

T.C.
NIĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DP600 ÇELİKLERİN ŞEKİLLENDİRME HIZI VE SAC KALINLIĞINA BAĞLI
OLARAK ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMLARININ İNCELENMESİ

EMRAH UYSAL

Mayıs, 2011

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DP600 ÇELİKLERİN ŞEKİLLENDİRME HIZI VE SAC KALINLIĞINA BAĞLI
OLARAK ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMLARININ İNCELENMESİ

EMRAH UYSAL

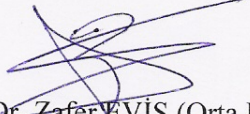
Yüksek Lisans Tezi

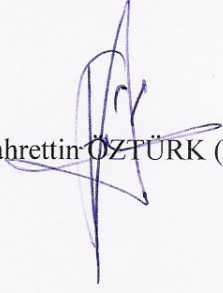
Danışman

Doç. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

Mayıs, 2011

Doç. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK danışmanlığında **Emrah UYSAL** tarafından hazırlanan “**DP600 Çeliklerin Şekillendirme Hızı ve Sac Kalınlığına Bağlı Olarak Şekillendirme Sınır Diyagramlarının İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Başkan : Doç. Dr. Zafer EVİS (Orta Doğu Teknik Üniversitesi)


Üye : Doç. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK (Niğde Üniversitesi)


Üye : Yrd. Doç. Dr. Aytekin POLAT (Niğde Üniversitesi)

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../201..

Doç. Dr. Nurettin ACIR
Enstitü Müdürü

ÖZET

DP600 ÇELİKLERİN ŞEKİLLENDİRME HIZI VE SAC KALINLIĞINA BAĞLI OLARAK ŞEKİLLENDİRME SINIR DİYAGRAMLARININ İNCELENMESİ

UYSAL, Emrah

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:

Doç. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

Mayıs 2011, 45 sayfa

Son yıllarda otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımında hızlı bir artış görülmektedir. Bu çelikler arasında da yüksek mukavemet ve iyi şekillenebilirlik özelliklerinden dolayı iki fazlı çelikler çok fazla ilgi görmektedir. Bu tez çalışmasında 25-1000 mm/dk hız aralığında DP600 sacların şekillendirme sınır diyagramları incelenmiştir. Ayrıca 25 mm/dk hızda sac kalınlığının şekillendirme sınır diyagramına etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak belirlenen hız aralığında şekillendirme sınır diyagramlarının birbirine çok yakın olduğu, farklılık göstermediği belirlenmiştir. Sac kalınlığındaki 1 mm'lik artışın yaklaşık olarak düzlem birim deformasyon değerini % 10 artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İki fazlı çelik, DP çelik, DP600, Şekillendirme sınır diyagramı, ŞSD, Şekillendirme hızı.

SUMMARY

INVESTIGATION OF FORMING LIMIT DIAGRAM FOR DP600 STEELS BASED ON DEFORMATION SPEED AND SHEET THICKNESS

UYSAL, Emrah

Niğde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK

May 2011, 45 Pages

In recent years, the use of advanced high strength steels in automotive industry has been increased remarkably. From advanced high strength steels, dual-phase (DP) steels have gained a great attention due to a combination of high strength and good formability. In this thesis study, the effect of deformation speed on forming limit diagram of DP600 steel is investigated in a deformation speed range of 25-1000 mm/min. In addition to the deformation speed, the thickness of the sheet on forming limit diagram is also researched. As a result, no significant deformation speed effect on forming limit diagram is observed at the prescribed test ranges. It is found that the plane strain deformation is increased about 10 % for every 1 mm thickness increase.

Keywords: Dual phase steel, DP steel, DP600, Forming limit diagram, FLD, Deformation speed.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 109M032 numaralı proje kapsamında Doç. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK 'ün danışmanlığında gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmaları kapsamında bir adet uluslar arası hakemli dergilerde (SCI) ve bir adet de ulusal bildiri olmak üzere iki adet bilimsel yayın yapılmıştır. Ayrıca ulusal konferansta bir adet bildiri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında DP600 çelik malzemenin farklı şekillendirme hızı ve sac kalınlığına bağlı olarak şekillendirme sınır diyagramları elde edilmiştir. Başta otomotiv olmak üzere bir çok sektörde kullanımı hızla artan çift fazlı (DP) çeliklerin şekillendirme sınır diyagramlarının simülasyonlarda ve gerçek sanayi uygulamalarında kullanılması için tespiti oldukça büyük öneme sahiptir. Bu diyagramların tespiti şekillendirme sırasında oluşabilecek hataları en aza indirmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanma sırasında kıymetli bilgilerinden beni mahrum bırakmayan, akademik camiadaki tecrübelerini paylaşarak bana yol gösteren, geleceğim için örnek aldığım değerli danışman hocam Doç. Dr. Fahrettin ÖZTÜRK 'e, proje kapsamında bu çalışmayı destekleyen TUBİTAK 'a, tez çalışmaları sırasında yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen Arş. Gör. Serkan TOROS 'a, Arş. Gör. Emre ESENER 'e, Mak. Müh. Remzi Ecmel ECE 'ye, benim bu günlere gelmemi sağlayan maddi-manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen babam ve annem Mustafa ve Emine UYSAL' a, her zaman güvenlerini ve desteklerini hissettiren ağabeyim ve yengem Hüseyin ve Melek UYSAL'a, en zor zamanlarımda bana huzur veren ve neşe katan biricik yeğenim Efe UYSAL' a ve son olarak destekleri için arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
ÖNSÖZ	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	x
KISALTMA ve SİMGELER	xi
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Şekillendirme Sınır Diyagramları	5
BÖLÜM II DENEYSEL ÇALIŞMALAR	9
2.1 Malzemeler	9
2.2 Deneysel Numunelerinin Hazırlanması	9
2.3 Deneysel Altyapı	11
2.4 Şekillendirme Sınır Diyagramı Deneyleri	14
BÖLÜM III DENEYSEL VERİLERİN İŞLENMESİ	16
3.1. Çekme Deneyi Verilerinin İşlenmesi	16
3.2. Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Belirlenmesi	17
BÖLÜM IV DENEYSEL SONUÇLAR	22
4.1. Çekme Deneyleri	22
4.2 Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD) Deneyleri	25
4.3. Farklı Kalınlıklardaki DP600 Çeliğinin Şekillendirme Sınır Diyagramları	35
BÖLÜM V SONUÇ	40
KAYNAKLAR	42

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1	Çift fazlı çeliklerin kimyasal bileşimi	5
Çizelge 3.1	Deformasyona uğramış gridlerin farklı yöntemlerle ölçülmesi	18
Çizelge 4.1	DP 600 malzemenin farklı hızlardaki mekanik özellikleri	22

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	ULSAB-AVC PNGV-Sınıf konsept tasarımında parçalar ve malzemeleri.....	1
Şekil 1.2	GM firması öngörülerine göre yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı	2
Şekil 1.3	Şekillendirme sınır diyagramı	6
Şekil 2.1	ASTM E8 standardına göre çekme testi numunesi	9
Şekil 2.2	Şekillendirme sınır diyagramı deney numuneleri boyutları	10
Şekil 2.3	Video tip extensometre ile ölçüm	12
Şekil 2.4	Şekillendirme sınır diyagramı testinin şematik görüntüsü	14
Şekil 3.1	Farklı grid geometrileri	18
Şekil 4.1	Farklı deformasyon hızlarında DP600 malzemenin gerçek gerilme – gerçek birim deformasyon grafiği	23
Şekil 4.2	Jump test sonrasında 5-500 mm/dk aralığında elde edilen gerçek gerilme - gerçek birim deformasyon grafiği	23
Şekil 4.3	25 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilmiş numunelerin kuvvet - LDH değişimleri	25
Şekil 4.4	100 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilmiş numunelerin kuvvet - LDH değişimleri	26
Şekil 4.5	250 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilmiş numunelerin kuvvet - LDH değişimleri	26
Şekil 4.6	500 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilmiş numunelerin kuvvet - LDH değişimleri	27
Şekil 4.7	75 mm genişliğindeki numunenin farklı deformasyon hızlarına göre LDH – kuvvet değişimi grafiklerinin karşılaştırılması	27
Şekil 4.8	Farklı deformasyon hızlarındaki ŞSD grafiklerinin karşılaştırılması	31
Şekil 4.9	Farklı hızlarda çekilen DP600 numunelerin ileri uniform uzama grafikleri	33
Şekil 4.10	Farklı kalınlıklarda şekillendirilen numunelerin ŞSD grafikleri	37
Şekil 4.11	Farklı kalınlıklardaki malzemeler için Keeler modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırması	38

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 1.1	Büyük ve küçük birim şekil değişiminin deney malzemesi üzerinde gösterimi	7
Fotoğraf 2.1	(a) Çekme cihazı ve (b) deney numunesinin bağlanmış görüntüsü	11
Fotoğraf 2.2	(a) Metal şekillendirme test sistemi ve (b) kalıpları	13
Fotoğraf 2.3	(a) ASAME ve (b) GPA grid ölçüm sistemleri	13
Fotoğraf 2.4	Şekillendirilmiş örnek parçalar	15
Fotoğraf 3.1	Referans küpü	19
Fotoğraf 3.2	ASAME Target Model	19
Fotoğraf 3.3	ASAME yazılımında grid ölçümü	20
Fotoğraf 3.4	Ölçüm yapılan farklı bölgeler. (a) arka bölge (b) boyun verme bölgesi (c) kırılmaya sınır bölge	21
Fotoğraf 4.1	25 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği	28
Fotoğraf 4.2	100 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği	29
Fotoğraf 4.3	250 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği	29
Fotoğraf 4.4	500 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği	30
Fotoğraf 4.5	750 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği	30
Fotoğraf 4.6	1000 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği	31
Fotoğraf 4.7	Farklı hızlarda şekillendirilen ŞSD numunelerinin kırılma fotoğrafları	34
Fotoğraf 4.8	25 mm/dk hızda şekillendirilmiş 0.8 mm kalınlığındaki numunenin ŞSD grafiği	35
Fotoğraf 4.9	25 mm/dk hızda şekillendirilmiş 1.3 mm kalınlığındaki numunenin ŞSD grafiği	36
Fotoğraf 4.10	25 mm/dk hızda şekillendirilmiş 0.8 mm kalınlığındaki numunenin ŞSD grafiği	36

KISALTMA VE SİMGELER

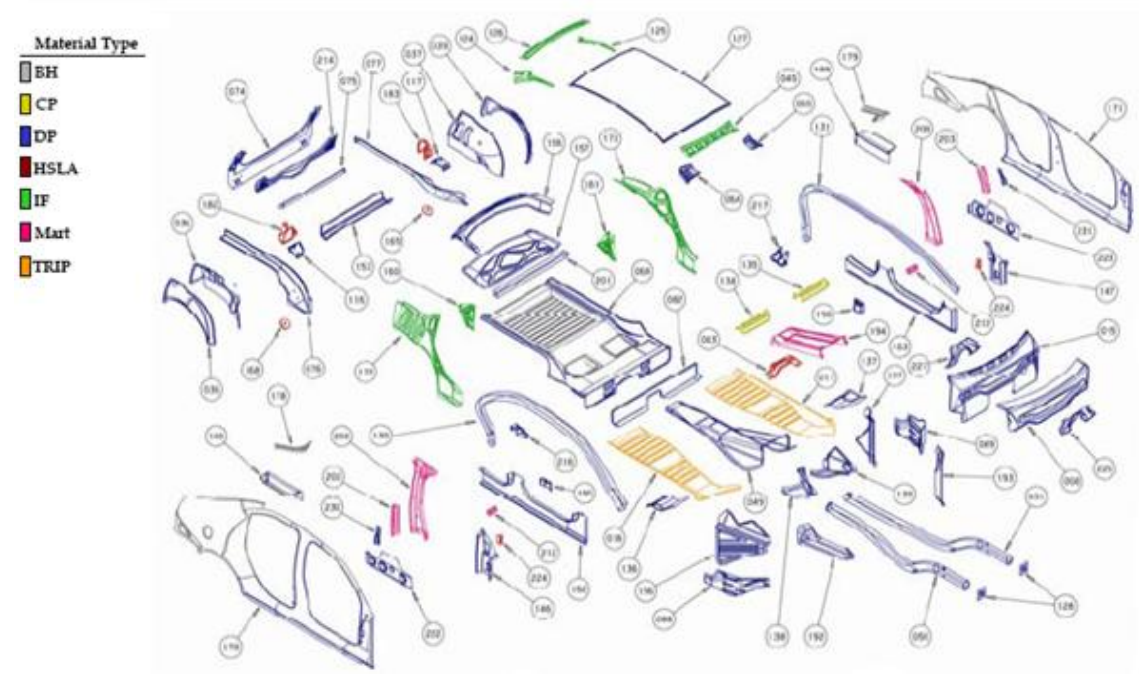
Al:	Alüminyum
Mg:	Magnezyum
Li:	Lityum
Ti:	Titanyum
Be:	Berilyum
GM:	General Motors
DP:	Çift fazlı
TRIP:	Üç fazlı
HSLA:	Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı
MHO:	Martenzit hacim oranı
SEM:	Taramalı elektron mikroskobu
FLD:	Şekillendirme sınır diyagramı (Forming limit diagram)
ŞSD:	Şekillendirme sınır diyagramı
n:	Pekleşme üsteli
σ :	Gerilme
K:	Mukavemet katsayısı
ϵ :	Birim şekil değiştirme
ρ :	1 ve 2 yönündeki birim şekil değiştirme oranları
t:	Kalınlık
MTS:	Mekanik Test Sistemi
F:	Kuvvet
A:	Alan
L:	Uzunluk
m:	Deformasyon oranı hassasiyeti
LDH:	Sınır kubbe yüksekliği
δ :	İleri üniform uzama

BÖLÜM I

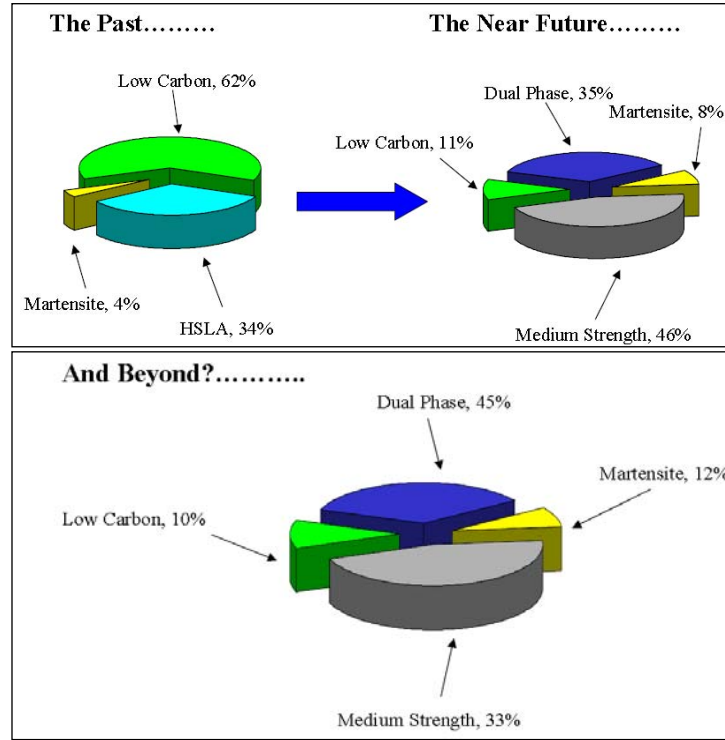
GİRİŞ

Son yıllarda sınırlı olan enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak ve artan çevre kirliliğini önlemek; üretim, işçilik ve ulaşım gibi zamanla artan maliyetleri düşürebilmek için yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların başında enerji tüketimini ve çevre kirliliğini azaltan hafif metaller üzerine yapılan çalışmalar önemli bir yer tutmaktadır. Al, Mg, Li, Ti, Be ve alaşımları, iki ve üç fazlı çelikler, kompozit malzemeler hafif malzemeler olarak değerlendirilmektedir. Otomotiv endüstrisinde araçların hafifletilmesi üzerine yapılan çalışmalara hız verilmiştir.

Şekil 1.1’de parçalarına ayrılmış en son ULSAB-AVC PNGV-Sınıf konsept tasarımının birebir hangi malzemelerden üretildiğini gösteren şekil yer almaktadır. Şekilde görüldüğü üzere yüksek mukavemetli çeliklerden çift fazlı (DP) çelikler oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir.



Şekil 1.1 ULSAB-AVC PNGV-Sınıf konsept tasarımında parçalar ve malzemeleri [1]
Şekil 1.2’de otomotiv endüstrisinde kullanılan bazı çelik türlerinin dün, bugün ve gelecekteki durumunu gösteren bir grafik verilmiştir.



Şekil 1.2 GM firması öngörülerine göre yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı [2]

Grafiklerden anlaşılacağı üzere dünyada yüksek mukavemetli çeliklerin araçlardaki kullanım alanının artırılması yönündeki çalışmalara hız verilmiştir.

Bu yüksek mukavemetli çeliklerin başında çift (DP) ve üç (TRIP) fazlı çelikler gelmektedir. Bu çeliklerin daha az kalınlıklarından imal edilmiş konstrüksiyonların gereken mukavemet değerlerini sağladığı görülmüştür. Böylece araç gövdesi aynı veya daha mukavemetli olmakta ve önemli ölçüde hafiflemektedir. Bu çelikler ayrıca araç gövdesinde kazalar neticesinde oluşabilecek deformasyonları en iyi şekilde karşılayabilme özelliğine de sahiptir [3,4]. Burada DP çelikler yumuşak ferrit ve sert martenzit yapıdan oluşan düşük karbonlu çeliklerdir. TRIP çelikler ise ferrit matrisleri boyunca tutulmuş ostenit ve küçük miktarda beynit ihtiva etmektedir. Bu çelikler aynı çekme dayanımına sahip diğer çeliklere göre daha iyi şekillendirilebilme ve uzama özelliklerine sahiptir [5]. Literatürde de bu yeni nesil çeliklerin mekanik davranışlarının belirlenmesi üzerine yoğun bir çalışma başlamış, söz konusu olan özelliklerin, özellikle şekillendirilebilme kabiliyetleri üzerindeki etkileri incelenmektedir. Yapılan çalışmalarda, otomotiv gövdesinde oldukça yaygın kullanılan TRIP ve DP çeliklerin dinamik çekme karakterleri incelenmiş ve sonuç olarak da artan deformasyon oranı ile

gerilme değerinde artış, uzama miktarında ise hafif bir azalma gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra DP çeliklerin deformasyon oranı hassasiyetinin TRIP çeliklere nazaran daha yüksek olduğu vurgulanmıştır [6]. Ayrıca TRIP çelikler için benzer bir çalışmada ise deformasyon oranının mekanik özelliklere ve hapsedilmiş ostenitin davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Deformasyon oranının artması ile birlikte uzamada azalma gözlemlenirken yüksek deformasyon oranları altında artan deformasyon, adiyabatik sıcaklıktan dolayı dönüşmüş ostenitin hacim kısmında azalma gözlemlenmiştir [7]. Bu yeni nesil çeliklerin deformasyon kabiliyetleri ve bunlara etki eden parametreler literatürde incelenmiş olmasına karşın yeterli seviyede değildir [3,8]. Çift fazlı (DP) çelikler üretildikleri HSLA (Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşım) ve karbon çelikleri ile kıyaslandığında sürekli akma davranışı, düşük akma dayanımı, yüksek pekleşme hızı, düzgün ve toplam uzama ve düşük akma oranı gibi pek çok şart için ideal olarak ifade edilebilecek özelliklere sahiptir [9-15]. Çift fazlı çeliklerin dayanımları büyük oranda martenzit fazına, süneklik ise ferrit fazının karakterine bağlıdır [15]. Bu çeliklerin üretildikleri çeliklere nazaran mekanik özelliklerinin değişmesinin sebebi, temel olarak martenzit fazının verimliliğine ve bu fazın çevresindeki yoğun hareketli dislokasyonlar gösterilmektedir [16]. Üretim yöntemlerine göre martenzitin yerine ikinci faz olarak yapıda sementit ve beynit bulunabilir. Bu durum malzemedan istenen özellikleri bozacağından dolayı arzu edilmezler [17]. Çift fazlı çeliklerin iç yapısı ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin belirlenmesi ve özel uygulamalarda kullanmak üzere geliştirilmesi için pek çok araştırma yapılmıştır [3-21]. Bununla birlikte çift fazlı çeliklerde martenzit hacim oranı (MHO) ile çekme dayanımı arasındaki ilişki üzerine çalışmalar mevcuttur [22-25]. Chen ve Cheng [22] yaptıkları çalışma sonucunda, ağırlıkça %0,1-%0,14 ve %0,19 oranlarında karbon içeren çelik numunelerin MHO artışıyla çekme dayanımlarının da arttığını tespit etmişlerdir. Bu numunelerin aynı MHO değerinde en yüksek mukavemete, karbon içeriği en fazla olan çeliğin sahip olduğu belirtilmiştir. Acarer [26] tarafından yapılan çalışmada ise, düşük karbonlu çeliklerden olan DIN-EN 360 B (St 37-2) ve DIN-EN 360 D1 (St 37-3) sac malzemelere kritik tavlama-su-buz-tuz ortamında su vererek ferrit+martenzitten oluşan çift fazlı çelik üretmiştir. Ayrıca bu çalışmada üretilen çift fazlı çeliklerin martenzit hacim oranının (MHO-%V) sıcaklığa bağlı olarak değişimi incelenmiş, çekme testleri uygulanmıştır. Sonuç olarak MHO arttıkça akma ve kopma dayanımlarında artış gözlemlenirken uzama değerlerinde düşüş tespit edilmiştir. Alaşım elementi miktarlarının artması MHO ve dayanım değerlerini oldukça arttırmıştır. Kadkhodapour

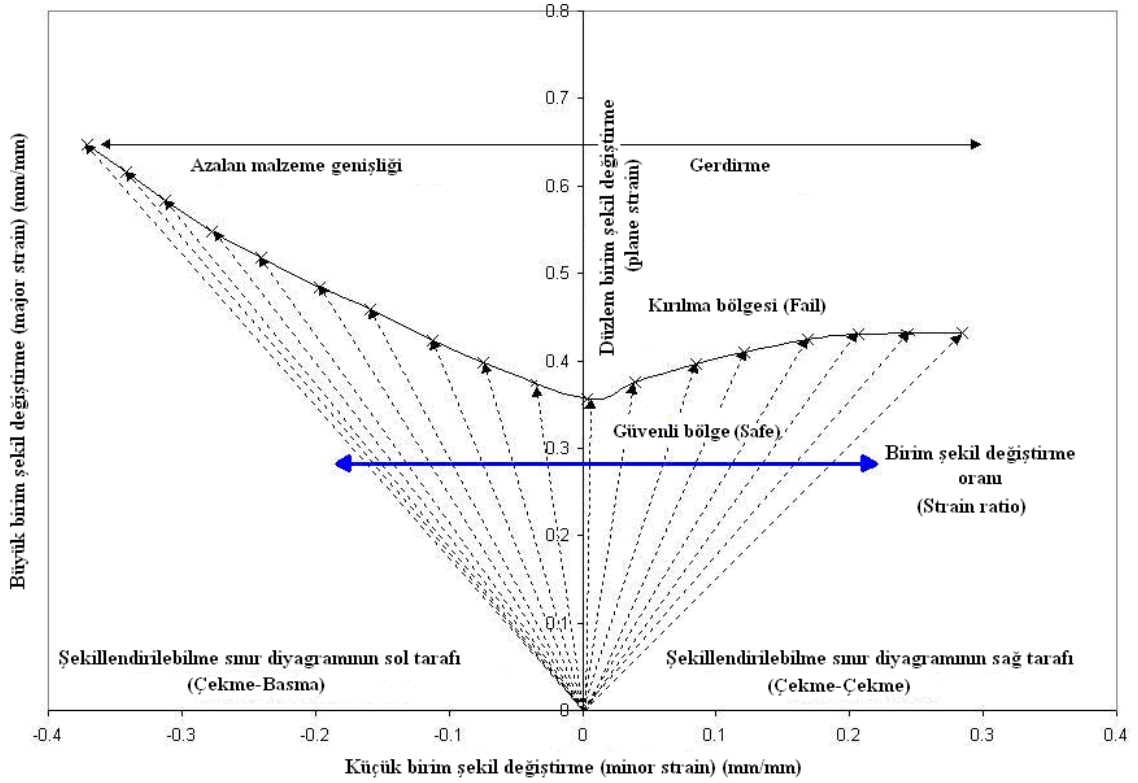
ve arkadaşları [27] çift fazlı çeliklerin uzamaya bağlı olarak mikroyapıları ve hata mekanizmaları üzerine detaylı bir çalışma yapmışlardır. Araştırmalarında martenzit ve ferrit yapılarında şekil değişimi sonucu boşluk oluşumu üzerine yoğunlaşmış ve bu oluşumları incelemek için farklı hızlarda çekme tesleri uygulamışlardır. Yapılan SEM testleri sonucunda, boşluk çekirdeklenmelerinin ferrit fazının martenzit etrafından ayrılması sonucu oluştuğu tespit edilmiştir. Martenzit yapısının ve dağılımının, hasarın yığılmasında güçlü bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Sun ve arkadaşları [28] yaptıkları çalışmada, değişik sınıftaki çift fazlı çeliklerde sünek kırılmaya etki eden anahtar faktörleri mikroyapı temelli modellerle incelemişlerdir. Endüstride kullanılan çift fazlı çelikler ile değişik MHO'ya sahip çeliklerin kırılma durumları karşılaştırılmıştır. Ardından bu modeller ferrit fazının ve bu fazdaki boşlukların malzemenin sünekliğine olan etkisini incelemek için kullanılmıştır. Bulgulara göre, mikroyapıdaki martenzitin kırılma hacmi oranı % 15'den düşük ise, çeliğin ortalama sünekliği güçlü bir şekilde ferrit matriksinin sünekliğine dayanmaktadır. Bu nedenle başlangıçtaki mikro boşluklar çeliğin sünekliğini belirgin olarak azaltmaktadır. Martenzitin kırılma hacmi %15'den fazla olduğunda ise, ferrit matrisindeki başlangıç boşluklarının çift fazlı çeliklerin sünekliğine belirgin bir etkisi olmadığı ve ortalama sünekliğin iki fazın arasındaki mekanik özelliklerin farklılığından daha çok etkilendiği gözlemlenmiştir. Literatürde çift fazlı çeliklerin tavlama ve yaşlandırma özellikleri üzerine de çalışmalar mevcuttur [29-32]. Juan-Juan ve arkadaşları [29] çift fazlı çeliklere aşırı yaşlandırmanın ve vanadyum eklenmesinin mikroyapıya ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda aşırı yaşlandırmanın malzeme özelliklerine çok büyük bir etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Yaşlandırma işlemi düşük sıcaklıklarda yapıldığında (200 - 300 °C) uzama miktarında etkili bir yükseliş görülürken, hem akma hem de kopma dayanımında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda uygulanan yaşlandırma sonucunda ise (>300 °C), uzamada artış görülmezken akma dayanımının arttığı ve kopma dayanımının düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca vanadyum mikro alaşımlandırması ile malzemenin dayanımında ve tavlama kararlılığında belirgin bir gelişme görülmüştür. Son olarak en uygun yaşlandırma sıcaklığı normal malzemelerde 250 °C civarında iken vanadyum eklenmiş çeliklerde 300 °C civarında olduğu belirtilmişlerdir. Çift fazlı çeliklerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 1.1' de verilmiştir.

Çizelge 1.1 Çift fazlı çeliklerin kimyasal bileşimi [33]

Üretim Yöntemi	Bileşim, % ağırlıkça						
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	N
Sürekli tavlama, soğuk haddelenmiş	0.11	1.43	0.61	0.12	0.08	0.06	0.01
Sürekli tavlama, sıcak haddelenmiş	0.11	1.20	0.40	-	-	-	-
Kuru tavlama	0.12	2.10	1.40	-	-	-	-
Haddelenmiş halde	0.06	0.90	1.35	0.50	0.35	-	-

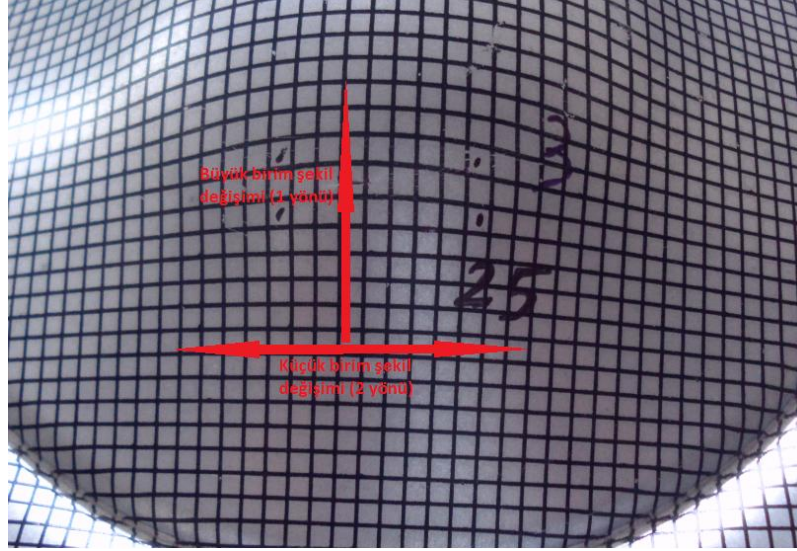
1.1 Şekillendirme Sınır Diyagramları

Sac metal malzemelerin şekillendirilebilirliğinin sınırları genel olarak boyun vermenin (necking) başladığı noktaya göre tayin edilir. Her ne kadar boyun verme sonrasında malzeme hemen kırılmasa da, bu noktadan sonra davranışlar tahmin edilemeyeceğinden dolayı boyun vermenin tespit edildiği birim şekil değiştirme değerleri sınır değer olarak kabul edilmektedir. Malzemenin farklı şekil değiştirme durumlarında şekillendirilebilirlik sınırlarını büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranları cinsinden ifade eden diyagram “Şekillendirme Sınır Diyagramı” (ŞSD) (Forming Limit Diagram, FLD) olarak adlandırılmaktadır. Bu diyagram basit çekme deneyinden başlayarak, düzlem birim şekil değiştirme ve iki eksenli gerdirme hallerinin hepsini ihtiva etmektedir. Şekillendirilebilirlik sınır diyagramları çok yaygın olarak metallerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmede ve şekil verme esnasında ortaya çıkan problemlerin analizi ve çözümlerinde kullanılmaktadırlar. Bir malzemenin şekilendirme sınır diyagramı farklı geometrilerde hazırlanmış sac metal numunelerin üzerlerine özel gridler uygulanarak ve bu gridlerin şekil değiştirmeden sonraki ölçüleri değerlendirilerek elde edilir. Her bir geometri bir şekil değiştirme durumunu ihtiva eder. Şekillendirme sınır diyagramı ile ilgili detaylı bilgiler Ozturk ve Lee [34] tarafından verilmiştir. Şekillendirme sınır diyagramının deneysel olarak elde edilmesi oldukça zaman alıcı ve özel ölçüm sistemleri gerektiren bir çalışmadır. Şekilendirme sınır diyagramı ilk defa 1963 yılında Keeler ve Backofen [35] ve 1968 yılında Goodwin [36] tarafından ortaya atılmıştır. Keeler büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranlarının pozitif olduğu kısmı (şekillendirme sınır diyagramının sağ tarafı) geliştirmiştir. Goodwin ise büyük ve küçük birim şekil değiştirme oranlarının negatif olduğu kısmı (şekillendirme sınır diyagramının sol tarafı) geliştirmiştir. Şekil 1.3’de örnek bir şekillendirme sınır diyagramı görülmektedir.



Şekil 1.3 Şekillendirme sınır diyagramı [34]

Şekil 1.3'de de görüldüğü gibi şekillendirme sınır diyagramları x ekseninde küçük birim şekil değiştirme ve y ekseninde büyük birim şekil değiştirme olmak üzere iki eksenle çizilmektedir. Bu eksenler 1 ve 2 yönündeki şekil değişimlerini ihtiva etmektedir (Şekil 1.4). Grafiğin sol tarafı tek eksenli şekil değişimini ifade eder. Bir başka ifadeyle malzemede sadece 1 yönünde yani büyük birim şekil değişimi yönünde uzama görülürken 2 yönünde daralma meydana gelmektedir. Bir anlamda grafiğin sol tarafı çekme deneyi gibi davranmaktadır. Grafiğin sağ tarafında ise her iki yönde de uzama görülür. Sağ taraf düzlem şekil değişimini ifade eder. Örnek olarak derin çekme işlemindeki malzemenin şekil değişimi davranışı verilebilir. Grafiğin tam orta eksenini, yani küçük birim deformasyonun sıfır olduğu nokta ise tek eksenli şekil değişiminden çift eksenli şekil değişimine geçiş noktasıdır ve malzemede sadece 1 yönünde uzama gerçekleşirken, 2 yönünde yani küçük birim şekil değiştirmede herhangi bir değişiklik olmaz. Bu noktada büyük birim şekil değişimi en küçük değerini alır.



Fotoğraf 1.1 Büyük ve küçük birim şekil değişiminin deney malzemesi üzerinde gösterimi

Şekillendirme sınır diyagramları malzemenin boyun verdiği birim şekil değiştirme oranlarına göre oluşturulmaktadır. Bu diyagramlar her malzeme için deneysel olarak oluşturulmaktadır. Deneyler oldukça fazla zaman aldığından dolayı bu diyagramların analitik olarak oluşturulması için çeşitli modeller de geliştirilmiştir. Bu modeller için pekleşme üsteli (n) kullanarak hesaplama yapılmaktadır. Bu analitik modellerin ilki Hill tarafından oluşturulmuştur [37]. Bu model şekillendirme sınır diyagramının sol tarafının simulasyonunda kullanılır. $\sigma = K\varepsilon^n$ ampirik akma eğrisi denklemi kullanılarak boyun verme için gerekli kritik şart;

$$\varepsilon_1^* = \frac{n}{1 + \rho} \quad (1.1)$$

olarak tespit edilmiştir. Burada n pekleşme katsayısı veya üsteli (strain hardening) olup ρ ise $\frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1}$ oranıdır. (Bu oran 1 ve 2 yönündeki şekil değişimi oranlarını ifade etmektedir.)

Şekillendirilebilirlik sınır diyagramının sağ tarafı ise Swift tarafından geliştirilen analitik modelle tahmin edilebilmektedir [38]. Bu modele göre boyun verme için gerekli kritik şart;

$$\varepsilon_1^* = \frac{2n(1 + \rho + \rho^2)}{(\rho + 1)(2\rho^2 - \rho + 2)} \quad (1.2)$$

Bu modellere ilave olarak malzeme kalınlığının (t) ve pekleşme katsayısının (n) etkileri Keeler ve Braizer [39] tarafından çelik malzemeler için aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Düzlem birim şekil değiştirme (\%)} &= \frac{n}{0,21} (23,3 + 14,1t) \quad n < 0,21 \\ \text{Düzlem birim şekil değiştirme (\%)} &= 23,3 + 14,1t \quad n \geq 0,21 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Eşitlik (3)'deki t 'nin birimi mm dir ve malzeme kalınlığının artması düzlem birim şekil değiştirmesinde ($\varepsilon_2=0$) malzeme şekillendirme sınır diyagramının büyük eksen boyunca büyüyeceğini ifade etmektedir.

Tez çalışması kapsamında DP600 malzemenin farklı hızlardaki ve kalınlıklardaki mekanik özelliklerindeki değişim ve şekillendirme sınır diyagramları incelenmiştir.

Son yıllarda hafif malzemeler üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. İki ve üç fazlı çeliklerde bu grupta değerlendirilmektedir. Bu tez kapsamında çift fazlı çeliklerin farklı deformasyon hızı ve kalınlıklarda şekillendirme sınır diyagramları incelenmiştir. Tez konusu olarak ele alınan malzemeler yeni nesil çelik grubunda yer almakta olup literatürde yeteri kadar çalışma bulunmamaktadır. Ülkemizde ise konuyla ilgili yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır. Tez çalışmasının gerçekleştirilmesi sonucu özellikle otomotiv endüstrisi için önemli veriler elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yazılımlarından gerçek değerlere yakın değerler elde edilmeye başlanılmasıyla birlikte ürünün kalitesinde artış ve maliyetinde de önemli oranda azalma beklenmektedir. Malzemelerin üretimi esnasında karşılaşılan hataların daha çabuk giderilmesi ve fire sayısının azaltılması mümkün olacaktır. Böylece firmanın rekabet gücünde artış olacak ve ülke ekonomisine önemli miktarda katma değer sağlanacaktır. Bilimsel olarak da ülkemizin yeni nesil çelikler konusunda bilgi birikimine katkı sağlamıştır. Üniversite açısından çıktılar değerlendirildiğinde şekillendirme sınır diyagramı konusunda uzmanlaşmış bir grup oluşmuş ve üniversite sanayi işbirliğinin gelişmesi için önemli adımlar atılmıştır.

BÖLÜM II

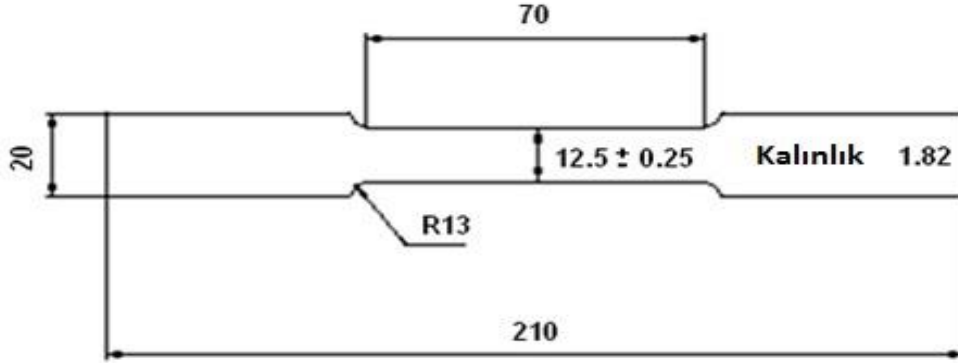
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzemeler

Bu tez kapsamında çift fazlı yeni nesil çeliklerden DP600 kullanılmıştır. Çift fazlı çeliklerin isimlendirilmesinde DP kısaltmasının yanına gelen sayı, o malzemenin toplam mukavemetini yaklaşık olarak nitelendirmektedir. Kullanılan DP600 malzemenin de toplam mukavemeti bu durumda 600 MPa 'dır. Farklı hızlarda yapılan çekme ve ŞSD deneyleri için malzeme kalınlığı olarak ise, yapılan incelemeler sonucu otomotiv endüstrisinde en sık kullanılan 1,3 mm seçilmiştir. Diğer kalınlıklar 0,8 ve 1,8 mm seçilmiş, bu kalınlıklardaki ŞSD deneyleri 25 mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir.

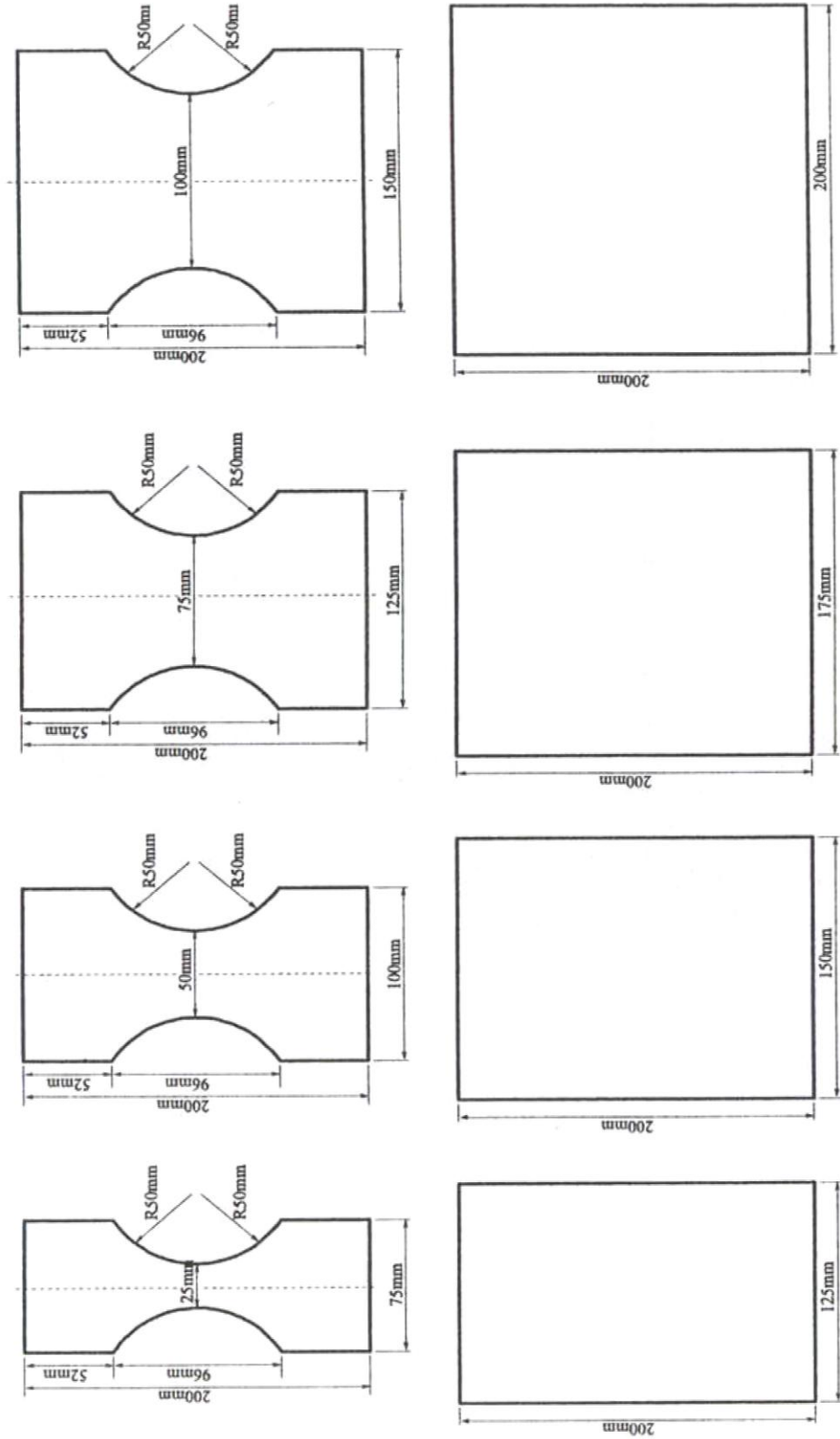
2.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Tez kapsamında çekme ve şekillendirme sınır diyagramları deneyleri yapılmıştır. Deney numuneleri lazer ile kesilerek hazırlanmıştır. Çekme deneylerinde kullanılan test numunelerinin boyutları aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.1 ASTM E8 standardına göre çekme testi numunesi

Her bir deney en az üç kez tekrar edilmiş ve ortalaması alınmıştır. Şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesi için Şekil 2.2'de boyutları gösterilen (Nakazima veya out of plane test) numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 2.2 Şekillendirme sınır diyagramı deney numuneleri boyutları [34]

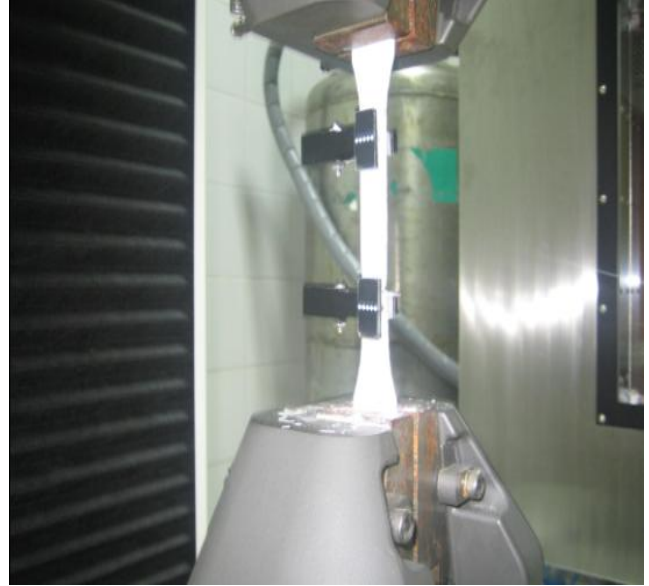
Şekillendirme sınır diyagramları için deney numunelerinin üzerine grid uygulanmıştır. Gridleme, serigrafi (Screen printing, serigraphy) yöntemi ile uygulanmıştır. Serigrafi yöntemi, bir şablon vasıtasıyla malzeme üzerine ipek baskı boyasının aktarılması işlemidir.

2.3. Deneysel Altyapı

Tez kapsamında çekme deneyleri Shimadzu AG-IS 100 kN çekme deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında malzemelere ait deformasyon miktarları video tipi deformasyon ölçer ile kontrol edilmiştir. Malzemede oluşan deformasyonun temassız olarak ölçülmesinden dolayı video tipi deformasyon ölçer, ölçüm değerlerinin doğruluğunda büyük bir rol oynamaktadır. Şekillendirme sınır diyagramı deneyleri ise MTS metal şekillendirme presinde gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmalarında kullanılan deneysel altyapının görüntüleri Fotoğraf 2.1, 2.2 ve 2.3' de verilmiştir.

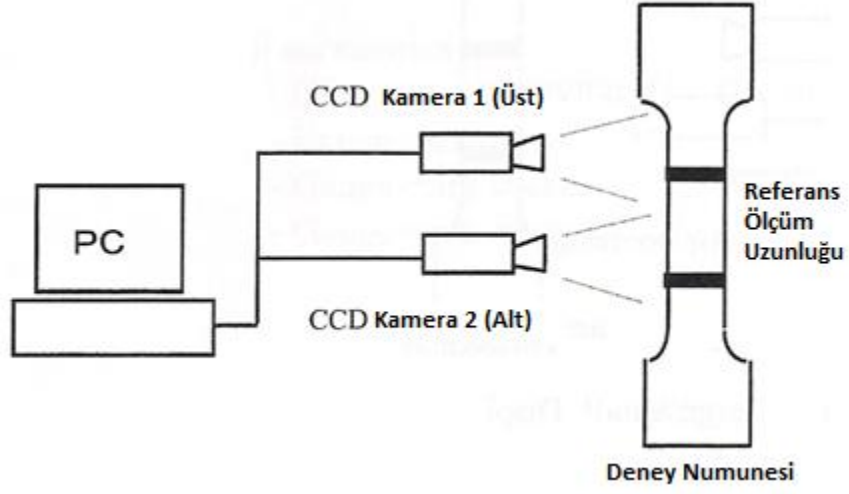


(a)



(b)

Fotoğraf 2.1 (a) Çekme cihazı ve (b) deney numunesinin bağlanmış görüntüsü



Şekil 2.3 Video tip extensometre ile ölçüm

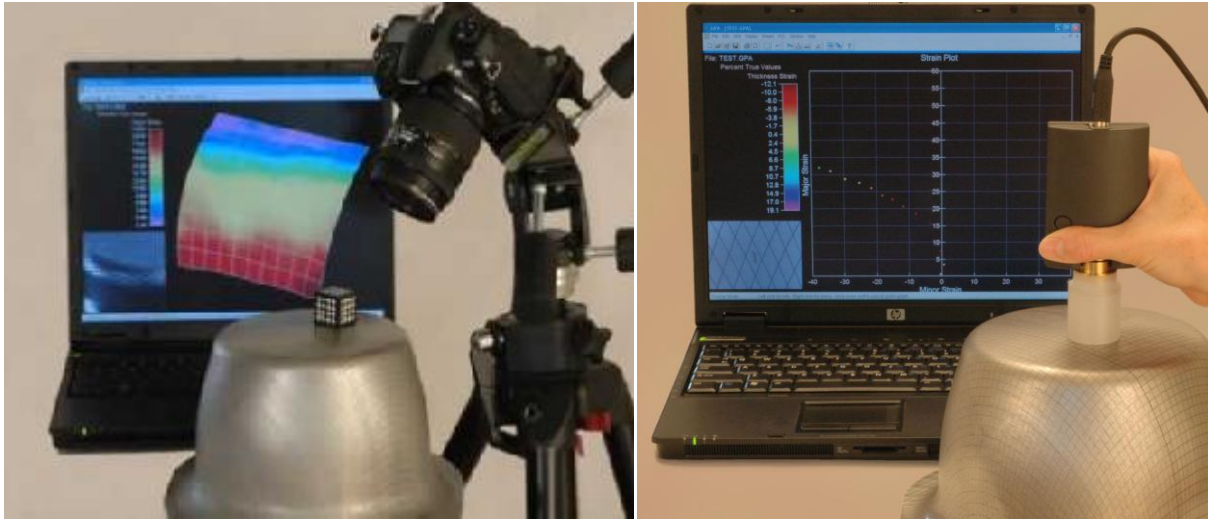


(a)



(b)

Fotoğraf 2.2 (a) Metal şekillendirme test sistemi ve (b) kalıpları



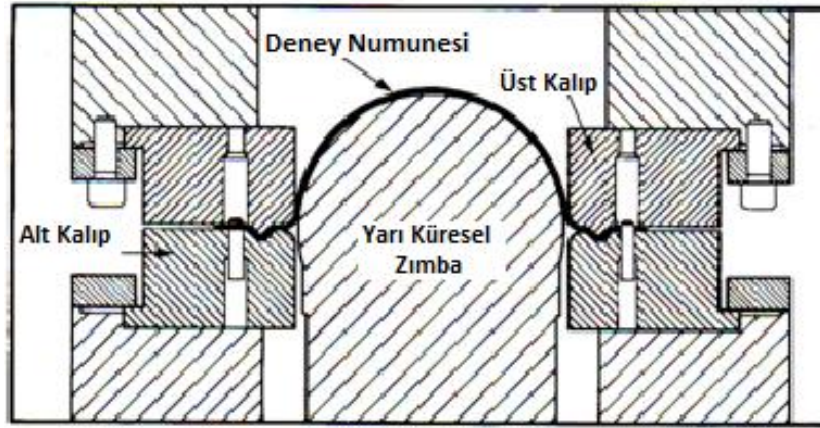
(a)

(b)

Fotoğraf 2.3 (a) ASAME ve (b) GPA grid ölçüm sistemleri

2.4 Şekillendirme Sınır Diyagramı Deneyleri

Malzemelerin şekillendirme sınır diyagramının tespitinde yarı küresel zımba (out-of-plane) testi kullanılmıştır. Şekil 2.4’de yapılan deneyin şematik görüntüsü verilmiştir [34]. Son yıllarda şekillendirme sınır diyagramlarına ilgi oldukça artmış ve malzemelerin şekillendirme işlemi esnasında yırtılma kontrolünde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle şekillendirme kalıpları hazırlanırken ön simülasyonlarda sacın ilgili şekli alıp alamayacağı, yırtılıp yırtılmayacağı gibi sorulara önceden cevap verme imkânı sağlamaktadır. Örnek olarak bir kapı sacı ele alındığında simülasyon gerçekleştirildikten sonra şekillendirilmiş sacın her noktasındaki deformasyonlar şekillendirme sınır diyagramına göre kontrol edilmektedir. Şekillendirme esnasında malzeme üzerinde oluşabilecek hatalar önceden tespit edilerek gerekli değişiklikler kalıpların tasarım aşamasında yapılmaktadır. Önemli miktarda zaman tasarrufu sağlanmakta ve maliyetler azalmaktadır.



Şekil 2.4 Şekillendirme sınır diyagramı testinin şematik görüntüsü [34]

Fotoğraf 2.4’de tez kapsamında yapılmış olan deneylerden bazı örnekler gösterilmiştir.



Fotoğraf 2.4 Şekillendirilmiş örnek parçalar

Daha önce de belirtildiği gibi şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesinde farklı geometrilere numuneler kullanılması gerekmektedir. Bunun sebebi oluşan birim şekil değiştirmeleri tek eksenli çift eksene doğru artan şekil verme bölgesi genişliği boyunca tespit edebilmektir. Şekil 2.2' de verilen test numunelerinin boyutlarına baktığımızda, tek eksenli şekil değiştirmeleri tespit etmek için kum saatine benzeyen, şekillendirme bölgesi ince olan numuneler kullanılır. Bu numuneler ŞSD (şekillendirme sınır diyagramı) 'nın sol tarafını oluşturmaktadır. Diğer düz dikdörtgen ve kare geometrili numunelerde ise şekil değiştirme çift eksenli olarak meydana gelir. Böylece bu numuneler ŞSD' nin sağ tarafını oluşturmaktadır. Her bir hız ve kalınlık için Şekil 2.2'de görülen bir set (8 adet numune) şekillendirilmiş ve deneyler 3' er tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak tez kapsamında yaklaşık 200 adet numune şekillendirilmiş ve deformasyona uğrayan gridler ölçülmüştür.

BÖLÜM III

DENEYSEL VERİLERİN İŞLENMESİ

3.1. Çekme Deneyi Verilerinin İşlenmesi

Deneylerde oldukça fazla veri toplanmaktadır. Bu verilerin işlenmesi ve proses edilmesi de proje çalışmasında önemli bir yere sahiptir.

Çekme deneyi esnasında ölçülen çekme kuvveti F ve referans çizgilerin yer değiştirme miktarı ($\Delta L=L-L_0$) Eşitlik (4) ve (5)'de verilmiş olan mühendislik gerilmesinin ($\sigma_{müh}$) ve birim şekil değişiminin ($\varepsilon_{müh}$) hesaplanmasında kullanılmıştır.

$$\sigma_{müh} = F/A_0 \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_{müh} = \Delta L/L_0 \quad (3.2)$$

Burada A_0 malzemelerin başlangıç kesit alanı, ΔL anlık alınan deformasyon miktarı ve L_0 ise başlangıç boy ölçüsüdür. Mühendislik gerilme ve birim deformasyonunun belirlenmesinden sonra gerçek gerilme ve birim deformasyon değerleri de Eşitlik (6) ve (7)'de verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{ger} = \sigma_{müh}(1 + \varepsilon_{müh}) \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_{ger} = \ln(1 + \varepsilon_{müh}) \quad (3.4)$$

Şekillendirmede bir diğer önemli malzeme karakteristiği de deformasyon hız hassasiyeti olarak adlandırılan m değeridir. m değeri;

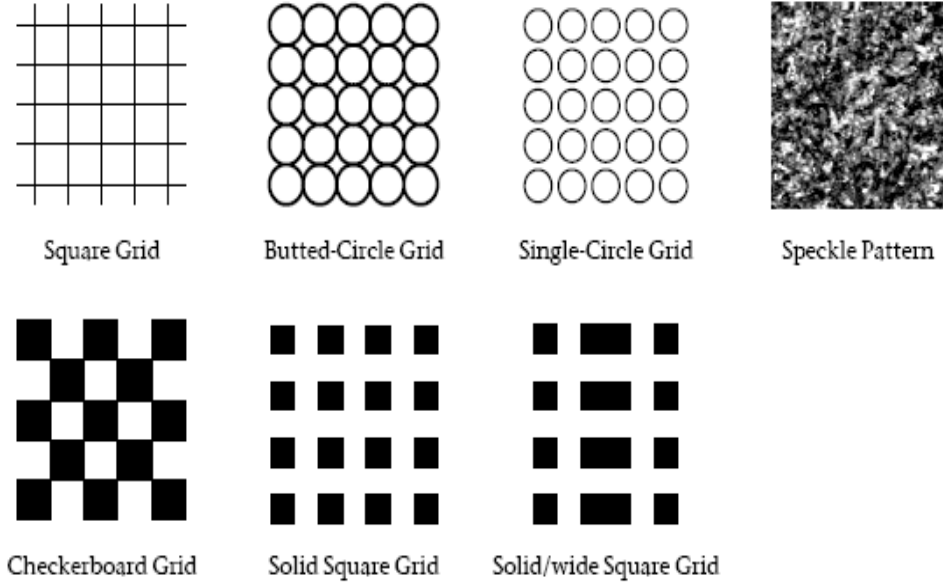
$$m = \frac{\log \sigma_2 - \log \sigma_1}{\log \varepsilon_2 - \log \varepsilon_1}$$

(3.5)

denkleminde gösterildiği gibi iki farklı deformasyon hızında gerçekleştirilen gerçek gerilme-gerçek birim deformasyon diyagramının gerilme ve deformasyon hızlarının logaritmalarının oranı olarak hesaplanır. "m" değerinin bulunması için malzemeye sıçrama (jump) testi uygulanır. Bu testin standart çekme testinden farkı, şekillendirme esnasında malzemeye ani şekillendirme hızı değişiklikleri uygulanmasıdır. Bu ani değişiklikler sayesinde malzemenin hıza karşı hassasiyeti belirlenerek yukarıdaki formül yardımıyla deformasyon hızı hassasiyeti tespit edilir.

3.2. Şekillendirme Sınır Diyagramlarının Belirlenmesi

Deney verilerinin işlenerek şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesi için, malzemeler üzerine işlenmiş gridlerden faydalanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi gridler dışarıdan hizmet alımı yoluyla Konya Sanayi'de, serigrafi yöntemi ile uygulanmıştır. Şekillendirme uygulanmadan önce gridlerin ölçüsü tespit edilmiş, şekillendirme sonrasında ise grid boyutlarındaki değişimler görüntü işleme yöntemi ile ölçülmüştür. Şekil 3.1' de farklı grid geometrileri ile ilgili örnekler gösterilmiştir. Yapılan çalışmalarda "square grid (kare grid)" geometrisi kullanılmıştır.



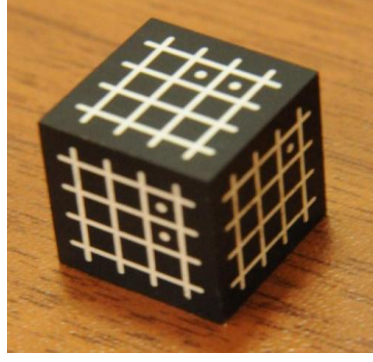
Şekil 3.1 Farklı grid geometrileri

Farklı ölçüm sistemlerini ve mevcut sistemin hassasiyetini belirlemek için deformasyona uğramış gridler farklı ölçüm sistemleriyle ölçülmüştür [40]. Sonuçlar Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

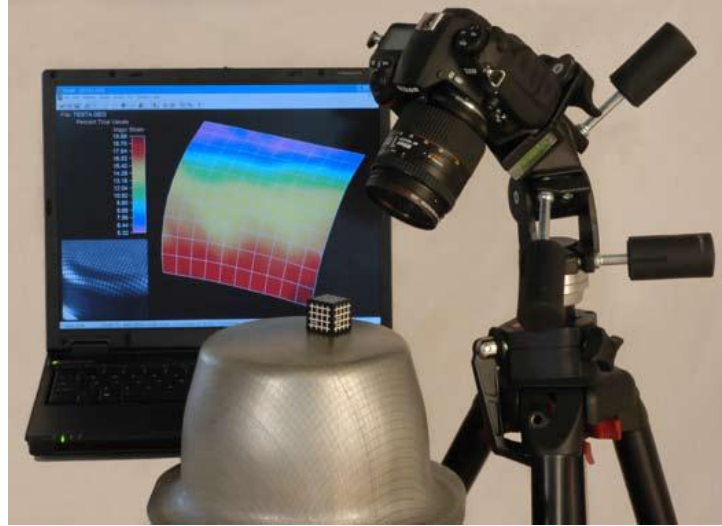
Çizelge 3.1 Deformasyona uğramış gridlerin farklı yöntemlerle ölçülmesi [40]

ASAME		GPA		Mylar Tape		Optic Comparator	
Major Strain (%)	Minor Strain (%)	Major Strain (%)	Minor Strain (%)	Major Strain (%)	Minor Strain (%)	Major Strain (%)	Minor Strain (%)
5.38 ± 0.40	-2.34 ± 0.36	5.91 ± 0.16	-2.15 ± 0.07	4.8 ± 5	-2.4 ± 5	5.37 ± 0.41	-2.13 ± 0.2

Gridlerin ölçülmesinde bilgisayar ortamında yapılan analiz için ASAME (Automated Strain Analysis and Measurement Environment) teknolojilerinden Target Model yöntemi kullanılmıştır [41]. Target Model yöntemi, referans küpünü esas alarak grid üzerindeki deformasyonu ölçme temeline dayanmaktadır. Fotoğraf 3.1’de ölçümlerde kullanılan referans küpü gösterilmektedir



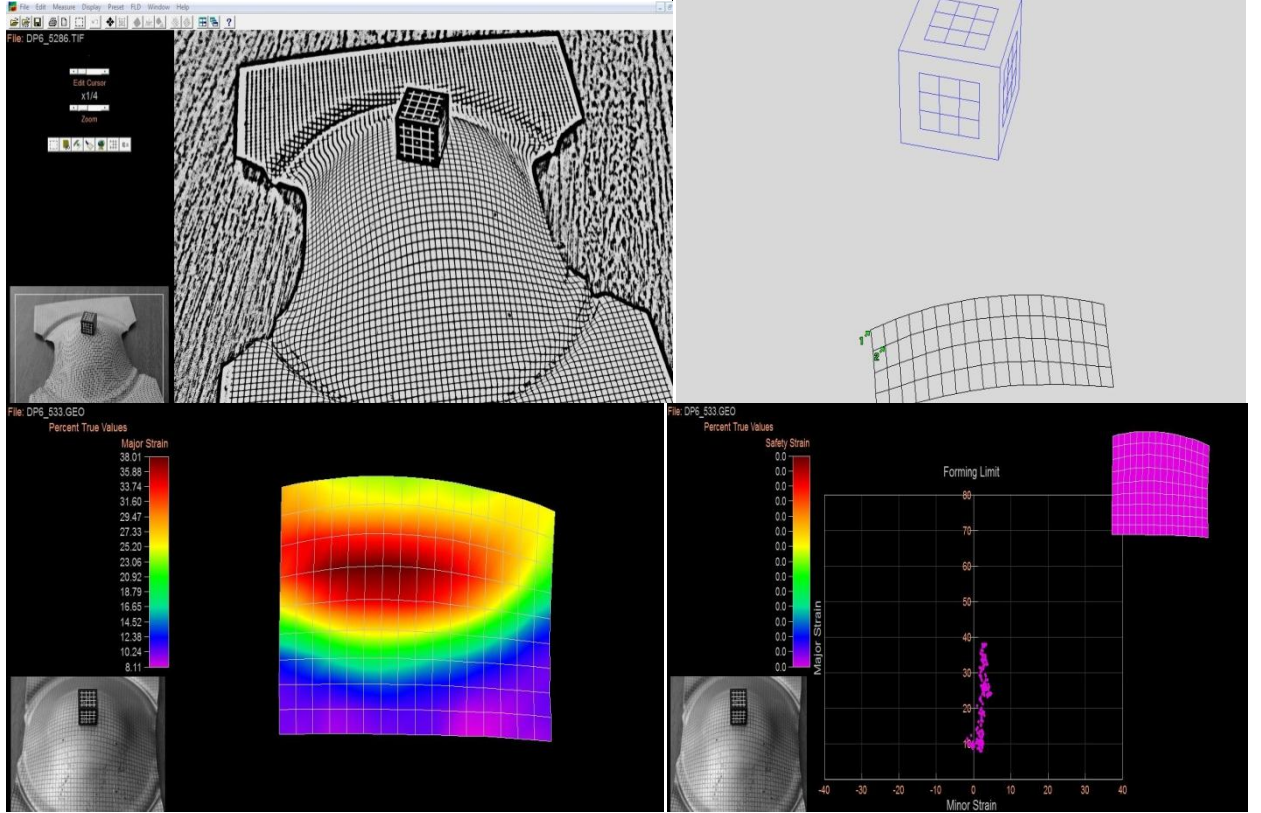
Fotoğraf 3.1 Referans küpü



Fotoğraf 3.2 ASAME Target Model

Şekillendirme miktarı ölçülmek istenen bölgenin hemen dışına fotoğraf karesine girecek şekilde bu küpün yerleştirilmesiyle ölçümler alınır. Bu modelde kullanılan küpün belirli bazı özellikleri vardır. Küp üzerindeki karelerin boyutları birbirine eşittir. Ayrıca bu karelerin bazılarının ortasında içi dolu beyaz daireler bulunmaktadır. Şekillendirilen numunelere ait şekil değişimleri, üzerlerinde bulunan gridler sayesinde ölçülmektedir. Gridler boyutları 2,5x2,5 mm ve çizgi kalınlığı 0,5 mm olarak malzeme üzerine uygulanmıştır. Başlangıç ölçüleri ve çizgi kalınlıkları bilinen gridler, şekillendirme sonrasında fotoğrafları çekilip bilgisayar ortamına aktarılarak ölçülür ve grid üzerinde oluşan boyut değişiklikleri tespit edilerek deformasyon ölçümü yapılır. ASAME yazılımı küpü referans olarak boyutsal değişikliklerin ölçümünü yapmaktadır. Küp en az iki yüzeyi fotoğraf karesine sığacak şekilde ölçüm yapılacak yüzeyin yakınına yerleştirilir ve iki farklı

açından görüntü alınır. Görüntü yazılıma aktarıldıktan sonra grid ölçüleri programa girilir. Ardından grid çizgilerinin kalınlıkları program tarafından 1 piksele kadar inceltilir ve arta kalan kısımlar temizlenir. ASAME iki fotoğraftaki gridlerin ve küpün boyutlarını karşılaştırarak deformasyon değerlerini verir. Fotoğraf 3.3'de yazılım üzerinde yapılan işlemler özetlenmiştir.



Fotoğraf 3.3 ASAME yazılımında grid ölçümü

Bu yöntemde kullanılan kameranın özellikleri de çok önemlidir. Kameranın netlik ayarı, odaklama, çözünürlük, objektif ayarları gibi birçok özelliğinin iyi olması gerekmektedir. Fotoğrafların alınmasında bir diğer önemli nokta ise ortamdaki ışık yoğunluğudur. Işığın fazla olmaması ve geldiği açının doğru olması, gridlerin daha sonra analizinde kolaylık sağlaması için oldukça önemlidir.

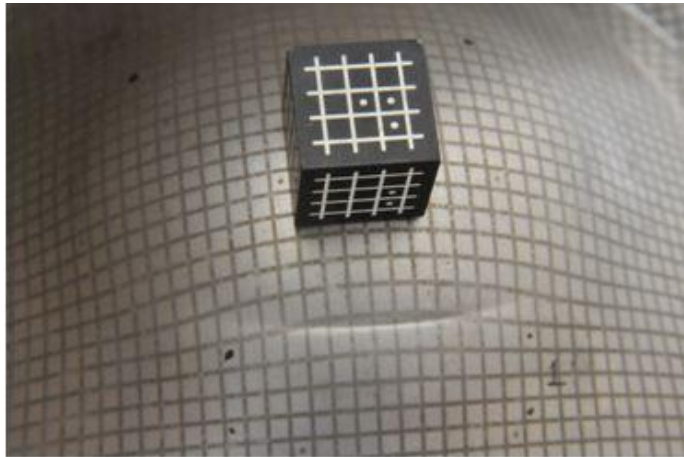
Şekillendirme sınır diyagramlarının belirlenmesinde farklı yöntemler mevcuttur. Uysal ve Öztürk [42], yaptıkları çalışmada farklı analiz yöntemlerini uygulamış ve sonuçları

karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında deney numunelerinin 3 ayrı bölgesinden ölçüm almışlardır. Bu bölgeler; boyun verme ve kırılmanın tam arkasındaki bölge (kırılmaya tam simetrik), boyun vermenin olduğu bölge (kırılma veya boyun verme hatalarını ihtiva eder) ve kırılmanın hemen bitişiğinde ama kırılmayı içine almayan bölgedir. Fotoğraf 3.4'de ölçüm yapılan bölgelerin resimleri gösterilmiştir. Resimlerde görülen gridlerin, işaretlenen noktalar arasında kalan bölgelerinden ölçüm alınmıştır. Düşük birim şekil değiştirme değerlerine sahip ŞSD'nin daha güvenli olduğu bilindiğinden, elde edilen şekillendirme sınır diyagramlarında en güvenli sonucu arka bölgeden alınan verilerle oluşturulan ŞSD'nin verdiği tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışma doğrultusunda tez çalışmasında da ŞSD'ler arka bölgeden alınan verilerle elde edilmiştir.



(a)

(b)



(c)

Fotoğraf 3.4 Ölçüm yapılan farklı bölgeler. (a) arka bölge (b) boyun verme bölgesi (c) kırılmaya sınır bölge [40]

BÖLÜM IV

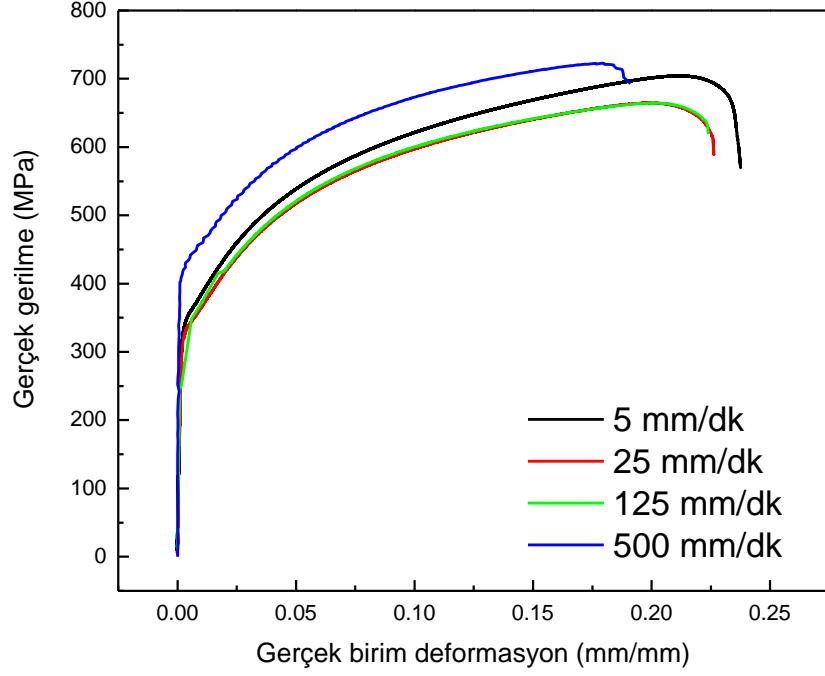
DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Çekme Deneyleri

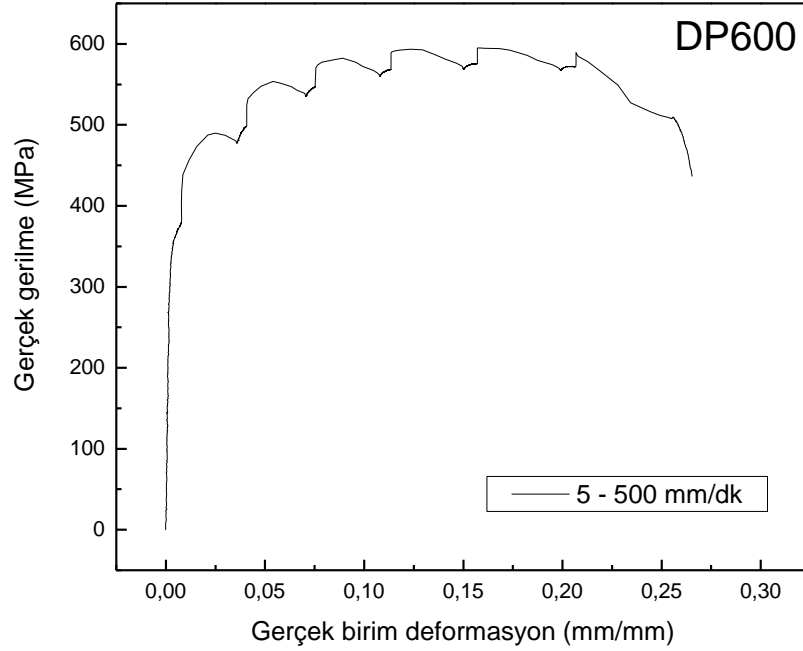
Belirtildiği üzere, DP600 malzemeye farklı hızlarda çekme testi uygulanmış mekanik özellikleri belirlenmiştir. Malzemenin farklı hızlardaki mekanik özellikleri Çizelge 4.1’de ve çekme grafikleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 DP 600 malzemenin farklı hızlardaki mekanik özellikleri

Deformasyon Hızı (mm/dk)	Maksimum Gerilme (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Yüzde Uzama (%ε)	Pekleşme Katsayısı (n)	Mukavemet Katsayısı (K)	Deformasyon oranı hassasiyeti (m)
5	684,27	335,59	0,239	0,20	907,82	0,0082
25	664,66	339,87	0,228	0,19	908,54	
125	664,57	358,06	0,222	0,19	930,69	
500	709,36	402,98	0,196	0,15	945,68	



Şekil 4.1 Farklı deformasyon hızlarında DP600 malzemesinin gerçek gerilme – gerçek birim deformasyon grafiği



Şekil 4.2 Sıçrama testi sonrasında 5-500 mm/dk aralığında elde edilen gerçek gerilme - gerçek birim deformasyon grafiği

DP 600; yeni nesil çelik grubundan olup, çift fazlı yapı içermektedir. Yapısındaki fazlar ferrit ve içerisinde dağılmış faz olan martenzit yapılarıdır. Yüksek mukavemet/ağırlık oranlarından dolayı, özellikle otomotiv endüstrisinde araç hafifletme çalışmalarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Malzemeye farklı hızlarda çekme testi uygulanmış ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi DP600 malzemeler farklı şekillendirme hızlarında farklı mekanik özellikler göstermektedirler. Öyle ki farklı hızlarda yapılan çekme deneylerinde, akma eğrisinde 5 mm/dk' dan - 125 mm/dk' ya azalma gözlemlenirken, 500 mm/dk' da tekrar artış gözlemlenmiştir. I. durumda malzemenin negatif deformasyon oranı hassasiyetine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum ise artan şekillendirme hızı ile şekillendirmek için gerekli olan kuvvetin azalması anlamına gelmektedir. II. durumda ise deformasyon oranı hassasiyeti pozitif olduğundan gerekli olan kuvvet artmaktadır.

Malzemelerde deformasyon oranı hassasiyetinin şekillendirme miktarı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Basit bir çekme deneyinde ilk etapta malzemenin bir kısmı daha hızlı deforme olarak pekleşir ve deformasyon daha zayıf olan yan bölgeye kayarak tüm bölgenin pekleşmesi sağlanır. Deformasyon oranı hassasiyeti ne kadar büyük olursa bu bölgeyi deforme etmek için gerekli olan kuvvet artmakta ve malzemede boyun verme gecikmektedir. Deformasyon oranı hassasiyeti (m) deformasyonun her kademesinde aynı miktarda olmayabilir. TRIP malzemelerin deformasyon oranı hassasiyeti deformasyonla birlikte iç yapıdaki dönüşümden dolayı artmaktadır. Bu durum boyun vermeyi geciktirerek malzemenin daha fazla deforme edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak DP600 malzemede m değeri deformasyonla birlikte azalmakta ve boyun vermeyi geciktirici etkisi de ortadan kalkmaktadır.

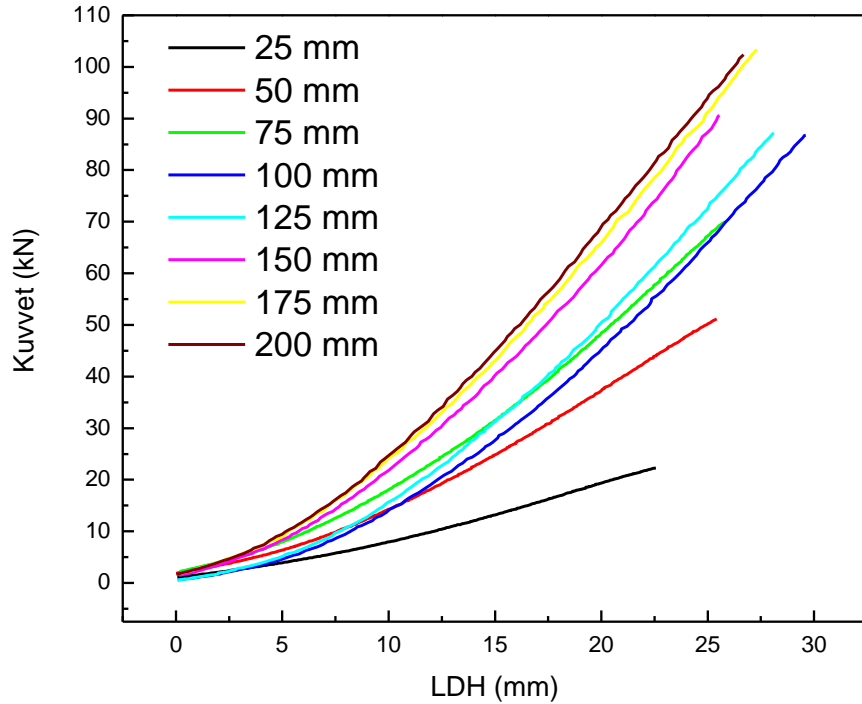
Malzemenin akma gerilmelerinde 500 mm/dk hızında yapılan deney haricinde fazla bir değişiklik görülmemiştir. Akma gerilmesi 5 mm/dk deformasyon hızında 335,59 MPa iken bu değer 500 mm/dk da 402,98 MPa'a yükselmiştir. Ayrıca toplam uzamalarda % 23'den, %19'a düşüş gözlemlenmiştir. Malzemenin pekleşme katsayısı da 0,2'den 0,19'a düşmüştür. Ayrıca malzemeye 5-500 mm/dk aralığında sıçrama (jump) test uygulanmıştır (Şekil 4.2). Sıçrama testi sonucunda deformasyon hızı hassasiyeti (m) 0,0082 olarak tespit

edilmiştir. Malzemenin maksimum mukavemeti 5 mm/dk'dan sonra düşüş göstermiş fakat 500 mm/dk' da tekrar yükselmiş ve en büyük değerini almıştır.

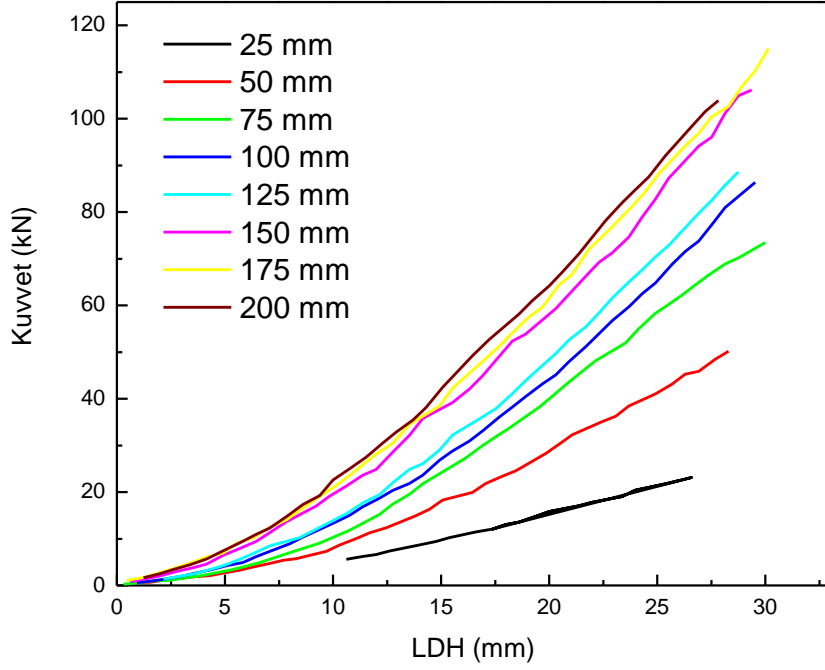
4.2 Şekillendirme Sınır Diyagramları (ŞSD) Deneyleri

Yapılan çalışmada daha önce de belirtildiği gibi Nakazima standartlarında hazırlanmış 1,3 mm kalınlığında DP600 malzemeler, farklı hızlarda (25, 100, 250, 500, 750, 1000 mm/dk) şekillendirilmiştir.

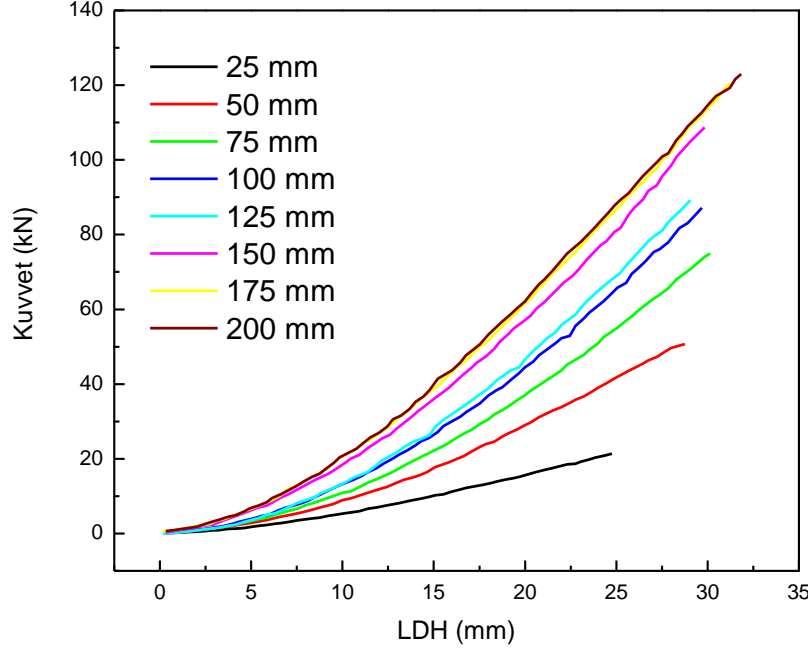
Deneylerde yarı küresel zımba ve üzerinde süzdürme çubukları bulunan baskı plakaları kullanılmıştır. Malzemelerin geometrilerine göre baskı plakası kuvvetleri seçilmiştir. Deneyler sonucunda kubbe yüksekliklerinin (LDH) malzemenin maruz kaldığı kuvvete göre değişim grafikleri Şekiller 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 ve 4.7' de verilmiştir.



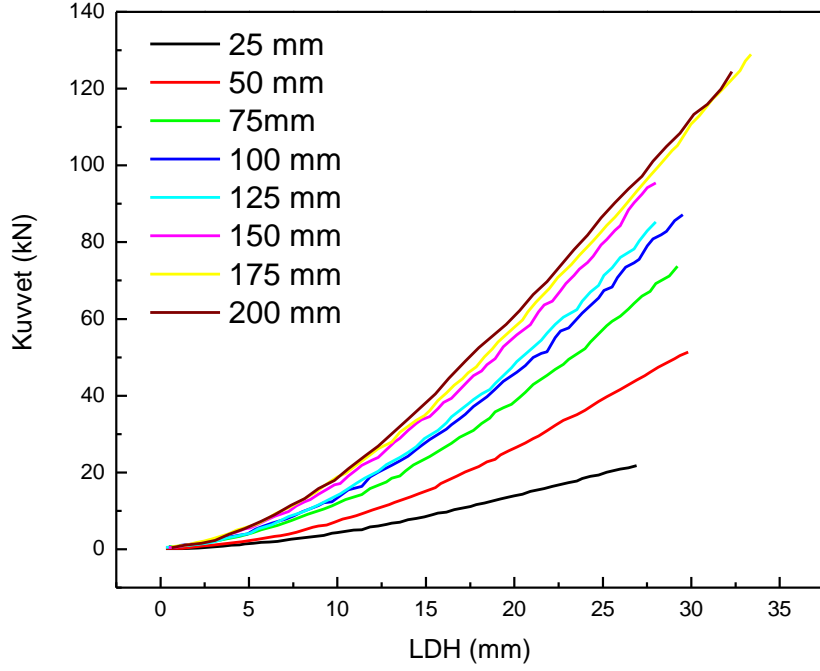
Şekil 4.3 25 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilmiş numunelerin kuvvet – LDH değişimleri



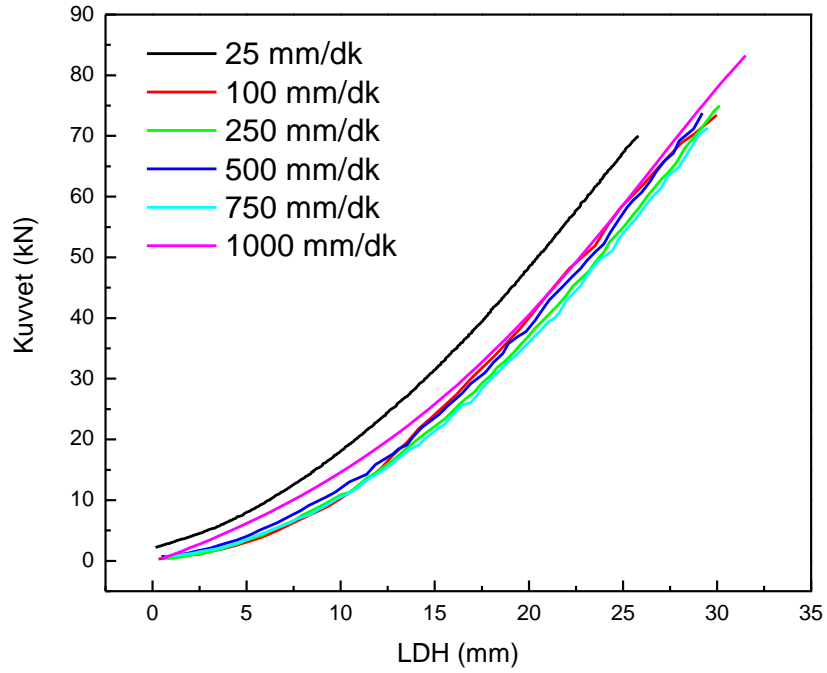
Şekil 4.4 100 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilmiş numunelerin kuvvet – LDH değişimleri



Şekil 4.5 250 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilmiş numunelerin kuvvet – LDH değişimleri



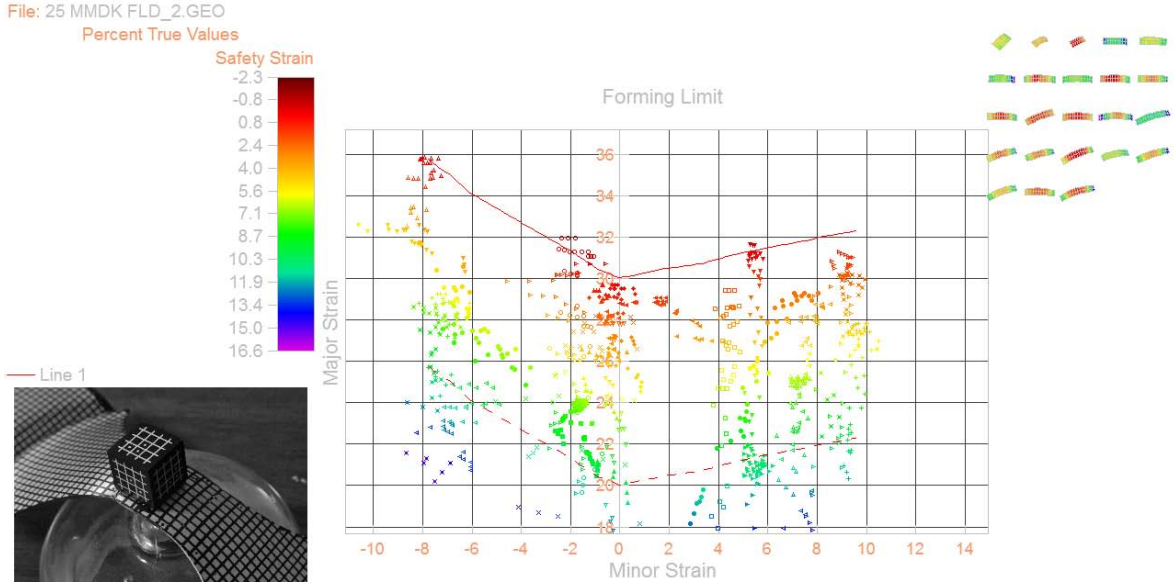
Şekil 4.6 500 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilmiş numunelerin kuvvet – LDH değişimleri



Şekil 4.7 75 mm genişliğindeki numunenin farklı deformasyon hızlarına göre kuvvet – LDH değişimi grafiklerinin karşılaştırılması

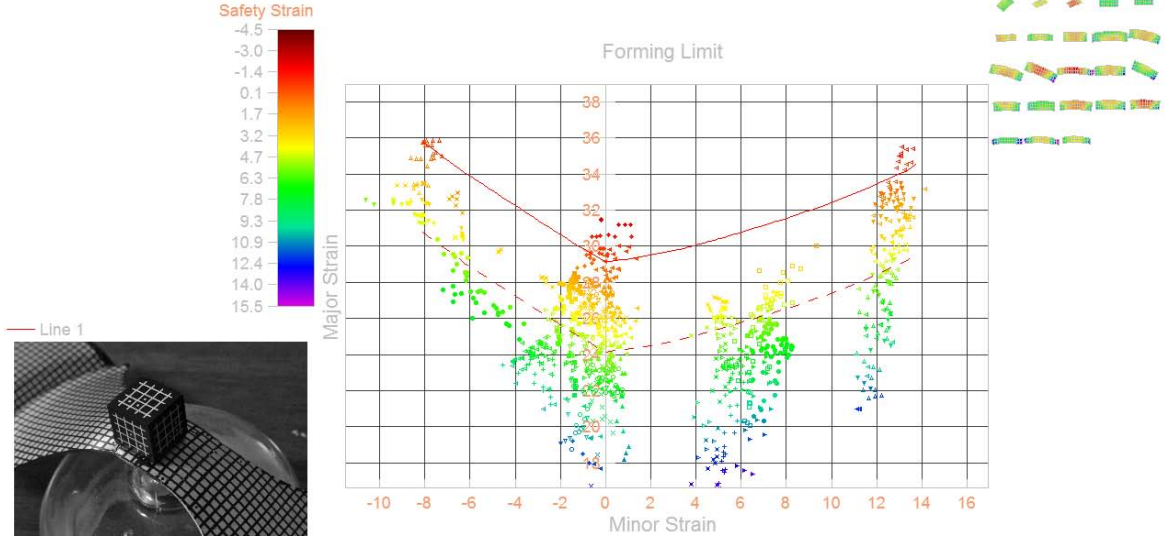
Grafiklerden de görüldüğü gibi, malzemenin kalınlığı arttıkça, malzemeye uygulanan kuvvette de artma görülmüştür. Hızlara göre kuvvet değişiminde ise 1000 mm/dk ya kadar çok fazla bir değişim görülmemiştir. 75 mm genişliğindeki numune için uygulanan kuvvet 25 mm/dk şekillendirme hızında 70 kN iken bu değer 1000 mm/dk'da 83 kN'a çıkmıştır.

Yapılan şekillendirme sınır diyagramı testleri (out of plane test) sonucunda malzemelerin ŞSD grafikleri elde edilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi numunelerin yüzeylerine deney öncesi grid uygulanmış ve deneyden sonra gridler üzerindeki değişim ölçülerek malzemelerin deformasyonları belirlenmiştir. Deformasyonun ölçülmesinde ASAME Target Model yöntemi kullanılmış ve DP600 çeliğin farklı deformasyon hızlarında ŞSD'leri elde edilmiştir. Elde edilen ŞSD grafikleri ASAME arayüzünden alınan görüntülerle aşağıda verilmiştir.



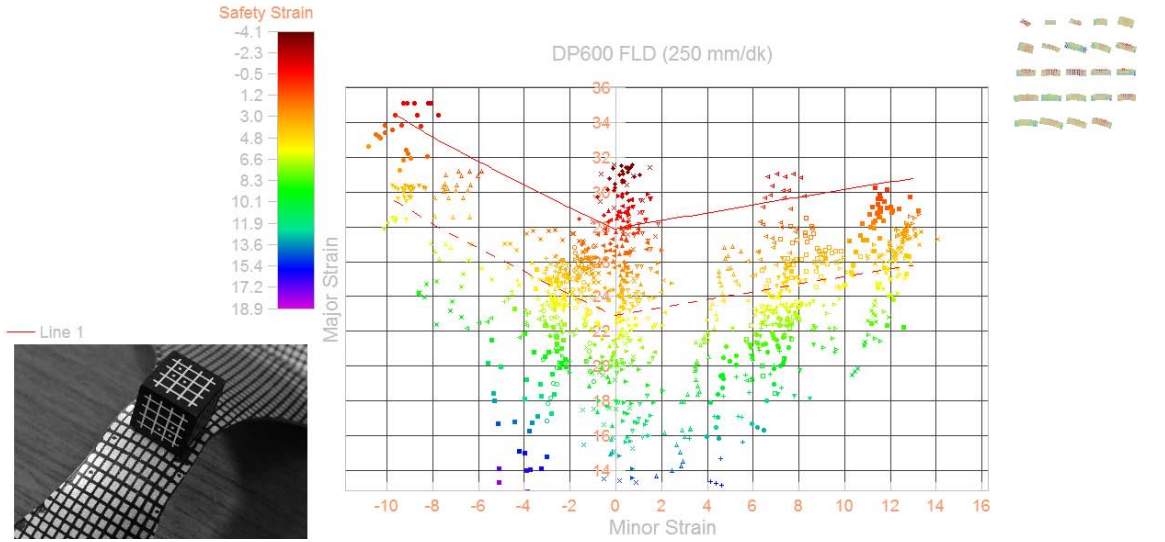
Fotoğraf 4.1 25 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği

File: 100 MMDK_FLD_2.GEO
Percent True Values



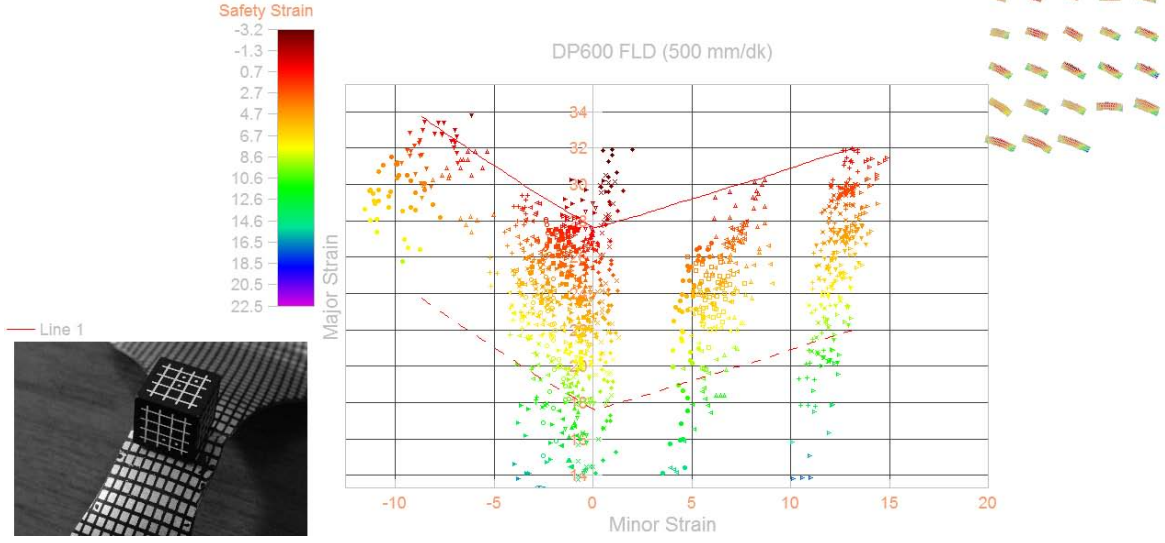
Fotoğraf 4.2 100 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği

File: 250MMDK_FLD_2.GEO
Percent True Values



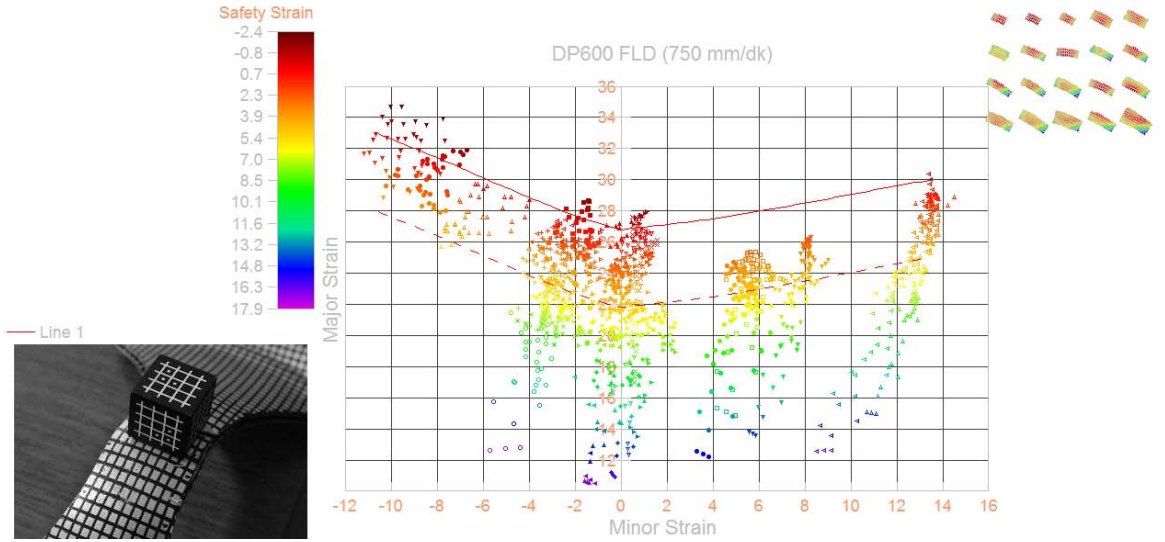
Fotoğraf 4.3 250 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği

File: 500 MM_DK_FLD_2.GEO
Percent True Values

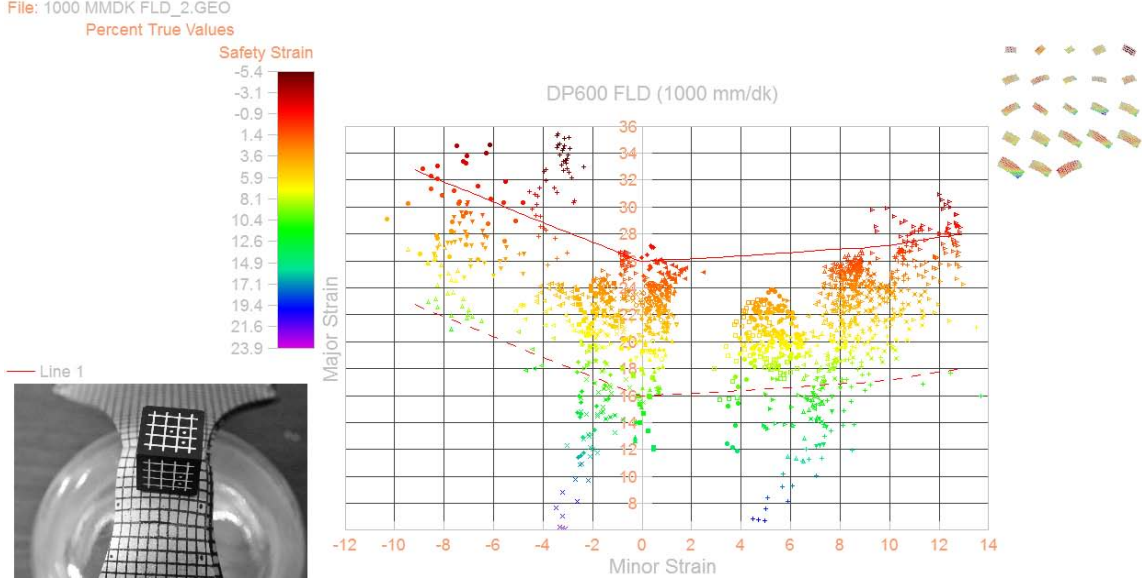


Fotoğraf 4.4 500 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği

File: 750 MM-DK_FLD_2.GEO
Percent True Values

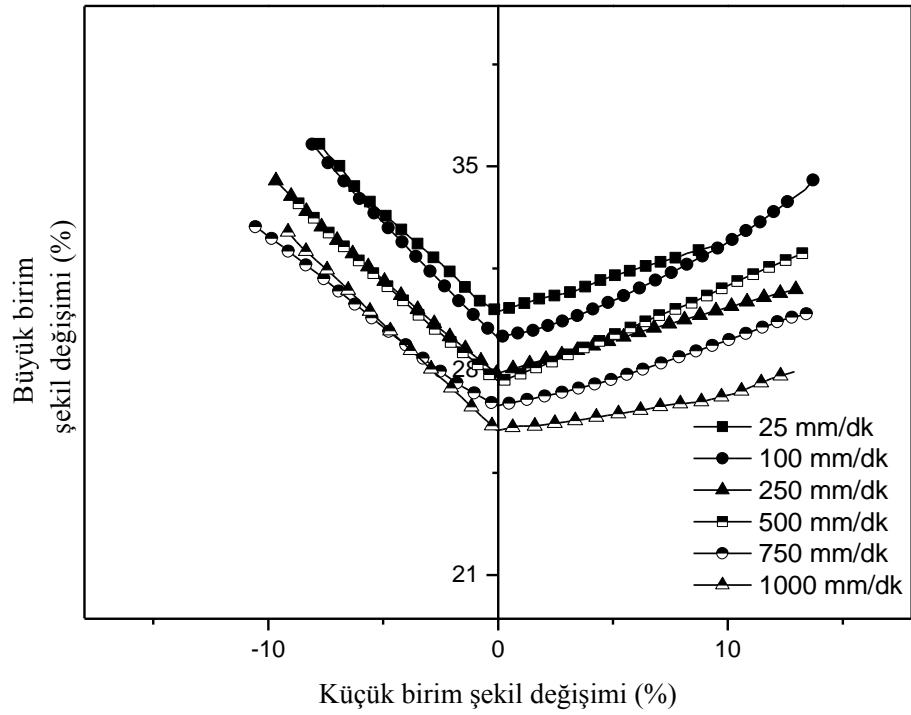


Fotoğraf 4.5 750 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği



Fotoğraf 4.6 1000 mm/dk deformasyon hızıyla şekillendirilen numunelerin ŞSD grafiği

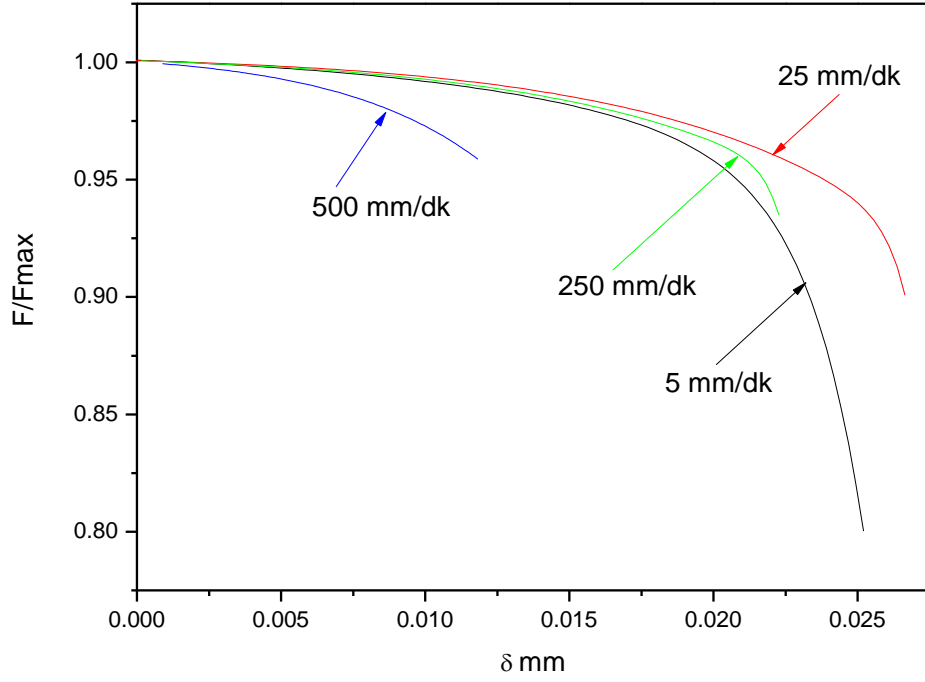
Yukarıda verilen ŞSD grafikleri, ASAME programında boyun verme ve hata bölgeleri belirlenerek çizilmiştir. Ayrıca DP600 malzeme için farklı deformasyon hızlarındaki ŞSD grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 Farklı deformasyon hızlarındaki ŞSD grafiklerinin karşılaştırılması

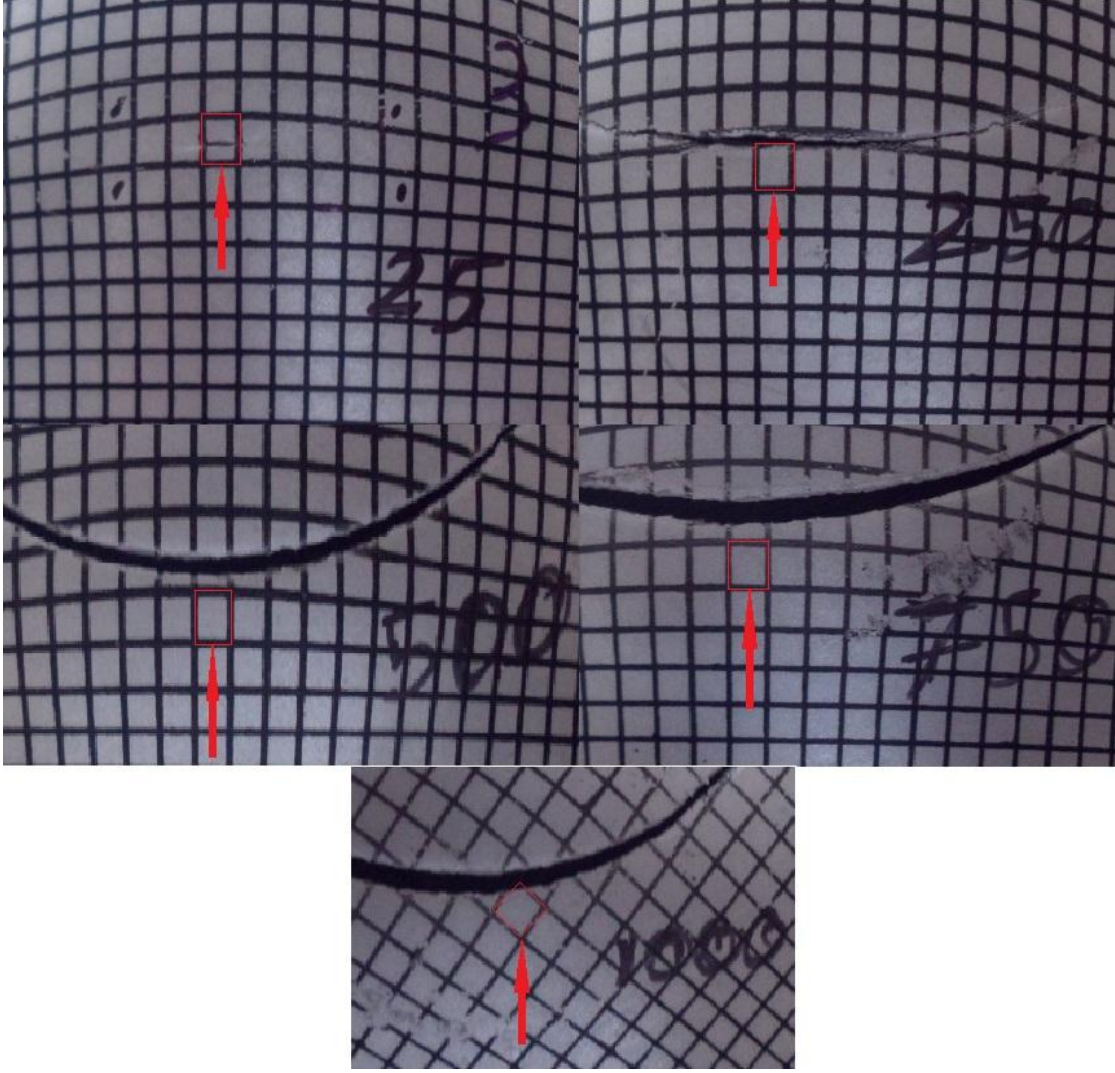
Yapılan testlerinin sonucunda DP600 malzeme için ŞSD grafiklerinde deformasyon hızının artması ile dikkate değer bir değişme olmadığı tespit edilmiştir. ŞSD'ler grafiğin sol tarafında, yani tek eksenli birim şekil değiştirme bölgesinde, birbirilerine çok yakın davranış göstermişlerdir. İki eksenli birim şekil değiştirmenin söz konusu olduğu sağ tarafta ise hafif farklılıklar gözlemlenmiştir. Özellikle 250 mm/dk deformasyon hızında şekillendirilen numuneler sağ tarafta diğer garfiklere göre daha farklı bir eğilim göstermiştir. Grafikten elde edilen sonuca göre en düşük minör birim şekil değiştirme grafiğin sol tarafında 500 mm/dk hızda %-8,67, grafiğin sağ tarafında ise 25 mm/dk hızda %9,56 olarak tespit edilmiştir. En yüksek major birim şekil değiştirme ise grafiğin sol tarafında 25 mm/dk hızda %35,77, grafiğin sağ tarafında 100 mm/dk hızda %34,53 olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca ŞSD grafiklerinde en yüksek minör birim şekil değiştirmeye %13,72 ile 100 mm/dk' nın sahip olduğu görülmüştür. Minor şekil değiştirmenin 0 olduğu ekseninde (plane strain), yani iki eksenli birim şekil değiştirmeye geçiş noktasında en yüksek major birim şekil değiştirmeye 25 mm/dk sahiptir. 25 mm/dk'da %30,02 ile en yüksek değeri alan major birim şekil değiştirme 1000 mm/dk deformasyon hızında %25,95'e düşerek en düşük değerini almıştır.

Ayrıca hızın şekillendirme üzerindeki etkisini daha detaylı incelemek amacıyla ileri uniform uzama grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler malzemenin boyun vermesinden kopmasına kadarki bölümde meydana gelen uzamayı ve kuvvet oranlarını vermektedir. Bu grafiklere ek olarak farklı hızlarda şekillendirilmiş ŞSD numunelerinden kırılma bölgelerinin yakından fotoğrafları çekilerek grid boyutları incelenmiştir. İleri uniform şekillendirme grafikleri farklı hızlara göre Şekil 4.9 'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Farklı hızlarda çekilen DP600 numunelerin ileri uniform uzama grafikleri

Şekilden de görüldüğü gibi şekillendirme hızının artması ile ileri uniform uzama (25 mm/dk hariç) düşmektedir. Bunun başlıca sebebi malzemenin kırılma esnasında deformasyon oranı hızının ($d\sigma/d\varepsilon$) sıfır olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu durum esnasında malzemenin $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$ olduğu evresinde malzemenin boyun vermeye başladığını göstermektedir. Birçok malzeme gibi bu değer sıfır olmadan malzemede kırılma meydana gelmektedir. Öyle ki Şekil 4.9'da da görüldüğü gibi 500 mm/dk şekillendirme hızı için F/F_{max} oranı 0,96 'da sonlanmıştır. Diğer deformasyon hızlarında ise bu değer hızın düşmesi ile azalmaktadır. Buna ilave olarak ileri uniform uzaması (δ) hızla birlikte düşmektedir. Yapılan şekillendirme çalışmalarından da görüldüğü üzere malzemenin üzerine çizilen gridlerin artan hızla birlikte daha az birim şekil değişimine uğrayarak kırılmanın meydana geldiği ilgili bölgedeki gridler aşağıdaki fotoğraflarda görülmektedir.

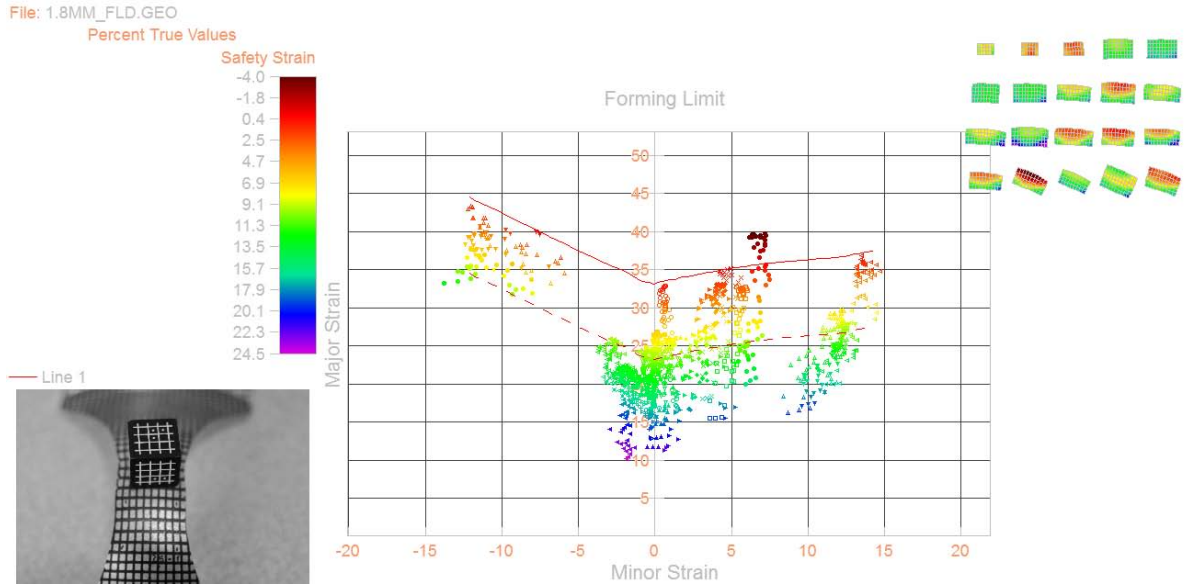


Fotoğraf 4.7 Farklı hızlarda şekillendirilen ŞSD numunelerinin kırılma fotoğrafları

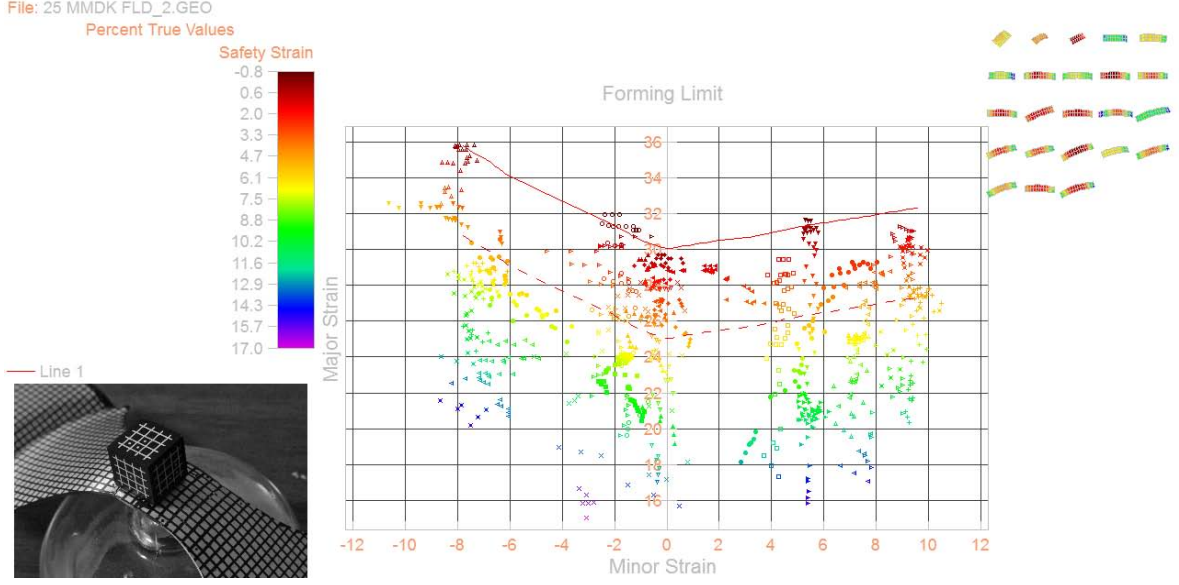
Yukarıdaki fotoğraftan da görüldüğü gibi şekillendirme hızı arttıkça malzemenin kırılma boyutları büyümüş, 25 mm/dk' da boyun vermenin ardından küçük bir çatlak oluşurken 1000 mm/dk'da malzeme boyun vermeden kırılmıştır. Kırılma bölgelerinin hemen altından seçilen gridlerin boyutları dikkate alındığında hız arttıkça grid boyutlarının küçüldüğü tespit edilmiştir. Bu durum da Şekil 4.9' daki grafiği destekleyerek malzemenin şekillendirme hızı arttıkça boyun verme ve ileri uniform uzamasının azaldığını, bu nedenle hız artışıyla ŞSD' nin az da olsa düştüğünü göstermektedir.

4.3. Farklı Kalınlıklardaki DP600 Çeliğinin Şekillendirme Sınır Diyagramları

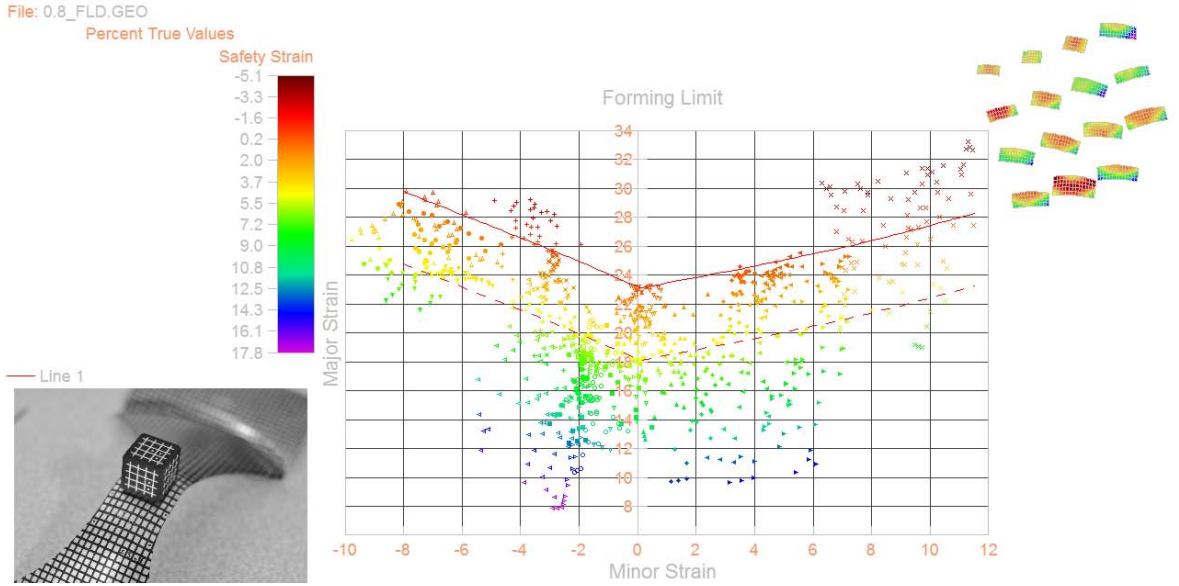
DP 600 malzemenin şekillendirme kabiliyetinin kalınlıkla olan değişimini incelemek için farklı kalınlıklardaki malzemelere testler uygulanmış ve ŞSD grafikleri oluşturulmuştur. Kalınlıkla ŞSD değişimini incelemek için 3 farklı kalınlık kullanılmıştır. Bu kalınlıklar sırasıyla 0,8, 1,3 ve 1,8 mm'dir. Her kalınlık için uygulanan deney hızı 25 mm/dk'dır. Elde edilen grafikler Fotoğraflar 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir.



Fotoğraf 4.8 25 mm/dk hızda şekillendirilmiş 0,8 mm kalınlığındaki numunenin ŞSD grafiği

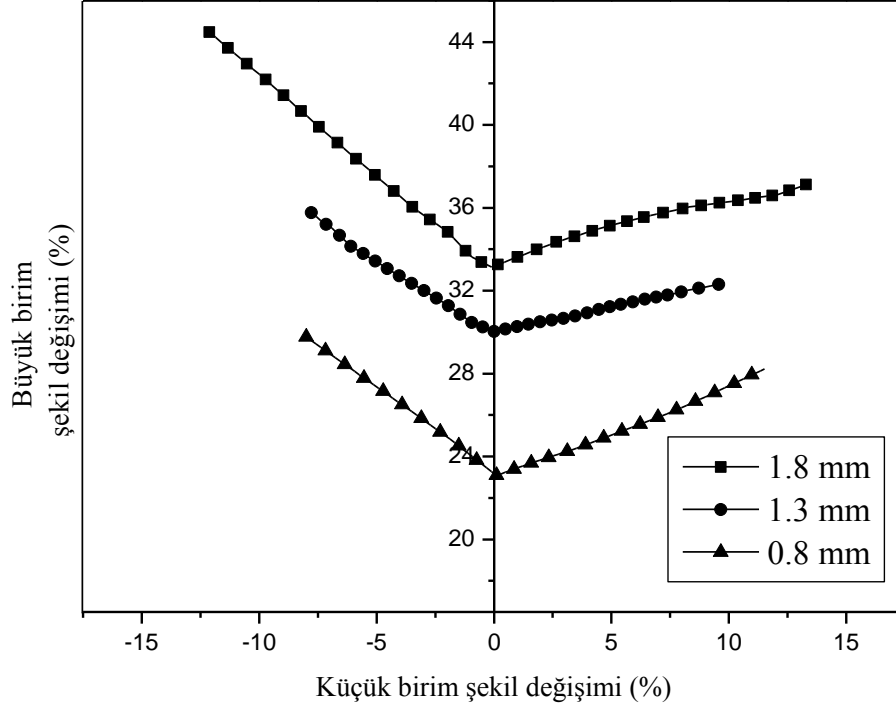


Fotoğraf 4.9 25 mm/dk hızda şekillendirilmiş 1,3 mm kalınlığındaki numunenin ŞSD grafiği.



Fotoğraf 4.10 25 mm/dk hızda şekillendirilmiş 0,8 mm kalınlığındaki numunenin FLD grafiği

Yukarıda verilen grafiklerin karşılaştırmalı gösterimi Şekil 4.10'da verilmiştir.

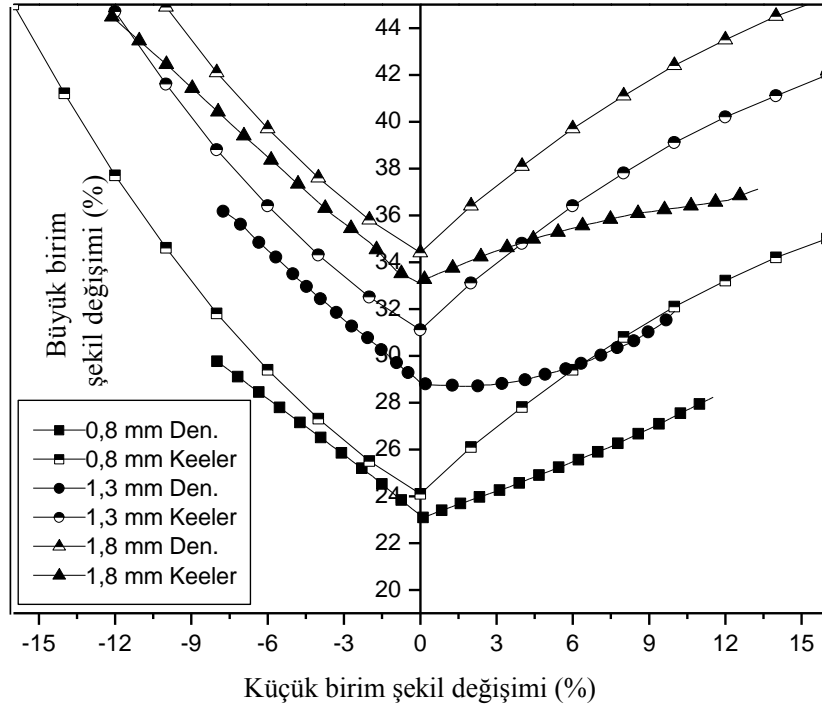


Şekil 4.10 Farklı kalınlıklarda şekillendirilen numunelerin ŞSD grafikleri

Yapılan testler sonucunda kalınlığın artması ile şekillendirme sınır diyagramının arttığı açıkça görülmüştür. Malzeme kalınlığındaki 1 mm'lik artış şekillendirme sınır diyagramına %10'luk bir artış olarak yansımaktadır. Tek eksenli birim şekil değiştirmenin meydana geldiği grafiğin sol tarafında en yüksek küçük birim şekil değişimi % -12,12 ile 1,8 mm kalınlığındaki numunede görülürken 1,3 mm (% -7,76) ve 0,8 mm (% -7,99) kalınlığındaki numunelerin küçük birim şekil değiştirme oranı hemen hemen aynı değerde tespit edilmiştir. Küçük birim şekil değişiminin sıfır olduğu ekseninde ise en yüksek büyük birim şekil değişimi % 33,26 ile 1,8 mm'de, en düşük değer ise % 23,08 ile 0,8 mm kalınlığında tespit edilmiştir. Çift eksenli birim şekil değişiminin meydana geldiği grafiğin sağ tarafında ise en yüksek büyük birim şekil değişimi oranı %37,12 ile 1,8 mm'de, en düşüğü ise % 28,2 ile 0,8 mm'de meydana gelmiştir. Yine sağ tarafta en yüksek ve en düşük küçük birim şekil değiştirme oranları sırasıyla %13,29 ile 1,8 mm'de ve %9,56 ile 1,3 mm'de tespit edilmiştir. Tek eksenli birim şekil değişiminin meydana geldiği grafiğin sol tarafında ŞSD'ler birbirine paralel eğilimler gösterirken aynı durum sağ taraf için geçerli olmamıştır. Bu durum da kalınlık değişiminin malzemede iki eksenli şekil değişimine daha çok etki ettiği anlamına gelmektedir. 0,8 mm ile 1,3 mm kalınlığındaki malzemeler arasındaki fark sol tarafta grafik

boyunca sadece % 1'lik bir değişim gösterirken, orta noktada % 7 olan fark, küçük birim şekil değişiminin artması ile % 4' lere kadar düşmektedir. Genel olarak bakıldığında 0,8 ile 1,3 mm arasında yaklaşık olarak % 7 oranında bir fark tespit edilmiştir. 1,3 ile 1,8 mm arasındaki fark ise % 3 olarak belirlenmiştir. Bu değerler 1 mm sacdan sonraki kalınlık artışının şekillendirmeye daha az etkisi olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak DP600 malzemelerde 1 mm kalınlık artışının (0,8-1,8 mm) ŞSD' yi % 10 artırdığı tespit edilmiştir.

Yapılan literatür taramasında incelenen ve formülleri daha önce verilmiş (Eşitlik 1.3) Keeler ve Braizer tarafından çelikler için geliştirilen model [39] DP600 malzemeler için uygulanmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de verilmektedir.



Şekil 4.11 Farklı kalınlıklardaki malzemeler için Keeler modelinin deneysel sonuçlarla karşılaştırması

Kullanılan model düşük karbonlu çelikler için geliştirilmesine rağmen, Yine düşük karbonlu çelik sınıfından olan DP600 için çok doğru sonuç vermemiştir. 0,8 mm kalınlığındaki malzeme için deney ile model arasındaki fark küçük birim şekil değişiminin

sıfır olduğu orta ekseninde % 1 olarak tespit edilirken, 1,3 mm kalınlık için bu fark % 3 olarak belirlenmiştir. 1,8 mm kalınlığındaki malzemede ise deney ve model arasında % 1,5'lik bir fark bulunmaktadır. Grafiğin sağ tarafında küçük birim şekil değişimi arttıkça ŞSD'ler arasındaki farkın dikkate değer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. 0,8 mm için küçük birim şekil değişiminin % 0 olduğu noktada fark %1 iken küçük birim şekil değişiminin %11 olduğu noktada %5'e çıkmıştır. 0,8 mm için % 4 olan bu fark, 1,3 mm için % 2, 1,8 mm kalınlık için ise % 6 olarak tespit edilmiştir. Aynı durum sol taraf için geçerli olmamaktadır ve küçük birim şekil değişim oranı düştükçe büyük birim şekil değişim oranlarındaki farklar değişim göstermemektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel verilerle modelden hesaplanan ŞSD grafikleri, özellikle diyagramın sol tarafında birbirine paralel eğilim gösterirlerken, sağ taraf için aynı durum söz konusu değildir. Başka bir ifadeyle kullanılan model tek eksenli şekil değişimi için daha hassas ve doğru cevap vermiştir.

BÖLÜM V

SONUÇ

Bu tez kapsamında otomotiv endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahip DP600 malzemelere farklı deformasyon hızlarında çekme ve şekillendirme sınır diyagramı deneyleri yapılmıştır. Şekillendirme deneyleri yarı küresel zımba ile gerçekleştirilmiş ve deney sonrası deformasyonların ölçümü ile her bir şekillendirme hızı için ŞSD grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlarda, malzemenin mekanik özelliklerinde deformasyon hızının artması ile dikkate değer bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.

- Malzemenin mekanik özellikleri incelendiğinde pekleşme katsayısının deformasyon hızı arttıkça düştüğü gözlemlenmiştir.

- Şekillendirme sınır diyagramı deneylerinin dataları incelendiğinde deformasyon hızı arttıkça uygulanan kuvvetin arttığı gözlemlenmiştir.

- Farklı hızlarda elde edilen ŞSD grafikleri karşılaştırıldığında, grafikler arasında dikkate değer bir değişimin olmadığı gözlemlenmiştir. Tek eksenli birim şekil değiştirmenin gerçekleştiği grafiğin sol tarafında, iki eksenli birim şekil değiştirmenin meydana geldiği sağ tarafa göre birbirine daha yakın sonuçların ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak DP600 malzemelerin iki eksenli birim şekil değiştirme durumları, tek eksene göre şekillendirme hızına daha duyarlıdır.

- Yapılan ileri uniform uzama analizlerinde DP600 malzemenin şekillendirme hızı arttıkça boyun vermenin azaldığı ve bu nedenle ileri uniform uzamasının düştüğü belirlenmiştir.

- Literatürde mevcut olan bilgileri ve modelleri yapılan deney sonuçları da desteklemiş ve çift fazlı çeliklerde kalınlık arttıkça şekillendirme kabiliyetinin de arttığı tespit edilmiştir.

- Çift fazlı çelik saclarda kalınlıktaki 1 mm'lik artışla şekillendirme oranının yaklaşık %10 artacağı görülmüştür.

- Modelle deneysel verilerin karşılaştırılması sonucu Keeler ve Braizer tarafından hazırlanan modelin çift fazlı çeliklerde tek eksenli şekil değişimi için etkili olduğu, çift

eksenli Şekil değişimini tam anlamıyla karŐılamadıęı görülmüştür. Başka bir ifadeyle bu model çift fazlı çelikler için tek eksenli birim Şekil değiştirmeye daha duyarlıdır. Buradan yola çıkarak ŞSD' nin sağ tarafı yani çift eksenli gerilmeler için modellerin araŐtırılması gerektiği ve ileriki çalışmalarda çift fazlı çelikleri daha çok destekleyecek modeller geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıŐtır.

- Yapılan literatür incelemesinde çelikler için geliştirilen bir çok Şekillendirme sınır diyagramları modellerine rastlanmıŐtır. İleriki çalışmalarda bu modeller daha detaylı olarak incelenmeli ve DP600 ve yeni nesil çeliklere göre hesaplanmalı, deneysel sonuçlarla karŐılaŐtırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Anderson D., Application and Repairability of Advanced High Strength Steels, America Iron and Steel Institute, 2008
- [2] <http://www.autosteel.org/AM/Template.cfm?Section=PDFs&TEMPLATE=/CM/ContentDisplay.cfm&CONTENTFILEID=1004>
- [3] Bleck, W., Deng, Z., Papamantellos, K. and Gusek, O.C., A comparative study of the forming-limit diagram models for sheet steels, Journal of Materials Processing Technology, 83, 223-230, 1998.
- [4] Doege, E., Dröder, K. and Griesbach, B., On the development of new characteristic values for the evaluation of sheet metal formability, Journal of Materials Processing Technology, 71, 152-159, 1997.
- [5] Iwamoto, T., Tsuta, T. and Tomita, Y., Investigation on deformation mode dependence of strain induced martensitic transformation in TRIP steels and modelling of transformation kinetics, International Mechanical Sciences, 40, 173-182, 1998.
- [6] Huh, H., Kim, B. S., Song, H.J. and Lim, H.J., Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body, International Mechanical Sciences, 50, 918-931, 2008.
- [7] Wei, X., Fu, R. and Li, L., Tensile deformation behavior of cold-rolled TRIP-aided steels over large range of strain rates, Materials Science and Engineering A, 465, 260-266, 2007.
- [8] Shan, K.T., Li, H.S., Zhang, G.W. and Xu, G.Z., Prediction of martensitic transformation and deformation behavior in the TRIP steel sheet forming, Materials and Design, 29, 1810-1816, 2008.
- [9] Bayram, A., Uğuz, A. and Ula, M., Effects of microstructure and notches on the mechanical properties of dual-phase steels, Materials Characterization 43, 259–269, 1999.
- [10] Demir B. ve Erdoğan M., Çift-fazlı çeliklerde martensit hacim oranı ve morfolojisinin çekme özellikleri üzerine etkisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Ekim 1998.

- [11] Acarer M., Hayat F. ve Demir B., Çift-fazlı çeliklerde, martenzit hacim oranı (MHO) ve farklı başlangıç yapılarının çekme özelliklerine etkisi, 1. Uluslararası Mesleki ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi, Ankara, 2005.
- [12] Davies R.G., Influence of martensite composition and content on the properties of dual-phase steels, *Metalurgical Transaction*, 18A, 671-679, 1978.
- [13] Hayat F., Demir B. ve Acarer M., Çift-fazlı çeliklerin nokta direnç kaynağında mho ve kaynak süresinin kaynak kabiliyeti üzerine etkisi, 7. Uluslararası Kırılma Konferansı 553-560, 19-21, Kocaeli, 2005.
- [14] Hayami S. and Furukawa T., A family of high strength , Cold Rolled Steels, in *Microalloying 75*, Session 2A, Vanitec, 78-87, London, 1975.
- [15] Hayami S. and Furukawa T., A family of high strength cold rolled steels, *Proceedings of Micro-Alloying (Internatinal Symposium on HSLA)*, 311-320, Washington D.C, 1975.
- [16] Rashid M.S., Gm 980x-A unique high strength sheet steel with superior formability, *SAE*, Preprint 760206, 938-949, 1976.
- [17] Rashid M.S., Relationship between steel microstructure and formability, formable HSLA and dual-phase steels, Ed. By. Davenport A.T., *AIME*, 1-29, Newyork, 1977.
- [18] Nabil A. and Chin C. Deformation cracteristics of dual phase steel, materials and processing for the factory of the future, *ASM Pekia Chapter*, March, 1989.
- [19] Speich G.R., Dual phase steels heat treating, *ASM Handbook*, 5. baskı, 424-429, 1997.
- [20] Erdoğın M., Effect of austenite dispersion on phase transformatin in dual phase steel, *Scripta Met.*, 48, 501-506, 2003.
- [21] Erdoğın M., The effect of new ferrit content on tensile fracture behaviour of dual phase steels, *Journal of Materials Science*, 37, 3623-3630, 2002.
- [22] Chen H.C. and Chenge, G.H., Effect of martenzite strength on the tensile strength of dual phase steels, *Journal of Materials Science* 24, 1991-1994, 1989.
- [23] Sudhakar, K.V. and Dwarakadasa, E.S., A study on fatigue crack growth in dual phase 244 martenzitic steel in air environment, *Academy Of Science*, Vol:23, Indian, 193-199, 2000.

- [24] Tomita, Y., Effect of morphology of second-phase martensite on tensile properties of Fe-0.1C dual phase steels, *Journal of Materials Science*, 25, 5179–5184, 1990.
- [25] Cai, X. L., Feng, J. and Owen, W. S., The dependence of some tensile and fatigue properties of a dualphase steel on its microstructure, *Metallurgical Transaction A*, 16, 1405–1415, 1985.
- [26] Acarer, M., Düşük karbonlu çelik saclardan çift-fazlı çelik üretimi ve mho'nun çekme özellikleri üzerine etkisi, *Teknoloji Dergisi*, 8, 3, 237-244, 2005.
- [27] Kadkhodapour, J., Butz, A. and Ziaei R. S., Mechanisms of void formation during tensile testing in a commercial dual-phase steel, *Acta Materialia*, 59, 2575–2588, 2011.
- [28] Sun, X., Choi, K.S., Soulami, A., Liu, W.N. and Khaleel, M.A., On key factors influencing ductile fractures of dual phase (DP) steels, *Materials Science and Engineering A*, 526, 140–149, 2009.
- [29] Juan-juan, L., Wen, S., Qun-Iei, H. and Lin, L., Heat treatment of cold-rolled low-carbon si-mn dual phase steels, *Journal of Iron and Leel Research International*, 17, 54-58, 2010.
- [30] Fredrikssona, K., Melandera, A. and Hedmana M., influence of prestraining and ageing on fatigue properties of high-strength sheet steels, *International Journal of Fatigue*, 10, 139-151, 1988.
- [31] Gündüz, S. and Tosun, A., Influence of straining and ageing on the room temperature mechanical properties of dual phase steel, *Materials and Design*, 29, 1914-1918, 2008.
- [32] Khondkera, R., Mertens, A. and McDermid, J.R., Effect of annealing atmosphere on the galvanizing behavior of a dual-phase steel, *Materials Science and Engineering A*, 463, 157-165, 2007.
- [33] Speich, G.R. ,Dual Phase Steels, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys ASM Handbook, 10. edition, 1, 424-429, 1996.
- [34] Ozturk, F. and Lee, D., Experimental and numerical analysis of out-of-plane formability test, *Journal of Material Processing Technology*, 170, 247-253, 2005.

- [35] Keeler, S.P. and Backofen, W.A., Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches, Trans. ASM, 56 (No. 1), 25-48, 1963.
- [36] Goodwin, G.M., Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, Society of Automotive Engineers, Paper 680093, 1968.
- [37] Hill, R., On discontinuous plastic states with special reference to localized necking in thin sheets, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1, 19-30, 1952.
- [38] Swift, H.W., Plastic instability under plane stress, journal of the mechanics and physics of solids, Vol.1, 1-18, 1952.
- [39] Keeler, S.P. and Brazier, W.G., Relationship between laboratory material characterization and press shop formability, In Microalloying 75 Proceedings, Union Carbide Corp., New York, 517-528, 1977.
- [40] Öztürk, F., Analysis of forming limits using ductile fracture criteria, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, USA, 2002.
- [41] ASAME Technology LLC, ASAME The Automated Strain and Measurement Environment Reference Manual Version 4.12, January, 2008.
- [42] Uysal, E. ve Öztürk, F., Örnek bir uygulama ile yüksek mukavemetli çeliklerde şekillendirme sınır diyagramlarının elde edilmesi, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir, 11-12 Kasım 2010.