

**DP800 ve MART1400 GELİŞMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ
ÇELİKLERİN FARKLI KALIP AÇILARINDAKİ DERİN
ÇEKİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

EZGİ TÖNGÜ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Doç. Dr. NURİ ŞEN**

DÜZCE, 2023

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DP800 ve MART1400 GELİŞMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ
ÇELİKLERİN FARKLI KALIP AÇILARINDAKİ DERİN
ÇEKİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ezgi TÖNGÜ 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. Oktay ELKOCA

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Ömer SEÇGİN

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 28/07/2023

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.

28 Temmuz 2023

Ezgi TÖNGÜ



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 dileklerimle teşekkür ederim.

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

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

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

28 Temmuz 2023

Ezgi TÖNGÜ

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİLER	8
2.1. GELİŞTİRİLMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER	10
2.1.1. Çift Fazlı Çelikler.....	13
2.1.2. Martensitik Çelikler.....	15
2.2. ÇEKME TESTİ.....	15
2.2.1. Çekme Testi Sırasında Malzemenin Mekanik Davranışları	16
2.3. DERİN ÇEKME VE MEKANİĞİ.....	16
3. MATERYAL METOT	20
3.1. MATERYALLER.....	20
3.2. ÇEKME TESTİ DENEYLERİ	20
3.3. DERİN ÇEKME DENEYLERİ.....	21
3.4. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ MODELLEMESİ	23
3.4.1. DP800 Ve MART1400 İçin Malzeme Modelinin Optimizasyonu.....	23
3.4.2. Derin Çekme Analizi.....	24
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	26
4.1. AÇILI KALIPLARDA DERİN ÇEKME YÖNTEMİNİN DP800 VE MART1400 ÇELİKLERİNİN DERİN ÇEKME ORANI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ	26
4.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE DENEYSEL AÇILI KALIPLARDA DERİN ÇEKME SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	28
4.3. AÇILI KALIPLARDA DERİN ÇEKME YÖNTEMİNİN DUVAR KALINLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	30
5. SONUÇ	33
6. KAYNAKLAR.....	34
7. ÖZGEÇMİŞ	39

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.1. Çeliklerin çekme mukavemetine göre uzama miktarındaki değişimi [54]....	9
Şekil 2.1.2. Yeni nesil araçlarda kullanılan çelik türleri ve oranları [55].....	9
Şekil 2.1.1.1. Çift fazlı çeliklere ait a) şematik ve b) mikroyapı görüntüsü [54].....	11
Şekil 2.1.1.2. Çift fazlı (DP) çeliklere, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliklere ve az karbonlu çeliklere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği [52]	12
Şekil 2.1.1.3. Çift fazlı çeliklerin farklı martensit hacim oranlarının çekme mukavemeti ile ilişkisi [54], [56]	13
Şekil 2.1.2.1. Martensit çelik mikroyapısının şematik görüntüsü [53].....	14
Şekil 2.2.1. Çekme testi numunesi [59].....	15
Şekil 2.2.1.1. Çekme testi numunesinin deformasyon adımları [59].....	16
Şekil 2.3.1. Derin çekme işlemi a. Şematik b. Perspektif [61], [62]	17
Şekil 2.3.2. Derin çekme mekanığı [61], [62]	18
Şekil 2.3.3. Derin çekme esnasında parçaya boylamsal kısımlarında meydana gelen gerilmeler [61], [62]	18
Şekil 2.3.4. Derin çekme işleminde iş parçasına etki eden kuvvetler [62]	19
Şekil 2.3.5. Dikdörtgen ve kare kapların köşe gerilme analizi [62]	19
Şekil 3.2.1. Çekme testi numunelerinin boyutları	20
Şekil 3.2.2. 0,005 s-1’de DP800 ve MART1400 çeliklerinin gerçek gerilme-gerinim grafiği	21
Şekil 3.3.1. a) Açılı kalıplarda derin çekme için deney düzeneği ve b) şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.4.1.1. Çekme testi simülasyonu için kullanılan sayısal model	23
Şekil 3.4.1.2. DP800 ve MART1400 çelikleri için simüle edilmiş ve deneysel akış eğrilerinin karşılaştırılması.....	24
Şekil 3.4.2.1. DP800 çeliğinin 70mm çapında derin çekilmesi için deneysel ve simüle edilmiş kuvvet-yer değiştirme grafiğinin karşılaştırılması.....	25
Şekil 3.4.2.2. a) DP800 ve b) MART1400 çelikleri için teorik Keeler yöntemine göre elde edilen FLD eğrileri	25
Şekil 4.1.1. a) 0°, b) 7,5°, c) 2,5°, d) 20° farklı açılarda açılı kalıplarda derin çekilen DP800 numuneleri: a), b), c)’de gösterilen numunelerin başlangıç çapları 76, 78, 80, ve 82 mm ve d) için soldan sağa sırasıyla 76, 78, 80, 82, 84 mm’dir	27
Şekil 4.1.2. 0°, b) 7,5°, c) 12,5°, d) 20° farklı açılarda açılı kalıplarda derin çekilen MART1400 numuneleri: a), b), c), d)’de gösterilen numunelerin başlangıç çapları soldan sağa 68, 70, 72, ve 74 mm’dir.....	28
Şekil 4.2.1. 0°, b) 7,5°, c) 12,5°, d) 20° kalıp açılarında 74mm başlangıç çaplı MART1400 çeliği için deneysel ve sayısal derin çekme analizinde karşılaştırılması	29
Şekil 4.2.2. 0°, b) 7,5°, c) 12,5°, d) 20° kalıp açılarında 72 mm başlangıç çapındaki MART1400 çeliği için sayısal derin çekme sonuçları	29
Şekil 4.2.3. 0°, b) 7,5°, c) 12,5°, d) 20° kalıp açılarında DP800 çeliği için deneysel ve sayısal derin çekme analizinin karşılaştırılması	30
Şekil 4.2.4. 0°, b) 7,5°, c) 12,5°, d) 20° kalıp açılarında DP800 çeliği için sayısal derin çekme sonuçları	30
Şekil 4.3.1. Farklı kalıp açılarında derin çekilmiş DP800 kaplarının boyunca kalınlık	

değişimi	31
Şekil 4.3.2. Farklı kalıp açılarında derin çekilmiş MART1400 kaplarının boyunca	
kalınlık değişimi	32



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1.1. Çelik türlerinin içyapı özellikleri ve mekanik değerleri [55]	10
Çizelge 2.1.1.1. Farklı geliştirilmiş çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri [53].	11
Çizelge 3.1.1. DP800 ve MART1400 çeliklerinin kimyasal bileşimi	20
Çizelge 3.3.1. Derin çekme işlemi için kalıp kurulumunun geometrik özellikleri	21



KISALTMALAR

AHSS	Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler
DÇO	Derin çekme oranı
DP	Çift fazlı
FEA	Sonlu elemanlar analizi
HSLA	Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler
MMY	Minimum miktarda yağlama
DÇS	Derin çekme sınır oranı
OEM	Orijinal ekipman üreticileri
SEL	Sonlu elemanlar formülü içeren kod



SİMGELER

Fe	Demir
C	Karbon
$d\phi_f$	Başarıyla derin çekilmiş numune kabı çapı
$d\phi_p$	Zımba çapı
V_1	Voce sertleşme modeli parametresi
V_2	Voce sertleşme modeli parametresi
σ_0	İlk akma dayanımı



ÖZET

DP800 ve MART1400 GELİŞMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLERİN FARKLI KALIP AÇILARINDAKİ DERİN ÇEKİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Ezgi TÖNGÜ

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doc. Dr. Nuri ŞEN

Temmuz 2023, 38 sayfa

Derin çekme, önemli ve geniş çapta uygulanan sac şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Bu yüzden sac metallerin derin çekilebilirliğinde elde edilen küçük iyileştirmeler bile, sac metalin daha karmaşık ürünlere dönüştürülme kabiliyetini önemli ölçüde artırmaktadır. Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS'ler), yüksek dayanımlarından dolayı otomotiv endüstrisinde en popüler kullanılan çeliklerden birisidir. Bununla birlikte, düşük süneklikleri sebebiyle bu çeliklerin derin çekme işlemi sırasında zımba radyüs bölgesi yakınında önemli yırtılma sorunlarıyla karşılaşmaktadır. Bu çalışmada, AHSS'ler için açılı kalıplarda derin çekme ile daha yüksek bir derin çekme oranının (DÇO) elde edilip edilemeyeceğini araştırmak amacıyla DP800 ve MART1400 çelikleri, dört farklı açılı (0° , 7.5° , 12.5° ve 20°) açılı kalıplarda derin çekme deneyleri yapılmıştır. Ek olarak, farklı açılı kalıp kurulumlarındaki her iki çelik türü için DÇO'yu tahmin etmek amacıyla sonlu elemanlar analizi (FEA) kullanılmıştır. MART1400 çeliğinin derin çekilebilirliğinin açılı kalıp düzeneklerinin hiçbirinde DÇO'nun gelişmediği görülmüştür. Ancak DP800'ün DÇO'su, 20° kalıp açısında %2,46 oranında bir miktar artış göstermiştir. Gerçekleştirilen sayısal ve deneysel sonuçlar birbirleriyle yakın bir uyum göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Açılı Kalıplarda Derin Çekme; Derin Çekme Oranı; DP800; MART1400

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE DEEP DRAWABILITY OF DP800 AND MART1400 ADVANCED HIGH STRENGTH STEELS AT VARIOUS DIE ANGLES

Ezgi TÖNGÜ

Düzce University

Graduate School, Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc.Prof. Dr. Nuri ŞEN

July 2023, 38 pages

Deep drawing is one of the most important and vastly conducted sheet metal forming method. Thus, even small improvements achieved on the deep drawability of sheet metals significantly increases the ability of sheet metal to be formed into more complex products. Advanced high strength steels (AHSSs) are one of the most popular steels in the automotive industry due to their high strengths. However, their low ductility causes considerable splitting problems near the cup punch region. In this study, deep drawing experiments have been conducted in conical dies with four different angles (0° , 7.5° , 12.5° , and 20°) for DP800 and MART1400 steels to observe whether a higher deep drawing ratio (DDR) can be achieved by deep drawing in conical dies for AHSSs. In addition, finite element analysis (FEA) has been utilized to estimate the DDR for each types of steels in different conical die setups. It has been observed that the deep drawability of MART1400 steel has not improved in any of the conical die setups. However, DDR of DP800 has slightly increased by 2.46% by deep drawing with 20° die angle. A good agreement with the numerical and experimental results has been achieved.

Keywords: Conical Die Deep Drawing; Deep Drawing Ratio; DP800; MART1400

1. GİRİŞ

Çelik endüstrisi dünyada ciddi bir öneme sahiptir ve farklı alanlarda yaygın olarak birçok çelik çeşidi kullanılmaktadır. Bu çeşitlilik, çeliğin kullanılacak uygulamadaki, uygulama şartlarına ve istenilen özelliklerine göre değişmektedir. Birçok alanda üretici ve tasarımcılar yüksek özelliklere sahip, hafif, mukavemetli, şekillendirilebilme kabiliyeti iyi olan çelik malzemeler kullanmayı tercih etmektedirler. Otomotiv, savunma sanayi, havacılık, uzay vb. gibi farklı birçok sektörde çelikler sac levha olarak yaygın kullanılmaktadır. Enerji kaynaklarının azalması ve çevre kirliliğinin artması orijinal ekipman üreticilerinin (OEM'ler) enerji tüketimini azaltmak ve çevre kirliliğini en aza indirmek için ağırlık azaltma ve mukavemet artırma ana görevlerinden biri olmuştur. Bu nedenle, sac metal şekillendirme endüstrileri arasında yüksek mukavemetli ve daha az ağırlığa sahip parçalar elde etmek için AHSS'lerin kullanımı sürekli artmaktadır [1], [2]. Bununla birlikte, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliklere kıyasla AHSS'lerin daha düşük şekillendirilebilirliği, sağlam ürünler elde etmek için şekillendirme işleminin iyi optimizasyonunu gerektirir. Gelişmiş yüksek mukavemetli çift fazlı (DP) çelikler ve MART çelikleri özellikleri bakımından birçok alanda iyi bir seçenek olmaktadır.

DP çelikleri, makul şekillendirilebilirlikleri ve yüksek enerji emme kapasiteleri nedeniyle en çok tercih edilen AHSS'lerden biridir [3]. Bu nedenle, daha çok darbe dayanımı ve iyi enerji yutma yeteneği istenen parçalarda kullanılır. DP çeliklerinin makul şekillendirilebilirliği ve yüksek mukavemeti, ferritik ve martensitik yapıları içeren benzersiz mikro yapıları sayesinde elde edilir [4]-[6]. Ferrit yapı, DP çeliklerine iyi şekillendirilebilirlik sağlarken, martensitik yapı, mukavemetini artırır. Bu nedenle, mikro yapıda bir arada bulunan ferrit ve martensit oranları değiştirilerek çeşitli DP çelikleri elde edilebilir. Öte yandan MART çelikleri, tamamen martensitik mikro yapıları nedeniyle AHSS'ler arasında en güçlü çeliklerden biridir ve tamponlar gibi darbeye dayanıklı parçalar için yüksek oranda kullanılmaktadır [7], [8]. MART çeliklerinin önemli ölçüde yüksek mukavemeti, karmaşık parçalar için kullanımlarını önemli ölçüde sınırlayan şiddetli geri yaylanma ve düşük şekillendirilebilirliğe sebep olur [9].

Çelik sacların şekillendirilmesinde kalıp ile şekillendirme yöntemi oldukça yaygın kullanılan ve maliyeti yüksek olan bir üretim yöntemidir. Metal sacların kalıp ile şekillendirme yöntemlerinden biri olan derin çekme yöntemi ile deney yapmak, üretilen malzeme ve kalıp parametrelerini önceden belirlemek, oluşabilecek sorunları ön görerek önlem almaya ve maliyet-zaman tasarrufu yapmaya olanak sağlamaktadır. Derin çekme yöntemi, baskı plakası ve kalıp arasına yerleştirilerek sıkıştırılan bir sac levha numunesinin zımba ile kalıbın boşluğuna doğru itilmesiyle sac levhadan, silindirik veya derin kare profil bir kap elde etme işlemidir. Derin çekme sınır limiti, sac levha malzemesinin derin çekilmesi sırasında, oluşturulan kabın dip bölgesinde çatlak başlangıcı oluşmayan en büyük malzeme çapını belirleyebilmemizi sağlar.

Literatürde hem DP hem de MART çeliklerinin deformasyon davranışını değerlendirmek ve daha karmaşık şekilli parçalar için kullanımlarını genişletmek amacıyla şekillendirilebilirliklerini geliştirmek için birçok girişimde bulunulmuştur. Bazı çalışmalarda [10]-[15] araştırmacılar, sıcak şekillendirme kullanarak AHSS'lerin derin çekilebilirliği, geri esneme azalması ve toplam uzama kapasitesi üzerinde önemli gelişmeler bulmuşlardır. Bazı araştırmacılar [16]- [18], kalıp ve sac ara yüzleri arasında uygun bir yağlamanın, düşük yüzey pürüzlülüğü ve az nöbet hatası olan parçalar elde etmek için hayati bir faktör oynadığından, şekillendirmede uygun yağlamanın önemine odaklanmışlardır. AHSS'lerin inanılmaz derecede yüksek mukavemet seviyeleri nedeniyle, bu yüzey hataları şekillendirme işlemi sırasında daha da kötüleşir. Abe vd. [16], kalıp kaplamalarının 980 ve 1180 MPa AHSS'ler için tutukluk hataları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. VC kaplı kalıbın daha küçük yüzey pürüzlülüğüne neden olduğunu ve krapaj hatasını ortadan kaldırdığını, TiN kaplı kalıbın ise AHSS'ler için uygun olmadığını göstermişlerdir. Şen vd. [17], artımlı şekillendirme işlemi için minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemini uygulamışlardır. Yazarlar, MMY destekli artımlı şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiş ürünlerde yaklaşık %14,60 oranında daha yüksek yüzey kalitesi elde etmişlerdir. Sac metalin deformasyon altındaki davranışı, mikro yapı özellikleriyle önemli ölçüde ilişkilidir. Bu nedenle, gerinim sertleşmesi ve gerinim hızı duyarlılık indeksleri, kurucu fazların deformasyon davranışı ve mikro yapıdaki hasar gelişimi gibi bazı kritik sac metal faktörleri, literatürde araştırmacıların önemli bir ilgisini çekmiştir [19], [20].

Derin çekme işlemi sırasında yağlama koşulları, mikro yapı ve sıcaklık baskın bir rol oynamasına rağmen, kalıp omuz yarıçapı, zımba kenar yarıçapı ve kalıp açısı gibi kalıp

düzeninin geometrik özelliklerinin derin çekme işlemi üzerinde belirleyici etkileri vardır [21]-[24]. Literatürde, derin çekme işlemi için açılı bir kalıbın kullanılmasının DÇO'yu artırabileceği belirtilmiştir [25], [26]. Savaş ve Seçgin [27], DIN EN 10130-91 çelik saca derin çekme için farklı açılarda (0° , 2.5° , 5° , 10° , 15°) açılı kalıp tasarımını kullanmışlardır. DÇO'nun 0° kalıp açısında 1,75'ten 15° kalıp açısında 2,175'e yükseldiğini gözlemlediler. Özek ve Akkelek [28], St37 çeliğinden dikdörtgen şekilli kapların derin çekmesi için çeşitli kalıp açılarıyla (0° , 3° , 6° , 9° , 12° , 15°) benzer açılı kalıp tasarımını uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, DÇO'nun geleneksel derin çekme kalıbına kıyasla 3° ila 15° kalıp açılarında 1,55'e iyileştirilebileceğini gösterdiler.

Çavuşoğlu ve Gürün çalışmalarında [29], DP600 ve DP780 sac malzemelerinin derin çekme işleminde deformasyon hızının etkilerini, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak deformasyon hızındaki artışın, ürünün üst kısımlarında et kalınlığında incelmeleri artırdığını, etek kısımlarda kalınlık artışına yol açtığını, geri esneme miktarı ve kalıplama kuvvetini artırdığını belirlemişlerdir.

Erhan Kara, yüksek lisans tezinde, DP500 ve DP600 sac malzemelerin derin çekilebilirliğini incelemiştir. Yaptığı çalışmada, derin çekme kalıplarında çekmeyi etkileyen parametreler olan dişi kalıp kavis yarıçapı, zımba kavis yarıçapı, zımba ilerleme hızı ve yağlama parametrelerini deneysel olarak incelemiştir. Küçük kalıp kavis değerlerinde sac malzemenin yırtıldığı, çekme hızı, kalıp kavislerinin artışı ve yağlayıcı seçimine bağlı olarak kalıplama kuvvetinde azalmaları meydana geldiğini görmüşlerdir. Kalıp kavis yarıçaplarının artması ile parçanın kavislerinde, yan duvarlarında incelmeler ve parçanın üst kısmında kalınlaşmalar artmıştır [30].

Nuri ŞEN, bir araştırma makalesinde yaptığı çalışmada [31], ultra yüksek mukavemetli DP600 malzemesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanarak şekillendirebilirlik analizi yapmıştır. Kalıp tasarımı yapılarak belirli bir geometride ve başlangıçta 1 mm kalınlığındaki sac malzeme için sanal ortamda hem sabit hem de değişken baskı plakası kuvvetlerinde derinçekme işlemi uygulayarak malzemenin oda şartlarında her iki farklı yöntem için sınır çekme oranı belirlemiştir. Derin çekme analizleri sonucunda değişken baskı plakası kuvveti kullanılarak sınır çekme oranı 2,07'den 2,12'ye yükseldiği tespit etmiştir.

Aydın vd. [32], otomotiv endüstrisinde kullanılan DP450 ve DP800 saclarında deformasyon hızının ve haddeleme yönünün çekme özelliklerine etkisini araştırmışlardır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, DP450 ve DP800 çeliklerinde deformasyon hızının çekme özellikleri üzerindeki etkisi hadde yönü etkisinden daha fazla olmuştur.

Kayhan ve Kaftanoğlu [33], yapılan deneysel çalışmada; sıcaklığın, çelik malzemelerin şekillendirilmesine olan olumlu etkisinden faydalanılarak DP600, IF ve HSLA çeliklerine ait derin çekme sınır oranlarının artırılması araştırmışlardır ve yeni bir uygulama yöntemi geliştirmişlerdir. DP600, IF ve HSLA çelikleri ile gerçekleştirilen ılık deneylerde, derin çekme sınır oranlarında (DÇS), oda sıcaklığında elde edilen değerlere göre %25,58 e kadar artış sağlanmıştır.

Kara vd. [34], DP600 sac ile yaptıkları derin çekme deneylerinde çapı 32 mm olan sac malzemeyi kalıp radius 2, 3, 4, 6 mm, zımba Radius 2, 3, 4, 6 mm, zımba hızı 60, 150, 250, 350 mm/dk parametrelerinde farklı yağlayıcılar kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak sac malzemelerin küçük kalıp Radius da parçalandığını, zımba hızı ve kalıp radiusu arttıkça kalıp kuvvetinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Pepelnjak ve Kaftanoğlu [35], yaptıkları FEM analizinde DP600 malzeme 1,6 mm kalınlığında sacı oda sıcaklığında ve 200-300 °C aralığında flanş bölgesini ısıtarak derin çekme yapmışlardır. Analiz sonuçlarında, 200-300 °C ile yapılan analizlerin oda sıcaklığında yapılanlara göre daha yüksek bir derin çekme limiti gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Salamcı ve Kabakçı [36], çift fazlı bir çeliğin çekme özellikleri üzerinde martenzit ve yeni ferrit hacim oranının etkisi araştırmışlardır. Sonuç olarak çift fazlı çeliklerde artan martenzit hacim oranı ile birlikte akma ve çekme dayanımları artarken, uzama değerlerinin düştüğünü ve yeni ferrit miktarı arttıkça mukavemetin azaldığını, sünekliğin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Schmid ve Merklein [37], lisans tezinde derin çekme işleminde sonra çekme testi deneyi yaparak DC04 ve DP800 sac metallerin mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Derin çekme işlemlerinin malzeme özelliklerini değiştirdiğini ve malzemeye bağlı olarak, kırılma gerilmesi azalırken çekme mukavemetinin arttığını gözlemlemişlerdir.

Özbek ve Taşdemir [38], derin çekme işlemi ile yaptıkları deneyde 4 farklı kalıp yüzey açısı, 4 farklı sıcaklık ve farklı baskı plakası kuvveti parametreleri uygulamışlardır. Yapılan deney sonuçlarında kalıp açısının değişimi şekillendirmeyi etkilediğini gözlemlemişlerdir ve en ideal açının 5-10° olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca değiştirilen

parametrelerin sertliğin kontrolünde önemli olduğunu görmüşlerdir.

Taşdemir [23], kalıp geometrisinin derin çekmede etkisini sonlu elemanlar analizinde kalıp ağız geometrisini farklı şekillerde deneyerek kap üzerindeki etkisini simülasyon analizi ile araştırmıştır. Düz, kavisli, eliptik ve 45° eğimli olarak değiştirdiği kalıp parametrelerinde, kapta gerilme ve kalınlık dağılımı açısından geometri seçiminin önemli olduğunu gözlemlemiştir.

Yalçın ve Kaftanoğlu [39], derin çekme işleminde baskı plakası kuvvetinin buruşmaya olan etkisini simülasyon ile aksel simetrik kap modellemesi üzerinde incelemiştir. Baskı plakasının kuvvetini değiştirdiklerinde kuvvetin 10000N da buruşmayı engellediğini gözlemlemiştir. Ayrıca numune kalınlığı değiştirdiklerinde buruşmanın ince kalınlıklarda daha fazla olduğunu, numune çapını değiştirdiklerinde ise çap arttıkça dalga sayısının azaldığını belirtmişlerdir.

Seçgin ve Savaş [40], bu yüksek lisans tezinde 0°, 5°, 10°, 15°'lik açılı kalıplarda DKP 37 sac malzeme kullanarak, 4mm/s sabit zımba hızında gerçekleştirdikleri derin çekme deney sonuçlarında, limit çekme oranının 1,75'den 2,175'e kadar arttığını ve kalıp açısının baskı plakası kuvvetini etkileyebildiğini gözlemlemiştir.

Ünal'ın doktora tezinde [41], matris/baskı plakası açısı, matris/zımba radyüsü ve baskı plakası kuvvetinin kare profilli kapların açılı derin çekme kalıplarında şekillendirilmesinde, matris/baskı plakası açılarının artması ile limit çekme oranının arttığı ve kap et kalınlığındaki kritik incelenin ise 0.590mm den 0,742 mm'ye çıktığı tespit edilmiştir.

Kalıp açısı değişiminin alüminyum sacının derin çekilebilirliğine etkilerini yüksek lisans tezindeki çalışmada araştıran Aytaç [42], baskı plakası yüzeylerine açı verilerek limit çekme oranının arttırılabildiğini ve buruşma olmadan baskı plakası kuvvetinin büyük oranda azaldığı sonucuna varmıştır.

Akkelek'in yüksek lisans tezi [43], açılı derin çekme kalıplarında dikdörtgen kesitli kalıpların çekilebilirliğini araştırdığı ve kalıplara açılar verilerek limit çekme oranının arttırılabildiği ve maksimum limit çekme oranının 9°'lik kalıpta 2,31 olarak elde edildiği gösteren bir tez çalışmasıdır.

Bal [44], DKP 37 sacının derin çekilmesinde, matris ve baskı plakasında farklı açılarla, matris ve zımbada farklı radyüs değerleriyle yaptığı çalışmada, en büyük derin çekme oranını 2,3 olarak matris ve zımba radyüsü 10mm 'de matris ve baskı plakası

açısı 12,5°'de tespit etmiştir.

Doktora tezinde [45], derin çekme işleminde malzeme kalitesi üzerine çalışan Koçar, deneylerini Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanarak gerçekleştirmiştir ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizler yapmıştır. İşlem değişkenleri olarak kalıp kavisi, yağlayıcı, zımba hızı ve baskı plakası kuvvetini seçmiştir. Değişkenlerin hepsinin ürün kalitesi için etkili olduğunu ve baskı plakası kuvvetinin en büyük etkiye sahip olduğunu analizleri sonucunda göstermiştir.

Özek ve Bal [46], derin çekme çalışmalarında kalıp ve baskı plakası yüzeylerinin açılarını, kalıp ve zımba köşelerindeki radyüsleri değiştirerek çekme oranı ile et kalınlığı arasındaki etkiyi araştırmışlardır. Kalıp açısı ve kalıp-zımba radyüsleri arttıkça çekme oranının da arttığı gözlemlenmiştir. Çekme oranı sabit tutulduğunda ise et kalınlıklarının çok fazla değişmediğini, birbirlerine yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Doğrusal olmayan sonlu elemanlar metoduyla derin çekme işleminin modellenmesinde, kompleks geometriler içeren kalıplarda, çelik sac malzemenin şekillendirme esnasında oluşabilecek şekil hatalarının kalıp tasarımı aşamasında ön görülerek önlem alınmasına adına yapılan çalışmadır [47]. Yıldız ve Kırılı, yaptıkları araştırma sonucunda, derin çekme işlemine; çekme derinliği, kalıp yüzeylerinin geometrik formu, sacın kesim hattı, sac malzemesi, sac kalınlığı, iş parçasının açısı, baskı plakası kuvveti ve sürtünmenin etki ettiğini belirtmişlerdir.

Yıldırım ve Darendeliler [48], yaptıkları derin çekme çalışmasını silindirik ve kare profil kalıplar ile çelik ve pirin sac malzeme kullanarak yapmışlardır. Silindirik derin çekmede sac malzeme kalınlıklarını 1,5mm olarak kare profil derin çekmede ise sac malzeme kalınlığını 1mm olarak belirlemişlerdir. Elde edilen deney sonuçları karşılaştırılmak için Abaqus yazılımı ve Darendeliler tarafından geliştirilmiş sonlu elemanlar yöntemini içeren kod (SEY) kullanmışlardır. Abaqus ve SEY Kod sonuçlarının, deney sonuçları ile aynı eğilimi gösterdiğini belirtmişlerdir.

Karaağaç ve Özdemir [49], bu makalelerinde tasarım ve imalatı özel olarak yapılan hidromekanik derin çekme deney düzeneğinde Erdemir 6112 sac malzeme kullanarak, farklı sac kalınlıklarında yaptıkları deneysel çalışmaları konu almışlardır. Hidromekanik derin çekme çalışmalarında, klasik kalıplama yöntemine göre daha yüksek çekme oranı ve en küçük kalınlık değişiminin elde edildiğini belirtmişlerdir.

Şen vd. [18], derin çekme prosesinde yağlayıcının öneminden bahsedilen bu makalede,

HC300LA ve HC420LA sac malzemeler ile yapılan derin çekme deneylerini iki tür yağlayıcı kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmayı konu almışlardır. Grafit sprej ve grafit sprej ile teflon bileşiminin birlikte kullanıldığı çalışmada, grafit sprej ve teflonun birlikte kullanımının yalnız grafit sprej kullanımına oranla sürtünme kuvvetinin azaldığı ve şekillendirme kuvvetinin azaldığı sonuçlarına ulaşmışlardır.

Matris açılı derin çekme yöntemi ve hidromekanik derin çekme yöntemini birleştirerek, DIN EN 10130-1999 sac malzemesi üzerine deneysel ve sayısal inceleme yapılan, Ballıkaya'nın tez çalışmasının [50], sonucunda matris açısının, zımba radyüsünün, baskı plakası kuvvetinin vb. parametrelerin bu çalışma için optimum değerlerini ve aralıklarını göstermiştir ve önerilerde bulunmuştur.

Şen ve Kurgan, bu çalışma makalelerinde [51], HC300LA ve HC42LA sac malzemelerinin ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirilmesinde malzeme karakterizasyonunu incelemişlerdir. 150 °C ve 300 °C sıcaklık aralığında yapılan deneyler sonucunda, en büyük ılık şekillendirme sıcaklık aralığını 300 °C olarak tespit etmişlerdir.

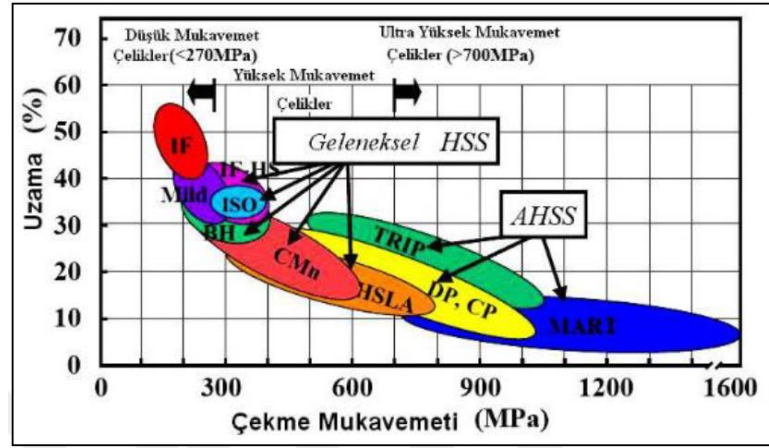
2. TEMEL BİLGİLER

2.1. GELİŞTİRİLMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER

Çelik bir demir (Fe) karbon (C) alaşıımıdır ve farklı oranlarda farklı alaşım elementleri içerebilir. Kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelik elde edilebilmesi için çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler ile iç yapıda kontrol edilebilir [52]. Çelikler kimyasal bileşimleri, üretim yöntemleri, şekilleri, kullanım alanları vb. gibi çeşitli ölçütlerde sınıflandırılmıştır. Bundan sonraki kısımda otomotiv sektöründe kullanılan çelikler hakkında bilgi verilmiştir.

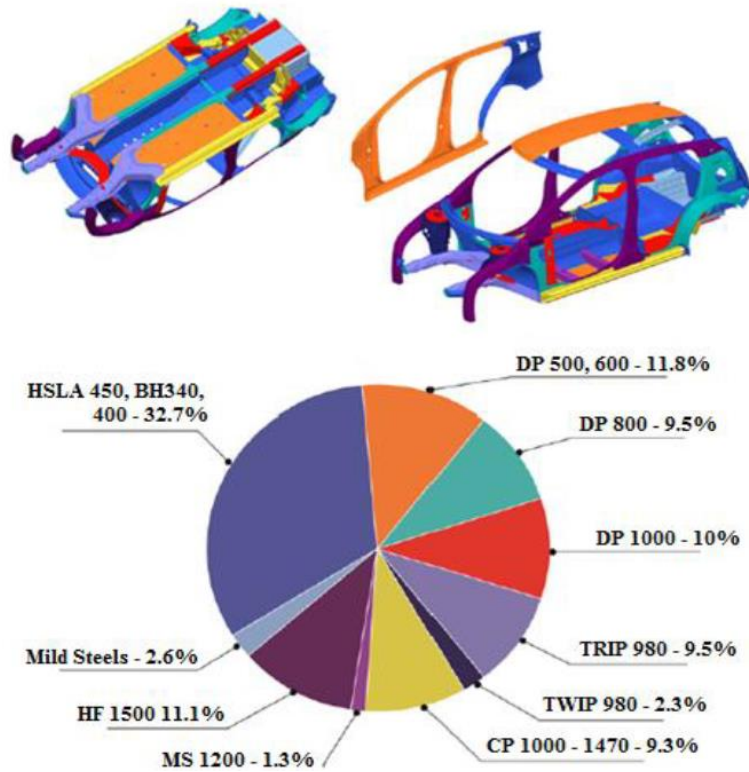
Teknolojinin her geçen gün gelişmesi, yakıt tasarrufu, emisyon ve kaza anında yolcu can güvenliği gibi faktörler geçmişten günümüze otomobil endüstrisinde kullanılan çelik türlerinin giderek gelişmesine zemin hazırlamıştır. 1970 yıllarında görülen petrol krizi sonrasında, otomobillerde yakıt tüketimini azaltabilmek için toplam araç ağırlığını azaltıcı önlemler alınması gerekmiştir ve yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı gündeme gelmiştir [52], [53]. Otomobillerde toplam ağırlığın azaltılması için kullanılabilecek farklı malzemeler olsa da mukavemet, şekillendirilebilme ve maliyet gibi sebeplerle yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı daha avantajlı olmaktadır [53].

Geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), yüksek mukavemetli (HSS) ve ultra yüksek mukavemetli (UHSS) çelikleri de kapsamaktadır [54]. AHSS çeliklerin mukavemet-uzama oranları ve gelişim süreçleri Şekil 2.1.1'de gösterilmiştir. Şekil 2.1.1.'de görüldüğü üzere mukavemet değerleri arttıkça uzama oranları düşüş göstermektedir [53]. Genel olarak bir çeliğin mukavemeti arttıkça şekillendirilebilirliğinde azalma görülmektedir. Özellikle ultra yüksek mukavemetli çeliklerin uzama miktarlarındaki düşüş tasarımlarda kullanımını kısıtlamaktadır ve karmaşık geometrili şekillerde yırtılmalar oluşmaktadır. Bu anlamda bu malzemelerin şekillendirilmesinde yüksek kapasiteli cihazların gereksinimi ve şekil verme yöntemlerinin geliştirilmesinin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.



Şekil 2.1.1. Çeliklerin çekme mukavemetine göre uzama miktarındaki değişimi [54].

Otomotiv sektöründe kullanılan geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS); çift fazlı çelikler (DP – Dual Phase), kompleks fazlı çelikler (CP – Complex Phase), dönüşüm etkili plastisite çelikleri (TRIP – Transformation Induced Plasticity), martenzitik çelikler (MS – Martensitic Steel) olarak sınıflandırılmıştır. Yeni nesil araçlarda kullanılan bu çelik malzemelerin kullanım yerleri ve kullanım oranları Çizelge 2.1.1’de, içyapı özellikleri ve mekanik değerleri Şekil 2.1.2’de verilmiştir.



Şekil 2.1.2. Yeni nesil araçlarda kullanılan çelik türleri ve oranları [55]

Çizelge 2.1.1. Çelik türlerinin içyapı özellikleri ve mekanik değerleri [55]

Çelik Türü	İçyapı	Çekme Mukavemeti [MPa]	% Uzama
HSLA	Ferrit + Perlit + Alaşım Çökeltileri	300 - 800	10 - 25
DP	Ferrit + Martenzit	450 - 1000	6 - 30
CP	Küçük Taneli Ferrit + Yüksek Yüzde % Martenzit ve Ferrit	450 - 1200	6 - 30
TRIP	Ferrit + Beynit + Martenzit	500 - 1200	10 - 33
MS	Martenzit	720 - 1650	3 - 12

Çizelge 2.1.1’de de görüleceği üzere yeni nesil yüksek mukavemetli çelik malzemeler içyapı olarak birbirlerinden farklıdır. Bu iç yapı farklılıkları, çeliklerin mukavemet değerlerinin ve şekillendirilme özelliklerinin üzerinde etki gösterirler. İçyapıdaki martenzit yapı mukavemet değerini arttırırken, ferrit yapı sünekliliği arttırır, dolayısıyla şekillendirilebilirlik özelliğini arttırmaktadır.

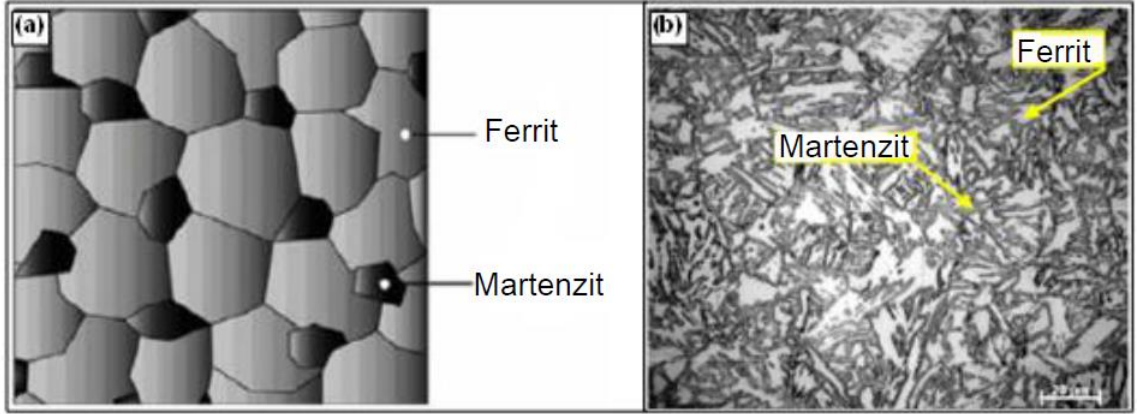
Bu çalışmadaki deneylerde, geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerden çift fazlı çeliklerden DP800 ve martenzit çeliklerden MART1400 çelikleri deneysel incelenmiştir ve bundan sonraki kısımda bu çelik türleri hakkında bilgi verilmiştir.

2.1.1. Çift Fazlı Çelikler

Çift fazlı (DP) çelikler, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı veya alaşımsız çeliklerin (HSLA) Demir-Sementit ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$) faz diyagramında A_1 - A_2 sıcaklık aralığında (ferrit-ostenit belgesinde) belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, bir süre bekletildikten sonra belirli hızlarda soğutulmasıyla östenitin martenzite dönüşümü sağlanarak üretilirler [56]. Üretim sırasında ferrit+martenzit fazlarının yanı sıra perlit, beynit, sementit ve kalıntı östenit fazlar da oluşabilir.

Bu çeliklere çift fazlı terimi de içerisinde ferrit ve martenzit fazının bir arada bulunmasından gelmektedir. Bu faz dağılımı DP çeliklerin mukavemet değerlerinin yüksek ve şekillendirilebilirlik özelliklerinin iyi olmasını anlaşılır kılmaktadır. Ferritik yapı sünekliliği sağlarken, martenzitik yapı sert olduğundan mukavemeti sağlamaktadır. Bu iki fazın hacim oranları süneklilik ve mukavemet oranını belirlemektedir. Şekil 2.1.1.1’de DP çeliğine ait şematik ve optik mikroskop ile çekilmiş mikroyapı görüntüsü

verilmiştir.

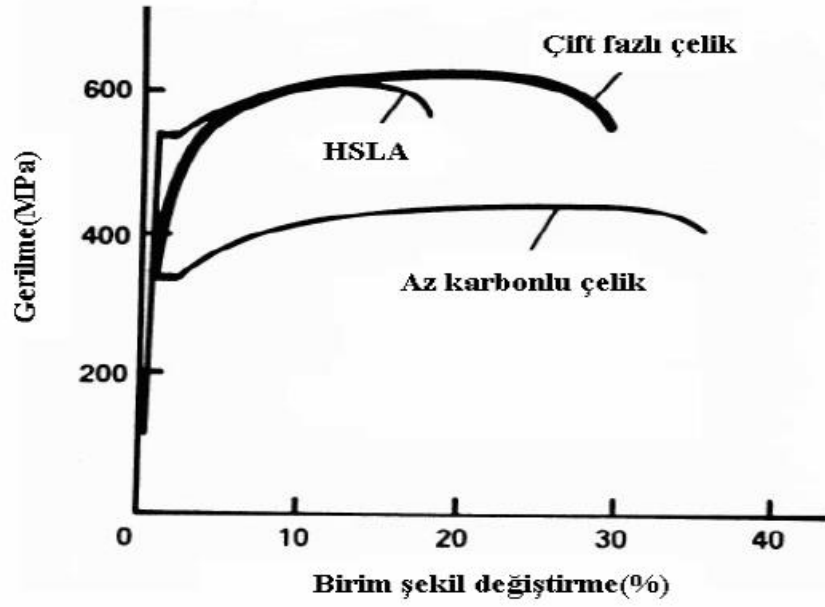


Şekil 2.1.1.1. Çift Fazlı çeliklere ait (a) şematik ve (b) mikroyapı görüntüsü [54].

Çift fazlı çeliklerin mekanik davranışları, fazların hacim oranlarının yanı sıra, kimyasal bileşimlerine, dislokasyonlara ve tane boyutları gibi etmenlere de bağlıdır. Çizelge 2.1.1.1’de farklı geliştirilmiş çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri verilmiştir. Çift fazlı çelikler yüksek çekme mukavemetine ve devamlı akma dayanımına sahiptirler. Çift fazlı çeliklerin akma mukavemeti yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler ve az karbonlu çeliklerle kıyaslandığında daha düşüktür ve Şekil 2.1.1.2’e bakıldığında daha yüksek % uzamaya sahip olduğu görülmektedir [52], [54], [56].

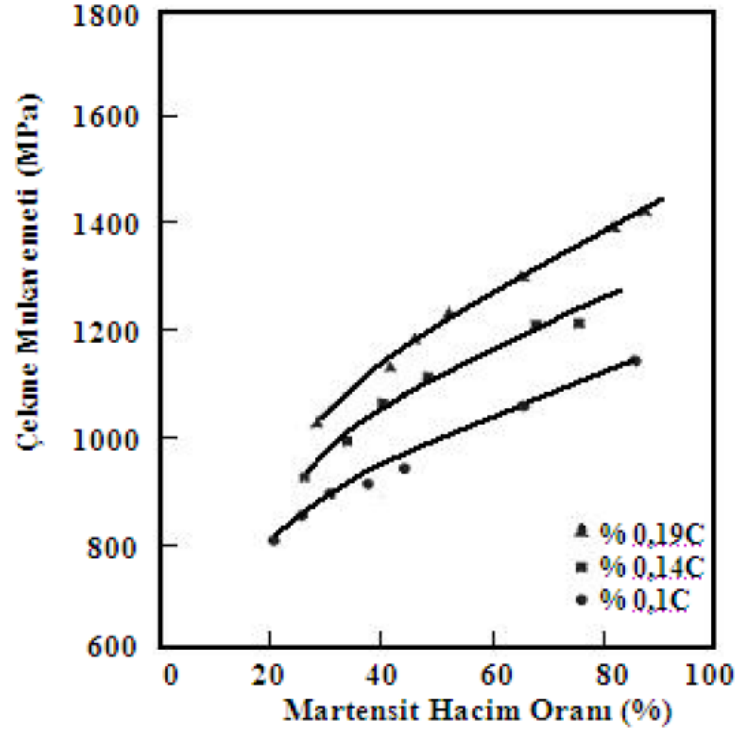
Çizelge 2.1.1.1. Farklı geliştirilmiş çift fazlı çeliklerin mekanik özellikleri [53]

Çelik Sınıfı	Minimum Çekme Mukavemet Aralığı (MPa)	Minimum Yüzde Uzama Aralığı (%)
DP500	500	20
DP600	600	16
DP800	800	10
DP1000	1000	6
DP1200	1200	7



Şekil 2.1.1.2. Çift fazlı (DP) çeliklere, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çeliklere ve az karbonlu çeliklere ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği [52]

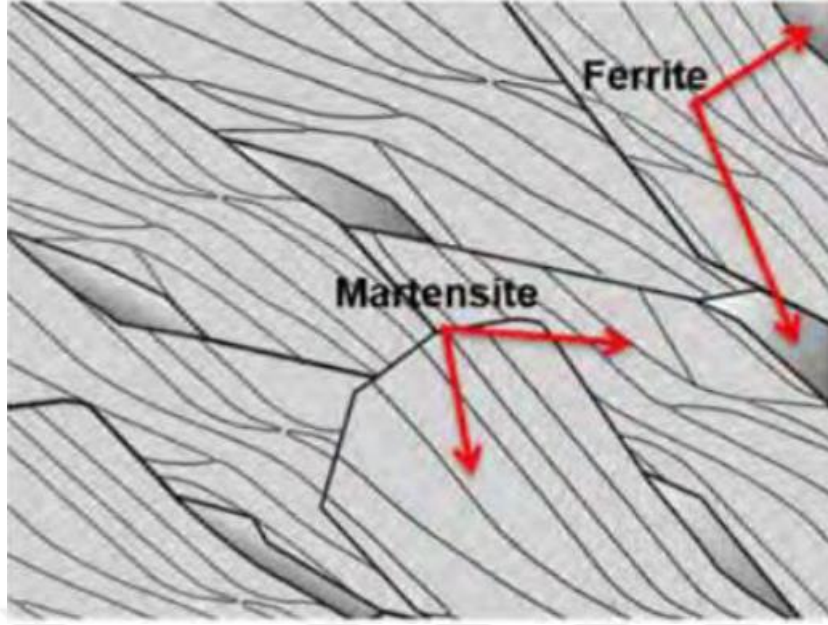
Çift fazlı çeliklerin martenzit hacim oranı çekme mukavemet değerlerini etkilemektedir. Şekil 2.1.1.3'de farklı martenzit hacim oranlarının çekme mukavemeti ile ilişkisi gösterilmiştir. Şekil 2.1.1.3'de görüldüğü üzere martenzit hacim oranı arttıkça çekme mukavemet değerleri artmaktadır.



Şekil 2.1.1.3. Çift fazlı çeliklerin farklı martensit hacim oranlarının çekme mukavemeti ile ilişkisi [54], [56]

2.1.2. Martensitik Çelikler

Martensitik (MART) çelikler, sıcak haddeleme veya tavlama sırasında var olan östenit fazını, sementit oluşmasına yeterli zaman vermeden yüksek bir hızda soğutulması ile martensit fazına dönüştürülerek oluşturulur. Martensit, bir denge fazı değildir ve demir-karbon denge faz diyagramında gösterilmemektedir. Martensit fazının oluşmaya başladığı ilk sıcaklığa martensit başlama sıcaklığı adı verilir. Dönüşüm sıcaklığı 0 K ile 600 K arasındadır ve genellikle alaşım bileşeni, atomların dizilişi, iç gerilmeler, kafes kusurları ve karbon miktarı bu sıcaklıklara etki etmektedir. Karbon atomları genellikle kademeli soğutma sırasında dışarı atılacakken yüksek soğuma hızında atılmaya fırsat bulamaz ve kristal kafeste arayer atomu olarak kalır. MART çeliklerinde karbon atomu sertleşebilirliği artırır ve çeşitli kombinasyonlarda da (manganez, silisyum, krom vb.) sertleşebilirliği artırılabilir. MART çelikleri az miktarda ferrit ve beynit fazını içerebilir. Şekil 2.1.2.1’de martensit çeliğinin mikroyapısının şematik görüntüsü verilmiştir [55], [57], [58].



Şekil 2.1.2.1. Martenzit çelik mikroyapısının şematik görüntüsü [53]

MART çelikleri diğer fazlı çeliklere göre en yüksek çekme mukavemet değerlerine sahiptir ve 1700 MPa çekme mukavemet değerini sağlar. MART çelik sınıfına ait mekanik özellikler Çizelge 2.1.2.1’de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan MART1400 çeliği için minimum çekme mukavemeti 1400 MPa’dır.

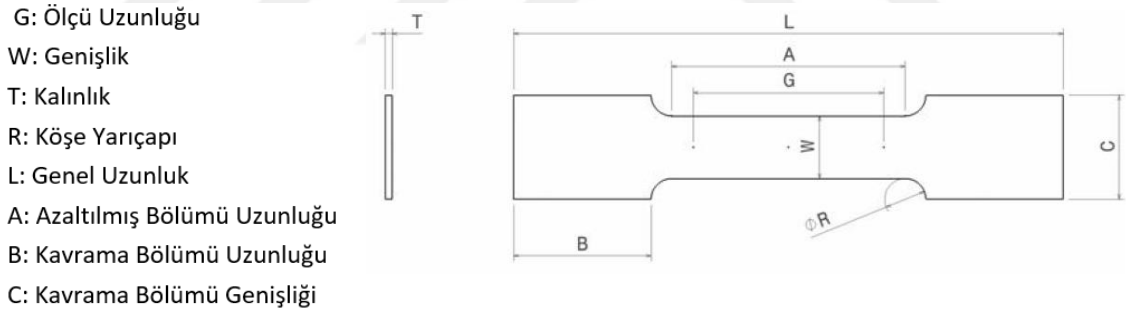
Çizelge 2.1.2.1. Farklı geliştirilmiş martenzit çeliklerinin mekanik özellikleri [53]

Çelik Sınıfı	Minimum Çekme Mukavemet Aralığı (MPa)	Minimum Yüzde Uzama Aralığı (%)
MART900	900	3
MART1100	1100	3
MART1200	1200	3
MART1300	1300	3
MART1400	1400	3
MART1500	1500	3
MART1700	1700	3

2.2. ÇEKME TESTİ

Çekme testi, standart geometriye sahip önceden hazırlanmış bir numunenin, iki ucundan zıt yönlerle çekilmesi ile iki parçaya ayrılana kadar çekme işleminin devam etmesidir. En basit ve en yaygın kullanılan test, tek eksenli statik çekme testidir [59]. Çekme testi, malzemenin mekanik özelliklerinin ortaya konması ve sınıflandırılması için önemlidir [60]. Çekme testi sonucunda çıkan veriler, hesaplanan, akma, uzama, akma mukavemeti, çekme mukavemeti vb. gibi mühendislik hesaplamalarında doğrudan kullanılmaktadır. Sonuçların en yaygın belirlenmesi ve gösterimi gerilme-gerinim diyagramıdır [59].

Çekme testi numunesi, belirli standartlara göre hazırlanır. Bu çalışmada deneyler TS EN ISO 6892-2 standartlarına göre yapılmıştır. Şekil 2.2.1’de, çekme testi numunesinin bölümleri gösterilmiştir. Şekil 2.2.1.’de G uzunlu ile gösterilen gösterge bölümü numunenin en önemli kısmıdır. Numunenin gösterge bölümünün enine uzunluğu, omuz ve kavrama olarak adlandırılan bölgelerin enine uzunluğundan daha azdır ve deformasyon bu bölgede oluşur [59].

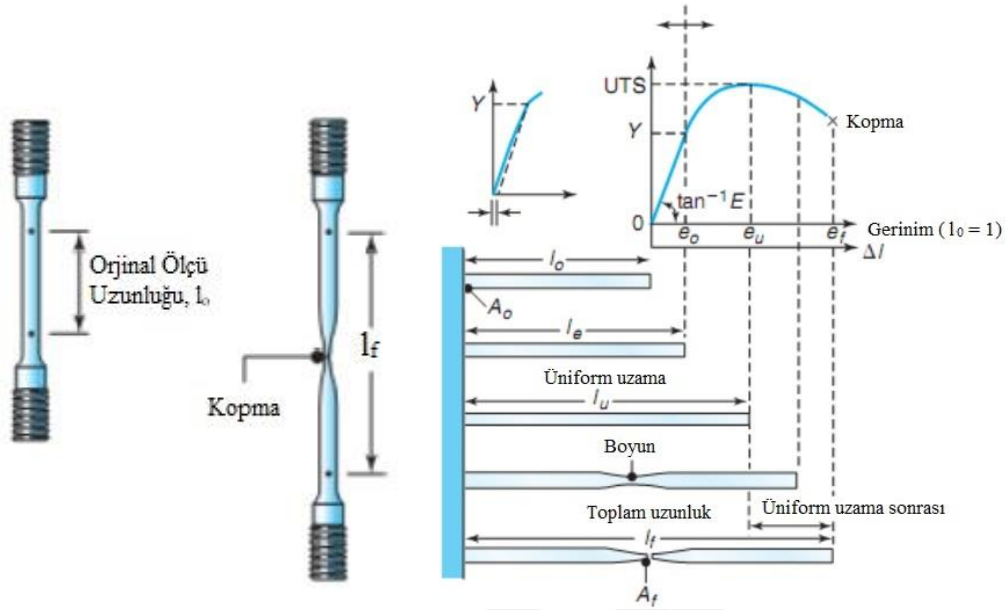


Şekil 2.2.1. Çekme testi numunesi [59]

2.2.1. Çekme Testi Sırasında Malzemenin Mekanik Davranışları

Bir metal çekme numunesi, Şekil 2.2.1.1’de, gösterildiği gibi çekme testi sırasında farklı deformasyon aşamalarından geçer. İlk olarak, elastik deformasyona uğrayan numune, daha sonrasında plastik deformasyon olmaya başlar. Elastik deformasyon geçiren numune deformasyonu kalıcı değildir fakat plastik deformasyon, deformasyonun artık

kalıcı olduğu aşamadır. Akma sınırının daha ilerisinde bir noktada oluşmaya başlayan plastik deformasyon sırasında numunede, metalin sertleşmesine neden olan bir uzama başlar ve “uniform uzama” olarak adlandırılır [59].

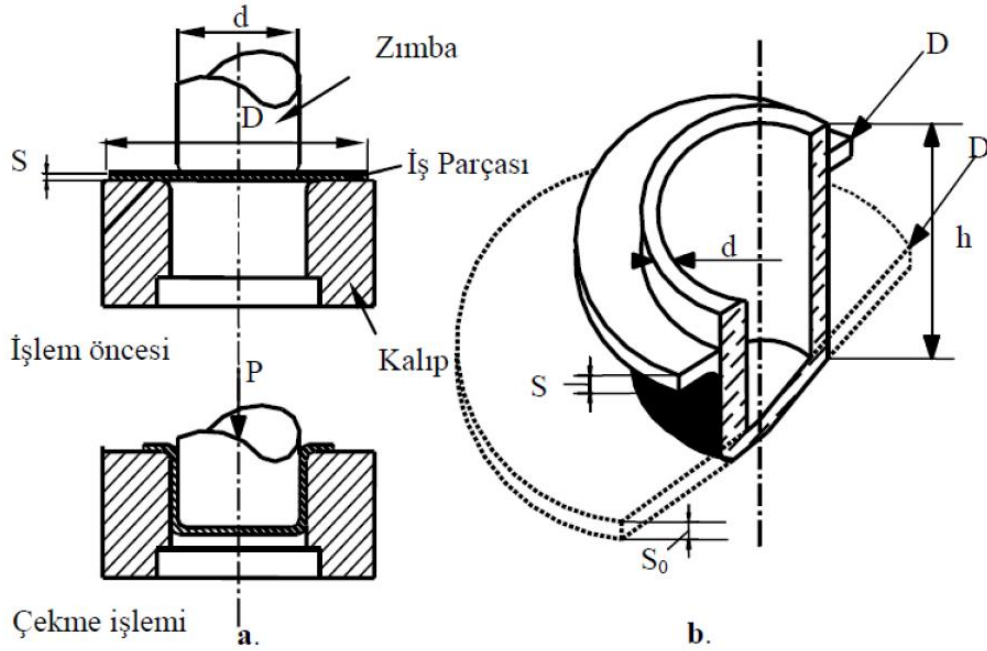


Şekil 2.2.1.1. Çekme testi numunesinin deformasyon adımları [59]

2.3. DERİN ÇEKME VE MEKANİĞİ

Derin çekme, zımbanın hareketi ile sac metale kalıp şeklini veren, sıkıştırma-germe etkilerinin birlikte olduğu sac metal malzemelerin şekillendirmesi yöntemlerinden biridir. Bu işlem, iki boyutlu düzlemsel geometriye ve belirli bir kalınlığa sahip bir iş parçasının, işlem parametrelerine göre hazırlanmış bir çekme kalıbı elemanlarıyla preste itilmesiyle, kalıp yapısına göre oluşan derinlik ve profillere sahip üç boyutlu ürünler elde edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu işlem kabın elde edilmesi düşünülen geometriye bağlı olarak birden fazla işlem ile oluşturulabilirler [61], [62].

Şekil 2.3.1’de, dairesel iş parçasından d çapına sahip silindirik bir kabın çekme işlemiyle elde edilmesi şematik olarak verilmiştir.

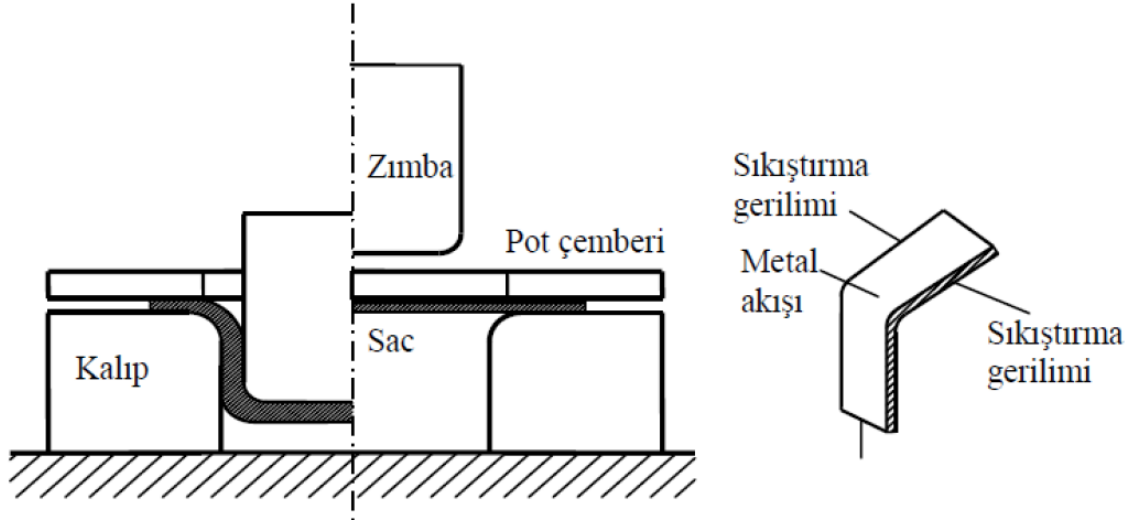


Şekil 2.3.1. Derin çekme işlemi a. Şematik, b. Perspektif [61], [62]

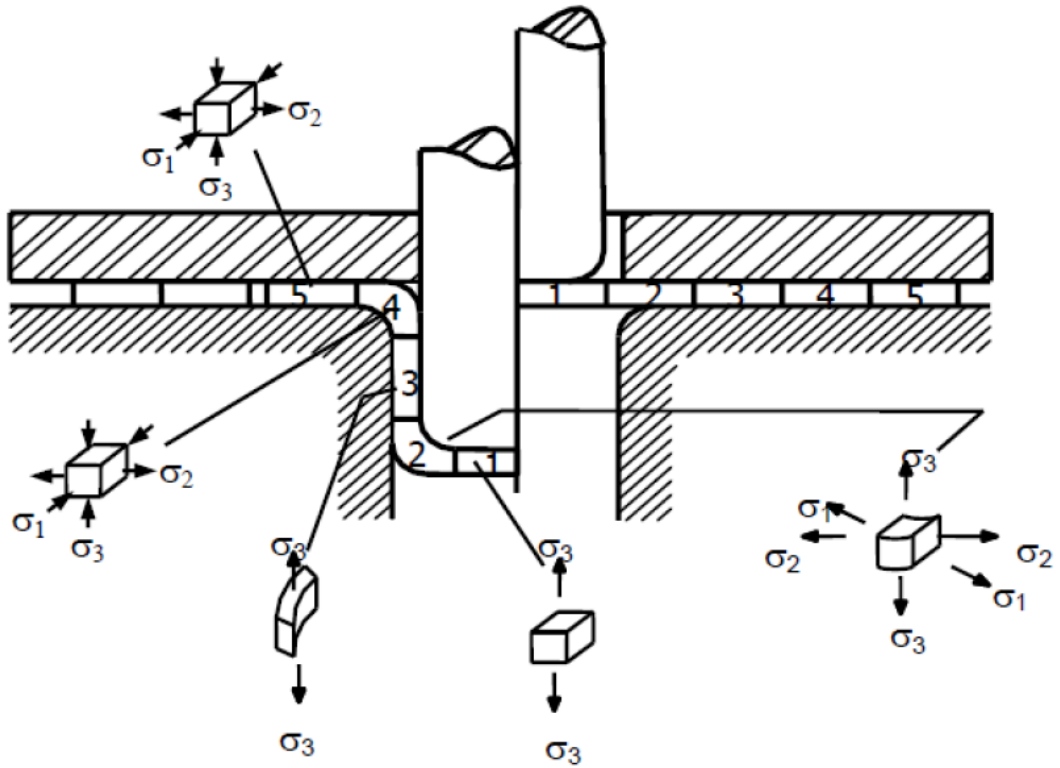
Şekilde görüldüğü gibi, D çapına ve S kalınlığa sahip bir sac levha numunesi, çapı d olan zımba olarak adlandırılan prese bağlı bir kalıp parçasıyla, iç çapı sac levha kalınlığı ve zımba çapına göre belirlenmiş bir kalıp içine çekilerek (itilerek), belirli bir derinliğe ve profile sahip altı düz bir kap haline getirilmektedir [61], [62].

Çekme olayında sac levha kalıp üzerine yerleştirilir ve baskı plakası ile kalıp arasına belirli bir kuvvetle sıkıştırılır. Baskı plakası derin çekme işlemi boyunca, sac levhaya baskı uygular. Baskı plakası ile kalıp arasında kalan bölgeye flanş bölgesi denir. Zımba ileri doğru hareket ederek sac levhaya baskı uygular ve sac levhayı kalıp boşluğuna girmeye zorlar. Sac levha, kalıp kenarlarındaki radyüsler yardımıyla eğilerek ve radyal olarak akarak kalıp içerisine girer ve kalıp-zımba arasında kalarak düz duvar oluşturur. Sac levhanın flanş bölgesindeki kısmı sürtünme kuvveti olduğundan çekme olayını engelleyici etki gösterir. Yağlayıcı kullanılarak bu sürtünme etkisi azaltılabilir. Çekme olayı esnasında Şekil 2.3.2’de görüldüğü gibi sac levhanın kalınlığı azalmaya başlar ve Şekil 2.3.3’de görüldüğü gibi düşey kısımlarından kalıp dibine doğru büyüyen

gerilmeler oluşturur [61], [62].

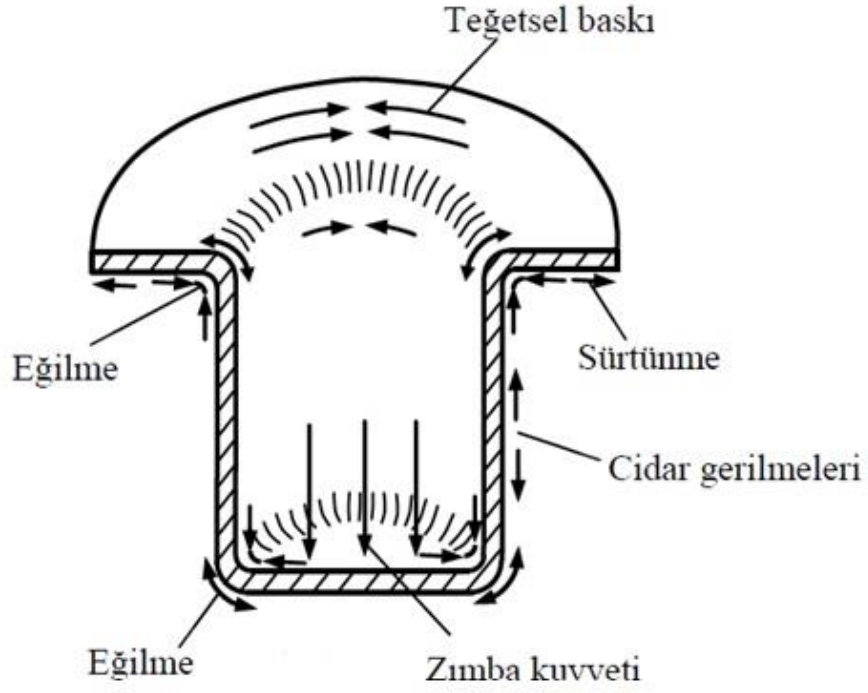


Şekil 2.3.2. Derin çekmenin mekaniği [61], [62].



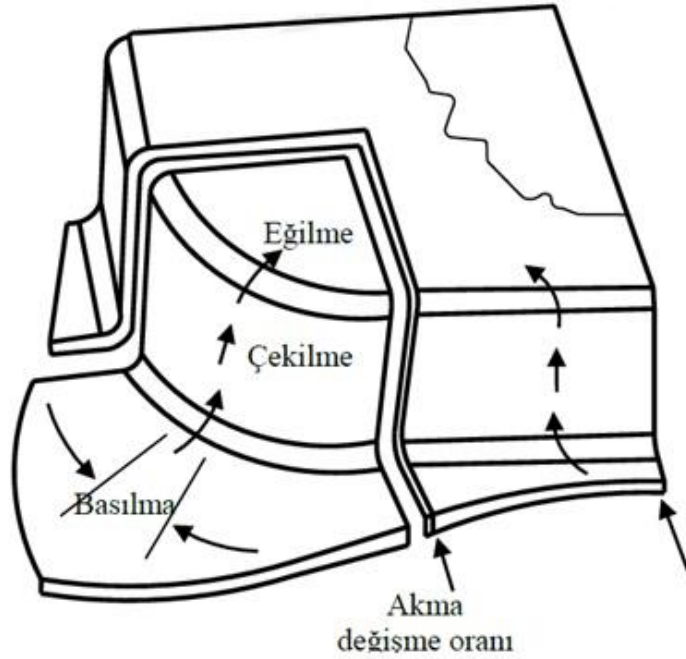
Şekil 2.3.3. Derin çekme esnasında parçaya boylamsal kısımlarda meydana gelen gerilmeler [61], [62].

Dairesel bir sac levhanın derin çekme yöntemiyle silindirik bir parça olarak üretimi esnasında, parça iç yapısında ortaya çıkan kuvvet ve gerilmeler Şekil 2.3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3.4. Derin çekme işleminde iş parçasına etki eden kuvvetler [62]

Bir sac levhanın kare kalıp kullanılarak derin çekme yöntemiyle üretimi esnasında çekilen kabın köşelerinde eğme, çekme ve basma gerilmeleri Şekil 2.3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3.5. Dikdörtgen ve kare kapların köşe gerilme analizi [62]

3. MATERİYAL METOT

3.1. MATERYALLER

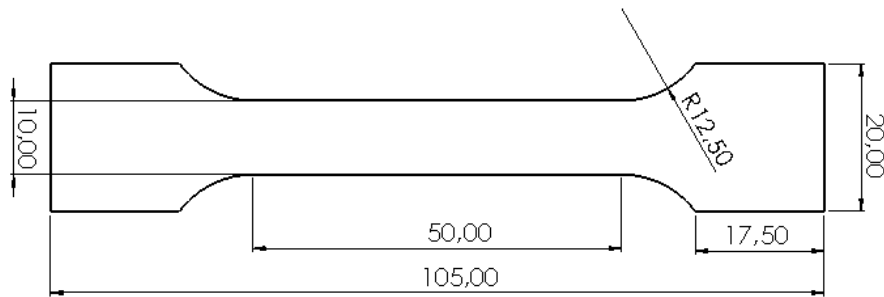
Bu çalışmada, yüksek mukavemetli çeliklerin açılı kalıplarda derin çekme işleminde kalıp geometrisinin limit çekme oranı üzerine etkisinin incelenmesi için 1mm kalınlıktaki DP800 ve 1,5mm kalınlıktaki MART1400 çelikleri kullanılmıştır. Her iki çeliğin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1.1. DP800 ve MART1400 çeliklerinin kimyasal bileşimi

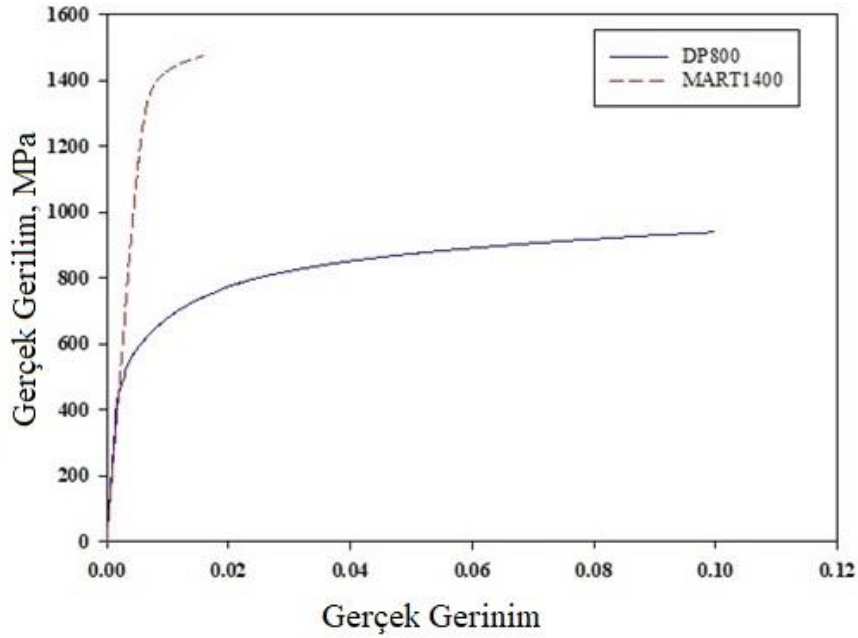
Malzeme	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	V
DP800	97,9	0,142	0,190	1,489	0,007	0,003	0,038	0,001	0,016	0,012
MART1400	98,1	0,179	0,168	1,201	0,010	0,004	0,038	0,032	0,001	0,018

3.2. ÇEKME TESTİ DENEYLERİ

Şekil 3.2.1’de boyutları gösterilen çekme testi numuneleri her bir çelik için haddeleme yönünde su jeti kesme yöntemi ile kesilmiştir. Çekme testi deneyleri, TS EN ISO 6892-2 standardına göre Zwick/Roell Z600 çekme testi cihazı ile 0,005 s⁻¹’de gerçekleştirilmiştir. Her iki çeliğin gerçek gerilme-gerinim grafikleri Şekil 3.2.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2.1. Çekme testi numunelerinin boyutları



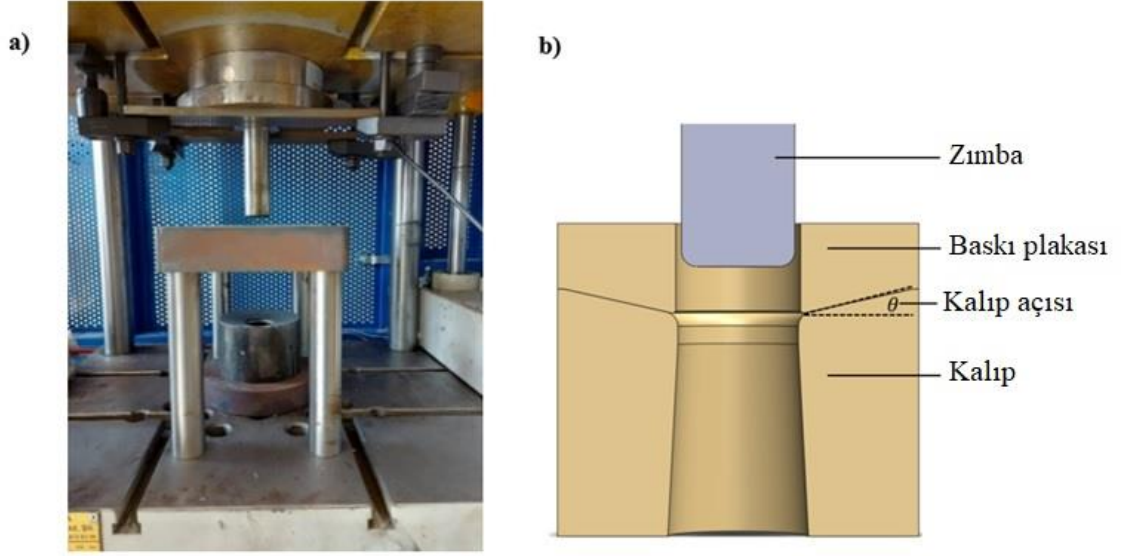
Şekil 3.2.2. 0,005 s⁻¹'de DP800 ve MART1400 çeliklerinin gerçek gerilme-gerinim grafiği

3.3. DERİN ÇEKME DENEYLERİ

Dairesel numuneler, su jeti kesme yöntemiyle DP800 ve MART1400 sac malzemelerden kesilmiştir. Sac malzemeler 66-90mm arasında değişen farklı çaplarda hazırlanmıştır. Derin çekme deneylerinde dört farklı açılı (0°, 7,5°, 12,5°, 20°) kalıplar üretilmiş ve kullanılmıştır. Kalıp kurulumunun geometrik özellikleri Çizelge 3.3.1'de verilmiştir. Deney düzeneği ve şematik gösterimi Şekil 3.3.1'de verilmiştir. Deneylerde dairesel numune ve yağlayıcı kalıp üzerine yerleştirilir ve baskı plakası hareket ettirilerek numuneye baskı kuvveti uygulanır. Ardından zımba ilerler ve numune kalıp boşluğuna itilerek şekillendirilir.

Çizelge 3.3.1 Derin çekme işlemi için kalıp kurulumunun geometrik özellikleri

Malzemeler	Geometrik Özellikler				
	Zımba çapı	Kalıp açısı	Kalıp radyüsü	Zımba kenar radyüsü	Boşluk
DP800	37.6 mm	0°, 7,5°, 12,5°, 20°	5 mm	5 mm	1.21 mm
MART1400	36.4 mm	0°, 7,5°, 12,5°, 20°	5 mm	5 mm	1.81 mm



Şekil 3.3.1. a) Açılı kalıplarda derin çekme için deney düzeneği ve b) şematik gösterimi

Etkili yağlama yöntemini seçmek için üç farklı yağlama koşulunda (Teflon film, grafit, Teflon film + grafit) derin çekme deneyleri yapılmıştır. Teflon + grafit durumuna göre uygulaması daha kolay olduğunda ve grafit durumuna göre daha düşük şekillendirme kuvveti ile sonuçlandığı için derin çekme deneylerinde kullanılmak üzere teflon film seçilmiştir. Kalınlığı 0,25 mm olan teflon filmler, sacın flanş bölgelerinin üst ve alt yüzeylerine yerleştirilmiştir.

Derin çekme işlemi sırasında kırılmaları önlemek için DP ve MART numunelerine sırasıyla yaklaşık 7,5 ton ve 15 ton baskı plakası kuvveti uygulanmıştır. Baskı plakası kuvvetinin belirlenmesi ön derin çekme testleri ile yapılmıştır, burada yırtılma veya kırılma olmadan başarılı bir çekme elde edilene kadar baskı plakasının kuvveti artırılmıştır. Her başarılı derin çekme işleminden sonra, numune çapları kademeli olarak 2mm arttırılmıştır. Daha sonra DÇO, Denklem 1’de gösterildiği gibi başarıyla derin çekilmiş en büyük numune çapının zımba çapına bölünmesiyle hesaplanmıştır.

$$D\check{C}O = \frac{d\phi_f}{d\phi_p} \quad (1)$$

Burada, $d\phi_f$ ve $d\phi_p$ sırasıyla, başarıyla derin çekilmiş nihai numune çapını ve zımba çapını temsil eder.

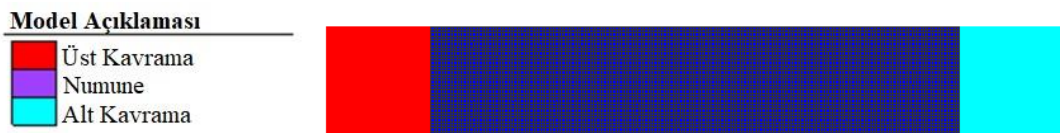
3.4. SONLU ELEMENLAR ANALİZİ MODELLEMESİ

3.4.1. DP800 ve MART1400 İçin Esas Modelin Optimizasyonu

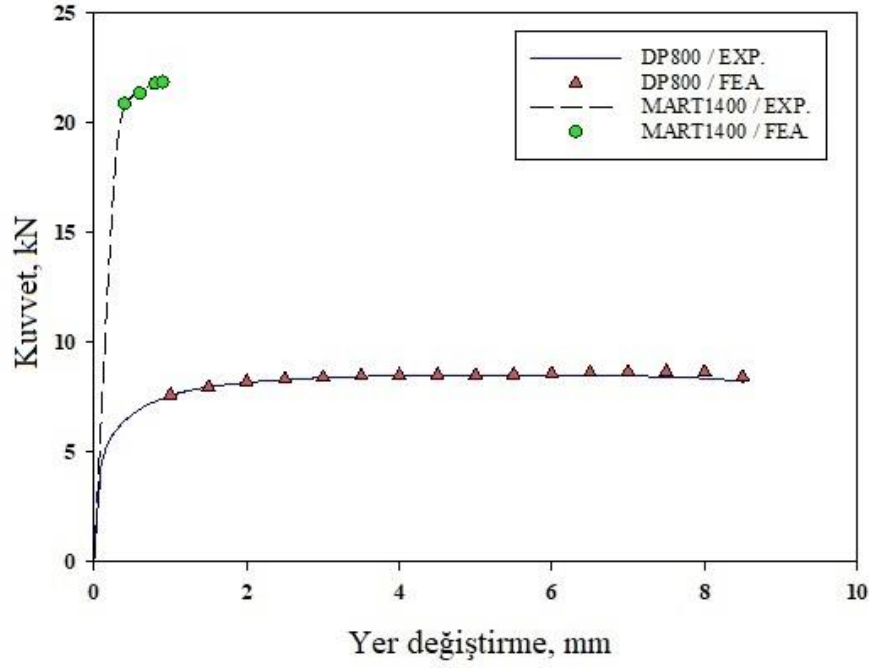
Sonlu elemanlar analizi, temel olarak kalıp tasarım süreçlerinde deneme yanılma aşamalarını ortadan kaldırmak veya azaltmak için kullanılır. Bu aşamada Denklem 2 büyük deformasyon gerilmelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Voce sertleşme modeli, gerilim doygunluğu davranışı nedeniyle, daha yüksek gerinim seviyelerinde gerilim-gerinim tepkimelerini tahmin edebilir, çelik ve alüminyum dahil olmak üzere çeşitli malzemeler için kullanılır. [63],[64]. Voce sertleşme modelinin parametreleri, bir dizi çekme testi deneyi simüle edilerek ve elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri deneysel değerlerle karşılaştırılarak optimize edilmiştir. Çekme testi simülasyonlarında, numunelerin master boyları 0,3mm boyutunda altı yüzlü elemanlarla meshlenmiş ve kalınlık boyunca üç eleman kullanılmıştır. Numuneyi yerinde tutmak için kullanılan çeneler rijit gövdeler olarak seçilmiş ve numuneye yapıştırılmıştır. Çekme testi simülasyon modeli Şekil 3.4.1.1 gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin gerçek verilerle karşılaştırılması Şekil 3.4.1.2’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere uygulanan malzeme modeli gerçek verilere yüksek oranda bir yakınsama sağlamıştır.

$$\sigma = \sigma_0 + V_1 [1 - \exp(-V_2 \epsilon)] \quad (2)$$

Burada V_1 ve V_2 , Voce sertleşme modeli parametrelerini ve σ_0 ilk akma dayanımı temsil eder.



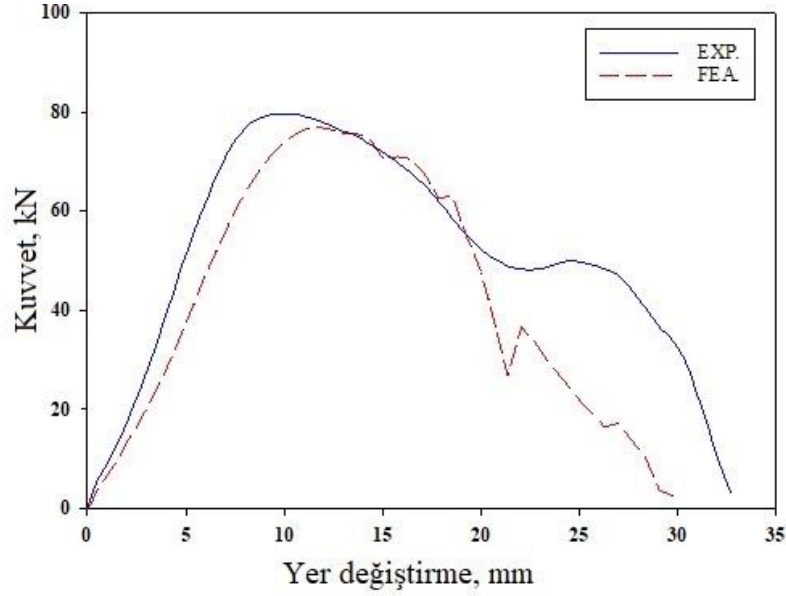
Şekil 3.4.1.1. Çekme testi simülasyonu için kullanılan sayısal model



Şekil 3.4.1.2. DP800 ve MART1400 çeliği için simüle edilmiş ve deneysel akış eğrilerinin karşılaştırılması

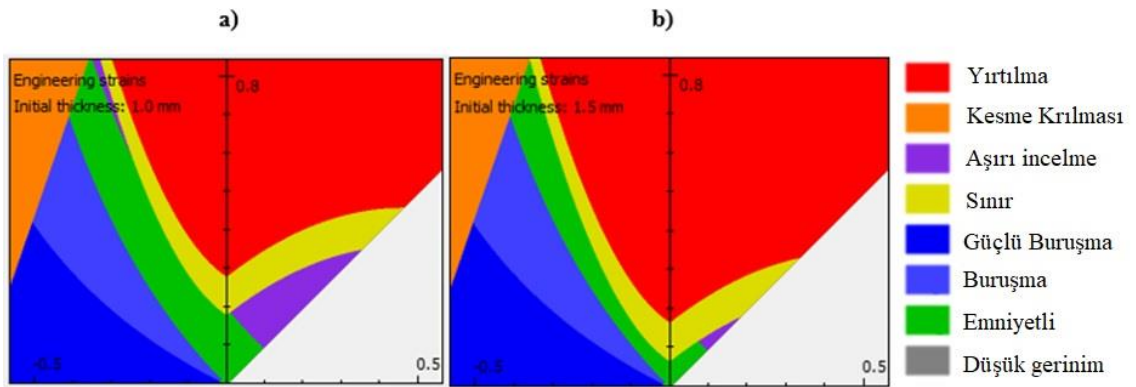
3.4.2. Derin Çekme Analizi

Derin çekme analiz modelinde kalıplar FEA modeline rijit cisimler olarak yerleştirilmiştir ve sac malzemeler 0,43mm boyutunda altı yüzlü elemanlarla meshlenmiş ve kalınlık boyunca üç eleman kullanılmıştır. Programın hesaplama süresini azaltmak için dairesel numunelerin sadece dörtte biri simüle edilmiştir. Deneysel ve simüle edilmiş kuvvet-yer değiştirme grafikleri üzerinde iyi bir uyuşmaya varılana kadar farklı sürtünme katsayıları için yinelenmeli derin çekme simülasyonları gerçekteştirilerek, kalıp ve yüzey arasında 0,07 coulomb sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Deneysel ve simüle edilmiş kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 3.4.2.1’de gösterilmiştir. Gerçek deneylerde yağlayıcı olarak kullanılan teflon filmin kalınlığı sebebiyle kalıp boşluğunda bir miktar düşüş olmuş olabilir. Simülasyon modelinin derin çekme işleminin ütüleme aşamasında daha düşük kuvvet tahmin etmesinin sebebi gerçekte ve analiz ortamındaki kalıp boşluklarının farklılık göstermesinden kaynaklanmış olabilir. Sac modellerin arıza teşhisi, teorik Keeler şekillendirme limit diyagramı (FLD) ile değerlendirilmiştir.



Şekil 3.4.2.1. DP800 çeliğin 70 mm çapında derin çekmesi için deneysel ve simüle edilmiş kuvvet-yer değiştirme grafiğinin karşılaştırılması

DP800 için FLD'nin türetilmesinde, verilen gerinim sertleşme katsayısı n ve kalınlık t , sırasıyla 0,16 ve 1mm idi. MART1400 için FLD'nin türetilmesinde, verilen gerinim sertleşme katsayısı n ve kalınlık t , sırasıyla 0,11 ve 1,5mm idi. DP800 ve MART1400 çelikleri için elde edilen türetilmiş FLD eğrileri Şekil 3.4.2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4.2.2. a) DP800 ve b) MART1400 çelikleri için teorik Keeler yöntemine göre elde edilen FLD eğrileri

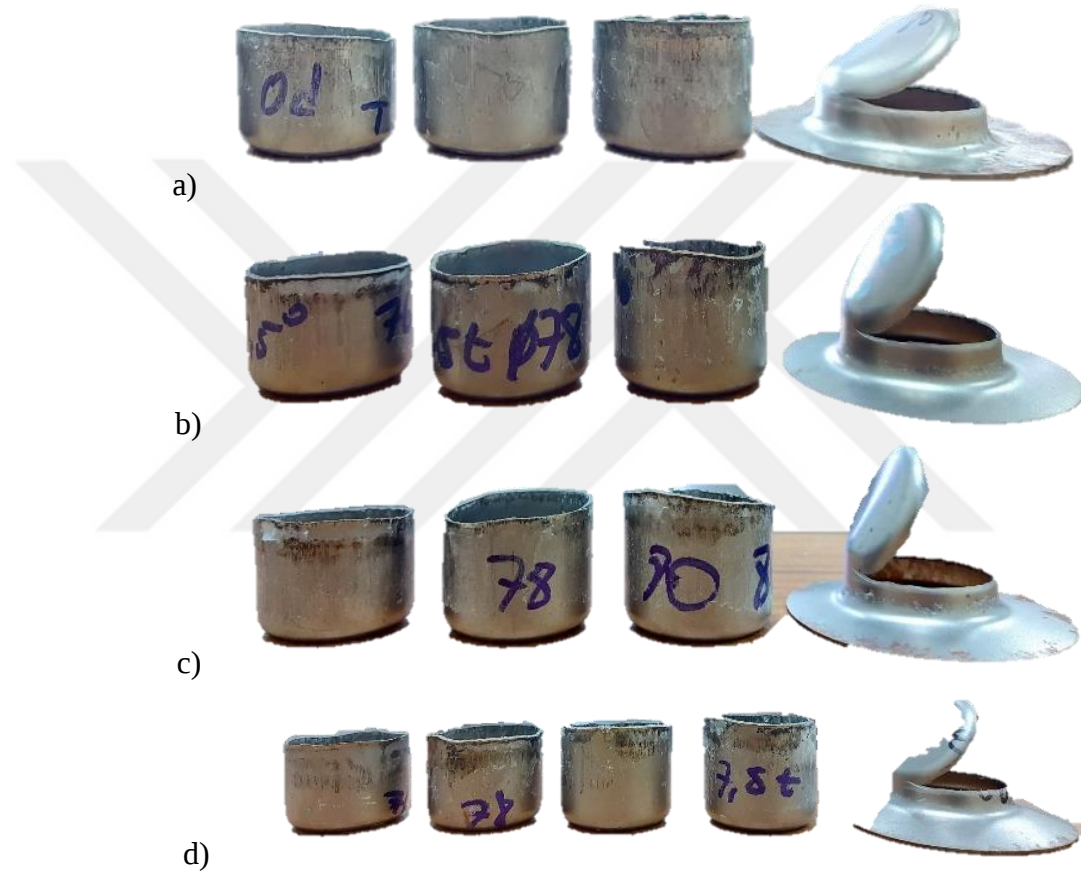
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

4.1. AÇILI KALIPLARDA DERİN ÇEKME YÖNTEMİNİN DP800 VE MART1400 ÇELİKLERİNİN DERİN ÇEKME ORANI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

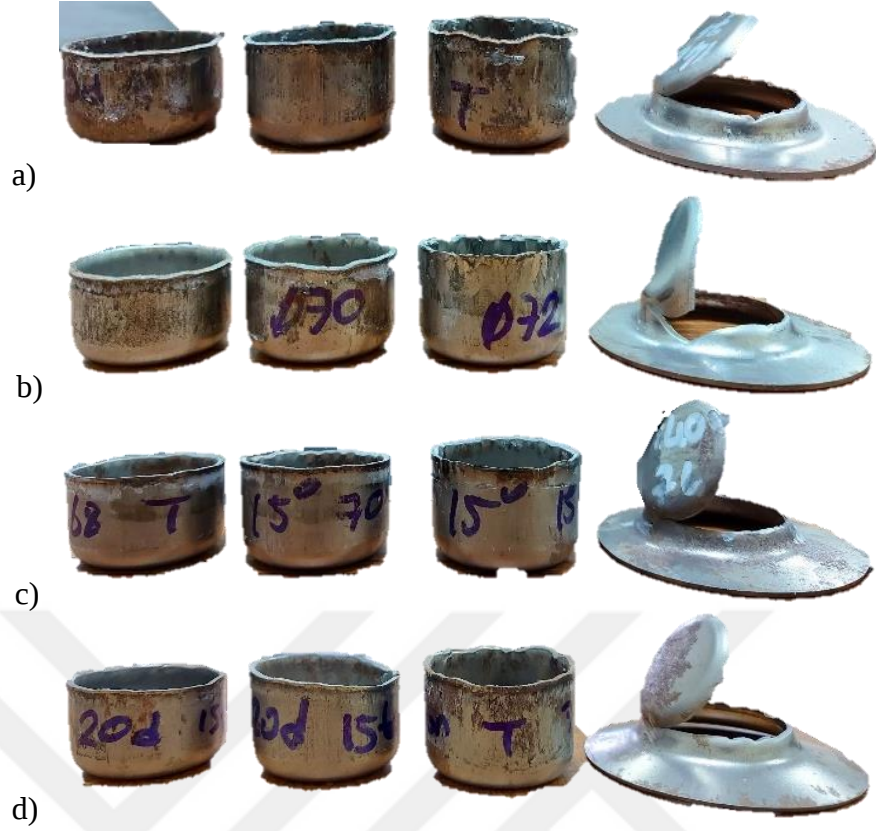
DÇO, sac metallerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmenin karakteristik yöntemlerinden biridir. Esas olarak DÇO değeri, ürünlerin ne kadar derin oluşturulabileceğini gösterir. Böylece, DÇO'nin iyileştirilmesi, daha yüksek karmaşıklığa veya derinliğe sahip ürünlerin şekillendirilmesine olanak tanır. Şekil 4.1.1 ve 4.1.2'de DP800 ve MART1400 çeliklerinin farklı açılarda açılı kalıplarla derin çekme numuneleri gösterilmiştir. Kalıp açısındaki artışın her bir çelik türü için DÇO'da önemli iyileşmeye yol açmadığı görülmektedir. Ancak, DP800'ün DÇO'su 20° kalıp açısında %2,46 oranında biraz iyileşmiştir. Elde edilen en yüksek DÇO, DP800 ve MART1400 çelikleri için sırasıyla 2,18 ve 1,97 olmuştur. Geleneksel derin çekme operasyonlarında, çekme yapılırken kalıp köşe radyüsünde iş parçasının duvarları eğilir ve tekrar düzelir. İş parçasının duvarlarındaki bu eğilme ve tekrar düzelme deformasyonu, iş parçası duvarlarında mukavemet sertleşmesine neden olur. Diğer yandan çekilen kabın köşelerinde sadece tek bir eğilme deformasyonu geçirdiği için, kap duvarlarına göre daha az mukavemet sertleşmesine neden olur. Bu nedenle, kap köşe ve duvar bölgeleri arasındaki bu mukavemet sertleşme gradyanı, derin çekme işlemi sırasında kap köşelerinin destekleyebileceği duvar uzunluğu miktarını sınırlar. Bununla birlikte, saclar açılı bir kalıptan çekildiğinde, kalıp açının artmasıyla kap duvarlarının eğilmesi ve tekrar düzelmesi azalır, bu da kabın köşe ve duvar bölgelerinde mukavemet sertleşme gradyanının azalmasına ve sonuç olarak DÇO'nun iyileşmesine neden olur. Soğuk haddelenmiş düşük karbonlu çelik [65], pirinç ve alüminyum [22],[66] gibi malzemeler için açılı kalıplarda derin çekme yöntemiyle birçok gelişme gözlemlenmiş olsa da, DP800 ve MART1400 çeliklerinde 20°'ye kadar kalıp açıları, DÇO'nun artmasına önemli ölçüde katkıda bulunmadı. DP800 ve MART1400 çeliklerinin bu çalışmada gözlemlenen 0° ile 20° açıda açılı kalıplarda derin çekme işlemine bu kadar bağımsız olmasının ana nedenlerinden biri, kap duvarlarının mukavemet sertleşmesini azaltmak için yetersiz kalıp açılarının kullanılmasından kaynaklanmış olabilir. Hezam vd. [67], açılı bir kalıp kullanarak DÇO'da önemli artış gözlemlenmişlerdir ancak daha düşük kalıp açılarında elde edilen DÇO'nun, daha yüksek kalıp açılarında elde edilenden daha düşük olduğunu

da belirtmişlerdir.

Daha düşük kalıp açılarında, açılı kalıplarda derin çekme kalıbı geleneksel derin çekme kalıbına yaklaştığından, açılı bir kalıp kullanmanın geleneksel derin çekme kalıbına göre avantajları önemli ölçüde azalır. Böylece, daha yüksek kalıp açılarında daha yüksek bir DÇO elde edilebilir olabileceği sonucuna varılabilir. Ancak, özellikle yüksek dayanımlı ve düşük kalınlıktaki çeliklerde daha yüksek kalıp açılarında baskı plakası kullanılamayacağından buruşma kusurlarına yol açabileceği göz önünde bulundurulabilir.



Şekil 4.1.1. a) 0° , b) 7.5°, c)12.5°, d) 20°, farklı açılarda açılı kalıplarda derin çekilen DP800 numuneleri: a), b), c)'de gösterilen numunelerin başlangıç çapları soldan sağa 76, 78, 80 ve 82 mm ve d) için soldan sağa 76, 78, 80, 82 ve 84 mm'dir

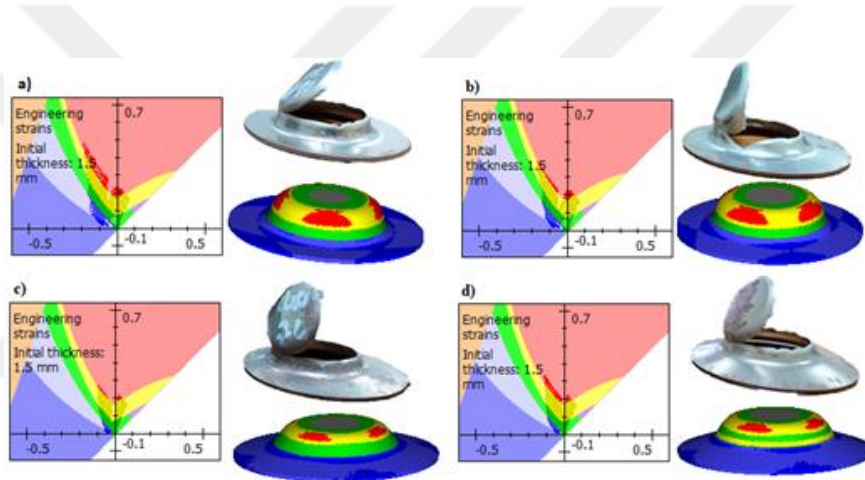


Şekil 4.1.2. a) 0°, b) 7,5°, c) 12,5°, d) 20°, farklı açılarda açılı kalıplara sahip derin çekme MART1400 numuneleri: a), b), c) ve d)'de gösterilen numunelerin başlangıç çapları soldan sağa 68, 70, 72 ve 74 mm'dir

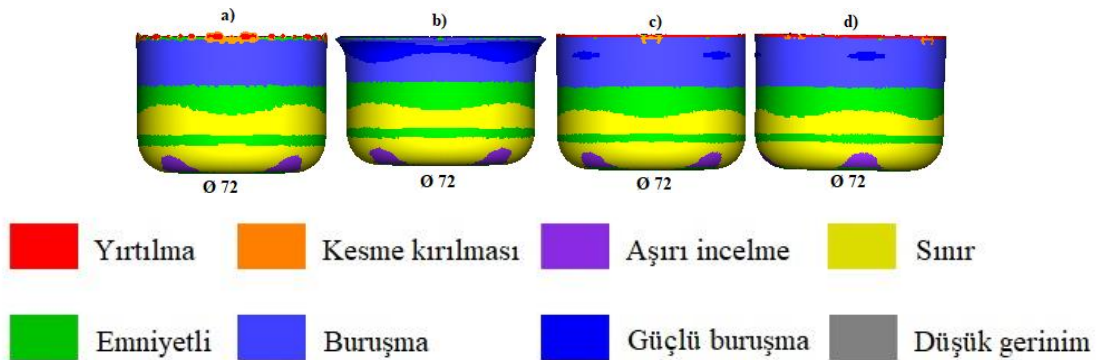
4.2. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE DENEYSEL AÇILI KALIPLARDA DERİN ÇEKME SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

FEA yöntemleri, deneme yapılma sırasında harcanan zaman ve kaynak israfını önlemek amacıyla sac şekillendirme tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, akış eğrisi, anizotropi, şekillendirme sınırı vb. gibi sac malzeme özelliklerinin analiz sonuçlarını gerçek şekillendirme sürecinde gözlemlenen sonuçlara yaklaştırmak için iyi karakterize edilmesi ve tanımlanması gerekir. Bir sac metalin şekillendirme sınırları genellikle Nakazima testi ile elde edilebilen FLD'ler ile tanımlanır. Bununla birlikte, sac metal için FLD'nin elde edilmesi, fazla miktarda tekrarlayan deneysel testler gerektirir. Bu nedenle, sınırlayıcı gerinimleri elde etmek için sac metal endüstrisinde genellikle Keeler gibi teorik yöntemler tercih edilir. FEA ve kırık numunelerin karşılaştırılması MART1400 çeliği için Şekil 10'da gösterilmiştir. FEA modelinde kırılmalar 74mm başlangıç çapı için zımba köşe bölgesi boyunca meydana gelmiştir ve bu deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içindedir. Şekil 4.2.1'de gösterilen deneysel

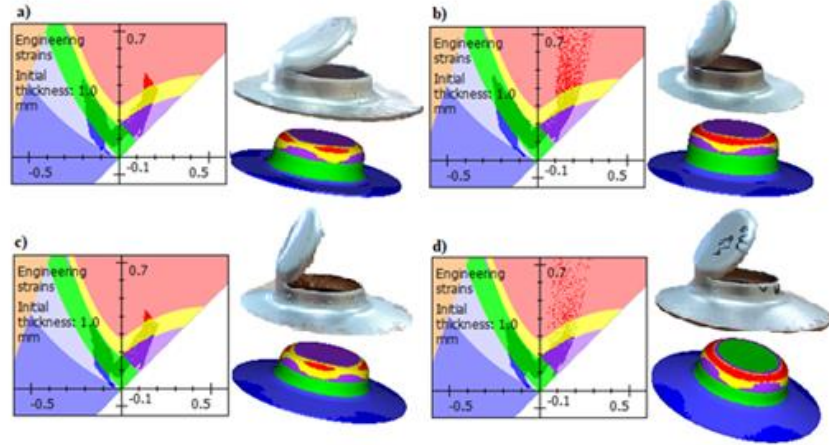
sonuçlara benzer şekilde, sayısal olarak derin çekilebilen MART1400 çeliği için en büyük başlangıç çapı Şekil 4.2.2’de gösterildiği gibi 72mm olmuştur. FEA ve kırık numunelerin karşılaştırılması DP800 çeliği için Şekil 4.2.3’da gösterilmiştir. FEA modelindeki kırılmalar, deneysel sonuçlarda gözlemlendiği gibi her zaman zımba köşe bölgesi boyunca meydana gelmiştir. Ancak sayısal sonuçlarda 0° ve $7,5^\circ$ kalıp açıları için 82mm başlangıç çapında kırılmalar meydana gelirken, $12,5^\circ$ ve 20° kalıp açıları için 83mm başlangıç çapında meydana gelmiştir. DP800 çeliği için farklı kalıp açılarında sayısal olarak derin çekilmiş en büyük başlangıç çapları Şekil 4.2.4’de gösterilmiştir. Sayısal sonuçlar ile deneysel derin çekme sonuçları karşılaştırıldığında yüksek bir yakınlığa ulaşıldığının görülmesi, MART1400 ve DP800 çelikleri için derin çekme analizinde Keeler teorik FLD’nin uygulanabilirliğini doğrular.



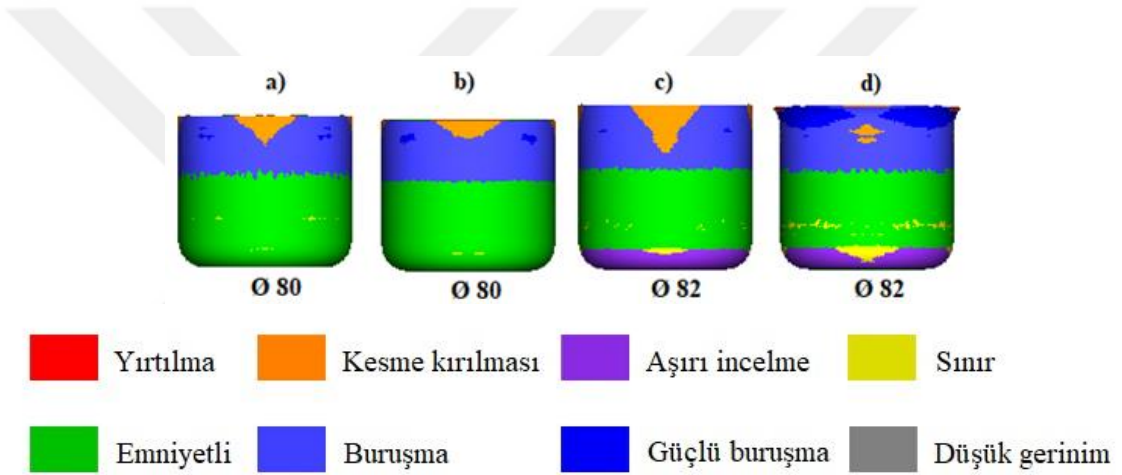
Şekil 4.2.1. a) 0° , b) $7,5^\circ$, c) $12,5^\circ$, d) 20° kalıp açılarında 74 mm başlangıç çaplı MART1400 çeliği için deneysel ve sayısal derin çekme analizinin karşılaştırılması



Şekil 4.2.2. a) 0° , b) $7,5^\circ$, c) $12,5^\circ$, d) 20° kalıp açılarında 72 mm başlangıç çapındaki MART1400 çeliği için sayısal derin çekme sonuçları



Şekil 4.2.3. a) 0°, b) 7,5°, c) 12,5°, d) 20° kalıp açılarında DP800 çeliği için deneysel ve sayısal derin çekme analizinin karşılaştırılması

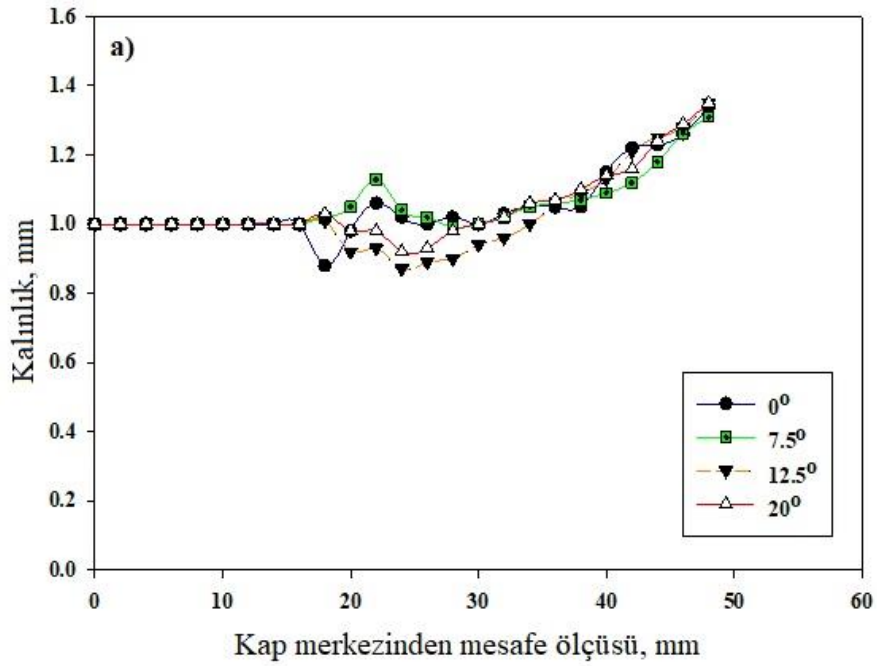


Şekil 4.2.4. a) 0°, b) 7,5°, c) 12,5°, d) 20° DP800 çeliği için sayısal derin çekme sonuçları, ölçüler mm cinsindendir

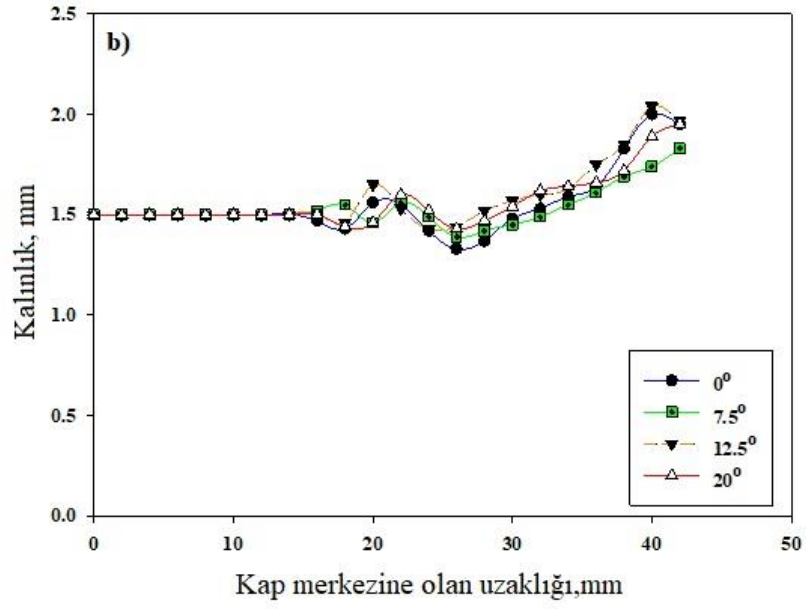
4.3. AÇILI KALIPLARDA DERİN ÇEKME YÖNTEMİNİN DUVAR KALINLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Başarılı bir şekilde işlemenin anahtar parametrelerinden biri, şekillendirilen ürünlerde üniform bir kalınlık değişimi elde etmektir. Derin çekme ile şekillendirme yönteminde kap köşesine yakın bölgeler aşırı incelmeye en duyarlı (yatkın) bölgelerdir. Bu nedenle, çoğu derin çekme işleminde, kap köşe çevresinde hatalar meydana gelir. Kap flanş bölgeleri ise, derin çekme işlemi sırasında sac flanşın çevresi etrafında basınç gerilmelerinin oluşması nedeniyle kalınlık artışına karşı duyarlıdır. Farklı kalıp açılarında derin çekilmiş DP800 ve MART1400 kapları boyunca kalınlık değişimi sırasıyla Şekil

4.3.1 ve Şekil 4.3.2’te gösterilmiştir. Her iki çelikte de en yüksek kalınlık azalması zımba köşe bölgesinde (15mm-30mm) meydana gelmiştir. DP800 çeliği için gözlemlenen en düşük kalınlıklar 0° , $7,5^\circ$, $12,5^\circ$, 20° kalıp açıları için sırasıyla 0,88, 0,99, 0,87, 0,92 mm olmuştur. MART1400 çeliği için gözlemlenen en düşük kalınlıklar 0° , $7,5^\circ$, $12,5^\circ$, 20° kalıp açıları için sırasıyla 1,33, 1,39, 1,43, ve 1,43 mm olmuştur. Her bir kalıp açısında her iki çelik türü için yan duvar bölgesindeki kalınlıkta monotonik bir artış gözlemlenmiştir. Bu nedenle, farklı kalıp açılarında derin çekme işleminde, her iki çelik tipinde de kalınlık değişimlerinde önemli bir fark görülmemiştir. Küçük varyasyonlar, sacın kalıp yüzeyine, doğru hizalanmaması gibi deneysel hatalardan kaynaklanmış olabilir.



Şekil 4.3.1. Farklı kalıp açılarında derin çekilmiş DP800 kapları boyunca kalınlık değişimi



Şekil 4.3.2. Farklı kalıp açılarında derin çekilmiş MART1400 kapları boyunca kalınlık değişimi

5. SONUÇ

Bu çalışmada DP800 ve MART1400 AHSS'lerin DÇO'larını iyileştirmek için farklı kalıp açılarında (0° , 7.5° , 12.5° ve 20°) deneysel ve sayısal derin çekme testleri yapılmıştır. Araştırmadan çıkarılabilecek başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- MART1400 çeliğinin farklı kalıp açılarında yapılan derin çekme testlerinde DÇO açısından herhangi bir gelişme gözlenmemiştir. Elde edilen maksimum DÇO, her kalıp açısı kurulumunda 1,98 olmuştur.
- DP800 çeliğinin farklı kalıp açılarında yapılan derin çekme testlerinde, 20° kalıp açısı kurulumunda diğer kalıp açısı kurulumlarına kıyasla DÇO'da sadece %2,46 civarında hafif bir artış gözlemlendi. 0° , 7.5° , 12.5° kalıp açılarında elde edilen maksimum DÇO 2,12 olurken, 20° kalıp açısında 2,18 olmuştur.
- Keeler FLD kriterleri ile teşhis edilen FEA modeli, kırılma konumunu (kap köşe bölgesi) doğru bir şekilde yakalayabilmiştir ve her bir çelik türü için DÇO'ları yakından tahmin etmiştir.
- DP800 ve MART1400 çelikleri için her bir kalıp açısı kurulumunda benzer bir kalınlık değişimi gözlenmiştir.
- Düşük kalıp açısı aralıkları (0° - 20°) için açılı bir kalıbın kullanılmasıyla kap yan duvarlarındaki mukavemet sertleşme miktarının azalmasının, MART1400 ve DP800 çeliklerinin DÇO'larında bir iyileşmeye neden olacak kadar küçültüldüğü varsayılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- [1] Ö. N. Cora & M. Koç, “Promises and problems of ultra/advanced high strength steel (u/ahss) utilization in automotive industry.” *7th Automot Technol Congress* (OTEKON 2014), ss. 1-8 2014.
- [2] M. Y. Demeri, “Advanced high-strength steels: science, technology, and applications.” *Ohio:ASM International*, ss. 301, 2013.
- [3] P. K. Mallick, “Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles materials.” *Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. Woodhead Publishing Limited*, ss. 1-369, 2010.
- [4] R. R. U. Queiroz, F. G. G. Cunha, & B. M. Gonzalez, “Study of dynamic strain aging in dual phase steel.” *Materials Science and Engineering: A*, c. 543, ss. 84-87, 2012.
- [5] B. Bayramin, C. Şimşir, & M. Efe, “Dynamic strain aging in dp steels at forming relevant strain rates and temperatures.” *Mater Sci Eng A*. c. 704, ss. 164-72, 2017.
- [6] T. Senuma, “Physical metallurgy of modern high strength steel sheets.” c. 41, sayı 6, ss.520-532, 2001.
- [7] S. Keeler, M. Kimchi, & P. J. Mooney, “Advanced high-strength steels guidelines.” *Version 6.0. WorldAutoSteel*, Aralık, 2017. [Online]. Erişim: <https://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>
- [8] H. Mohrbacher, “Martensitic automotive steel sheet - fundamentals and metallurgical optimization strategies.” *Advanced Materials Research*, c. 1063, ss 130-142, 2014.
- [9] Y. Sun, K. Wang, D. J. Politis, G. Chen, & L.Wang, “An experimental investigation on the ductility and post-form strength of a martensitic steel in a novel warm stamping process.” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 275, s. 116387, 2020.
- [10] E. Kayhan, & B. Kaftanoglu, “Experimental investigation of non-isothermal deep drawing of dp600 steel.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 99, sayı 1-4, ss. 695-706, 2018.
- [11] İ. Karaağaç, T. Önel, & O. Uluer, “The effects of local heating on springback behaviour in v bending of galvanized DP600 sheet.” *Ironmaking & Steelmaking*, c. 47, sayı 7, ss. 807-813, 2020.
- [12] N. Şen, “Experimental investigation of the formability of ultrahigh-strength sheet material using local heat treatment.” *Ironmaking & Steelmaking*, c. 47, sayı 2, ss. 93-99, 2020.
- [13] N. Şen, & T. Civek, “Detailed deformation behaviour analysis of dp steels at warm forming temperatures via warm tensile tests detailed deformation behaviour

analysis of dp steels at warm forming temperatures via warm tensile tests.” *Ironmaking & Steelmaking*, ss. 1-11, 2022.

- [14] Y. Arslan, & İ. Karacağağ, “V bükmede geri esneme davranışları.” *Gazi Üniversitesi Fen Bilim Derg.* c. 3, ss 255-63, 2014.
- [15] G. Küçüktürk, M. Tahta, H. Gürün, & İ. Karağağ, “Evaluation of the effects of local heating on springback behaviour for ahss docol 1400 sheet metal.” c. 3, ss. 51-62, 2022, [Online]. Erişim: <https://doi.org/10.21278/TOF.463037821>
- [16] Y. Abe, T. Ohmi, K. Mori, & T. Masuda, “Journal of materials processing technology improvement of formability in deep drawing of ultra-high strength steel sheets by coating of die.” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 214 sayı 9, ss. 1838-1843, 2014.
- [17] N. Şen, Ş. Şirin, T. Kırak, T. Civek, & Ö. Seçgin, “A new lubrication approach in the spif process: Evaluation of the applicability and tribological performance of mql.” *Tribology International*, c. 171, sayı 107546, 2022.
- [18] N. Şen, N. Kurgan, İ. Karağağ, & O. Uluer, “İlk derin çekme prosesinde yağlayıcı etkisinin şekillendirilebilirlik açısından deneysel araştırılması.” *Politeknik Dergisi*, c. 19, sayı 2, ss. 185-193, 2016.
- [19] M. Azuma, S. Goutianos, N. Hansen, G. Winther, & X. Huang, “Effect of hardness of martensite and ferrite on void formation in dual phase steel”. *Materials Science and Technology*, c.28 sayı 9-10, ss. 1092-1100, 2012.
- [20] W. Wang, & X. Wei. “The effect of martensite volume and distribution on shear fracture propagation of 600-1000 MPa dual phase sheet steels in the process of deep drawing.” *International Journal Mechanical Sciences*, c. 67, ss. 100-107, 2013.
- [21] M. Manoochehri, & F. Kolahan, “Integration of artificial neural network and simulated annealing algorithm to optimize deep drawing process.” *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, c. 73, sayı 1-4, ss. 241-249, 2014.
- [22] M. Hassan, L. Hezam, M. El-Sebaie, & J. Purbolaksono, “Deep drawing characteristics of square cups through conical dies”. *Procedia Engineering*, c. 81, ss. 873-880, Ekim, 2014.
- [23] V. Taşdemir, “Derin çekme işlemi üzerine kalıp geometrisinin etkisinin sonlu elemanlar analizi.” *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 16, sayı 1, ss. 43-47, 2013.
- [24] C. Özek, & V. Taşdemir, “AA 5754-O alaşımının ilk derin çekilmesi üzerine kalıp yüzey açısı ve baskı plakası kuvvetinin etkisinin deneysel araştırılması.” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 32, sayı 1, ss. 193-201, 2017.
- [25] C. Loganathan, & R. Narayanasamy, “Wrinkling behaviour of different grades of annealed commercially pure aluminium sheets when drawing through a conical die.” *Materials & Design*, c. 29, sayı 3, ss. 662-700, 2008.
- [26] R. Narayanasamy, & R. Sowerby, “Wrinkling of sheet metals when drawing through a conical die.” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 41, sayı 3, ss. 275-290, 1994.

- [27] V. Savaş, & O. Secgin, "A new type of deep drawing die design and experimental results." *Materials & Design*, c. 28, sayı 4, ss. 1330-1333, 2007.
- [28] C. Ozek, & H. Akkelek, "Investigation of deep drawability of rectangular shaped cups in deep drawing dies". *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, c. 5, sayı 2, 2021.
- [29] O. Çavuşoğlu, H. Gürün. "Deformasyon hızının dp600 ve dp780 sac malzemelerin mekanik özelliklerine ve derin çekme işlemine etkisinin incelenmesi." *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 29, sayı 4, ss. 777-784, 2014,
- [30] E. Kaya, "Dp500 ve dp600 sac malzemelerin derin çekilebilirliğinin incelenmesi." Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, 2011.
- [31] N. Şen, "DP600 malzemelerin değişken baskı plakası kuvveti etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılması." *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, ss. 1295-1304, 2018.
- [32] H. Aydın, O. Tuncel, M. Karpuz, & Ö. Aydın, "Otomotiv endüstrisinde kullanılan dp450 ve dp800 saçlarında deformasyon hızının ve haddeleme yönünün çekme özelliklerine etkisi". *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* c. 21, sayı 1, ss. 323-335, 2019.
- [33] E. Kayhan, & B. Kaftanoğlu, "Yüksek mukavemet çeliklerinin derin çekme oranlarının geliştirilmesi için yapılan deneysel çalışmalar." *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, c. 14, sayı 2, ss. 77-87, 2016.
- [34] E. Kara, Ç. Karataş, & S. Z. Mutlu, "The study of the effect of the mould parameters on the moulding force in the deep drawing process of dp600 material." *The International Journal of Energy & Engineering Sciences*, c. 1, sayı 3, ss. 14-22, 2016.
- [35] T. Pepelniak, & B. Kaftanoğlu, "Finite element analysis of non-isothermal warm deep drawing of dual phase steel." *MATEC Web of Conferences*, DOI:10.1051/mateconf/20168014003, c. 80, sayı, 14003, 2016.
- [36] E. Salamcı, & F. Kabakçı. "Çift fazlı çeliğin çekme özelliklerine mikroyapının etkisi." *Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, c. 26, sayı 2, ss. 263-272, 2011.
- [37] H. Schmid, & M. Merklein, "Effect on the mechanical properties of sheet metals after the use of drawbeads in deep drawing." *Institute of Manufacturing Technology, Friedrich Alexander University Erlangen*, ss.11-13, 91058, MATEC Web of Conferences, c. 190, sayı 05001, 2018.
- [38] C. Özek, & V. Taşdemir, "Derin çekme işlemi sonrası malzemede oluşan sertlik dağılımı üzerine kalıp yüzey açısı, sıcaklık ve baskı plakası kuvveti etkilerinin incelenmesi." *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, c 6-3, ss. 35-41, 2018.
- [39] S. Yalçın, & B. Kaftanoğlu. "Derin çekme işlemlerinde plastik buruşma analizi ve modellemesi." *Makine Tasarım İmalat Dergisi*, c. 12, sayı 1, ss. 10-17, 2011.
- [40] Ö. Seçgin, "Dkp sac çeliğinin derin çekilmesinde matris yüzey açısı değişiminin araştırılması." Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, 2005.

- [41] E. Ünal, “Kare kesitli kapların derin çekilmesinde kalıp geometrisi ve radyüsünün çekme oranına etkisinin araştırılması”. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, 2011.
- [42] F. Aytaç, “Matris açılı derin çekme kalıplarında alüminyumun derin çekilmesinde açı değişiminin çekme oranı üzerine etkisinin deneysel araştırılması”. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, 2007.
- [43] H. Akkelek, “Açılı derin çekme kalıplarında dikdörtgen Kesitli Kalıpların Çekilebilirliğinin Araştırılması”. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2022.
- [44] M. Bal, “Açılı derin çekme kalıplarında matris ve zımba radyüsünün çekme oranına etkisinin araştırılması.” Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Fırat Üniversitesi, 2007.
- [45] O. Koçar, “Derin çekme işleminde ürün kalitesinin tahmini ve kontrolü.” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi, 2014
- [46] M. Bal, & C. Özek, “Derin çekme kalıplarında matris-zımba radyüsü ve çekme oranının et kalınlığı üzerindeki etkisi.” Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, c. 24, sayı 1, ss. 33-41, 2009.
- [47] H. Yıldız, & O. Kırılı, “Derin çekme işleminin doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi.” Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 10, sayı 3, ss. 317-326, 2004.
- [48] O. Yıldırım, & H. Darandeliler, “Derin çekme işleminde eksenel simetrik ve kare taslakların deneysel ve sayısal incelenmesi.” Araştırma, Geliştirme ve Uygulama Makaleleri, Makine Tasarım ve İmalat Dergisi, c. 3, sayı 3, ss. 103-110, 1997.
- [49] İ. Karacaagaç, & A. Özdemir, “Erdemir 6112 sac malzemenin hidromekanik derin çekme yöntemiyle şekillendirilebilirliği.” Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Der, c. 26, sayı 4, ss. 841-850, 2011.
- [50] H. Ballıkaya, “Matris açılı derin çekme kalıplama yönteminin hidromekanik derin çekme yöntemine uygulanması.” Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, 2017.
- [51] N. Şen, & N. KURGAN. “Sac metal malzemelerin ılık derin çekme yöntemiyle şekillendirme prosesinde malzeme karakterizasyonu” Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, c. 3, ss. 663-674, 2015.
- [52] S. K. Akay, “Otomotiv endüstrisinde kullanılan çift fazlı çeliklerin fiziksel özelliklerinin araştırılması.” Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, 2005.
- [53] T. Civek, “Yüksek ve ultra yüksek mukavemetli çeliklerin ılık şekillendirme sıcaklıklarındaki deformasyon davranışlarının karakterize edilmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, 2022.
- [54] K. Aydın, “Otomotiv sektöründe kullanılan yeni nesil yüksek dayanımlı çeliklerin direnç nokta kaynağı uygulamaları ve kaynak bölgesi karakterizasyonu”. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, 2023.
- [55] Y. Şen, “Dp600, dp800, ms1200, ms1400 tipi yüksek mukavemetli sacların cmt kaynak yöntemiyle birleştirilmesi ve mekanik/mikroyapı özelliklerinin incelenmesi.” Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, 2019.

- [56] S. Ulu, “Çift fazlı çelikler”. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, c. 6, sayı 3, ss. 100-103, 2009.
- [57] İ. Günel, “Martensitik faz dönüşümleri için mikromekanik temelli bir model.” Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, 2012.
- [58] G. Uysal, “Otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli sacların şekillendirilebilme özelliklerinin incelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, 2006.
- [59] E. Coruk, “Advanced identification of flow curve paramaters in tension test”. A master’s Thesis, Atılım University, 2011.
- [60] N. Şen, & N. Kurgan, “Sac Metal Malzemelerin Ilık Derin Çekme Yöntemiyle Şekillendirme Prosesinde Malzeme Karakterizasyonu”. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, c. 3, ss. 663-674, 2015.
- [61] N. Şen, “Yüksek mukavemetli çelik sacların flanş bölgesinin ısıtılması ile derin çekme sınır oranının deneysel incelenmesi.” Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, 2015.
- [62] V. Taşdemir, “Açılı derin çekme kalıplarında sıcaklığın limit çekme oranına etkisinin araştırılması.” Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, 2016.
- [63] M. Aghaie-Khafri, R. Mahmudi, & H. Pishbin, “Role of yield criteria and hardening laws in the prediction of forming limit diagrams”. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci. C.* 33, sayı 5, ss.1363-1371, 2002.
- [64] J. H. Sung, J. H. Kim, R. H. Wagoner, “A plastic constitutive equation incorporating strain, strain-rate, and temperature”. *International Journal of Plasticity*, c. 26, sayı 12, ss. 1746-1771, 2010.
- [65] H. Ballikaya, V. Savas, & C. Ozay, “The limit drawing ratio in die angled hydromechanical deep drawing method.” *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, c. 106, sayı 1-2, ss. 791-801, 2020.
- [66] A. A. Dhaiban, M. E. Soliman, & M. G. El-Sebaie, “Finite element modeling and experimental results of brass elliptic cups using a new deep drawing process through conical dies.” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 214, sayı 4, ss. 828-838, 2014.
- [67] L. M. A. Hezam, M. A. Hassan, I. M. Hassab-Allah, M. G. El-Sebaie, “Development of a new process for producing deep square cups through conical dies.” *The International Journal Advanced Manufacturing Technology*, c. 49, sayı 10, ss. 773-780, 2009.

7. ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ezgi TÖNGÜ

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Makine Müh.	Düzce Üniversitesi	2023
Lisans	Makine Müh.	Düzce Üniversitesi	2018
Lise	Yok	Bolu Anadolu Lisesi	2014

YAYINLAR

- [1] N. Şen, T. Civek, & E. Töngü, “Assessment of conical die deep drawability of dp800 and mart1400 advanced high strength steels” *International Journal Of Automotive Science And Technology*, c. 7/2, ss. 104-111, 2023.