5 mm thickness in bending dies,” *Materials and Design*, c. 27, s. 3, ss. 251–258, 2006.
- [53] Zwick/roell, “Kenar çatlak hassasiyetini belirlemek için ISO 16630’a göre delik genişletme testi” Erişim: <https://www.zwickroell.com/tr/sektoerler/malzeme-testi/sac-metal-sekillendirme-icin-test-yoentemi/delik-genisletme-testi/kenar-catlak-hassasiyetinin-belirlenmesi-iso-16630/>.
- [54] R. Ardalı, “Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelik sacların bölgesel şekillendirme davranışının delik denişletme testi ile araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye, 2021.
- [55] ISO standards and patents. 2017. “Metallic materials-sheet and strip-hole expanding test,” Erişim: www.iso.org/patents.
- [56] S. K. Paul, M. Mukherjee, S. Kundu, ve S. Chandra, “Prediction of hole expansion ratio for automotive grade steels,” *Computational Materials Science*, c. 89, ss. 189–197, Haziran 2014,
- [57] T. Civek, “Yüksek ve ultra yüksek mukavemetli çeliklerin ılık şekillendirme sıcaklıklarındaki deformasyon davranışlarının karakterize edilmesi,” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2022.
- [58] F. Kara, “Çift fazlı (DP) çelikler,” *Malzemebilimi*, 2019. Çift Fazlı (DP) Çelikler.
- [59] ASSAB korkmaz a.ş., “Gelişmiş yüksek mukavemetli çelik sacların şekillendirilmesinde takım çeliklerinden beklenen özellikler,” *Ders Notları*, Nisan. 2009.
- [60] Wikipedia, “Çekme testi,” *ASM International*, Kasım. 23, 2021. Erişim: https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%87ekme_testi.
- [61] Schut, “De Meet 400 Schut.” Erişim: https://www.schut.com/Products/DeMeet/index_Specifications.htm.
- [62] Aurotek, “3D CNC coordinate measuring machine DEMEET-400.” Erişim: <https://www.aurotek.com.tw/en/product/product-detail/c03/128/807>.
- [63] Y. Ito, Y. Nakazawa, Y. Kuriyama, K. Suzuk, ve N. Suzuki, “Effects of Vertical Angle of Conical Punch on Stretch Flangeability of High Strength Steel,” *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, c. 28, s. 12, ss. 1503–1509, Aralık 2015.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Necati BEKTAŞ

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2022
Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2019