

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAC ŞEKİLLENDİRME PROSESİNDE KULLANILAN  
SÜZDÜRME ÇUBUĞUNUN MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak. Müh. Derya İRİÇ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Recep KOZAN**

**Ağustos 2012**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAC ŞEKİLLENDİRME PROSESİNDE KULLANILAN  
SÜZDÜRME ÇUBUĞUNUN MODELLENMESİ


YÜKSEK LİSANS TEZİ


Mak. Müh. Derya İRİÇ


Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

Bu tez 09 / 08 / 2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr.  
Recep KOZAN  
Jüri Başkanı

  
Doç. Dr.  
Ahmet ÖZEL  
Üye

  
Yrd. Doç. Dr.  
Aysun Eğrisöğüt TIRYAKI  
Üye

## **TEŞEKKÜR**

Tez alıŐması s¼reci boyunca danıŐman hocam, sayın Prof. Dr. Recep KOZAN'a akademik çalıŐmalarımnda ve tez s¼recinde bana desteklerini esirgemediği için minnettarlığımı sunarım.

Tezimin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Aysun EĐrisoĐ¼t TIRYAKI'ye ayrıca teŐekk¼rlerimi sunarım.

Her koşul altında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teŐekk¼rlerimi sunarım.

ÇalıŐmalarım esnasında desteklerini esirgemeyen sevgili eŐim Sedat İRI'e ve canım kızım Tuğçe Cansu İRI'e ayrıca teŐekk¼r ve minnettarlıklarımı sunarım.

Bu alıŐma 2011-50-01-062 proje numarası ile SAÜ BAPK tarafından desteklenmiŐtir. Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna teŐekk¼r ederim.

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ .....	ix
ÖZET .....	x
SUMMARY .....	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ .....	1
1.1. Süzdürme Çubuğu ve Kanalı .....	2
1.2. Süzdürme Çubuğu Konumunun Belirlenmesi .....	7
1.3. Literatür Araştırması.....	8
1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı .....	14
1.5. Çalışmanın Ana Hatları .....	15
BÖLÜM 2. REGRESYON ANALİZİ .....	16
2.1. Giriş .....	16
2.2. Doğrusal Regresyon Model .....	17
2.2.1. Basit doğrusal regresyon modeli.....	18
2.2.2. Çoklu doğrusal regresyon modeli .....	22
BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	26
3.1. Giriş .....	26
3.2. Deney Düzenegi.....	27
3.3. Deneylerin Yapılışı.....	33
3.4. Deney Sonuçları.....	36

BÖLÜM 4. SÜZDÜRME ÇUBUĞU FRENLEME KUVVETİNİN MODELLENMESİ .....	41
4.1. Giriş .....	41
4.2. Eğri Uydurma ile Modelleme .....	42
4.2.1. 0,8 mm sac kalınlığı ve 3mm süzdürme çubuk yarıçapı için polinom model .....	44
4.2.2. 1,0 mm sac kalınlığı ve 3mm süzdürme çubuk yarıçapı için polinom model .....	44
4.2.3. 1,2 mm sac kalınlığı ve 3mm süzdürme çubuk yarıçapı için polinom model .....	45
4.3. Regresyon Model.....	48
4.3.1. Doğrusal regresyon model .....	48
4.3.2. İkinci dereceden regresyon model .....	50
4.3.3. Etkileşimli regresyon model .....	52
4.3.4. İkinci dereceden etkileşimli regresyon model .....	54
 BÖLÜM 5. SONUÇLAR, TARTIŞMALAR ve ÖNERİLER .....	 58
 KAYNAKLAR.....	 60
ÖZGEÇMİŞ.....	64

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

B	: Süzdürme çubuğu batma miktarı
c	: Süzdürme çubuğu ile kanal arasındaki boşluk
DP600	: Çift fazlı çelik
$F_{\text{daire}}$	: Yarım daire kesitli süzdürme çubuğu
$F_{\text{dikd}}$	: Dikdörtgen kesitli süzdürme çubuğu
$F_{\text{köş}}$	: Köşe kenar kesitli süzdürme çubuğu
$F_{\text{de}}$	: Deney sonucu ölçülen frenleme kuvveti
$F_{\text{fk}}$	: Kalıp seti frenleme kuvveti
$F_{\text{p}}$	: Pot çemberi baskı kuvveti
$F_{\text{scfk}}$	: Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti
$F_{\text{de}}$	: Deney sonucunda ölçülen frenleme kuvveti
FE	: Sonlu elemanlar (Finite element)
FLD	: Şekillendirme sınır diyagramı (Forming limit diagram)
ŞSD	: Şekillendirme sınır diyagramı
HKT	: Hataların kareleri toplamı
k	: Değişken parametre sayısı
K	: Sac kalınlığı
K	: Pekleşme katsayısı
n	: Örnek sayısı
n	: Pekleşme üssü
r	: Süzdürme çubuğu giriş-çıkış yarıçapı
R	: Süzdürme çubuğu yarıçapı
$R^2$	: Korelasyon katsayısı
RMSE	: Hataların kareleri ortalamasının karekökü
RSM	: Cevap yüzey metodu
SÇ	: Süzdürme çubuğu
SÇBM	: Süzdürme çubuğu batma miktarı

SÇFK	: Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti
SE	: Sonlu elemanlar
SSE	: Hataların kareleri toplamı
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
Y	: Süzdürme çubuğu yarıçapı
t	: Sac kalınlığı
$\mu_k$	: Kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayısı
$\beta_{0,1,\dots}$	: Regresyon parametreleri
$\varepsilon$	: Hata değişim değeri
$\sigma_y$	: Akma gerilmesi
$\sigma_u$	: Kopma gerilmesi
$\varepsilon_{min}$	: Toplam Uzama
$\varepsilon_{max}$	: % uzama
$r_{90}^{\circ}_{min}$	: Anizotropi faktörü
$n_{90}^{\circ}_{min}$	: Pekleşme üssü
$x_{1,2,\dots}$	: Regresyon değişkenleri

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Sac metal şekillendirmede en sık rastlanan kusurlar (a) yırtılma, (b) buruşma, (c) geri esneme [3] .....	2
Şekil 1.2.	Süzdürme Çubuğu üzerinden akan sac üzerine etkiyen kuvvetler [4] .....	3
Şekil 1.3.	Sac şekillendirme kalıplarında kullanılan süzdürme çubuğunun şematik gösterimi [5].....	4
Şekil 1.4.	Süzdürme çubuğu tipleri [7].....	4
Şekil 1.5.	Süzdürme çubuğu ve kanalında oluşan bükme ve doğrulma işlemleri [8]. .....	5
Şekil 1.6.	Süzdürme çubuğunun kullanıldığı ve kullanılmadığı durumların karşılaştırılması [6].....	8
Şekil 2.1.	Doğrusal regresyon.....	17
Şekil 2.2.	Doğrusal ilişkinin grafik gösterimi [37].....	19
Şekil 2.3.	Üç regresyon katsayısına sahip çoklu regresyon modelinin grafik gösterimi [37] .....	23
Şekil 3.1.	Süzdürme çubuğu ve sac üzerine etkiyen kuvvetlerin şematik gösterimi .....	25
Şekil 3.2.	Modernize edilmiş 40 tonluk atölye tipi pres .....	26
Şekil 3.3.	Modernize edilmiş 40 tonluk atölye tipi pres .....	27
Şekil 3.4.	Pres üzerine monte edilen kalıp seti ve donanımların şematik gösterimi .....	28
Şekil 3.5.	Pres alt tablasına yerleştirilen kalıp seti .....	28
Şekil 3.6.	Measurement Computing firmasının üretmiş olduğu veri toplama cihazı.....	29
Şekil 3.7.	Veri toplama amacıyla kullanılan DASYLAB programı .....	30
Şekil 3.8.	Deneylerde kullanılan pot çemberi, süzdürme çubukları ile giriş çıkış yarıçap parçaları.....	30
Şekil 3.9.	Deneylerde kullanılan ölçülerin şematik gösterimi .....	31



Şekil 3.10.	Sac levhanın kalıp seti içindeki hareketinin şematik gösterimi .....	32
Şekil 3.11.	Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu batma miktarı grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (süzdürme çubuğu yarıçapı 3 mm'dir) .....	35
Şekil 3.12.	Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu batma miktarı grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (süzdürme çubuğu yarıçapı 4 mm'dir) .....	36
Şekil 3.13.	Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu batma miktarı grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (süzdürme çubuğu yarıçapı 5 mm'dir) .....	36
Şekil 3.14.	Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu batma miktarı grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (süzdürme çubuğu yarıçapı 6 mm'dir) .....	37
Şekil 3.15.	Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu yarıçapı grafiğinin batma miktarına göre değişimi (sac kalınlığı 0,8 mm'dir).....	37
Şekil 3.16.	Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu yarıçapı grafiğinin batma miktarına göre değişimi (sac kalınlığı 1,0 mm'dir).....	38
Şekil 3.17.	Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu yarıçapı grafiğinin batma miktarına göre değişimi (sac kalınlığı 1,2 mm'dir).....	38
Şekil 4.1.	3 mm yarıçapında süzdürme çubuğundan geçen 0,8 mm sac kalınlığındaki sac levha için SÇBM'ye bağlı (a) deneysel SÇFK değerleri ile kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata .....	43
Şekil 4.2.	3 mm yarıçapında süzdürme çubuğundan geçen 1,0 mm sac kalınlığındaki sac levha için SÇBM'ye bağlı (a) deneysel SÇFK değerleri ile kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata .....	44
Şekil 4.3.	3 mm yarıçapında süzdürme çubuğundan geçen 1,0 mm sac kalınlığındaki sac levha için SÇBM'ye bağlı (a) deneysel SÇFK değerleri ile kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve	45

	model sonuçları arasındaki hata .....	
Şekil 4.4.	Doğrusal regresyon model ve deneysel SÇFK değerleri.....	48
Şekil 4.5.	Doğrusal regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası.....	48
Şekil 4.6.	İkinci dereceden regresyon model ve deneysel SÇFK değerleri.....	50
Şekil 4.7.	İkinci dereceden regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası.....	51
Şekil 4.8.	Etkileşimli regresyon model ve deneysel SÇFK değerleri.....	52
Şekil 4.9.	Etkileşimli regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası.....	53
Şekil 4.10.	İkinci dereceden Etkileşimli regresyon model ve deneysel SÇFK değerleri.....	54
Şekil 4.11.	İkinci dereceden etkileşimli regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası .....	55

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki çeşitli ilişkiler .....	17
Tablo 3.1.	Deneyle sırasında kullanılan ölçüler .....	31
Tablo 3.2.	Deneylede kullanılan DP 600 sac malzemenin özellikleri [41]......	32
Tablo 3.3.	Süzdürme çubuğu kullanılmadan kalıp setinden ölçülen frenleme kuvvetleri.....	33
Tablo 3.4.	Her bir sac levha için elde edilen sürtünme katsayıları.....	34
Tablo 4.1.	Model girişleri .....	40
Tablo 4.2.	SÇFK'yı kestirmek için oluşturulan polinom modellerin performansına ait veriler .....	46
Tablo 4.3.	Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması .....	49
Tablo 4.4.	Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması .....	51
Tablo 4.5.	Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması .....	53
Tablo 4.6.	Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması .....	55
Tablo 4.7.	Oluşturulan regresyon modelleri için hesaplanan $R^2$ ve RMSE değerleri.....	56

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Sac Metal Şekillendirme, Süzdürme Çubuğu, Matematik Model

Sac metal şekillendirme prosesi, elektronik, otomotiv, havacılık ve uzay endüstrileri gibi birçok endüstriyel alanın belkemiğidir. Endüstriyel alanda meydana gelen gelişmelerle beraber sac metal parçaların boyutsal tamlığı, yüzey kalitesi ve şekil karmaşıklığı gibi gereksinimleri giderek daha çok önem arz etmekte ve araştırılmaktadır. [1]

Pres operasyonları için aranan mekanik özellikleri sağlayan uygun sac malzemeler seçilmiş olsa bile, şekillendirme esnasında sorunlarla karşılaşmaya devam edilmektedir. Buruşma, yırtılma ve geri esneme gibi kusurlar sac şekillendirme sırasında oluşan en bilindik kusurlardır. Bu gibi kusurlara genellikle sacın kalıp boşluğuna kontrolsüz ve istenmeyen bir oranda akışı neden olmaktadır. Sac malzemede şekillendirme esnasında oluşacak kusurları engellemek veya minimuma indirmek için malzeme akışını düzenleyen pot çemberi baskı kuvveti ve süzdürme çubuğu gibi kontrol mekanizmaları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada son yıllarda otomotiv endüstrisinde yüksek mukavemet ve iyi şekillendirilebilirlik özelliklerinden dolayı kullanımında hızlı bir artış gösteren iki fazlı çeliklerden olan DP600 kullanılmıştır. Simulasyon yapılarak oluşturulan bir şekillendirme işleminden elde edilen frenleme kuvvetini deneme yanılma yoluna başvurmadan bulan matematiksel modeller oluşturmak amacıyla 40 tonluk atölye tipi hidrolik bir pres modernize edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini kestirmek için sac kalınlığı ile süzdürme çubuğu yarıçapı ve batma miktarına bağlı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Matematiksel modelin sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine ait kestirimler deney sonuçları ile oldukça iyi uyum göstermiştir.

# **MODELING OF DRAWBEAD USED IN SHEET METAL FORMING PROCESS.**

## **SUMMARY**

Keywords: Sheet Metal Forming, Drawbead, Mathematical Model

Sheet metal shaping process is the basis of many industrial fields such as electronics, automotive, aviation and space. Together with the industrial developments the requirements of sheet metal parts such as dimensional preciseness, surface quality and shape complexity become more important day by day and they are being researched.

Even if the suitable sheet materials fulfilling the required mechanical properties for forming operations are selected, problems are still being faced after forming. Wrinkle, tearing and springback are most well-known defects during sheet metal forming. The reason of these defects is the uncontrolled flow of sheet to the die cavity at an undesired ratio. In order to avoid or minimize the defects that may occur during forming of sheet material, control mechanisms such as blank holder force and drawbead that regulate the material flow are used.

In this study, dual phase DP600 steel which is being used more and more in automotive industry in recent years due to high resistance and good formability properties. For the experiments, a hydraulic press with a capacity of 40tons is modernized. By using the obtained data, a mathematical model is developed in order to prediction the drawbead restraining force, radius of drawbead and amount of penetration. The results of the mathematical model and the experiment results are compared and the estimations regarding the drawbead restraining force are found to be in very good accordance with experiment results.

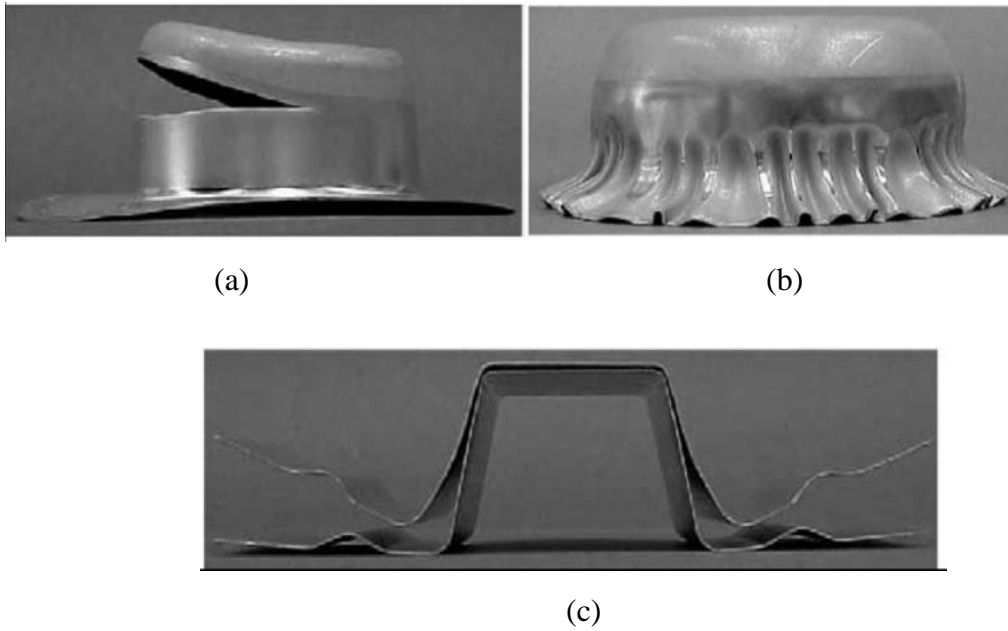
## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

İnsanoğlu yaratılışından bu yana hayatını kolaylaştırmak için taş, metal, ahşap gibi çok çeşitli malzemelere şekiller vererek alet, ekipman ve makinalar yapmıştır. Malzemelerin özelliğine göre, şekillendirme yöntemi uygulanmış yani; taş yontulmuş, demir dövülmüş ve ahşap yontularak şekillendirilmiştir.

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte ekipman ve malzeme türlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Ancak bu ihtiyaçlar yine temelde dökme, birleştirme, talaşlı imalat ile dövme, eğme, bükme, çekme gibi plastik şekil verme metotları ile karşılanmıştır. Mühendislik malzemeleri olarak adlandırılan metal veya metal dışı tüm malzemeler döküm, kaynak, talaşlı veya talaşsız şekillendirme yöntemlerinden biri veya bir kaçının birden uygulanması ile ürün haline dönüşürler veya bu ürünlerin bir araya getirilmesiyle bir sistem veya makine üretilir [2].

Montajda ve nihai ürün performansında oluşacak problemlerden kaçınmak için şekillendirilen parçanın kalitesi önemlidir. Sac, plastik deformasyona uğrayarak şekillenmektedir. Sac levhaların şekillendirilmesi sırasında sac kalınlığında istenenden daha farklı bir değişim olursa sacda buruşmalar ya da yırtılmalar görülmektedir. Başarılı olarak yapılmış bir şekillendirme işleminden sonra karşılaşılan diğer bir problem ise; şekillendirilmiş parça geometrisi üzerinde bulunan elastik yer değişimlerin, şekillendirmeyi sağlayan yüklemenin kaldırılması ile parçanın şekillendirme yönünün aksine yer değişimi göstermesidir. Geri esneme olarak adlandırılan bu durum, sac parçaların şekillendirme işleminin ardından oluşan, çoğu zaman istenmeyen ya da oluşması halinde değerinin bilinmesi istenen bir problemdir.

Buruşma, yırtılma, aşırı incelme, yüzey bozunması ve geri esneme gibi kusurlar sac malzemede şekillendirme esnasında oluşan en sık rastlanan kusurlardandır (Şekil 1.1). Bu tür kusurlar genellikle sac malzemenin kalıp boşluğuna kontrolsüz ve istenmeyen oranda akışından dolayı meydana gelmektedir. Değişken pot çemberi kuvveti uygulaması ve kalıp ile sac yüzey arasındaki sürtünmenin azaltılması gibi bir dizi yöntem sac malzemenin kalıp boşluğuna akışını kontrol etmede kullanılabilir. Ancak günümüz imalat sanayinde kullanılan preslerin bu tür uygulamalarda kullanılabilmesi için büyük maliyet gerektiren modernizasyon ihtiyaçları bulunmaktadır. Günümüz rekabetçi ortamında üreticiler, bu tür büyük maliyetli yatırımlar yerine daha düşük maliyetli ve modüler çözümler üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bu ihtiyaçlar ışığında kalıp boşluğu içine akan sac malzemenin kontrolü veya belirli bölgelerde düzenlenmesi amacıyla süzdürme çubuğu gibi kontrol mekanizmalarının kullanılması fikri ortaya çıkmıştır. [3].



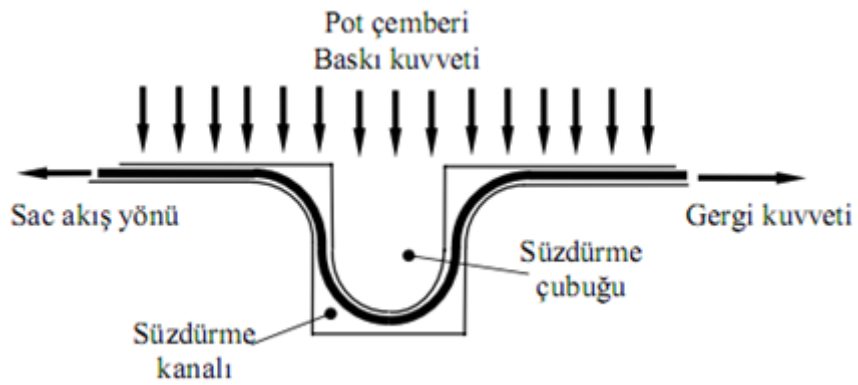
Şekil 1.1. Sac metal şekillendirmede en sık rastlanan kusurlar (a) yırtılma, (b) buruşma, (c) geri esneme [3]

### 1.1. Süzdürme Çubuğu ve Kanalı

Sac metal şekillendirmede kırışma ve yırtılma problemlerinin çözümü için sacın dışı kalıp boşluğundaki akışı iyi olmalıdır. Genellikle çekme işlemi boyunca pot çemberi sac akışını tamamen kontrol etmemektedir. Yüksek germe kuvveti gerektiği

zamanlarda, yüksek pot çemberi kuvvetine ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan bu yüksek pot çemberi kuvveti yerine yerel kontrol mekanizmaları olan süzdürme çubukları kullanılarak istenilen gergi kuvveti sağlanmaktadır. Bu sayede düşük pot çemberi kuvvetleri ile istenilen kalitede ürünler elde edilebilmektedir.

Bölgesel gergi kuvveti elde etmek için kullanılan süzdürme çubukları temelde iki parçadan oluşmaktadır. Bunlar sacın kontrollü akışını sağlayan süzdürme çubuğu ve süzdürme kanalı olarak tanımlanabilir [4].

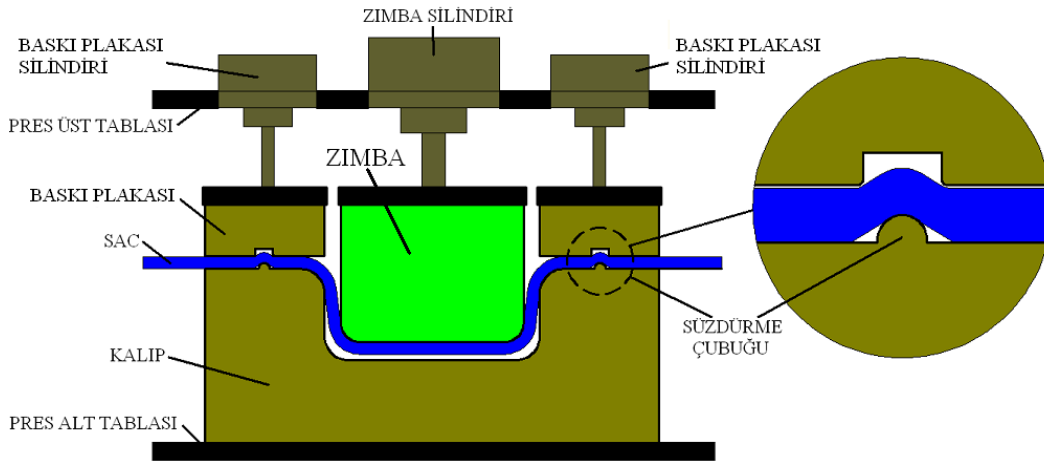


Şekil 1.2. Süzdürme Çubuğu üzerinden akan sac üzerine etkiyen kuvvetler [4]

Sac malzemenin süzdürme çubuğundan geçişi sırasında malzeme üzerine, sac akış yönüne dik yönlü pot çemberi baskı kuvveti ile sac akışına zıt yönlü sürtünme kuvveti ve süzdürme çubuğundan kaynaklı gergi kuvveti etki etmektedir (Şekil 1.2). Sac üzerine etkiyen bu gergi kuvveti her zaman çekme yönüne zıt yönlü ve saca teğet olmaktadır.

Şekil 1.3'de sac şekillendirme kalıbı ile süzdürme çubuğu ve kanalının şematik gösterimi görülmektedir.

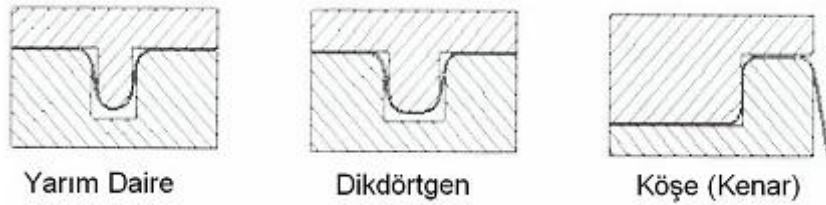




Şekil 1.3. Sac şekillendirme kalıplarında kullanılan süzdürme çubuğunun şematik gösterimi [5]

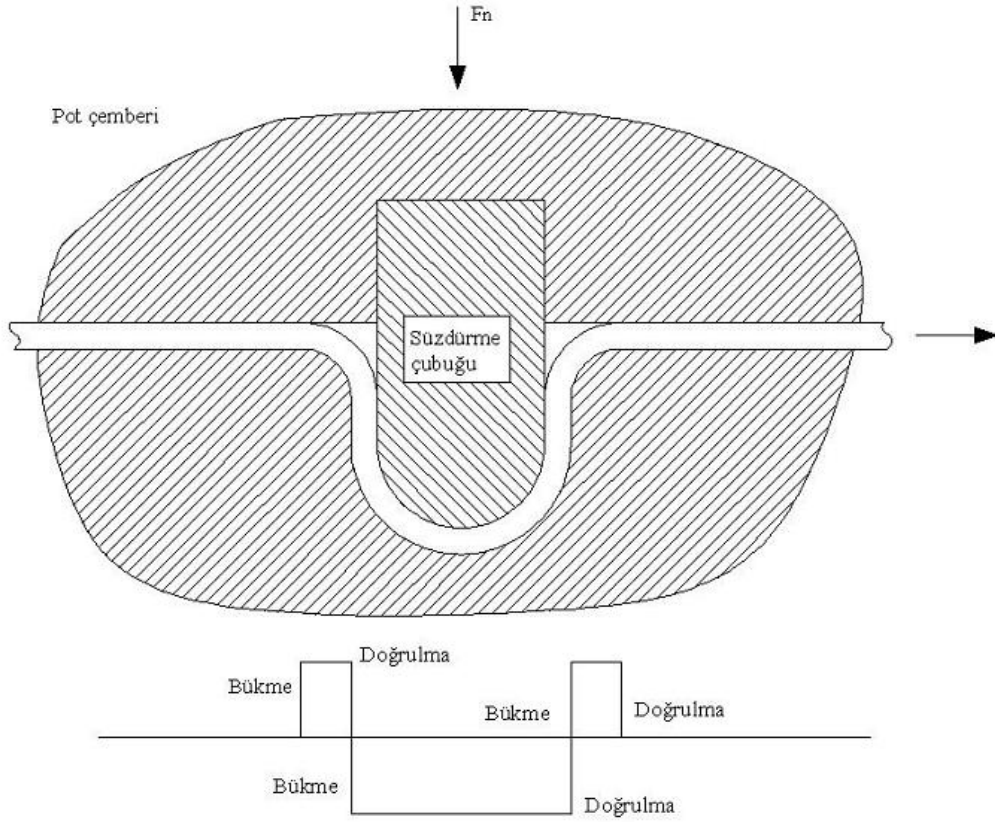
Şekillendirme esnasında kullanılan süzdürme çubukları kalıp geometrisi ve istenilen gergi kuvvetine bağlı olarak farklı tiplerde üretilmektedirler.

Temelde süzdürme çubukları kesit geometrisine göre yarım daire, dikdörtgen ve köşe (kenar) formolu olmak üzere 3 tipte üretilmektedir [6]. Şekil 1.4'te bu süzdürme çubukları görülmektedir.



Şekil 1.4. Süzdürme çubuğu tipleri [7].

Sac malzeme, süzdürme çubuğu üzerinden akışı esnasında ilk olarak bir yönde bükülür sonra ters yönde doğrulur [8].



Şekil 1.5. Süzdürme çubuğu ve kanalında oluşan bükme ve doğrulma işlemleri [8].

Süzdürme çubuğu malzeme üzerinde çekilme yönüne ters yönde sabit bir gerilme kuvvetini, sacı bir dizi bükme ve doğrultma deformasyonuna zorlayarak üretir. Bu bükme doğrultma deformasyonları süzdürme çubuğunun tipine göre değişiklik göstermektedir.

Yarım daire formdaki süzdürme çubuğunda sac 3 kez bükme 3 kez doğrulma işlemine maruz kalır, yani 3 çevrim gerçekleşir. Form kalıplarında en çok kullanılan süzdürme çubuğu tipi yarım daire form tipidir.

Dikdörtgen formda malzeme 4 kez bükme 4 kez doğrulma işlemlerine maruz kalır, yani 4 çevrim gerçekleşir. Dikdörtgen formdaki süzdürme çubuğu yağlamaya karşı duyarsızdır ve en fazla gerilme kuvvetini oluşturan süzdürme çubuğu tipidir.

Köşe kenar formda bükme açısı  $90^\circ$  olduğu ve çubuk ile kanal arası yatay uzaklık sac

kalınlığına eşit olduğu zaman sacda 2 bükme 2 doğrulma işlemi gerçekleşir. Köşe form dışı kalıbın köşesine uygulanabilir ve böylece malzeme kaybı en aza indirilebilir [8].

Üretilen gergi kuvvetine göre süzdürme çubuğu ve kanalı tiplerinin sıralaması

$$F_{\text{dik}} > F_{\text{daire}} > F_{\text{köş}} \quad (1.1)$$

şekline yapılabilir.

Form verme işleminde sacın süzdürme çubuğundan akışı esnasında meydana gelen bükme–doğrulma çevriminden ve pot çemberinin saca uyguladığı normal kuvvetten dolayı sac ile kalıp elemanları arasında meydana gelen sürtünme kuvvetleri ile oluşan gergi kuvveti çeşitli faktörlere bağlıdır [9].

Gergi kuvvetine etki eden faktörler

#### 1. Süzdürme çubuğu geometrisi

- a) Kesit şekillerine göre süzdürme çubuğu
- b) Çubuk geçişi
- c) Bükme açısı
- d) Çubuk yarıçapı
- e) Kanal yarıçapı
- f) Çubuk ile kanal arasındaki yatay uzaklık (Kanal boşluğu)
- g) Çubuk ile kanal arasındaki dikey uzaklık (Batma miktarı)

#### 2. Malzeme özellikleri

#### 3. Sac kalınlığı

#### 4. Kalıp elemanları ve sac arasındaki sürtünme durumu

Bu faktörler incelendiğinde,

- Sacın çubuk üzerinden geçiş boyu ve bükme açısı arttığı zaman gergi kuvvetinin arttığı
- Çubuk ve kanal yarıçapları azaldığı zaman gergi kuvvetinin arttığı

- Çubuk ile kanal arasındaki yatay ve dikey uzaklığın azalması ile gergi kuvvetinin arttığı
- Malzeme özellikleri ve sac kalınlığı arttıkça gergi kuvvetinin arttığı
- Kalıp elemanları arasındaki sürtünmenin artması ile gergi kuvvetinin arttığı görülmektedir [6-11].

## **1.2. Süzdürme Çubuğu Konumunun Belirlenmesi**

Süzdürme çubuğu ve kanalının konumu ile ihtiyaç duyulan gergi kuvvetine genellikle Sonlu Elemanlar (SE) hesaplaması yapılarak karar verilir.

Şekil 1.6'da süzdürme çubuklu ve çubuksuz iki durum karşılaştırılmıştır. Süzdürme çubuğunun kullanılmadığı durumda üç tane farklı kusur ortaya çıkmaktadır..

A bölgesinde yeteri kadar gerinme olmadığı için malzeme hızlı hareket etmiş ve kesme hattına yaklaşmıştır.

B bölgesinde erkek kalıp ve dişi kalıp arasında sıkışan sacda yeteri kadar gergi kuvveti oluşmadığı için kırışmalar meydana gelmiştir.

C bölgesinde artık gerilmeler oluşmadığı için parçada dağınık malzeme bölgeleri oluşmuştur.

Bu kusurlar Şekil 1.6'da gösterilen süzdürme çubuklarının kalıba yerleştirilmesi ile ortadan kaldırılabilir [11].



Şekil 1.6. Süzdürme çubuğunun kullanıldığı ve kullanılmadığı durumların karşılaştırılması [6]

### 1.3. Literatür Araştırması

Literatürde sac üzerine etkiyen gergi kuvvetinin belirli bölgelerde kontrol edilmesi amacıyla kullanılan süzdürme çubukları ilgili farklı yaklaşımlarda bulunulmuştur.

Tiryaki [5], kalıp boşluğu içine akan sac malzemenin kontrolü için kullanılan süzdürme çubuğunun oluşturduğu frenleme kuvvetini kestirmek için bir matematiksel model geliştirmiştir. Modelde sac malzeme özellikleri, sac kalınlığı ve süzdürme çubuğunun batma miktarına bağlı süzdürme çubuğu frenleme kuvveti hesaplanabilmektedir. Geliştirilen matematiksel model süzdürme çubuğunu temsil etmek üzere kullanılmış ve sac üzerinde istenen frenleme kuvvetini sağlamak için batma miktarını ayarlayan bir model öngörülü kontrolör geliştirmiştir. Model öngörülü kontrolör farklı referanslar altında çalıştırılmış ve elde edilen proses cevabı referansları oldukça yakından kararlı bir şekilde yakalamıştır.

Jansson ve arkadaşları [12], otomotiv sanayinde kullanılan bir sac parçanın şekillendirilebilmesi için gerekli olan optimum süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanarak optimize edebilmek amacıyla cevap yüzey metodu (response surface methodology-RSM) ve uzay dönüşümü (space mapping) yöntemi kullanmışlardır. Aynı şekilde SEY kullanarak elde edilen optimum frenleme kuvveti için gerekli olan süzdürme çubuğu geometrisini

hesaplamışlardır. Çalışmanın sonucunda uzay dönüşümü metodunun daha etkili ve doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca bu metot RSM ile karşılaştırıldığında hesaplama süresini oldukça azalttığı görülmüştür.

Courvoisier ve arkadaşları [13], süzdürme çubuğu boyunca akan sac metalin bükme-germe işlemini açıklamak için bir analitik model geliştirmiştir. Malzemenin elastik-plastik olduğunu varsayarak izotropik yada non-lineer kinematik pekleşme yaklaşımını dikkate almışlar ve sacın ilk boyunun geometrik değişimini Love-Kirchhoff yaklaşımı ile tanımlamışlardır. Sonuçları sonlu elemanlar benzetiminin kestirimleri ve daha önce yapılan çalışmalardaki deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlar ve oldukça iyi uyum elde etmişlerdir.

Samuel [14], genişlik boyunca düzlem gerinime konu olan sac metali şekillendirmek için gereken çekme kuvveti, kesme kuvveti ve bükme momentini belirlemek için bir sayısal modeli tasarlamıştır. Model sac metal şekillendirmede süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini ve pot çemberi baskı kuvvetini doğru olarak kestirmiş ve süzdürme çubuğu geometrisi ve sürtünmeden oldukça fazla etkilenmiştir. Kare dişi süzdürme çubuğunun üst ve alt yüzeylerindeki total eşdeğer plastik gerinme ve Von Mises gerilmelerinin dairesel dişi süzdürme çubuğundakinden daha yüksek olduğu sonucuna varmıştır.

Keum ve arkadaşları [15], sac metal şekillendirme prosesini geliştirmek için SEY kullanmışlardır. Uzman bir süzdürme çubuğu modeli kurarak süzdürme çubuğu karakteristiklerini hesaplamak amacıyla dairesel, kademeli ve kare süzdürme çubuklarını farklı ölçülerde hazırlamışlardır. Hazırladıkları bu süzdürme çubuklarındaki ölçüleri kullanarak bükme teorisi, kayış-kasnak denklemi ve Coulomb sürtünme yasasından elde ettikleri verilerle matematik bir model kurmuşlardır. Süzdürme çubukları kullanılarak yapılan çekme test sonuçları ile matematik model arasındaki çekme karakteristikleri farklarını azaltmak için çoklu lineer regresyon modeli kurarak, temel süzdürme çubuklarının uzman modele dayanan bir matematik modelini oluşturmuşlardır. Geliştirilen uzman modeli doğrulamak için, süzdürme çubuğu frenleme kuvveti hesaplanarak deneysel verilerle

karşılaştırılmış ve uzman modelin kestiriminin deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Keum ve Ghoo [16], SEY'i kullanarak hazırladıkları şekillendirme prosesinden elde ettikleri verileri kullanarak süzdürme çubuğunun çekme karakteristiklerinden uzman bir model oluşturmuşlardır. Çeşitli süzdürme çubukları ve saclar kullanarak yaptıkları sürtünme testleri ve oluşturulan uzman model ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Geliştirilen uzman modeli doğrulamak için, süzdürme çubuğu frenleme kuvveti deneysel verilerle karşılaştırılmış ve uzman modelin kestirimi deneysel verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Kim ve arkadaşları [17], sac şekillendirme işleminde, malzemenin kalıp boşluğuna akışını ve nihai ürün kalitesini proseste süzdürme çubuğu kullanarak kontrol etmişlerdir. Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin (SÇFK) kestirimi için dairesel süzdürme çubuğunun yüksekliği, omuz yarıçapı ve sac kalınlığı parametleriyle Box-Behnken tasarım modeli kullanılarak bir simülasyon geliştirmişlerdir. İkinci dereceden regresyon denklemi elde ederek her bir dizayn durumundan yaklaşık olarak SÇFK değeri elde etmişler ve kalıp tasarımını SÇFK tahmini değeri ile yapmışlar ve deneme safhasında ürün geliştirme maliyetlerinin etkin olarak azaltılabileceğini incelemişlerdir.

Wei ve Yuying [18], SEY ve optimizasyon tekniğini birleştirerek çok amaçlı problemleri tek amaçlı probleme dönüştürmüşler ve sac metal şekillendirmenin en uygun proses parametrelerini bulmuşlardır. Kırılma, kırışma, yetersiz uzama ve sac kalınlığındaki problemleri aynı anda azaltmak için pot çemberi kuvveti ve SÇFK'yı optimize etmişlerdir. Bu optimizasyonu Latin Hipercube dizayn, response surface model ve artan sonlu elemanlar analizi programı kullanarak yapmışlardır. Örnek çalışma olarak yaptıkları otomobil gövde paneli şekillendirme prosesi göstermiştir ki bu prosedür yaklaşımı geleneksel sonlu elemanlar yöntemi ve deneme yanılma yönteminden daha etkili ve kesin sonuçlar vermiştir.

Fırat ve arkadaşları [19], çift fazlı çelik olan DP600 ve DC06 kalitesindeki sacların çekme karakteristiklerini dairesel süzdürme çubuğu kullanarak oluşturdukları şerit

çekme test cihazıyla belirlemişlerdir. Bu iki sac arasındaki çekme karakteristikleri farkları süzdürme çubuğu kuvvet parametrelerinde önemli farklılıklar yarattığını gözlemlemişlerdir. Her iki metalde de süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ve sactaki incelleme deformasyonu üzerinde çubuk batma derinliği, sacı tutan çenenin sıkma kuvveti ve metalin akma gerilmesinin baskın bir faktör olduğunu deneysel dotalar ile incelemiştir. Her iki çeliğin deneysel analiz sonuçlarının girdi eğrisi olarak FE proses simülasyonundaki eşdeğer süzdürme çubuğu modelini kullanabilecekleri bir model geliştirmişlerdir.

Shuhui ve arkadaşları [20], gerçek süzdürme çubuğunun formu yerine kullanmak için geliştirilen bir eşdeğer süzdürme çubuğu matematik modeli geliştirmişlerdir. Optimum süzdürme çubuğu frenleme kuvveti dağılımını belirlemek için derin çekme prosesinin 3 boyutlu sonlu elemanlar analizini oluşturmuşlardır. Süzdürme çubuğu geometrisinin optimum tasarımını, analiz sonucu elde edilen optimum frenleme kuvvetiyle geliştirilen eşdeğer süzdürme çubuğu modelinde kullanarak nonlinear sınırlı optimizasyon vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyondan elde ettikleri geometri parametreleri kullanılarak hazırlanan kalıplarda şekillendirilen panellerin başarılı olduğu görülmüş ve sonlu elemanlar ile optimizasyon metodunun birlikte kullanımının kalıp tasarımı ve proses planlamada etkili olabileceği sonucuna varmışlardır.

Chen ve Liu [21], çekme prosesinde 3-boyutlu sonlu elemanlar analizini kolaylaştırmak için gerçek süzdürme çubuğundan elde edilen frenleme etkilerinin benzetimi için bir eşdeğer süzdürme çubuğu modeli seçtikleri çalışmada, ilk olarak gerçek süzdürme çubuğuna uygulanan frenleme kuvvetini sonlu elemanlar analizi ile hesaplamışlardır. Hesaplanan frenleme kuvvetini, daha önceki yayınlarda bulunan teorik kestirimler deneysel verilerle doğrulamışlardır.

Li ve Weinmann [22], özellikle simetrik olmayan panel şekillendirmede, alüminyumun şekillendirilebilirliğini iyileştirebilmek için süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini dikkate alarak üç boyutlu ve zamana bağlı sonlu elemanlar modelini geliştirmişlerdir. Deney sonuçları ile model sonuçlarını karşılaştırarak panel üzerindeki gerilim dağılımı kestirimlerinin mükemmel uyum sağladığını



göstermişlerdir. Ayrıca Şekillendirme Sınır Diyagramı (FLD-Forming Limit Diagram) analizi, hareketli süzdürme çubuğu fikrinin Al 6111-T4 malzemesinin şekillendirilmesinde faydalı olduğunu göstermiştir.

Sheriff ve İsmail [23], dikdörtgen şekilli bir süzdürme çubuğunun konumunu optimize etmek için sonlu elemanlar metodu kullanarak süzdürme çubuğu ile kap çekme prosesinde gerinim ve kalınlık dağılımlarını analiz etmişlerdir. Benzetim çalışmalarını süzdürme çubuğunun tüm olası konumları için gerçekleştirmişler ve en büyük asal gerinimi veren konumu optimize edilen yer olarak almışlardır. Sonuçlar incelendiğinde sayısal metot sonuçları ile deneyler arasında iyi uyum olduğu görülmüştür.

Li ve arkadaşları [24], sac metal şekillendirme prosesini optimize etmek için hareketli süzdürme çubuğu kullanılan deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Optimal bir süzdürme çubuğu yörünge şeması belirlemek için oval Al 6111-T4 panelleri çekerek süzdürme çubuğu yörüngeleri elde etmişlerdir. Kullanılan sabit süzdürme çubukları hareketli süzdürme çubukları ile değiştirildiğinde çekme derinliğinin % 57'ye kadar arttırılabildiği görülmüştür. Hareketli süzdürme çubuklarının geleneksel düz pot çemberi ve sabit süzdürme çubuğu kullanarak şekillendirme ile karşılaştırıldığında Al 6111-T4'ün şekillendirilebilirliğinde iyileşme sağladığı sonucuna varmışlardır.

Fırat [25], kare tip bir süzdürme çubuğu kullanarak otomotiv saclarındaki frenleme kuvveti ve inceme özelliklerinin kestirimi için bir analitik model geliştirmiştir. Modeli kullanarak kare tip bir süzdürme çubuğu ile üç otomotiv sacının süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ve süzdürme çubuğu sac çıkış kalınlığını hesaplamıştır. Farklı batma seviyeleri için geleneksel çekme kalitesindeki ve yüksek dirençli çelik tiplerine ait elde ettiği kuvvet kestirimlerinin deneysel veriler ile karşılaştırıldığında sonuçların birbiri ile örtüştüğü görülmüştür. Bununla birlikte, dual-faz çelikler için hesaplamalar ve deneysel sonuçları arasında farklılıklar bulmuştur. Kestirilen sac çıkış kalınlığı ile ilgili olarak, tüm çelikler için süzdürme çubuğunun orta yükseklikteki batma aralığına kadar olan deneylerde oldukça iyi bir korelasyon elde ederken yüksek batma seviyeleri için modelin zayıf olduğunu gözlemlenmiştir.

Larsson [26], sac metal şekillendirme simülasyonunda, süzdürme çubuklarının modellemeye etkilerini anlamak için bir sonlu elemanlar modeli geliştirerek eleman büyüklüğü, birleşme noktası sayısı, malzeme pekleşmesi gibi çeşitli modelleme durumlarıyla sürtünme ve kalıp geometrisi gibi bazı proses parametrelerini incelemiştir. Süzdürme çubuğu tarafından oluşturulan frenleme kuvvetinin bükme davranışına, sürtünme özelliklerinden çok daha etkili olduğu ve süzdürme çubuğu yarıçapı ve dalma genişliğinin değişiminin hem kaldırma kuvveti hem de frenleme kuvvetinde büyük farklılık yarattığı sonucuna varmıştır.

Oliveira ve arkadaşları [27], yumuşak çelik AKDQ-HDG, yüksek dirençli çelik HSLA-HDG, dual-faz çelik DP600-HDG ve alüminyum alaşımı AA6022-T43 olmak üzere dört farklı çelik malzemeyi aynı çekme kalıbında, süzdürme çubuğu batma seviyelerini %25, %50 ve %100 olarak şekillendirmiştir. Bu deneysel sonuçlar ile sayısal benzetimden elde ettikleri verileri karşılaştırmışlar ve deneysel sonuçlarda süzdürme çubuğu dalma miktarındaki artışın geri esneme genel bir azalmaya sebep olduğu görülmüştür.

Gavas ve İzçiler [28], sac malzemenin kalıp boşluğu içine kontrollü bir şekilde akabilmesi için pot çemberi üzerine spiral yay eklemiştir. Bu yöntem ile kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünme alanı azaltılmış ayrıca spiral yayların arasına yağ akıtılarak sac malzemenin daha homojen bir şekilde yağlanması sağlanmıştır.

Yang ve arkadaşları [29], sac metal şekillendirmenin 2D elasto-plastik benzetimi için geliştirilen bir kapalı çözüm (implicit) sonlu elemanlar yazılımı ile dairesel ve dikdörtgen şekilli süzdürme çubuğuna sahip çekme prosesinin benzetimini yapmışlardır. Süzdürme çubuğu geometrik parametrelerinin, pot çemberinin sac üzerine uyguladığı baskı kuvvetine ve süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine etkisini inceleyerek etkisi büyük olan geometrik parametrelerin; süzdürme çubuğu yüksekliği, süzdürme çubuğu yarıçapı, omuz yarıçapı ve süzdürme çubuğu şekli (dairese, dikdörtgen) olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca benzetim ile hesaplanan sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmışlar ve iyi bir uyum elde etmişlerdir.

Ingarao ve Lorenzo [30], sac şekillendirme prosesinde pot çemberi ile birlikte süzdürme çubuğunu kullanarak, sac üzerinde meydana gelen frenleme kuvvetinin malzemedeki incelmeye ve şekillendirme sonrasında ortaya çıkan geri esneyeme etkisini incelemiştir.

Çiçek [31], süzdürme çubuklarının sac şekillendirme üzerindeki etkilerini incelemiştir. Süzdürme çubuğu kuvvetlerinin belirlenmesinde 3B düzlem gerilme ve 2B düzlem şekil değiştirme sonlu elemanlar sayısal modellerini oluşturmuştur. Çözüm süresini ve optimizasyon çevrimini azaltmak amacıyla gerçek süzdürme çubuklarının yerine eşdeğer süzdürme çubuğu modeli kullanmıştır. Analitik ve sayısal sonuçları literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Süzdürme çubuğu kullanımının metal şekillendirmeye etkisi ile eşdeğer süzdürme çubuğu modelinin doğruluk derecesini iki ayrı sonlu elemanlar uygulamasıyla göstermiştir.

Zhongqin ve arkadaşları [32], panel şekillendirme tasarımında çekme prosesinde üç süzdürme çubuğu geometrisi için nonlinear sonlu elemanlar metodu kullanarak sayısal olarak benzetimini yapmışlar ve üç süzdürme çubuğu geometrisini karşılaştırarak şekillendirme kusurlarından kaçınacak şekilde malzeme akışını kontrol edebilen dikdörtgen ve yarı-dairesel süzdürme çubuğunu içeren geometrileri seçmişlerdir. Seçtikleri geometri ile bagaj kapağının benzetimini yaparak, deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

#### **1.4. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasında, sac metal şekillendirmede karşılaşılan kusurlardan olan kırışma, yırtılma, geri esneme gibi problemleri en aza indirmek yada ortadan kaldırmak için sıklıkla kullanılan süzdürme çubuklarından elde edilen frenleme kuvvetinin kestirimi için bir matematiksel model geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla, değişken olarak kabul edilen sac kalınlığı, süzdürme çubuğu yarıçapı ve batma miktarına bağlı olarak elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin ölçülebildiği bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu düzeneden elde edilen 60 adet veriden 56 tanesinin frenleme kuvvetleri kullanılarak sistem değişkenlerinin giriş ve

frenleme kuvvetinin çıkış olduğu matematiksel bir model geliştirilmiştir. Hazırlanan bu model ile modelin hazırlanışı sırasında kullanılan ve kullanılmayan veriler karşılaştırılarak, modelin sisteme olan uyumluluğu incelenmiştir. Bu model yardımıyla, simülasyon yapılarak oluşturulan bir şekillendirme işleminde kestirilen frenleme kuvvetinin elde edilebilmesi için sac kalınlığı bilinen süzdürme çubuğu yarıçapına bağlı batma miktarının hesaplanabilmesi sağlanacaktır. Bu matematiksel model ile uzun zaman alan deneme-yanılma yoluna veya tekrardan simülasyon yapılması ihtiyacı duyulmadan frenleme kuvveti hesaplanarak hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilmesi sağlanacaktır.

### **1.5. Çalışmanın Ana Hatları**

Tez çalışması 5 ayrı bölümden oluşmaktadır.

Tezin 1. bölümünde konuya giriş yapılarak geçmişten günümüze kadar sac şekillendirme prosesi, pot çemberi ve süzdürme çubukları üzerine yapılmış belli başlı çalışmalar ve bunlardan elde edilen sonuçların özetlendiği literatür araştırması, çalışmanın amacı, içeriği ve önemi anlatılmıştır.

Tezin 2. bölümünde regresyon analizi ve doğrusal regresyon modelleri hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin 3. bölümünde yapılan deneysel çalışma anlatılmış, kullanılan cihazlar, malzemeler ve elde edilen veriler hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Tezin 4. bölümünde sac kalınlığı, süzdürme çubuğu yarıçapı ve süzdürme çubuğu batma miktarına bağlı elde edilen frenleme kuvveti, eğri uydurma ve regresyon model yöntemleri ile modellenerek karşılaştırılmış ve bunların içinde en uygun modele karar verilmiştir.

Tezin 5. bölümünde çalışmanın sonucunda varılan temel sonuçlar paylaşılmış ve bu konuda çalışma yapacak araştırmacılara önerilerde bulunulmuştur.

## BÖLÜM 2. REGRESYON ANALİZİ

### 2.1. Giriş

Regresyon analizinin temelinde gözlenen bir olayın değerlendirilirken, hangi olayların etkisi altında olduğunun araştırılması yatmaktadır. Bu olayların arasındaki kuşkulanan bu ilişkinin nicel verilere dayanması gerekmektedir. Regresyon analizi yapılırken, gözlem değerlerinin ve etkilenilen olayların bir matematiksel gösterimle yani bir fonksiyon yardımıyla ifadesi gerekmektedir. Kurulan bu modele regresyon modeli denilmektedir. Regresyon analizi yapılırken kurulan matematiksel modelde yer alan değişkenler bir bağımlı değişken ve bir veya birden çok bağımsız değişkenden oluşmaktadır. Buradaki mantık eşitliğin solunda yer alan değişkenin sağında yer alan değişkenlerden etkilenmesidir. Sağda yer alan değişkenlerse diğer değişkenlerden etkilenmemektedir. Bağımsız değişkenler kurulacak modelde bir bağımsız değişkenli olarak ele alınır, basit doğrusal regresyon, birden fazla bağımsız değişkenli olarak alınır, çoklu regresyon modeli konusunu oluşturmaktadır [33].

Basit ve çoklu regresyon modelleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [34].

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + e_{ij}$$

Basit doğrusal model

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + e_{ij}$$

Çoklu doğrusal model

$$Y_1, Y_2 = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Çok değişkenli doğrusal model

Burada;

$X_{1,2,\dots,n}$  = Model girişleri

$Y$  = Model çıkışlarını

gösterir.

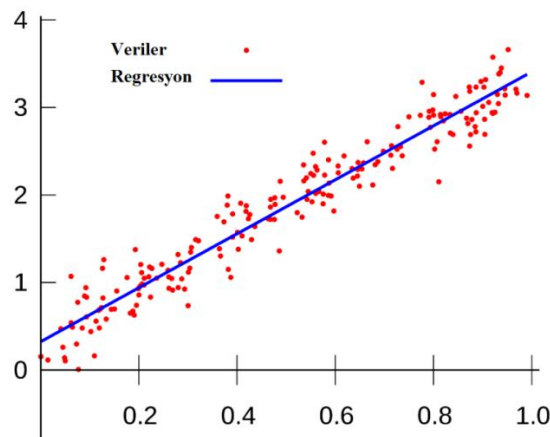
Uygulamada çok karşılaşılan bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişki şekilleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir [35].

Tablo 2.1. Bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki çeşitli ilişkiler

1	Doğru denklemi	$y = a + bx$
2	Parabolik ilişki	$y = a + bx + cx^2$
3	Üssel eğri	$y = ab^x$ veya $\log y = \log a + x \log b$
4	Geometrik eğri	$y = ax^b$ veya $\log y = \log a + b \log x$
5	Hiperbolik ilişki	$\frac{1}{y} = a + bx$ veya $y = \frac{1}{ax + b}$

## 2.2. Doğrusal Regresyon Model

Bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkinin doğrusal bir fonksiyon ile ifade edildiği modeldir. Bağımlı değişkeni (y) kestirmek için tek bağımsız değişken (x) kullanılıyorsa Basit Doğrusal Regresyon Model, bağımlı değişkeni (y) kestirmek için birden fazla bağımsız değişken ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) var ise Çoklu Doğrusal Regresyon Model adı verilmektedir [36].



Şekil 2.1. Doğrusal regresyon

### 2.2.1. Basit doğrusal regresyon modeli

En basit doğrusal modeldir ve tek bir bağımsız değişken içerir. Bu model, bağımsız değişkenin değerinin artması yada azalması durumunda bağımlı değişkenin gerçek ortalamasının sabit bir oranda değiştiğini ifade eder.

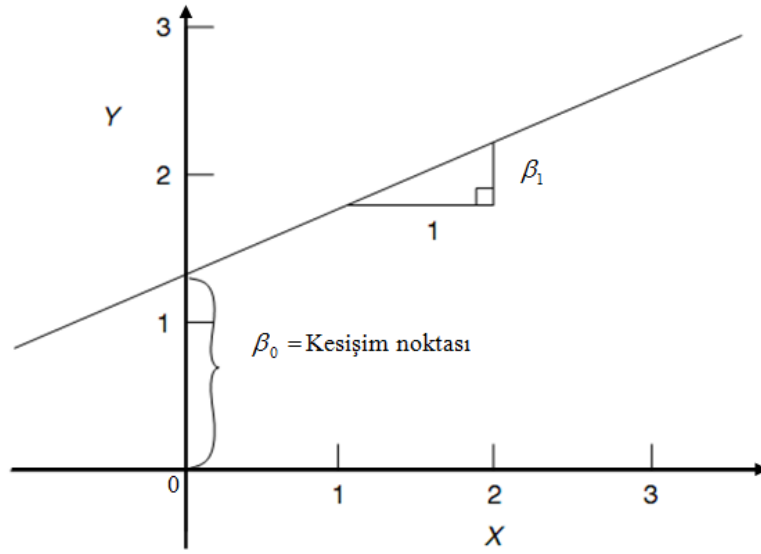
Basit doğrusal regresyon modeli,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (2.1)$$

olarak gösterilir. Bu eşitlikte  $\beta_0$  ve  $\beta_1$  tüm popülasyon verileri kullanılarak hesaplanan teorik değerlerdir. Ancak yine de dikkate alınmayan bağımsız değişkenler olabileceğinden verilerin rassal (şansa bağlı) değişimlerini gösteren hata değeri  $\varepsilon$  modele eklenmiştir.

- x : Bağımsız (sebepl) değişken olup hatasız ölçüldüğü varsayılır.
- y : Bağımlı (sonuç) değişken olup belli bir hataya sahip olduğu varsayılır
- $\beta_0$  : Sabit olup  $x=0$  olduğunda  $y$ 'nin aldığı değerdir.
- $\beta_1$  : Doğrunun eğimi yani  $x$ 'in birim değişiminde  $y$ 'de oluşan değişim değerini
- $\varepsilon$  : Sıfır ortalama ve  $\sigma^2$  varyansa sahip, normal dağılımlı hata değişim değerini

gösterir [36]. Basit doğrusal regresyon modeline ait katsayıların da gösterildiği doğrusal ilişkinin grafik gösterimi Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Doğrusal ilişkinin grafik gösterimi [37].

Doğru ve güvenilir bir regresyon modelinde amaç, gerçek gözlem değeri ile tahmin değeri arasında fark olmaması ya da farkın minimum olmasıdır. Bunun için çeşitli tahmin yöntemleri geliştirilmiştir. Bilinmeyen katsayıların bulunmasında en sık kullanılan en küçük kareler yöntemidir. Bu yöntemde hataların kareleri toplamını minimize edecek şekilde  $\beta_0$  ve  $\beta_1$  değerleri bulunur.

(2.1) nolu eşitlik kullanılarak,

$$\varepsilon = y - \beta_0 - \beta_1 x \quad (2.2)$$

bulunur. n adet örnekleme dikkate alınacak olursa Hataların Kareleri Toplamı (*HKT*),

$$\text{HKT} = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (2.3)$$

yazılabilir.



$\beta_0$  ve  $\beta_1$  katsayılarının değerini bulmak için ayrı ayrı *HKT*'nin  $\beta_0$  ve  $\beta_1$ 'e göre türevleri alınıp sıfıra eşitlenirse,

$$\frac{\partial \text{HKT}}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \text{HKT}}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) \quad (2.5)$$

elde edilir. (2.4) ve (2.5) nolu eşitlikler sıfıra eşitlenirse,

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0 \quad (2.6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0 \quad (2.7)$$

olur. (2.6) ve (2.7) nolu denklemler kullanılarak,

$$\beta_0 n + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.8)$$

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (2.9)$$

normal denklemleri elde edilir. (2.8) nolu eşitlikte  $\beta_0$  katsayısı çekilirse,

$$\beta_0 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n y_i - \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i \right)}{n} \quad (2.10)$$

bulunur. (2.10) nolu denklem (2.9) nolu eşitlikte yerine yazılırsa,

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i - \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i\right)}{n} \sum_{i=1}^n x_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (2.11)$$

olur ve bu denklem  $\beta_1$  için çözüldüğü takdirde,

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad (2.12)$$

bulunur. Eğer,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.13)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.14)$$

olarak kabul edilirse ve buna göre (2.12) nolu denklem düzenlenirse,

$$\beta_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.15)$$

olarak elde edilir.  $\beta_0$  ise (2.10) nolu denklem kullanılarak,

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (2.16)$$

olarak bulunur [38, 39].

### 2.2.2. Çoklu doğrusal regresyon modeli

Basit regresyonda olayı etkileyen sadece bir faktöre yer verilir. Oysa gerek sosyal gerekse de ekonomik olaylar çok sayıda faktöre bağlı olan olaylarla birlikte değişim göstermektedir. Bu nedenle basit regresyon modelleri yetersiz kalmakta ve bunun yerine bağımlı değişkeni etkileyen birden fazla bağımsız değişkenin söz konusu olduğu çoklu doğrusal regresyon modelleri kullanılmaktadır.

k adet bağımsız değişken ile çoklu doğrusal regresyon modeli,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2.17)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad k = 1, 2, \dots, p$$

$\beta_0$  = y-eksenini kestiği değer (x=0) olarak başlangıç değerini,

$\beta_1 = x_2, x_3, \dots, x_k$  değişkenleri sabit tutulduğunda  $x_1$  değişkeniyle y'nin eğimi

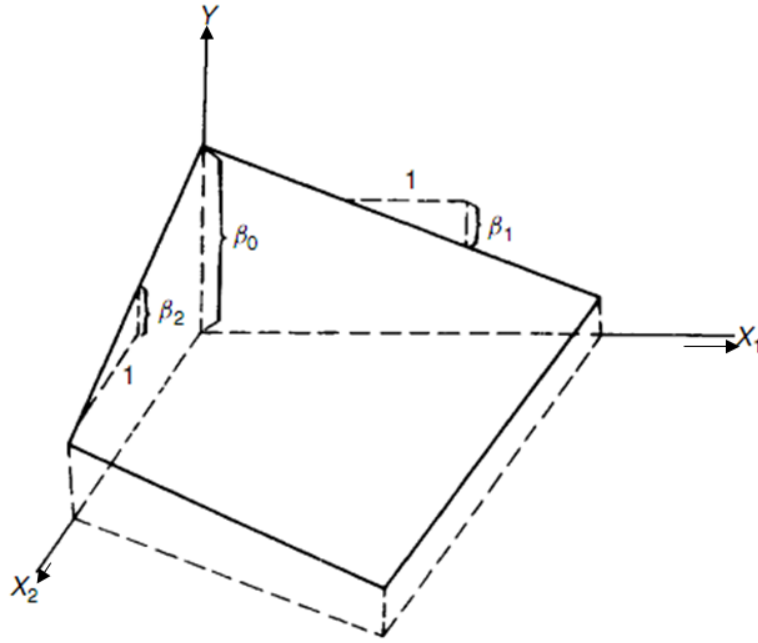
$\beta_2 = x_1, x_3, \dots, x_k$  değişkenleri sabit tutulduğunda  $x_2$  değişkeniyle y'nin eğimi

$\beta_3 = x_1, x_2, x_4, \dots, x_k$  değişkenleri sabit tutulduğunda  $x_3$  değişkeniyle y'nin eğimi

$\beta_k = x_1, x_2, x_3, \dots, x_{k-1}$  değişkenleri sabit tutulduğunda  $x_k$  değişkeniyle y'nin eğimi

$\varepsilon_i = i$ . gözlem için y'deki hata değerini gösterir [36].

Çoklu doğrusal regresyon modelinde k=2 olduğunda Şekil 2.3'de görüldüğü gibi fonksiyon 3-boyutta bir düzleme uyar.



Şekil 2.3. Üç regresyon katsayısına sahip çoklu regresyon modelinin grafik gösterimi [37]

Basit doğrusal regresyon modelindeki katsayıları bulmak için kullanılan hataların kareleri yöntemi çoklu doğrusal regresyon modelinde de kullanılmaktadır. Ancak çok parametrelili bir doğrusal modelin oluşturulması esnasında bu yöntemin kullanılması için karışık matematiksel işlemlerin yapılması gerekmektedir. Matematiksel işlem yoğunluğu nedeniyle oluşan karışıklıktan kurtulmanın en iyi yolu matris yaklaşımını kullanmaktır.

Eğer (2.17) nolu eşitlikte bulunan terimler matris olarak ifade edilirse,

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

olur. Burada,

$\mathbf{y} = (n \times 1)$  gözlem vektörünü,

$\mathbf{x} = (n \times (p+1))$  değişken matrisi,

$\boldsymbol{\beta} = ((p+1) \times 1)$  katsayı vektörünü,

$\boldsymbol{\varepsilon} = (n \times 1)$  hata vektörünü

temsil eder. (2.17) nolu eşitlik matris formunda ifade edilirse,

$$y = x\beta + \varepsilon \quad (2.19)$$

elde edilir. (2.19) nolu eşitlikten,

$$\varepsilon = (y - x\beta) \quad (2.20)$$

bulunur. Hataların kareleri alınırsa,

$$\varepsilon'\varepsilon = (y - x\beta)'(y - x\beta) \quad (2.21)$$

$$\varepsilon'\varepsilon = y'y - \beta'x'y - y'x\beta + \beta'x'x\beta \quad (2.22)$$

elde edilir.  $\beta'x'y$  ( $1 \times 1$ ) boyutunda bir matris yani skaler olduğu için, transpozu

$(\beta'x'y)' = y'x\beta$  olmaktadır. Böylece (2.22) nolu eşitlik düzenlenirse,

$$\varepsilon'\varepsilon = y'y - 2\beta'x'y + \beta'x'x\beta \quad (2.23)$$

olur. Hataların karelerini minimize edecek  $\beta$  matrisini bulmak için (2.23) nolu eşitliğin  $\beta$  'ya göre türevini alıp sıfıra eşitlemek gerekir.

$$\frac{\partial \varepsilon'\varepsilon}{\partial \beta} = -2x'y + 2\beta x'x \quad (2.24)$$

$$2\beta x'x - 2x'y = 0 \quad (2.25)$$

buradan  $\beta$  çekilirse,

$$\beta = (x'x)^{-1}x'y \quad (2.26)$$

elde edilir ve çoklu regresyon modelin katsayı matrisi bulunmuş olur [38,39].

Çoklu doğrusal regresyon modeli içerisinde bağımsız değişkenler doğrusal, kareleri alınmış ve birbirleriyle çarpım şeklinde bulunabilir. Bu şekilde elde edilen ve tez çalışmasında kullanılan regresyon modelleri,

a. Doğrusal (Linear) Model:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots$$

b. İkinci Dereceden (Purequadratic) Model:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + \dots$$

c. Etkileşimli (Interaction) Model:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + \dots$$

d. İkinci Dereceden-Etkileşimli (Quadratic) Model:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + \dots + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + \dots$$

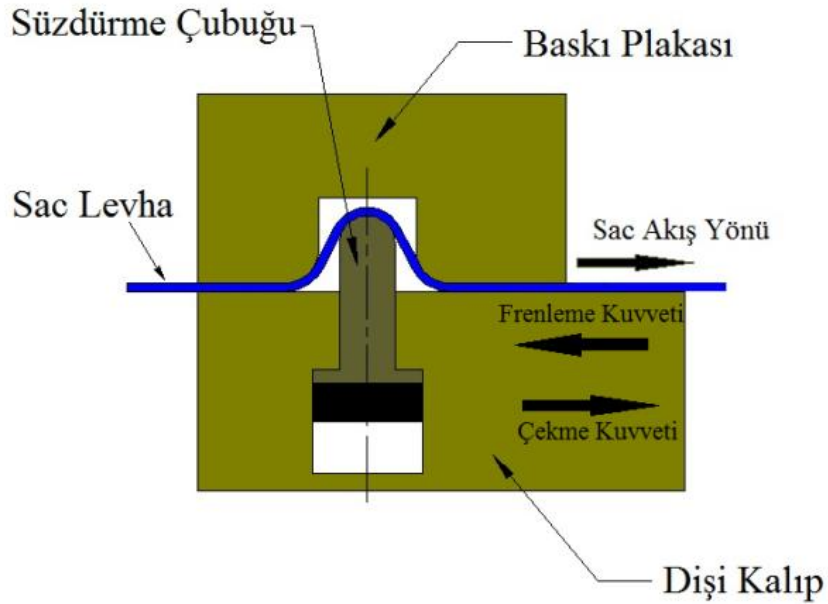
olarak gösterilebilir [40].

Çalışmada, deneysel veriler kullanılarak, süzdürme çubuğu yarıçapı batma miktarı ve sac kalınlığının değişimine bağlı olarak frenleme kuvvetinin hesaplanabildiği yukarıda verilen dört regresyon model elde edilmiştir.

## BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 3.1. Giriş

Literatür araştırmasında da görüldüğü üzere pot çemberi baskı kuvveti ve kuvvetin sac üzerinde oluşturduğu frenleme kuvveti, sac metal şekillendirme prosesinde nihai ürün kalitesini etkileyen başlıca faktörlerden birisidir. Bu çalışmada pot çemberinin oluşturduğu frenleme kuvvetine ek olarak, sac akışının belirli bölgelerde kontrol edilmesinin istendiği durumlarda sıklıkla kullanılan süzdürme çubuğunun oluşturduğu frenleme kuvveti, süzdürme çubuğu yarıçapı, batma miktarı ve sac kalınlığına bağlı olarak modellenmiştir. Bu yöntem ile sac kalınlığı ve süzdürme çubuğu geometrisine bağlı olarak süzdürme çubuğu batma miktarı değiştirilerek, sac akışını kontrol edilebilen bölgesel frenleme kuvveti elde edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Süzdürme çubuğu ve sac üzerine etkiyen kuvvetlerin şematik gösterimi

### 3.2. Deney Düzeneği

Pot emberi kuvveti ve süzdürme çubuğu batma miktarına bağlı olarak elde edilecek frenleme kuvvetinin ölçülebilmesi için 40 tonluk atölye tipi hidrolik pres modernize edilmiştir (şekil 3.2, şekil 3.3



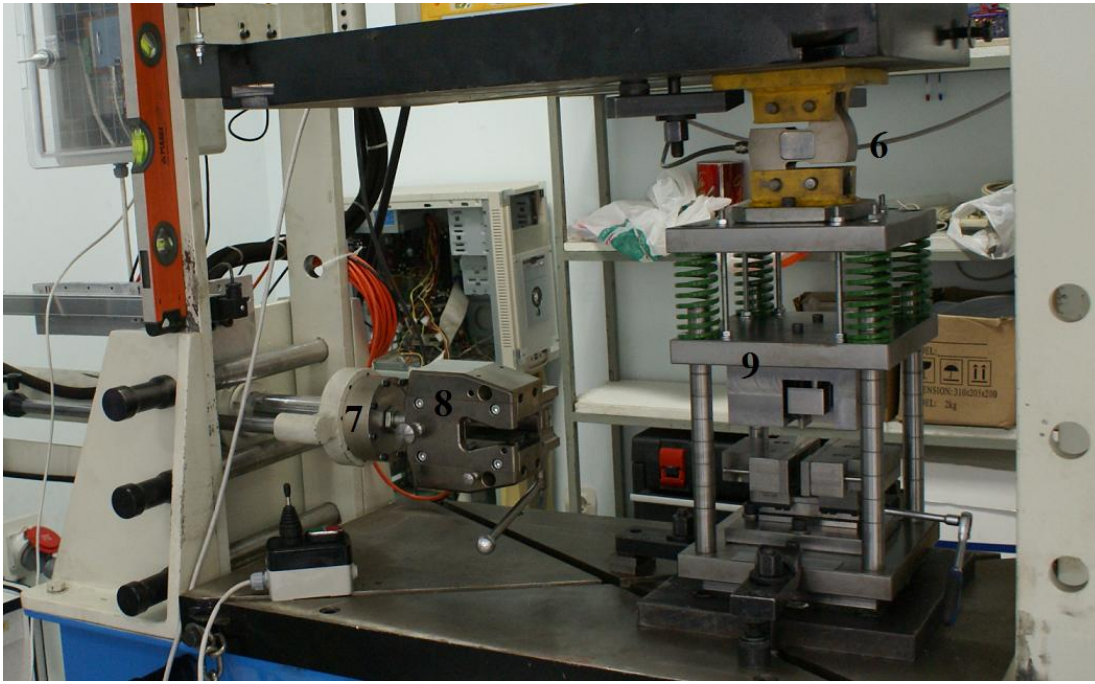
şekil 3.2. Modernize edilmiş 40 tonluk atölye tipi pres

Deneyler sırasında sac üzerine etkiyen kuvvetlerin presin konumuna bağlı olarak ölçülmesi ve elde edilen bu verilerin kaydedilebilmesi için pres üzerine çeşitli donanımlar monte edilmiştir. şekil 3.2 ve şekil 3.3'deki resimler üzerinde bu donanımlar numaralandırılmıştır.

1. Düşey konum ler: Kalıp setinin bağlı olduğu pres st tablasının konumunun ölçülmesi amacıyla kullanılan donanımdır.
2. Yatay konum ler: Sac levhayı çeken yatay silindirin konumunu ölçmek ve saca etkiyen kuvvetin konuma bağlı elde edilebilmesi için kullanılan donanımdır.



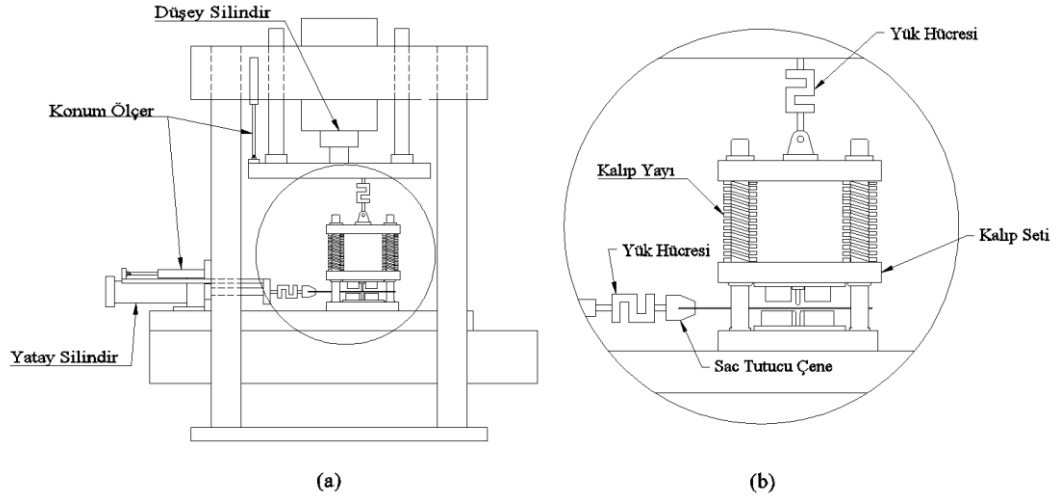
3. Düşey silindir: Pres üst tablasına bağlı kalıp setinin açılıp kapatılabilmesi için kullanılan ekipmandır.
4. Yatay silindir: Sacın kalıp setinin içinden yatay olarak çekilebilmesi için kullanılan ekipmandır.
5. Bilgisayar: Deney düzeneği üzerine bağlanan ölçüm cihazlarından gelen verilerin toplandığı donanımdır.
6. Düşey silindir yük hücresi: Pres üst tablası tarafından kalıp setinin kapatılması için uygulanan kuvveti ölçmek için kullanılan donanımdır.



Şekil 3.3. Modernize edilmiş 40 tonluk atölye tipi pres

7. Yatay silindir yük hücresi: Yatay silindir yardımıyla kapatılan kalıp seti tarafından sac üzerinde oluşan sürtünme kuvveti ile süzdürme çubuğu üzerinden geçirilen sacın çekilmesi esnasında elde edilen frenleme kuvvetinin ölçülmesi için kullanılan donanımdır.
8. Tutucu çene: Sacın yatay silindir yardımıyla çekilebilmesi için kullanılan ekipmandır.
9. Kalıp seti: Sac malzeme üzerine etkiyen kuvvetin ayarlanması ve sacın süzdürme çubuğu üzerinden geçirilmesi amacıyla kullanılan ekipmandır.

Şekillendirme esnasında sac levha üzerine etkiyen frenleme kuvvetinin deneysel olarak incelenebilmesi için süzdürme çubuğu ve pot çemberinden oluşan bir kalıp seti hazırlanmıştır. Şekil 3.4’de şematik olarak gösterilen pres üzerine bu kalıp seti yatay olarak monte edilmiştir.



Şekil 3.4. Pres üzerine monte edilen kalıp seti ve donanımların şematik gösterimi



Şekil 3.5. Pres alt tablasına yerleştirilen kalıp seti

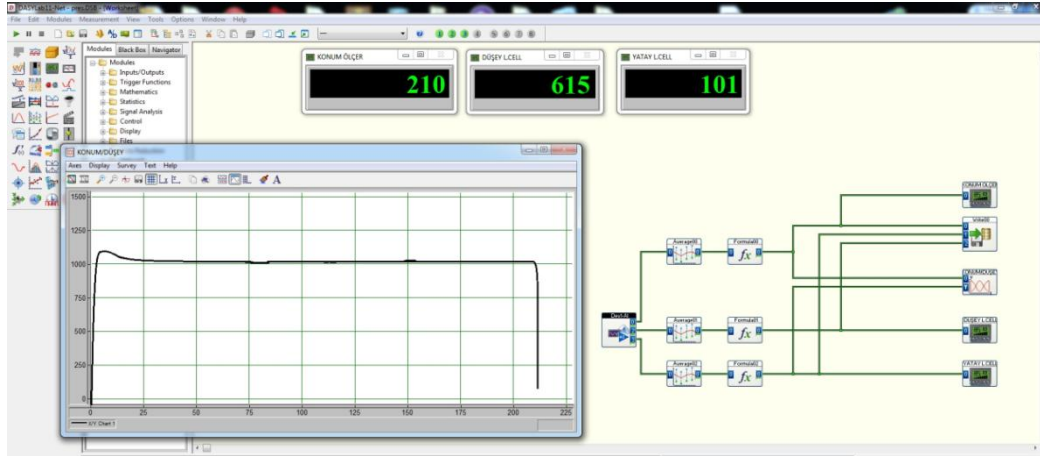
Şekil 3.5’de görülen kalıp setinin alt tablasına Er-El firmasından alınan çift açılır hassas mengenene (1) monte edilmiştir. Bu mengene yardımıyla süzdürme çubuğu kanalının açıklığı, süzdürme çubuğu merkezde kalacak şekilde iki yönlü olarak hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir. Bunun yanında mengene çenelerine monte edilen parçalar yardımıyla süzdürme çubuğu kanal giriş-çıkış yarıçapları (2) değiştirilebilmektedir. Kalıp seti ara plakasına (3) bağlı pot çemberi (4) yardımıyla sac malzeme üzerinden istenilen dikey baskı kuvveti oluşturulabilmektedir. Pot çemberi üzerine yerleştirilen hareketli süzdürme çubuğu (5) yardımıyla, süzdürme çubuğunun batma miktarı ayarlanabilmektedir. Kalıp seti üst plakası (6) ile ara plakası arasında bulunan kalıp yayları (7) yardımıyla pot çemberi dikey kuvveti hassas bir şekilde ayarlanabilmektedir.

Pres üzerine monte edilen 2 adet konum ölçer ve 2 adet yük hücresinden gelen 0-10V aralığındaki analog sinyaller, Measurement Computing firmasının üretmiş olduğu 1208FS model veri toplama cihazı yardımıyla USB portundan bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 3.6. Measurement Computing firmasının üretmiş olduğu veri toplama cihazı

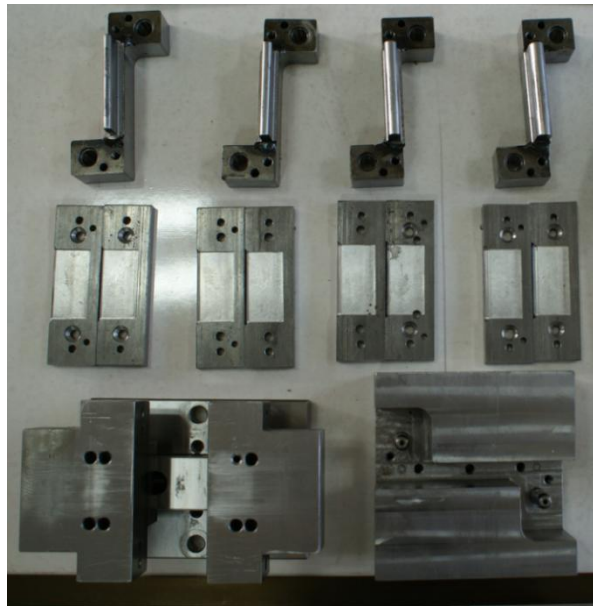
Veri toplama cihazından elde edilen 0-10V aralığındaki analog sinyaller DASYLAB isimli veri analiz programı yardımıyla işlenerek konum ve kuvvet bilgilerine çevrilmiştir.



Şekil 3.7. Veri toplama amacıyla kullanılan DASYLAB programı

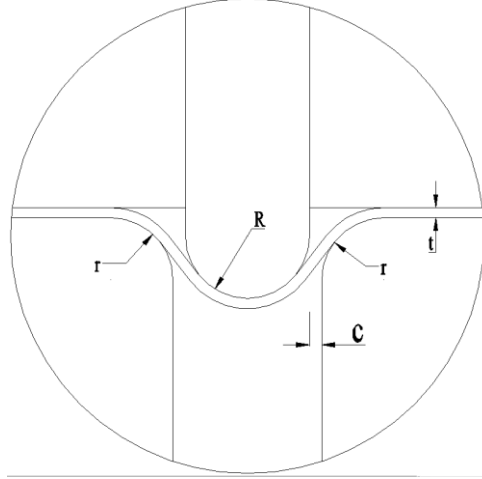
DASYLAB programı yardımıyla deney sırasında elde edilen veriler eş zamanlı olarak hem ekranda görülebilmekte hem de kaydedilmektedir. Bu işlem esnasında yatay silindir konumuna bağlı olarak elde edilen frenleme kuvveti grafik olarak ekranda görülebilmektedir (Şekil 3.7).

Deneylerde kullanılan süzdürme çubukları, pot çemberi ve giriş çıkış yarıçapları Sakarya Üniversitesi Makine Laboratuvarında Şekil 3.9'da gösterilen ölçülerde üretilmiştir.



Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan pot çemberi, süzdürme çubukları ile giriş çıkış yarıçap parçaları

Deneyleer sırasında kullanılacak süzdürme çubukları, giriş-çıkış yarıçap plakası 4 set olarak üretilmiştir. Bu setlerde kullanılan ller Tablo 3.1'de verilmiştir. Tabloda verilen  $t$ , sac kalınlığını,  $R$  süzdürme çubuğu yarıçapını,  $r$  süzdürme çubuğu giriş-çıkış yarıçapını ve  $c$  ise çubuk ile kanal arasındaki boşluğu göstermektedir. Deneyleerde  $c$  ölçüsü sac kalınlığına 1 mm eklenerek hesaplanmıştır [41].



Şekil 3.9. Deneyleerde kullanılan ölçülerin şematik gösterimi

Tablo 3.1. Deneyleer sırasında kullanılan ller

	R (mm)	r (mm)	t (mm)	c (mm)
Deneylee Seti 1	3	3	0,8	$t+1=1,8$
			1,0	$t+1=2$
			1,2	$t+1=2,2$
Deneylee Seti 2	4	4	0,8	$t+1=1,8$
			1,0	$t+1=2$
			1,2	$t+1=2,2$
Deneylee Seti 3	5	5	0,8	$t+1=1,8$
			1,0	$t+1=2$
			1,2	$t+1=2,2$
Deneylee Seti 4	6	6	0,8	$t+1=1,8$
			1,0	$t+1=2$
			1,2	$t+1=2,2$

### 3.3. DeneYlerin Yapılışı

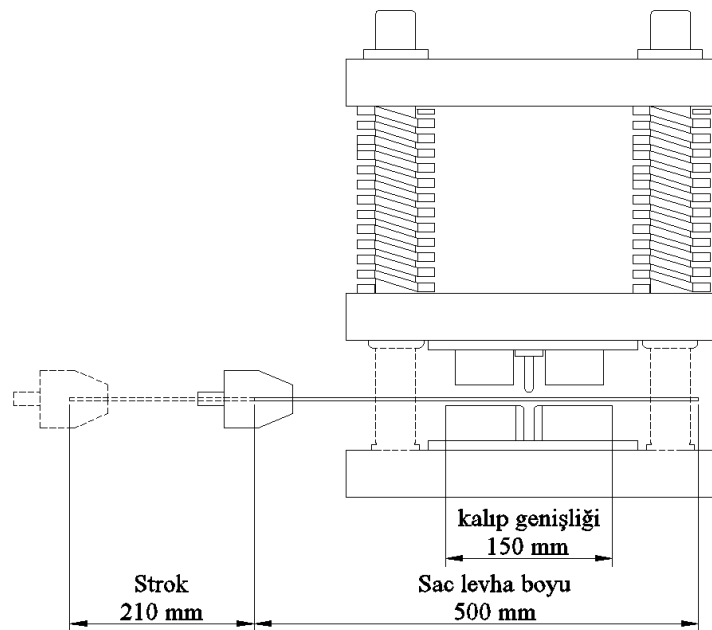
DeneYler esnasında derin çekme işlemine uygun, otomotivde yeni kullanılmaya başlanan çift fazlı DP 600 0,8, 1 ve 1,2 mm kalınlığında sac levhalar kullanılmıştır. Bu levhaların mekanik özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. DeneYlerde kullanılan DP 600 sac malzemenin özellikleri [41].

Çelik	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ (%)	K (MPa)	n	$r_0^0$	$r_{45}^0$	$r_{90}^0$	$r_{ort}$
DP600	491,3	618,2	24,4	936,9	0,136	1,04	1,058	1,344	1,125

DeneYler sırasında kullanılan 0.8, 1.0 ve 1.2 mm kalınlığındaki sac levhalar, 30 mm genişliğinde ve 500 mm boyunda kesilmiştir. Levhaların 500 mm boyunda kesilmesinin amacı, sac levhanın deney sırasında 210 mm çekilmesi esnasında sacın tamamının kalıp ile temasının sağlanmasıdır.

DeneYlerde, malzeme özellikleri ve yüzey kalitesinin etkisini ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan sac levhalar aynı plaka üzerinden kesilmiştir.



Şekil 3.10. Sac levhanın kalıp seti içindeki hareketinin şematik gösterimi

Deney sonuçlarının güvenilirliğini arttırmak ve hata oranını azaltmak amacıyla deneyler 3'er kez tekrarlanarak sonuçların ortalaması alınmıştır.

Çalışmanın amacı olan süzdürme çubuğu batma miktarı ile çubuk yarıçapı ve sac kalınlığına bağlı olarak elde edilecek frenleme kuvvetinin ölçülmesinde, pot çemberi baskı kuvveti 6300N'da ve çekme hızı 26 mm/s'de sabit tutulmuştur. Bu sayede pot çemberinin oluşturduğu frenleme kuvveti, ölçülen değerlerden çıkarılarak süzdürme çubuğu tarafından üretilen frenleme kuvveti ölçülmüştür. Denklem 3.1'de bu hesaplama yöntemi gösterilmiştir.

$$F_{sçfk} = F_{de} - (F_p * \mu_k) \quad (3.1)$$

- $F_{sçfk}$  : Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti  
 $F_{de}$  : Deney sonucu ölçülen frenleme kuvveti  
 $F_p$  : Pot çemberi baskı kuvveti (6300 N)  
 $\mu_k$  : Sac ile kalıp seti arasındaki sürtünme katsayısı

Sac ile kalıp seti arasındaki sürtünme katsayısının bulunması için, deneyler süzdürme çubuğu süzdürme kanalına batırılmadan 3 kez tekrarlanmıştır. Bu yöntem ile elde edilen frenleme kuvveti, pot çemberine uygulanan 6300 N'luk normal kuvvetin oluşturduğu sürtünme kuvvetine eşittir. Tablo 3.3'de bu deneyler sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Süzdürme çubuğu kullanılmadan kalıp setinden ölçülen frenleme kuvvetleri

Batma Miktarı (mm)	Sac Kalınlığı (mm)	Ölçülen Frenleme Kuvveti (N)
0	0,8	1618,657
0	0,8	1632,09
0	0,8	1625,373
0	1,0	1605,224
0	1,0	1618,657
0	1,0	1645,522
0	1,2	1638,806
0	1,2	1625,373
0	1,2	1632,09

Elde edilen bu frenleme kuvveti (3.2) denklemiyle de ifade edilebilir.

$$F_{fk} = F_p * \mu_k \quad (3.2)$$

$F_{fk}$  : Kalıp seti frenleme kuvveti (Tablo 3.3)

$F_p$  : Pot çemberi baskı kuvveti (6300 N)

$\mu_k$  : Sac ile kalıp seti arasındaki sürtünme katsayısı

Buradan sürtünme katsayısı çekilirse denklem 3.3 elde edilir.

$$\mu_k = \frac{F_{fk}}{F_p} \quad (3.3)$$

Tablo 3.3'deki değerler denklem 3.3'de yerine konularak her bir deney tekrarından elde edilen sürtünme katsayısı hesaplanabilir. Tablo 3.4'de elde edilen bu sürtünme katsayıları ve ortalama sürtünme katsayısı gösterilmiştir.

Tablo 3.4. Her bir sac levha için elde edilen sürtünme katsayıları

Sürtünme katsayıları					Ortalama Sürtünme Katsayısı
		Deney Numarası			
		1	2	3	
Sac Kalınlığı (mm)	0,8	0,25693	0,259062	0,257996	0,258233
	1,0	0,254797	0,25693	0,261194	
	1,2	0,260128	0,257996	0,259062	

Tablo 3.4'deki değerler incelendiğinde her bir levhanın sürtünme katsayılarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç ışığında aynı seriden (aynı üretim hattından çıkan) olan sac levhaların yüzey kalitelerinin birbirine çok yakın olduğunu ve sürtünme katsayısının beklenildiği şekilde sac kalınlığı ile değişmediği görülmektedir. Bu da denklem 3.1 ile sadece süzdürme çubuğu ile elde edilen frenleme kuvvetinin hesaplanabileceğini göstermektedir.

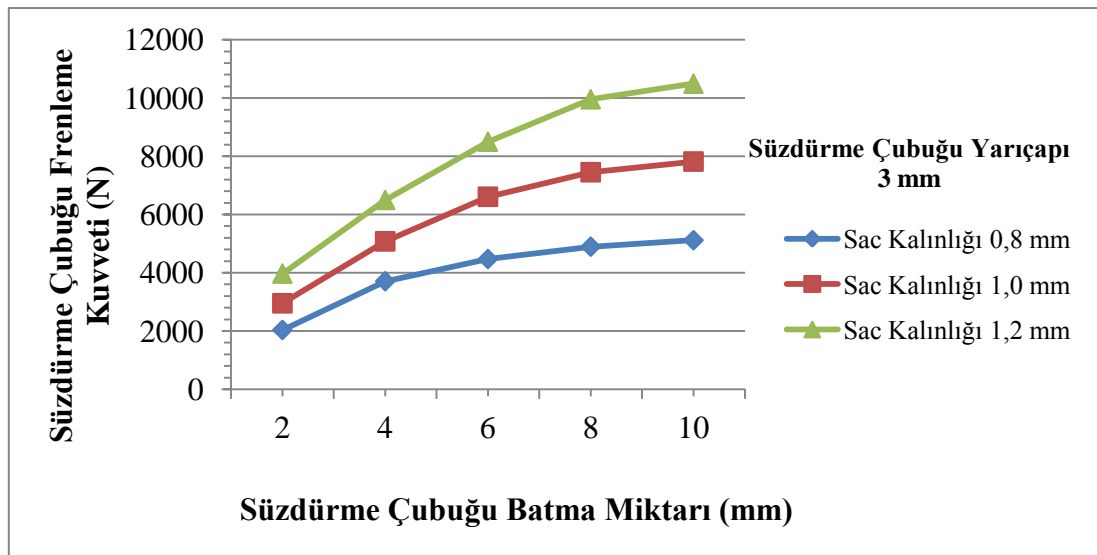


Kalıp seti içindeki sürtünme katsayısı hesaplandıktan sonra prostedeki ana değişken olan süzdürme çubuğu batma miktarının değişimine göre elde edilen frenleme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bunun için her bir sac kalınlığı ve süzdürme çubuğu yarıçapı için süzdürme çubuğu sırasıyla 2,4,6,8,10 mm süzdürme kanalına batırılmıştır. Bu yöntem ile 60 adet veri elde edilmiştir.

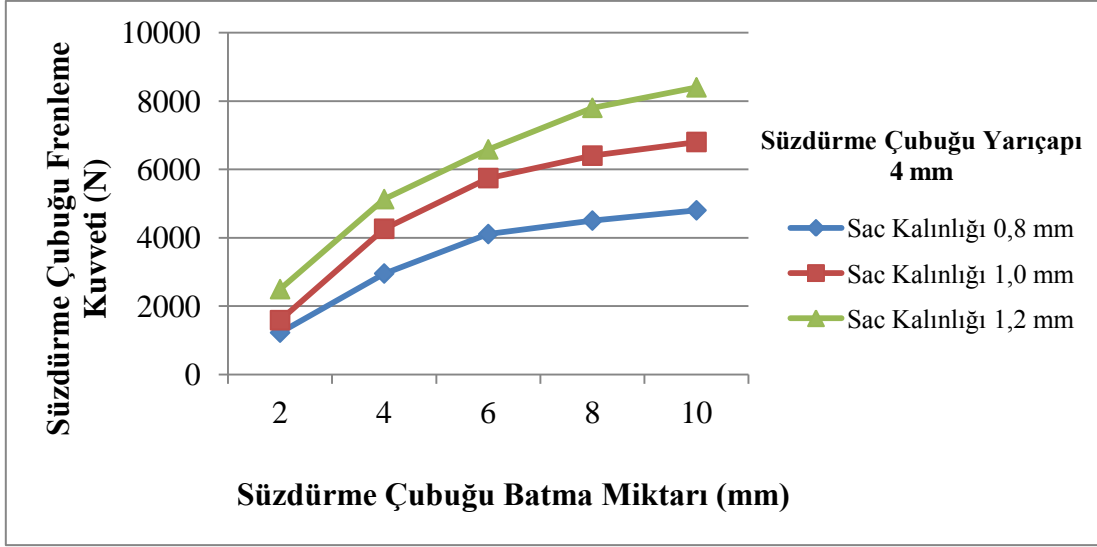
### 3.4. Deney Sonuçları

Deneyler sırasında 3 farklı kalınlıkta çift fazlı DP600 sac levhalar 500x30 mm boyutlarında kesilerek kullanılmıştır. Bu levhalar, sabit pot çemberi baskı kuvveti altında (6300N), süzdürme çubuğunun farklı geometrileri ve batma miktarları için çekilmiştir. Bu işlem her bir koşul için 3'er kez tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Elde edilen bu veriler denklem 3.1'de yerine konularak sadece süzdürme çubuğunun ürettiği frenleme kuvveti elde edilmiştir.

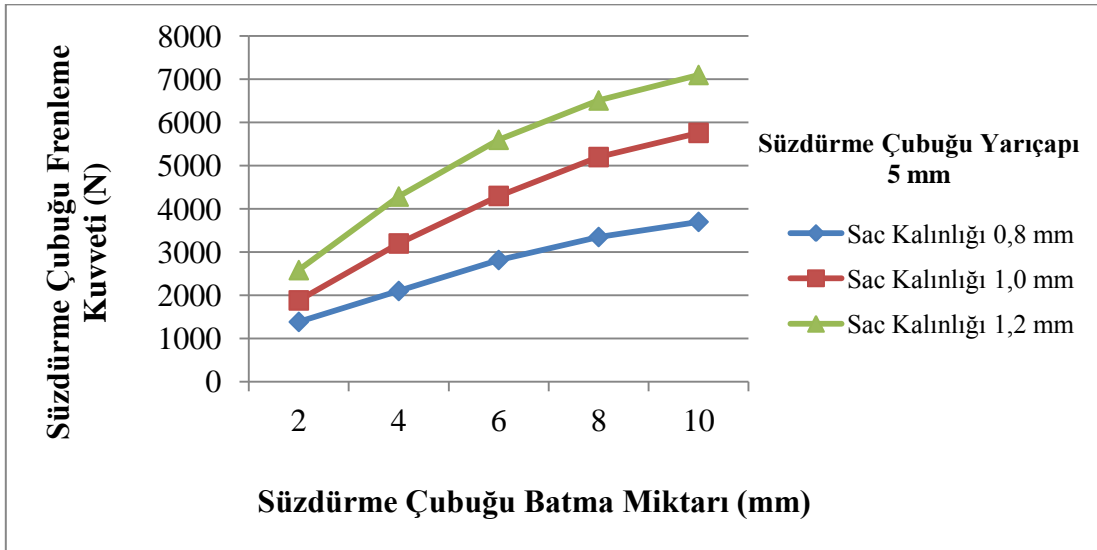
Bu bölümde süzdürme çubuğunun batma miktarına karşılık elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin sac kalınlığına ve süzdürme çubuğu yarıçapına bağlı değişimi grafiklerle karşılaştırılacaktır.



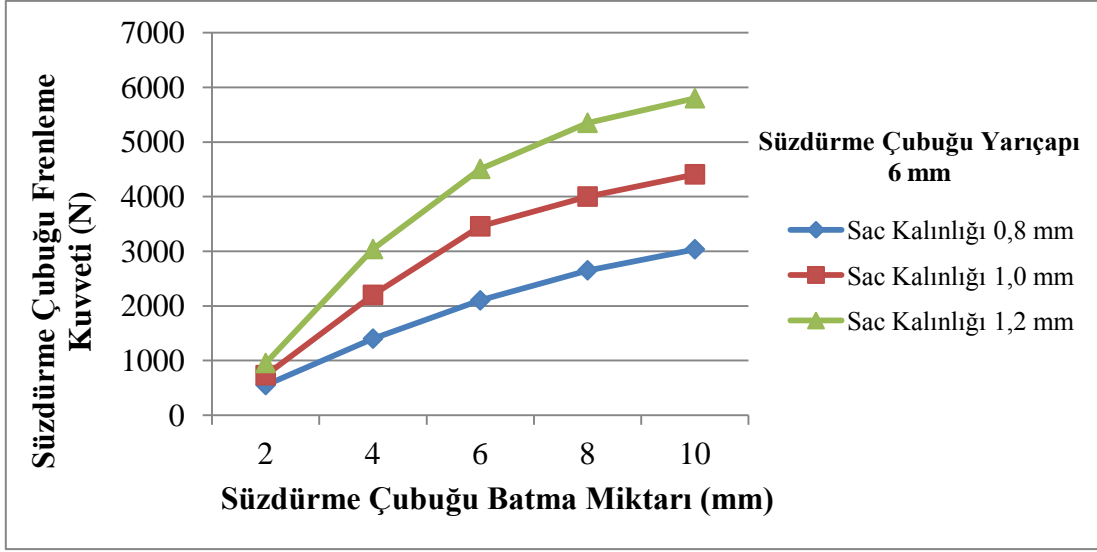
Şekil 3.11. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu batma miktarı grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (süzdürme çubuğu yarıçapı 3 mm'dir)



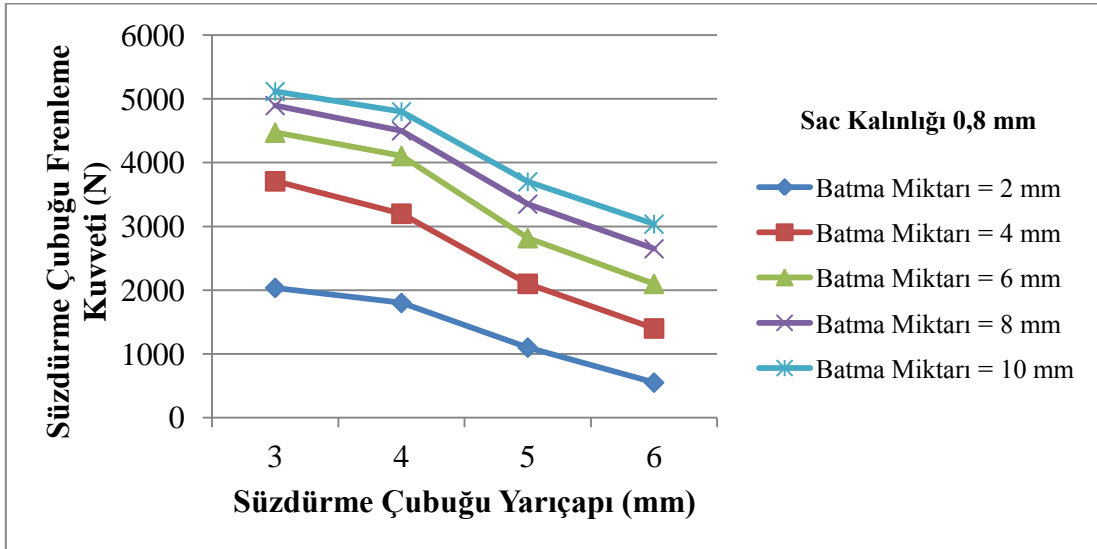
Şekil 3.12. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu batma miktarı grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (süzdürme çubuğu yarıçapı 4 mm'dir)



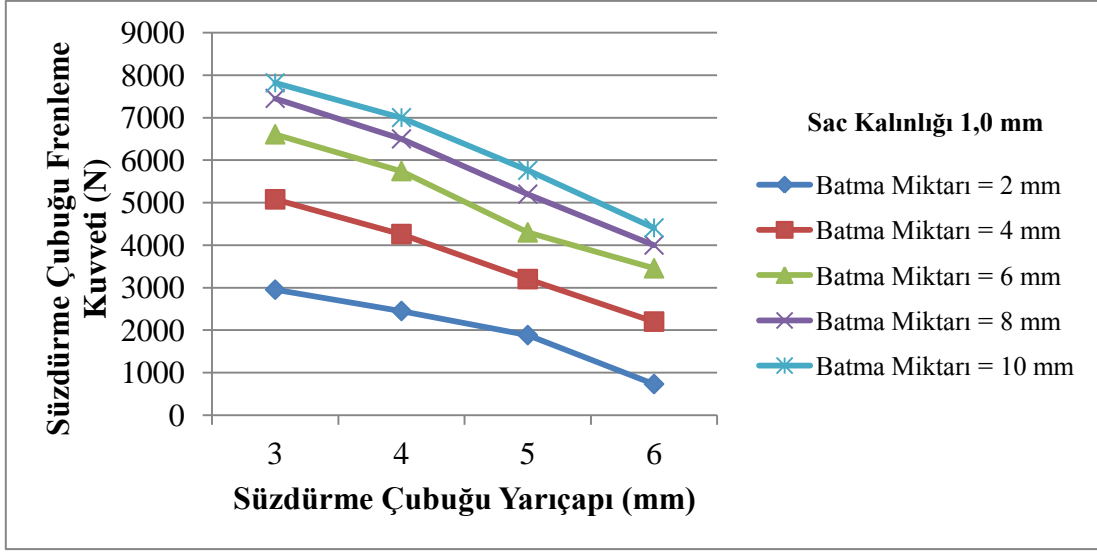
Şekil 3.13. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu batma miktarı grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (süzdürme çubuğu yarıçapı 5 mm'dir)



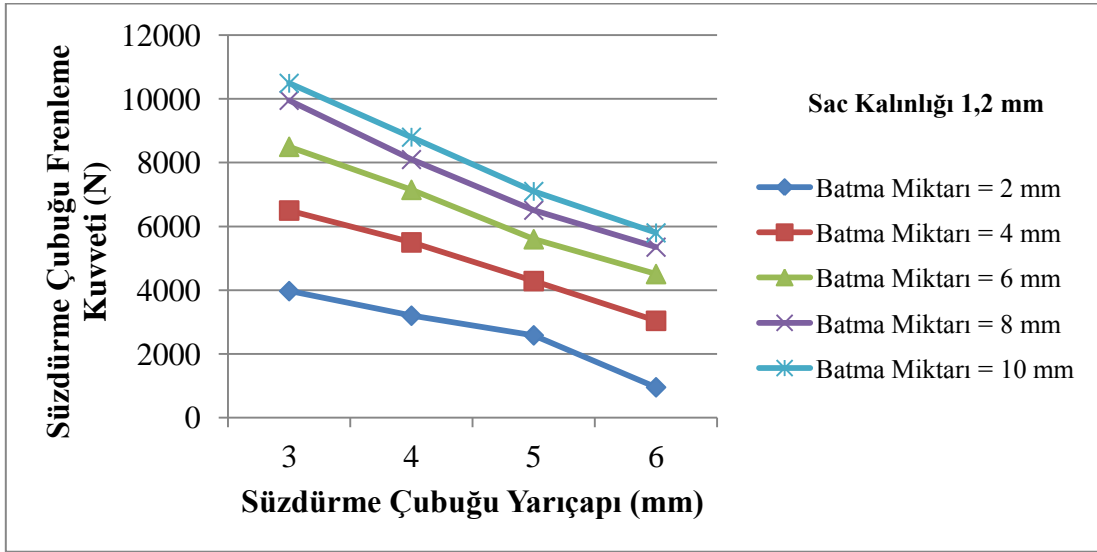
Şekil 3.14. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu batma miktarı grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (süzdürme çubuğu yarıçapı 6 mm'dir)



Şekil 3.15. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu yarıçapı grafiğinin batma miktarına göre değişimi (sac kalınlığı 0,8 mm'dir)



Şekil 3.16. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu yarıçapı grafiğinin batma miktarına göre değişimi (sac kalınlığı 1,0 mm'dir)



Şekil 3.17. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti - süzdürme çubuğu yarıçapı grafiğinin batma miktarına göre değişimi (sac kalınlığı 1,2 mm'dir)

Deney sonuçlarına göre çizilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti grafikleri incelendiğinde, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Sac kalınlığı arttıkça elde edilen frenleme kuvveti artmaktadır.

- Süzdürme çubuğu batma miktarı arttıkça elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti artmaktadır.
- Süzdürme çubuğu yarıçapı arttıkça aynı şartlarda elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti azalmaktadır.
- 2 mm batma miktarında, sac kalınlığı ve süzdürme çubuğu yarıçapına bağlı frenleme kuvvetindeki değişim yaklaşık % 80 mertebesinde iken, diğer batma miktarlarında bu oran yaklaşık %50 mertebesinde kalmaktadır.
- Süzdürme çubuğu batma miktarı azaldıkça elde edilen frenleme kuvvetindeki azalma oranı da artmaktadır. Bu da üretim sırasında süzdürme çubuğunda meydana gelen aşınmaların dikkatlice izlenmesi gerektiğini göstermektedir.

## BÖLÜM 4. SÜZDÜRME ÇUBUĞU FRENLEME KUVVETİNİN MODELLENMESİ

### 4.1. Giriş

Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti, sac şekillendirme işlemi esnasında, malzemenin kalıp boşluğu içine kontrollü bir şekilde akması amacıyla pot çemberi kuvvetiyle beraber kullanılır. Pot çemberi sac akışını kalıbın her alanında düzenlerken, süzdürme çubuğu sac akışını bölgesel olarak ayarlama imkanı verir. Süzdürme çubuğu ile elde edilen bu bölgesel frenleme kuvveti, özellikle karmaşık geometrilerin üretildiği otomotiv sektöründe karşılaşılan şekillendirme problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu bölümde; deneylerden elde edilen veriler kullanılarak süzdürme çubuğu frenleme kuvveti, süzdürme çubuğu yarıçapı, batma miktarı ve sac kalınlığına bağlı olarak modellenecektir. Deneylerde değiştirilen süzdürme çubuğu yarıçapı, batma miktarı ve sac kalınlığı modellerin girişlerini, süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ise modelin çıkışını oluşturacaktır.

Tablo 4.1. Model girişleri

Model Girişleri		
Sac Kalınlığı (mm)	Süzdürme çubuğu Yarıçapı (mm)	Süzdürme Çubuğu Batma Miktarı (mm)
0,8 1,0 1,2	3	2
	4	4
	5	6
	6	8
		10

## 4.2. Eğri Uydurma ile Modelleme

Bir fonksiyonun nokta nokta verilen değerlerinde, fonksiyona en yakın başka bir fonksiyonun belirlenmesi veya pratikte kullanımı zor olan fonksiyonların yerine geçerek hesaplamalarda kolaylık sağlayabilecek yeni fonksiyonların araştırılması “eğri uydurma” problemidir [42].

Bu kısımda deney sonuçları kullanılarak her bir süzdürme çubuğu yarıçapı ve sac kalınlığı için süzdürme çubuğu batma miktarına karşılık elde edilen frenleme kuvvetini veren polinom modeller elde edilmiştir. Modeller, MATLAB Curve Fitting Toolbox 1.2 kullanılarak deneysel verilere en yakın sonuçları veren aşağıdaki gibi kübik polinom şeklinde elde edilmiştir.

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (4.1)$$

burada,

$f(x)$ : Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti (SÇFK) (N),

$x$ : Süzdürme çubuğu batma miktarı (SÇBM) (mm),

olarak gösterilmiştir.

Deneysel veriler ile kübik polinom modelden elde edilen sonuçlar arasındaki hata, ‘Hata = Deneysel Veri – Polinom Model’ şeklinde hesaplanmıştır. Ayrıca kübik modellerin tümüne ait modelin performansı hakkında bilgi veren Korelasyon Katsayısı  $R^2$ , Hataların Kareleri Toplamı (SSE) ve Hataların Karelerinin Ortalamasının Karekökü (RMSE) elde edilmiştir.

Korelasyon katsayısı,

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.2)$$

Korelasyon katsayısı, bir değişkenin diğer değişkene hangi oranda bağlı olduğunu gösteren, diğer bir anlatımla bir değişkendeki değişimlerin yüzde kaçının diğer değişken tarafından açıklanacağını belirten katsayısıdır. Bu katsayısı 0 ile 1 arasında değerler alır. Bu değer 1'e ne kadar yakın ise, değişkenler arasındaki ilişkinin o kadar kuvvetli olduğu kabul edilir.

Hataların kareleri toplamı,

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.3)$$

Hataların karelerinin ortalamasının karekökü

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.4)$$

olarak ifade edilir. Burada,

$y$  : Gerçek çıkış değeri,

$\hat{y}$  : Modelden kestirilen çıkış değeri,

$\bar{y}$  : Çıkış değerlerinin ortalaması ve

$n$ : Örnek sayısını

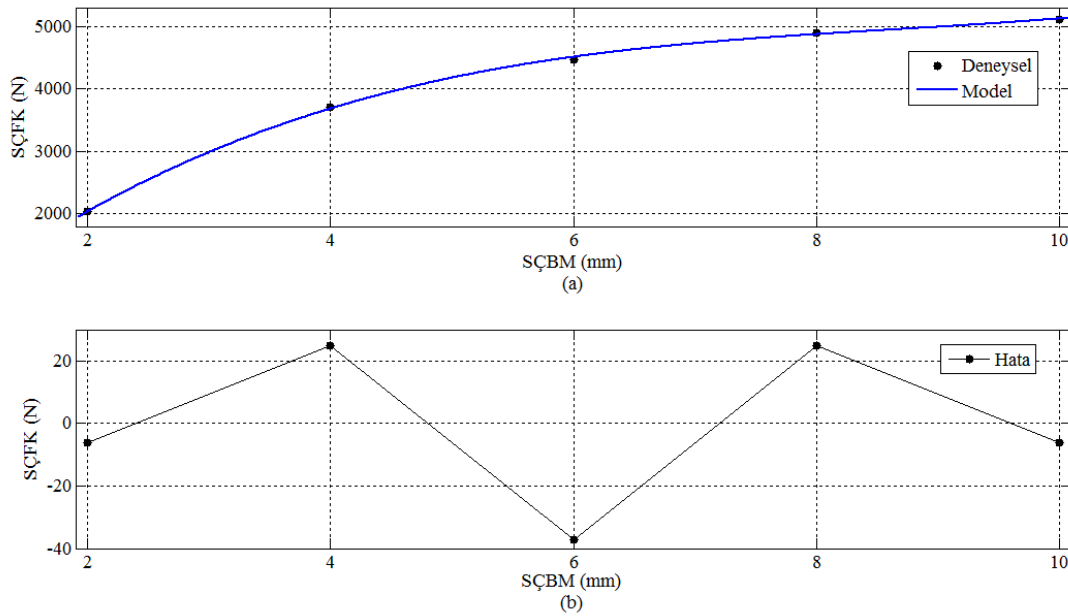
gösterir [5].



#### 4.2.1. 0,8 mm sac kalınlığı ve 3mm süzdürme çubuk yarıçapı için polinom model

$$S\check{C}FK = 7.358B^3 - 190.4 B^2 + 1757 B - 769.6 \quad (4.5)$$

Şekil 4.1'de, 3 mm yarıçapında süzdürme çubuğundan geçen 0,8 mm sac kalınlığındaki sac levha için süzdürme çubuğunun batma miktarına karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı  $R^2 = 0.9996$ ,  $SSE = 2696$  ve  $RMSE = 51.92$  olarak hesaplanmıştır.



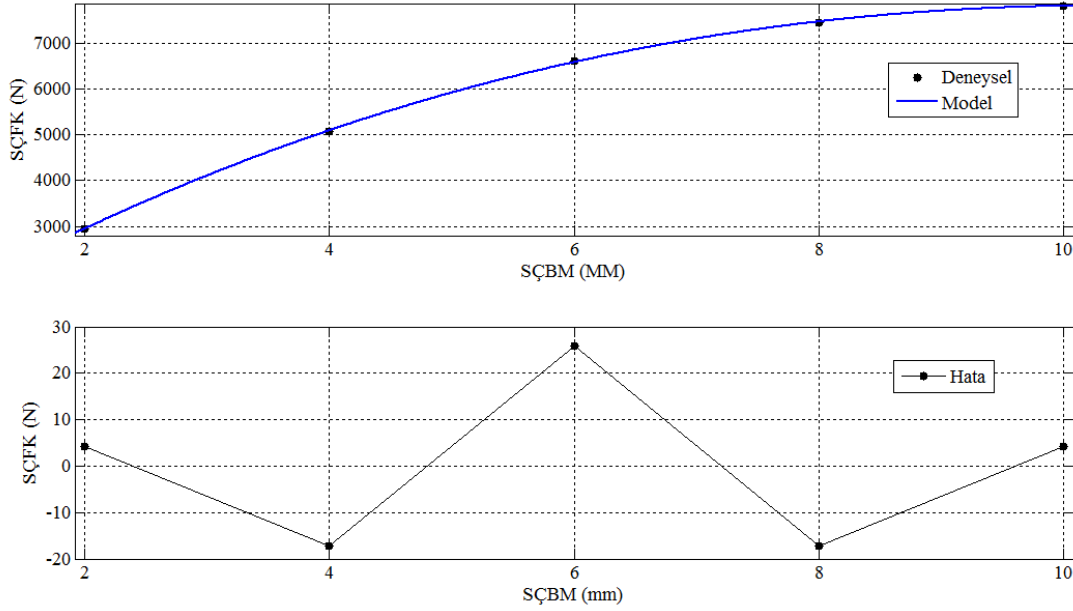
Şekil 4.1. 3 mm yarıçapında süzdürme çubuğundan geçen 0,8 mm sac kalınlığındaki sac levha için SÇBM'ye bağlı (a) deneysel SÇFK değerleri ile kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

#### 4.2.2. 1,0 mm sac kalınlığı ve 3mm süzdürme çubuk yarıçapı için polinom model

$$S\check{C}FK = 1.217B^3 - 97.06 B^2 + 1622 B + 81.56 \quad (4.6)$$

Şekil 4.2'de, 3 mm yarıçapında süzdürme çubuğundan geçen 1,0 mm sac kalınlığındaki sac levha için süzdürme çubuğunun batma miktarına karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar

görülmektedir. Korelasyon Katsayısı  $R^2 = 0.9999$ ,  $SSE = 1291$  ve  $RMSE = 35.94$  olarak hesaplanmıştır.

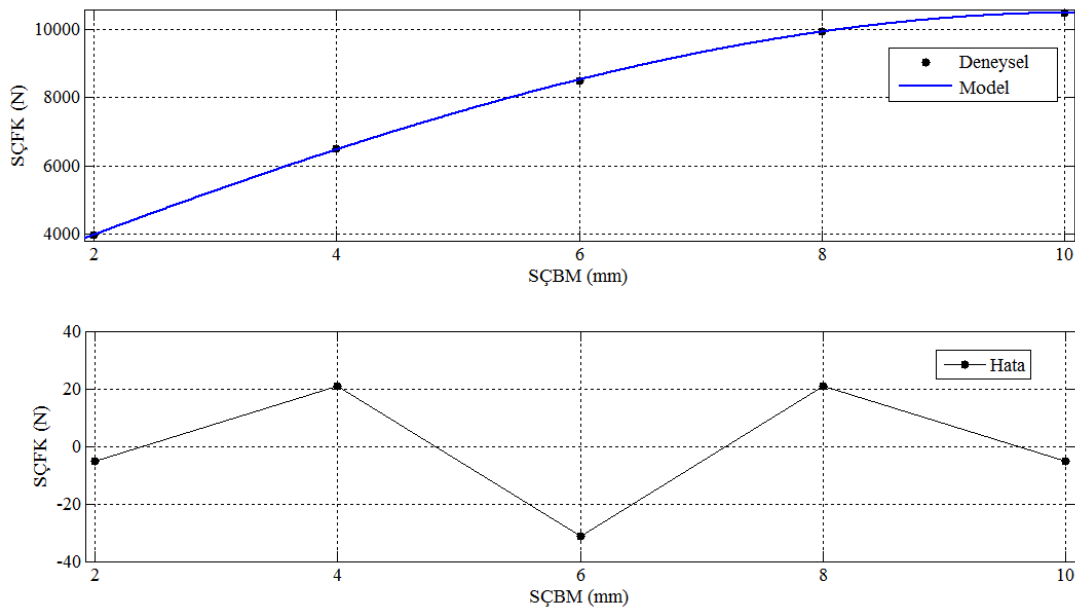


Şekil 4.2. 3 mm yarıçapında süzdürme çubuğundan geçen 1,0 mm sac kalınlığındaki sac levha için SCBM'ye bağlı (a) deneysel SCFK değerleri ile kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

#### 4.2.3. 1,2 mm sac kalınlığı ve 3mm süzdürme çubuk yarıçapı için polinom model

$$SCFK = -4.103B^3 - 7.036 B^2 + 1408 B + 1222 \quad (4.7)$$

Şekil 4.3'de, 3 mm yarıçapında süzdürme çubuğundan geçen 1,2 mm sac kalınlığındaki sac levha için süzdürme çubuğunun batma miktarına karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı  $R^2 = 0.9999$ ,  $SSE = 1885$  ve  $RMSE = 43.41$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. 3 mm yarıçapında süzdürme çubuğundan geçen 1,2 mm sac kalınlığındaki sac levha için SÇBM'ye bağlı (a) deneysel SÇFK değerleri ile kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

0.8, 1.0 ve 1.2 mm kalınlığındaki sacların 3 mm yarıçapındaki süzdürme çubuğundan geçtiği durumlarda elde edilen model sonuçları ve hata grafikleri, süzdürme çubuğu yarıçapının 4, 5, 6 mm olduğu durumlarla benzerlik gösterdiğinden dolayı, bu yarıçaplar için elde edilen modellerin performans değerleri Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Bağımsız değişkenin regresyon modeli ile bağımlı değişkenin ne kadar açıklanabildiğini görmek için bir ölçüt olan korelasyon katsayısı  $R^2$ , 0 ile 1 arasında değişen değerler almakta olup 1'e yaklaştıkça güvenilirlik yüksek, 0'a yaklaştıkça güvenilirlik düşük olarak ifade edilmektedir [36].

Tablo 4.2. SÇFK'yi kestirmek için oluşturulan polinom modellerin performansına ait veriler

Sac Kalınlığı (mm)	SÇ Yarıçapı (mm)	Polinom Model		
		R <sup>2</sup>	SSE	RMSE
0,8	3	$7.358B^3 - 190.4 B^2 + 1757 B - 769.6$		
		0.9996	2696	51.92
1,0	3	$1.217B^3 - 97.06 B^2 + 1622 B + 81.56$		
		0.9999	1291	35.94
1,2	3	$-4.103B^3 - 7.036 B^2 + 1408 B + 1222$		
		0.9999	1885	43.41
0,8	4	$5.005B^3 - 154.7 B^2 + 1684 B - 1580$		
		0.9988	10.033	101.6
1,0	4	$9.725B^3 - 271.1 B^2 + 2699 B - 2810$		
		1	617	24,84
1,2	4	$5.868B^3 - 182.6 B^2 + 2202 B - 1208$		
		0,9989	24890	157,8
0,8	5	$-1.923B^3 + 18.28 B^2 + 308.5 B + 707.2$		
		0,9999	496,9	22,29
1,0	5	$-1.276B^3 - 7.668 B^2 + 734.9 B + 455.6$		
		1	355,7	18,86
1,2	5	$0.7278B^3 - 60.04 B^2 + 1195 B + 427.3$		
		1	134,9	11,61
0,8	6	$-0.1492B^3 - 16.55 B^2 + 527.8 B - 437.7$		
		1	2,64	1,62
1,0	6	$0.7917B^3 - 64.86 B^2 + 1140 B - 1311$		
		0,9982	16310	127,7
1,2	6	$2.351B^3 - 111.9 B^2 + 1657 B - 1933$		
		0,9999	806,2	28,39

Tablo 4.2'de farklı sac levha kalınlıkları ve süzdürme çubuğu yarıçapları için hesaplanan polinom modellerin korelasyon katsayısının 1'e oldukça yakın olduğu dikkate alındığında modellerin başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak bu yöntemde süzdürme çubuğu frenleme kuvveti sadece süzdürme çubuğu batma miktarına bağlı değişmekte olup her bir durum için ayrı model kullanmak gerekmektedir. Bu yüzden sac kalınlığı ve süzdürme çubuğu yarıçapını da birer bağımsız değişken olarak kullanan regresyon modeller geliştirilmiştir.

### 4.3. Regresyon Model

Bu bölümde Tablo 4.1'deki model girişleri kullanılarak, çoklu doğrusal regresyon yöntemi ile model çıkışı olan süzdürme çubuğu frenleme kuvveti hesaplanmıştır.

Modelde, bağımsız değişken olarak tanımlanan sac kalınlığı ve süzdürme çubuğu yarıçapı ile süzdürme çubuğu batma miktarı modele girilerek, bağımlı değişken olarak tanımlanan süzdürme çubuğundan elde edilen frenleme kuvveti hesaplanabilmektedir.

Deneylerden elde edilen 60 veriden 56 tanesi kullanılarak, Bölüm 2.2.2'de tanımlanan Doğrusal (Linear), İkinci Dereceden (Purequadratic), Etkileşimli (Interaction) ve İkinci Dereceden-Etkileşimli (Quadratic) olmak üzere 4 farklı regresyon model oluşturulmuştur. Regresyon modelleri elde etmek için MATLAB Statistics Toolbox 7 kullanılmış ve modellerin doğruluğunu ölçmek ve karşılaştırabilmek için korelasyon katsayısı  $R^2$  ve RMSE değerleri hesaplanmıştır.

Bunun yanında 60 veriden modellerin hazırlanmasında kullanılmayan 4 veri ise modellerin deney sonuçları ile ne kadar uyumlu olduğunun karşılaştırılması için kullanılmıştır.

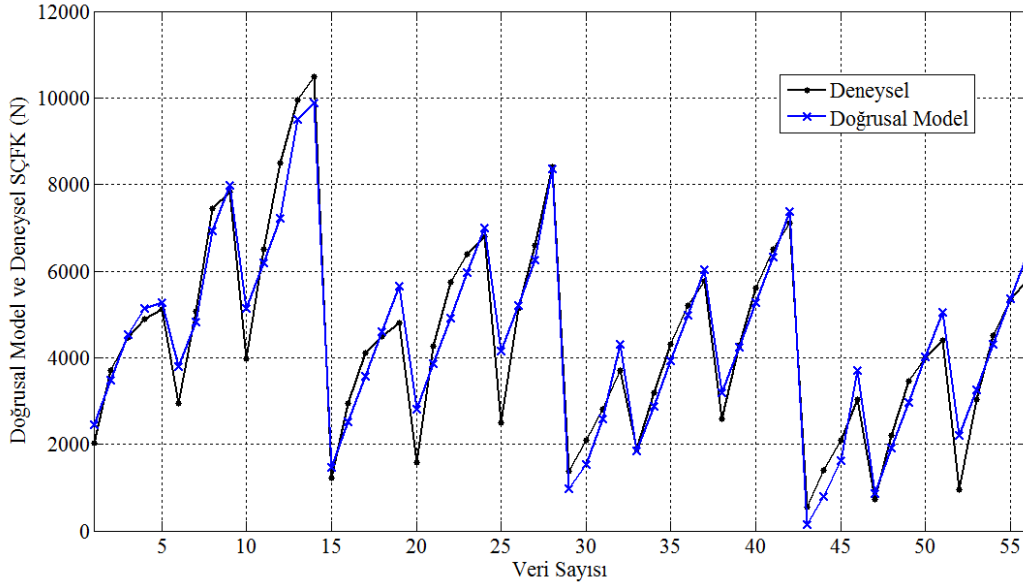
#### 4.3.1. Doğrusal regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (K), süzdürme çubuğu yarıçapı (Y) ve süzdürme çubuğu batma miktarı (B) ile bağımlı değişken süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine (SCFK) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir doğrusal regresyon model elde edilmiştir.

$$SCFK = -1071,78 + 6733,616 * K + 524,124 * Y - 974,194 * B \quad (4.8)$$

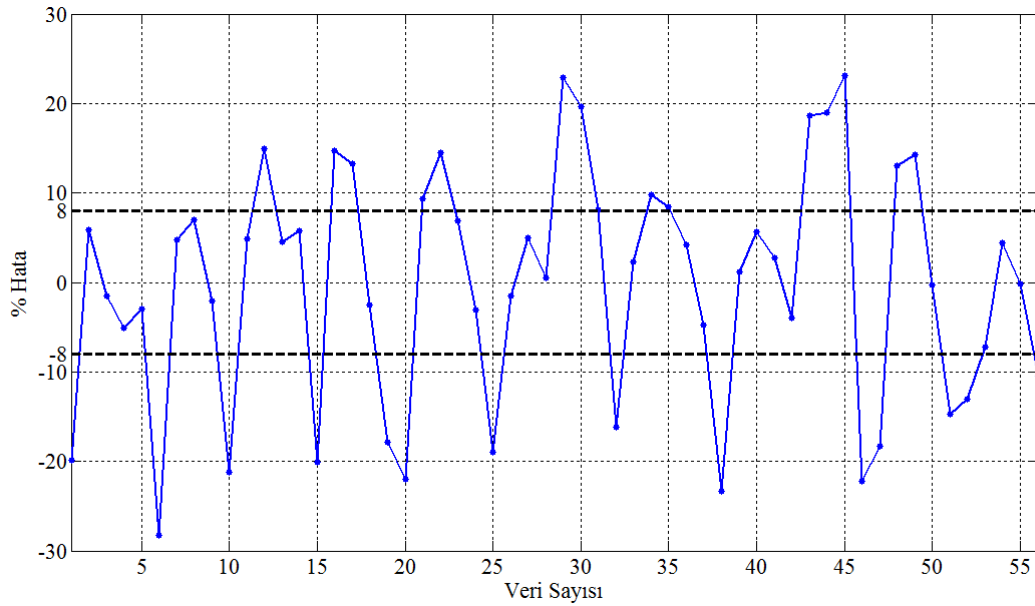
Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, RMSE = 454,23 ve korelasyon katsayısı,  $R^2 = 0,7824$  olarak

hesaplanmıştır. Şekil 4.4’de belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ile doğrusal regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Doğrusal regresyon model ve deneysel SÇFK değerleri

Şekil 4.5’de, Şekil 4.4’de gösterilen model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark, % cinsinden gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Doğrusal regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası

Tablo 4.3’de modelin hazırlanışı sırasında kullanılmayan veriler ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.3. Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Sac Kalınlığı (mm)	Batma Miktarı (mm)	Süzdürme Çubuğu Yarıçapı (mm)	Deneysel Veri	Matematik Model	% Hata
			Frenleme kuvveti (N)	Frenleme kuvveti (N)	
1	6	3	6609,1	5884,01	-10,97
1,2	6	4	6583,25	6256,5	-4,96
0,8	4	5	2101,24	1540,6	-26,68
0,8	2	6	550,36	481,80	12,45

Şekil 4.5 ve Tablo 4.3 incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürde kabul gören %8’lik hata oranının üstünde kaldığı görülmüştür [41].

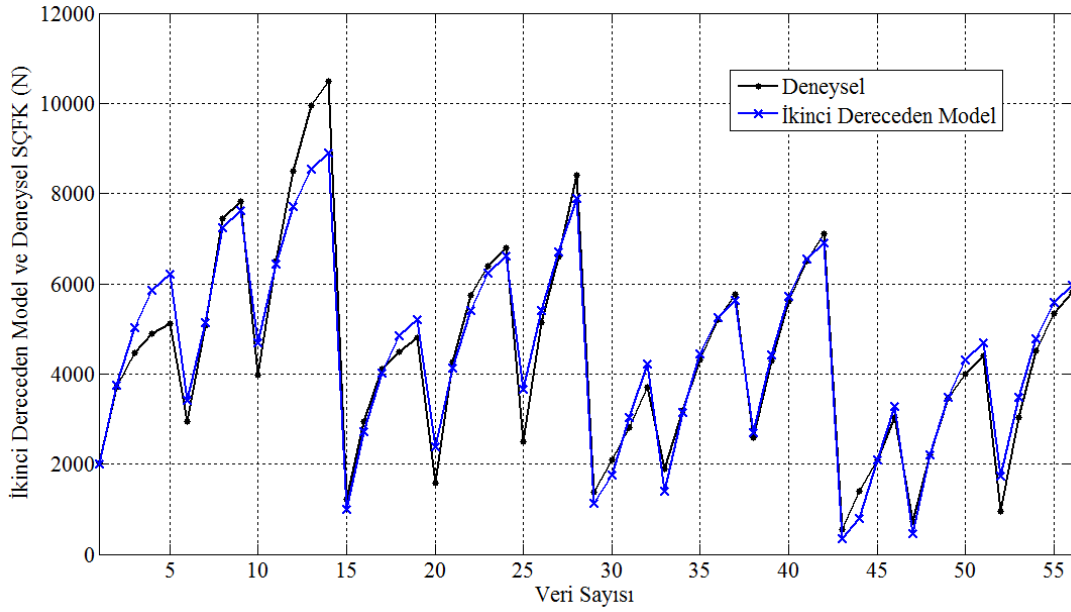
Modelleme yapılırken kullanılan ve kullanılmayan verilerin model sonuçları ile uyumuna bakıldığında kullanılan doğrusal regresyon modelin literatürde kabul gören %8’lik hata payının [41] çok üstünde kaldığı ve güvenilirlik katsayısı olan  $R^2$  nin 0.7824 gibi çok düşük bir oranda kaldığı görülmüştür. Bu yüzden diğer modelleme yöntemleride incelenip en uygun % hata payını ve güvenilirlik katsayısını veren model bulunmaya çalışılacaktır.

#### 4.3.2. İkinci dereceden regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (K), süzdürme çubuğu yarıçapı (Y) ve süzdürme çubuğu batma miktarı (B) ile bağımlı değişken süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine (SÇFK) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir ikinci dereceden regresyon model elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{SÇFK} = & -3715.5 + 9651.3 * K + 1214.2 * Y - 1138.1 * B \\ & -1475 * (K^2) - 57.26 * (Y^2) + 17.56 * (B^2) \end{aligned} \quad (4.9)$$

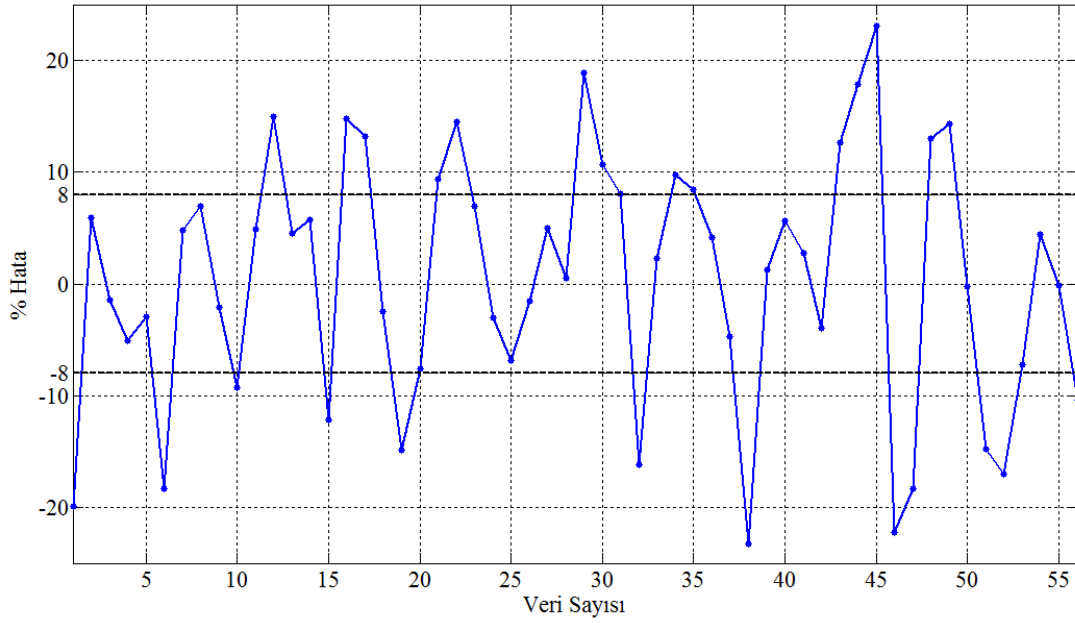
Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü,  $RMSE = 189,45$  ve korelasyon katsayısı,  $R^2 = 0,9612$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.6'da belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ile ikinci dereceden regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.6. İkinci dereceden regresyon model ve deneysel SÇFK değerleri

Şekil 4.7'de, Şekil 4.6'da gösterilen model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark, % cinsinden gösterilmiştir.





Şekil 4.7. İkinci dereceden regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası

Tablo 4.4’de modelin hazırlanışı sırasında kullanılmayan veriler ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.4. Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Sac Kalınlığı (mm)	Batma Miktarı (mm)	Süzdürme Çubuğu Yarıçapı (mm)	Deneysel Veri	Matematik Model	% Hata
			Frenleme kuvveti (N)	Frenleme kuvveti (N)	
1	6	3	6609,1	6428,4	-2,73
1,2	6	4	6583,25	6694,5	1,69
0,8	4	5	2101,24	1750,7	-16,68
0,8	2	6	550,36	735,54	33,64

Şekil 4.7 ve Tablo 4.4 incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürde kabul gören %8’lik hata oranının üstünde kaldığı görülmüştür [41].

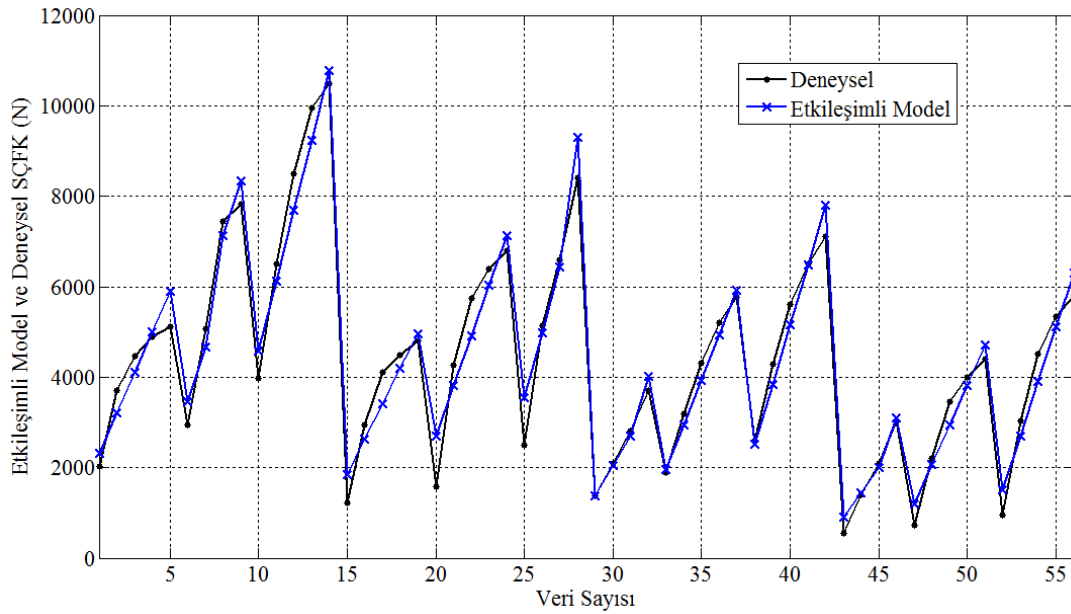
### 4.3.3. Etkileşimli regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (K), süzdürme çubuğu yarıçapı (Y) ve süzdürme çubuğu batma miktarı (B) ile bağımlı değişken süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine

(SÇFK) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir etkileşimli regresyon model elde edilmiştir.

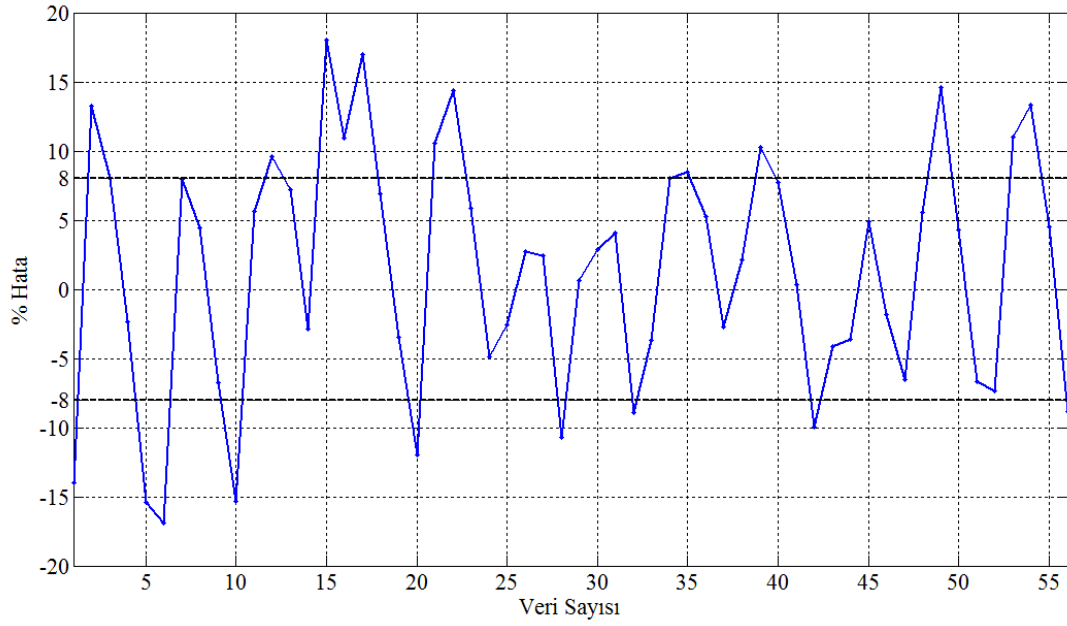
$$\begin{aligned} \text{SÇFK} = & -4039.7 + 8163.2 * K - 32.51 * Y + 751.69 * B \\ & + 819.68 * K * Y - 1384.3 * K * B - 58.3 * Y * B \end{aligned} \quad (4.10)$$

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, RMSE = 353,23 ve korelasyon katsayısı,  $R^2 = 0,8334$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.8’de belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ile etkileşimli regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Etkileşimli regresyon model ve deneysel SÇFK değerleri

Şekil 4.9’da, Şekil 4.8’de gösterilen model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark, % cinsinden gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Etkileşimli regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası

Tablo 4.5’de modelin hazırlanışı sırasında kullanılmayan veriler ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.5. Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Sac Kalınlığı (mm)	Batma Miktarı (mm)	Süzdürme Çubuğu Yarıçapı (mm)	Deneysel Veri	Matematik Model	% Hata
			Frenleme kuvveti (N)	Frenleme kuvveti (N)	
1	6	3	6609,1	5899,3	-10,74
1,2	6	4	6583,25	7533,1	14,43
0,8	4	5	2101,24	2039	-2,96
0,8	2	6	550,36	692,23	25,77

Şekil 4.9 ve Tablo 4.5 incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürde kabul gören %8’lik hata oranının üstünde kaldığı görülmüştür [41].

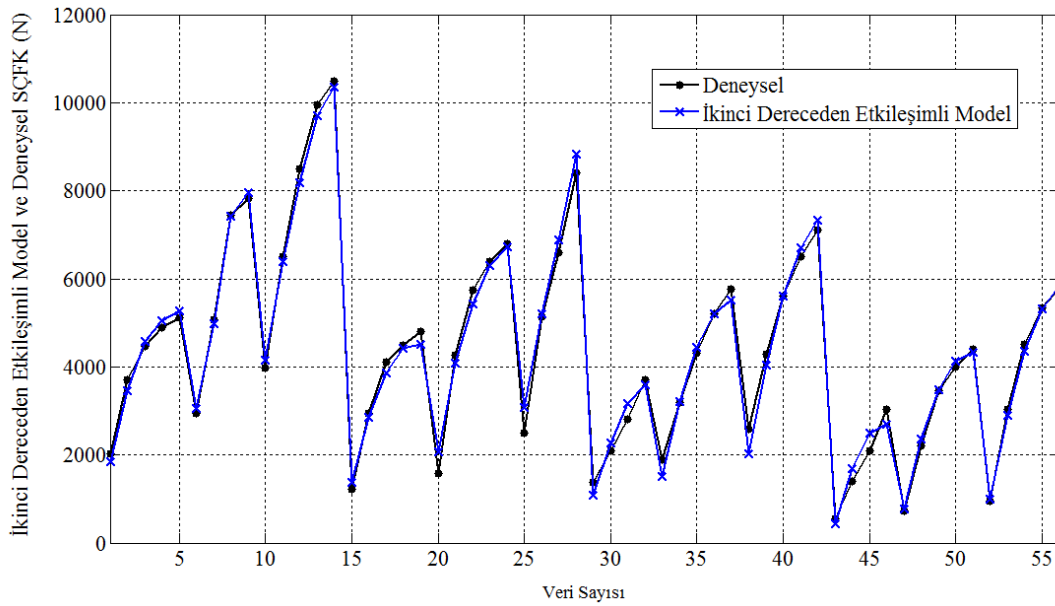
#### 4.3.4. İkinci dereceden etkileşimli regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (K), süzdürme çubuğu yarıçapı (Y) ve süzdürme çubuğu batma miktarı (B) ile bağımlı değişken süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine

(SÇFK) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir ikinci dereceden etkileşimli regresyon model elde edilmiştir.

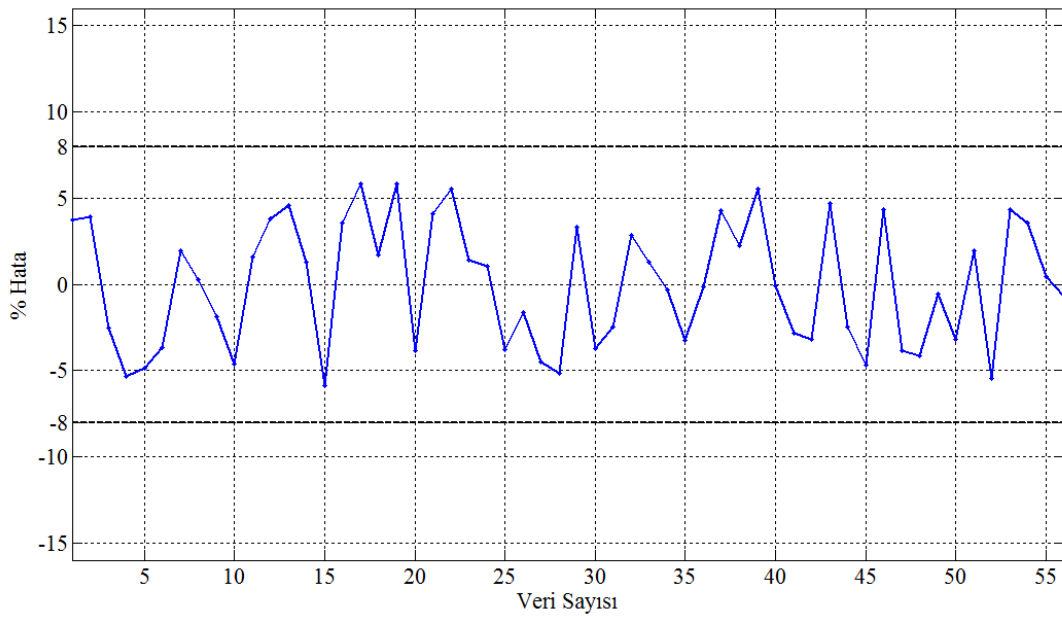
$$\begin{aligned} \text{SÇFK} = & -7002.1 + 11157.2 * K + 665.13 * Y + 706.22 * B + 810.33 * K * Y \\ & - 14497.2 * K * B - 56.87 * Y * B - 1340.5 * K^2 - 57.63 * Y^2 + 10.81 * B^2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, RMSE = 102,21 ve korelasyon katsayısı,  $R^2 = 0,987$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.10'da belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ile ikinci dereceden etkileşimli regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.10. İkinci dereceden Etkileşimli regresyon model ve deneysel SÇFK değerleri

Şekil 4.11'de, Şekil 4.10'da gösterilen model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark, % cinsinden gösterilmiştir.



Şekil 4.11. İkinci dereceden etkileşimli regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası

Tablo 4.6’da modelin hazırlanışı sırasında kullanılmayan veriler ile deneysel veriler karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.6. Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Sac Kalınlığı (mm)	Batma Miktarı (mm)	Süzdürme Çubuğu Yarıçapı (mm)	Deneysel Veri	Matematik Model	% Hata
			Frenleme kuvveti (N)	Frenleme kuvveti (N)	
1	6	3	6609,1	6472,1	-2,07
1,2	6	4	6583,25	6671,31	1,33
0,8	4	5	2101,24	2214,42	5,38
0,8	2	6	550,36	522,17	-5,12

Şekil 4.11 ve Tablo 4.6 incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürde kabul gören %8’lik hata oranının altında kaldığı görülmüş ve modelin süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini, sac kalınlığı, süzdürme çubuğu yarıçapı ve batma miktarı cinsinden tanımlamada başarı ile kullanılabileceği uygun görülmüştür [41]. Sac kalınlığı ve süzdürme çubuğu yarıçapı ile süzdürme çubuğu batma miktarının etkilediği modellerin doğruluğunu ölçmek ve karşılaştırabilmek için hesaplanan korelasyon katsayısı ve RMSE değerleri Tablo 4.7’de görülmektedir.

Tablo 4.7. Oluşturulan regresyon modelleri için hesaplanan  $R^2$  ve RMSE değerleri

Regresyon Model	$R^2$	RMSE
Doğrusal	0,7824	454,23
İkinci Dereceden	0,9612	189,45
Etkileşimli	0,8334	353,23
İkinci Dereceden - Etkileşimli	0,987	102,21

Oluşturulan regresyon modellerin korelasyon katsayıları, RMSE değerleri, Şekil 4.10-4.11’de gösterilen modellerin deneysel veriler ile uyumu ve model sonuçlarının modellerde kullanılmayan verilere olan yakınlığı dikkate alındığında uygun modelin ikinci dereceden-etkileşimli regresyon ile sağlandığı görülmüştür.

İkinci dereceden-etkileşimli regresyon model sonuçları incelendiğinde korelasyon katsayısı 0,987 ile diğer modellere göre en iyi sonucu vermiştir. Bunun yanında deney sonuçlarına ve modellerin hazırlanışı sırasında kullanılmayan 4 veriye, maksimum %8’lik bir hata ile yaklaşarak literatürdeki kabul görmüş hata payı [41] içinde kalmıştır.

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR, TARTIŞMALAR VE ÖNERİLER

Bu tezde sac şekillendirme prosesi esnasında oluşan şekillendirme kusurlarını ortadan kaldırmak veya en aza indirmek amacıyla, kalıp boşluğu içine akan sac malzemenin kontrolü veya belirli bölgelerde düzenlenmesi amacıyla pot çemberi ile birlikte kullanılan süzdürme çubuğunun sac malzeme üzerinde oluşturduğu frenleme kuvveti incelenmiştir.

Süzdürme çubuğundan elde edilen frenleme kuvvetinin kestirimi için deneysel veriler kullanılarak her bir sac kalınlığı ve süzdürme çubuğu yarıçapı için süzdürme çubuğu batma miktarına bağlı olarak frenleme kuvvetini veren kübik polinom modeller elde edilmiştir. Bu modeller incelendiğinde güvenilirlik katsayısı olarakta bilinen korelasyon katsayısının ( $R^2$ ) 0,99'dan daha büyük çıktığı görülmüştür. Ancak bu yöntem, sadece deneylerde kullanılan sac kalınlığı ile süzdürme çubuğu yarıçapları için frenleme kuvvetinin hesaplanabilmesine olanak tanımaktadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak amacıyla sac kalınlığı ve süzdürme çubuğu yarıçapı ile süzdürme çubuğu batma miktarının birer değişken olarak tanımlandığı yeni bir modelin hazırlanması gerekmiştir.

Regresyon yöntemi kullanılarak bu değişkenlerin kullanıldığı farklı modeller hazırlanmış ve bu modeller deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak elde edilen modeller arasından hem deneysel veriler ile en uyumlu olan hem de hataların karelerinin ortalamasının karekökü (RMSE) ve korelasyon katsayısının ( $R^2$ ) hesaplanmasıyla (0,987) ile en başarılı sonucu, ikinci dereceden-etkileşimli regresyon model vermiştir. Güvenirlik katsayısı da denen bu değer 1'e oldukça yakın olması, hesaplanan polinom modelin başarılı sonuç verdiğini ve performansının iyi olduğunu gösterdiğinden dolayı bu model, süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini kullanılan değişkenlere göre tanımlayan model olarak kabul edilmiştir.

Elde edilen bu ikinci dereceden-etkileşimli regresyon model sayesinde herhangi bir deney veya analiz yapmaya gerek kalmadan, sac kalınlığına ve süzdürme çubuğu yarıçapına bağlı olarak süzdürme çubuğu batma miktarı hesaplanabilir. Bu sayede istenen frenleme kuvveti için gerekli batma miktarı bulunabilir.

Bu tezde deneysel çalışma yapılarak süzdürme çubuğundan elde edilen frenleme kuvveti kabul edilen değişkenlere göre ölçülmüş olup, süzdürme kanal boşluğu, süzdürme çubuk yarıçapı ile kanal giriş-çıkış yarıçapı arasında kombinasyonlar ile, yağlama, çekme hızı gibi bazı hususlar üzerinde durulmamıştır. İleriye dönük yapılması önerilen çalışmalar şunlar olabilir;

- Deneyler sırasında sac kalınlığından 1 mm (t+1) daha geniş olacak şekilde kabul edilen süzdürme çubuğu kanal boşluğunun değişiminin, elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine olan etkisi incelenebilir.
- Elde edilen sonuçlar bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile simule edilerek karşılaştırılabilir. Bu yöntem ile deney setinde hazırlanması zor şartlar bilgisayar ortamında hazırlanarak sonuçların frenleme kuvvetine etkisi incelenebilir.
- Farklı özellikteki sac malzemeler kullanılarak, malzeme özelliklerinin elde edilen frenleme kuvvetine etkisi incelenebilir.
- Yağlama, çekme hızı gibi proses parametreleri değiştirilerek, her bir değişkenin elde edilen frenleme kuvvetine etkisi incelenebilir.
- Çekme sonucunda sac malzemelerde oluşan incelmeye ölçülerek elde edilen frenleme kuvvetine karşılık oluşan incelmeye karşılaştırılabilir. Bunun yanında yağlama ve çekme hızının da bu incelmeye olan etkisi incelenebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] <http://www.demircelik.com.tr> (Erişim Tarihi: 15.04.2012)
- [2] <http://www.scribd.com/doc/57839308/Imalat-Yontemleri> (Erişim Tarihi: 27.03.2012)
- [3] <http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming> (Erişim Tarihi: 15.04.2012)
- [4] FIRAT, M., Sheet Metal Forming – Stamping Process from the view point of a Computational Mechanics Engineer, Forming Control Elements, The University of Sakarya, şubat 2004
- [5] TİRYAKİ, A.E., Sac metallerin şekillendirilmesinde kullanılan süzdürme çubuğunun modellenmesi ve kontrolü, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [6] KAWKA, M., WANG, A., Improving drawbeads and friction models simulations of industrial sheet metal forming process, Metal forming in Industry, Conference proceedings, Baden-Baden, 1994
- [7] KELER, S., How we think drawbead work, The Science of Forming 70-71, 2000
- [8] HOSFORD, W.F., CADDELL, R.M., Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, Prince-Hall, NJ, 1993.
- [9] MATTIASSON, K., BERNSPANG, L., Drawbead modelling in sheet metal stamping simulation, Numisheet'99 , Besacon-France, September 1999.
- [10] NINE, H.D., Drawbead forces in sheet metal forming, mechanics of sheet metal forming, Koistinen, D.P., and Wang. N.M., Plenum Press, New York, pp179-210, 1978.
- [11] PENG, Y., RUAN, Y.X., The new calculation method of drawbead restrain forces, Numisheet'99 , Besacon-France, September 1999)
- [12] JANSSON, T., ANDERSSON, A., NILSSON, L., Optimization of draw-in for an automotive sheet metal part An evaluation using surrogate models

- and response surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, 159, pp. 426-434, 2005.
- [13] COURVOISIER, L., MARTINY, M., FERRON, G., Analytical modelling of drawbeads in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 133, pp. 359-370, 2003.
- [14] SAMUEL, M., Influence of drawbead geometry on sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 122, pp. 94-103, 2002.
- [15] KEUM, Y.T., KIM, J.H., GHOO, B.Y., Expert drawbead models for finite element analysis of sheet metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 38, pp. 5335-5353, 2001.
- [16] GHOO, B.Y., KEUM, Y.T., Expert drawbead models for sectional FEM analysis of sheet metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 105, pp. 7-16, 2000.
- [17] BAE, G.H., SONG, J.H., HUH, H., KIM, S.H., PARK, S.H., Simulation-based prediction model of the draw-bead restraining force and its application to sheet metal forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, pp. 123-127, 2007.
- [18] WEI, L., YUYING, Y., Multi-objective optimization of sheet metal forming process using Pareto-based genetic algorithm, *Journal of Materials Processing Technology*, 208, pp. 499-506, 2008.
- [19] FIRAT, M., LIVATYALI, H., GURLER, B., OZSOY, M., An experimental analysis of drawing characteristics of a dual-phase steel through a round drawbead, *Materials and Design*, 31, pp. 1639-1643, 2010.
- [20] SHUHUI, L., ZHONGQIN, L., WEILI, X., YOUXIA B., An improved equivalent drawbead model and its application, *Journal of Materials Processing Technology*, 121, pp. 308-312, 2002.
- [21] CHEN, F.-K., LIU, J. -H., Analysis of an equivalent drawbead model for the finite element simulation of a stamping process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37-4, pp. 409-423, 1997.
- [22] LI, R., WEINMANN K.-J., Formability in non-symmetric aluminium panel drawing using active drawbeads, *Annals of the CRIP*, 48/1, pp. 209-212, 1999.
- [23] SHERIFF, N.M., ISMAIL M.M, Numerical design optimization of drawbead position and experimental validation of cup drawing process, *Journal of Materials Science*, 42, pp. 228-233, 2008.
- [24] LI, R., BOHN, M.L., WEINMANN K.J., CHANDRA, A., A study of the

- optimization of sheet metal drawing with active drawbeads, *Journal of Manufacturing Processes*, 2/4, pp. 205-216, 2000.
- [25] FIRAT, M., An analysis of sheet drawing characteristics with drawbead elements, *Computational Materials Science*, 41, pp. 266–274, 2008.
- [26] LARSSON M., Computational characterization of drawbeads: A basic modeling method for data generation, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, pp. 376-386, 2009.
- [27] OLIVEIRA, M.C., BAPTISTA, A.J., ALVES, J.L., MENEZES, L.F., GREEN, D.E., GHAEI, A., CP908, NUMIFORM'07, *Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications*, pp. 841-846.
- [28] GAVAS, M., IZCILAR, M., Design and application of blank holder system with spiral spring in deep drawing of square cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 171, pp. 274-282, 2006.
- [29] YANG, Y.Y., JIN, Z.H., WANG, R.F., WANG, Y.Z., 2D Elasto-plastic FE simulation of the drawbead drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 120, pp. 17-20, 2002.
- [30] INGARAO, G., LORENZO, R.D., A new progressive design methodology for complex sheet metal stamping operations: Coupling spatially differentiated restraining forces approach and multi-objective optimization, *Computers and Structures*, 88, pp. 625-638, 2010.
- [31] ÇİÇEK, O., Effects of drawbeads in sheet metal forming, M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, Mechanical Engineering, August 2005.
- [32] ZHONGQIN, L., YOUXIA, B., GUANLONG, C., GANG L., Study on the drawbead setting of the large deformation area in a trunk lid, *Journal of Materials Processing Technology*, 105, pp. 264-268, 2000.
- [33] ŞAHİN, R. D. Olasılık ve İstatistik Uygulama 5, Regresyon Analizi, Hacettepe Üniversitesi Aktüerya Bilimleri Haziran 2006.
- [34] BİÇKİCİ, B., Çok değişkenli varyans analizi ve çoklu doğrusal regresyon analizinin uygulamalı olarak karşılaştırılması, Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [35] YILDIZ, N., AKBULUT, Ö., BİRCAN, H., İstatistiğe giriş uygulamalı temel bilgiler çözümlü ve cevaplı sorular, Aktif Yayınevi, Sayfa 247, 2002.
- [36] LEVINE, D.M., RAMSEY, P.P., SMIDT, R.K., *Applied statistics for engineers and scientists*, Prentice Hall, 2001.
- [37] WEISBERG, S., *Applied linear regression*, John Wiley & Sons, Inc., 2005.

- [38] DRAPER, N.R., SMITH, H., Applied regression analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [39] MATLAB, Statistics Toolbox 7 User's Guide, The MathWorks Inc.
- [40] GREEN, D.E. 2002. An Experimental Study of the Effects of Prestrain on Formability Limits, Industrial Research & Development Institute, Midland-Ontario.
- [41] SAMUEL, M., Influence of drawbead geometry on sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, 122, pp. 94-103, 2002.
- [42] <http://www.yildiz.edu.tr/~nguzel/...>  
Egri\_Uydurma\_ve\_En\_Kucuk\_Kareler\_Yontemi.docx (Erişim Tarihi: 26.07.2012)

## ÖZGEÇMİŞ

Derya İRİÇ, 1982 yılında Sakarya'da doğdu. 2001 yılında Ümraniye Lisesi'nden mezun oldu. 2001 yılında Sakarya Üniversitesi Hendek MYO. Bilgisayar Destekli Tasarım Bölümüne girdi. 2003 yılında mezun olduktan sonra 2006 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne girdi. 2009 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl Sakarya Üniversitesinde Makine Tasarım İmalat bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen bu bölümde görevine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir.