

**YÜKSEK MUKAVEMETLİ DP800 ÇELİĞİNİN ILIK
ŞEKİLLENDİRME SONRASI GERİ ESNEME DAVRANIŞININ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

NURKAN KARABULUT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. NURİ ŞEN**

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK MUKAVEMETLİ DP800 ÇELİĞİNİN ILIK
ŞEKİLLENDİRME SONRASI GERİ ESNEME DAVRANIŞININ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Nurkan KARABULUT 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. Vedat TAŞDEMİR
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 17/07/2025

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.

17 Temmuz 2025

Nurkan KARABULUT

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 Arş. Gör. Tolgahan CİVEK'e de şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi 2021.06.05.1178 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

17 Temmuz 2025

Nurkan KARABULUT

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
KISALTMALAR.....	viii
SİMGELER	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2. MATERYAL VE YÖNTEM	5
2.1. MALZEME.....	5
2.2. BÜKME DENEYLERİ İÇİN DENEYSEL DÜZENEK.....	5
2.3. GERİ ESNEME ÖLÇÜMLERİ.....	6
2.4. BÜKÜLMÜŞ NUMUNELERİN TEK EKSENLİ ÇEKME TESTLERİ.....	7
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	9
3.1. SICAKLIK, BASKI PLAKA KUVVETİ VE YAĞLAMA KOŞULUNUN GERİ ESNEME ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	9
3.2. SICAKLIĞIN ŞEKİLLENDİRME SONRASINDA MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİSİ	14
4. SONUÇ	16
5. KAYNAKLAR	17
ÖZGEÇMİŞ.....	21

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. a) Bükme deneyleri için deney düzeneği, b) Kalıpların kalın cam elyaf yünü ile kaplanması.....	6
Şekil 2.2. Şapka şeklinde bükülmüş numunelerde geri esneme ölçümleri	7
Şekil 2.3. Düzleştirilmiş parçalardan çıkarılan çekme testi numunelerinin geometrik boyutları (boyutlar mm cinsindedir).....	8
Şekil 2.4. a) Çekme testi cihazı, b) Düzleştirilmiş sac metal ve bükülmüş numunelerin her iki tarafından çıkarılan çekme testi numuneleri.....	8
Şekil 3.1. Bükme sıcaklığının ve baskı plaka kuvvetinin DP800 çeliğinin duvar geri esneme açıları üzerindeki etkisi	10
Şekil 3.2. Bükme sıcaklığının ve baskı plaka kuvvetinin flanş geri esneme açıları üzerindeki etkisi	11
Şekil 3.3. Bükme sıcaklığının ve baskı plaka kuvvetinin yan duvar yarıçapı üzerindeki etkisi	11
Şekil 3.4. Yağlama koşulu olarak teflon kullanıldığında sıcaklığın duvar ve flanş geri esneme açılarındaki etkisi	12
Şekil 3.5. Yağlama koşulunun a) duvar geri geri esnemesi θ_w , b) flanş geri geri esnemesi θ_f ve c) yan duvar yarıçapı ρ üzerindeki etkisi	13
Şekil 3.6. a) Teflon ve b) grafitin yağlama koşulu olarak kullanıldığı bükülmüş çeliklerin 3 boyutlu taranmış profilleri.....	13
Şekil 3.7. Şekillendirme sonrası DP800 çeliğinin çekme gerilmesi-gerinim grafikleri: a) Alt kısım, b) Yan duvar.....	15

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Kalıp düzeninin geometrik boyutları.....	6
Çizelge 3.1. Şapka şeklinde bükülmüş çeliğin alt kısmı ve yan duvar bölgelerinden elde edilen çekme mukavemeti değerleri.....	15



KISALTMALAR

AHSS	Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik
DP	Çift fazlı çelik
MART	Martenzitik çelik
CP	Karmaşık fazlı çelik



SİMGELER

θ_f

θ_w

ρ

İletkenlik

Güç (elektrik akımı için)

Siemens



ÖZET

YÜKSEK MUKAVEMETLİ DP800 ÇELİĞİNİN ILIK ŞEKİLENDİRME SONRASI GERİ ESNEME DAVRANIŞININ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Nurkan KARABULUT

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Nuri ŞEN

Temmuz 2025, 20 sayfa

Geri esneme, şekillendirilmiş ürünlerin montajını bozarak zaman ve enerji kaybına yol açtığı için bükme işleminin en istenmeyen sonuçlarından biri olarak bilinir. Bükme işleminden önce sac metali ısıtmak, geri geri esnemenin istenmeyen etkilerini hafifletmek için endüstride kullanılan yaygın bir uygulamadır. Ancak birçok durumda, sıcak veya ılık bükme işleminin bükülmüş ürünlerin mekanik özellikleri üzerindeki sonuçları tam olarak dikkate alınmaz. Bu çalışmada, sıcak bükme işleminin, baskı plaka kuvveti ve yağlama gibi işlem parametreleriyle birleştirilmesinin DP800 çeliğinin geri geri esneme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ek olarak, bükülmüş numunelerin mekanik sonrası özellikleri araştırılmıştır. Bunun için, DP800 çelik saclar dört farklı sıcaklıkta (25 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C), üç farklı baskı plaka kuvveti (25bar, 75bar, 125 bar) ve iki farklı yağlayıcı (grafit ve teflon) kullanılarak şapka biçimli bir ürüne bükülmüştür. Sonuçlara göre, baskı plaka kuvvetinin azaltılması ve daha iyi bir yağlayıcı (teflon) uygulanmasının daha düşük bir geri geri esneme elde etmede önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Ek olarak, sıcaklığın artırılması geri geri esnemeyi olumlu etkilerken, sıcak sıcaklıklarda bükülmüş sacların mekanik sonrası mukavemetinin önemli bir azalma göstermediği bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler: Geri Esneme, DP800, Ilık Şekillendirme, Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler, U-bükme

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF POST WARM-FORMED SPRINGBACK BEHAVIOUR AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH DP800 STEEL

Nurkan KARABULUT

Düzce University

Graduate School, Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nuri ŞEN

July 2025, 20 pages

Springback is known for being one of the most undesired outcomes of a bending process since it disrupts the assembly of formed products, wasting time and energy. Heating the sheet metal before the bending process is a broad application used in the industry to alleviate the undesired effects of spring-back. However, in many cases, the consequences of a warm or hot bending process on the mechanical properties of bent products are not thoroughly considered. In this study, the effects of the warm bending process combined with the process parameters such as blank-holder force and lubrication on the spring-back behaviour of DP800 steel have been examined. Additionally, the post-mechanical properties of the bent specimens have been investigated. For this, sheets of DP800 steels have been bent to a hat-shaped product at four different temperatures (25 °C , 200 °C , 300 °C , 400 °C), by using three different blank-holder force (25bar, 75bar, 125 bar), and two different lubricants (graphite and teflon). According to the results, it has been shown that reducing the blank-holder force and applying a better lubricant (teflon) has had a considerable effect in attaining a lower spring-back. Additionally, while increasing the temperature has positively impacted the spring-back, it has been found that the post-mechanical strength of bent sheets at warm temperatures has not shown a significant reduction.

Keywords: Spring-back, DP800, Warm Forming, Advanced High Strength Steels, Hat-shaped bending

1. GİRİŞ

Sac metallerde eğilme prosesi, ev aletlerinden havacılık ve uzaya kadar birçok endüstride yaygın olarak karşılaşılan bir durumdur [1–3]. Ancak, ürün türünden bağımsız olarak, bükülmüş sac metalin diğer bileşenlerle sorunsuz bir şekilde çalışması veya amaçlanan yerine kolayca monte edilebilmesi için tasarım toleranslarına uyması gerekmektedir [4]. Sac metallerin geri yaylanma davranışını anlamak, bu tasarım toleranslarını sağlayabilmek adına önemli bir rol oynamaktadır. Sıcak bükme yöntemi gibi yöntemlerden yararlanılarak geri yaylanma davranışının istenmeyen etkilerinin hafifletilmesi, bu tasarım toleranslarına uyumu önemli ölçüde kolaylaştırmaktadır. Ancak sıcak bükme yöntemi ile şekillendirilen ürünlerde toleransların uygunluğu kadar, şekillendirilen ürünlerin mekanik özelliklerinin de incelenmesi büyük önem taşımaktadır.

Otomobil gövde parçalarında yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımının gerekliliği, otomotiv endüstrisinin tasarımlarında Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler'i (AHSS) kullanmasını kritik hale getirmiştir [5, 6]. Ancak, Dual Phase (DP), Complex Phase (CP), TRIP-destekli DP, Martensit (MART) gibi AHSS'lerin sağladığı mukavemet seviyelerindeki artışla birlikte, geri esnemedan kaynaklanan sorunlar da artış göstermiştir [7]. Bu nedenle, AHSS'lerin çeşitli bükme işlemlerinde geri esneme davranışını anlamak veya istenmeyen etkilerini azaltmak için birçok araştırma çalışması yürütülmüştür. Sac metal boyunca düzensiz gerilim dağılımlarının, geri esneme olgusunun ana nedeni olduğu bilinmektedir [8]. Bu bağlamda, sac metale uygulanan optimum miktarda baskı plaka kuvveti, düzgün bir gerilim dağılımı sağlamanın ve böylece şekillendirilmiş sac metallerdeki geri esnemeyi kontrol etmenin basit yollarından biridir [8]. Bu nedenle, birçok araştırma çalışması [8–12], geri esnemeyi azaltmak için sac metal üzerinde optimum bir baskı kuvveti sağlamaya odaklanmıştır. Düzgün olmayan gerilim dağılımları nedeniyle sac metal üzerinde oluşan eğilme momentleri, geri esneme oluşumunun temel itici güçlerinden biridir. Sac metal üzerindeki eğilme momentlerindeki azalma, geri esnemeyi ortadan kaldırmada etkili bir şekilde yardımcı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, Lawanwong ve diğerleri tarafından yürütülen bazı çalışmalarda [13], [14], tersine eğme yöntemi kullanarak geri esnemeyi ortadan kaldırmak için negatif eğilme momentleri oluşturmaya odaklanmışlardır. Bazı çalışmalarda [15–18], araştırmacılar,

geri esnemeyi azaltmak için gerilim gevşetme yaklaşımıyla şekillendirme aşamasında sac metal üzerinde oluşan büyük gerilimleri azaltmaya odaklanmıştır.

Geri esnemeyi azaltmanın etkili bir yolu, sac levhayı ısıtarak bükme işlemi sırasında oluşan büyük akış gerilimlerini azaltmaktır [19]. Sıcaklığın farklı malzemeler üzerindeki etkisiyle ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır, ancak yalnızca birkaç çalışma AHSS'ler için sıcaklığın geri esneme davranışı üzerindeki etkisini ele almıştır. Örneğin, Eyercioglu ve arkadaşları [20], V bükme işleminde DOCOL 1500M çeliği için geri esnemeyi azaltmak amacıyla lokal bir ısıtma sistemi kullanmışlardır. Yazarlar, 500 °C'ye kadar sıcaklık artışıyla geri esnemede önemli bir azalma sağlanabileceğini göstermişlerdir, ancak 500 °C'nin üzerinde küçük bir seviyede ileri esneme olduğunu belirtmişlerdir. Küçüktürk ve arkadaşları [21], farklı sıcaklıklarda DOCOL 1400M çeliğinin V bükümü için benzer bir sıcak lokal ısıtma yöntemi uygulamışlardır. Sıcaklık artışıyla birlikte geri esnemede önemli bir azalma olduğunu belirtmişlerdir. Saito ve diğerleri [19], 980 MPa nano-çökme ile güçlendirilmiş çelik için V-bükme ve U-bükme işlemlerinde sıcak bükme işlemini uygulamışlar ve sıcaklığın artırılmasının her iki bükme işlemi için de geri esnemenin azalmasına yol açtığını gözlemlemişler, ancak geri esnemedeki azaltmanın daha düşük şekillendirme hızlarında daha belirgin olduğunu kaydetmişlerdir. Sen ve diğerleri [22], V-bükme işleminde MART1400 çeliğinin geri esneme davranışı üzerindeki sıcaklığın etkisini analiz ortamında araştırmışlar ve 375 °C ve 475 °C sıcaklıklarında geri esnemede önemli bir azaltmanın gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir.

Literatürde gösterildiği gibi, bükme sıcaklığının geri esneme üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu genel olarak kabul edilmektedir. Geri esnemenin ortadan kaldırılması, tasarım toleranslarına uymak için bir bükme işleminde temel bir ihtiyaç olmasına rağmen, geri esnemeyi hafifletmek için uygulanan yöntemler nedeniyle sac metalin şekillendirme sonrasındaki mekanik özelliklerinde meydana gelen kazanç veya kayıp da genellikle ihmal edilen, ancak ciddiye alınması gereken ciddi bir durumdur. Sun ve arkadaşları tarafından yürütülen bir çalışmada [23], MS1180 çeliğinin sıcak bükme işleminden sonra sac metalin şekillendirme sonrası mekanik özellikleri incelenmiş, ancak yazarlar bu çalışmalarında geri esneme oluşumundan bahsetmemişlerdir. Bu çalışmada, 400 °C'ye kadar sıcaklık etkisi altında DP800 çeliğinin şapka şeklindeki bir bükme işlemi neticesindeki geri esneme davranışı ve bununla birlikte şekillendirme sonrasındaki mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca, ılık sıcaklıklarda baskı plaka kuvvetinin ve yağlama yönteminin geri esneme üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

1.1. LİTERATÜR ÖZETİ

Son yıllarda çelik sacların kullanım alanlarının artması ile beraber yapılan pek çok araştırmada geri esneme davranışının sac metal endüstrisinde önemli bir yer tutması ile beraber geri esneme davranışını önlemeye dair çalışmalar da artmıştır. Bazı çalışmalarda geri esneme davranışına dair esneme değerini minimuma indirmek için malzeme ve kalıp fonksiyonlarına odaklanarak ideal kalıp ölçülerine dair veriler sunulmuştur [1,2]. Ancak geri esneme davranışı en aza indirgense dahi tamamen yok edilememektedir. Dolayısıyla geri esneme davranışını önceden tahmin edebilir olmak önem arz etmektedir. Çünkü geri esneme tam olarak önceden tahmin edilemez ise bu sac malzemelerde uygun şekillendirme için tekrarlanan denemelere yol açarak hem zaman hem de maliyet değerlerini artıracaktır [3]. Bu gibi nedenler geri esneme davranışının önemini vurgulamakla beraber, konuyla ilgili araştırmaların bazıları aşağıda sunulmuştur. [7] numaralı çalışmada kullanılan sac malzemelerin geri esneme davranışlarında kullanılan bükme işlemine ve bükme işleminin kuvvetine göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Sac malzemelere minimum bükme işlemi uygulandığında geri esneme davranışının daha yüksek olduğu, bükme kuvvetinin artırılması ile beraber de geri esneme davranışının ciddi oranda azaldığı gözlemlenmiştir. Yani bükme kuvvetinin etkisi bükme radiusunun artışı ile beraber artmıştır. Geri esneme davranışını engellemek veya bu durumu minimize etmek için birçok farklı yöntem uygulanmaktadır. Bu kapsamda literatürde yapılan çalışmalar ele alındığında, U-bükme ve V-bükme gibi kalıp sistemlerinde sürtünme katsayısının artışı ve baskı plakası kuvvetinin artırılması ile beraber geri yaylanmanın azaldığı, kalıp boşluğu arttıkça geri yaylanmanın arttığı, bununla beraber artan sac kalınlığı ile birlikte geri esnemenin artma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak yüksek baskı plakası kuvveti ile yüksek sürtünme katsayısı, daha fazla gerilme kuvveti ile etki edeceği için geri yaylanmanın azaldığı; fakat baskı plakası kuvveti ve sürtünme katsayısının yüksek olduğu değerlerde kullanılan sac üzerinde yıpranma meydana gelerek aşırı incelme ve yırtılma görüldüğü sonucuna ulaşılmıştır [28]. [7] numaralı çalışmada sac malzemelerde uygulanan V-bükme işleminde, sac kalınlığının artması ile ters orantılı olarak geri esneme davranışının azaldığı, kullanılan zımba ucu üzerinde bükme süresinin artması ile beraber geri esneme davranışının da azaldığı ifade edilmiştir.

[14] numaralı çalışmaya göre özellikle son dönemde U şeklindeki parçaların üretim hassasiyetinin artırılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu gerçeğe birlikte bu tür parçalar genellikle U-bükme işlemiyle üretilmektedir. Ancak literatür incelendiğinde asimetrik U-bükme işlemi hakkında araştırma eksikliği olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, geri yaylanma özelliklerinin incelenmesi ve kontrolünde işleme zorluğuna neden olur. U şeklindeki parçaların asimetrisinin bükme ve ters bükme gerilim dağılımında ve geri yaylanma özelliklerinde değişikliklere neden olduğu, dolayısıyla U şeklindeki bir parçada asimetrik tırnak yançapları veya bükme açıları ile, bir taraftaki bükme açısı ve yarıçapındaki değişiklikler, farklı geri yaylanma özelliklerine ve diğer tarafta elde edilen bükme açısının simetrik U şeklindeki parçalara kıyasla daha farklı olmasına neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. MALZEME

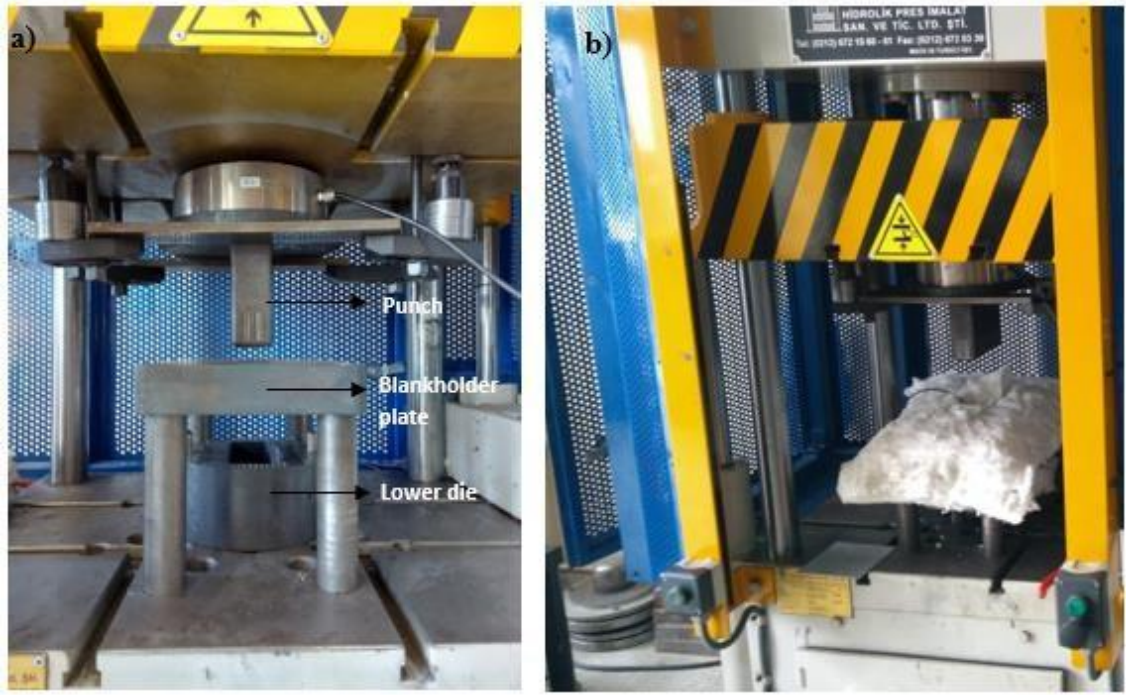
Bu çalışmada, U bükme testleri için 1,2 mm kalınlığında DP800 çelik malzeme kullanılmıştır. Sac metal, numunelere ısı girişini ortadan kaldırmak için su jeti kesme yöntemi ile 119 x 114 mm'lik dikdörtgen parçalar hâlinde kesilmiştir. Numunelerin uzun kenarı sac metalin haddelenme yönüne paralel olacak şekilde kesilmiştir.

2.2. BÜKME DENEYLERİ İÇİN DENEYSEL DÜZENEK

Bükme deneyleri, 50/20 ton kapasiteli çift etkili bir hidrolik pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney düzeni Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu deney düzeneğinde, sac metal malzeme alt kalıp üzerine yerleştirilmiş ve alt kalıp yukarı doğru hareket ettirilerek malzemenin alt kalıp ve baskı plakası arasında sıkıştırılması sağlanmıştır. Deneylerde, DP800 çeliğinin geri esneme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak için sac metale üç farklı baskı plaka kuvveti (25, 75, 125 bar) uygulanmıştır.

Bükme işlemi ise **zımba** sabit bir hızda (1 mm/dk) aşağı yönlü hareketi ile birlikte sac malzemeyi deforme etmesiyle sağlanmıştır. Bükme işleminin son aşamasında, sac malzeme 12,8 ton'luk bir kuvvetle itilmektedir. Şekillendirme işlemi tamamlandıktan sonra, zımba herhangi bir gecikme olmaksızın yukarı yönlü hareket ettirilmiş ve bükülmüş olan sac metal kalıp boşluğundan çıkarılmıştır.

Yüksek sıcaklıkta bükme deneylerini gerçekleştirmek için alt kalıp, seramik bantlı bir ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Deneyler dört farklı sıcaklıkta (25 °C, 200 °C, 300 °C ve 400 °C) gerçekleştirilmiştir. Alt kalıbın sıcaklığı, içine yerleştirilen bir termokupl ile sürekli olarak ölçülmüştür. Kalıp yüzeylerinden ısı kaybını azaltmak için kalıplar, kalın bir cam elyaf yünü ile kaplanmıştır (Şekil 2.1b). Kalıp düzeninin geometrik boyutları Çizelge 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. a) Bükme deneyleri için deney düzeneği, b) Kalıpların kalın cam elyaf yünü ile kaplanması

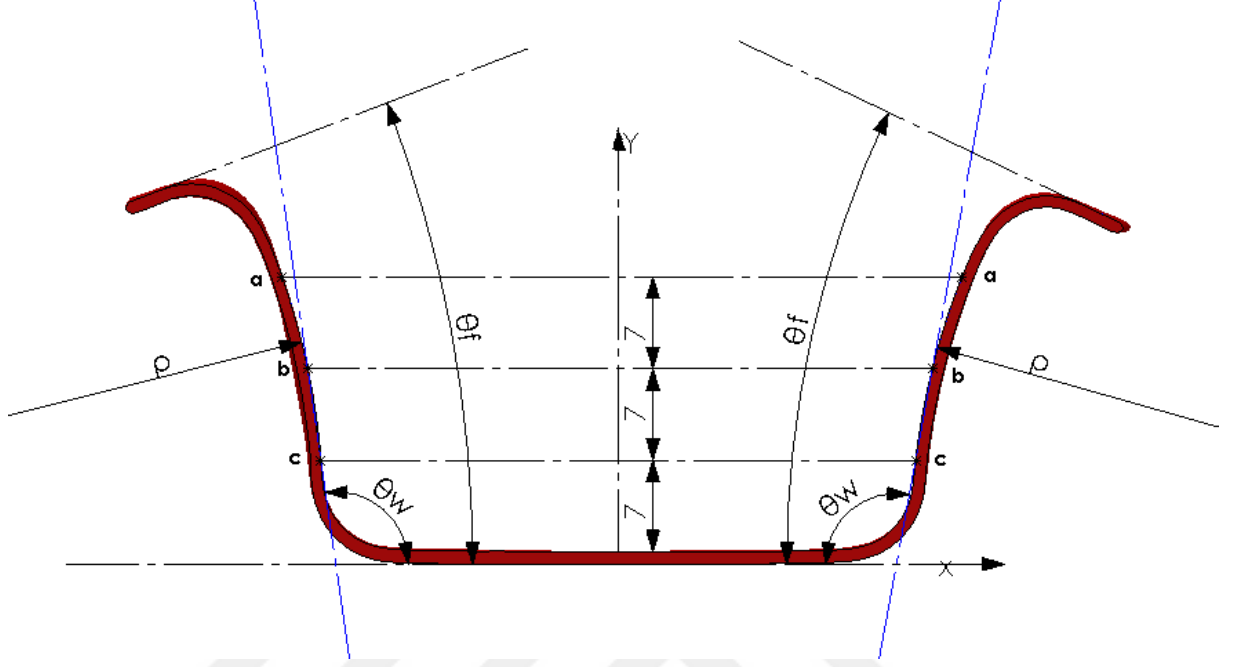
Çizelge 2.1. Kalıp düzeninin geometrik boyutları

Kalıp parçaları	Boyutlar (mm)
Kalıp yarıçapı	5
Zimba yarıçapı	5
Kalıp genişliği	45
Zimba genişliği	48

2.3. GERİ ESNEME ÖLÇÜMLERİ

Bükülmüş numunelerin profilleri, 3D tarama cihazı ile detaylı bir şekilde taranmıştır. Tarama sonuçları, test numunelerinin geri esneme miktarlarını ölçmek için CAD yazılımına aktarılmıştır. Her bir numunede üç farklı geometrik parametre ölçülmüştür: Duvarlardaki geri esneme açısı (θ_w), flanşlardaki geri esneme açısı (θ_f) ve yan duvar eğriliği (ρ). Her bir geometrik parametre, numunelerin her iki tarafından ölçülmüş ve ortalama değerleri kaydedilmiştir. Ölçüm tekrarlanabilirliğini sağlamak için numunenin taranmış kesiti, tercihen birbirinden 7 mm mesafede bulunan üç farklı kesik çizgiyle bölünmüş (Şekil 2.2) ve bu kesik çizgilerin numune kesitiyle kesiştiği noktalara a, b ve c

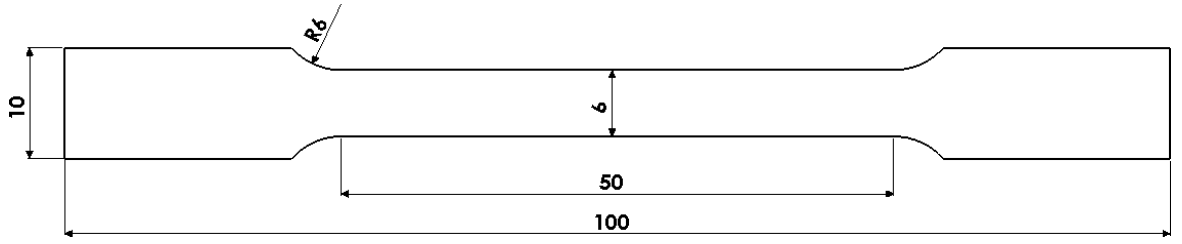
isimleri verilmiştir. θ_w açısı, bc çizgisi ile X eksenini arasındaki açı olarak ölçülmüştür. θ_f açısı, flanş yüzeyini takip eden doğrusal çizgi ile X eksenini arasındaki açı olarak ölçülmüştür. ρ ise, a, b ve c noktalarından geçen çemberin yarıçapı ile ölçülmüştür.



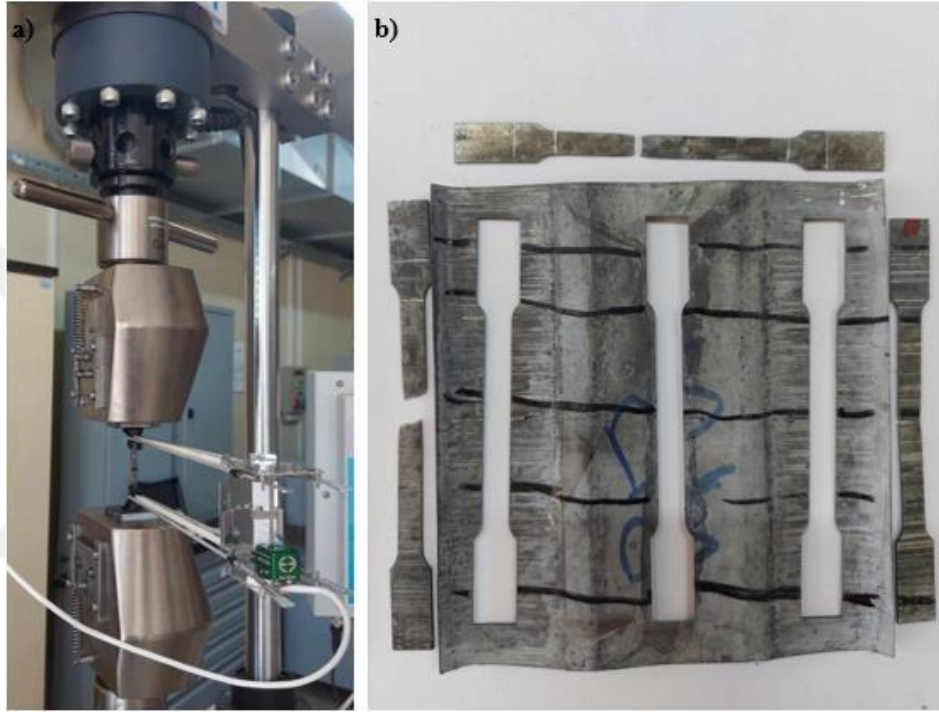
Şekil 2.2. Şapka şeklinde bükülmüş numunelerde geri esneme ölçümleri

2.4. BÜKÜLMÜŞ NUMUNELERİN TEK EKSENLİ ÇEKME TESTLERİ

U formunda bükülmüş numunelerin bükme işlemi sonrasındaki mekanik özellikleri, numunelerin duvarlarından alınan tek eksenli çekme testleri ile ölçülmüştür. U formunda bükülmüş olan numunelerden çekme testi numunesi alabilmek için bükülmüş numuneler önce düzleştirilmiş ve tel erozyon kesim yöntemi ile düzleştirilmiş sac metalden çekme testi numuneleri çıkarılmıştır. Kesilen çekme testi numunelerinin geometrik boyutları Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Kesilen çekme testi numuneleri, $0.001s^{-1}$ gerinim hızında tek eksenli çekme testi cihazında test edilmiştir. Çekme testleri sırasında gerinim değerleri, Epsilon marka ekstansiyometre cihazı ile kaydedilmiştir. Elde edilen çekme mukavemeti değerleri kaydedilmiş ve DP800 çeliğinin şekillendirme sonrasındaki mekanik özellikleri incelenmiştir. **Error! Reference source not found.**'de bükülmüş numuneden alınan çekme testi



Şekil 2.3. Düzleştirilmiş parçalardan çıkarılan çekme testi numunelerinin geometrik boyutları (boyutlar mm cinsindedir).

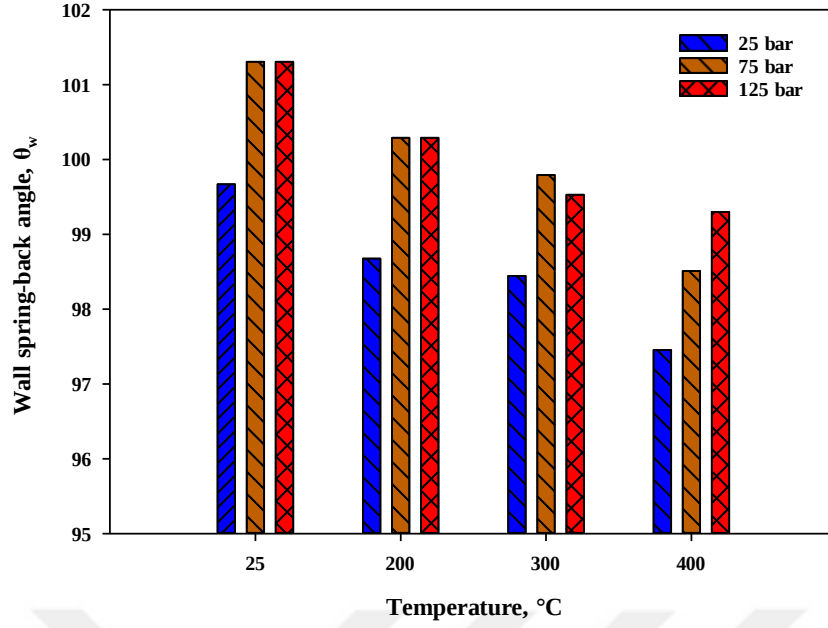


Şekil 2.4. a) Çekme testi cihazı, b) Düzleştirilmiş sac metal ve bükülmüş numunelerin her iki tarafından çıkarılan çekme testi numuneleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. SICAKLIK, BASKI PLAKA KUVVETİ VE YAĞLAMA KOŞULUNUN GERİ ESNEME ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

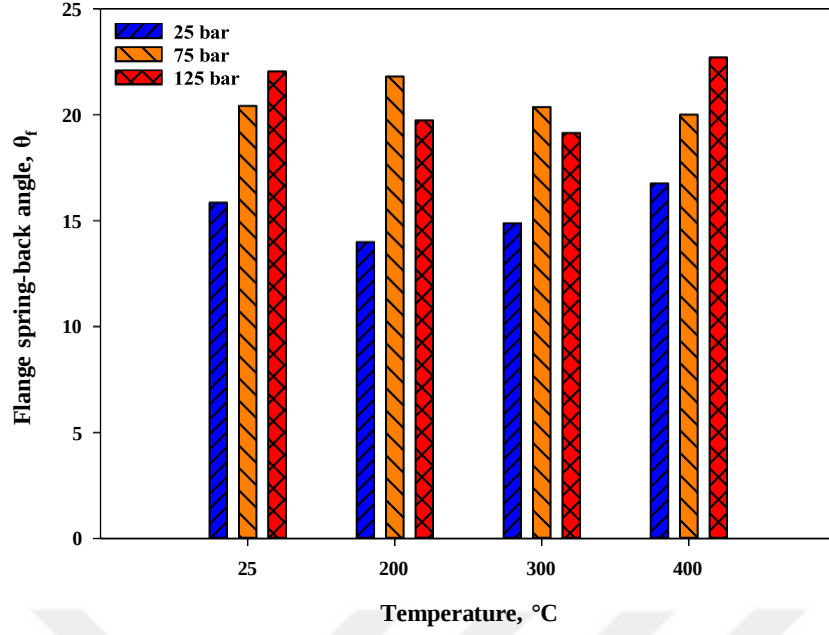
Geri esneme, yüksek akış gerilmeleri, deformasyon sırasında oluşan gerilme dağılımlarındaki düzensizlikler veya bükme momentlerindeki düzensizliklerden kaynaklanan bir durumdur [8–14]. Şekillendirme aşamasında oluşan büyük akış gerilmeleri, AHSS çeliklerinde geri esnemenin daha şiddetli bir şekilde meydana gelmesine yol açmaktadır. DP800 çeliğinin farklı sıcaklık ve baskı plaka kuvvetleri altında U formunda bükülmesi neticesinde duvarlarında meydana gelen geri esneme açıları Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, sıcaklık seviyesi arttıkça duvarlardaki geri esneme açılarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Duvarlardaki geri esnemenin, 400 °C'ye kadar düzenli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. 400 °C'de, 25, 75 ve 125 bar baskı plaka kuvvetleri uygulandığında, duvarlarda meydana gelen geri esneme açılarının oda sıcaklığı seviyesine göre sırasıyla %2.22, %1.22 ve %0.99 düşüş gösterdiği anlaşılmıştır. Ayrıca, en küçük duvar geri esneme açısının, tüm sıcaklık seviyeleri için 25 bar baskı plaka kuvveti kullanıldığında oluştuğu gözlemlenmiştir. 25 bar baskı plaka kuvveti ile 25°C, 200°C, 300°C ve 400°C sıcaklıklarda yapılan bükme testlerinde, geri esnemenin aynı sıcaklıklarda 125 bar baskı plaka kuvveti ile yapılan testlere kıyasla sırasıyla %1.61, %1.61, %1.09 ve %1.85 oranında daha az oluştuğu görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada, baskı plaka kuvvetinin azaltılmasının, U formunda bükülen DP800 çeliğinin duvarlarında gözlemlenen geri esnemeyi önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür.



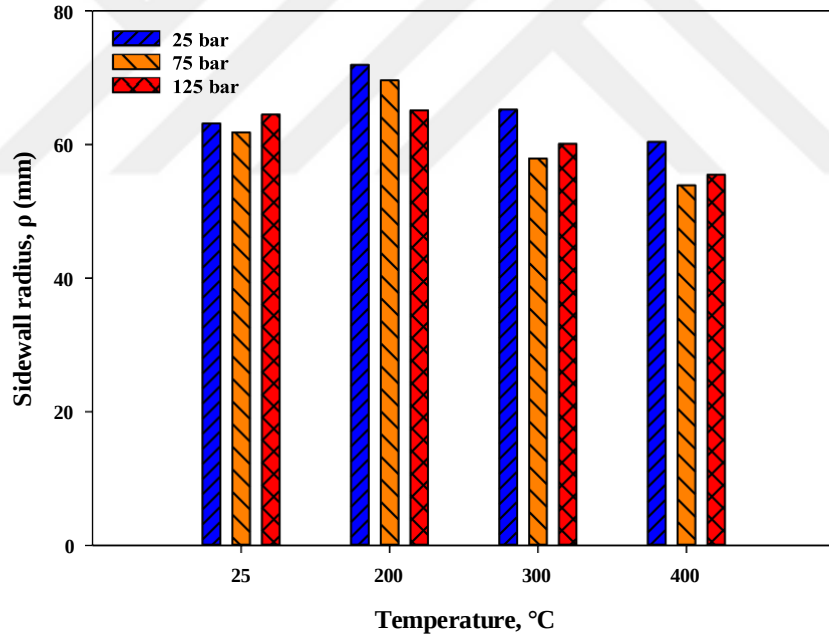
Şekil 3.1. Bükme sıcaklığının ve baskı plaka kuvvetinin DP800 çeliğinin duvar geri esneme açıları üzerindeki etkisi.

DP800 çeliğinin flanş bölgelerinde görülen geri esneme açıları, Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sıcaklığın, flanşlardaki geri esneme açıları üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. Değerler, her baskı plaka kuvveti için benzer seviyelerde dalgalanmıştır. Baskı plaka kuvvetinin, flanşlardaki geri esneme açısı üzerindeki etkisi, duvarlardaki geri esneme açılarındaki etkisine benzer bir sonuç göstermiştir; kuvvetin azalması, flanşlardaki geri esneme açılarını düşürmüştür. 25 bar baskı plaka kuvveti uygulandığında, 25°C, 200°C, 300°C ve 400°C sıcaklıklarında flanşlardaki geri esneme, aynı sıcaklıklar altında 125 bar baskı plaka kuvveti ile yapılan bükmelere kıyasla sırasıyla %28.11, %29.08, %22.27 ve %26.22 oranında azalmıştır. 75 bar ve 125 bar baskı plaka kuvvetlerinin uygulandığı bükmelerde ise, geri esneme değerleri oldukça benzer olup, en büyük fark 400 °C sıcaklığında %0.79 olarak kaydedilmiştir.

Yan duvar yarıçapı değerleri, Şekil 3.3Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Sıcaklığın, yan duvar yarıçapı değerleri üzerinde de düzenli bir artış ya da azalış etkisi yaratmadığı görülmüştür. En yüksek yan duvar yarıçapı değerleri, her sıcaklıkta en düşük baskı plaka kuvveti uygulandığında elde edilmiştir. Elde edilen bu bulgu, daha önceki bir çalışmada [22], küçük baskı plaka kuvvetlerinin bükülmüş parçalarda yan duvar yarıçapını iyileştirdiğini gösteren sonuçlarla uyumludur.



Şekil 3.2. Bükme sıcaklığının ve baskı plaka kuvvetinin flanş geri esneme açıları üzerindeki etkisi.

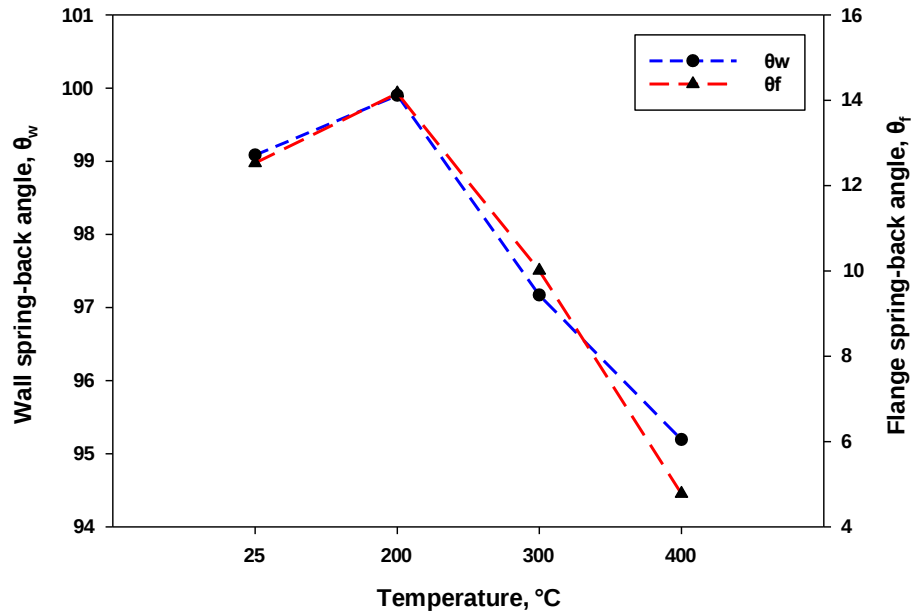


Şekil 3.3. Bükme sıcaklığının ve baskı plaka kuvvetinin yan duvar yarıçapı üzerindeki etkisi.

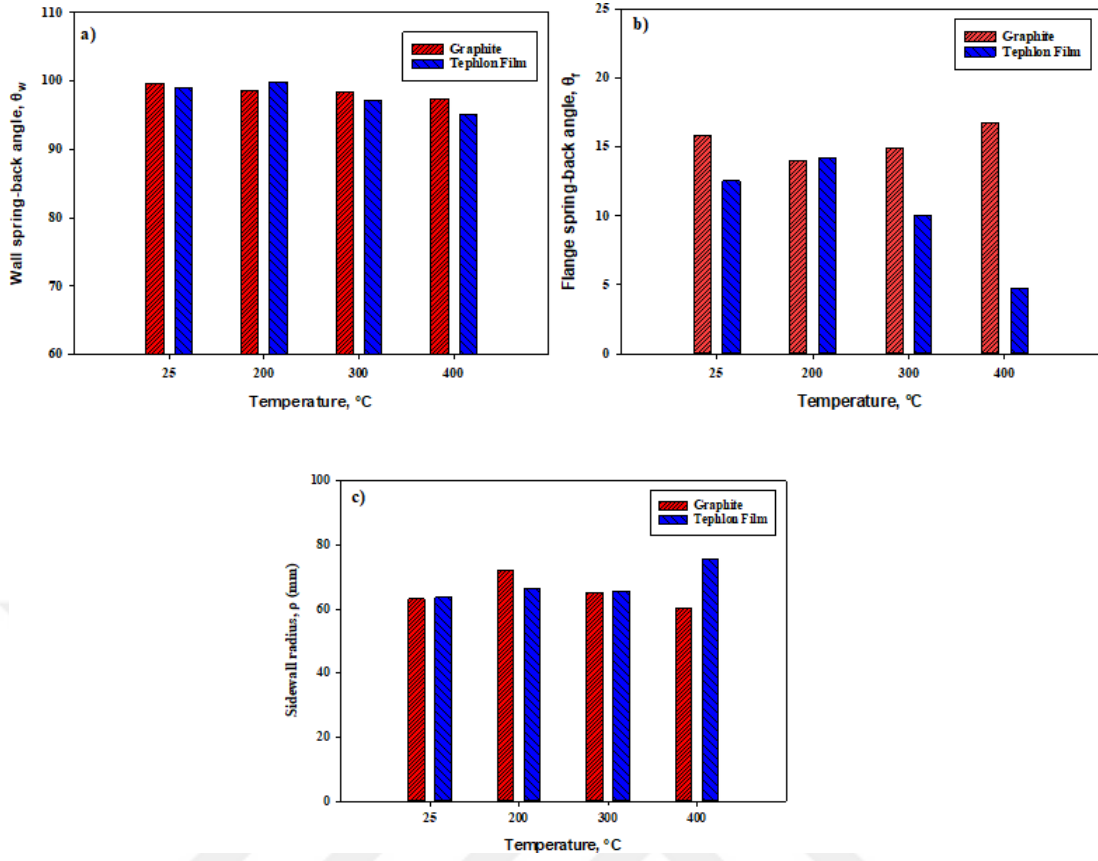
Sonuç olarak, sıcaklığın ve baskı plaka kuvvetinin DP800 çeliğinin geri esnemesi üzerinde önemli ölçüde iyileşme sağladığı anlaşılmıştır. Bilindiği üzere DP çeliklerinde akış gerilmesinin yüksek sıcaklıklarda azalmaktadır [24], bu da geri esnemeyi önemli ölçüde etkileyen önemli bir parametredir [20, 24, 25]. Diğer yandan, daha düşük baskı

plaka kuvveti ile geri esnemenin azalmasının arkasındaki nedenin, bükme işleminin son aşamasında uygulanan ütüleme kuvveti ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Daha önce gerçekleştirilmiş olan bir çalışmada, bükme işleminin sonunda uygulanan bir ütüleme kuvvetinin, negatif bükme momentleri oluşturarak geri esnemeyi azalttığı gösterilmiştir [22]. Bu nedenle, baskı plaka kuvvetindeki azalma, ütüleme aşamasında daha yüksek bir negatif moment oluşumuna sebep olarak geri esneme etkisini azalttığı düşünülmüştür.

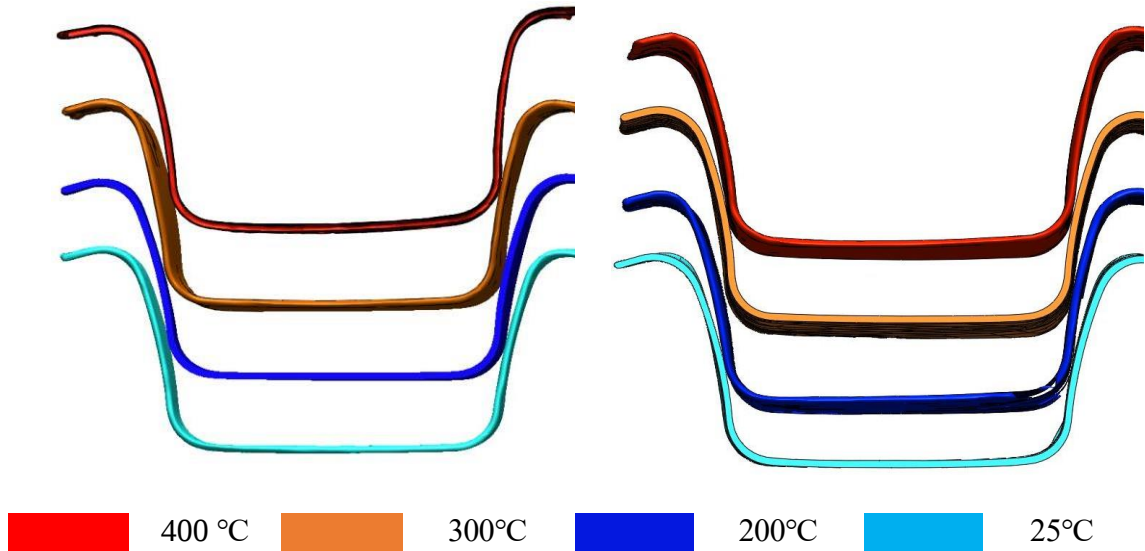
Çalışma kapsamında sıcaklık ve yağlama koşulunun geri esneme üzerindeki etkileri de dikkate alınmış ve en iyi sonuçlar (daha düşük geri esneme) en düşük baskı plaka kuvvetinin uygulanması neticesinde elde edilmiştir. Bu nedenle yağlama koşulunun etkisi yalnızca en düşük baskı plaka kuvveti altında incelenmiştir. Şekil 3.4’de teflon yağlayıcı kullanıldığında DP800 çeliğinin duvar ve flanş bölgelerinde görülen geri esneme davranışı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sıcaklığın 200 °C’den sonra, hem duvarlar hem de flanşlarda geri esnemenin belirgin bir şekilde azaldığı anlaşılmaktadır. Grafit ve teflon yağlayıcıları kullanılarak elde edilen geri esneme sonuçlarına bakıldığında, teflonun, grafitle kıyasla daha düşük bir geri esneme sağladığı görülmüştür (Şekil 3.5). Şekil 3.6’da teflon ve grafit yağlayıcı kullanılarak bükülen DP800 çeliğinin 3D tarama ile elde edilmiş olan görüntüleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere teflon yağlayıcı kullanarak yağlayıcı koşulunun iyileştirilmesi ile birlikte geri esneme de belirgin bir şekilde azalma olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 3.4. Yağlama koşulu olarak teflon kullanıldığında sıcaklığın duvar ve flanş geri esneme açılarındaki etkisi



Şekil 3.5. Yağlama koşulunun a) duvar geri geri esnemesi θ_w , b) flanş geri geri esnemesi θ_f ve c) yan duvar yarıçapı ρ üzerindeki etkisi



Şekil 3.6. a) Teflon ve b) grafitin yağlama koşulu olarak kullanıldığı bükülmüş çeliklerin 3 boyutlu taranmış profilleri

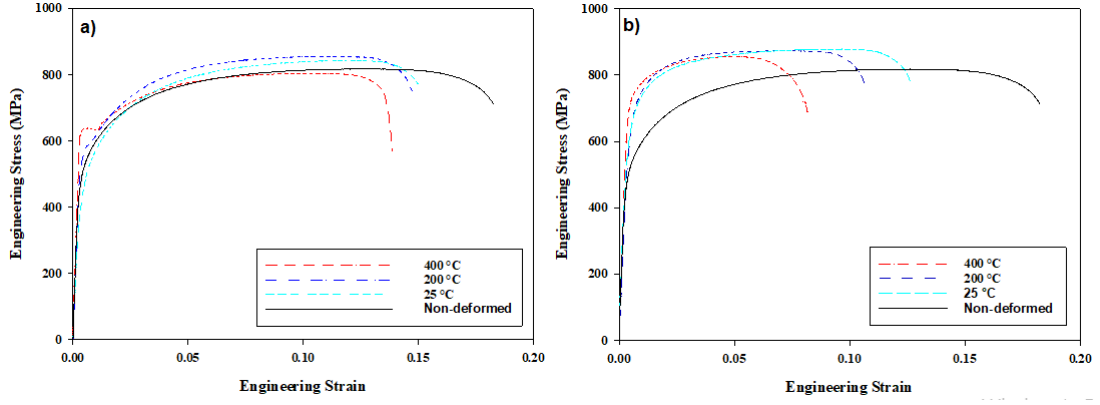
3.2. SICAKLIĞIN ŞEKİLENDİRME SONRASINDA MALZEMENİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE OLAN ETKİSİ

Sac metaller, şekillendirme işlemleri sırasında bir dizi karmaşık deformasyona maruz kalmaktadır ve bu durum, baskı plaka kuvveti, sıcaklık gibi parametrelerle birlikte sac metalin şekillendirme sonrasındaki mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada, DP800 çeliğinin şekillendirme sıcaklığının, şekillendirme sonrasındaki mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 3.7’de DP800 çeliğinin farklı sıcaklıklar altında şekillendirme sonrası çekme gerilme-gerinim grafikleri gösterilmiş, testlerden elde edilen çekme mukavemeti değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Kesme işlemi sırasında test numunesinde oluşan çentik nedeniyle, 300 °C’deki çekme testi sonuçları paylaşılmamıştır.

25 °C ve 200 °C sıcaklıklarında deforme edilen çeliğin, alt kısmı ve yan duvarlarında elde edilen çekme mukavemeti değerlerinin, şekillendirilmemiş DP800 çeliğinin çekme mukavemeti değerlerine kıyasla daha yüksek bir seviyede olduğu, ancak birbirleri ile kıyaslandığında benzer seviyelerde mukavemet değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Ancak, sıcaklığın 200 °C’den 400 °C’ye arttırılması ile birlikte, çekme mukavemeti değerlerinde 200 °C sıcaklığındaki mukavemet değerlerine kıyasla belirgin bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Buna rağmen, alt kısımda ölçülen çekme mukavemeti, şekillendirilmemiş DP800 çeliğinin mukavemet değerine kıyasla yalnızca %1.59 oranında bir azalma göstermiş, yan duvarlarda ise bu değer %4.77 oranında artış göstermiştir.

Bilindiği üzere, DP çeliğinin yaklaşık 400 °C gibi yüksek sıcaklıklarda temperlenmesi, deformasyon sertleşme yeteneğini önemli ölçüde azaltmaktadır [26]. Dolayısıyla, 400 °C’deki çekme mukavemetindeki azalma, DP çeliğinin temperleme etkisinden kaynaklanmış olabilir. Ayrıca, deformasyon sırasında oluşan pekleşme mekanizmasının mukavemeti artırabildiği bilinmektedir [27]. Bükme işlemi sırasında, çeliklerin yan duvar bölgeleri karmaşık ve yüksek deformasyonlara maruz kalırken, alt kısımda daha az bir deformasyon oluşmaktadır. Bu nedenle, şekillendirilmemiş çeliğe kıyasla yan duvarlar ve alt kısımlar boyunca daha yüksek çekme mukavemeti değerlerinin elde edildiği, ancak alt kısımlardaki mukavemet artışının, bu bölgede düşük bir deformasyon gerçekleşmesi

sebebiyle daha minimal kaldığı düşünülmüştür.



Şekil 3.7. Şekillendirme sonrası DP800 çeliğinin çekme gerilmesi-gerinim grafikleri:

a) Alt kısım, b) Yan duvar

Çizelge 3.1. Şapka şeklinde bükülmüş çeliğin alt kısmı ve yan duvar bölgelerinden elde edilen çekme mukavemeti değerleri

Sıcaklık (°C)	Çekme Mukavemeti (MPa)		Şekillendirilmemiş Çelik Mukavemeti (MPa)
	Alt kısım	Yan duvar	
25	843	878	817
200	855	873	
400	804	856	

4. SONUÇ

Bu çalışmada, DP800 çeliği, ılık sıcaklık seviyelerinde (25 °C, 200 °C, 300 °C ve 400 °C), üç farklı baskı plaka kuvveti ve iki farklı yağlama koşulu altında U formunda bükülmüştür. Sıcaklık, baskı plaka kuvveti ve yağlama koşulunun DP800 çeliğinin geri esnemesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Çalışma kapsamında uygulanan bükme prosesinde baskı plaka kuvvetinin azaltılmasının, DP800 çeliğinin geri esnemesini önemli ölçüde azalttığı anlaşılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen en düşük geri esneme değerleri, 25 bar baskı plaka kuvveti kullanıldığında elde edilmiştir. 75 bar ve 125 bar baskı plaka kuvvetleri kullanıldığında ise, geri esneme değerlerinde önemli bir değişim görülmemiştir.
- Deformasyon sıcaklığındaki artışın, bükülmüş olan DP800 çeliğin duvarlarındaki geri esneme açısını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Ancak sıcaklığın, çeliğin flanş ve yan duvarlarında oluşan geri esneme davranışına belirgin bir katkı sağladığı gözlemlenmemiştir.
- Yağlama koşulu olarak Teflon film kullanılması, Grafit yağlama ile karşılaştırıldığında daha iyi geri esneme sonuçları vermiştir.
- DP800 çeliğinin şekillendirme sonrasındaki çekme mukavemeti değerlerinde önemli ölçüde bir düşüş yaşanmadığı gözlemlenmiştir. Çekme mukavemetindeki en büyük düşüş 400 °C'de şekillendirilen çeliğin alt kısmında gözlemlenmiştir. DP800 çeliğinin yan duvarlarındaki çekme mukavemeti değerlerinin düşüşün aksine deformasyon sertleşmesi etkisi sayesinde belirli bir oranda artış gösterdiği görülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- [1] A. Ivanišević, M. Milutinović, B. Štrbac, and P. Skakun, “Stress state and springback in V-bending operations,” *J. Technol. Plast.*, vol. 39, no. 2, pp. 157–168, 2013.
- [2] H. Yang, H. Li, Z. Zhang, M. Zhan, J. Liu, and G. Li, “Advances and trends on tube bending forming technologies,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–12, 2012
- [3] R. K. Gnanasekaran, B. Shanmugam, V. Raja, and S. Kathiresan, “Multi-disciplinary Optimizations on Flexural Behavioural Effects on Various Advanced Aerospace Materials: A validated investigation,” *Mater. Plast.*, vol. 59, no. 1, pp. 223–242, 2022
- [4] C. P. Nikhare, “Springback Analysis in Bilayer Material Bending,” 2017, vol. Volume 2:, p. V002T02A062, doi: 10.1115/IMECE2017-70549.
- [5] J. Zhao and Z. Jiang, “Thermomechanical processing of advanced high strength steels,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 94, pp. 174–242, 2018
- [6] O. Çavuşoğlu, C. Yuce, and H. Aydın, “Mechanical characterization and microstructure of fiber laser welded TWIP980 steel depending on welding speed and focal distance,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 274, no. December 2022, 2023
- [7] S. Karabulut, İ. Esen, and E. Şahin, “Springback Prediction Performance and Experimental Analysis in the V-bending Process of SCGADUB1180 Advanced High-Strength Steel,” *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 441–453, 2024
- [8] G. Liu, Z. Lin, Y. Bao, and J. Cao, “Eliminating springback error in U-shaped part forming by variable blankholder force,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 11, no. 1, pp. 64–70, 2002
- [9] R. Padmanabhan, J. Sung, H. Lim, M. C. Oliveira, L. F. Menezes, and R. H. Wagoner, “Influence of draw restraining force on the springback in advanced high strength steels,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, no. SUPPL. 1, pp. 177–180, 2008, doi: 10.1007/s12289-008-0020-5.

- [10] G. Ingarao, R. Di Lorenzo, and F. Micari, "Analysis of stamping performances of dual phase steels: A multi-objective approach to reduce springback and thinning failure," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 10, pp. 4421–4433, 2009
- [11] P. Chen and M. Koç, "Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 190, no. 1–3, pp. 189–198, 2007
- [12] H. Chalal, S. G. Racz, and T. Balan, "Springback of thick sheet AHSS subject to bending under tension," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 59, no. 1, pp. 104–114, 2012
- [13] K. Lawanwong, H. Hamasaki, R. Hino, and F. Yoshida, "A novel technology to eliminate U-bending springback of high strength steel sheet by using additional bending with counter punch," *Procedia Eng.*, vol. 81, no. October, pp. 957–962, 2014
- [14] K. Lawanwong, H. Hamasaki, R. Hino, and F. Yoshida, "Double-action bending for eliminating springback in hat-shaped bending of advanced high-strength steel sheet," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, no. 5–6, pp. 1855–1867, 2020
- [15] H. Xie et al., "Investigation on transient electrically-assisted stress relaxation of QP980 advanced high strength steel," *Mech. Mater.*, vol. 93, pp. 238–245, 2016
- [16] H. Lim, M. G. Lee, J. H. Sung, J. H. Kim, and R. H. Wagoner, "Time-dependent springback of advanced high strength steels," *Int. J. Plast.*, vol. 29, no. 1, pp. 42–59, 2012
- [17] J. H. Yu and C. W. Lee, "Study on the time-dependent mechanical behavior and springback of magnesium alloy sheet (AZ31B) in warm conditions," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 14, 2021, doi: 10.3390/ma14143856.
- [18] K. Prasad, B. Venkatesh, H. Krishnaswamy, D. K. Banerjee, and U. Chakkingal, "On the interplay of friction and stress relaxation to improve stretch-flangeability of dual phase (DP600) steel," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 32, pp. 154–169, 2021
- [19] N. Saito, M. Fukahori, D. Hisano, H. Hamasaki, and F. Yoshida, "Effects of temperature, forming speed and stress relaxation on springback in warm forming of high strength steel sheet," *Procedia Eng.*, vol. 207, pp. 2394–2398, 2017

- [20] O. Eyercioglu, S. Alacaci, and M. Aladag, "Experimental Investigation of Springback of Locally Heated Advanced-High Strength Steels," *Int. J. Res. - GRANTHAALAYAH*, vol. 9, no. 3, pp. 269–277, 2021
- [21] G. Küçüktürk, M. Tahta, H. Gürün, and İ. Karaaslan, "Gelişmiş üretim süreçlerinde kalite kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması," **Güzelbahçe Mühendislik Dergisi**, vol. 3, no. 2, pp. 51–62, 2022.
- [22] N. Şen, T. Civek, and Ö. Seçgin, "Experimental, analytical and parametric evaluation of the springback behavior of MART1400 sheets," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 10, pp. 1–11, 2022
- [23] Y. Sun, K. Wang, D. J. Politis, G. Chen, and L. Wang, "An experimental investigation on the ductility and post-form strength of a martensitic steel in a novel warm stamping process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 275, no. May 2019, p. 116387, 2020
- [24] N. Saito et al., "Elasto-viscoplastic behavior of 980 MPa nano-precipitation strengthened steel sheet at elevated temperatures and springback in warm bending," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 146–147, no. November 2017, pp. 571–582, 2018
- [25] B. Wei, Y. Wei, F. Zhang, K. He, X. Dang, and R. Du, "Influence of different heating methods on springback of mild steel plate during dieless bending process," *Procedia Manuf.*, vol. 50, no. 2019, pp. 318–323, 2020
- [26] N. Sen and 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," *Ironmak. Steelmak.*, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1080/03019233.2022.2036083.
- [27] V. Colla, M. De Sanctis, A. Dimatteo, G. Lovicu, A. Solina, and R. Valentini, "Strain hardening behavior of dual-phase steels," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 40, no. 11, pp. 2557–2567, 2009
- [28] Ozek, Cebeli, and Vedat Tasdemir. "Experimental investigation of the effects of blank holder force and die surface angle on the warm deep drawing of AA5754-O alloy." *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 32.1 (2017): 171-179.

- [29] Şen, Nuri, Vedat Taşdemir, and Ömer Seçgin. "Investigation of formability of HC380LA material via the TPIF-RL incremental forming method." *Ironmaking & Steelmaking* 47.10 (2020): 1199-1205.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı Nurkan KARABULUT
Yabancı Dili İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Yıl
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2025
Lisans	Makine Mühendisliği	Aksaray Üniversitesi	2020
Lise	Yok	Hakan Yutkun Anadolu Lisesi	2015