



**ABKANT PRESLERDE
BÜKÜM PARAMETRELERİNİN TESPİTİ**

Fatih AYDEMİR



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ABKANT PRESLERDE BÜKÜM PARAMETRELERİNİN TESPİTİ

Fatih AYDEMİR

Doç. Dr. Ali DURMUŞ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2017
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Fatih AYDEMİR tarafından hazırlanan “Abkant Preslerde Büküm Parametrelerinin Tespiti” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Ali DURMUŞ

Başkan: Doç. Dr. Ali DURMUŞ

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

İmza



Üye: Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR

Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

İmza



Üye: Yrd. Doç. Dr. Hüseyin LEKESİZ

Bursa Teknik Üniversitesi,
Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım


Prof. Dr. Ali BAYRAM

Enstitü Müdürü

07/08/2017

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

.../.../.....

Fatih AYDEMİR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ABKANT PRESLERDE BÜKÜM PARAMETRELERİNİN TESPİTİ

Fatih AYDEMİR

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali DURMUŞ

Bu çalışma kapsamında öncelikle, Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L yassı malzemelerin levha kalınlığı, şekillendirme boyu ve mekanik özelliklerine bağlı olarak bükme kuvvetleri ve büküm anında üst tabladaki (punch) yer değişimlerini zamana bağlı olarak tespit edebilen ve aynı zamanda şekillendirme sırasında bükülme açısının değişiminin belirlenmesine imkan veren görüntü işleme sistemlerini de içeren hidrolik abkant pres tabanlı özel bir deney düzeneğinin tasarımı (HAPDD) ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalatı gerçekleştirilerek devreye alınan HAPDD’de iki farklı malzeme çeşidiyle yapılan deneylerin sonucunda bükülecek malzemenin ebatları ve mekanik özelliklerine bağlı olarak bükme kuvvetleri ve yer değiştirme miktarları tespit edilmiştir. Kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri her iki malzeme çeşidi için de eş zamanlı olarak çizilerek malzemelerin büküm anındaki davranışları detaylı olarak incelenmiştir. Bükme deneylerinden önce malzemelerin çekme deneyleri yapılarak malzeme mekanik özellikleri belirlenmiş ve bu değerler üretici firmaların teorik olarak verdiği özellikler ile kıyaslanmıştır. Bu değerler arasındaki farkların büküm parametrelerine etkisi incelenmiştir. Deneylerde havada büküm tekniği kullanılmıştır. Deneyler iki farklı üretici firmadan tedarik edilen yassı malzemeler ile farklı kalınlık, farklı uzunluk, farklı büküm açısı, farklı büküm hızı ve farklı kanal açıklıklarında yapılarak tüm bu parametrelerin bükme kuvvetleri ve yer değiştirme miktarlarına etkileri ortaya konmuştur. Her iki malzeme türü için büküm anındaki kuvvet ve yerdeğiştirmeye miktarları tedarikçi firmaya, bükme hızına, bükme açısına ve bükme boyuna göre belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Hardox 400, Paslanmaz AISI 304L, deney düzeneği, bükme parametreleri, havada büküm, çekme deneyi, bükme deneyi

2017, xi + 104 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DETERMINATION OF BENDING PARAMETERS IN PRESS BRAKES

Fatih AYDEMİR

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali DURMUŞ

In this study, firstly a specific hydraulic press brake based test setup (HPBTS) with image processing systems was designed and manufactured which is able to determine the bending forces and the punch displacements of Hardox 400 and Stainless AISI 304L depending on the plate thickness, plate length and mechanical properties. It is also possible to determine the change of the bending angle during forming. Experiments carried out by HPBTS were made with two different types of materials from which bending forces and displacement amounts were obtained depending on the dimensions and mechanical properties of the material. Force-time and force-displacement graphs were plotted simultaneously for both types of materials and mechanical behavior of the materials during the bending were examined in detail. Prior to the bending tests, tensile tests of the materials were carried out and the results were compared with the ones obtained from the manufacturers. The effect of the difference between these values on the bending parameters was investigated. Air bending technique was used during the experiments. Experiments were carried out with varying thickness, length, bending angle, bending velocity and channel opening values with the flat materials supplied from two different manufacturers. The effect of these parameters on the bending forces and displacement amounts were revealed. For both materials, the forces and displacements at the bending moment were determined depending on the supplier, bending speed, bending angle and bending length.

Key words: Hardox 400, Stainless AISI 304L, experimental setup, bending parameters, air bending, tensile test, bending test

2017, xi + 104 pages.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi ve tez çalıőmasını hazırlamamda destek ve yardımlarından dolayı danışman hocam Doç. Dr. Ali DURMUŞ, Doç. Dr. Kadir ÇAVDAR ve Arő. Gör. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN'a teşekkür ederim.

Tez çalıőmalarım kapsamında maddi manevi her türlü desteği sunan Durmazlar Makine A.Ő. ve mesai arkadaşlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Tez alıőması, Durmazlar Makine tarafından yürütölen TÜBİTAK TEYDEB 1501 Sanayi Ar-Ge projeleri destekleme proğamı kapsamında 3130075 proje numaralı, "Abkant Preslerde Bükme Parametrelerinin Deneysel Optimizasyonu" adlı proje ile birlikte yürütölmüş olup projenin belirli kısımları tez konusu olarak ele alınmıştır. Bu bakımdan TÜBİTAK'a ayrıca teşekkür ederiz.

Fatih AYDEMİR

.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Materyal	27
3.2. Hidrolik Abkant Pres Deney Düzeneği (HAPDD)	28
3.2.1. Kameralı Açık Ölçüm Cihazı.....	29
3.2.2. Lineer Potansiyometre	30
3.2.3. Lineer Encoder	30
3.2.4. Dinamik Yük Hücresi	31
3.3. Çekme Deneyleri.....	34
3.4. Bükme Deneyleri	36
3.5. Veri Toplama	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	46
4.1. Çekme Deneyleri Sonuçları	46
4.2. Bükme Deneyleri Sonuçları	50
5. SONUÇ	99
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	104

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

R_e, σ_{akma}	Akma dayanımı
R_d	Alt kalıp kenar yarıçapı
W, V	Alt kalıp kanal açıklığı
ε	Birim şekil değiştirme
HB	Brinell sertliği
α_0, θ	Büküm açısı
L	Büküm boyu
v	Büküm hızı
F_b, F	Büküm kuvveti
R_o	Büküm yarıçapı
\emptyset	Çap
$R_m, \sigma_{çekme}$	Çekme dayanımı
L_0	Çekme deneyi çubuğu yükleme öncesi ilk boyu
d_0	Çekme deneyi çubuğu yükleme öncesi ilk çapı
$\alpha_f, \Delta\theta$	Geri yaylanma açısı
R_{if}	Geri yaylanma yarıçapı
A5	Kopma uzaması oranı
u, y, Δx	Üst kalıp deplasmanları
R, R_p, R_i	Üst kalıp yarıçapı
t_0, s	Yassı malzeme kalınlığı
t	Zaman

Kısaltmalar

Açıklama

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
CNC	Bilgisayarlı Nümerik Kontrol
HAPDD	Hidrolik Abkant Pres Deney Düzeneği
NC	Nümerik Kontrol
TS	Türk Standartları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Hidrolik abkant pres kısımları ve eksenlerin şematik görünümü (Anonim 2006).....	3
Şekil 2.2. Üst tabla deplasmanı ve maksimum kuvvet kombinasyonu (Mentink ve ark. 2003).....	7
Şekil 2.3. Bükme kuvveti ve üst kalıp deformasyonu arasındaki ilişki (Singh ve ark. 2004).....	9
Şekil 2.4. Deneyler için kullanılan test cihazı ve V-Büküm kalıp seti (Thipprakmas 2010).....	9
Şekil 2.5. Sonlu elemanlar yöntemi simülasyon metodu (Thipprakmas 2010).....	10
Şekil 2.6. Sac kalınlığı ile geri yaylanma arasındaki ilişki (Fei ve ark. 2006).....	13
Şekil 2.7. Alt kalıp kanal genişliği ile geri yaylanma arasındaki ilişki (Fei ve ark. 2006).....	13
Şekil 2.8. SPFC 980Y malzemesi için üst tabla stroğu ile büküm açısının değişimi (Mori ve ark. 2007).....	14
Şekil 2.9. Büküm hızının üst kalıp açısındaki değişime etkisi (Mori ve ark. 2007).....	14
Şekil 2.10. Büküm sonrası sacta hesaplanan ve ölçülen yer değiştirme miktarları (Vin ve ark. 1999).....	15
Şekil 2.11. Hesaplanan ve ölçülen üst kalıp deplasmanları (Vin ve ark. 1999).....	16
Şekil 2.12. Bükme kuvveti ve üst kalıp nüfuzu arasındaki ilişki (Hambli ve ark. 2004).....	16
Şekil 2.13. İki farklı metot kullanılarak yapılan farklı kalınlıklardaki malzeme bükümleri sonrası ortaya çıkan geri yaylanma miktarları (Tekaslan ve ark. 2008).....	18
Şekil 2.14. Çıkıntılı üst kalıp mekanizması (Thipprakmas 2011).....	19
Şekil 2.15. Deneyler ve sonlu elemanlar simülasyonundan elde edilen sonuçların kıyaslanması (Thipprakmas 2011).....	20
Şekil 3.1. Bükme deneylerinin yapılması amacıyla imal edilen hidrolik abkant pres deney düzeneği.....	29
Şekil 3.2. Kameralı açı ölçüm cihazı ve HAPDD üzerindeki yerleşimi.....	29
Şekil 3.3. Kalıp içi lineer potansiyometreler.....	30
Şekil 3.4. Makineden harici konumlandırılmış lineer encoder.....	31
Şekil 3.5. Kuvvet ölçümleri için kalıp altına yerleştirilen dinamik yük hücreleri.....	32
Şekil 3.6. Dinamik yük hücresi kalibrasyonu.....	32
Şekil 3.7. Hidrolik abkant pres deney düzeneği kompleksi ve üzerindeki ekipman ve ölçüm aletlerinin yerleşimi.....	33
Şekil 3.8. ASTM E 8 ve TS 138'e göre çekme deneyi numunesi teknik resmi.....	34
Şekil 3.9. Hazırlanan çekme deneyi numuneleri.....	34
Şekil 3.10. Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L malzemelerinin çekme deneylerine ait fotoğraflar.....	35
Şekil 3.11. Hazırlanan bükme deneyi numuneleri.....	37
Şekil 3.12. Hidrolik abkant pres deney düzeneğindeki havada bükme işlemi.....	37
Şekil 3.13. Bükme deneyleri fotoğrafları.....	41

Şekil 3.14.	4 mm ve 6 mm Hardox 400 bükümü için alt ve üst kalıp tasarımları.....	42
Şekil 3.15.	4 mm, 6 mm ve 8 mm Paslanmaz AISI 304L bükümü için alt ve üst kalıp tasarımları.....	43
Şekil 3.16.	LabView veri toplama cihazı ve akış diyagramı.....	43
Şekil 3.17.	LabView yazılım platformunda hazırlanan ölçüm programı	44
Şekil 3.18.	Buton kontrolü ile veri toplama işlemleri	45
Şekil 4.1.	K firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı Kuvvet-yer değiştirme grafiği	51
Şekil 4.2.	K firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	52
Şekil 4.3.	K firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	53
Şekil 4.4.	K firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	54
Şekil 4.5.	E firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	55
Şekil 4.6.	E firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	56
Şekil 4.7.	E firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	57
Şekil 4.8.	E firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	58
Şekil 4.9.	K firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	59
Şekil 4.10.	K firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	60

Şekil 4.11. K firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	61
Şekil 4.12. K firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	62
Şekil 4.13. E firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	63
Şekil 4.14. E firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	64
Şekil 4.15. E firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	65
Şekil 4.16. E firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	66
Şekil 4.17. L firmasına ait, 4x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	68
Şekil 4.18. L firmasına ait, 4x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	69
Şekil 4.19. L firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	70
Şekil 4.20. D firmasına ait, 4x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	71
Şekil 4.21. D firmasına ait, 4x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	72
Şekil 4.22. D firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği	73

Şekil 4.23. L firmasına ait, 6x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	74
Şekil 4.24. L firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	75
Şekil 4.25. L firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	76
Şekil 4.26. D firmasına ait, 6x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	77
Şekil 4.27. D firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	78
Şekil 4.28. D firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	79
Şekil 4.29. L firmasına ait, 8x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	80
Şekil 4.30. L firmasına ait, 8x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	81
Şekil 4.31. L firmasına ait, 8x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	82
Şekil 4.32. D firmasına ait, 8x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	83
Şekil 4.33. D firmasına ait, 8x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	84
Şekil 4.34. D firmasına ait, 8x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	85

Şekil 4.35. 4 mm hardox 400 malzemenin 60'lık kanalda iki farklı ebat ve iki farklı tedarikçi firma için iki farklı bükme hızına göre ortalama bükme kuvvetleri.....	91
Şekil 4.36. 6 mm hardox 400 malzemenin 120'lik kanalda iki farklı ebat ve iki farklı tedarikçi firma için iki farklı bükme hızına göre ortalama bükme kuvvetleri.....	93
Şekil 4.37. 4 mm Paslanmaz AISI 304L malzemenin 30'luk kanalda üç farklı ebat için tedarikçi firmaya göre ortalama bükme kuvvetleri.....	95
Şekil 4.38. 6 mm Paslanmaz AISI 304L malzemenin 60'lık kanalda üç farklı ebat için tedarikçi firmaya göre ortalama bükme kuvvetleri.....	96
Şekil 4.39. 8 mm Paslanmaz AISI 304L malzemenin 120'lik kanalda üç farklı ebat için tedarikçi firmaya göre ortalama bükme kuvvetleri.....	97



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1.	SAF 2304 ve 18-9 Paslanmaz malzemeleri için deneysel ve teorik bükme deneyleri sonuçları (Asnafi ve ark. 2000)	12
Çizelge 3.1.	İki farklı firmadan tedarik edilen Paslanmaz AISI 304 L malzemelerine ait kimyasal kompozisyonlar	27
Çizelge 3.2.	İki farklı firmadan tedarik edilen Hardox 400 malzemelerine ait kimyasal kompozisyonlar	27
Çizelge 3.3.	İki farklı firmadan tedarik edilen Paslanmaz AISI 304 L malzemelerine ait mekanik özellikler.....	28
Çizelge 3.4.	İki farklı firmadan tedarik edilen Hardox 400 malzemelerine ait mekanik özellikler	28
Çizelge 3.5.	Çekme deneyi numune tablosu.....	36
Çizelge 3.6.	Taguchi deney yöntemi'ne göre belirlenen deneyler	39
Çizelge 3.7.	Bükme deneyleri planı.....	40
Çizelge 3.8.	Otomatik olarak toplanan verilerin excel dosyasına dökümü	45
Çizelge 4.1.	K firmasına ait Hardox 400 malzemeye ait haddeye dik yöndeki çekme deneyleri sonuçları	46
Çizelge 4.2.	K firmasına ait Hardox 400 malzemeye ait haddeye paralel yöndeki çekme deneyleri sonuçları	47
Çizelge 4.3.	D firmasına ait Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye dik yöndeki çekme deneyleri sonuçları	47
Çizelge 4.4.	D firmasına ait Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye paralel yöndeki çekme deneyleri sonuçları	47
Çizelge 4.5.	E firmasına ait Hardox 400 malzemeye ait haddeye dik yöndeki çekme deneyleri sonuçları	48
Çizelge 4.6.	E firmasına ait Hardox 400 malzemeye ait haddeye paralel yöndeki çekme deneyleri sonuçları	48
Çizelge 4.7.	L firmasına ait Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye dik yöndeki çekme deneyleri sonuçları	48
Çizelge 4.8.	L firmasına ait Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye paralel yöndeki çekme deneyleri sonuçları	49
Çizelge 4.9.	Çekme deneyleri sonuçları	49
Çizelge 4.10.	Hardox 400 numunelerine ait deneysel bükme kuvveti sonuçları.....	87
Çizelge 4.11.	Paslanmaz AISI 304L numunelerine ait deneysel bükme kuvveti sonuçları	88
Çizelge 4.12.	Hardox 400 deney numunelerine ait büküm sırasındaki yer değiştirme miktarları	89
Çizelge 4.13.	Paslanmaz AISI 304L deney numunelerine ait büküm sırasındaki yer değiştirme miktarları	90
Çizelge 4.14.	Hardox 400 deney numunelerine ait geri yaylanma miktarları	94

1. GİRİŞ

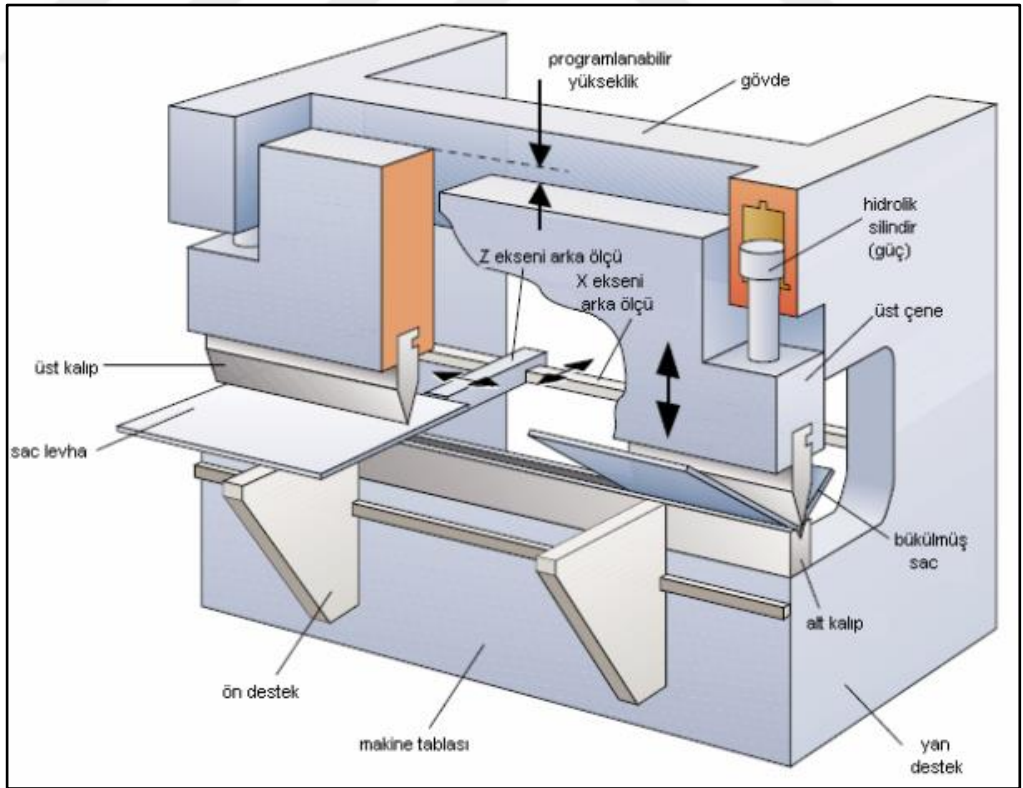
Sac şekillendirme sanayiinde çok farklı yassı malzeme çeşidi kullanılmakta, aynı kalınlık ve aynı standart numarasına sahip sac malzemeler için de yerli ve yabancı farklı üreticiler bulunmaktadır. Kullanılan sac malzemeler aynı kalınlık ve aynı standart numarasına sahip olmasına rağmen üretici firmalar bazında; kimyasal kompozisyonları ve üretim proseslerinden dolayı bu sacların mekanik özelliklerinde farklılıklar görülebilmektedir.

Malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin sac şekillendirme proseslerini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Belirleyici mekanik özellikler olarak; akma ve çekme dayanımları, poisson oranı, yüzde elastik ve kopma uzaması, yüzde kesit daralması, deformasyon sertleşme üssü, gerinim hızı hassasiyeti gibi değerler sıralanabilir. Üretici firmaların ortalama olarak ve belirli bir aralık dâhilinde verdikleri mekanik özellikler ile gerçek mekanik özellikler arasında %10 - %15 civarlarına varan farklılıklar oluşabilmektedir. Üretici firmalardan alınan bu ortalama ve belirli bir aralık dahilindeki mekanik özellikler baz alınarak yapılan hesaplamalar ve tasarımlarla makine ve kalıp imalatları yapılmaktadır. Dolayısıyla gerçek ve teorik malzeme özellikleri arasındaki bu farklılıklar yapılan makine ve kalıp tasarımlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Tasarım esnasında malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri konusunda tam olarak doğru verilere ulaşamadığı için %5-%10 hatta zaman zaman %20 oranlarında fazla emniyetli hesaplanıp imal edilmiş makineler olabilmektedir. Yani iş parçasının şekillendirilmesi için gerekli olan kuvvetten çok daha fazlası malzemeye uygulanmaktadır. Ya da bazı durumlarda tam aksine yetersiz emniyette hesaplanıp iş parçasının şekillendirilmesi için gerekli kuvvet sağlanamamakta ve işlem sonunda üretilen malzemenin uygun olmaması gibi nedenlerden dolayı ıskarta maliyetleri oluşabilmektedir. Sac malzemelerin büküm işlemleri amacıyla üretilen hidrolik abkant preslerin genelinde, malzeme özelliklerinin teoriden farklılıklar göstermesi sebebi ile uygun olmayan makineler veya gereksiz enerji harcanması sonucu seri üretimde ciddi enerji kayıplarının yaşandığı durumlarla karşılaşmak mümkündür.

Çalışma kapsamında, Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L malzemeleri için farklı levha kalınlığı, farklı levha boyu ve farklı parametrelerde bükme deneyleri yapılarak, yukarıda değinilen sonuçlara sebep olan malzemelerin mekanik özelliklerindeki değışimler bu iki malzeme grubu için detaylı olarak incelenmiştir. Aynı tip malzemelerin üretici firma kaynaklı mekanik özelliklerindeki farklılıkları tespit etme amaçlı her ürün tipi için iki farklı firmadan deney malzemesi temin edilmiştir. Tedarik edilen yassı malzemelerin ilk olarak üniversal çekme-basma test cihazında haddeye dik ve haddeye paralel yönde olmak üzere çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan çekme deneyleri sonucu elde edilen veriler malzeme tedarığı sırasında üretici firmalardan talep edilen malzemelerin ait oldukları plakalarının sertifikalarında belirtilen mekanik özellikleri ile kıyaslanmıştır. Çalışma başlangıcında iki farklı malzeme tipi ile bükme deneylerinin yapılması için farklı bükme hızı, bükme açısı, levha kalınlığı ve şekillendirme boyu gibi bükme parametreleri kullanılarak kuvvet, yer değıştirme, geri yaylanma gibi değerlerin zamana bağılı olarak eş zamanlı elde edileceğı hidrolik abkant pres tabanlı bir deney düzeneğı (HAPDD) tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deney düzeneğine yerleştirilmiş sensörlerden alınan değerler ile her iki malzeme çeşidi için farklı bükme hızları, bükme açıları ve kanal açıklarında yapılan bükme deneyleri sonucu bükme kuvvetleri ve büküm anındaki yer değıştirme miktarları eş zamanlı olarak alınmıştır. Bükme deneylerinden elde edilen sonuçlar makine tasarımlarında kullanılan ampirik değerler ile kıyaslanarak çalışma sonlandırılmıştır. Çalışmada ortaya çıkan sonuçlar ile Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L malzemelerinin belirtilen ebatlarda bükümü için daha uygun hidrolik abkant pres ve pres ekipmanları tasarımlarının gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Öncelikle abkant presler, pres ekipmanları ve bükme işlemleriyle ilgili kısa bilgiler verilmiştir. Abkant pres, yassı metal malzemeleri bükerek istenen forma getiren bir sac şekillendirme tezgahıdır. Abkant büküm tezgahları ile yassı malzemeler, iki kalıp arasında basılarak şekil alır. Altta bulunan büyük kalıp dişi kalıp, üstteki ise erkek kalıptır. Farklı kalınlık ve boylarda malzeme bükümü için farklı tonajlarda ve genişliklerde üretilmektedirler. Abkant presler üst kalıp, alt kalıp, hidrolik eksenler, CNC kontrol ünitesi ve arka sac dayama gibi bölümlerden oluşurlar. Üst kısımdaki erkek kalıbın alt kısımdaki dişi kalıp üzerinde bulunan yassı metal malzemeye hidrolik kuvvetle baskı uygulaması sonucu bükme işlemi gerçekleşir. Abkant preslerde bükülecek parçaların açınımı, arka dayama pozisyonları, bükme sıraları, bükme açıları için gerekli strok ve kalıplar ile bükülecek parçanın uyumluluğu, malzeme bilgileri tanımlanmak şartı ile kontrol ünitesi tarafından otomatik olarak yapılır. Hidrolik abkant presleri oluşturan ana kısımlar ve eksenlerin şematik görünümü Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Hidrolik abkant pres kısımları ve eksenlerin şematik görünümü (Anonim 2006)

Abkant preslerde bükme parametrelerinin tespitine yönelik literatürde yapılan çalışmalar detaylı olarak araştırılmış, emsal teşkil edebilecek ve yol gösterecek bazı çalışmalar özetlenmiştir. Konuyla ilgili patent taraması da yapılmış olup bölümün sonunda verilmiştir.

Altıntaş ve ark. (1997) çalışmalarında, elektro-hidrolik CNC abkant preslerine ait mekanik, hidrolik ve CNC sistemlerini tanıtmıştır. Bilgisayar kontrollü NC ve CNC abkantlarla ilgili bilgiler vermiştir.

Canteli ve ark. (2008) çalışmalarında, yüksek sıcaklıklarda havada bükme işlemi için bir deney düzeneği tasarlamış ve üretmişlerdir. Bununla beraber çalışmada teorik bir termo-mekanik model geliştirilmiş ve sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bükme işleminde bükme kuvveti ve üst tabla yer değiştirmesinin tespitinde ticari abkant presten yararlanılmıştır. Deneylerden önce ve sonra büküm açıları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarıyla geliştirilen model sonuçları birbirlerine yakın çıkmıştır. Bükme kuvveti tahmininde %5'in altında, yüzde geri yaylanma açısının tahmininde ise %1,5'un altında farklılıklar saptanmıştır. Sonuç olarak; geliştirilen modelin sanayide yüksek sıcaklıklardaki bükme işlemlerine uygulanabileceği ispatlanmıştır ve bu modelin bükmedeki işlem parametrelerinin doğru tahmin edilmesinde kullanılabilir olduğu görülmüştür. Malzeme olarak AISI 304 Paslanmaz çelik kullanılan deneysel çalışmada farklı sac kalınlığı, üst kalıp yarı çapları ve kalıp boşlukları için üst tabla yer değiştirmesine bağlı olarak bükme kuvvetlerinin değişimi elde edilmiş ve sonuçlar geliştirilen model sonuçlarıyla birlikte grafikler ile verilmiştir. Çalışma hem oda sıcaklığındaki hem de 770 °C gibi yüksek sıcaklık altındaki testleri kapsamıştır. Ayrıca deneysel ve geliştirilen teorik model yardımıyla bulunan geri yaylanma açıları tespit edilmiştir.

Canteli ve ark. (2008) çalışmalarında ayrıca, geliştirilen teorik termo-mekanik model ile sacdaki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan ticari NC abkant pres hidrolik abkant prestir. Deneylerde bükme boyu 3050 mm maksimum bükme kuvveti 900 kN dur. Makine bükme işlemi sırasında üst tabla yer değiştirmesini kontrol eden bir makinedir. Makinede bükme yükü hem yük hücresi ile hem de basınç sensörü ile

ölçülmüştür. Bükme açısı üst tablanın maksimum yer değiştirme miktarı için ve yük kaldırıldıktan sonrası için açıölçer kullanılarak ölçülmüştür. α_0 a bağlı olarak yüzde geri yaylanma değerinin değişimi ve punch yer değiştirmesine bağlı olarak yüzde geri yaylanma değerinin değişimi elde edilmiştir.

Coelho ve ark.'nın (2005) abkant preslerin yapısal analizi ve optimizasyonunun (boyut, şekil ve başlangıç - yer değiştirme optimizasyonu) çalışıldığı araştırmada, Timoshenko beam teorisi kullanılarak abkant preslerdeki bükme işlemi için bir model geliştirilmiştir. Coelho ve arkadaşlarına göre bükme açısı üst kalıp ilerlemesine oldukça bağlıdır ve bu ilerleme değeriyle açı büyük oranda değişim gösterir. Örneğin; havada bükülen 0,05 mm'lik bir ilerlemenin 1 mm kalınlığındaki plakanın 10 mm genişliğindeki kalıpta bükümü halinde bükme açısının 1° değişimine sebep olduğu tespit edilmiştir.

Duflou ve ark. (2005) araştırmalarında nümerik kontrollü abkant preslerde havada büküm tekniğiyle sac büküm işlemlerinde proses koşulları altında malzeme davranışlarını incelemişlerdir. Sac levhaların bükümü için uygun kalıp seçimleri ve operatörün verimli çalışması için çeşitli yöntemler çalışmada ayrıca tartışılmıştır. Büküm sıralaması, çarpışma algılama, tolerans doğrulama ve takım seçimi gibi otomatik planlanmış sac büküm işlemlerinde karşılaşılan temel sorunlar üzerinde çalışılmıştır.

Bir başka araştırmada Duflou ve Aereus (2006) tarafından kalın çelik levhaların bükümü için gerekli olan kuvveti bölgesel ön ısıtma yöntemiyle azaltma amaçlı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler göstermiştir ki 25 mm kalınlıkta bir çelik levha bükümü için gerekli olan büküm kuvveti bölgesel ön ısıtma (5 dakikada 630°C civarında sıcaklıklara ulaşarak) uygulanarak %55 oranlarında azaltılmıştır. Ön ısıtma süresini uzun tutarak daha yüksek kalınlıklardaki çelik levhaların büküm kuvvetlerinin azaltılmasının mümkün olduğu kanısına varılmıştır.

Elkins ve Sturges (1999) küçük açılı büküm yarıçaplarının tekrarlanmayan kontrolü üzerinde durmuşlardır. Abkant preslerle küçük yarıçaplı büküm operasyonlarında ilk parça kalitesinin kontrolünün, yüksek kalite ve çok sayıda küçük parçaların üretim

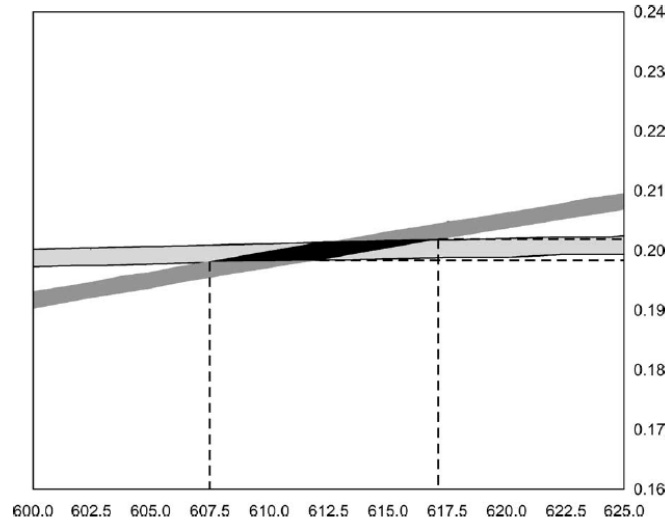
ihtiyaçlarında önemli olduğu vurgulanmıştır. Parça deformasyonu ölçümleri, takım geometrieleri değişkenlikleri ve malzeme özellikleri deneysel ölçümlerine dayanarak yeni bir aı ölçüm tekniğinin geliştirildiğine değinilmiştir. Bu tekniğin parça kalınlığı ve sertliğinin evrimdişi ölçümü ile pres st tabla pozisyonu ve yükleme açısının evrimii ölçülmesini gerektirdiği belirtilmiştir. Sac parçaların üretimi üzerinde durulan bu araştırmada esnek üretim sistemlerinin uygulanmasında karşılaşılan zorluk ve problemler de ele alınmıştır. İlk olarak havada bükme büküm tipi ve kalıpları ele alınmış, büküm sırasında st ve alt kalıplardaki deformasyonlar incelenmiştir. Lineer regresyon analizi, Neural network analizi ve geri yaylanma kontrol sistemleri üzerinde durulmuştur.

Gupta ve ark. (1998) alışmalarında sac metal büküm operasyonlarında otomatik bükme işlemleri üzerinde durmuşlardır. İlk olarak kalıp üzerindeki parça pozisyonu, işlem sırasındaki st kalıp pozisyonu, büküm performansı ve çıkan ürün gibi büküm prosesleri incelenmiş ve örnek bir sac parça ele alınarak araştırmaya devam edilmiştir. İşlemler için örnek bir büküm istasyonu kurulup parça modellemesi yapılmıştır. Ele alınan sac parçanın büküm aşamaları üzerinde durulmuş ve bu sac parçanın bükümü için farklı tipte st kalıp modelleri ele alınmıştır. Büküm merkezi üzerine yerleştirilen farklı tasarımlardaki parça tutucular ve robot sistemi ile birlikte parçanın makine üzerindeki büküm işlemini kolaylıkla gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Farklı pozisyonlarda robotik destekli yapılan bkmlerle ilgili ölçümler alınmış ve büküm hassasiyetleri kontrol edilmiştir. İlgili işlemler birkaç farklı tasarımdaki sac parçalar kullanılarak devam ettirilmiştir.

Bükme tezgahlarındaki parametre belirleme çalışmalarında abkant preslerin dışındaki makineler üzerinde de yapılan çalışmalar mevcuttur. Lazer destekli form vermede işlem süreçleri ile ilgili araştırmalar Magee ve De Vin (2002) tarafından gerçekleştirilmiştir. Lazerle form verme işlemi, iş parçası ve kalıp (lazer işını) arasında bir mekanik temas olmayan, çok yüksek işlem hassasiyeti istenilen ve malzemenin çok küçük derecelere kadar form alması gereken durumlarda tercih edilmektedir. Bu çalışmada ilk olarak deneysel bir lazer form verme nitesi kurulmuş, yapılan deneylerle söz konusu proseslerdeki büküm hassasiyetleri incelenmiştir. Bununla birlikte yapılan deneylerde

basit bir sac kutu bükümü yapılmış, geri yaylanmalar göz önüne alınarak kutunun birleşim noktalarındaki ölçüler incelenmiştir.

Mentink ve ark. (2003) çalışmalarında abkant preslerde işlem gören her hangi bir malzemenin özelliklerini ortaya çıkarma amacı gütmüşlerdir. Çalışmada, malzemelerin parametrelerini incelemek için havada büküm prosesi ele alınmıştır. Havada büküm prosesinin geometrik açıları incelenmiş, kullanılan kalıp ve sac özellikleri ortaya koyulmuştur. Daha sonrasında havada büküm işleminde malzemelerin davranışları üzerine yoğunlaşmıştır. Malzeme özelliklerine göre gerilme dağılımı ortaya konmuş ve bükme deneylerine ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri incelenmiştir. Daha sonra malzeme kalınlığı ve özelliklerine göre havada büküm tekniğinin duyarlılığına değinilmiştir. Yaptıkları deneylerden elde ettikleri ölçümlerle St 37 malzemesinin bükümü sırasındaki maksimum kuvvet ve deplasman arasındaki kombinasyonu ortaya koyarak çalışmalarını tamamlamışlardır (Şekil 2.2).



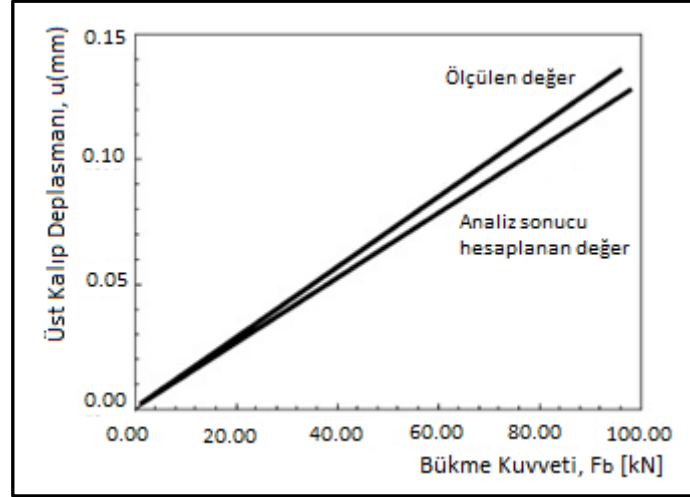
Şekil 2.2. Üst tabla deplasmanı ve maksimum kuvvet kombinasyonu (Mentink ve ark. 2003)

Ona ve Watari (1998), abkant pres tarafından form verilen bir ürünlerdeki boyuna eğriliklerin giderilmesi üzerinde çalışmışlardır. Abkant preslerdeki V büküm proseslerinde kısmen dar sac parçaların büküm işlemleri sonrası işleme tabi tutulan parçalarda boyuna eğrilik denilen kusurlara rastlandığını ortaya koyan Ona ve Watari (1998), yaptıkları incelemeler ve deneylerle bu kusurların nedenleri üzerinde durmuşlardır. Yapılan deneylerde, V büküm prosesinde kullanılan farklı kalınlıklardaki

sönümleyici pedlerle büküm sonrası parçalarda oluşan eğrilik değerleri bulunmuştur. Daha sonra aynı şekilde ped kalınlıklarındaki değişimin büküm açılarına etkileri de irdelenmiştir. Son olarak üzerinde çalıştıkları büküm mekanizması ile büküm yapılan parçanın V köşesinde oluşan uzama ve sürtünme kuvvetlerinin tersine etki etmesi sağlanarak doğru açı ve eğrilik değerleri yakalanması amaçlanmıştır.

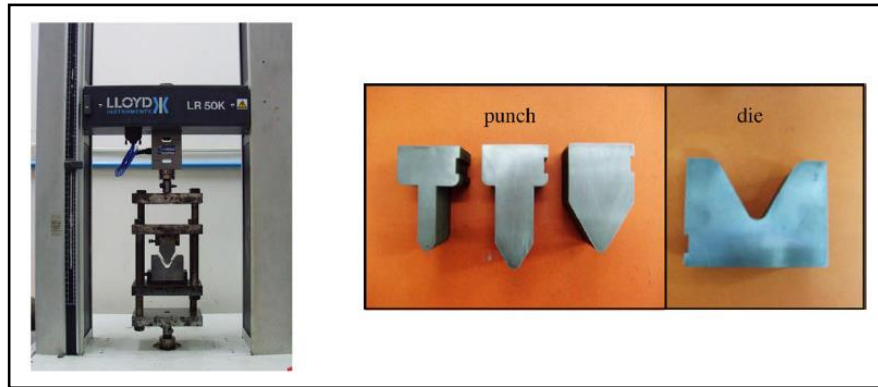
Santos ve ark. (2011) çalışmalarında abkant preslerde kullanılan iş takımlarının yüksek hassasiyetlerde üretilmesi için kaybedilen gereksiz enerji miktarları üzerinde durulmuştur. İş takımları ve kalıpların etkili ve düşük maliyetli olması gerektiği bildirilmiştir. Ayrıca hidrolik abkant preslerin elektrik enerjisi tüketiminde verimlilik ve enerjinin etkileri incelenmiştir.

Singh ve ark. (2004) havada büküm tekniğinde takım geometrisinin ürün üzerinde etkilerinin sayısal simülasyonu üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada bir parçanın büküm kalitesinin, parça uzunluğu boyunca büküm açısının doğruluğu ve tutarlılığı ile belirlendiğine değinilmiştir. Bu büküm açısının doğruluğunun da kalıpta takım nüfuzu ile direkt ilgili olduğu açıklanmıştır. Takım nüfuzundaki küçük değişimlerin büküm açısında nispeten büyük değişimlere sebep olabileceği belirtilmiştir. Ayrıca abkant pres üst tablasındaki deplasmanlar ve takım bozulmalarının sebep olduğu bükme sırasında takım durma noktasındaki değişimin, bu tarz takım nüfuzunda değişimlere sebep olduğu ve bunun da bükme açılarını önemli derecede etkileyebileceği belirtilmiştir. Dolayısı ile çalışmada takım geometrisinin sonlu elemanlar yöntemi ile modeli oluşturulmuş ve iş takımları üzerinde oluşan deplasman değerleri hesaplanarak gerçek değerler ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak yapılan çalışmada, büküm kuvveti ve üst kalıp deformasyonu arasındaki ilişki, takım tasarımının önemi, takımların sertliği ve büküm açısı gibi konular irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, büküm kuvveti ve üst kalıp deformasyonu arasındaki ilişki Şekil 2.3'deki grafikte verilmiştir.



Şekil 2.3. Bükme kuvveti ve üst kalıp deformasyonu arasındaki ilişki (Singh ve ark. 2004)

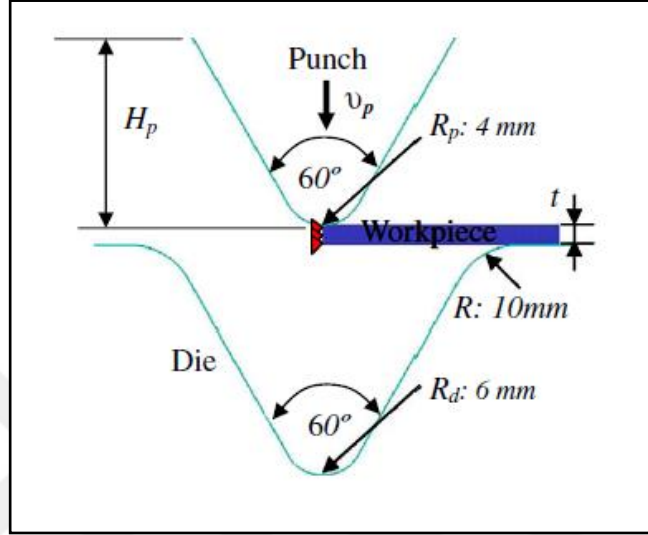
Thipprakmas (2010) çalışmasında, üst kalıp yüksekliğinin V büküm açısı üzerindeki etkisinin sonlu elemanlar analizini yapmıştır. Çalışmada, ilk olarak kısmi veya tam büküm gibi V büküm proseslerin sınıflandırılması ele alınmıştır. V büküm için üst ve alt kalıplar belirtilerek bu kalıpların büküm yarıçap ve açıları simule edilmiştir. Sonrasında ise ilgili deneylerin yapılabilmesi için V büküm kalıplarının kullanılacağı ve gerilmelerin hesaplanacağı bir test düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Deneyler için kullanılan test cihazı ve V-Büküm kalıp seti (Thipprakmas 2010)

Yapılan deneylerde farklı üst kalıp yükseklikleri göz önüne alınarak malzemelerin form alma sırasındaki akış analizleri kıyaslanmıştır. Test cihazında yapılan daha sonraki deneylerde ise yine kullanılan farklı üst kalıp yüksekliklerine göre malzemelerde oluşan

gerilme dağılımlarının karşılaştırılması yapılmıştır. En nihayetinde deney ve sonlu eleman analizi sonuçlarıyla arasındaki büküm kuvvetlerinin kıyası ve üst kalıp yükseklik farklarına göre deneyler ve sayısal çözüm sonuçları yardımıyla büküm açılarının karşılaştırılması ortaya konulmuştur (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Sonlu elemanlar yöntemi simülasyon metodu (Thipprakmas 2010)

Sonuç olarak simülasyon ve deneylerden birbirine yakın veriler elde edilmiştir. 3 mm kalınlığında 60° büküm açısında 4 mm üst kalıp ve 6 mm alt kalıp yarıçaplarında bükümü yapılan bir malzemenin, üst kalıp stroğunun 30 mm'den yukarı olduğu durumlarda 20 kN'un üzerinde yüksek büküm kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan diğer veride ise aynı büküm şartlarında 60° 'lik büküm açısını yakalayabilmek için üst kalıp yüksekliğinin 21 ila 30 mm arasında olması gerektiği belirlenmiştir (Thipprakmas 2010).

Wang ve ark. (2008) havada büküm tekniğinde geri yaylanma kontrolü üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmada abkant preslerde büküm işlemlerinin çoğunlukla sac levha parçalarla imalat yapılan proseslerde gerçekleştirildiğine değinilmiştir. Çalışmada, final büküm açısı yani bükme işlemi sonunda zımbanın sac levha üzerinden ayrılmasından sonra ortaya çıkan açının, bükme işlemi sonundaki ilk büküm açısından daha büyük olduğu gösterilmiştir. Geri yaylanma denilen bu hadisenin sac parçaların elastiki toparlanma isteğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Geri yaylanmayı tahmin

etme amaçlı takım geometrisi ve sac levhaların bilinen özellikleri kullanılarak çeşitli teorik modellerin önerildiğine değinilmiştir. Ancak bir üretim ortamında herhangi bir iş parçasının gerçek özelliklerinin tüm parça grubunun belirlenmiş özelliklerinden farklı olabileceği belirtilmiştir. Bunun da gerçek geri yaylanma miktarlarının teorik öngörülerden sapmalar göstermesine neden olduğu söylenmiştir. Bu çalışmada geri yaylanma oranları göz önünde bulundurularak daha doğru final büküm açıları elde etme amaçlı üst tabla deplasmanını kontrol etmeye yönelik çalışılan pratik artımlı büküm metoduna değinilmiştir. Önerilen yaklaşımda iş parçası geri yaylanma davranışı yüklü ve yüksüz büküm açıları ölçümlerinden tahmin edilmiştir. Bu tahmini iş parçası davranışı geri yaylanma sonucu istenilen büküm açısını elde etmeye yönelik nihai üst tabla pozisyonunu belirlemek için kullanılmıştır. Bu amaçla bu çalışma kapsamında bir dizi büküm deneyi yapılmıştır. Deneyler sonucu önerilen metotla geri yaylanma miktarının daha iyi tahmin edilebileceği ve bir üretim ortamında büküm açısı değişiminin etkin olarak kontrol edilebileceği ortaya konmuştur.

Asnafi ve ark. (2000) çalışmalarında kalın paslanmaz çeliklerin V-Kalıp'ta havada büküm tekniğiyle bükülmeleri sonrası oluşan geri yaylanmalar ve sactaki kırılmalar üzerinde durmuşlardır. 9 farklı paslanmaz çeşitli sınıflarda ve kalınlıklarda ele alınarak testlere tabi tutulmuşlardır. Test edilen saclardan en kalını 31,3 mm olurken en ince sac ise 7,9 mm olarak belirlenmiştir. Geri yaylanma tahmini için uygun bir analitik model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu analitik modelle her kalıp genişliği ve büküm radüsü için geri yaylanma oranları hesaplanmıştır. Her ne kadar teorik analizde tarafsız eksende kayma ve sac kalınlığındaki incelmeler ihmal edilse de çalışma sonunda teorik analiz ve uygulama arasındaki ilişki oldukça iyi ortaya çıkmıştır. Yapılan bükme işlemleri sonrasında kırılma olayı ise görülmemiştir.

Asnafi ve ark. (2000) çalışmada, SAF 2304, 18-9, 17-12-2,5, 19-11L, 253 MA, SKR-4, 2205, 254 SMO, 904L gibi paslanmaz çelik malzemeleri ele alınarak teorik ve deneysel ortamda farklı kalınlıklarda, farklı kanal genişliklerinde ve farklı büküm yarıçaplarında bükümler yapılmıştır. Her durum için geri yaylanma oranları tespit edilerek sonuçlar ortaya konmuştur. Örnek olarak SAF 2304 ve 18-9 malzemelerinin farklı deneylerden elde edilen teorik ve pratik sonuçları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. SAF 2304 ve 18-9 Paslanmaz malzemeleri için deneysel ve teorik bükme deneyleri sonuçları (Asnafi ve ark. 2000)

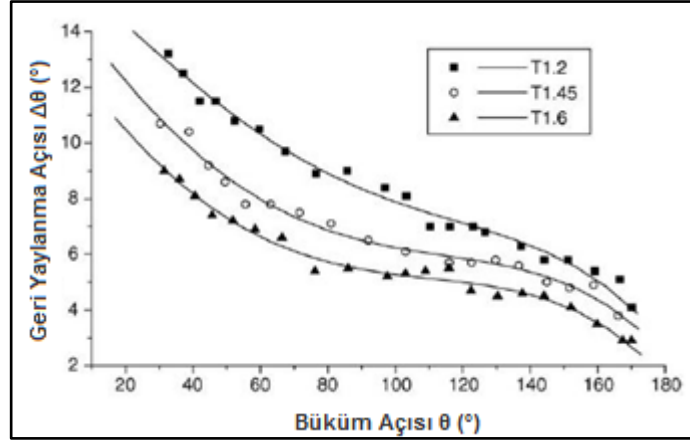
Malzeme	t_0 (mm)	R (mm)	W (mm)	Deneysel Sonuçlar			Teorik Sonuçlar				
				α_0 (°)	α_f (°)	Geri Yaylanma (°)	R_0 (mm)	R_f (mm)	α_0 (°)	α_f (°)	Geri Yaylanma (°)
SAF 2304	10,1	12	70	85,667	90,000	4,33	12,844	13,308	85,667	88,962	3,295
			100	86,350	91,850	5,50	17,565	18,312	86,350	90,169	3,819
			150	85,250	92,750	7,50	24,238	25,482	85,250	89,876	4,626
18-9	8,50	8	50	86,233	89,667	3,43	11,379	11,725	86,233	89,000	2,767
			60	81,250	85,150	3,90	13,413	13,868	81,250	84,495	3,245
			80	85,000	89,750	4,75	16,397	16,987	85,000	88,298	3,298
	20,6	20	150	84,000	88,000	4,00	31,918	32,885	84,000	86,823	2,823
			200	84,300	89,165	4,87	39,135	40,437	84,300	87,381	3,081
			250	84,600	89,200	4,60	49,675	51,570	84,600	88,106	3,506
	29,7	30	250	86,800	90,667	3,87	55,475	57,306	86,800	89,778	2,978
			67,5	84,550	88,750	4,20	54,285	56,074	84,550	87,596	3,046

t_0 = Sac kalınlığı, R = Üst kalıp yarıçapı, W = V kanal açıklığı
 α_0 = Büküm açısı, α_f = Geri yaylanma açısı, R_0 = Büküm yarıçapı, R_f = Geri yaylanma yarıçapı

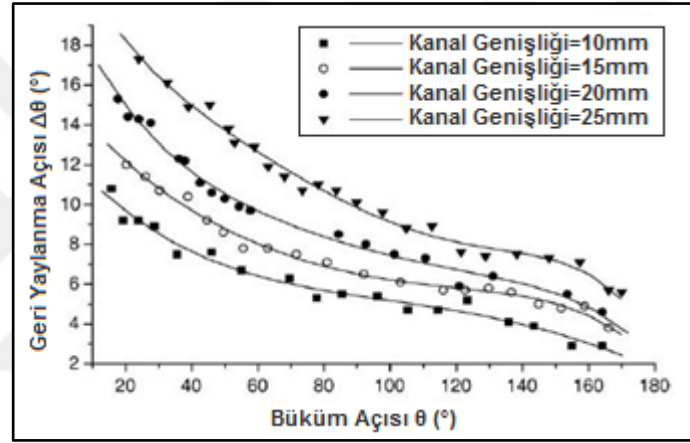
Chan ve ark. (2004) V-Büküm yöntemi ile sac şekillendirme işlemlerinde geri yaylanmaların sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yapmışlardır. Geri yaylanmanın alt ve üst kalıplara bağlı olarak değişiklik gösterebileceği belirtilmiştir. Üst kalıp yarıçapı, üst kalıp açısı, alt kalıp kanal genişliği ve alt kalıp yarıçapı gibi farklı kalıp parametrelerinin geri yaylanma üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca üst tabladaki deplasmanların geri yaylanma üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

Fei ve ark. (2006) çalışmalarında soğuk haddelenmiş TRIP çeliklerinin havada büküm işlemlerindeki geri yaylanmalarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar daha çok, çeşitli kalınlıklarda ve çeşitli geometrik parametrelerde geri yaylanmaların tespit edildiği TRIP çelikleri üzerinde yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar için soğuk haddelenmiş TRIP çeliklerinden 1,2 – 1,45 ve 1,6 mm kalınlıklar seçilmiştir. Yapılan deneylerle kalıp kanal genişliği ve sac kalınlığının geri yaylanma üzerindeki etkisi ortaya konmuştur (Şekil 2.6, Şekil 2.7). Çalışmada ayrıca sürtünme kuvvetinin havada büküm tekniğinde geri yaylanmaya etkisi olmazken üst kalıp kuvvetini etkileyebileceği gözler önüne serilmiştir (Fei ve ark. 2006).



Şekil 2.6. Sac kalınlığı ile geri yaylanma arasındaki ilişki (Fei ve ark. 2006)



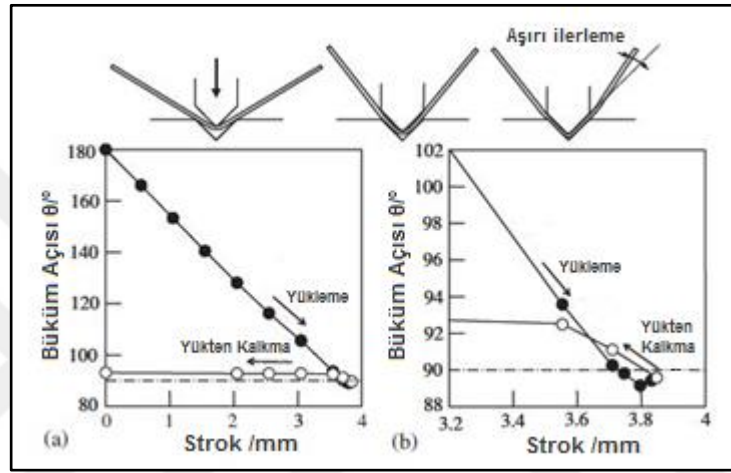
Şekil 2.7. Alt kalıp kanal genişliği ile geri yaylanma arasındaki ilişki (Fei ve ark. 2006)

Ultra yüksek mukavemetli çeliklerin CNC servo abkantlarda bükülmesi işlemlerinde geri yaylanma davranışları Mori ve ark. (2007) tarafından incelenmiştir. Çalışma, iki servo motor tarafından doğrusal hareketin kontrol edildiği CNC servo abkant pres'te yapılmıştır. Malzeme etkileri, büküm sonrası kalınlıkta azalma, büküm hızı ve bekleme sürelerinin V-Büküm tekniğinde geri yaylanma oranları üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

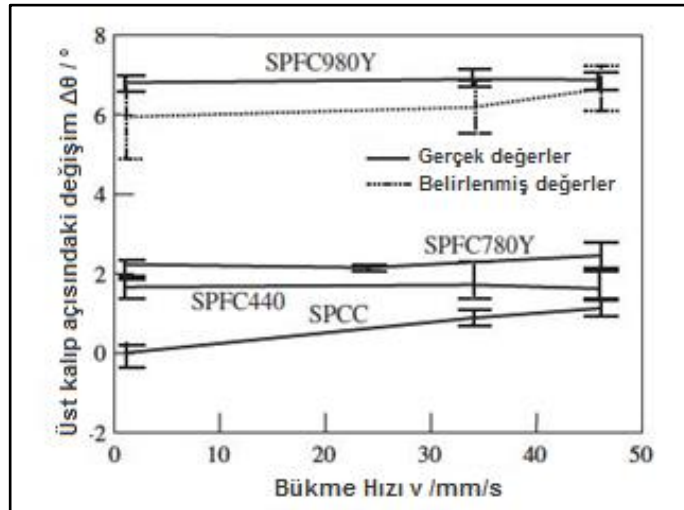
Mori ve ark. (2007) çalışmalarında ayrıca ultra yüksek mukavemetli çeliklerin şekillendirilmelerinin özellikle otomotiv sanayi'nde araç ağırlıklarının azaltılması konusunda yüksek önem taşıdığına değinmiştir. Ancak istenilen şekillendirmelerin bu çeliklerin sahip olduğu yüksek mukavemet değerleri nedeni ile çok kolay olmadığı da belirtilmiştir. Dolayısı ile ultra yüksek mukavemetli çeliklerin şekillendirilebilme özelliklerinin geliştirilmesinin otomotiv sanayisi için oldukça çekici hale geldiğinden

söz edilmiştir. Çalışmada söz konusu gelişim için ultra yüksek mukavemetli çeliklerin bükme sonrası geri yaylanmaları üzerinde araştırmalar yapılmıştır.

Mori ve ark. (2007) tarafından yapılan araştırmalarda ultra-yüksek mukavemetli çeliklerden SPFC440, 780Y, 980Y ve yumuşak çelik cinsi olan SPCC ele alınarak oda sıcaklığında bükümleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen bazı sonuçlar Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'daki grafiklerde belirtilmiştir.



Şekil 2.8. SPFC 980Y malzemesi için üst tabla stroğu ile büküm açısının değişimi (Mori ve ark. 2007)

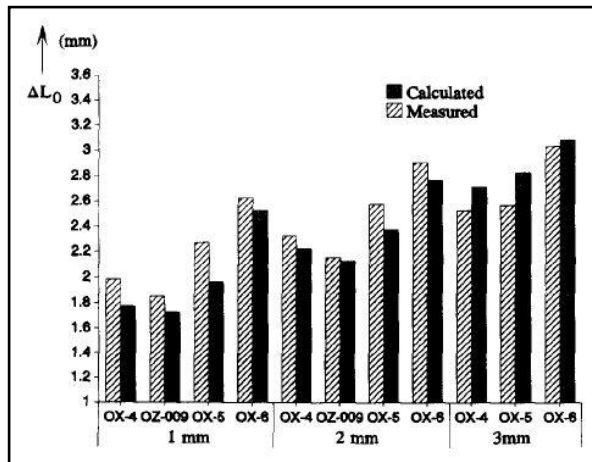


Şekil 2.9. Büküm hızının üst kalıp açısındaki değişime etkisi (Mori ve ark. 2007)

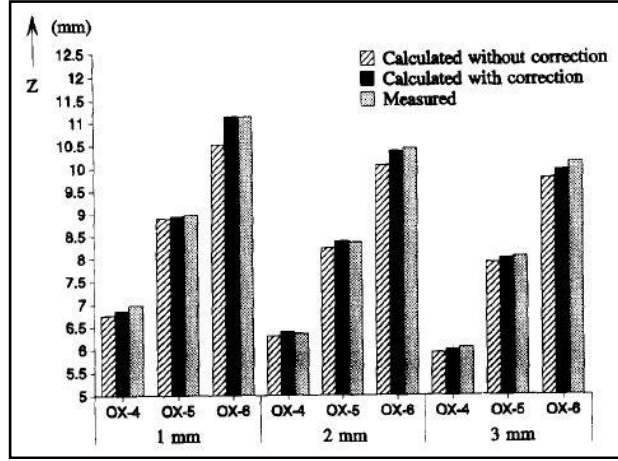
Vin ve ark. (1999) çalışmalarında havada büküm tekniği modelleri üzerinde durmuşlardır. Çalışmada havada bükme tekniğinin basit bir modelinin rijit-plastik olduğu belirtilmiştir. Bu modelde sac geometrisi iki düz, bir dairesel bölümlerle açıklanmıştır ve geri yaylanma görülmediğine değinilmiştir. Bu modelin daha çok sac geometrisindeki değişimler ve geri yaylanmanın etkisini açıklama gibi durumlarda kullanıldığı belirtilmiştir. Oluşan bu modele göre, yükleme sonrası sac geometrisinin iki düz ve bir dairesel bölümden oluştuğuna değinilmiştir. Yükleme koşulları altında, rijit – plastik modele kıyasla daha büyük üst kalıp deplasmanı gerektiği durumlarda bu bölümlerin elastik deformasyona uğradığı belirtilmiştir.

Vin ve ark. (1999) çalışmanın devamında büküm sonrası sac boyutundaki değişimlerin deneysel ölçümlerini ve teorik hesaplamalarını yapmışlardır. Deneyler 1, 2 ve 3 mm kalınlıklarında ve 40 mm genişliğinde soğuk haddelenmiş çeliklerle yapılmıştır. Deneylerde kullanılan üst kalıp 3 mm yarıçapa sahip Modufix BX-4 olarak belirlenmiştir. Alt kalıplar ise 19,3 mm yükseklik 2 mm yarıçaptaki OZ-009, 18,3 mm yükseklik 1,5 mm yarıçaptaki OX-4, 23,06 mm yükseklik 2 mm yarıçaptaki OX-5 ve 27,84 mm yükseklik 2,5 mm yarıçaptaki OX-6 olarak seçilmiştir.

Yukarıdaki bahsi geçen 4 farklı alt kalıp tipi ile farklı kalınlıklardaki saclarla yapılan deney sonuçları Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’deki gibi oluşmuştur (Vin ve ark. 1999).



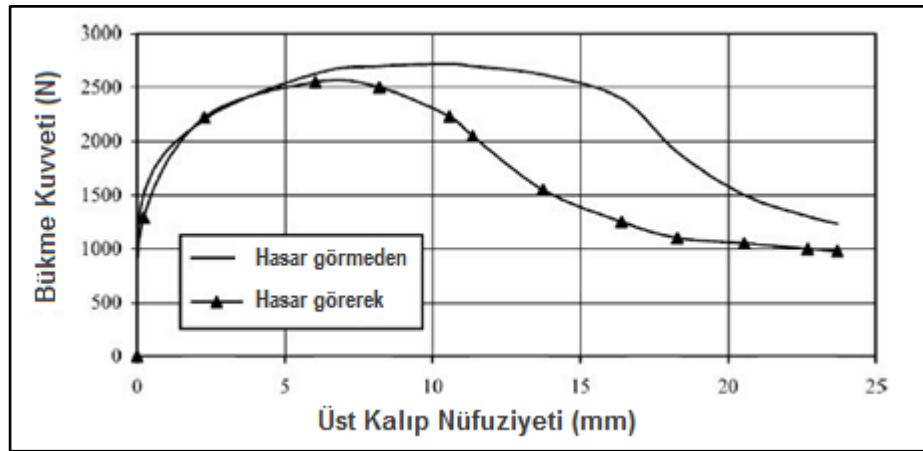
Şekil 2.10. Büküm sonrası sacda hesaplanan ve ölçülen yer değiştirme miktarları (Vin ve ark. 1999)



Şekil 2.11. Hesaplanan ve ölçülen üst kalıp deplasmanları (Vin ve ark. 1999)

Hambli ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada, ilk olarak havada büküm tekniğine değinmiş, bu büküm tekniğinde sacın davranışına göre sayısal modelini çıkarmışlardır. Havada büküm işlemi sırasında sac şekillendirme operasyonu devam ederken sacın uğradığı deformasyonlar sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve gerekli analizler yapılmıştır. Sactaki deformasyon gelişiminin sayısal simülasyonu sürekli hasar yaklaşımı sayesinde modellenmiştir.

Oluşturulan 3D örgü modelde sacın bükümleri yapılmış ve oluşan deformasyonlar incelenmiştir. Yapılan incelemelerden üst kalıp nüfuzu ve bükme kuvveti arasındaki ilişki Şekil 2.12'deki grafikte verilmiştir (Hambli ve ark. 2004).



Şekil 2.12. Bükme kuvveti ve üst kalıp nüfuzu arasındaki ilişki (Hambli ve ark. 2004)

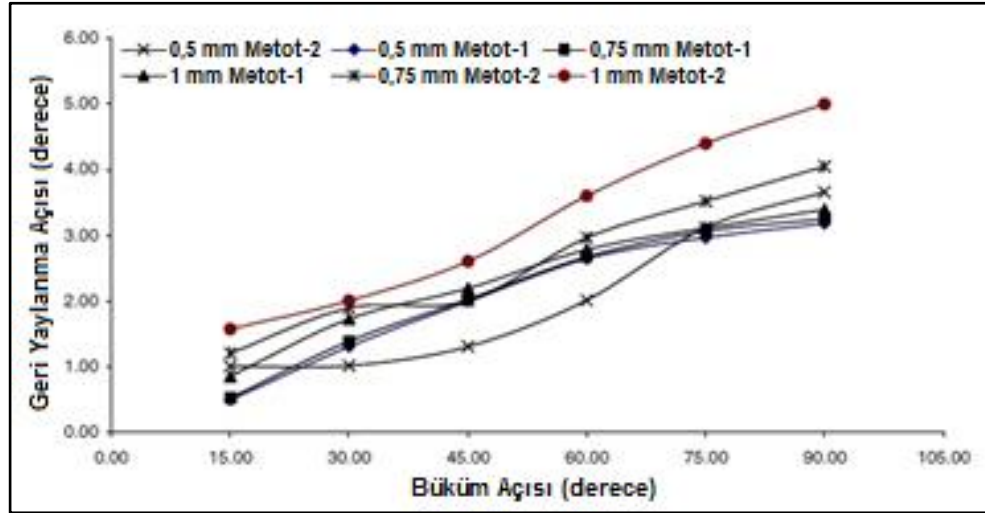
Imai ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada yüksek hassasiyetli V-büküm gerçekleştirmek için bir büküm sistemi önermişlerdir. Çalışmada, bu sistemin büküm sırasında uygun büküm durumunu hesaplayabileceğine ve pratikte zamanı verimli kullanabilme imkanı sağlayabileceğine değinilmiştir. Bu sistemin önemli noktasının üst kalıp nihai pozisyona ulaşmadan hemen önce iş parçasının serbest kalması olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca bu sistemin kullanılması ile veri toplanabileceği, malzeme özelliklerinin hesaplanabileceği ve hedeflenen final pozisyonunun tahmin edilebileceği bildirilmiştir. Bu pozisyonun, sac üzerindeki kuvvetin kaldırılmasından sonra geri yaylanmanın dikkate alınarak belirlendiği açıklanmıştır. Bununla birlikte geri yaylanmanın, her bir iş parçasının malzeme özelliklerindeki farklılıklardan dolayı sabit olmadığına değinilmiştir. Sonuç olarak önerilen bu bükme sisteminin yüksek hassasiyetli bükümler gerçekleştirebildiği ve başarıyla gerçek operasyonlarda kabul edildiği belirtilmiştir.

Tekaslan ve ark. (2008) yaptıkları çalışmalarında paslanmaz çeliklerin V-büküm kalıplarında bükülmeleri sonucu ortaya çıkan geri yaylanma oranlarını belirleme amacı gütmüşlerdir. Sac metal parçaların büküm işlemlerinde, elastik deformasyona bağlı geri yaylanma olayına yatkın olduğunun bilindiğine dikkat çekmişlerdir. İstenilen ürün açısının elde edilmesi ve uygun kalıp tasarımının yapılabilmesinin geri yaylanma miktarının bilinmesine bağlı olduğu açıklanmıştır. Dolayısı ile bu çalışmada sac metal parçaların bükme işlemlerindeki geri yaylanma oranlarının tespiti amaçlı deneysel araştırmalar yapılmıştır. Farklı büküm açılarındaki sac metal parçaların geri yaylanma miktarları modüler bir V-bükme kalıbı tasarımı ile elde edilmiştir. Ayrıca oluşturulan geri yaylanma grafikleri sayesinde literatüre bir katkı sağlama amaçlanmıştır. 18 farklı modül kalıpta 4 farklı büküm metodu kullanılarak ve toplam 720 paslanmaz çelik örneğinin bükümü yapılmış (her malzeme çeşidi için en az 10 büküm), farklı kalınlıklarda üç malzeme çeşidi için geri yaylanma grafikleri elde edilmiştir.

Deneysel literatürde en çok kullanılan 4 farklı büküm metodu ile yapılmıştır. İlk metotta üst kalıp alt kalıbın dibine gidecek kadar ayarlanmamış ve arada sac kalınlığı kadar boşluk bırakılmıştır. Sac malzeme iki kalıp arasında sıkıştırılarak geri yaylanmanın engellenmesi amaçlanmıştır. Üst kalıp büküm bitiminde hemen geri kalkmamış, 20 s sac üzerinde bekletilmiştir. İkinci metotta büküm sırasındaki alt ve üst kalıp arasındaki

boşluk ilk metottaki gibi sac kalınlığı kadar ayarlanmış ancak bu kez büküm bitiminde üst kalıp sac üzerinden hemen ayrılmıştır. Yani bekleme süresi verilmemiştir. Üçüncü metotta ise üst kalıp alt kalıbın dibine gidecek kadar ayarlanmış ve arada kalan sacın kalınlığı ihmal edilmiştir. Üçüncü metotta büküm bitiminde sac üst kalıp üzerinde 20 s bekletilmiştir. Dördüncü metotta alt ve üst kalıp arasındaki boşluk üçüncü metottaki gibi ayarlanmış ancak bu kez büküm bitiminde üst kalıp sac üzerinden hemen ayrılmıştır. Her deney metodunda 60 adet sac bükümü gerçekleştirilmiş ve 4 deney metodu ile yapılan büküm sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak büküm sırasında üst kalıp pozisyonunu belirlerken bükümü yapılan sac malzemenin kalınlığının ihmal edildiği üçüncü ve dördüncü metotlar karışık ve uygunsuz sonuçlar vermiştir. Birinci ve ikinci metotta yapılan deney sonuçları anlamlı bulunmuş ve çalışma kapsamında bu iki metotta yapılan büküm sonuçları değerlendirilmiştir (Tekaslan ve ark. 2008).

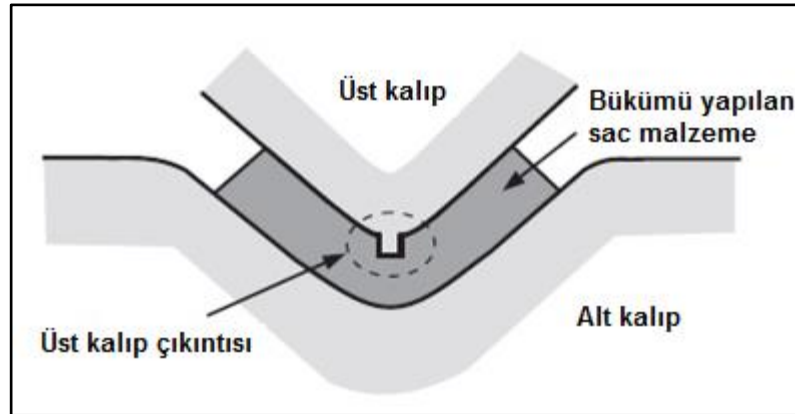
Birinci ve ikinci büküm metodu ile yapılan deneylerin sonuçları Şekil 2.13'te verilmiştir. Geri yaylanma değerlerinin $0,5^\circ$ ve 5° arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Tekaslan ve ark. 2008).



Şekil 2.13. İki farklı metot kullanılarak yapılan farklı kalınlıklardaki malzeme bükümleri sonrası ortaya çıkan geri yaylanma miktarları (Tekaslan ve ark. 2008)

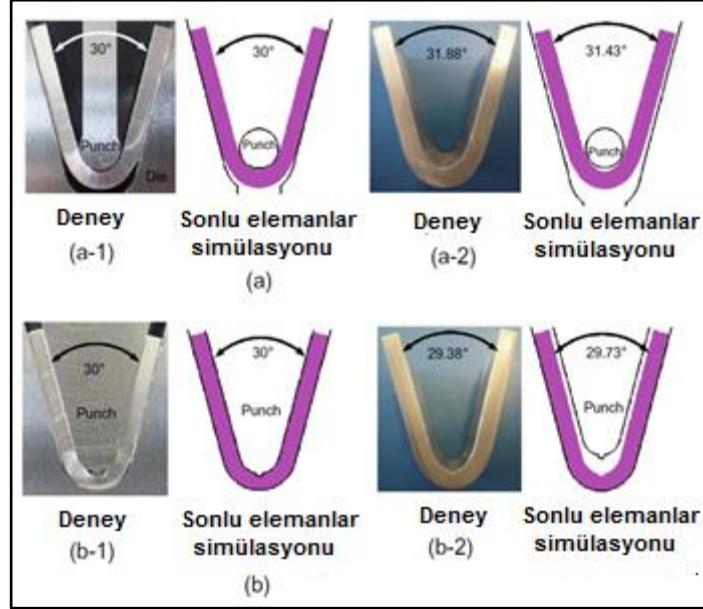
V-büküm tekniğinin sonlu elemanlar simülasyonu ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasının yapıldığı çalışmada Nilsson ve ark. (1997) sac metal parçaların bükümündeki en büyük problemin geri yaylanma olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmanın ana amacının V-kalıpta yapılan bir büküm için geri yaylanma oranlarının sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilebilmesi olduğu vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda sonlu elemanlar yöntemi ile geri yaylanma oranlarının tahmin edilebileceği ortaya konmuştur. Çalışmada değişik kalınlıklarda 8 farklı malzeme tipi ele alınarak geri yaylanma tespiti üzerine deneyler yapılmıştır. Simülasyondan elde edilen sonuçlar ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu deneyler ve simülasyon arasında iyi bir uyum elde edilmiştir.

Thipprakmas (2011) yaptığı çalışmasında V-büküm işlemi sırasında çıkıntılı üst kalıp mekanizması üzerinde sonlu elemanlar analizi yapmıştır. Çalışmada çıkıntılı üst kalıp tekniğinin V-büküm işlemleri sırasında geri yaylanma problemlerini çözmek amacıyla yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Bununla birlikte bu tekniğin geri yaylanma üzerindeki etkisinin henüz net olarak tespit edilmediğine de değinilmiştir. İşte bu sebeple bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ve laboratuvar deneyleri ile çıkıntılı üst kalıp mekanizmasının geri yaylanma üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çıkıntılı üst kalıp mekanizması Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.14. Çıkıntılı üst kalıp mekanizması (Thipprakmas 2011)

Çıkıntılı üst kalıp tekniğinin kullanılarak ve kullanılmayarak yapıldığı bükme deneyleri ve sonlu elemanlar analizlerinin karşılaştırılması Şekil 2.15’de verilmiştir.



Şekil 2.15. Deneysel ve sonlu elemanlar simülasyonundan elde edilen sonuçların kıyaslanması (Thipprakmas 2011)

- (a) Çıkıntılı üst kalıp tekniği yok. Dairesel şekilli üst kalıp ($\text{ØP} = 7,0 \text{ mm}$)
(a-1) Yükleme kaldırılmadan (a-2) Yükleme kaldırıldıktan sonra
(b) Çıkıntılı üst kalıp tekniği var. V-şekilli üst kalıp ($R_p=3,5\text{mm}$, $R_d= 6,5\text{mm}$,
 $\alpha=30^\circ$, $h=0,5\text{mm}$, $w=1\text{mm}$)
(b-1) Yükleme kaldırılmadan (b-2) Yükleme kaldırıldıktan sonra

Tekiner (2004) birkaç farklı kalınlık ve mekanik özellikteki sac metal parçaların bükümü sonrası ortaya çıkan geri yaylanma oranları üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. Tekiner ilk olarak sac metal ürün endüstrisinde bükme kalıplarının önemine işaret etmiştir. Ayrıca bükme sonrası geri yaylanma oranlarının kalıp tasarımına bağlı olduğuna vurgu yapmıştır. Kabul edilebilir tolerans limitleri içinde bükümü yapılan sac-metal parçaların geri yaylanma miktarlarının tahmin edilebileceğini belirtmiştir. Bu çalışmada bükümü yapılan ürünler üzerinde geri yaylanma oranlarının belirlenmesi için deneysel araştırmalar yapılmıştır. Bu nedenle V-büküm kalıplarında farklı açılarda bükümü yapılan çeşitli sac metallerin geri yaylanma miktarları elde edilerek grafikler

oluşturulmuştur. 18 farklı modül kalıpta 4 çeşit büküm metodu kullanılarak 6 farklı malzeme tipi için geri yaylanma grafikleri oluşturulmuştur. Bükme tiplerinin geri yaylanma üzerindeki etkisi ve elde edilen grafiklerin uygunluğu tüm detayları ile tartışılmıştır. Elde edilen test sonuçları tablo ve grafiklere aktarılarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmayla birlikte geri yaylanma dikkate alınarak dizayn edilen bükme kalıpları için faydalı veriler elde edilmiştir.

Saric ve ark. (2016) yaptıkları çalışmalarında, büküm işlemlerindeki en kritik problemlerden biri olan geri yaylanma üzerinde durmuştur. İş parçasının bükümünde oluşan geri yaylanma sonucu istenilen ölçüsel toleransları elde etmeye yönelik çalışmalar yapmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yük altında iş parçası geometrisindeki değişimleri, gerilme-birim şekil değiştirme ve geri yaylanma miktarlarını tahmin etmeye çalışmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan sonuçları doğrulama amacıyla deneysel çalışmalar da yapılmıştır. Deneysel çalışmalar 3 farklı malzeme çeşidi kullanılarak farklı alt kalıp genişliği, farklı üst kalıp yarıçapı ve farklı büküm açılarında yapılmıştır. Malzeme olarak Al 99.5, siyah çelik DD13 EN ve yüksek mukavemetli çelik S355MC EN kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için alt kalıp genişliklerini ve üst kalıp yarıçaplarını ayarlamaya uygun özel bir test cihazı hazırlanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile siyah çelik DD13 EN ve Al 99.5 malzemeleri için ortaya çıkan geri yaylanma oranlarının sonlu elemanlar yöntemiyle yüksek hassasiyette tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Ancak yüksek mukavemetli çelik S355MC EN malzemesine ait deneysel sonuçlar ile sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenen geri yaylanma oranlarında önemli sayılabilecek farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde veya deneysel çalışmalarda, yüksek mukavemetli çelik S355MC EN malzemesinin bükümlerinde alt kalıp genişliğinin azaltılması ile geri yaylanmanın düştüğü ve dolayısıyla büküm açısının yüksek hassasiyetle elde edilebildiği gösterilmiştir.

Adnan ve ark. (2016) çalışmalarında, AA6061 malzemesi için Taguchi metodu kullanarak malzemenin kalınlığının homojen olmayan bölgelerindeki geri yaylanma davranışlarını incelemiştir. Otomotiv sektöründe kullanılan parçaların ağırlığını düşürmek için kullanılan en yaygın yöntemin ihtiyaç olmayan bölgelerde parça

kalınlığının azaltılması olduğu bildirilmiştir. Bu sebeple otomotiv sektöründe kullanılan bazı parçalarda malzeme kalınlığının parça genelinde aynı olmadığı vurgulanmıştır. Dolayısıyla kalınlığın homojen dağılmadığı malzemelerin bükümlerinde geri yaylanma oranlarının farklı olabildiği belirtilmiş ve çalışmada, belirlenen AA6061 malzemesi için farklı kalınlık bölgelerindeki geri yaylanma davranışları üzerinde durulmuştur. Çalışmada geri yaylanma oranlarını etkileyen 3 önemli parametre üzerinde yoğunlaşmıştır. Kalınlık değişimi, büküm açısı ve parça hizalama üzerinde Taguchi metodunu kullanarak deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile geri yaylanma üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda geri yaylanma oranları etkileyen en önemli parametrenin büküm açısı olduğu tespit edilmiştir. İkinci etkenin malzemedeki kalınlık dağılımının olduğu saptanırken geri yaylanma oranlarına en az etki eden parametrenin bükme işlemi sırasında numunenin doğru hizalanmaması olduğu bildirilmiştir.

Marcondes ve ark. (2015) yaptıkları çalışmalarında yüksek mukavemetli TRIP çeliklerinin bükümleri sonucu oluşan geri yaylanma oranları üzerinde durmuşlardır. Son yıllarda, gelişmiş yüksek mukavemetli TRIP çeliklerinin özellikle otomotiv sektöründe kullanımında önemli bir artış olduğu ve dolayısıyla büküm sırasındaki geri yaylanma davranışlarını inceleme ihtiyacının olduğu bildirilmiştir. Çalışmada, düşük geri yaylanma oranları ile istenilen parça geometrisine ulaşabilmek için TRIP800 malzemesine ait numunelerin V-büküm yöntemi ile form verme işlemleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda malzeme üzerine uygulanan bükme kuvvetinin geri yaylanma oranlarında önemli bir etki gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle çalışma sırasında V-bükme kalıbı üzerindeki malzemeye farklı bükme kuvvetleri uygulanmıştır. Sonuç olarak V-büküm metodunda bükme kuvvetini artırarak geri yaylanma oranlarını azaltmanın mümkün olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde abkant preslerde farklı malzeme çeşitlerinin farklı kalınlık ve farklı boyları için yapılan büküm işlemleri ile ilgili bükme kuvveti, üst kalıp deplasmanları ve geri yaylanma gibi konular üzerinde yapılan ve yukarıda özetlenen farklı çalışmalar her ne kadar bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar için emsal teşkil etse de farklı geometri ve farklı kalınlıklarda Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L malzemelerini

kullanarak yapılan deneylerle belirlenen, aynı tip malzemelerin tedarikçi firmaya ve bükme hızına göre bükme kuvveti ve büküm anındaki yer değiştirme miktarları arasındaki farkların belirlenmesi, üst kalıbın hareketine bağlı olarak kuvvet değişimlerinin ortaya konulması, geri yaylanma oranlarının tespiti, kuvvet, yer değiştirme, açı değişimi ve geri yaylanma gibi çıktıların bükme hızı ve tedarikçi firmaya bağlı olarak değişimi gibi tez kapsamında üzerinde çalışılan konular ile ilgili yapılmış yeterli çalışmaya rastlanmamıştır.

Literatür araştırmasının yanı sıra tez konusu ile paralel olabilecek patent ve faydalı model başvuruları incelenmiştir. Çalışmaya örnek teşkil edebilecek ulusal-uluslararası patent ve faydalı modellerden bazıları aşağıda sıralanmıştır.

Ulusal Başvurular:

- Ölçüm elemanına sahip bükme aleti - Trumpf Maschinen Austria GmbH &Co.Kg.
Tescil No: 2012 12651, Tescil Tarihi: 21.01.2013 (Patent)
- Bir iş parçasının bükme deformasyonu vasıtası ile üretilmesi için metot - Trumpf Maschinen Austria GmbH &Co.Kg.
Tescil No: 2008 03994, Tescil Tarihi: 21.07.2008 (Patent)
- Bükme makineleri için bir büküm açısı ölçüm düzeneği - Durmazlar Makina Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi
Tescil No: 2009 03549, Tescil Tarihi: 22.08.2011 (Patent)
- Abkant Presler için hidrolik kalıp tutucusu - Wilson Tool International, Inc.
Tescil No: 2007 05202 , Tescil Tarihi: 21.09.2007 (Patent)
- Abkant preslerde sac sehimini engelleyen bombeleme işlemi için hidrolik tahrik mekanizması - Durmazlar Makina Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi
Tescil No: 2007 07279 , Tescil Tarihi: 22.09.2008 (Faydalı Model)

- Servo tork motorlu elektrikli abkant preslerde yenilik - Ermaksan Makina Sanayi Ve Ticaret Anonim Şirketi
Tescil No: 2007 07359, Tescil Tarihi: 22.09.2008 (Faydalı Model)
- Abkant preslerde yenilik - Baykal Makina Sanayi Ve Ticaret Anonim Şirketi
Tescil No: 2008 00830, Tescil Tarihi: 22.09.2008 (Faydalı Model)
- Hidrolik abkant preslerde enerji tasarrufu sağlayan bir yapılanma - Demirer Teknolojik Sistemler Sanayi Ticaret Limited Şirketi
Tescil No: 2009 06352, Tescil Tarihi: 21.06.2013 (Patent)
- Abkant preslerde alt kalıp kaldırma ve çevirme mekanizması - Durmazlar Makina Sanayi Ve Ticaret Anonim Şirketi
Tescil No: 2011 07467, Tescil Tarihi: 22.04.2013 (Patent)
- Ayarlanabilir kalıp - Acera S.A.
Tescil No: 2005 04684, Tescil Tarihi: 21.12.2005 (Patent)
- Bir bükme makinesi ile bir iş parçasının kalınlığının tespiti için metot ve bu tip bir bükme makinesi - Trumpf Maschinen Austria GmbH & Co.Kg.
Tescil No: 2013 02501, Tescil Tarihi: 22.04.2013 (Patent)
- Bükme aletleri için kenetleme mekanizması - Franciscus Wilhelmus Rouweler
Tescil No: 2012 09536, Tescil Tarihi: 22.10.2012 (Patent)
- Paneller, saclar, levhalar ve benzeri yassı madeni elemanları bükmek için makina ve ilgili bükme yöntemi - Atlantic International Assets S.A.
Tescil No: 2010 10216, Tescil Tarihi: 21.01.2011 (Patent)

Uluslararası Başvurular:

- CN202316788 (U) - Non-indentation bending machine die - Maanshan Golin Press Brake Tooling Co. Ltd.
Uygulama No: CN20112489206U 20111130 , Tarih: 11.07.2011
- CN202387840 (U) - Bending and flattening mould for bender - Maanshan Golin Press Brake Tooling Co. Ltd.
Uygulama No: CN20112508589U 20111208 , Tarih: 22.08.2012
- EP2631020 (A1) - Upper tool holder for press brake - Amada Co. Ltd.
Uygulama No: EP20110834290 20111014 , Tarih: 28.08.2013
- JP2013035067 (A) - Press Brake For Bending Sheet - Amada Co. Ltd.
Uygulama No: JP20120220741 20121002 , Tarih: 21.02.2013
- WO2012169461 (A1) - Press Brake, And Processing Method Using Press Brake - Amada Co Ltd [JP]; Yoshida Hidehiko [JP]
Uygulama No: WO2012JP64390 20120604 , Tarih: 13.12.2012
- WO2012155168 (A1) - Angle Measuring Device For A Press Brake - Trumpf Maschinen Austria Gmbh [At]; Angerer Gerhard [At]; Freudenthaler Klemens [At]; Gaggl Josef [At]; Hoerl Matthias [At]; Strasser Hagen [At]; Theis Helmut [At]; Weiss Thomas [At]
Uygulama No: WO2012AT50070 20120515 , Tarih: 22.11.2012
- WO2012119175 (A1) - Method For Positioning A Workpiece At A Press Brake - Trumpf Maschinen Austria Gmbh [At]; Edlbauer Richard [At]; Gugler Gerhard [At]
Uygulama No: WO2012AT50030 20120307 , Tarih: 13.09.2012

- WO2011070232 (A1) - Method For Forming The Body Of A Press Brake, And A Press Brake - Aliko Automation Oy [F1]; Alitalo Hannu
Uygulama No: WO2010FI50971 20101129 , Tarih: 16.06.2011
- CN101837394 (A) - Press brake for bending sheets - Amada Europ
Uygulama No: CN20101134510 20100315 , Tarih: 22.09.2010
- EP2036711 (A1) - Drive device for a press brake - Trumpf Maschinen Austria Gmbh
Uygulama No: EP20080005440 20080322 , Tarih: 18.03.2009
- JP2008080368 (A) - Work Positioning Apparatus In Press Brake - Sanmei Electric Co. Ltd.
Uygulama No: JP20060263132 20060927 , Tarih:10.04.2008
- WO2007018218 (A1) - Servo-Motor For Driving Press With Brake Mechanism - Amada Co. Ltd. [JP]; Amada Press Technology Co. Ltd. [JP]; Narukawa Hiroshi; Itakura Hideo; Soga Mitsumasa
Uygulama No: WO2006JP315678 20060808 , Tarih: 15.02.2007
- JP2007114077 (A) - Sheet Material Bent Angle Measuring Instrument In Press Brake, And Article Angle Measuring Instrument - Murata Machinery Ltd
Uygulama No: JP20050306612 20051021 , Tarih: 10.05.2007
- WO2011148059 (A2) - Press Brake, Press Brake Beam And Table, And Edging Method - Aliko Oy Ltd [F1]; Alitalo Hannu [F1]
Uygulama No: WO2011FI50484 20110526 , Tarih: 01.12.2011
- JP2012240111 (A) - Bending Material, Bending Method, Graphic Preparing Device and Press Brake - Amada Co. Ltd.
Uygulama No: JP20110115576 20110524 , Tarih: 10.12.2012

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Çalışma kapsamında bükme parametrelerini tespit etme amaçlı Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L yassı malzemeler seçilmiştir. Söz konusu malzemeler kullanılarak yapılan bükme deneylerinde malzeme kalınlığının etkisini araştırma amacıyla Hardox 400 malzeme için 4 mm ve 6 mm, Paslanmaz AISI 304L malzemesi için ise 4 mm, 6 mm ve 8 mm olmak üzere farklı kalınlıklar ele alınmıştır. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları ve mekanik özelliklerindeki farklılıkların bükme parametrelerine etkisini inceleyebilmek için malzemeler 2 farklı üreticiden tedarik edilmiştir. Tedarik edilen malzemelerin üretildikleri lota ait kimyasal kompozisyonları ve mekanik özellikleri üretici firmalardan alınmış olup, kimyasal kompozisyonlar Çizelge 3.1. ve Çizelge 3.2’de, mekanik özellikler ise Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’de sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 3.1. İki farklı firmadan tedarik edilen Paslanmaz AISI 304 L malzemelerine ait kimyasal kompozisyonlar

		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	N %
Paslanmaz AISI 304L	L Firması	0,018	0,43	1,38	0,031	0,002	18,2	8,10	0,052
	D Firması	0,023	0,41	1,47	0,034	0,001	18,1	8,08	0,046

Çizelge 3.2. İki farklı firmadan tedarik edilen Hardox 400 malzemelerine ait kimyasal kompozisyonlar

		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	B %
Hardox 400	K Firması	0,11	0,28	0,99	0,008	0,003	0,20	0,04	0,019	0,002
	E Firması	0,13	0,23	1,61	0,011	0,003	0,24	0,03	0,005	0,001

Çizelge 3.3. İki farklı firmadan tedarik edilen Paslanmaz AISI 304 L malzemelerine ait mekanik özellikler

		R_e MPa	R_m MPa	A5 (L ₀ /d ₀ =5) %	Mikrosertlik HB
Paslanmaz AISI 304L	L Firması	315	630	55	185
	D Firması	290	620	56	180

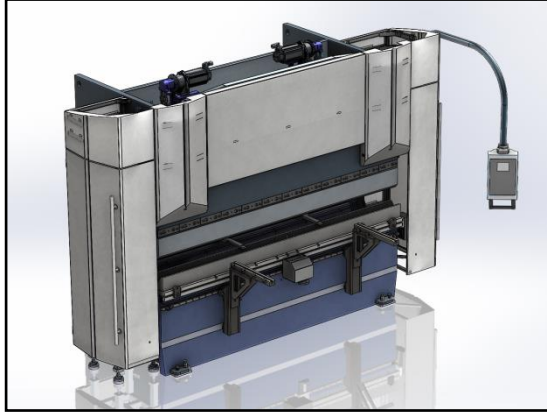
Çizelge 3.4. İki farklı firmadan tedarik edilen Hardox 400 malzemelerine ait mekanik özellikler

		R_e MPa	R_m MPa	A5 (L ₀ /d ₀ =5) %	Mikrosertlik HB
Hardox 400	K Firması	1000	1250	10	400
	E Firması	1000	1250	10	400

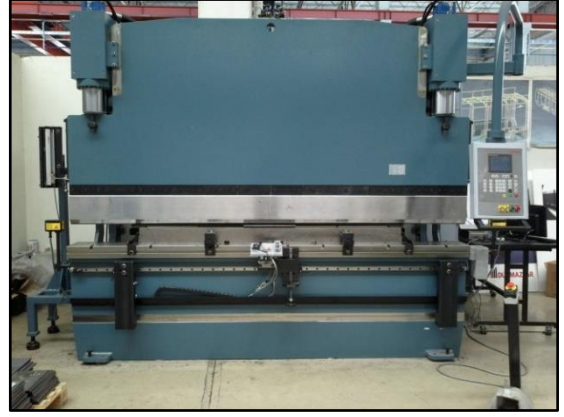
Tedarik edilen bu malzemelerden çıkarılan numuneler üzerinden üniversal çelme cihazı kullanılarak mekanik özellikler ayrıca tespit edilmiş olup ileri bölümlerde açıklama yapılmıştır.

3.2. Hidrolik Abkant Pres Deney Düzeneği (HAPDD)

Çalışmada, ilk olarak abkant presler kullanılarak bükme işlemleri gerçekleştirilen sac malzemelerde istenilen geometrik özelliklerin elde edilebilmesi için uygun büküm parametrelerinin belirlenmesinde kullanılacak deney düzeneğinin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1).



a



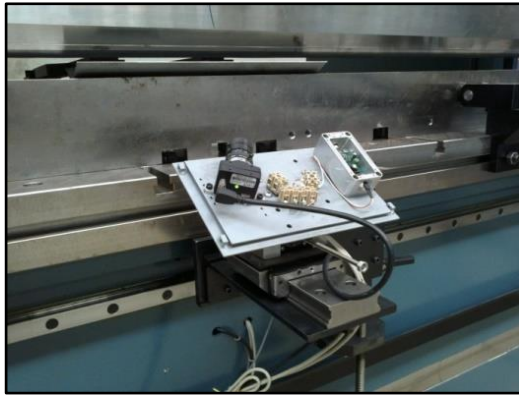
b

Şekil 3.1. Bükme deneylerinin yapılması amacıyla imal edilen hidrolik abkant pres deney düzeneği, a) Bilgisayar destekli tasarım görüntüsü, b) İmalatı tamamlanan deney düzeneği görüntüsü

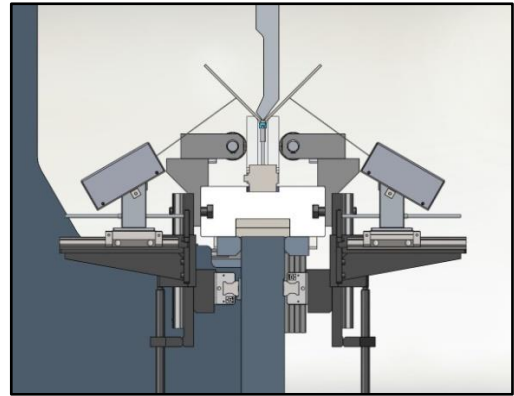
Farklı geometri ve mekanik özelliklerdeki Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L sac malzemeler kullanılarak yapılan deneylerden bükme parametrelerini tespit etme amacıyla imal edilen deney düzeneğine çeşitli ölçüm cihazları monte edilmiştir. Kullanılan ölçüm cihazları altta sıralanmıştır.

3.2.1. Kameralı Açı Ölçüm Cihazı

Alt kalıp önüne ve arkasına bir biri ile senkronize çalışan 2 adet kameralı açı ölçüm cihazı yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Bu sayede büküm sırasındaki açı değişimleri anlık olarak izlenip malzemede büküm sonrası gerçekleşen geri yaylanma değerleri tespit edilmiştir.



a

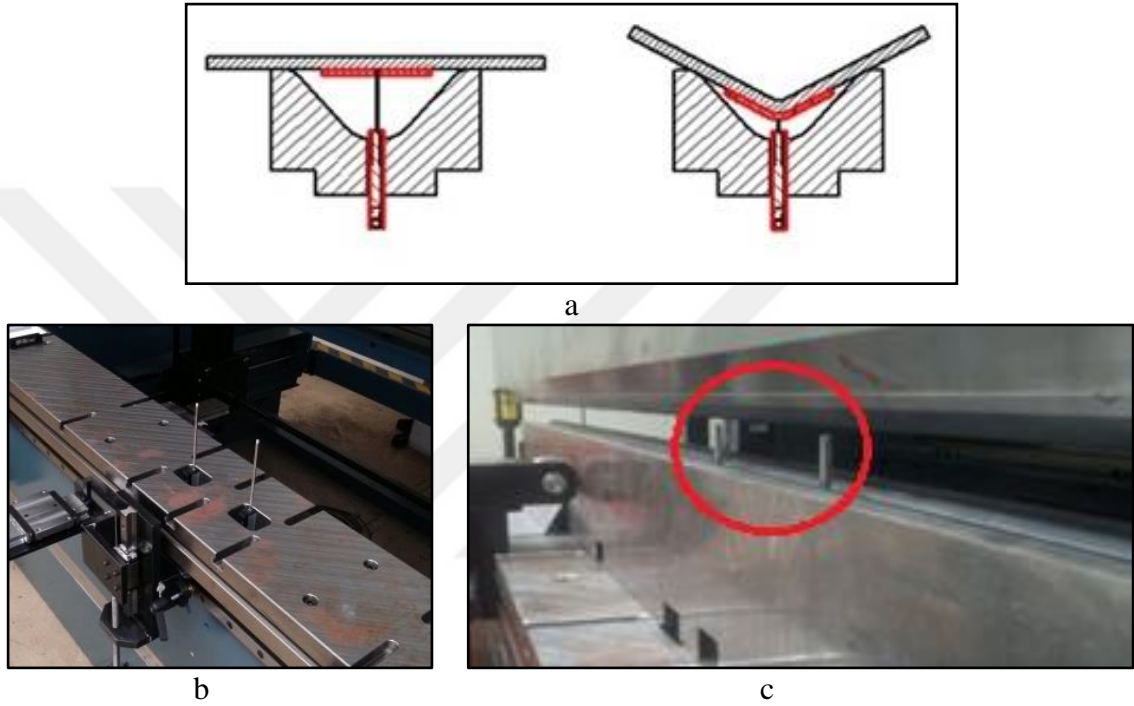


b

Şekil 3.2. Kameralı açı ölçüm cihazı ve HAPDD üzerindeki yerleşimi, a) Düzenek üzerindeki yerleşim fotoğrafı, b) Bilgisayar destekli tasarım görüntüsü

3.2.2. Lineer Potansiyometre

Bükme sırasında sac malzemedeki deplasmanları hesaplamak amaçlı alt kalıp içine farklı iki noktadan ölçüm alabilecek lineer potansiyometreler yerleştirilmiştir (Şekil 3.3). Bu sayede abkant presin sacı istenilen derecede bükmesi için üst kalıbı gönderdiği noktanın sactaki yer değişimlerine göre doğruluğu irdelenmiştir.



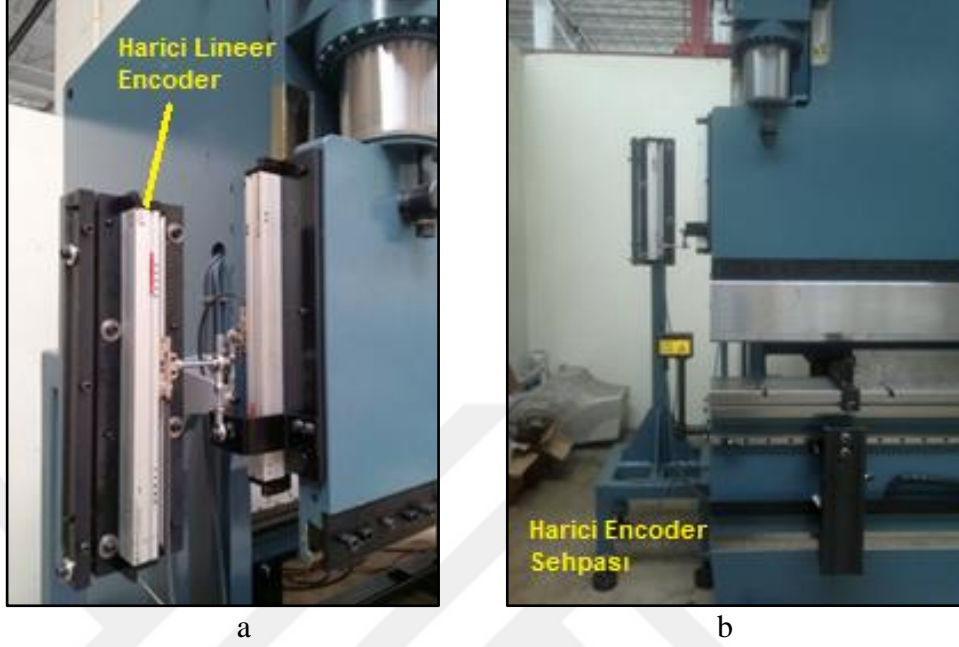
Şekil 3.3. Kalıp içi lineer potansiyometreler

- a) Kalıp içi potansiyometrelerin şematik görünümü, b) HAPDD üzerine montaj edilen potansiyometrelere ait fotoğraf, c) Alt kalıp içinde ölçüm için hazırlanmış potansiyometrelere ait fotoğraf

3.2.3. Lineer Encoder

Bükme deneylerinde üst kalıp yer değiştirme miktarının ölçümleri için büküm sırasında makinede oluşacak sehimlerden etkilenmemesi adına makine dışına makineden bağımsız yüksek hassasiyetli bir lineer encoder yerleştirilmiştir (Şekil 3.4). Lineer encoder ve kalıp içine yerleştirilen potansiyometrelerden alınan veriler kıyaslanarak daha doğru ölçümlerin harici lineer encoderden alındığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla kalıp içi potansiyometrelerden alınan veriler iptal edilerek tez kapsamında oluşturulan

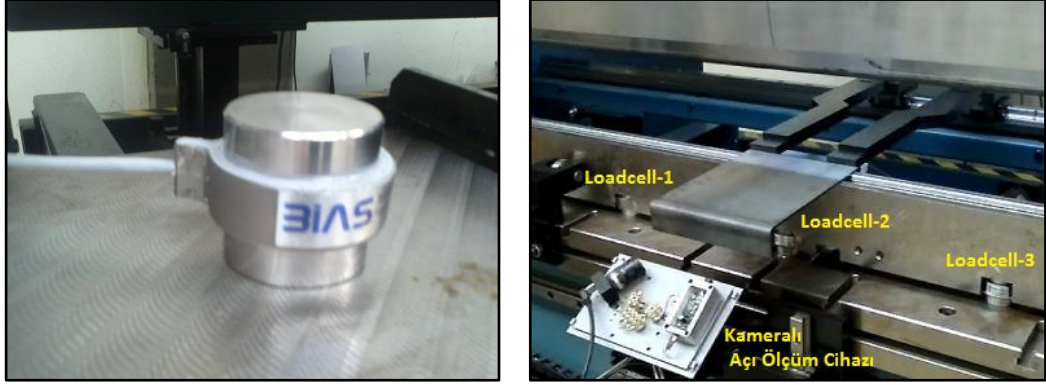
kuvvet-yer değiştirme ve yer değiştirme-zaman grafiklerinde harici lineer encoderden alınan yer değiştirme miktarları kullanılmıştır.



şekil 3.4. Makineden harici konumlandırılmış lineer encoder
a) Linner encoder fotoğrafı, b) Harici lineer encoder sehpaşı ve konumu

3.2.4. Dinamik Yük Hücresi

Tez alışmaları kapsamında HAPDD’de yapılan bükme deneyleri 5 mm/s ile 15 mm/s arasında hızlarda olduğundan dolayı kuvvet ölçümleri için dinamik yük hücresi ihtiyaı ortaya çıkmıştır. Bkmlerde kuvvet değişimlerini lme amaçlı 3 adet 1000 kN kapasitesinde dinamik yük hücresi kullanılmıştır (şekil 3.5). Yük hücreleri Hidrolik Abkant Pres Deney Düzeneğinin alt kalıbı altına belirli aralıklarla yerleştirilmiştir. Yük hücrelerinden alınan verilerle farklı kalınlık, farklı uzunluk, farklı büküm açısı, farklı büküm hızı ve farklı kanal açıklıkları gibi parametreler için büküm kuvvetleri hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Kuvvet ölçümleri için kalıp altına yerleştirilen dinamik yük hücreleri
a) Dinamik yük hücresi, b) Yük hücrelerinin HAPDD'deki yerleşimi

Tedarik edilen dinamik yük hücreleri bükme deneyleri öncesi 1000 kN kapasiteli Instron marka üniversal çekme-basma test cihazında kalibre edilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Dinamik yük hücresi kalibrasyonu

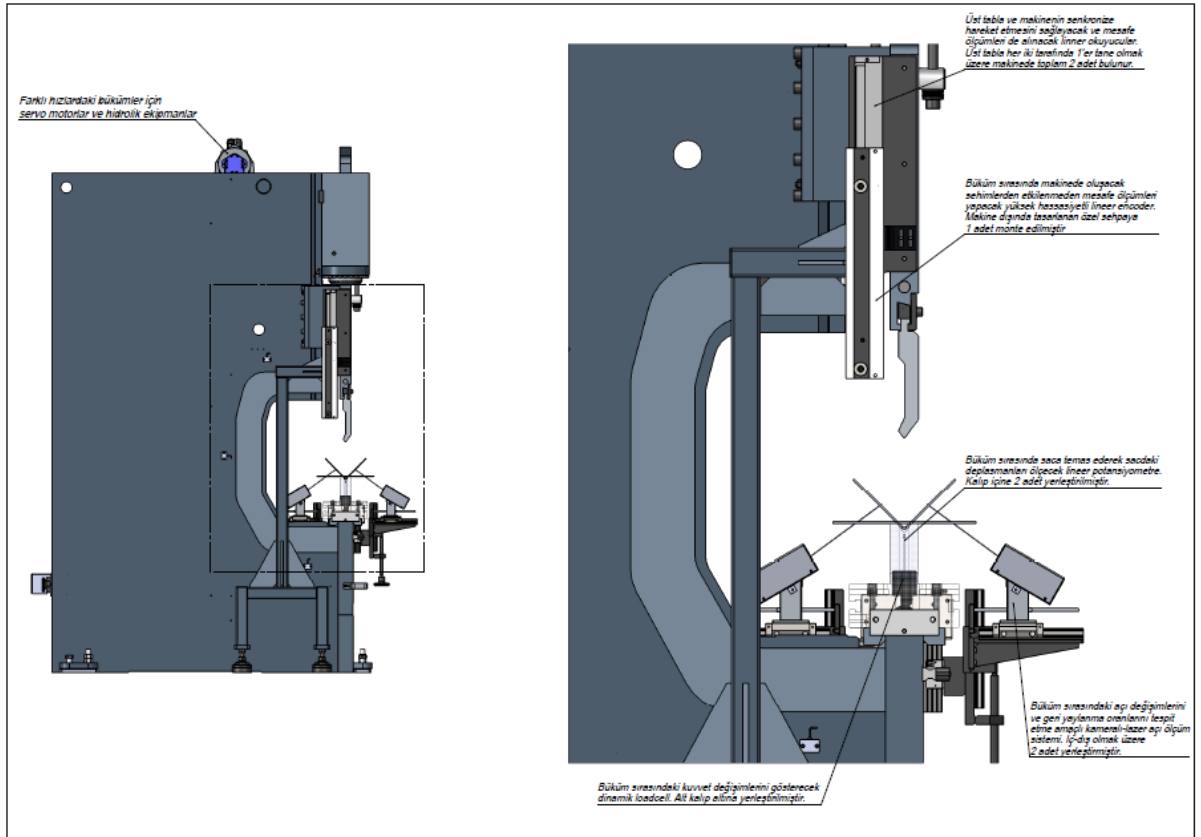
Kalibre edilen rod tipi özel yük hücresine ait mekanik özellikler aşağıda sıralandığı gibi ortaya çıkmıştır.

- Minimum yük : Çalışma yükünün %0'ı kadar
- Maksimum yük : Çalışma yükünün %120'si kadar
- İzin verilen maksimum aşırı yükleme : Çalışma yükünün %150'si kadar
- Kırılma yüklemesi : Çalışma yükünün %300'ünü geçtiği zaman
- Maksimum yanal yükleme : Çalışma yükünün %10'u kadar
- Maksimum dinamik yükleme : Çalışma yükünün %40'ı kadar

Yük hücresine ait elektiriksel değerler ise üretici firma tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir.

- Nominal hassasiyet : 1mV/Volt
- Besleme voltajı : N.10V 2 – 15 Volt
- Nominal çalışma sıcaklığı : -10/+40 °C
- Hücre malzemesi : Yüksek mukavemetli paslanmaz çelik

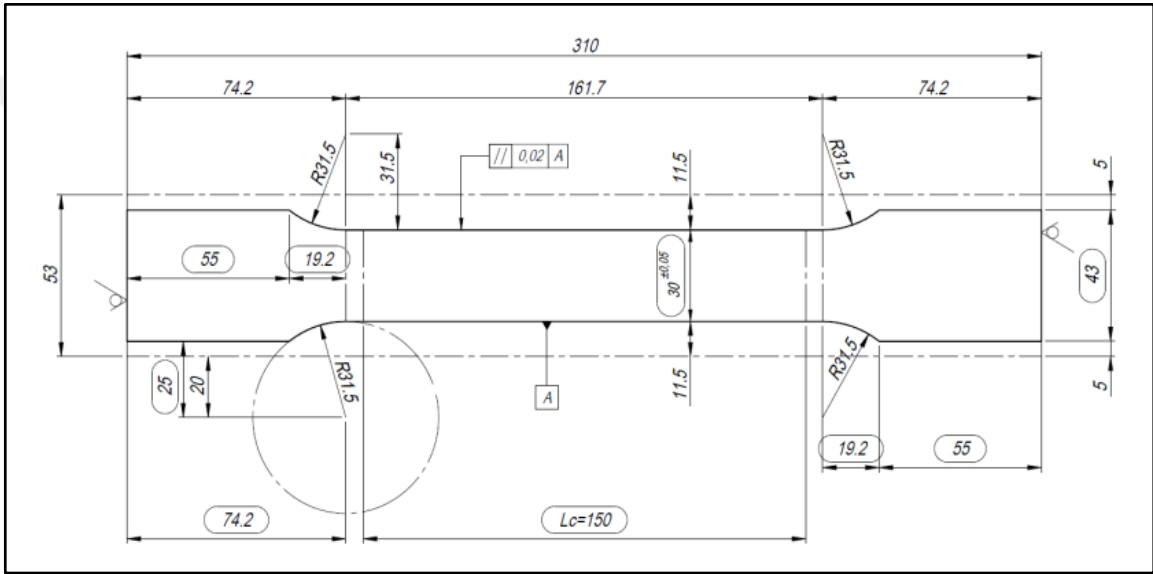
İmal edilen Hidrolik Abant Pres Deneş Düzeneginde gerçekteşirilen eş zamanlı ölçümlerle bükümlere ait kuvvet-zaman, yer değiştirme-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri ölçümlerden elde edilen voltaj değerleri üzerinden ham datalar kullanılarak elde edilmiştir. Malzemelerin büküm sonrası geri yaylanma değerleri tespit edilerek farklı sac kalınlığı, bükme boyu, bükme hızı, mekanik özellik ve kalıp geometrileri için bu değerler optimize edilmiştir. Tüm ölçüm cihazlarının makine üzerinde yerleşimi Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Hidrolik abkant pres deney düzenegi kompleksi ve üzerindeki ekipman ve ölçüm aletlerinin yerleşimi

3.3. Çekme Deneyleri

Çalışma kapsamında bükme deneylerinden önce malzemelerin üretici firmaların verdiği mekanik özellikler ile gerçek mekanik özellikleri arasındaki farkları ortaya koyma amaçlı iki malzeme türü için de çekme deneyleri yapılmıştır. Hadde yönüne dik ve paralel olmak üzere yapılan çekme deneylerinde numune ebatları ASTM E 8 ve TS 138'e göre belirlenmiştir. Çekme numuneleri 53x310 mm ebatlarında soğuk kesme yöntemi ile kesilip Şekil 3.8'deki teknik resme göre işlenerek hazırlanmıştır.

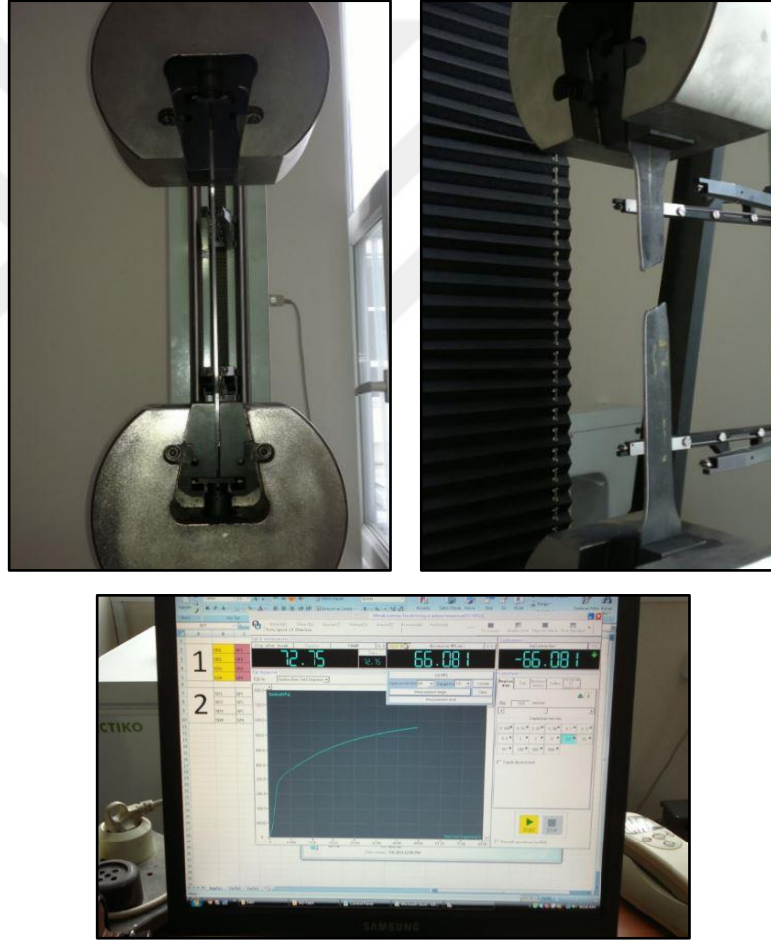


Şekil 3.8. ASTM E 8 ve TS 138'e göre çekme deneyi numunesi teknik resmi



Şekil 3.9. Hazırlanan çekme deneyi numuneleri

Çekme deneyleri, 250 kN kapasiteli UTEST marka universal çekme-basma test cihazında yapılmıştır. Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarında yapılan deneyler ile birlikte malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Malzemelerin gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilerek akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen veriler malzeme tedarigi sırasında üretici firmalardan talep edilen malzemelerin o lotlarına ait sertifikalarında belirtilen mekanik özellikleri ile kıyaslanmıştır. Böylece üreticilerin verdiği mekanik özelliklerle gerçek değerler arasındaki sapmalar tespit edilmiştir. Çekme deneyleri 10 mm/dk hızda yapılmıştır.



Şekil 3.10. Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L malzemelerinin çekme deneylerine ait fotoğraflar

Çekme deneylerinde her iki malzeme çeşidi için hadde yönü de dikkate alınarak toplam 32 deney yapılmıştır. 4 mm kalınlıktaki Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L

numuneler haddeye dik ve haddeye paralel olarak her iki tedarikçi için 4'er tekrarlı olacak şekilde çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Çekme deneyi için numune tablosu Çizelge 3.5.'de verildiği gibi oluşturulmuştur.

Çizelge 3.5. Çekme deneyi numune tablosu

Malzeme Tipi	Sac Kalınlığı (mm)	Hadde Yönü	Tedarikçi Firma	Çekme Hızı (mm/dk)	Deney Adet	Numune No						
						Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4			
Hardox 400	4	Dik	K	10	4	1	2	3	4			
			E		4	5	6	7	8			
			Paralel		K	4	9	10	11	12		
					E	4	13	14	15	16		
							16					
		Paslanmaz AISI 304L	4		Dik	L	10	4	17	18	19	20
						D		4	21	22	23	24
						Paralel		L	4	25	26	27
D	4			29				30	31	32		
					16							
TOPLAM ÇEKME DENEYİ SAYISI					32							

3.4. Bükme Deneyleri

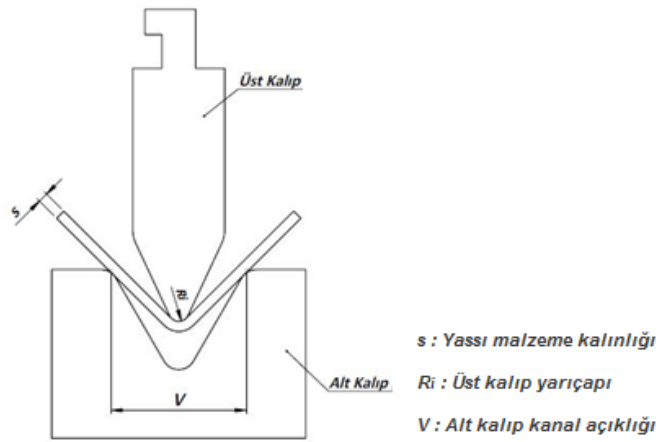
Bükme deneylerinde kullanılan numune kalınlıkları ve boyları aç, yer değiştirme ve kuvvet ölçümlerine uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Malzeme genişliğinin bükme parametreleri üzerindeki etkisi bu tez kapsamında incelenmeyeceğinden dolayı tüm deney numuneleri için 300 mm genişlik değeri sabit olarak ele alınmıştır. Hardox 400 malzemesi için 4 ve 6 mm iki farklı kalınlık değeri ile beraber malzeme boyunun bükme parametreleri üzerindeki etkisini inceleme amaçlı 600 ve 1000 mm olmak üzere iki farklı uzunluk seçilmiştir. Paslanmaz AISI 304L malzemesi için ise 4, 6 ve 8 mm kalınlık değerleri ile birlikte 200, 600 ve 1000 mm'lik farklı üç uzunluk değeri ele alınmıştır. Deneylerde kullanılacak kalınlık ve uzunluk değerlerinin belirlenmesiyle Hardox 400 malzeme için 4x300x600, 4x300x1000, 6x300x600 ve 6x300x1000, Paslanmaz AISI 304L malzeme için ise 4x300x200, 4x300x600, 4x300x1000, 6x300x200, 6x300x600, 6x300x1000, 8x300x200, 8x300x600 ve 8x300x1000 olacak şekilde tüm deneyler için numune ebatları ortaya çıkmıştır.

Tedarik edilen sac plakalar belirlenen ebat ve adetlerde malzeme kimyasal yapısına zarar vermemek adına soğuk şekillendirme yöntemiyle kesilerek HAPDD'deki deneylere hazır hale getirilmiştir. Bükme deneyleri için hazırlanan numune örnekleri Şekil 3.11.'de verilmiştir.



Şekil 3.11. Hazırlanan bükme deneyi numuneleri

İki farklı üreticiden tedarik edilen saclar yukarıda belirtilen kalınlık ve ebatlarda hazırlanarak çalışma kapsamında tasarlanıp üretilerek devreye alınan 135 ton kapasiteli Hidrolik Abkant Pres Deney Düzeneginde bükme deneylerine tabi tutulmuştur. 48 adet Hardox 400 ve 54 adet Paslanmaz AISI 304L olmak üzere toplam 102 numunenin bükme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde havada büküm yöntemi kullanılmıştır. Havada bükme yöntemiyle parça üzerine kuvvet uygulanarak yapılan deneylere ait şema Şekil 3.12.'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Hidrolik abkant pres deney düzenegindeki havada bükme işlemi

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde kalınlık, bükme boyu, büküm açısı, büküm hızı, kalıp açıklığı gibi pek çok parametrenin etkisi incelendiğinden dolayı çok sayıda deney adeti ortaya çıkmıştır. Belirlenen yaklaşık 1600 adet deney için ortaya çıkan yüksek malzeme maliyetleri ve uzun deney süreleri uygun görülmemiştir. Bu sebepler göz önünde bulundurularak yeni bir deney yöntemi araştırılmış ve sonuç olarak deney planı Taguchi deney yöntemi ile sadeleştirilmiştir. Amacı hedef değer etrafındaki değişkenliği azaltmak olan Taguchi yöntemi ile Hardox 400 malzemedeki iki farklı kalınlık için 48, Paslanmaz AISI 304L malzemedeki ise üç farklı kalınlık değeri için 54 adet deney sayısı belirlenmiştir.

Başlangıçta deney malzemelerinin her bir kalınlığında belirlenen 3 farklı ebat her bir ebat için 3 farklı açı ve 3 farklı hızda 3'er adet bükme deneyleri yapılması kararlaştırılmıştır. Taguchi yöntemi ile beraber her ebat için tek açı ve tek hızda 3'er deney yapılmış ve ortaya çıkan sonuçlar kıyaslanmıştır. Böylece fazla malzeme sarfıyatı ve zaman kayıplarının önüne geçilmiştir.

Deneylerde, Hardox 400 malzemesi için iki farklı kalınlık ele alındığından dolayı Taguchi L8 yöntemi kullanılırken, Paslanmaz AISI 304L malzemesi için ise üç farklı kalınlık ele alındığından dolayı Taguchi L9 yöntemi kullanılmıştır (Çizelge 3.6).

Çizelge 3.6. Taguchi deney yöntemi'ne göre belirlenen deneyler

Tedarikçi 1					Tedarikçi 2				
Taguchi L8 (Parametre=4, Seviye=2)					Taguchi L8 (Parametre=4, Seviye=2)				
Hardox					Hardox				
Deney No	Sac Kalınlığı	Ebat	Büküm Açısı	Büküm Hızı	Deney No	Sac Kalınlığı	Ebat	Büküm Açısı	Büküm Hızı
1	4	E2	1	V1	1	4	E2	1	V1
2	4	E2	1	V2	2	4	E2	1	V2
3	4	E3	2	V1	3	4	E3	2	V1
4	4	E3	2	V2	4	4	E3	2	V2
5	6	E2	2	V1	5	6	E2	2	V1
6	6	E2	2	V2	6	6	E2	2	V2
7	6	E3	1	V1	7	6	E3	1	V1
8	6	E3	1	V2	8	6	E3	1	V2
8 Deney x 3 Tekrar					8 Deney x 3 Tekrar				
Deney Sayısı 24					Deney Sayısı 24				
Taguchi L9 (Parametre=4, Seviye=3)					Taguchi L9 (Parametre=4, Seviye=3)				
Paslanmaz					Paslanmaz				
Deney No	Sac Kalınlığı	Ebat	Büküm Açısı	Büküm Hızı	Deney No	Sac Kalınlığı	Ebat	Büküm Açısı	Büküm Hızı
1	4	E1	1	V1	1	4	E1	1	V1
2	4	E2	2	V2	2	4	E2	2	V2
3	4	E3	3	V3	3	4	E3	3	V3
4	6	E1	2	V3	4	6	E1	2	V3
5	6	E2	3	V1	5	6	E2	3	V1
6	6	E3	1	V2	6	6	E3	1	V2
7	8	E1	3	V2	7	8	E1	3	V2
8	8	E2	1	V3	8	8	E2	1	V3
9	8	E3	2	V1	9	8	E3	2	V1
9 Deney x 3 Tekrar					9 Deney x 3 Tekrar				
Deney Sayısı 27					Deney Sayısı 27				
Toplam Deney Sayısı					102				

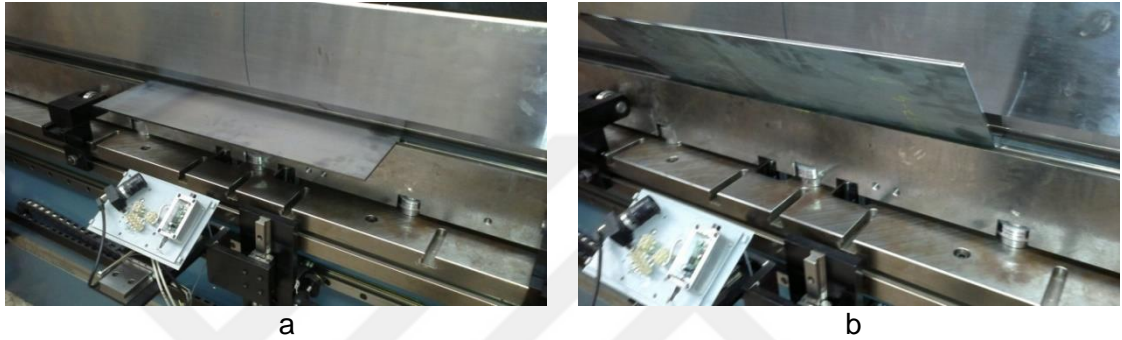
Taguchi yaklaşımına göre deney sayısı azaltılan numunelere ait deney planı Çizelge 3.7.'deki gibi oluşmuştur.

Çizelge 3.7. Bükme deneyleri planı

Malzeme Tipi	Sac Kalınlığı (mm)	Ebat	Hadde Yönü	Büküm Açısı	Tedarikçi Firma	Büküm Hızı (mm/s)	Deney Adet	Kanal Genişliği (mm)	Numune No				
									Deney 1	Deney 2	Deney 3		
Hardox 400	4	4x300x600	Dik	90	K	5	3	60	1	2	3		
		4x300x600		90	K	15	3		4	5	6		
		4x300x1000		120	K	5	3		7	8	9		
		4x300x1000		120	K	15	3		10	11	12		
		4x300x600		90	E	5	3		13	14	15		
		4x300x600		90	E	15	3		16	17	18		
		4x300x1000		120	E	5	3		19	20	21		
		4x300x1000		120	E	15	3		22	23	24		
		6x300x600		120	K	5	3		25	26	27		
		6x300x600		120	K	15	3		28	29	30		
	6	6x300x1000	90	K	5	3	31	32	33				
		6x300x1000	90	K	15	3	34	35	36				
		6x300x600	120	E	5	3	37	38	39				
		6x300x600	120	E	15	3	40	41	42				
		6x300x1000	90	E	5	3	43	44	45				
		6x300x1000	90	E	15	3	46	47	48				
		48											
		Paslanmaz AISI 304L	4	4x300x200	Dik	90°	L	5	3	30	49	50	51
				4x300x600		105°	L	10	3		52	53	54
				4x300x1000		120°	L	15	3		55	56	57
4x300x200	90°			D		5	3	58	59		60		
4x300x600	105°			D		10	3	61	62		63		
4x300x1000	120°			D		15	3	64	65		66		
6x300x200	105°			L		15	3	67	68		69		
6	6x300x600			120°		L	5	3	70		71	72	
	6x300x1000			90°		L	10	3	73		74	75	
	6x300x200			105°		D	15	3	76		77	78	
	6x300x600		120°	D	5	3	79	80	81				
	6x300x1000		90°	D	10	3	82	83	84				
	8		8x300x200	120°	L	10	3	85	86	87			
			8x300x600	90°	L	15	3	88	89	90			
			8x300x1000	105°	L	5	3	91	92	93			
			8x300x200	120°	D	10	3	94	95	96			
			8x300x600	90°	D	15	3	97	98	99			
8x300x1000			105°	D	5	3	100	101	102				
54													
TOPLAM BÜKME DENEYİ SAYISI								102					

Taguchi deney yöntemine uygun olarak bükümler, Hardox 400 malzeme için 5 mm/s ve 15 mm/s olmak üzere iki farklı hızda, Paslanmaz AISI 304L malzeme için ise 5 mm/s, 10 mm/s ve 15 mm/s olmak üzere üç farklı hızda yapılmıştır. Bu sayede her bir malzeme tipi için hızın büküm kuvvetine olan etkisi araştırılmıştır. Kanal açıklığı büküm kuvvetine doğrudan etki ettiğinden dolayı aynı ebatlardaki malzemeler aynı kalıp setinde bükülmüştür. 4 mm Paslanmaz AISI 304L malzemeler 30'luk kanalda, 4 mm Hardox 400 ve 6 mm Paslanmaz AISI 304L malzemeler 60'luk kanalda, 6 mm Hardox 400 ve 8 mm Paslanmaz AISI 304L malzemeler ise 120'lik kanalda bükülmüştür. Bükümler, bükme açısının kuvvet üzerindeki etkilerini inceleyebilmek adına farklı ebatlar için 90°, 105° ve 120° olmak üzere üç farklı açıda yapılmıştır. Bükümlerin yapıldığı alt kalıp ön ve arka kısmına yerleştirilen kameralı açı ölçüm cihazı ile Hardox 400 malzemeye ait tüm deneylerde üç farklı açı değeri için geri yaylanma oranları tespit edilmiştir. Yassı malzeme kalınlığı, boyu, büküm açısı, büküm

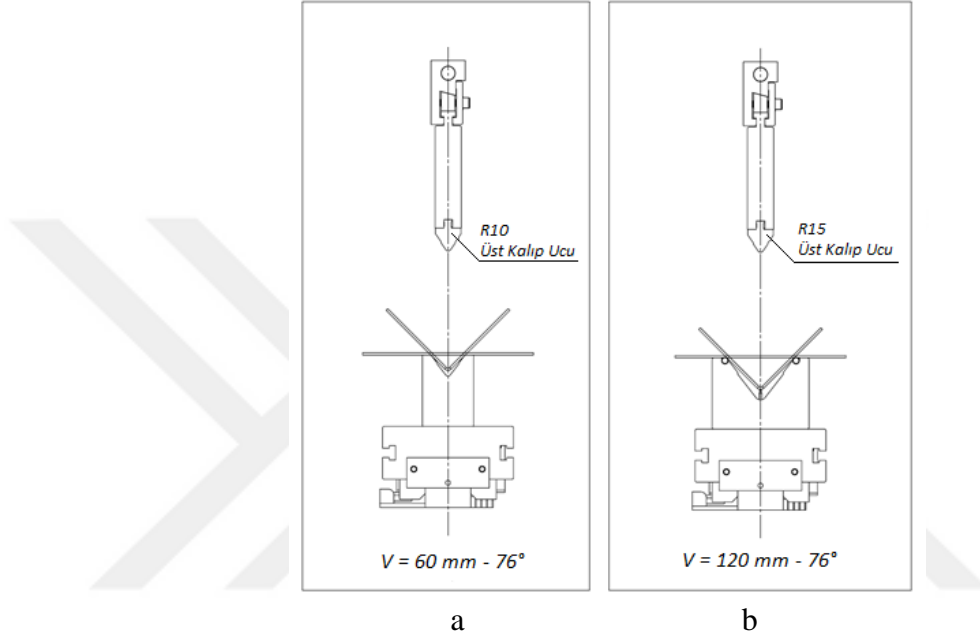
hızı, alt kalıp kanal açıklığı gibi farklı parametrelerin bükme kuvvetlerine ve üst kalıp yer değiştirmelerine etkilerinin incelendiği deneylerde doğru sonuçların elde edilebilmesi için numunelerin hadde yönünün aynı olmasına dikkat edilmiştir. Aynı koşullarda yassı malzemelerin farklı hadde yönüne ait numuneleri arasındaki bükümlerde kuvvet ve geri yaylanma değerlerinde farklılıklar görünebileceğinden dolayı tüm deneyler numunelerin hadde yönüne dik olarak yapılmıştır. Her bir ebat için her deney en az 3 kez tekrarlanmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Bükme deneyleri fotoğrafları
a) Büküm öncesi fotoğraf, b) Büküm sonrası fotoğraf

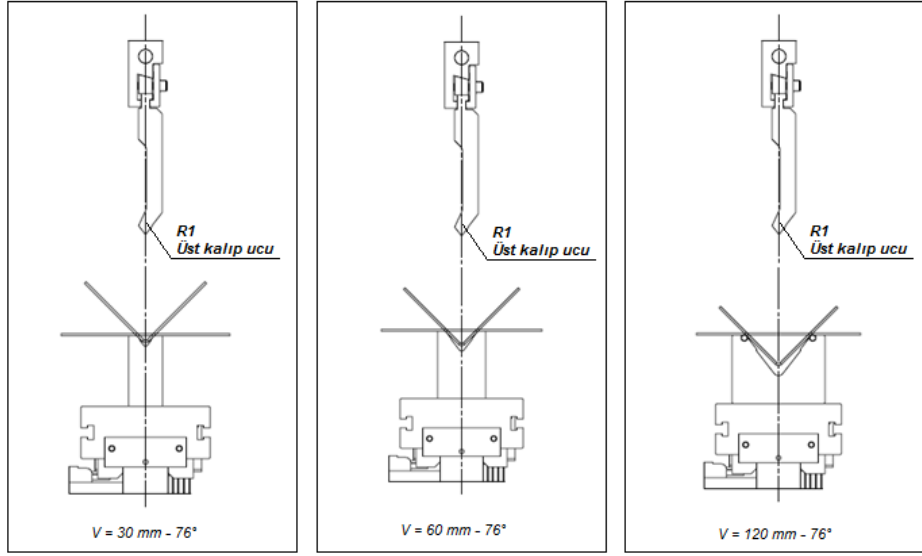
Deneylerde makine üst tablası iki kenarına monte edilen ve üst tablanın büküm sırasında senkronize hareketini sağlayan iki adet lineer encoder ve makine dışına yerleştirilen harici encoder vasıtası ile büküm sırasındaki üst tabla deplasmanları tespit edilmiştir. Üst tabla üzerindeki encoderler makine çalışması sırasında üst tablada ortaya çıkabilecek sehimler nedeni ile gerçek deplasman değerlerini veremediğinden dolayı makine dışına yerleştirilen harici encoder ile deneyler sırasındaki üst tabla deplasmanları doğrulanmıştır. Kalıp içine yerleştirilen ve bükümü yapılan malzemeye sürekli temas halinde olan iki adet lineer potansiyometre ile de bükümü yapılan sac parçaların deplasman hesapları yapılmıştır. Elde edilen değerler üst tabla ile temas halinde olan encoderlerden alınan değerlerle kıyaslanmıştır. Farklı bükme parametrelerinde oluşan deplasman değerleri incelenerek kuvvet-yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Kalıp altına yerleştirilen üç adet dinamik loadcell yardımı ile de büküm kuvvetleri elde edilerek her bir deney için kuvvet-zaman grafikleri çıkarılmıştır.

Deneylerde aynı kalınlıklar için havada büküm tekniğine uygun aynı kalıp setleri kullanılmıştır. Hardox 400 malzemeye ait deneyler, iki farklı kalınlıkta yapıldığından dolayı toplam 2 farklı kalıp seti tasarlanmıştır. 4 mm Hardox malzemeler için 60 mm kanal açıklığı ve R10 üst kalıp ucu (yuvarlatma yarıçapı), 6 mm Hardox 400 malzemeler için ise 120 mm kanal açıklığı ve R15 üst kalıp ucu (yuvarlatma yarıçapı) kullanılmıştır.



Şekil 3.14. 4 mm ve 6 mm Hardox 400 bükümü için alt ve üst kalıp tasarımları
a) 4 mm Hardox 400 kalıp seti, b) 6 mm Hardox 400 kalıp seti

Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait deneylerde ise üç farklı kalınlık için 3 farklı kalıp seti kullanılmıştır. 4 mm Paslanmaz AISI 304L malzemeler için 30 mm, 6 mm Paslanmaz AISI 304L malzemeler için 60 mm ve 8 mm Paslanmaz AISI 304L malzemeler için ise 120 mm kanal açıklıkları kullanılmıştır. Paslanmaz AISI 304L bükümlerinde her kalınlık için R1 üst kalıp ucu (yuvarlatma yarıçapı) kullanılmıştır.



a

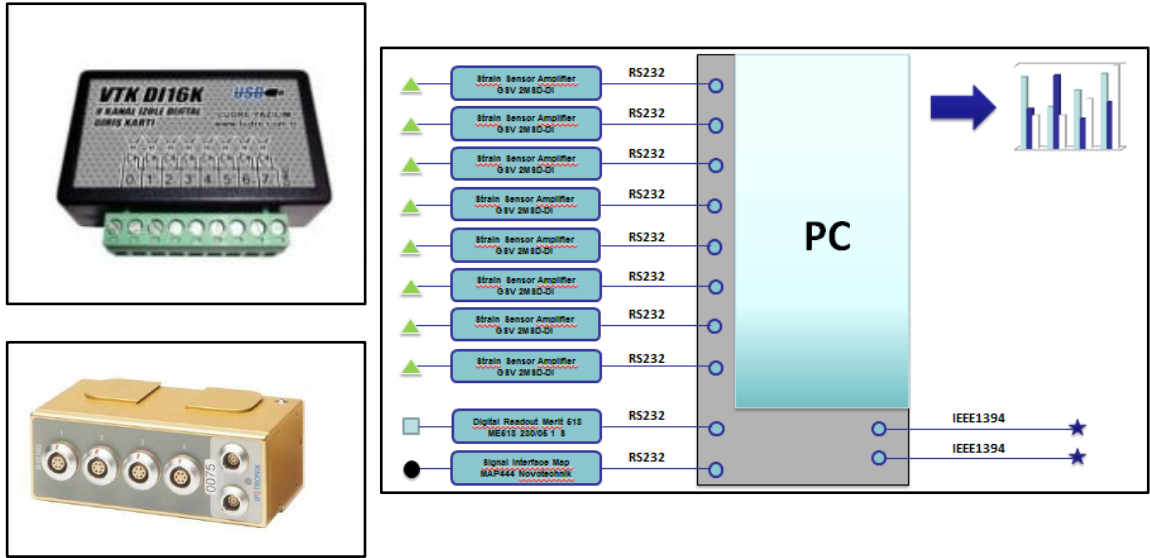
b

c

Şekil 3.15. 4 mm, 6 mm ve 8 mm Paslanmaz AISI 304L bükümü için alt ve üst kalıp tasarımları, a) 4 mm Paslanmaz AISI 304L kalıp seti, b) 6 mm Paslanmaz AISI 304L kalıp seti, c) 8 mm Paslanmaz AISI 304L kalıp seti

3.5. Veri Toplama

Tüm sensörlerden eş zamanlı veri alma amaçlı LabView veri toplama cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.16). National Instruments firmasının yazılım platformu LabView ile tüm sensörler için akış diyagramı oluşturularak eş zamanlı olarak her 10 milisaniyede bir alınan veriler excel dosyalarında toplanmıştır.

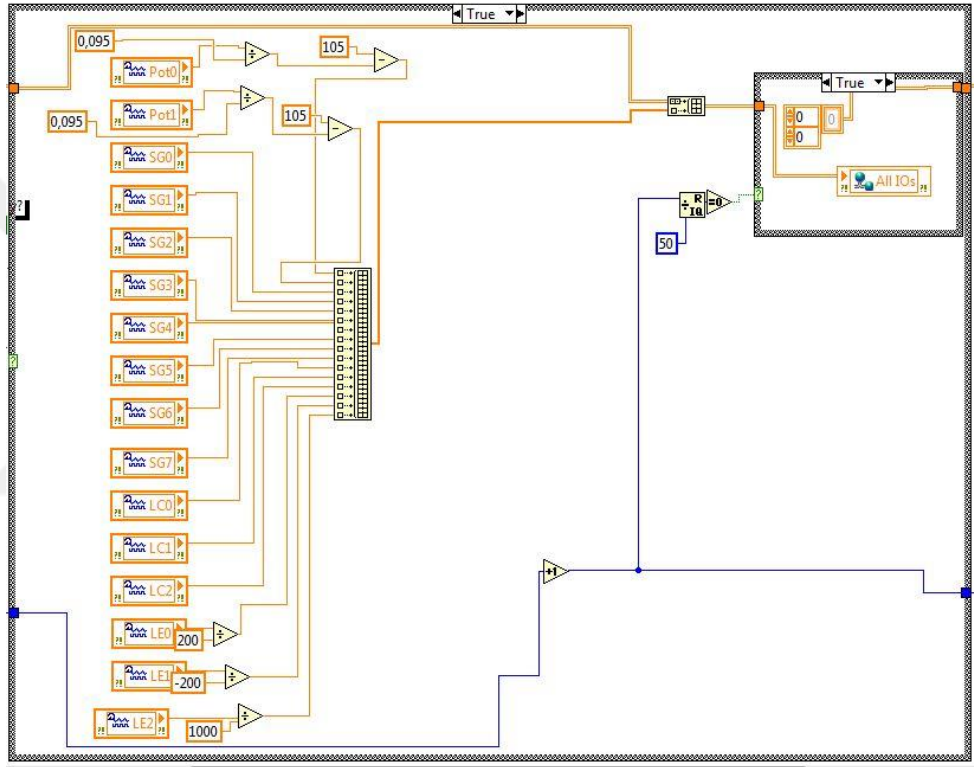


a

b

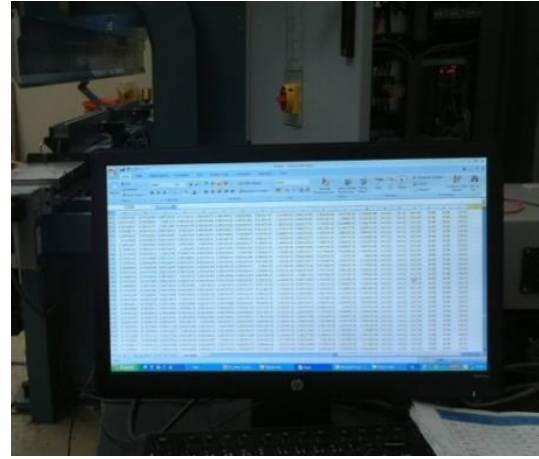
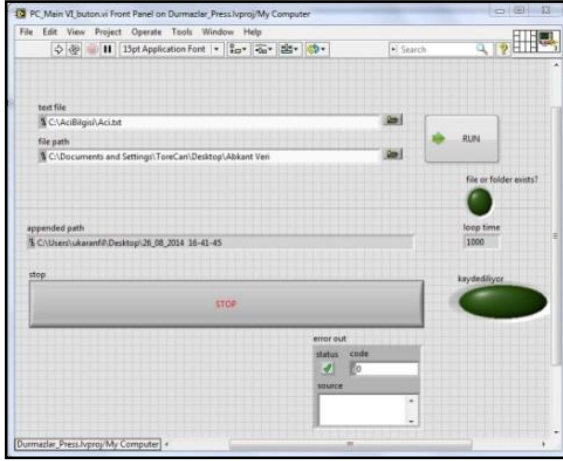
Şekil 3.16. LabView veri toplama cihazı ve akış diyagramı
a) Veri toplama cihazı, b) Akış diyagramı

Deneyler sırasında yukarıdaki Hidrolik Abkant Pres Deneği Düzeneği bölümünde detaylı olarak açıklanan sensörlerden veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri için 3 adet yük hücresinden, üst kalıp yer değiştirme ölçümleri için 1 adet lineer encoder ve kalıp içine yerleştirilen 2 adet lineer potansiyometreden ve açđ ölçümleri için ise alt kalıp önüne ve arkasına yerleştirilen 2 adet kameralı ölçüm cihazından veriler toplanmıştır. Veri toplama işlemleri için LabView yazılım platformunda uygun ölçüm programı yazılmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. LabView yazılım platformunda hazırlanan ölçüm programı

Alınan veriler buton kontrolü ile otomatik olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.18). Büküm başlamadan butona basılarak veri toplama işlemi başlatılmış, büküm bitiminde tekrar butona basılarak veri toplama işlemi sonlandırılmıştır. Veri toplama işleminin sonlanması için ikinci kez butonuna basılmasının ardından veriler otomatik olarak Windows ortamında TDMS dosyası olarak kaydedilmiştir.



a

b

Şekil 3.18. Buton kontrolü ile veri toplama işlemleri
a) Buton kontrol programı, b) Verilerin excel ortamına dökümü

LabView yazılımı sayesinde eşzamanlı olarak TDMS dsoyasında toplanan veriler excel dosyasına aktarılmıştır (Çizelge 3.8). Potansiyometre ve encoderlerden alınan veriler mm cinsinden olurken yük hücreleri verileri ise voltaj olarak alınıp daha sonra kalibrasyon sonuçları ile kuvvet birimlerine dönüştürülmüştür. Her bir satırda tüm sensörlerden alınan 10 milisaniyedeki değerler sıralanmıştır. Büküm işleminin süresine göre her bir deney için 1000 ila 2000 satır arasında farklı değerler excel dosyasına dökülmüştür.

Çizelge 3.8. Otomatik olarak toplanan verilerin excel dosyasına dökümü

POT1	POT2	LC1	LC2	LC3	LE1	KMR1	KMR2
6,2635068	9,900828	-0,0006815	-0,0067634	-0,0001409	-13301	0	0
6,274981	9,9112593	-0,0009588	0,0014127	-0,0004048	-13301	0	0
6,2756184	9,9137881	0,000335	-0,0056281	-0,0078018	-13301	0	0
6,2641443	9,897667	0,0062157	0,0031496	-0,0011223	-13301	0	0
6,2874113	9,9276965	-0,000984	0,003048	-0,0023922	-13301	0	0
6,2657379	9,900828	-0,0020593	-0,0003665	-0,0051547	-13301	0	0
6,2794431	9,9175813	0,00509	-0,0052807	-0,0023262	-13301	0	0
6,260957	9,897667	-0,0002531	0,0029971	0,0054171	-13301	0	0
6,277212	9,9153686	-0,0004967	-0,0026118	-0,0078018	-13301	0	0
6,260957	9,897667	-0,0047728	0,0003367	0,0045842	-13301	0	0
6,2810368	9,9194779	-0,0031598	-0,0007309	0,0003703	-13301	0	0
6,2705188	9,9062017	0,0028385	0,0033445	-0,0030931	-13301	0	0
6,2721124	9,9087305	-0,0008748	0,003497	-0,0056248	-13301	0	0
6,2756184	9,9125237	-2,626E-05	0,0014127	-0,0018397	-13301	0	0
6,267969	9,9062017	-0,0037647	-0,0033489	-0,0039343	-13301	0	0
6,2740248	9,9112593	0,0012003	3,167E-05	-0,0054516	-13301	0	0
6,2628694	9,8986153	0,0031493	0,0012602	-0,0012047	-13301	0	0
6,2756184	9,9115754	-0,0027398	0,0013195	0,0026876	-13301	0	0

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çekme DeneYleri Sonuçları

Çalışma kapsamında Hidrolik Abkant Pres DeneY Düzeneginde bükümü yapılacak yassı malzemelerinin ilk olarak çekme testleri yapılarak mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar yukarıdaki 3.1. Materyal kısmında verilen deneY malzemelerine ait tedarikçilerden alınan mekanik özellikler ile kıyaslanmıştır. Her iki malzeme grubu için 4'er tekrarlı olarak yapılan çekme deneYlerinden elde edilen sonuçlar aşağıda sırayla verilmiştir.

K firmasından tedarik edilen Hardox 400 malzemeye ait haddeye dik yönde çekilen ve 4 tekrarlı olarak yapılan çekme deneYi sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.

Çizelge 4.1. K firmasına ait Hardox 400 malzemeye ait haddeye dik yöndeki çekme deneYleri sonuçları

Numune Adı	$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	σ_{akma} (MPa)	% ϵ (Yüzde uzama)
KHD1	1217	1057	5,58
KHD2	1230	1058	6,10
KHD3	1232	1077	6,27
KHD4	1228	1076	5,53
Ortalama	1227±6,70	1067±10,98	5,87±0,37

Numune isimlendirilmesi aşağıda açıklandığı gibi yapılmıştır.

KHD1 için, **K** firmasından tedarik edilen **Hardox 400** malzemenin **Haddeye Dik** yönde çekilen **1.** Numune

KHD2 için, **K** firmasından tedarik edilen **Hardox 400** malzemenin **Haddeye Dik** yönde çekilen **2.** Numune

KHD3 için, **K** firmasından tedarik edilen **Hardox 400** malzemenin **Haddeye Dik** yönde çekilen **3.** Numune

KHD4 için, **K** firmasından tedarik edilen **Hardox 400** malzemenin **Haddeye Dik** yönde çekilen **4.** Numune

K firmasından tedarik edilen Hardox 400 malzemeye ait haddeye paralel yönde çekilen ve 4 tekrarlı olarak yapılan çekme deneyi sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.

Çizelge 4.2. K firmasına ait Hardox 400 malzemeye ait haddeye paralel yöndeki çekme deneyleri sonuçları

Numune Adı	$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	σ_{akma} (MPa)	% ϵ (Yüzde uzama)
KHP1	1231	1068	6,97
KHP2	1229	1078	6,87
KHP3	1219	1069	7,32
KHP4	1220	1080	6,87
Ortalama	1225±6,13	1074±6,13	7,00±0,21

D firmasından tedarik edilen Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye dik yönde çekilen ve 4 tekrarlı olarak yapılan çekme deneyi sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.

Çizelge 4.3. D firmasına ait Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye dik yöndeki çekme deneyleri sonuçları

Numune Adı	$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	σ_{akma} (MPa)	% ϵ (Yüzde uzama)
DSD1	607	364	51,59
DSD2	606	363	50,10
DSD3	608	365	51,67
DSD4	606	364	52,15
Ortalama	607±0,95	364±0,81	51,37±0,88

D firmasından tedarik edilen Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye paralel yönde çekilen ve 4 tekrarlı olarak yapılan çekme deneyi sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.

Çizelge 4.4. D firmasına ait Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye paralel yöndeki çekme deneyleri sonuçları

Numune Adı	$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	σ_{akma} (MPa)	% ϵ (Yüzde uzama)
DSP1	610	366	51,76
DSP2	610	366	50,27
DSP3	610	366	50,10
DSP4	609	365	50,61
Ortalama	610±0,50	366±0,50	50,68±0,74

E firmasından tedarik edilen Hardox 400 malzemeye ait haddeye dik yönde çekilen ve 4 tekrarlı olarak yapılan çekme deneyi sonuçları aşağıdaki gibi oluşmuştur.

Çizelge 4.5. E firmasına ait Hardox 400 malzemeye ait haddeye dik yöndeki çekme deneyleri sonuçları

Numune Adı	$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	σ_{akma} (MPa)	% ϵ (Yüzde uzama)
EHD1	1313	1212	4,45
EHD2	1330	1200	4,88
EHD3	1322	1182	4,97
EHD4	1323	1211	4,75
Ortalama	1322±6,97	1201±13,93	4,76±0,22

E firmasından tedarik edilen Hardox 400 malzemeye ait haddeye paralel yönde çekilen ve 4 tekrarlı olarak yapılan çekme deneyi sonuçları aşağıdaki gibi oluşmuştur.

Çizelge 4.6. E firmasına ait Hardox 400 malzemeye ait haddeye paralel yöndeki çekme deneyleri sonuçları

Numune Adı	$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	σ_{akma} (MPa)	% ϵ (Yüzde uzama)
EHP1	1321	1182	6,25
EHP2	1305	1165	5,83
EHP3	1306	1189	6,18
EHP4	1300	1162	5,84
Ortalama	1308±9,05	1174±13,07	6,02±0,22

L firmasından tedarik edilen Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye dik yönde çekilen ve 4 tekrarlı olarak yapılan çekme deneyi sonuçları aşağıdaki gibi oluşmuştur.

Çizelge 4.7. L firmasına ait Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye dik yöndeki çekme deneyleri sonuçları

Numune Adı	$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	σ_{akma} (MPa)	% ϵ (Yüzde uzama)
LSD1	627	375	54,17
LSD2	633	379	54,58
LSD3	631	378	54,01
LSD4	630	378	55,37
Ortalama	630±2,50	378±1,73	54,53±0,60

L firmasından tedarik edilen Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye paralel yönde çekilen ve 4 tekrarlı olarak yapılan çekme deneyi sonuçları aşağıdaki gibi olmuştur.

Çizelge 4.8. L firmasına ait Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait haddeye paralel yöndeki çekme deneyleri sonuçları

Numune Adı	$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)	σ_{akma} (MPa)	% ϵ (Yüzde uzama)
LSP1	635	380	52,43
LSP2	635	380	53,35
LSP3	632	379	52,39
LSP4	631	378	50,67
Ortalama	633±2,06	379±0,95	52,21±1,11

Yapılan tüm çekme deneylerinden elde edilen deney numunelerine ait mekanik özellikler ve üretici firmalardan alınan değerler Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Çekme deneyleri sonuçları

Malzeme Tipi	Hadde Yönü	Tedarikçi Firma	$\sigma_{\text{çekme}}$ (MPa)		σ_{akma} (MPa)		% ϵ (Yüzde uzama)	
			Çekme Deneyleri Sonucu	Üretici Firma Değerler	Çekme Deneyleri Sonucu	Üretici Firma Değerler	Çekme Deneyleri Sonucu	Üretici Firma Değerler
Hardox 400	Dik	K	1227	1250	1067	1000	5.87	10
		E	1322	1250	1201	1000	4.76	10
	Paralel	K	1225	1250	1074	1000	7.00	10
		E	1308	1250	1174	1000	6.02	10
Paslanmaz AISI 304L	Dik	D	607	630	364	315	51.37	55
		L	630	620	378	290	54.53	56
	Paralel	D	610	630	366	315	50.68	55
		L	633	620	379	290	52.21	56

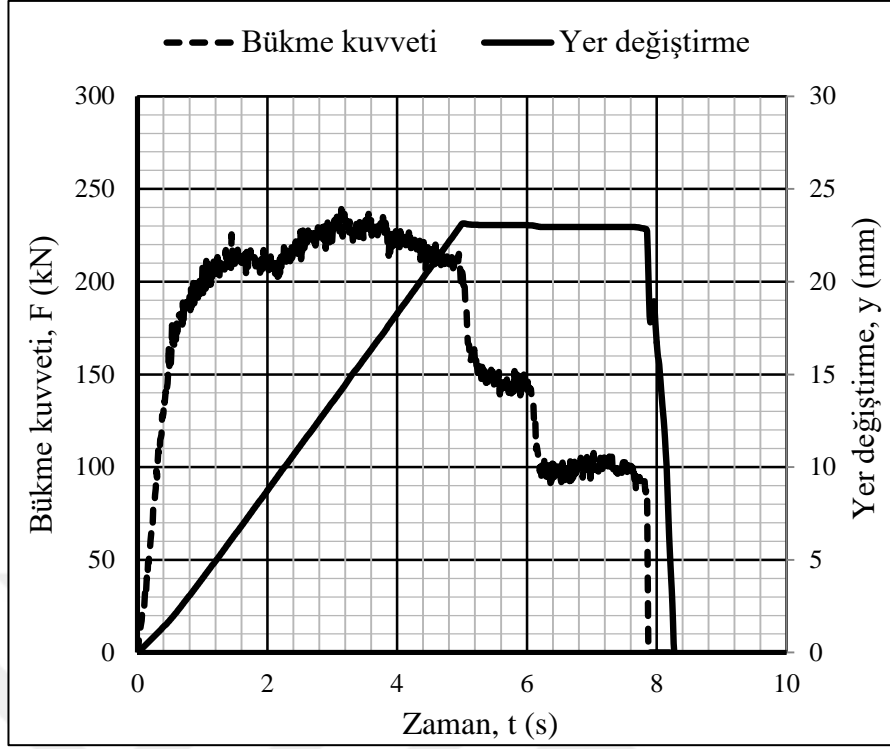
Elde edilen bulgular, aynı tip yassı malzemelerin mekanik özelliklerinde üretici firmalara göre farklılıklar görülebileceğini ve firmaların yassı malzemelere ait vermiş oldukları mekanik özelliklerin gerçek değerlerden farklı olabileceğini ortaya çıkarmıştır. Yassı malzemelerin mekanik özelliklerindeki bu farkların malzemelerin büküm işlemlerinde bükme kuvveti, üst kalıp yerdeğiştirme miktarı ve geri yaylanma oranları gibi parametrelere doğrudan etki ettiği 4.2. Bükme Deneyleri Sonuçları bölümünde elde

edilen bulgulardan anlaşılmıştır. Aynı tip malzemelerin aynı bükme parametrelerinde bükümü sonrası ortaya çıkan değerler farklı mekanik özelliklere bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

4.2. Bükme Deneyleri Sonuçları

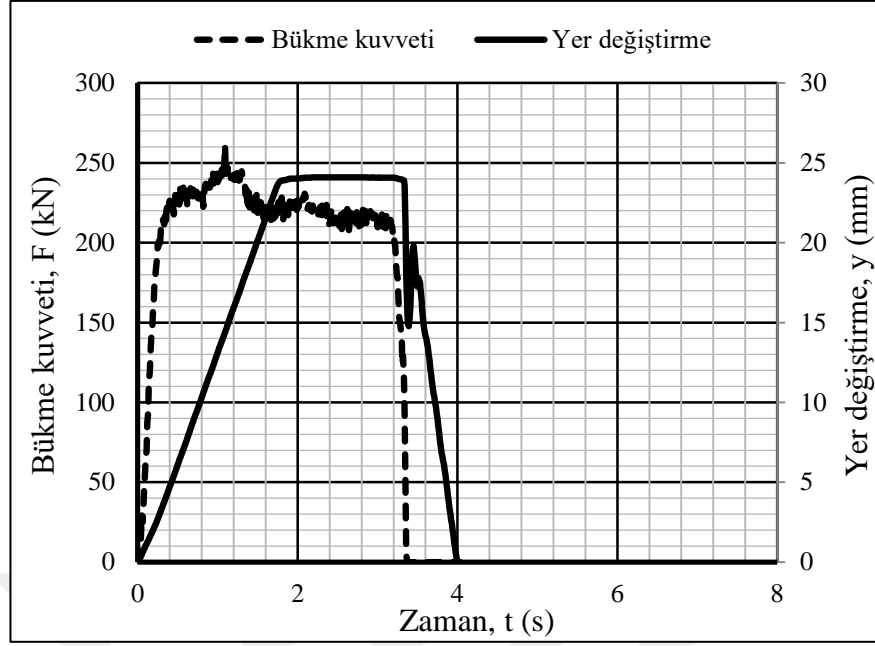
Bükme kuvveti, üst kalıp yer değişimleri ve büküm açılarını ölçme amaçlı deney düzeneği üzerine yerleştirilen ve 3.2. Hidrolik Abkant Pres Deney Düzeneği bölümünde detaylı olarak anlatılan sensörlerden yine 3.5 Veri Toplama bölümünde belirtildiği şekilde excel ortamında alınan ham verilerden elde edilen sonuçlar grafiklere taşınmıştır. LabView platformunda yazılan bükme programı sayesinde, lineer encoder ve lineer potansiyometre için veriler mm cinsinden excel dosyalarına aktarılırken, yük hücrelerinden alınan veriler tonaj ve kameralı açı ölçüm cihazından alınan veriler ise derece (°) cinsinden excel dosyalarında toplanmıştır. Sensörlerden elde edilen ham veriler kullanılarak her bir deney numunesi için eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerde her bir numune için zamana göre bükme kuvvetindeki değişimleri ve zamana göre üst kalıptaki yer değişimlerini ayrı ayrı görmek mümkündür. Ayrıca büküm sırasındaki kuvvet değişimlerine göre eş zamanlı olarak yer değiştirme miktarları da okunabilmektedir. Aynı firmanın numunelerinden aynı parametrelerde 3 tekrarlı olacak şekilde yapılan deneylerden bükme kuvveti, üst kalıp yer değiştirme miktarı ve geri yaylanma oranı için ortalama değerler bulunmuş ve bu numunelerden ortalama değerlere en yakın olanların grafikleri deney planına uygun olacak şekilde altta sırasıyla verilmiştir. İlk 16 grafik Hardox 400 deney numunelerine ait sonuçları yansıtırken takip eden 18 grafikte ise Paslanmaz AISI 304L malzemelerine ait sonuçlar verilmiştir. Çizelge 3.7 Deney Planı'nda da verildiği üzere Hardox 400 malzemelere ait deneyler 2 farklı bükme hızı, 2 farklı bükme açısı ve 2 farklı kanal açıklığında yapılırken Paslanmaz malzemelere ait deneyler ise 3 farklı bükme hızı, 3 farklı bükme açısı ve 3 farklı kanal açıklıklarında yapılmıştır.

K firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/sn bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.1'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.1. K firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

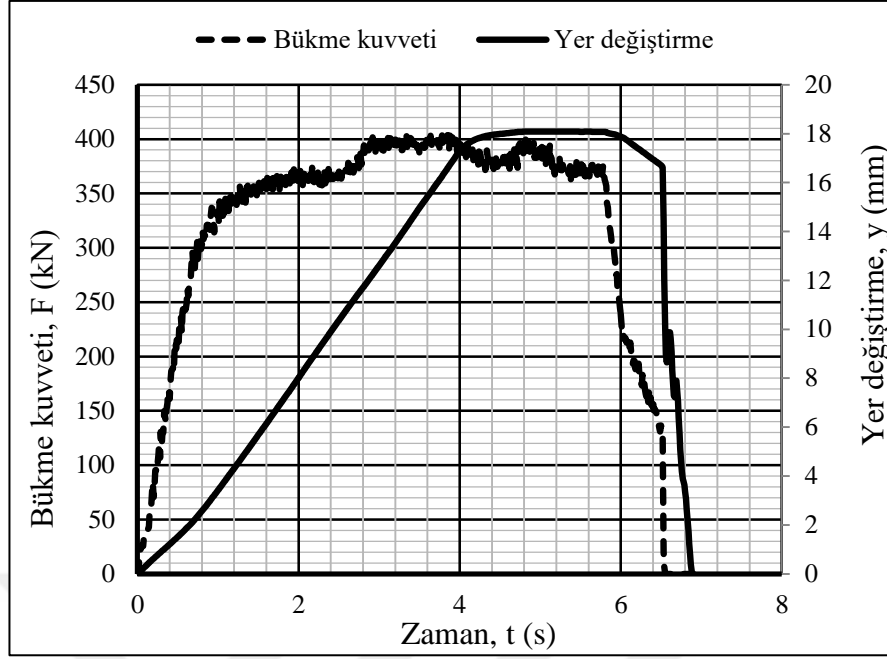
Şekil 4.1.'de verilen grafikte düz çizgi ile belirtilen eğriler üst tabla hareketinin zamana göre değişimini göstermektedir. Kesikli çizgi ile belirtilen eğriler ise büküm sırasında saca etkiyen kuvvetlerin zamana göre değişimini ifade etmektedir. Büküm işleminin başlamasıyla grafikten de okunduğu üzere üst tabla yer değiştirme miktarı ve bükme kuvveti aynı anda artış göstermeye başlar. Bu numunenin bükümü için deney planına göre belirlenmiş bükme hızı 5 mm/s'dir. Numunenin 90° bükümü için bükümün yaklaşık 5. saniyesi dolaylarında 24,206 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak 8,35 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 3,2. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 238,49 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. Yine K firmasına ait ve Şekil 4.1.'deki sonuçların ait olduğu numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin 15 mm/s bükme hızında aynı bükme parametrelerinde bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.2'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.2. K firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

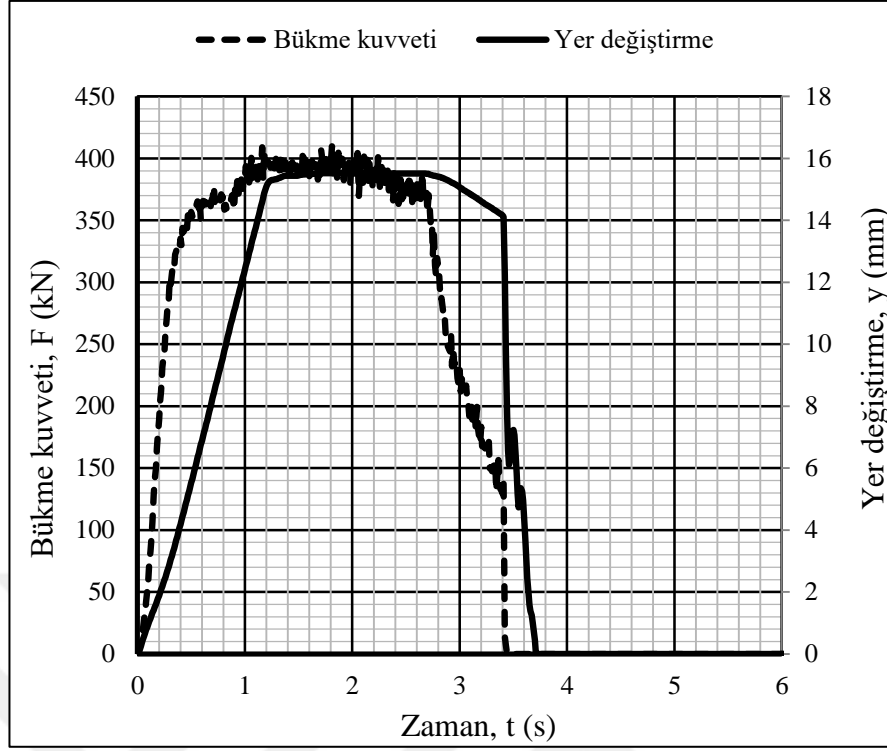
Şekil 4.2'de 15 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 3,2. saniyesi dolaylarında 24,511 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 4 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,1. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 258,26 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 15 mm/s bükme hızda yapılan bu deneyde, 5 mm/s hızda yapılan bir önceki numuneye ait deneye göre yaklaşık 20 kN daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da bükme hızındaki artışın bükme kuvvetlerini arttırdığını göstermiştir. Hızın bükme kuvvetine etkisi sonraki deneylerde de incelemeye devam edilmiştir.

Deneylere, bükme boyunun bükme parametrelerine etkisini inceleme amaçlı, bir önceki deneylerde 600 mm olarak ele alınan numune boyları 1000 mm yapılarak devam edilmiştir. Bu kapsamda K firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/sn bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.3'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.3. K firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

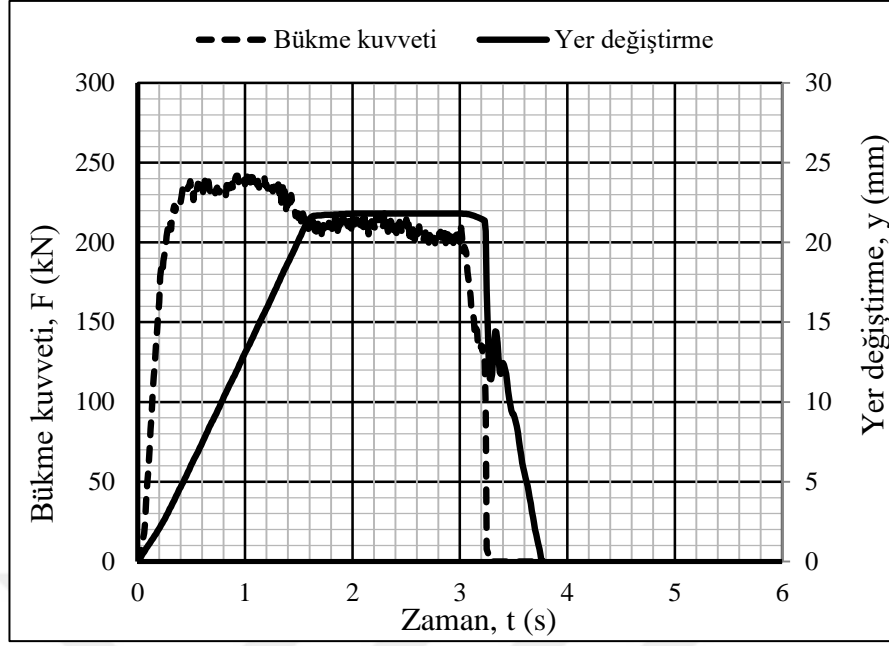
Şekil 4.3'de 5 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 4,6. saniyesi dolaylarında 15,826 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak yaklaşık 7 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 3,8. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 404,81 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 1000 mm bükme boyunda yapılan bu deneyde, 600 mm bükme boyunda yapılan önceki numunelere ait deneylere göre beklenildiği üzere daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da bükme boyundaki artışın bükme kuvvetlerini arttırdığını göstermiştir. Bükme boyunun bükme kuvvetine etkisi sonraki deneylerde de incelemeye devam edilmiştir. Yine K firmasına ait ve Şekil 4.3.'deki sonuçların ait olduğu numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin 15 mm's bükme hızında aynı bükme parametrelerinde bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.4'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.4. K firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.4'de 15 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 1,9. saniyesi dolaylarında 15,437 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak yaklaşık 3,7 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,2. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 411,80 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 1000 mm boyda yapılan bu deneylerde de tıpkı 600 mm boydaki numuneler ile yapılan deneylerde olduğu gibi bükme hızındaki artışın ortaya çıkan bükme kuvvetlerinde de artışa sebep olduğu görülmüştür.

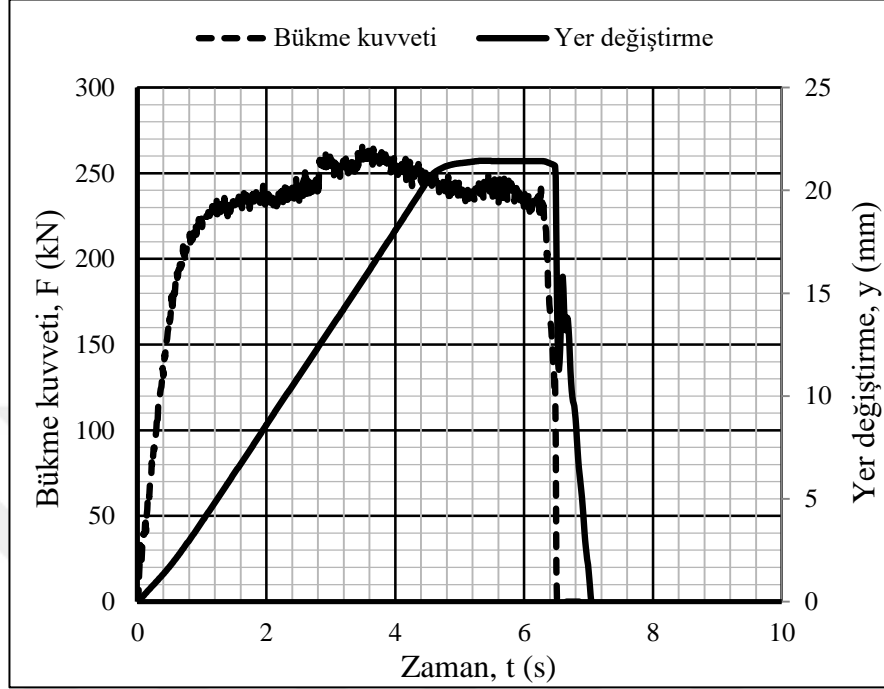
Deneylere, ilk 4 gruptaki K firmasından tedarik edilen numuneler ile yapılan deneylerdeki aynı bükme parametrelerinde ancak E firmasından tedarik edilen saclardan elde edilen numuneler ile devam edilmiştir. Şekil 4.5'de eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği verilen E firmasına ait numuneler Şekil 4.1'deki K firmasına ait numunelerdeki aynı bükme parametreleri kullanılarak bükülmüştür.



Şekil 4.5. E firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.5'de 5 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 3. saniyesi dolaylarında 24,332 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 3,8 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 240,84 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. E firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.1'de verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki K firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 2,5 kN daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da tamamen aynı özelliklerdeki numunelerin üretici firmaya göre bükme kuvvetlerinde değişimler olabileceğini göstermiştir. Bölüm 4.1'de verilen çekme deneyi sonuçlarına göre de E firmasından tedarik edilen numunelerin çekme dayanımları K firmasından tedarik edilen numunelerin çekme dayanımlarına göre yaklaşık 100 MPa fazla olduğundan dolayı E firması numunelerinde ortaya çıkan fazla bükme kuvveti değerleri normal karşılanmıştır. Farklı tedarikçilerden elde edilen numunelerin bükme kuvvetine etkisi sonraki deneylerde de incelemeye devam edilmiştir. Yine E firmasına ait ve Şekil 4.5.'deki sonuçların ait olduğu numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki

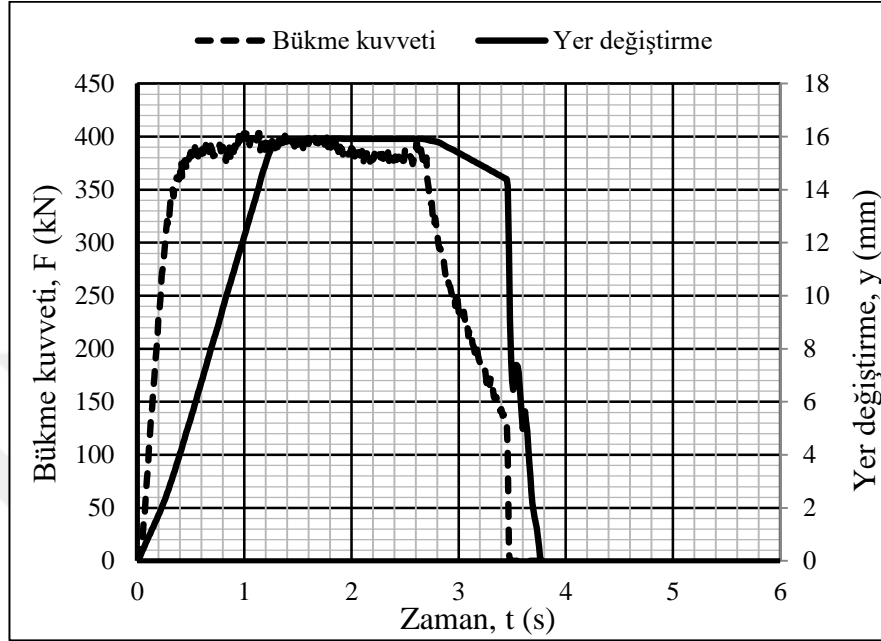
numunelerin 15 mm/s bükme hızında aynı bükme parametrelerinde bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.6'daki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.6. E firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

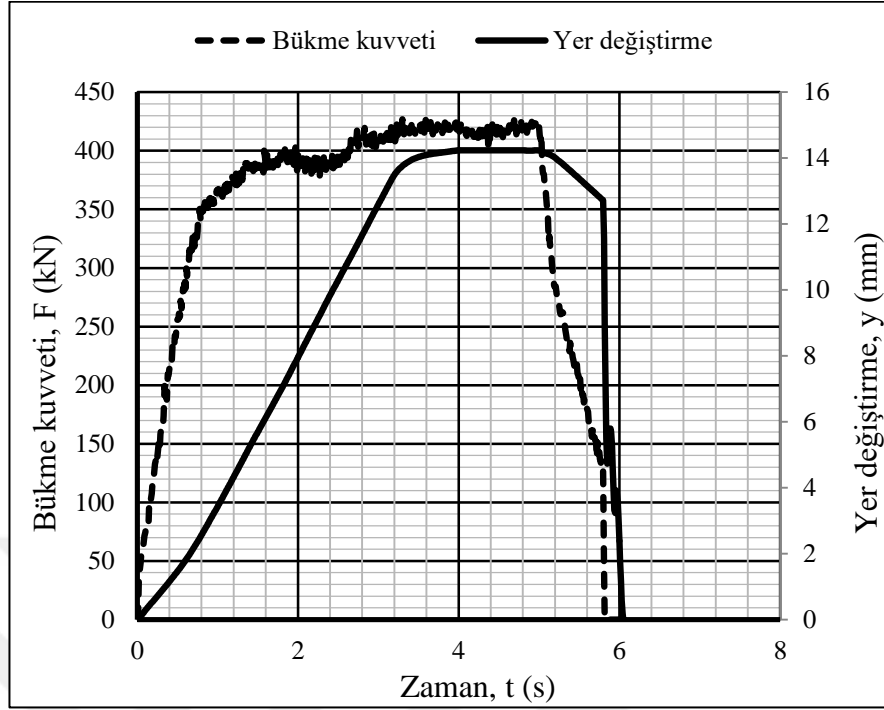
Şekil 4.6'da 15 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 6,2. saniyesi dolaylarında 24,025 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 7 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 3,5. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 263,86 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 15 mm/s bükme hızda yapılan bu deneyde, aynı koşullarda 5 mm/s hızda yapılan bir önceki numuneye ait deneye göre yaklaşık 23 kN daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da, tıpkı K firmasına ait numuneler ile yapılan ilk 4 grup deneyde olduğu gibi bükme hızındaki artışın bükme kuvvetlerini arttırdığını bir kez daha göstermiştir. K firmasına ait numuneler için yapılan deneylerde olduğu gibi E firmasına ait numuneler için de bükme boyu 600 mm olarak ele alınan ilk 2 deneyden sonra numune boyları 1000 mm yapılarak deneylere devam edilmiştir. Bu kapsamda E firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney

numunelerinin, 5 mm/sn bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.7'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.7. E firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

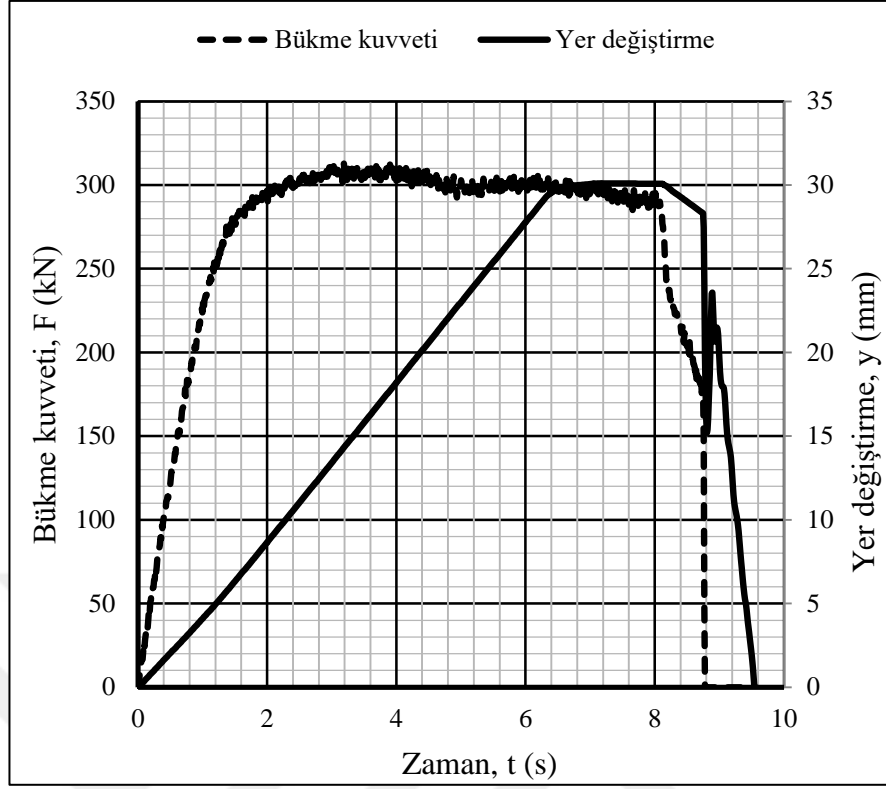
Şekil 4.7'de 5 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 3,2. saniyesi dolaylarında 15,042 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak yaklaşık 3,8 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,1. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 407,30 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 1000 nmm bükme boyunda yapılan bu deneyde, 600 mm bükme boyunda yapılan önceki numunelere ait deneylere göre beklenildiği üzere daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da, tıpkı K firmasına ait numuneler ile yapılan ilk 4 grup deneyde olduğu gibi bükme boyundaki artışın bükme kuvvetlerini arttırdığını bir kez daha göstermiştir. Yine E firmasına ait ve Şekil 4.7.'deki sonuçların ait olduğu numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin 15 mm's bükme hızında aynı bükme parametrelerinde bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.8'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.8. E firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

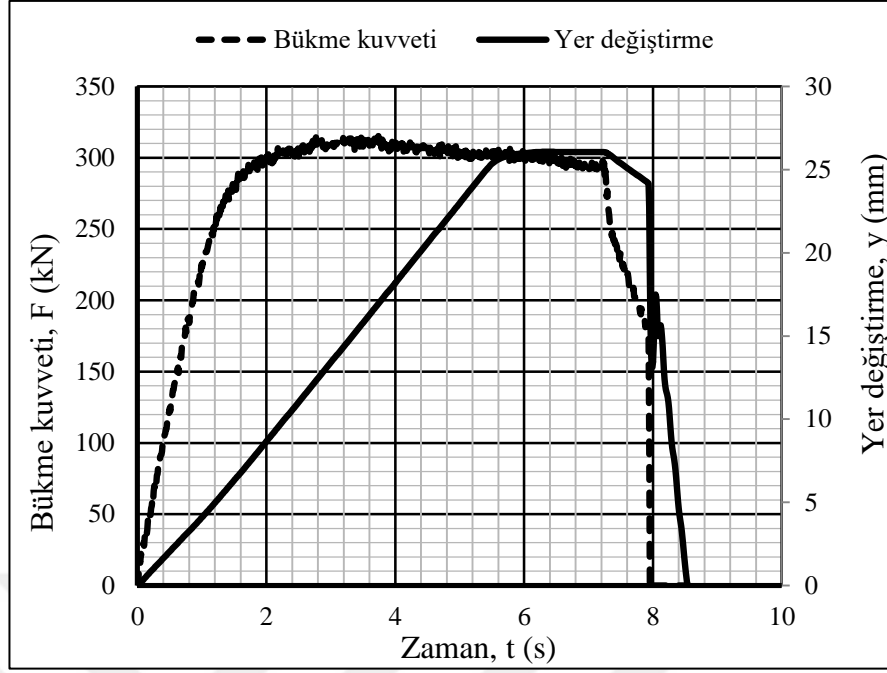
Şekil 4.8'de 15 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 5,8. saniyesi dolaylarında 15,063 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak yaklaşık 6,1 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 3,8. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 421,91 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 1000 mm boyda yapılan bu deneylerde de tıpkı 600 mm boydaki numuneler ile yapılan deneylerde olduğu gibi bükme hızındaki artışın ortaya çıkan bükme kuvvetlerinde de artışa sebep olduğu görülmüştür.

İlk 8 grupta 4 mm yassı malzeme kalınlığında yapılan deneylere aynı ebat ve mekanik özelliklerde olacak şekilde 6 mm yassı malzeme kalınlığı ele alınarak devam edilmiştir. K firmasına ait, 6x300x600 ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/sn bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.9'daki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.9. K firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

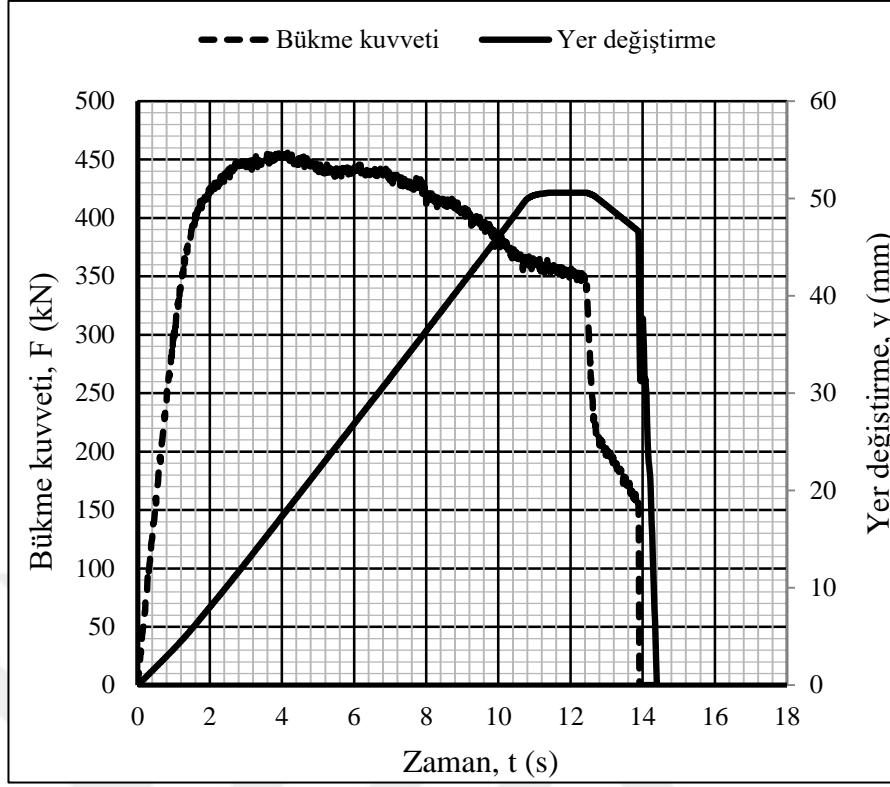
Şekil 4.9'da 5 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 8,8. saniyesi dolaylarında 31,211 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 9,6 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 4. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 310,25 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. Yine K firmasına ait ve Şekil 4.9.'daki sonuçların ait olduğu numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin 15 mm/s bükme hızında aynı bükme parametrelerinde bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.10'daki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.10. K firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

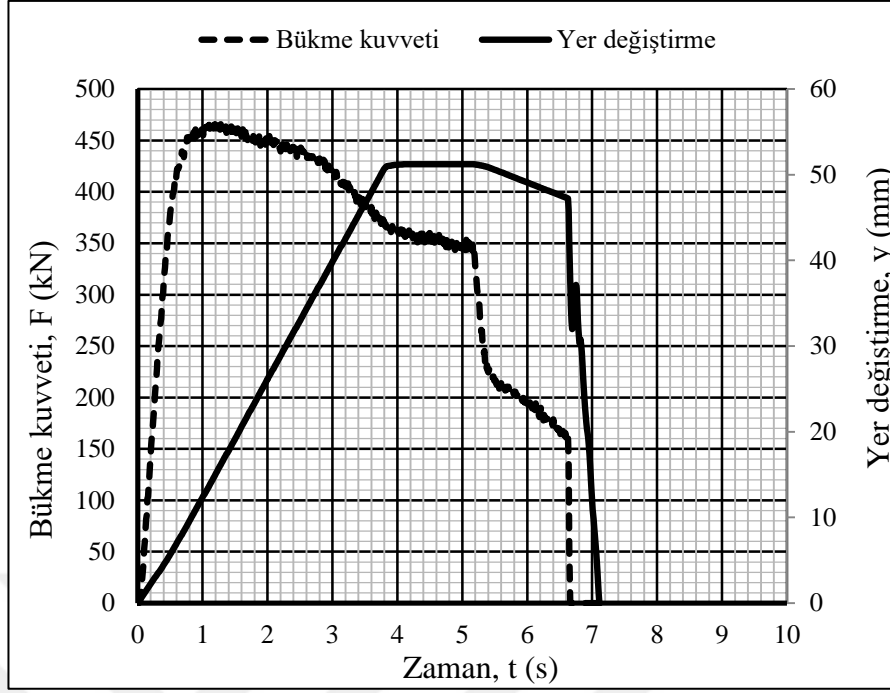
Şekil 4.10'da 15 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 8. saniyesi dolaylarında 30,980 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 8,45 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 3,5. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 316,72 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 15 mm/s bükme hızda yapılan bu deneyde, 5 mm/s hızda yapılan bir önceki numuneye ait deneye göre yaklaşık 6,5 kN daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da, 4 mm kalınlıktaki Hardox 400 numuneler ile yapılan deneylerde olduğu gibi bükme hızındaki artışın bükme kuvvetlerini arttırdığını birkez daha göstermiştir.

Deneylere, bükme boyunun bükme parametrelerine etkisini inceleme amaçlı, bir önceki deneylerde 600 mm olarak ele alınan numune boyları 1000 mm yapılarak devam edilmiştir. Bu kapsamda K firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/sn bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.11'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.11. K firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

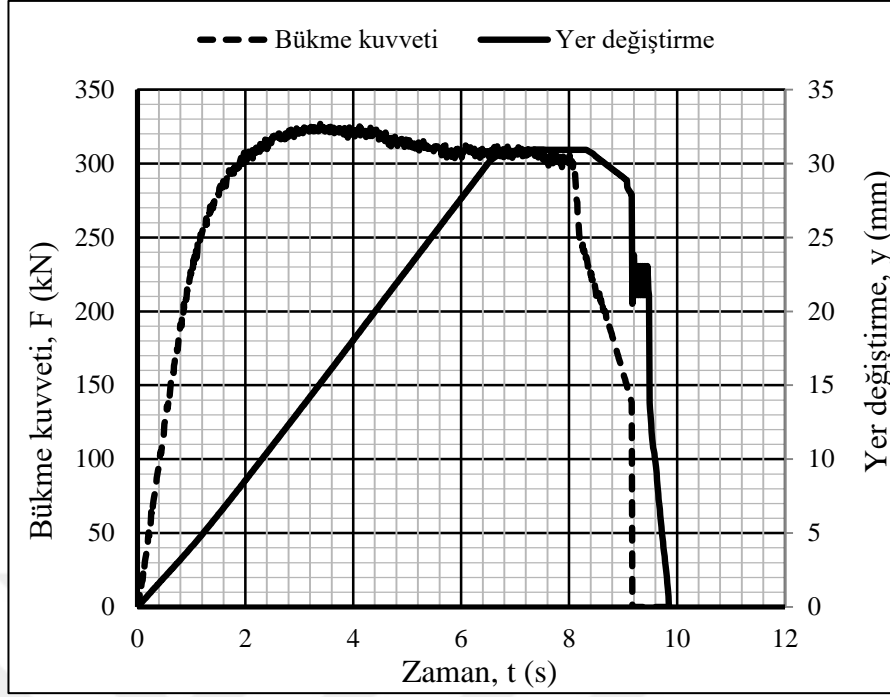
Şekil 4.11'de 5 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 14. saniyesi dolaylarında 50,908 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak yaklaşık 14,5 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 4. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 452,95 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 1000 mm bükme boyunda yapılan bu deneyde, 600 mm bükme boyunda yapılan önceki numunelere ait deneylere göre beklenildiği üzere daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da bükme boyundaki artışın bükme kuvvetlerini arttırdığını göstermiştir. Yine K firmasına ait ve Şekil 4.11.'deki sonuçların ait olduğu numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin 15 mm/s bükme hızında aynı bükme parametrelerinde bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.12'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.12. K firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.12'de 15 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 6,5. saniyesi dolaylarında 50,932 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak yaklaşık 7,2 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,5. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 466,31 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 1000 mm boyda yapılan bu deneylerde de tıpkı 600 mm boydaki numuneler ile yapılan deneylerde olduğu gibi bükme hızındaki artışın ortaya çıkan bükme kuvvetlerinde de artışa sebep olduğu görülmüştür. Aynı geometri için 5 mm/s hızda yapılan bir önceki deneye göre 15 mm/s hızda yapılan bu deneyde yaklaşık 14 kN'luk daha fazla bir bükme kuvveti ortaya çıkmıştır.

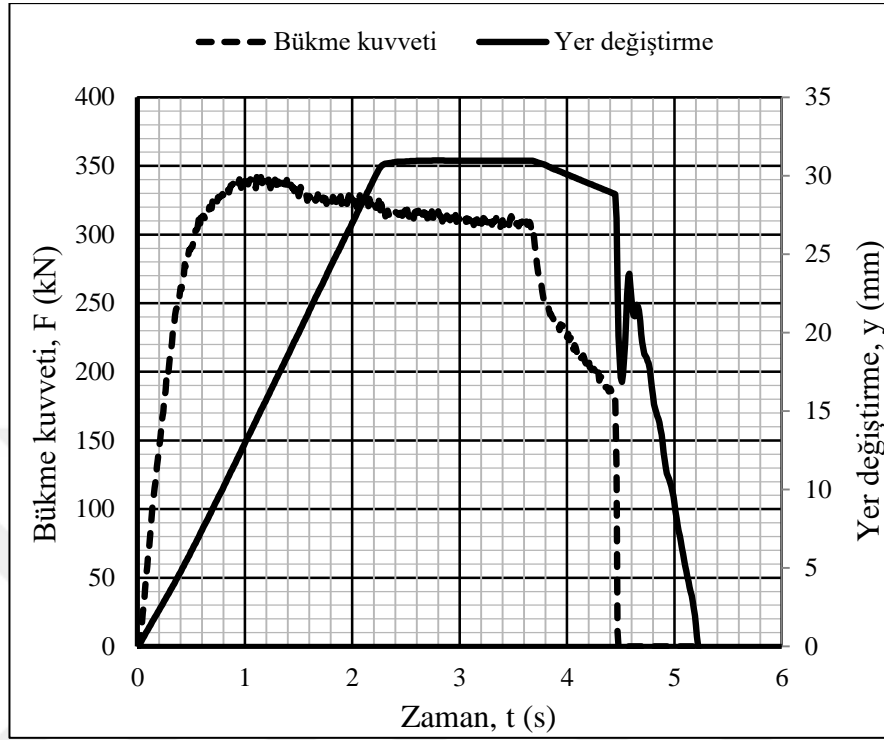
Deneylere, bir önceki 4 grupta K firmasından tedarik edilen numuneler ile yapılan deneyler ile aynı bükme parametrelerinde ancak E firmasından tedarik edilen saclardan elde edilen numuneler ile devam edilmiştir. Şekil 4.13'de eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği verilen E firmasına ait numuneler Şekil 4.9'daki K firmasına ait numunelerdeki aynı bükme parametreleri kullanılarak bükülmüştür.



Şekil 4.13. E firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.13'de 5 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 9. saniyesi dolaylarında 30,954 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 9,9 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 3,5. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 329,91 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. E firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.9'da verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki K firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 20 kN daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da tamamen aynı özelliklerdeki numunelerin üretici firmaya göre bükme kuvvetlerinde değişimler olabileceğini göstermiştir. Bölüm 4.1'de verilen çekme deneyi sonuçlarına göre de E firmasından tedarik edilen numunelerin çekme dayanımları K firmasından tedarik edilen numunelerin çekme dayanımlarına göre yaklaşık 100 MPa fazla olduğundan dolayı E firması numunelerinde ortaya çıkan fazla bükme kuvveti değerleri normal karşılanmıştır. Yine E firmasına ait ve Şekil 4.10.'daki K firmasına ait sonuçların ait olduğu numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin 15 mm/s

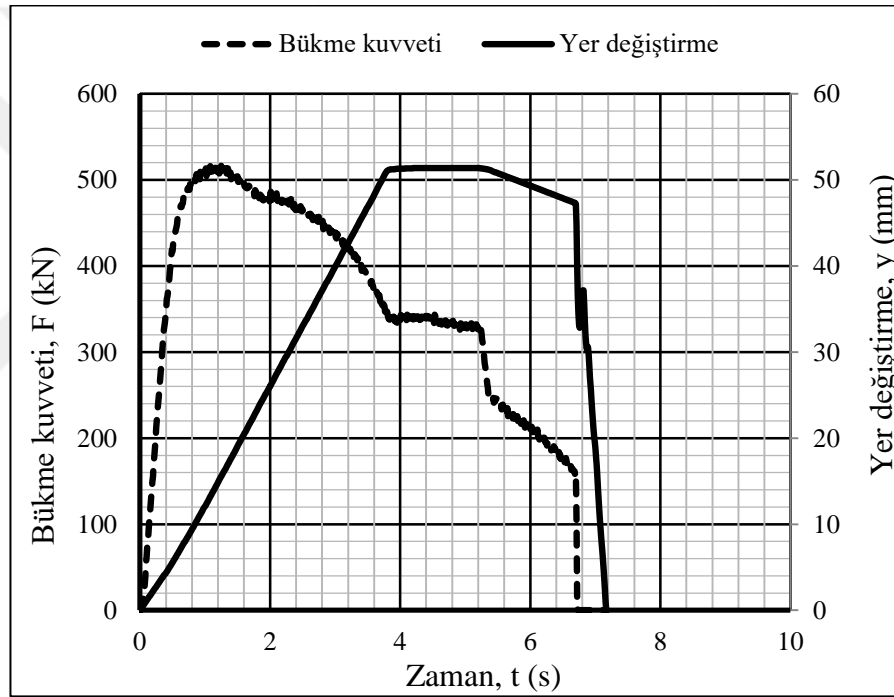
bükme hızında aynı bükme parametrelerinde bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.14'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.14. E firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.14'de 15 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 4,4. saniyesi dolaylarında 31,092 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 5,2 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,2. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 344,61 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 15 mm/s bükme hızda yapılan bu deneyde, aynı koşullarda 5 mm/s hızda yapılan bir önceki numuneye ait deneye göre yaklaşık 15 kN daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da, tıpkı K firmasına ait numuneler ile yapılan bir önceki 4 grup deneyde olduğu gibi bükme hızındaki artışın bükme kuvvetlerini arttırdığını bir kez daha göstermiştir. Ayrıca Şekil 4.14'deki E firması numunelerine ait bükme sonuçları ile Şekil 4.10'daki aynı mekanik özelliklerdeki K firması numunelerine ait sonuçlar arasında bükme kuvveti farklılıkları okunmuştur. Tamamen aynı geometri ve mekanik özelliklerde olmasına rağmen E

firmasına ait numuneler ile yapılan deneylerde K firması numuneleri ile yapılan deneylere göre yaklaşık 30 kN daha fazla bükme kuvveti oluşmuştur. Bu da bükme kuvvetlerinin üretici firmaya göre farklılık gösterebileceğini birkez daha ortaya koymuştur. K firmasına ait numuneler için yapılan deneylerde olduğu gibi E firmasına ait numuneler için de bükme boyu 600 mm olarak ele alınan ilk 2 deneyden sonra numune boyları 1000 mm yapılarak deneylere devam edilmiştir. Bu kapsamda E firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/sn bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.15'deki gibi oluşmuştur.

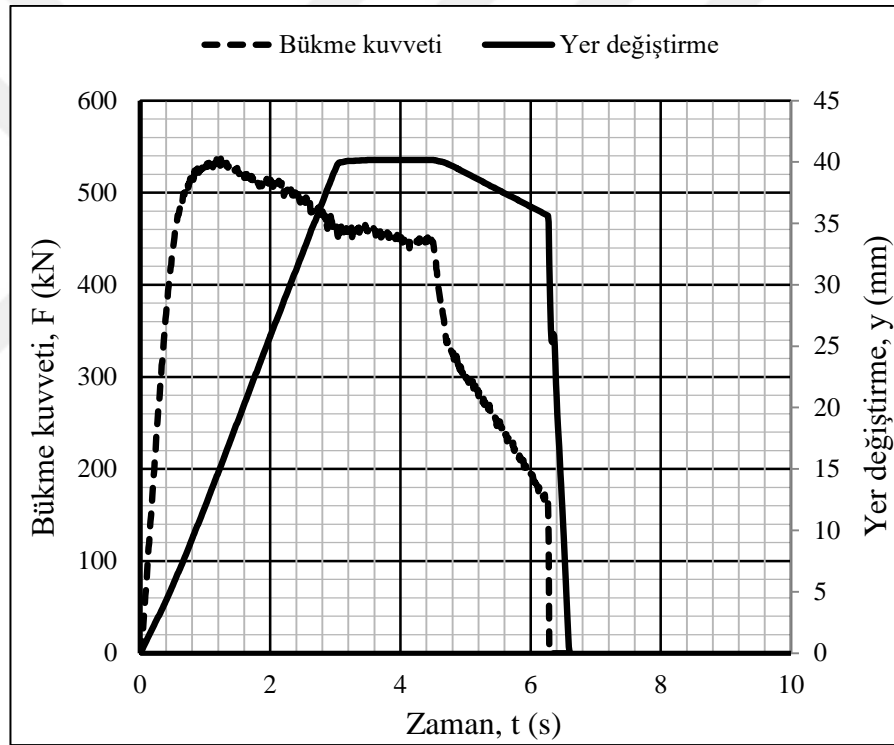


Şekil 4.15. E firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.15'de 5 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 6,8. saniyesi dolaylarında 51,063 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak yaklaşık 7,2 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 516,50 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 1000 mm bükme boyunda yapılan bu deneyde,

600 mm bükme boyunda yapılan önceki numunelere ait deneylere göre beklenildiği üzere daha fazla bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Yine Şekil 4.11’de aynı özelliklerdeki K firmasına ait numuneler ile yapılan deneyler sonucu ortaya çıkan bükme kuvvetine göre, E firması numuneleri ile yapılan bu deneyde yaklaşık 60 kN daha fazla bükme kuvveti okunmuştur.

E firmasına ait ve Şekil 4.15.’deki sonuçların ait olduğu numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin 15 mm/s bükme hızında aynı bükme parametrelerinde bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.16’daki gibi oluşmuştur.



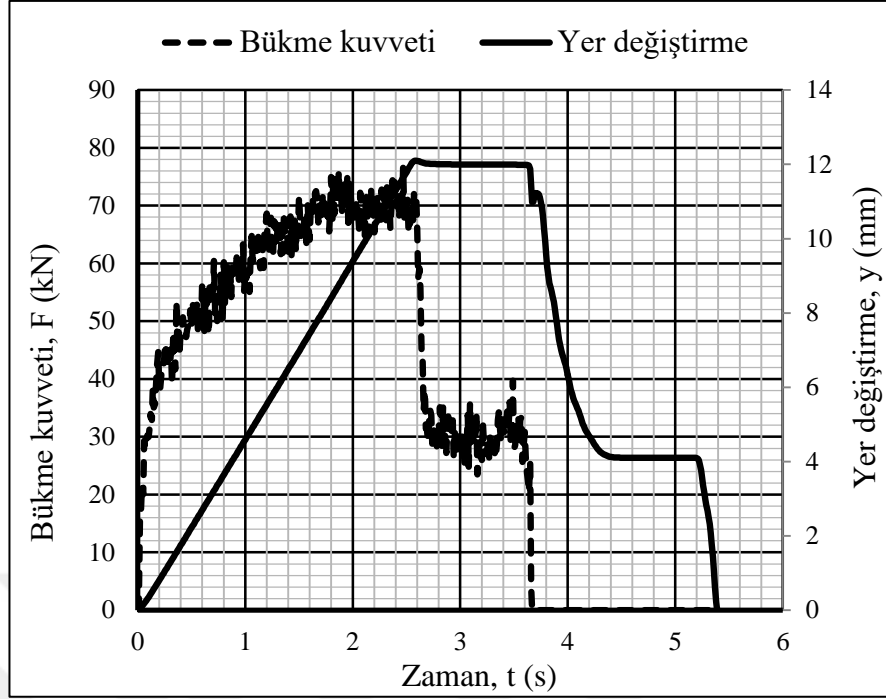
Şekil 4.16. E firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Hardox 400 deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm’lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.16’da 15 mm/s bükme hızında 90°’de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 6. saniyesi dolaylarında 51,392 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak yaklaşık 6,5 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°’lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 537,59 kN’luk

maksimum bükme kuvveti okunmuştur. 1000 mm boyda yapılan bu deneylerde de tıpkı 600 mm boydaki numuneler ile yapılan deneylerde olduğu gibi bükme hızındaki artışın ortaya çıkan bükme kuvvetlerinde de artışa sebep olduğu görülmüştür. Aynı geometri için 5 mm/s hızda yapılan bir önceki deneye göre 15 mm/s hızda yapılan bu deneyde yaklaşık 40 kN'luk daha fazla bir bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Ayrıca Şekil 4.12'de K firmasına ait numuneler ile yapılan deneylere göre E firmasına ait numuneler ile yapılan bu deneylerde yaklaşık 90 kN değerinde daha fazla bir bükme kuvveti okunmuştur.

Deney planına göre bu aşamadan sonra çalışmalara Paslanmaz AISI 304L malzemelerine ait numune bükümleri ile devam edilmiştir. Hardox 400 malzemeler için 4 mm ve 6 mm olmak üzere iki farklı kalınlıkta yapılan bükme deneyleri Paslanmaz AISI 304L malzemeleri için 4 mm, 6 mm ve 8 mm olmak üzere üç farklı yassı malzeme kalınlığı ele alınarak yapılmıştır. 4 mm kalınlık değeri için 30 mm, 6 mm kalınlık değeri için 60 mm ve 8 mm kalınlık değeri için ise 120 mm'lik alt kalıp kanal açıklıkları kullanılmıştır. Hardox 400 numuneler için ele alınan 90° ve 120°'lik bükme açısı değerlerine Paslanmaz malzemeleri için 105° değerinde üçüncü bir bükme açısı değeri ilave edilmiştir. Ayrıca Hardox 400 numune bükümlerinde 5 mm/s ve 15 mm/s bükme hızlarında yapılan deneylere Paslanmaz numuneleri için 10 mm/s bükme hızı da ilave edilerek devam edilmiştir. Paslanmaz AISI 304L malzemelerine ait numunelerde üç farklı kalınlık değeri ele alındığından dolayı diğer bükme parametreleri de üç farklı değişken olacak şekilde düzenlenmiştir.

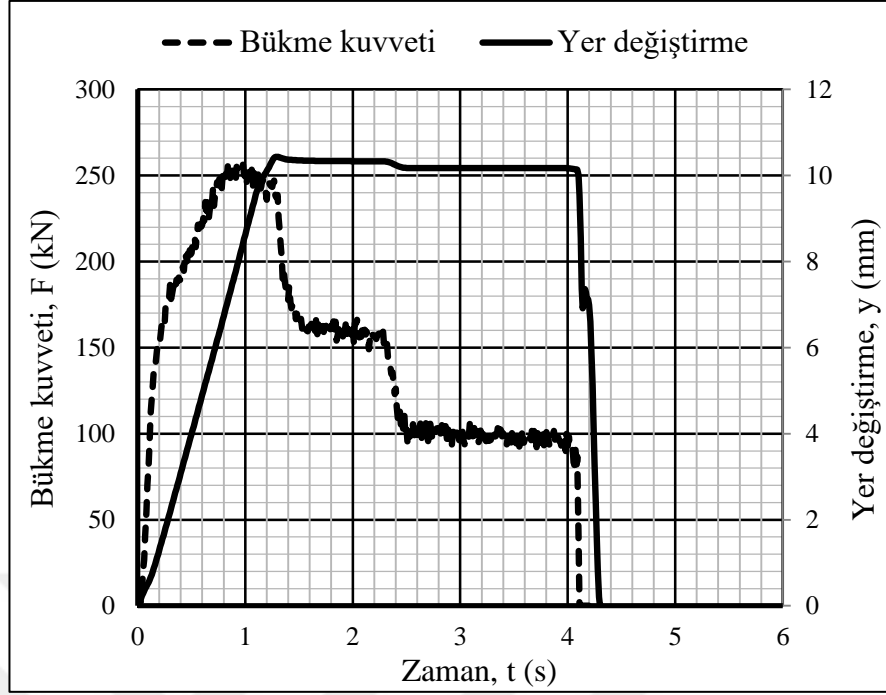
L firmasına ait, 4x300x200 ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.17'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.17. L firmasına ait, 4x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.17'de 5 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 3,6. saniyesi dolaylarında 12,164 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 5,5 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,9. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 77,259 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur.

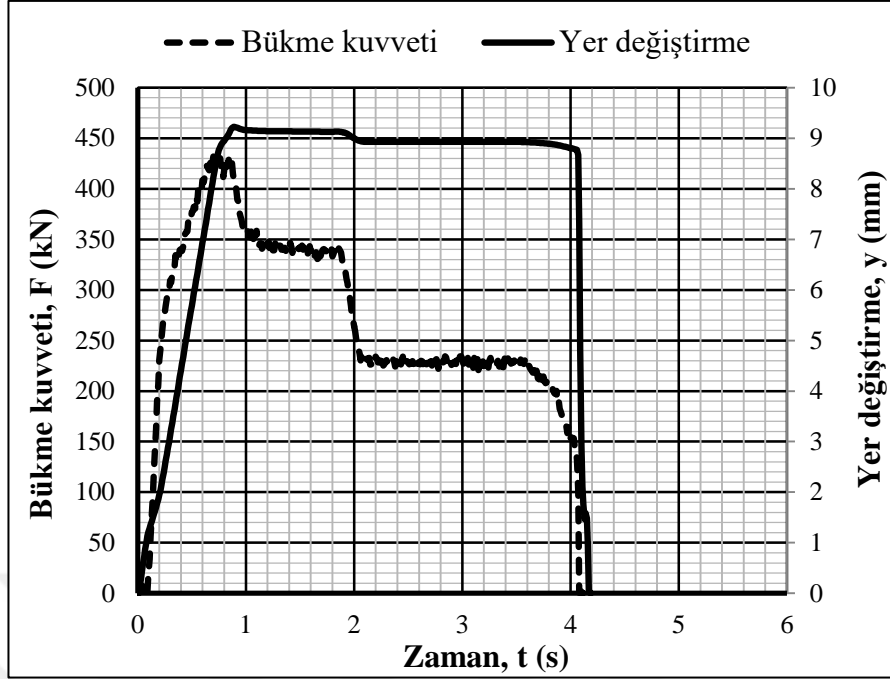
L firmasına ait, 4x300x600 ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.18'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.18. L firmasına ait, 4x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.18'de 10 mm/s bükme hızında 105°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 4. saniyesi dolaylarında 10,525 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 4,35 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 105°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 0,9. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 257,443 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur.

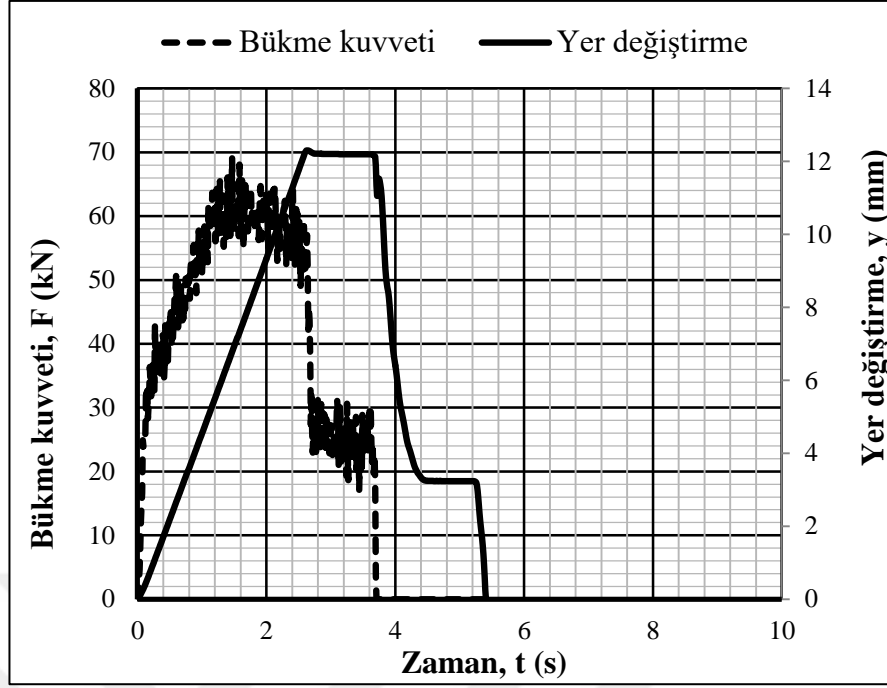
L firmasına ait, 4x300x1000 ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.19'daki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.19. L firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.19'da 15 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 4. saniyesi dolaylarında 8,387 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 4,2 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 0,8. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 431,668 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur.

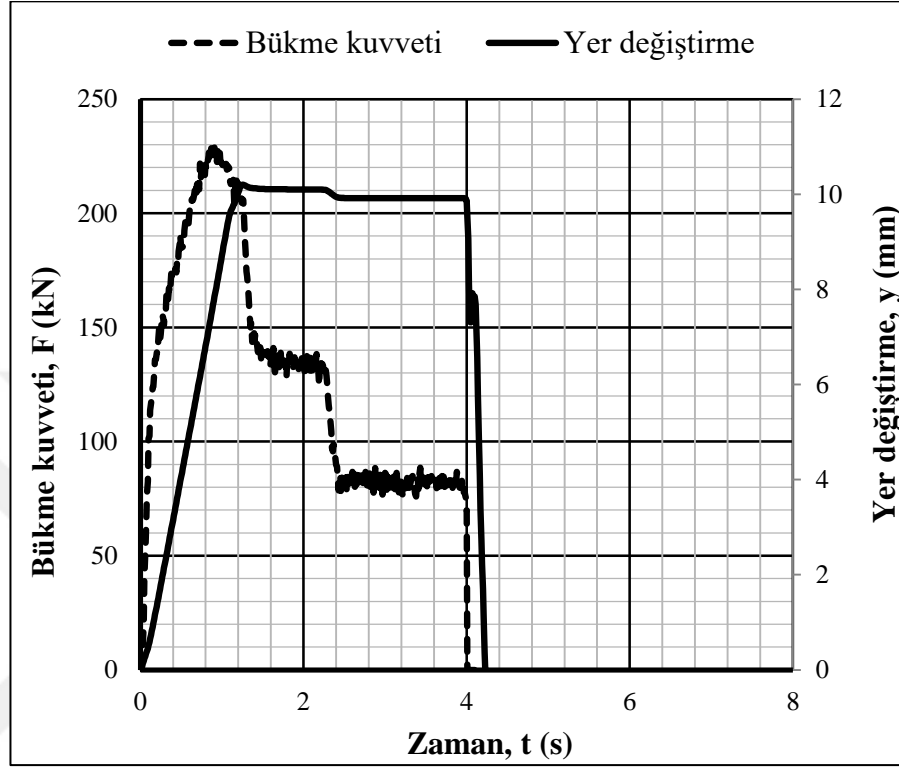
Deneylere, ilk 3 gruptaki L firmasından tedarik edilen numuneler ile yapılan deneylerdeki aynı bükme parametrelerinde ancak D firmasından tedarik edilen saclardan elde edilen numuneler ile devam edilmiştir. Şekil 4.20'de eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği verilen D firmasına ait numuneler Şekil 4.17'deki L firmasına ait numunelerdeki aynı bükme parametreleri kullanılarak bükülmüştür.



Şekil 4.20. D firmasına ait, 4x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.20'de 5 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 3,8. saniyesi dolaylarında 12,281 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 5,4 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,4. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 68,525 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. D firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.17'de verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki L firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 9 kN daha az bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Bu da tamamen aynı özelliklerdeki numunelerin üretici firmaya göre bükme kuvvetlerinde değişimler olabileceğini tekrar göstermiştir. Bölüm 4.1'de verilen çekme deneyi sonuçlarına göre de L firmasından tedarik edilen numunelerin çekme dayanımları D firmasından tedarik edilen numunelerin çekme dayanımlarına göre yaklaşık 20 MPa fazla olduğundan dolayı L firması numunelerinde ortaya çıkan fazla bükme kuvveti değerleri normal karşılanmıştır. Farklı tedarikçilerden elde edilen numunelerin bükme kuvvetine etkisi sonraki deneylerde de incelemeye devam edilmiştir. Yine D firmasına ait ve Şekil

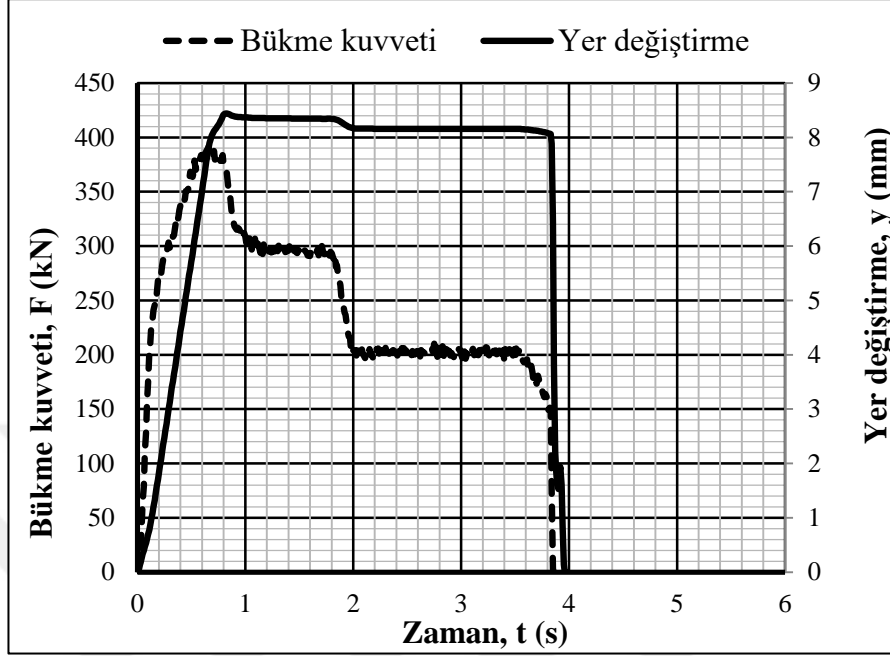
4.18.'deki L firmasına ait numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.21'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.21. D firmasına ait, 4x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.21'de 10 mm/s bükme hızında 105°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 3,9. saniyesi dolaylarında 10,310 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 4,2 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 105°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 0,9. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 228,596 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. D firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.18'de verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki L firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 30 kN daha az bükme kuvveti ortaya çıkmıştır. Yine D firmasına ait ve Şekil 4.19.'daki L firmasına ait numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki

numunelerin bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.22'deki gibi oluşmuştur.

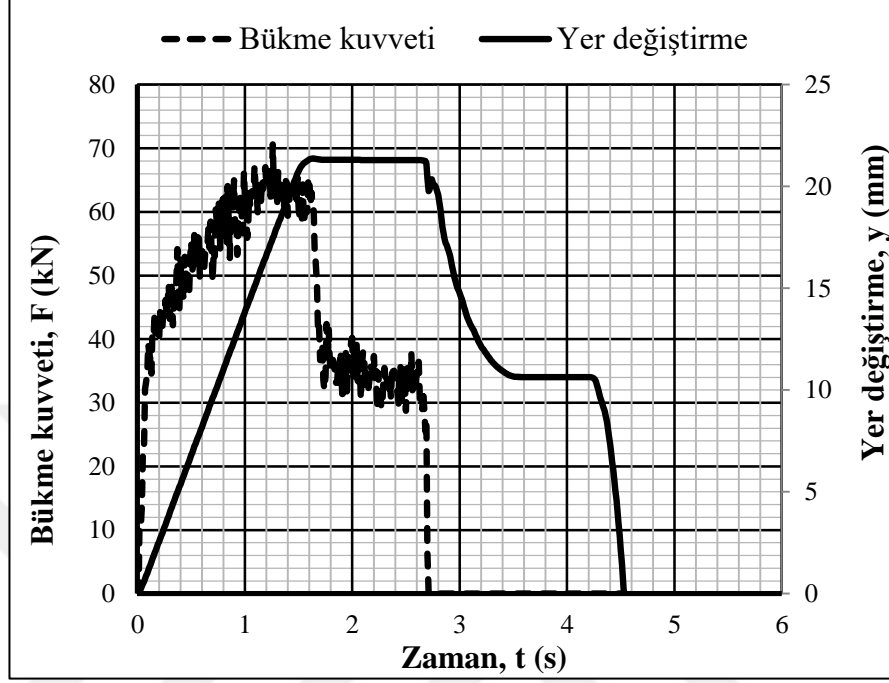


Şekil 4.22. D firmasına ait, 4x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 30 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.22'de 15 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 3,8. saniyesi dolaylarında 8,440 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 4 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 0,65. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 395,529 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. D firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.19'da verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki L firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 35 kN daha az bükme kuvveti ortaya çıkmıştır.

Deneylere Paslanmaz AISI 304L malzemesine ait 6 mm kalınlıkta malzemelerin farklı parametrelerdeki bükümleri ile devam edilmiştir. L firmasına ait, 6x300x200 ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60

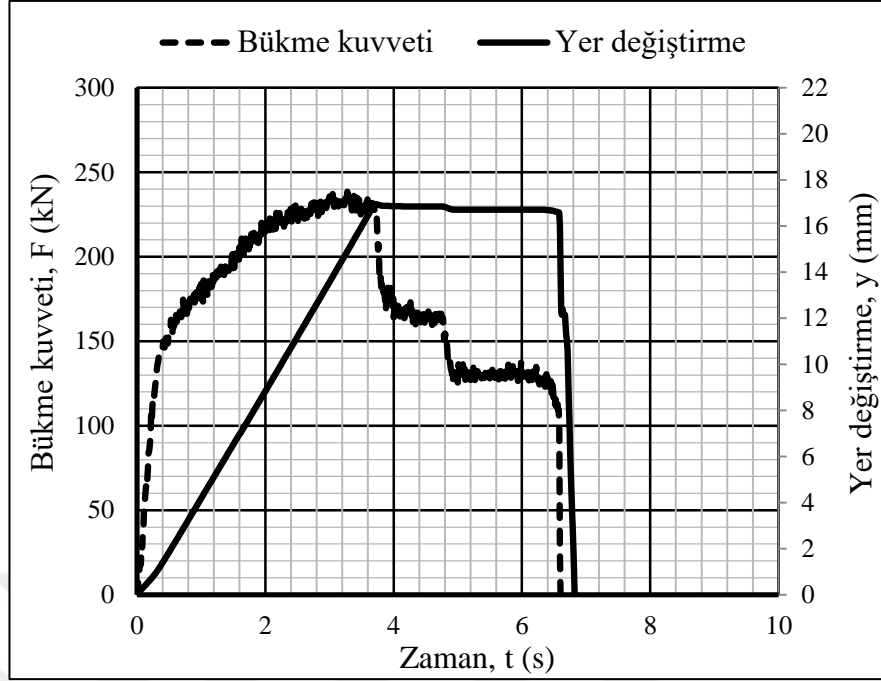
mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.23'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.23. L firmasına ait, 6x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.23'de 15 mm/s bükme hızında 105°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 2,7. saniyesi dolaylarında 21,285 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 4,5 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 105°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,25. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 70,294 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur.

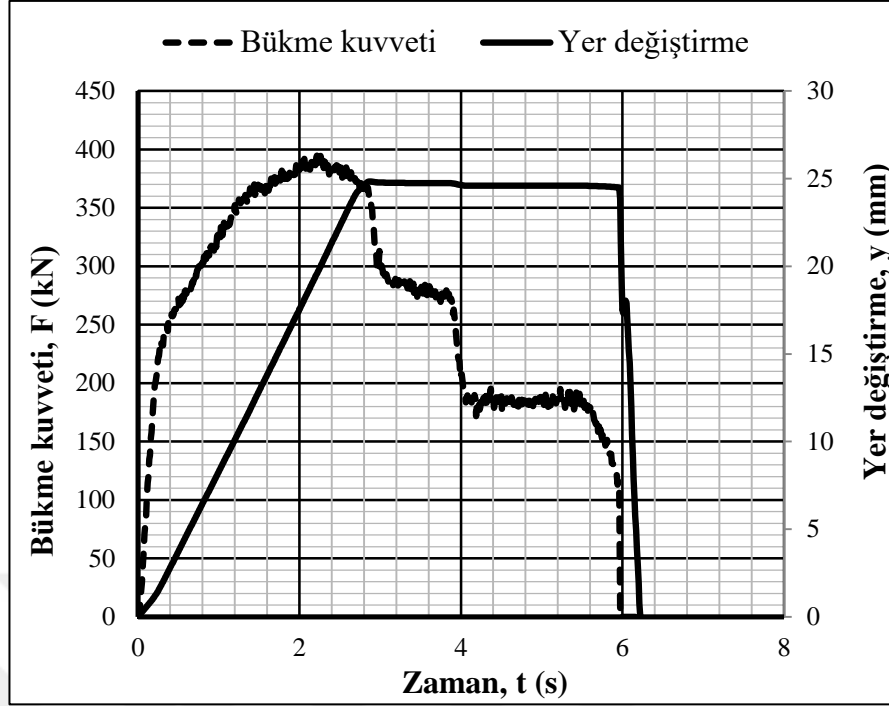
L firmasına ait, 6x300x600 ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.24'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.24. L firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.24'de 5 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 6,3. saniyesi dolaylarında 16,957 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 6,9 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 3,1. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 238,417 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur.

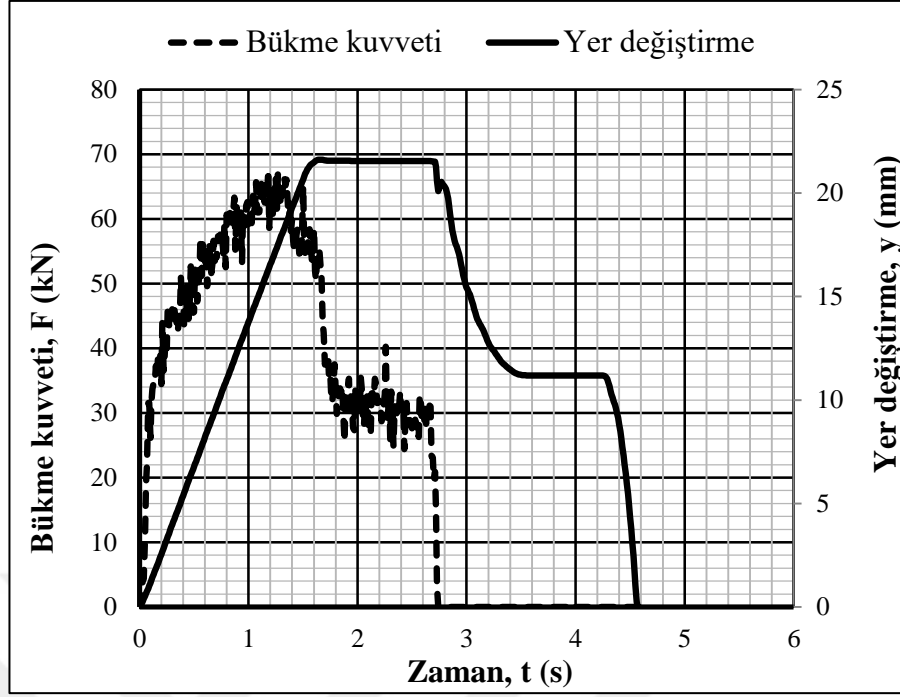
L firmasına ait, 6x300x1000 ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.25'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.25. L firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.25'de 10 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 5,9. saniyesi dolaylarında 26,079 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 6,2 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 2,2. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 398,430 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur.

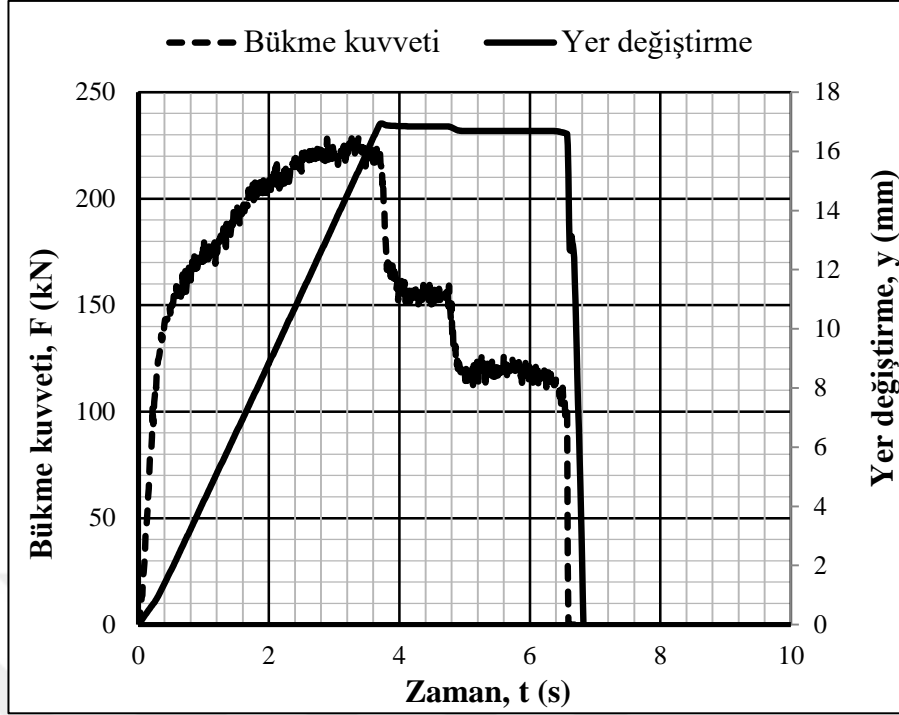
6 mm kalınlıktaki Paslanmaz malzeme deneylerine, önceki 3 gruptaki L firmasından tedarik edilen numuneler ile yapılan deneylerdeki aynı bükme parametrelerinde ancak D firmasından tedarik edilen saclardan elde edilen numuneler ile devam edilmiştir. Şekil 4.26'da eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği verilen D firmasına ait numuneler Şekil 4.23'deki L firmasına ait numunelerdeki aynı bükme parametreleri kullanılarak bükülmüştür.



Şekil 4.26. D firmasına ait, 6x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.26'da 15 mm/s bükme hızında 105°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 2,8. saniyesi dolaylarında 21,476 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 4,6 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 105°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,2. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 67,191 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. D firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.23'de verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki L firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 3 kN daha az bükme kuvveti ortaya çıkmıştır.

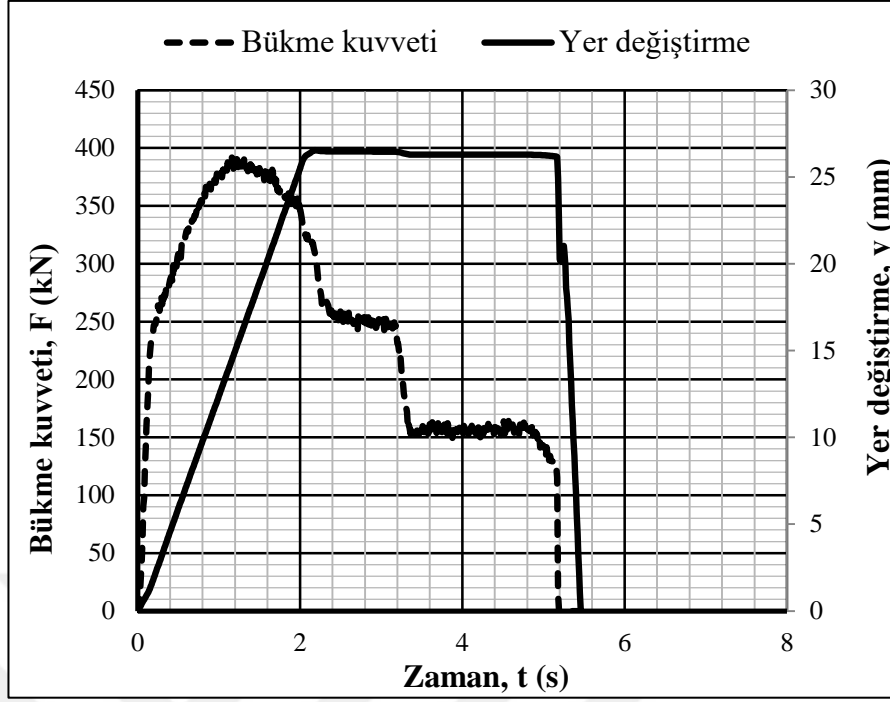
D firmasına ait ve Şekil 4.24.'deki L firmasına ait numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.27'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.27. D firmasına ait, 6x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.27'de 5 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 6,5. saniyesi dolaylarında 16,955 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 6,9 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 3,2. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 226,774 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. D firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.24'de verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki L firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 12 kN daha az bükme kuvveti ortaya çıkmıştır.

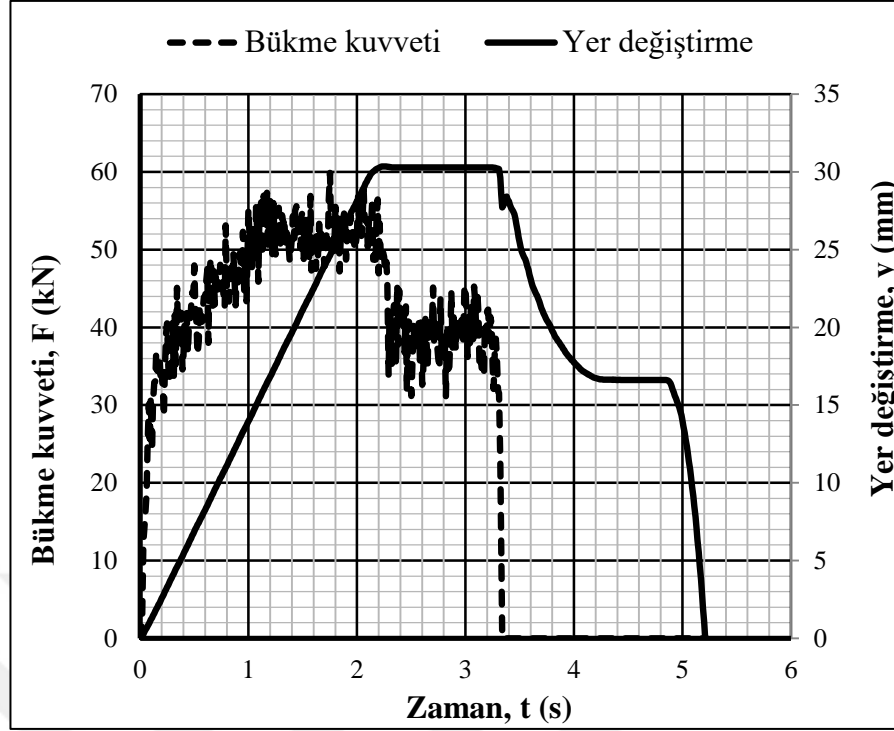
D firmasına ait ve Şekil 4.25'deki L firmasına ait numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.28'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.28. D firmasına ait, 6x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 60 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.28'de 10 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 5,2. saniyesi dolaylarında 26,059 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 5,6 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,3. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 391,298 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. D firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.25'de verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki L firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 7 kN daha az bükme kuvveti ortaya çıkmıştır.

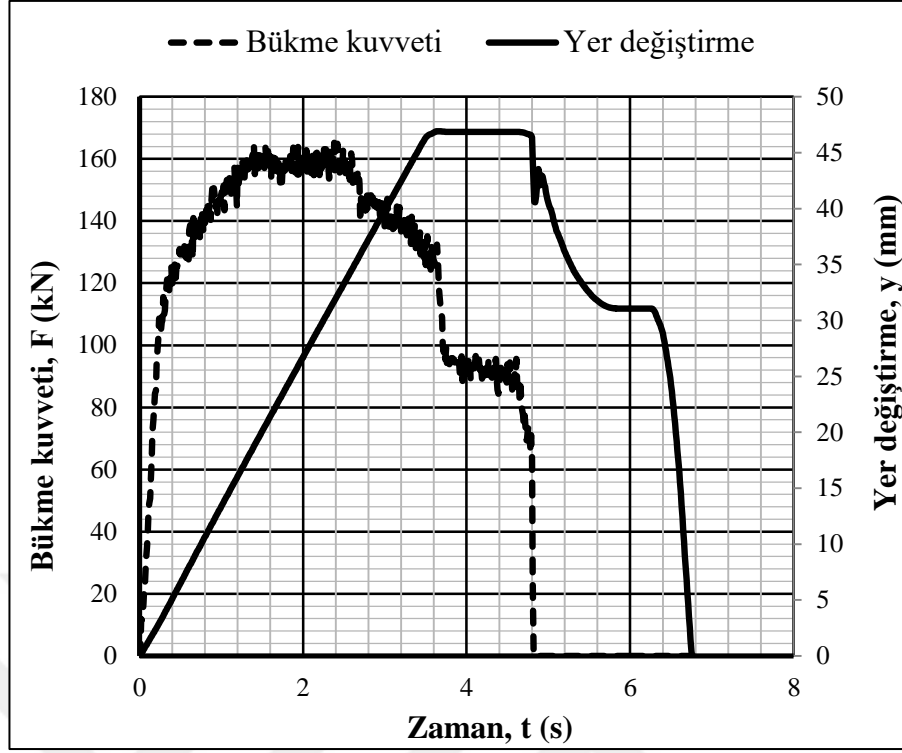
Deneylere Paslanmaz AISI 304L malzemesine ait 8 mm kalınlıkta malzemelerin farklı parametrelerdeki bükümleri ile devam edilmiştir. L firmasına ait, 8x300x200 ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.29'daki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.29. L firmasına ait, 8x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.29'da 10 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 3,3. saniyesi dolaylarında 31,205 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 5,2 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,8. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 61,837 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur.

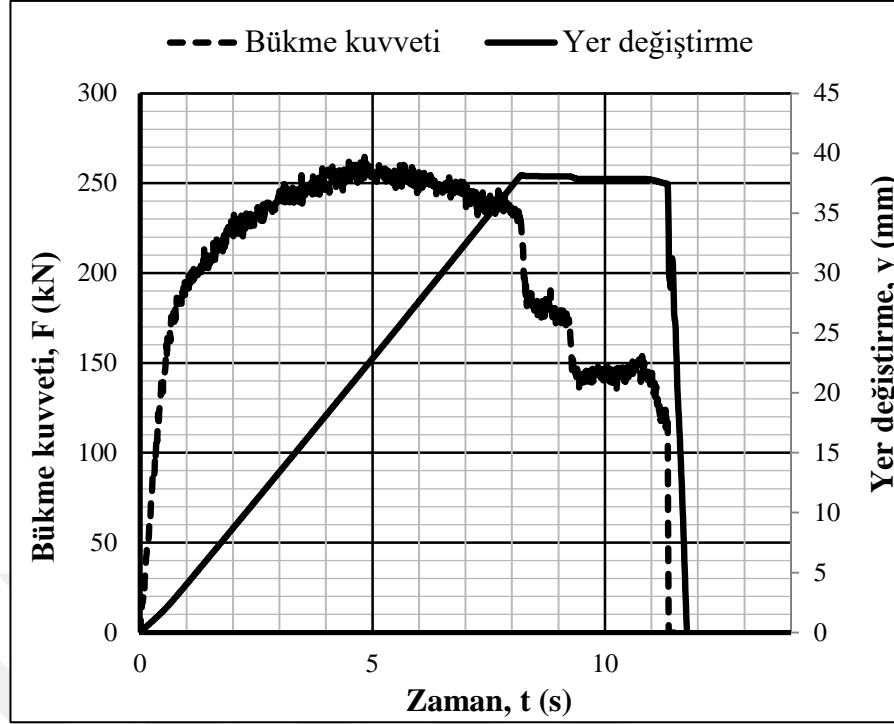
L firmasına ait, 8x300x600 ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.30'daki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.30. L firmasına ait, 8x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.30'da 15 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 4,9. saniyesi dolaylarında 49,264 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 6,8 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 2,2. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 165,179 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur.

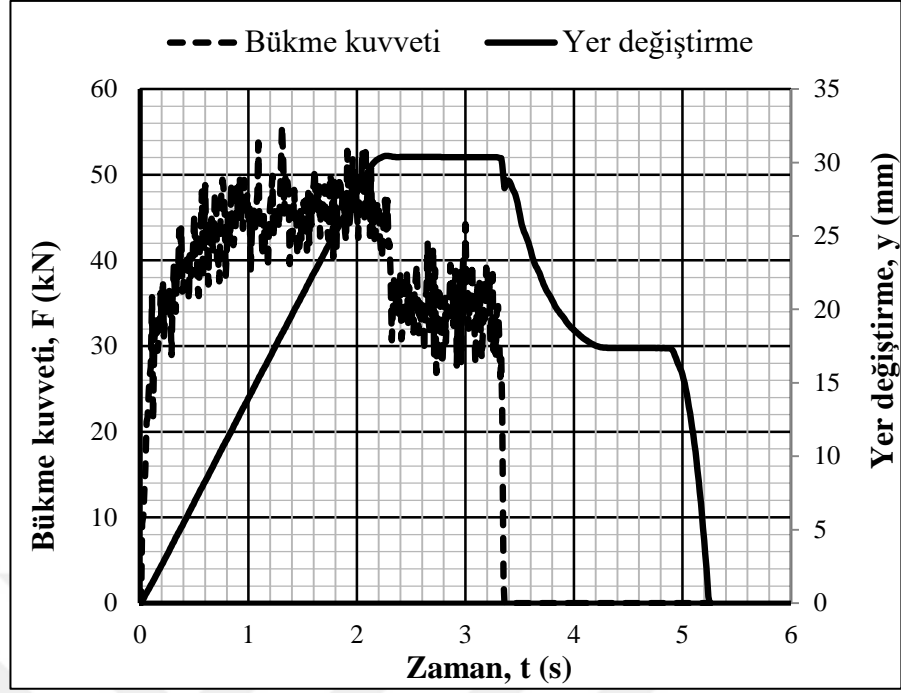
L firmasına ait, 8x300x1000 ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.31'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.31. L firmasına ait, 8x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.31'de 5 mm/s bükme hızında 105°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 11,3. saniyesi dolaylarında 39,122 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 11,9 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 105°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 4,9. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 263,572 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur.

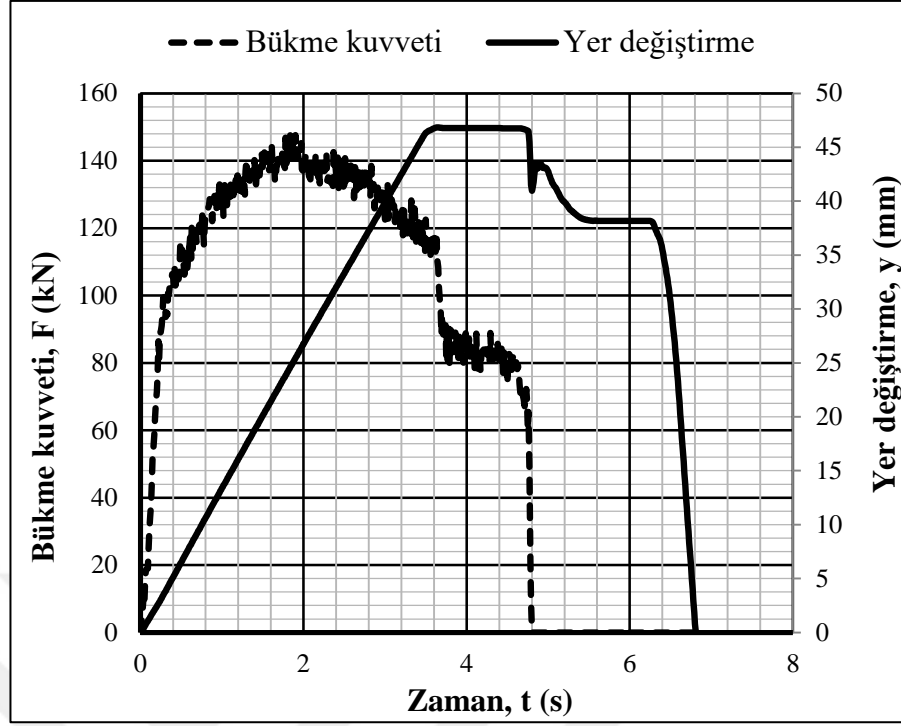
8 mm kalınlıktaki Paslanmaz malzeme deneylerine, önceki 3 gruptaki L firmasından tedarik edilen numuneler ile yapılan deneylerdeki aynı bükme parametrelerinde ancak D firmasından tedarik edilen saclardan elde edilen numuneler ile devam edilmiştir. Şekil 4.32'de eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği verilen D firmasına ait numuneler Şekil 4.29'daki L firmasına ait numunelerdeki aynı bükme parametreleri kullanılarak bükülmüştür.



Şekil 4.32. D firmasına ait, 8x300x200 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 10 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 120° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.32'de 10 mm/s bükme hızında 120°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 3,3. saniyesi dolaylarında 31,034 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 5,3 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 120°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,3. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 56,967 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. D firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.29'da verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki L firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 5 kN daha az bükme kuvveti ortaya çıkmıştır.

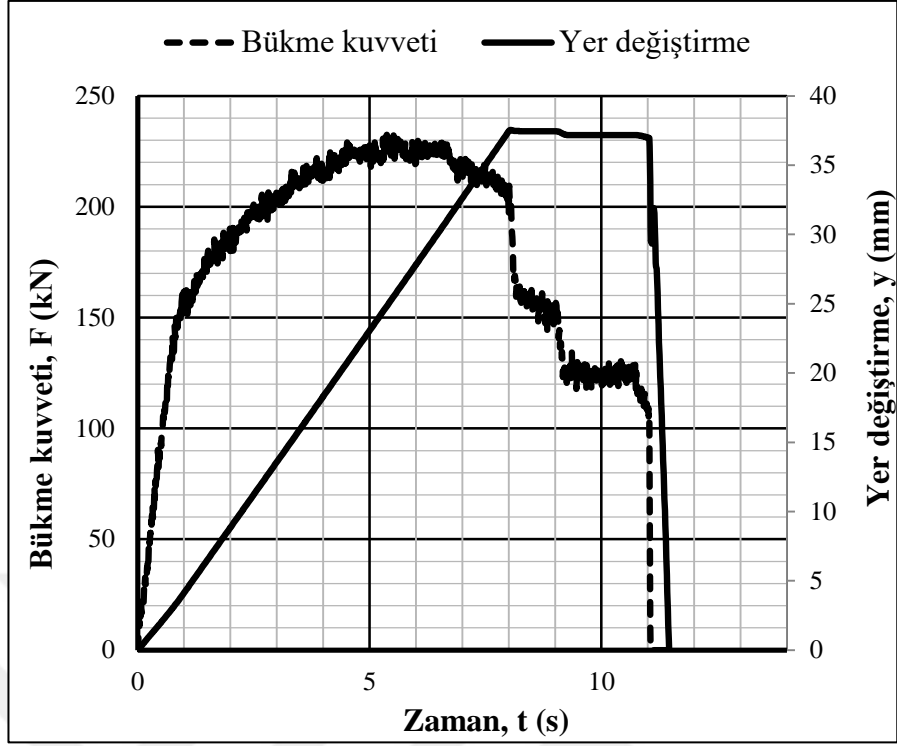
D firmasına ait ve Şekil 4.30.'daki L firmasına ait numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.33'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.33. D firmasına ait, 8x300x600 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 15 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 90° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.33'de 15 mm/s bükme hızında 90°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 4,8. saniyesi dolaylarında 49,114 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 6,8 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 90°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 1,9. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 148,424 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. D firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.30'da verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki L firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 17 kN daha az bükme kuvveti ortaya çıkmıştır.

D firmasına ait ve Şekil 4.31'deki L firmasına ait numuneler ile aynı mekanik ve geometrik özelliklerdeki numunelerin bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği ise Şekil 4.34'deki gibi oluşmuştur.



Şekil 4.34. D firmasına ait, 8x300x1000 mm ebatlarındaki Paslanmaz AISI 304L deney numunelerinin, 5 mm/s bükme hızında, 120 mm'lik kanal genişliğinde, 105° bükümü sonrası ortaya çıkan eş zamanlı kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.34'de 5 mm/s bükme hızında 105°'de bükümü yapılan numune için bükümün yaklaşık 11. saniyesi dolaylarında 39,088 mm yer değiştirme miktarında üst tabla hareketini tamamlar ve sactan ayrılarak toplam 11,4 s sonra büküm başlangıcındaki ilk pozisyonuna döner. Üst tabla hareketi ile 105°'lik bükümü tamamlanan numune üzerinde bükümün 5,4. saniyesi dolaylarında üst tabla hareketi devam ederken 232,585 kN'luk maksimum bükme kuvveti okunmuştur. D firmasına ait numune ile yapılan bu deneyde, Şekil 4.31'de verilen aynı boyutlar ve aynı mekanik özelliklerdeki L firmasına ait numune ile aynı parametrelerde yapılan deneye göre tedarikçi firma kaynaklı yaklaşık 30 kN daha az bükme kuvveti ortaya çıkmıştır.

Hidrolik abkant pres deney düzeneğinde yapılan bükme deneyleri sonucu grafiklerden okunan değerler çıkartılarak tablolara taşınmıştır. Çizelge 4.10. ve Çizelge 4.11.'de tüm deney numunelerine ait 3'er tekrarlı yapılan deneyler sonucu ortaya çıkan maksimum büküm kuvvetleri verilmiştir. 3 deneyin ortalaması alınarak belirtilen numune ebatı ve bükme parametrelerine ait maksimum bükme kuvvetleri Çizelge 4.10. ve Çizelge 4.11.'deki gibi oluşmuştur. Çizelge 4.10.'da Hardox 400 malzemeye ait büküm sonuçları yer alırken Çizelge 4.11.'de Paslanmaz AISI 304L numunelerine ait büküm sonuçları verilmiştir.



Çizelge 4.10. Hardox 400 numunelerine ait deneysel bükme kuvveti sonuçları

Malzeme Tipi	Sac Kalınlığı (mm)	Ebat (mm)	Hadde Yönü	Büküm Açısı	Tedarikçi Firma	Büküm Hızı (mm/s)	Kanal Genişliği (mm)	Ölçülen Büküm Kuvvetleri (kN)			Ölçülen Ortalama Büküm Kuvvetleri (kN)
								Deney 1	Deney 2	Deney 3	
Hardox 400	4	4x300x600	Dik	90°	K	5	60	228.79	239.26	247.42	238.48±9.33
		4x300x600		90°	K	15		251.44	262.31	261.04	258.26±5.94
		4x300x1000		120°	K	5		404.36	409.09	400.98	404.80±4.07
		4x300x1000		120°	K	15		409.66	419.33	406.40	411.79±6.72
		4x300x600		90°	E	5		232.21	241.88	248.42	240.84±8.15
		4x300x600		90°	E	15		256.90	267.56	267.11	263.85±6.02
		4x300x1000		120°	E	5		416.11	403.62	402.15	407.29±7.66
		4x300x1000		120°	E	15		426.98	427.92	410.83	421.91±9.60
	6	6x300x600		120°	K	5	120	301.18	312.81	316.76	310.24±8.09
		6x300x600		120°	K	15		315.14	312.90	322.13	316.72±4.81
		6x300x1000		90°	K	5		455.68	459.20	443.99	452.95±7.96
		6x300x1000		90°	K	15		471.10	467.48	460.37	466.31±5.45
		6x300x600		120°	E	5		326.78	337.97	324.97	329.90±7.04
		6x300x600		120°	E	15		337.23	341.97	354.62	344.60±8.98
6x300x1000	90°	E	5	519.56	516.54	513.41	516.50±3.07				
6x300x1000	90°	E	15	536.82	522.79	553.15	537.58±15.19				

Çizelge 4.11. Paslanmaz AISI 304L numunelerine ait deneysel bükme kuvveti sonuçları

Malzeme Tipi	Sac Kalınlığı (mm)	Ebat (mm)	Hadde Yönü	Büküm Açısı	Tedarikçi Firma	Büküm Hızı (mm/s)	Kanal Genişliği (mm)	Ölçülen Maksimum Büküm Kuvvetleri(kN)			Ölçülen Ortalama Büküm Kuvvetleri (kN)
								Deney 1	Deney 2	Deney 3	
Paslanmaz AISI 304L	4	4x300x200	Dik	90°	L	5	30	76.65	82.76	72.37	77.25±5.21
		4x300x600		105°	L	10		256.85	260.81	254.67	257.44±3.11
		4x300x1000		120°	L	15		431.80	433.51	429.69	431.66±1.91
		4x300x200		90°	D	5		69.41	67.00	69.16	68.52±1.32
		4x300x600		105°	D	10		229.46	230.12	226.21	228.59±2.09
		4x300x1000		120°	D	15		391.19	385.58	409.82	395.52±12.68
	6	6x300x200		105°	L	15	60	70.59	72.69	67.60	70.29±2.55
		6x300x600		120°	L	5		238.44	241.33	235.48	238.41±2.92
		6x300x1000		90°	L	10		395.51	404.89	394.89	398.43±5.60
		6x300x200		105°	D	15		64.01	70.00	67.57	67.19±3.00
		6x300x600		120°	D	5		231.63	220.21	228.48	226.77±5.89
		6x300x1000		90°	D	10		380.31	401.65	391.94	391.29±10.68
	8	8x300x200		120°	L	10	120	57.09	59.88	68.54	61.83±5.97
		8x300x600		90°	L	15		159.27	165.17	171.10	165.17±5.91
		8x300x1000		105°	L	5		260.13	265.93	264.66	263.57±3.05
		8x300x200		120°	D	10		55.76	59.27	55.88	56.96±1.99
		8x300x600		90°	D	15		152.73	144.56	147.98	148.42±4.10
		8x300x1000		105°	D	5		229.90	232.53	235.33	232.58±2.71

Büküm sırasında deney numunelerinde kuvvet uygulandığı anda ortaya çıkan maksimum yer değiştirme miktarları, ortalamaları ve standart sapma değerleri Hardox 400 malzeme için Çizelge 4.12.'de, Paslanmaz AISI 304L malzeme için Çizelge 4.13.'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Hardox 400 deney numunelerine ait büküm sırasındaki yer değiştirme miktarları

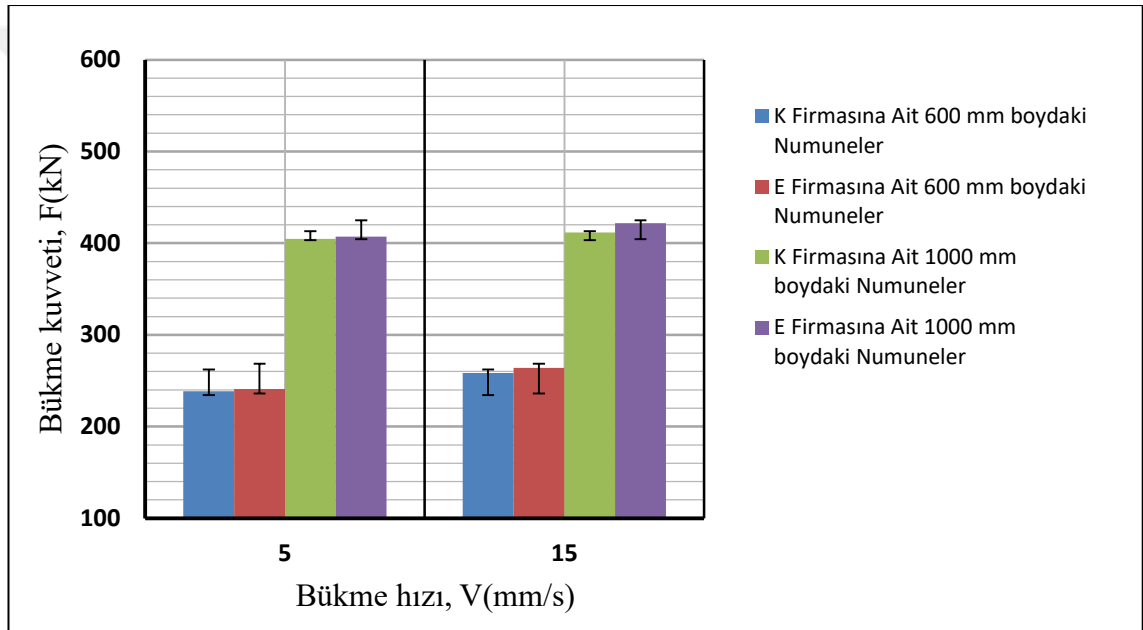
Malzeme Tipi	Sac Kalınlığı (mm)	Ebat (mm)	Hadde Yönü	Büküm Açısı	Tedarikçi Firma	Büküm Hızı (mm/s)	Kanal Genişliği (mm)	Toplam Yer Değiştirme Δx (mm)			Ortalama Deplasman (mm)
								Deney 1	Deney 2	Deney 3	
Hardox 400	4	4x300x600	Dik	90°	K	5	60	24.25	23.99	24.38	24.20 ± 0.19
		4x300x600		90°	K	15		25.09	24.35	24.09	24.51 ± 0.51
		4x300x1000		120°	K	5		15.83	16.05	15.60	15.82 ± 0.22
		4x300x1000		120°	K	15		15.53	15.14	15.65	15.43 ± 0.26
		4x300x600		90°	E	5		24.26	24.10	24.64	24.33 ± 0.27
		4x300x600		90°	E	15		23.96	23.89	24.23	24.02 ± 0.17
		4x300x1000		120°	E	5		15.12	15.16	14.85	15.04 ± 0.17
		4x300x1000		120°	E	15		14.73	14.99	15.47	15.06 ± 0.37
	6	6x300x600		120°	K	5	120	31.68	31.05	30.91	31.21 ± 0.40
		6x300x600		120°	K	15		30.73	31.58	30.63	30.97 ± 0.52
		6x300x1000		90°	K	5		50.59	50.58	51.55	50.90 ± 0.55
		6x300x1000		90°	K	15		50.92	51.24	50.64	50.93 ± 0.30
		6x300x600		120°	E	5		30.94	30.81	31.11	30.95 ± 0.15
		6x300x600		120°	E	15		31.39	30.97	30.92	31.09 ± 0.25
		6x300x1000		90°	E	5		50.77	51.37	51.05	51.06 ± 0.30
		6x300x1000		90°	E	15		51.43	51.02	51.73	51.39 ± 0.35

Çizelge 4.13. Paslanmaz AISI 304L deney numunelerine ait büküm sırasındaki yer değiştirme miktarları

Malzeme Tipi	Sac Kalınlığı (mm)	Ebat (mm)	Hadde Yönü	Büküm Açısı	Tedarikçi Firma	Büküm Hızı (mm/s)	Kanal Genişliği (mm)	Toplam Yer Değiştirme Δx (mm)			Ortalama Deplasman (mm)
								Deney 1	Deney 2	Deney 3	
Paslanmaz AISI 304L	4	4x300x200	Dik	90°	L	5	30	12.10	12.27	12.12	12.16±0.09
		4x300x600		105°	L	10		10.44	10.51	10.63	10.52±0.09
		4x300x1000		120°	L	15		8.35	8.38	8.43	8.38±0.04
		4x300x200		90°	D	5		12.28	12.26	12.30	12.28±0.02
		4x300x600		105°	D	10		10.20	10.75	10.31	10.41±0.29
		4x300x1000		120°	D	15		8.44	8.48	8.40	8.43±0.04
	6	6x300x200		105°	L	15	21.37	21.51	20.98	21.28±0.27	
		6x300x600		120°	L	5	16.95	17.03	16.89	16.95±0.06	
		6x300x1000		90°	L	10	25.78	26.56	25.90	26.07±0.42	
		6x300x200		105°	D	15	21.32	21.50	21.61	21.47±0.14	
		6x300x600		120°	D	5	16.99	16.93	16.94	16.95±0.03	
		6x300x1000		90°	D	10	26.06	25.58	26.54	26.05±0.48	
	8	8x300x200		120°	L	10	31.13	31.07	31.42	31.20±0.18	
		8x300x600		90°	L	15	49.34	49.03	49.42	49.26±0.20	
		8x300x1000		105°	L	5	39.16	39.16	39.04	39.12±0.06	
		8x300x200		120°	D	10	31.18	31.16	30.76	31.03±0.23	
		8x300x600		90°	D	15	48.77	49.29	49.28	49.11±0.29	
		8x300x1000		105°	D	5	39.02	38.93	39.32	39.08±0.20	

Hardox 400 numunelerin bükümleri sonucu bükme hızının ve numune boyunun bükme kuvvetine etkileri ortaya konmuştur. Bununla beraber farklı firmalardan tedarik edilen aynı geometrik özelliklerdeki sacların bükümü sonrası ortaya çıkan bükme kuvvetlerindeki farklılıklar tespit edilmiştir.

Şekil 4.35’de verilen grafikte iki farklı firmadan tedarik edilen 4 mm Hardox 400 malzemeye ait 600 mm ve 1000 mm boylarındaki numunelerin 5 mm/s ve 15 mm/s bükme hızlarında 60’lık kanalda bükümleri sonucu ortaya çıkan ortalama bükme kuvvetleri verilmiştir.

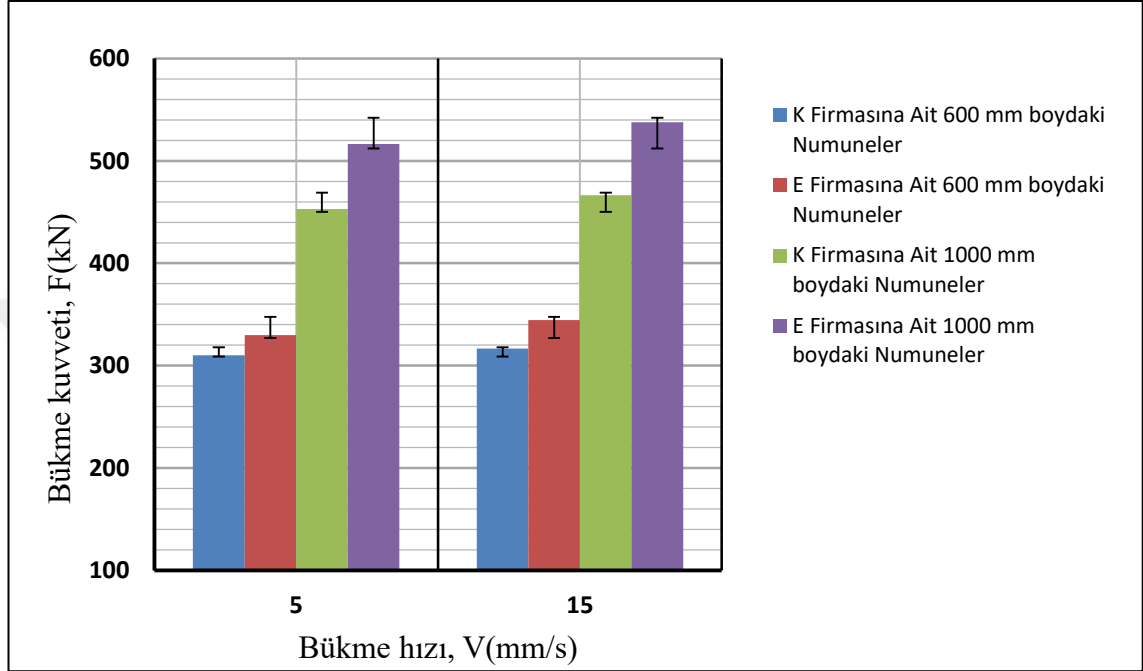


Şekil 4.35. 4 mm hardox 400 malzemenin 60'lık kanalda iki farklı ebat ve iki farklı tedarikçi firma için iki farklı bükme hızına göre ortalama bükme kuvvetleri

Şekil 4.35.'de verilen sütun grafiğinde eş zamanlı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri daha önceden ayrı ayrı verilen 4 mm Hardox 400 numunelere ait deney sonuçlarını bütün olarak yorumlamak mümkündür. Yapılan bükme deneyleri, farklı tedarikçi ve farklı bükme boylarında bükme hızını arttırmanın her zaman bükme kuvvetlerini de arttırdığını göstermiştir. Hız arttıkça bükme kuvvetlerinin de artması ortaya çıkan deformasyon sertleşmesinin göstergesidir. Bilindiği üzere metallerde şekil değiştirme hızının artması belirli bir deformasyondan sonra pekleşme geçirerek normaldeki dayanımlarından daha fazla dayanım göstermesine sebep olmaktadır. Yapılan bükme

deneyleri sonucu çizilen yukarıdaki grafikten de okunabileceği üzere 15 mm/s bükme hızında yapılan tüm deneylerde 5 mm/s bükme hızında yapılan deneylere göre daha fazla bükme kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Ayrıca aynı grafikte yassı malzemelerin tedarik edildiği firmalardaki farklılıkların da bükme kuvvetlerine etki ettiği açıkça görünmektedir. Aynı mekanik özelliklerde, iki farklı firmadan tedarik edilen numunelere ait bükme deneyi sonuçlarında üretici firma kaynaklı farklılıklar gözlenmiştir. E firmasından tedarik edilen numuneler ile yapılan deneylerde K firmasından tedarik edilen numuneler ile yapılan deneylere göre daha fazla bükme kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Numune boyunun veya bükme hızının arttırıldığı deneylerde de yine E firmasına ait numunelerin deneylerinde her zaman daha fazla bükme kuvveti değerleri okunmuştur. Bu da her ne kadar aynı mekanik özelliklerde olduğu söylene de kimyasal kompozisyonlar veya farklı üretim teknikleri nedeniyle malzemelerin mekanik özelliklerinde üretici kaynaklı farklılıklar görünebileceği ve bunun da bükme kuvvetlerine etki edebileceği yapılan deneyler sonucu açıkça gözlemlenmiştir.

Şekil 4.36’da verilen grafikte ise iki farklı firmadan tedarik edilen 6 mm Hardox 400 malzemeye ait 600 mm ve 1000 mm boylarındaki numunelerin 5 mm/s ve 15 mm/s bükme hızlarında 120’lik kanalda bükümleri sonucu ortaya çıkan ortalama bükme kuvvetleri verilmiştir.



Şekil 4.36. 6 mm hardox 400 malzemenin 120'lik kanalda iki farklı ebat ve iki farklı tedarikçi firma için iki farklı bükme hızına göre ortalama bükme kuvvetleri

Şekil 4.36.’da verilen sütun grafiğinde eş zamanlı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri daha önceden ayrı ayrı verilen 6 mm Hardox 400 numunelere ait deney sonuçlarını bütün olarak yorumlamak mümkündür. Yapılan bükme deneyleri, tıpkı 4 mm Hardox 400 malzemeler ile yapılan deneylerde olduğu gibi, farklı tedarikçi ve farklı bükme boylarında bükme hızını arttırmanın her zaman bükme kuvvetlerini de arttırdığını göstermiştir. 15 mm/s bükme hızında yapılan tüm deneylerde 5 mm/s bükme hızında yapılan deneylere göre daha fazla bükme kuvvetleri ortaya çıkmıştır. Ayrıca aynı grafikte, tıpkı 4 mm Hardox 400 malzemeler ile yapılan deneylerde olduğu gibi, yassı malzemelerin tedarik edildiği firmalardaki farklılıkların da bükme kuvvetlerine etki ettiği açıkça görünmektedir. Numune boyu ve bükme hızı farketmeksizin E firmasından tedarik edilen numuneler ile yapılan deneylerde K firmasından tedarik edilen numuneler ile yapılan deneylere göre daha fazla bükme kuvvetleri ortaya çıkmıştır.

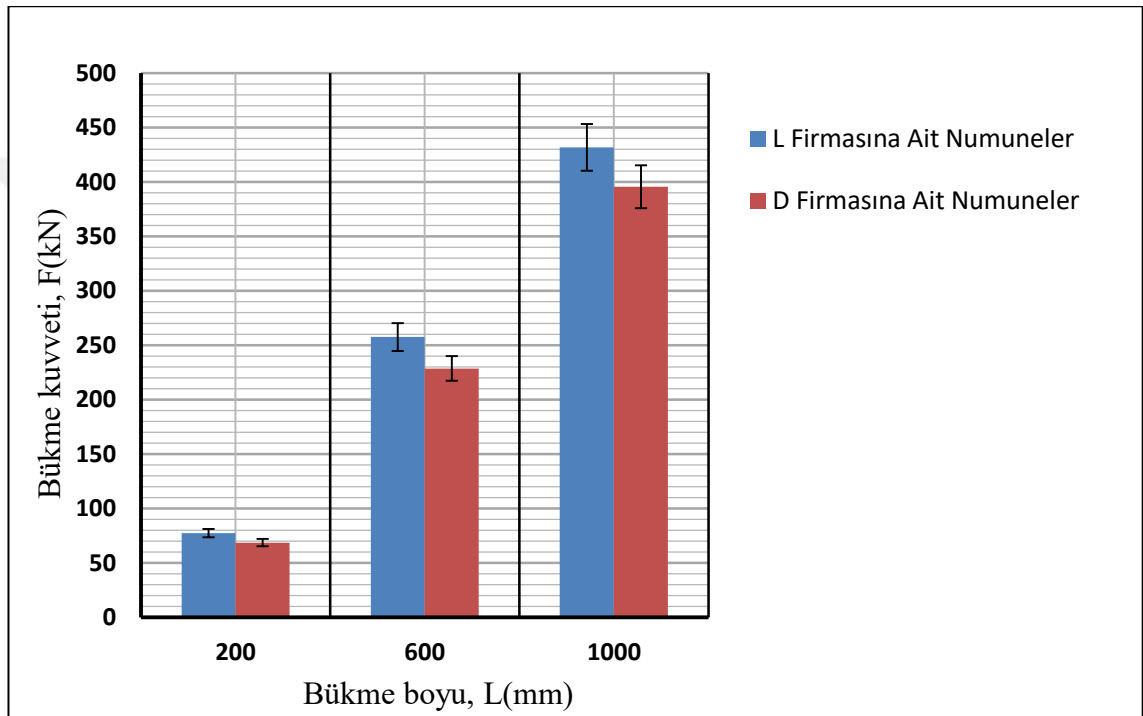
Hardox 400 malzeme deneylerinde ayrıca büküm sonrası yassı malzemelerde oluşan geri yaylanma miktarları da ölçülmüştür. Büküm anında Hidrolik abkant pres deney düzeneğine yerleştirilen kameralı açı ölçüm cihazı ile ilk ve son açıları tespit edilen numuneler büküm sonlandıktan minimum 15 dk sonra dijital açı ölçüm cihazı ile manuel olarak da ölçümleri yapılarak son açı değerinden emin olunmuştur. 4 mm ve 6 mm kalınlıklarındaki Hardox 400 deney numunelerine ait geri yaylanma miktarları Çizelge 4.14.'deki gibi oluşmuştur.

Çizelge 4.14. Hardox 400 deney numunelerine ait geri yaylanma miktarları

Malzeme Tipi	Sac Kalınlığı (mm)	Ebat (mm)	Hadde Yönü	Büküm Açısı	Tedarikçi Firma	Büküm Hızı (mm/s)	Kanal Genişliği (mm)	Geri Yaylanma Miktarları		
								İlk Açı (°)	Son Açı (°)	Geri Yaylanma %
Hardox 400	4	4x300x600	Dik	90°	K	5	60	90.12	101.03	12.11
		4x300x600		90°	K	15		90.47	101.10	11.75
		4x300x1000		120°	K	5		118.47	128.17	8.19
		4x300x1000		120°	K	15		122.53	131.77	7.54
		4x300x600		90°	E	5		90.30	103.47	14.58
		4x300x600		90°	E	15		89.63	102.47	14.32
		4x300x1000		120°	E	5		120.80	129.25	7.00
		4x300x1000		120°	E	15		120.07	130.17	8.41
	6	6x300x600		120°	K	5	120	120.40	134.35	11.59
		6x300x600		120°	K	15		120.23	134.55	11.91
		6x300x1000		90°	K	5		90.15	105.90	17.47
		6x300x1000		90°	K	15		90.13	106.07	17.68
		6x300x600		120°	E	5		120.03	133.80	11.47
		6x300x600		120°	E	15		120.47	133.77	11.04
		6x300x1000		90°	E	5		90.40	106.33	17.63
		6x300x1000		90°	E	15		89.83	105.47	17.40

Paslanmaz numunelerin bükümleri sonucu da yine bükme hızı, numune boyu ve farklı tedarikçi'nin bükme kuvvetine etkileri ortaya konmuştur.

Şekil 4.37.'de verilen grafikte iki farklı firmadan tedarik edilen 4 mm Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait 200 mm, 600 mm ve 1000 mm boylardaki numunelerin 5 mm/s, 10 mm/s ve 15 mm/s bükme hızlarında 30'luk kanalda bükümleri sonucu ortaya çıkan ortalama kuvvetler verilmiştir.

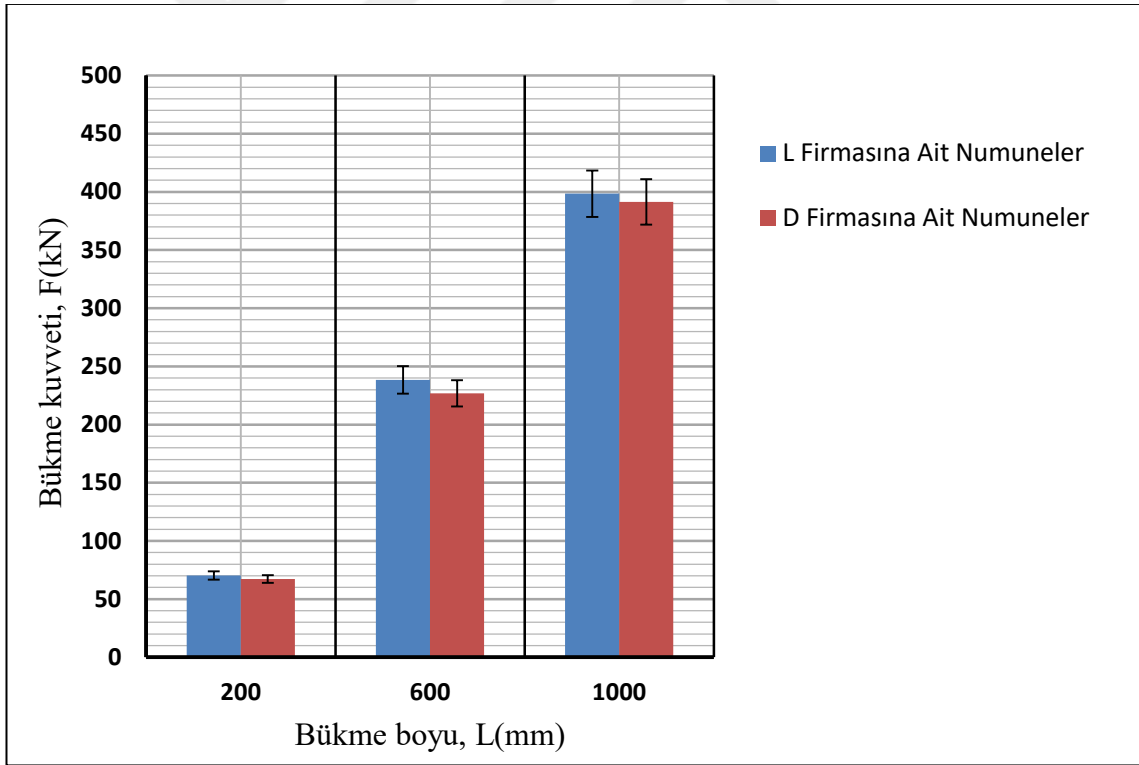


Şekil 4.37. 4 mm Paslanmaz AISI 304L malzemenin 30'luk kanalda üç farklı ebat için tedarikçi firmaya göre ortalama bükme kuvvetleri

Şekil 4.37.'de 4 mm Paslanmaz AISI 304L malzeme ile yapılan bükme deneylerine ait farklı bükme boyu ve farklı tedarikçiye göre ortaya çıkan bükme kuvvetleri verilmiştir. Bükme boyundaki artışın bükme kuvvetlerini de linner olarak arttırdığı literatürde kabul edilmektedir. Ancak deney sonuçları göstermiştir ki bükme hızındaki değişimler ve üretici firma kaynaklı sebepler nedeniyle, bükme boyundaki artış ile bükme kuvveti arasında tam olarak lineer bir değişim oluşmamaktadır. Örneğin, L firmasına ait 200 mm boyundaki numunenin bükümü sonucu ortaya çıkan maksimum bükme kuvveti 77,25 kN olurken, 3 kat uzunlukta 600 mm boydaki numunenin bükümü sonucu ortaya çıkan maksimum bükme kuvveti 257,44 kN olarak okunmuştur. Bu da ortaya çıkan

kuvvetin 3 kattan daha fazla olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde 5 kat fazla uzunlukta 1000 mm boydaki numune ile yapılan deney sonucunda ortaya çıkan 431,66 kN'luk bükme kuvvetinin 200 mm boydaki numune bükümünde ortaya çıkan 77,25 kN'luk kuvvetin 5 katından fazla olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, numune boyu arttıkça bükme kuvvetindeki artışın doğrusal artıştan biraz daha fazla olabileceğini göstermiştir. Ayrıca L firmasından tedarik edilen numunelere ait deneylerde D firmasından tedarik edilen numunelere ait deneylere göre daha fazla bükme kuvvetleri elde edilmiştir.

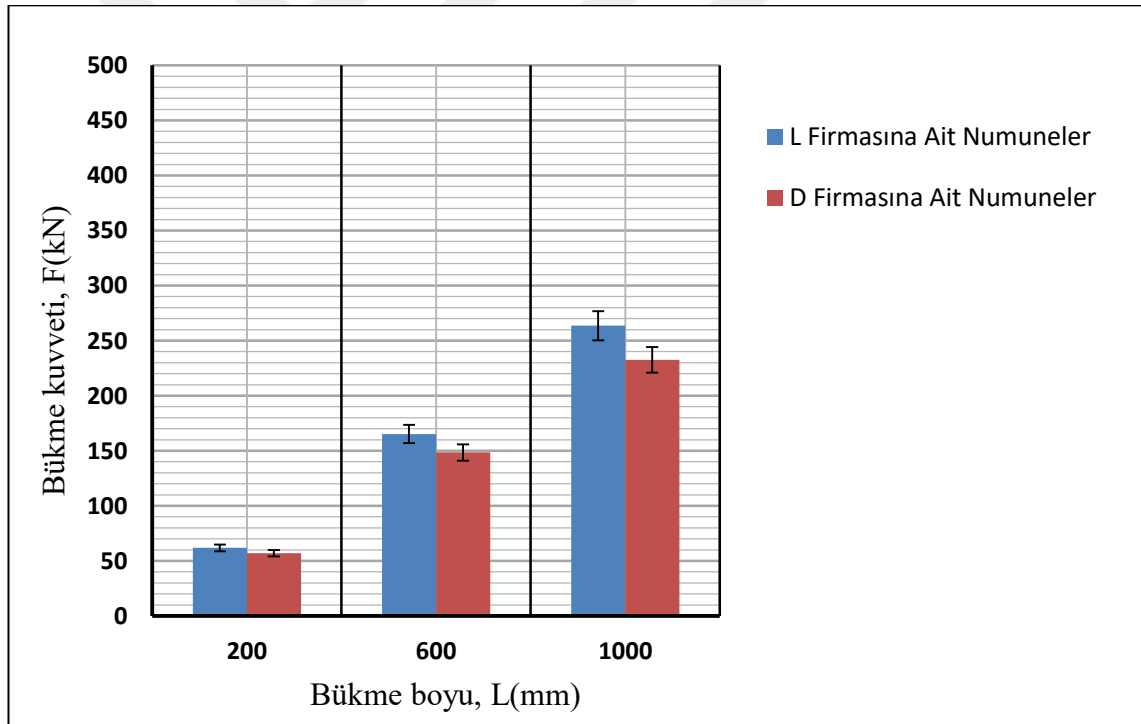
Şekil 4.38'de verilen grafikte iki farklı firmadan tedarik edilen 6 mm Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait 200 mm, 600 mm ve 1000 mm boylardaki numunelerin 5 mm/s, 10 mm/s ve 15 mm/s bükme hızlarında 60'lık kanalda bükümleri sonucu ortaya çıkan ortalama kuvvetler verilmiştir.



Şekil 4.38. 6 mm Paslanmaz AISI 304L malzemenin 60'lık kanalda üç farklı ebat için tedarikçi firmaya göre ortalama bükme kuvvetleri

Şekil 4.38.'de 6 mm Paslanmaz AISI 304L malzeme ile yapılan bükme deneylerine ait farklı bükme boyu ve farklı tedarikçiye göre ortaya çıkan bükme kuvvetleri verilmiştir. 6 mm kalınlığındaki numunelerle yapılan deneylerde de tıpkı 4 mm kalınlığındaki deneylerde olduğu gibi bükme boyu arttıkça bükme kuvvetindeki artışın doğrusal artıştan daha fazla olduğu görülmüştür. Yine bu kalınlıkta da, L firmasından tedarik edilen numunelere ait deneylerde D firmasından tedarik edilen numunelere ait deneylere göre daha fazla bükme kuvvetleri elde edilmiştir.

Şekil 4.39'da verilen grafikte ise iki farklı firmadan tedarik edilen 8 mm Paslanmaz AISI 304L malzemeye ait 200 mm, 600 mm ve 1000 mm boylardaki numunelerin 5 mm/s, 10 mm/s ve 15 mm/s bükme hızlarında 120'lik kanalda bükümleri sonucu ortaya çıkan ortalama kuvvetler verilmiştir.



Şekil 4.39. 8 mm Paslanmaz AISI 304L malzemenin 120'lik kanalda üç farklı ebat için tedarikçi firmaya göre ortalama bükme kuvvetleri

Şekil 4.39.'da 8 mm Paslanmaz AISI 304L malzeme ile yapılan bükme deneylerine ait farklı bükme boyu ve farklı tedarikçiye göre ortaya çıkan bükme kuvvetleri verilmiştir. 8 mm kalınlığındaki numunelerle yapılan deneylerde de tıpkı 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki deneylerde olduğu gibi bükme boyu arttıkça bükme kuvvetindeki artışın

doğrusal artıştan daha fazla olduğu görülmüştür. Yine L firmasından tedarik edilen numunelere ait deneylerde D firmasından tedarik edilen numunelere ait deneylere göre daha fazla bükme kuvvetleri elde edilmiştir.

İki farklı firmadan tedarik edilen Paslanmaz AISI 304L malzemeleri ile yapılan bükme deneylerinde aynı standart numarasına sahip olmasına rağmen farklı numune boyları ve hızlarda yapılan deneylerin hepsinde L firmasından tedarik edilen numunelerde D firmasından tedarik edilen numunelere göre daha fazla bükme kuvvetleri elde edilmiştir. Daha önceden yapılan Hardox 400 deneylerinde açıkça gözlemlendiği gibi, Paslanmaz AISI 304L deneylerinde de her ne kadar aynı mekanik özelliklerde olduğu söylene de kimyasal kompozisyonlar veya farklı üretim teknikleri nedeniyle malzemelerin mekanik özelliklerinde üretici kaynaklı farklılıklar görülebileceği bir kez daha gözlemlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L malzemelerinin farklı geometriler ve farklı bükme parametreleri için kuvvet-yer değiştirme davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Farklı parametreler için oluşan maksimum kuvvet ve toplam yer değiştirme miktarları belirlenmiştir. Ortaya çıkan sonuçlar irdelenerek farklı tedarikçi, büküm hızı, büküm açısı, kanal genişliği ve numune ebatlarının bükme kuvveti ve büküm anındaki toplam yer değiştirme miktarlarına etkileri ortaya konmuştur.

Elde edilen bulgulara göre ortaya çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L malzemelerinin tedarikçi firmaya göre mekanik özelliklerinde farklılıklar oluşabildiği yapılan çekme deneyleri ile anlaşılmıştır. Malzemelerin mekanik özelliklerindeki bu farklılıkların da bükme kuvvetlerine doğrudan etki ettiği açıkça ortaya konmuştur. Bükme kuvvetlerindeki beklenmeyen farklılıkların da hidrolik abkant pres makine ve iş takımlarının tasarımına doğrudan etkiyeceği anlaşılmıştır. Makine üreticilerinin bükümü yapılacak malzeme için makine ve sistem tasarımları yaparken standart değerler yerine deneysel sonuçlardan elde edilen verileri kullanmaları gerektiği gözlemlenmiştir.
- Hardox 400 malzemesi için K firmasından tedarik edilen sacların her kalınlık ve bükme boyu için yapılan bükümlerinde E firmasından tedarik edilen saclara göre daha az bükme kuvvetleri elde edilmiştir. Bu da her ne kadar aynı mekanik özelliklerde olduğu belirtilse de kimyasal kompozisyonlar veya farklı üretim teknikleri nedeniyle malzemelerin mekanik özelliklerinde üretici kaynaklı farklılıklar görülebileceğini açıkça ortaya koymuştur.
- Her iki firmadan da tedarik edilen Hardox 400 malzemeler için 15 mm/s hızdaki bükümlerde 5 mm/s hızdaki bükümlere göre daha fazla kuvvetler ortaya çıkmıştır. Böylece bükme hızındaki artışın az da olsa bükme kuvvetlerini arttırdığı belirlenmiştir. Bilindiği üzere metallerde şekil değiştirme hızının

artması belirli bir deformasyondan sonra pekleşme geçirerek normaldeki dayanımlarından daha fazla dayanım göstermesine sebep olmaktadır.

- Hardox 400 malzemeleri için büküm anındaki açılış değerleri izlenerek geri yaylanma değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen geri yaylanma değerlerinin üretici firmaların verdiği değerlerden farklılıklar gösterdiği anlaşılmıştır. Oluşan bu farklılıkların makine ve kalıp tasarımlarına etki edebileceği görülmüştür.
- Paslanmaz AISI 304L malzemesi için L firmasından tedarik edilen sacların her kalınlık ve bükme boyu için yapılan bükümlerinde D firmasından tedarik edilen deney numunelerine göre daha yüksek bükme kuvvetleri elde edilmiştir. Aynı standart numarasına sahip malzemelerde dahi malzemelerin mekanik özelliklerinde üretici kaynaklı farklılıklar görülebileceği bir kez daha belirlenmiştir.
- Paslanmaz AISI 304L malzemelerin tüm ebatları için 5 mm/s, 10 mm/s ve 15 mm/s hızlarda yapılan bükümlerde hız arttıkça bükme kuvvetinin de zaman zaman artış gösterdiği belirlense de bu artış Hardox 400 numunelerdeki kadar olmamıştır. Bu da mukavemeti yüksek çeliklerde bükme hızının bükme kuvvetine etkisinin daha belirgin olduğunu göstermiştir.
- Bükme boyundaki artışın bükme kuvvetlerini de lineer olarak arttırdığı bilinmektedir. Ancak yapılan deney sonuçlarına göre Hardox 400 ve Paslanmaz AISI 304L olmak üzere her iki malzeme grubunda da deney numunesi boyu arttıkça bükme kuvvetindeki artışın lineer olmadığı gözlemlenmiştir. Hardox 400 numuneler ile yapılan deneylerde bükme boyuna bağlı olarak beklenen kuvvetlerden yaklaşık %5 daha fazla bükme kuvvetleri elde edilirken, Paslanmaz AISI 304L numuneler ile yapılan deneylerde ise bükme boyuna bağlı olarak beklenen kuvvetlerden yaklaşık %10 daha fazla bükme kuvvetleri okunmuştur. Bükme boyu ve bükme kuvveti arasındaki değişimi lineer kabul ederek yapılacak makine ve sistem tasarımlarında hatalarla karşılaşılmasının mümkün olduğu anlaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Adnan, M.F., Abdullah, A.B., Samad, Z. 2017.** Springback behavior of AA6061 with non-uniform thickness section using Taguchi Method. *Int J Adv Manuf Technol (2017)*, 89: 2041–2052.
- Altıntaş, Y., Lane, J. 1997.** Design of an electro-hydraulic cnc press brake. *Int, J. Mach. Tools Manufact.*, 37(1): 45-59.
- Anonim, 2006.** MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Geliştirilmesi Projesi), Metal Teknolojisi, CNC Abkantta Bükme, kod: 521MMI254, Ankara, 2006.
- Asnafi, N. 2000.** Springback and fracture in v-die air bending of thick stainless steel sheets. *Materials and Design*, 21(3): 217-236.
- Canteli, J.A., Cantero, J.L., Miguelez, M.H. 2008.** Experimental identification of a thermo-mechanical model for air bending. *Journal of materials processing technology*, 203(1): 267–276.
- Chan, W.M., Chew, H.I., Lee, H.P., Cheok, B.T. 2004.** Finite element analysis of spring-back of V-bending sheet metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(1): 15–24.
- Coelho, P.G., Faria L.O., Cardoso J.B. 2005.** Structural analysis and optimisation of press brakes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(12): 1451–1460.
- De Vin, L.J., Streppel, A.H., Singh, U.P., Kals, H.J.J. 1996.** A process model for air bending. *Journal of Materials Processing Technology*, 57: 48-54.
- Duflou, J.R., Vancza, J., Aereens, R. 2005.** Computer aided process planning for sheet metal bending: A state of the art. *Computers in Industry*, 56(7): 747–771.
- Duflou, J.R., Aereens, R. 2006.** Force Reduction in Bending of Thick Steel Plates by Localized Preheating. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1): 237-240.
- Elkins, K.L., Sturges, R.H. 1999.** Non-Iterative Control of Small-Radius Bend Angle. *Journal Of Manufacturing Processes*, 1(1): 18-30.
- Fei, D., Hodgson, P. 2006.** Experimental and numerical studies of springback in air v-bending process for cold rolled TRIP steels. *Nuclear Engineering and Design*, 236(18): 1847–1851.
- Gupta, S.K., Bourne, D.A., Kim, K.H., Krishnan, S.S. 1998.** Automated Process Planning for Sheet Metal Bending Operations. *Journal of Manufacturing Systems*, 17(5): 338-361.

- Hambli, R., Mkadem, A., Potiron, A. 2004.** Finite element damage modeling in bending processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 147(3): 302–310.
- Imai, K., Koyama, J., Jin, Y. 2008.** High-accuracy V-bending system by real time identifying material property. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1) : 193–197.
- Magee, J., De Vin, L.J. 2002.** Process planning for laser-assisted forming. *Journal Of Materials Processing Technology*, 120(1): 322-326.
- Marcondes, P.V.P., Dos Santos, R.A., Haus, S.A. 2016.** The coining force influence on springback in TRIP800 steel V and L-bending processes. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. (2016)*, 38(2): 455–463.
- Mentink, R.J., Lutters, D., Streppel, A.H., Kals, H.J.J. 2003.** Determining material properties of sheet metal on a press brake. *Journal Of Materials Processing Technology* 141(1): 143-154.
- Mori, K., Akita, K., Abe, Y. 2007.** Springback behaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(2): 321–325.
- Nilsson, A., Melin, L., Magnusson, C. 1997.** Finite-element simulation of V-die bending: a comparison with experimental results. *Journal of Materials Processing Technology*, 65(1): 52-58.
- Ona, H., Watari, H. 1998.** Elimination of the longitudinal curvature of a product formed by a press brake. *Journal Of Materials Processing Technology*, 79(1): 236-241.
- Santos, J.P., Oliveira, M., Almeida, F.G., Pereira, J.P., Reis, A. 2011.** Improving the environmental performance of machine-tools: influence of technology and throughput on the electrical energy consumption of a press-brake. *Journal of Cleaner Production*, 19(4): 356-364.
- Saric, E., Mehmedović, M., Butković, S. 2016.** Analysis of springback in air bending process. *Journal for Technology of Plasticity*, 41(2): 35-44.
- Singh, U.P., Maiti, S.K., Date, P.P., Narasimhan, K. 2004.** Numerical simulation of the influence of air bending tool geometry on product quality. *Journal Of Materials Processing Technology*, 145(3): 269–275.
- Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U. 2008.** Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies. *Materials and Design*, 29(5): 1043–1050.
- Tekiner, Z. 2004.** An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(1): 109–117.

Thipprakmas, S. 2010. Finite element analysis of punch height effect on V-bending angle. *Materials and Design*, 31(3): 1593–1598.

Thipprakmas, S. 2011. Finite element analysis on the coined-bead mechanism during the V-bending process. *Materials and Design*, 32(10): 4909–4917.

Wang, J., Verma, S., Alexander, R., Gau, J.T. 2008. Springback control of sheet metal air bending process. *Journal of Manufacturing Processes*, 10(1): 21-27.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatih AYDEMİR
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa / 21.08.1987
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bursa Atatürk Lisesi Y.D.A, 2005
Lisans : Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, 2009

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Durmazlar Makina San. ve Tic. A.Ş. (2011-....)
İletişim (e-posta) : faydemir016@gmail.com