

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

**SAC METALLERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE
KULLANILAN SÜZDÜRME ÇUBUĞUNUN
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Yük. Müh. Aysun EĞRİSÖĞÜT TIRYAKI

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Recep KOZAN

Ocak 2010

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SAC METALLERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE
KULLANILAN SÜZDÜRME ÇUBUĞUNUN
MODELENMESİ VE KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ


Mak. Yük. Müh. Aysun EĞRİSÖĞÜT TIRYAKI

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

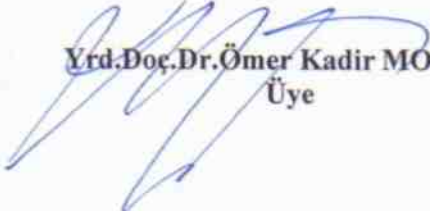
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

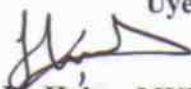
Bu tez 22 / 01 /2010 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Recep KOZAN
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Saadettin AKSOY
Üye


Doç. Dr. Muammer GAVAS
Üye


Yrd. Doç. Dr. Ömer Kadir MORGÜL
Üye


Yrd. Doç. Dr. Hakan MUMCU
Üye

TEŞEKKÜR

Doktora süreci boyunca danışman hocam, Prof. Dr. Recep KOZAN, sahip olduğu bilginin yanı sıra sabrını ve desteğini hiçbir zaman esirgememiŐtir. Katkılarından dolayı kendisine sonsuz teŐekkürlerimi sunarım. Ortak danışman hocam, Yrd. Doç. Dr. Mehmet FIRAT'a katkılarından dolayı teşekkür ederim. Tez izleme komitemdeki hocalarım, Doç. Dr. Saadettin AKSOY ve Yrd. Doç. Dr. Ömer Kadir MORGÜL'e, tez çalışmamdaki eksik noktaların belirlenmesi ve düzeltilmesi sürecinde göstermiş oldukları destek ve ilgiden dolayı teŐekkürlerimi sunarım. Çalışma arkadaşım, Arş. Gör. Sedat İRİÇ'e desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

Tez çalışmama 2006-FBD-028 numaralı proje kapsamında vermiş olduğu maddi destekten ötürü Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı'na teŐekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eşim, İnŐ. Müh. Serhat Y. Tiryaki'ye en içten duygularıyla teşekkür ederim. Tez çalışmamın son aşamalarında dünyaya gelen ve en sıkıntılı anlarımda gülümsemesiyle bana sonsuz mutluluk veren yaşam kaynağım kızım Nehir'e sonsuz teŐekkürler.

Ayrıca benim bu günlere ulaşmamda en fazla emeği geçen ve daima beni destekleyen aileme sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Arş. Gör. Aysun EĞRİSÖĞÜT TİRYAKİ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	5
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	19
1.3. Çalışmanın Ana Hatları	20
BÖLÜM 2. REGRESYON ANALİZİ	22
2.1. Doğrusal Regresyon Modeli	23
2.1.1. Basit doğrusal regresyon modeli.....	23
2.1.2. Çoklu doğrusal regresyon modeli.....	25
BÖLÜM 3. SÜZDÜRME ÇUBUĞUNUN MODELLENMESİ.....	29
3.1. Modellemede Kullanılan Deneysel Verilerin Elde Edilmesi.....	30
3.2. Eğri Uydurma ile Modelleme	34
3.3. Regresyon Model	40
3.3.1. Doğrusal regresyon model	42
3.3.2. İkinci dereceden regresyon model.....	44

3.3.3. Etkileşimli regresyon model	46
3.3.4. İkinci dereceden-etkileşimli regresyon model	48
BÖLÜM 4. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL	51
4.1. Öngörü Modeli	53
4.1.1. Darbe cevabı modeli	54
4.1.2. Basamak cevabı modeli	55
4.1.3. Transfer fonksiyonu modeli	55
4.1.4. Durum uzayı modeli	56
4.2. Amaç Fonksiyonu.....	56
4.3. Kontrol Kuralı	57
4.4. Model Öngörülü Kontrolün Genel Algoritması.....	58
BÖLÜM 5. HAREKETLİ SÜZDÜRME ÇUBUĞUNUN MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ	60
5.1. Süzdürme Çubuğunun Öngörü Modeli.....	61
5.1.1. ARX modeli	62
5.1.2. ARMAX modeli	63
5.1.3. Çıkış-hatası modeli	64
5.1.4. Box-Jenkins modeli	66
5.1.5. Durum-uzayı modeli.....	67
5.2. Model Öngörülü Kontrolör Tasarımı	70
BÖLÜM 6. SONUÇLAR	78
6.1. Analizlerden Elde Edilen Optimum SÇFK'nin MÖK'e Referans Verilmesi.....	78
6.2. Model Öngörülü Kontrolör ile PID Kontrolörün Karşılaştırılması.....	80
6.2.1. Sabit referans altında çalıştırılması	81
6.2.2. Değişken referans altında çalıştırılması.....	83

6.2.3. Bozucu etkiler altında alıştırılması	84
BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	86
7.1. Öneriler.....	87
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ	96

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Durum matrisi
A(q)	: q cinsinden proses çıkışına ait polinom
AKDQ-CR	Alüminyumdan arındırılmış çekme kalitesindeki sac, soğuk haddelenmiş-kaplama yok
ARMA	: Otoregresif hareketli ortalama
ARMAX	: Dış kaynak girişli oto-regresif hareketli ortalama
ARSM	: Uyarlamalı yüzey cevabı
ARX	: Dış kaynak girişli oto-regresif
B	: Giriş matrisi
B(q)	: q cinsinden proses girişine ait polinom
BH210-EG	Fırında sertleştirilmiş, elektro çinko kaplama
BJ	: Box-Jenkins
C	: Çıkış matrisi
C(q)	: q cinsinden hataya ait polinom
D	: Direkt transmisyon matrisi
D(q)	: q cinsinden hataya ait polinom
D(t)	: Bozucu büyüklük
d[t + j t]	: Gelecekteki öngörülen bozucu
DP600-HDG	Dual faz, sıcak daldırma çinko kaplama
du_{max}	: Giriş işaretindeki maksimum değişim
du_{min}	: Giriş işaretindeki minimum değişim
e(t)	: Hata
EMBR	: Elektromanyetik baskı plakası
E_{SÇFK}	Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin referans değeri ile proses cevabı arasındaki hata
F(q)	: q cinsinden proses girişine ait polinom

FLC	: Şekillendirme sınır eğrisi
FLD	: Şekillendirme sınır diyagramı
G	: Bozucu büyüklük matrisi
h_i	: Sisteme uygulanan giriş (darbe, basamak)
HKT	: Hataların kareleri toplamı
HSLA-CR	: Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik, soğuk haddelenmiş- kaplama yok
HSLA-HDG	: Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik, sıcak daldırma çinko kaplama
IA	: Ters yaklaşım
K	: Pekleşme katsayısı
K_d	: Türevsel kazanç katsayısı
K_I	: İntegral kazancı katsayısı
K_P	: Oransal kazanç katsayısı
M	: Malzeme özelliklerine ait parametre
MÖK	: Model öngörülü kontrol
N	: Pekleşme üssü
N_1	: En küçük öngörü ufku
N_2	: Öngörü ufku
n_a	: Modele çıkış işaretinin kaç örnekleme zamanı gerisine kadar olan kısmının katılacağını gösteren model derecesi
n_b	: Modele giriş işaretinin kaç örnekleme zamanı gerisine kadar olan kısmının katılacağını gösteren model derecesi
n_c	: Hataya ait C(q) polinomunun derecesi
n_d	: Hataya ait D(q) polinomunun derecesi
n_f	: Proses girişine ait F(q) polinomunun derecesi
n_k	: Giriş-çıkış arasındaki gecikmeyi gösteren model derecesi
N_u	: Kontrol ufku
OE	: Çıkış-hatası
P	: % Batma miktarı
P	: Süzdürme çubuğunun batma miktarı (yüksekliği)
PI	: Orantısal-İntegral
PID	: Orantısal-İntegral-Türev

PI	: Orantısal artı integral kontrolör
Q	: Zamansal kaydırma operatörü
QP	: Karesel programlama
R	: Anizotropi faktörü
R_1	: Dişi süzdürme çubuğu yarıçapı
R_2	: Erkek süzdürme çubuğu yarıçapı
R^2	: Korelasyon katsayısı
RMSE	: Hataların kareleri ortalamasının karekökü
$R_{SÇFK}$: Referans süzdürme çubuğu frenleme kuvveti
RSM	: Cevap yüzey metodu
SÇFK	: Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti
SE	: Sonlu elemanlar
SISO	: Tek giriş-tek çıkış
SPCC	: Soğuk haddelenmiş sac çelik
SQP	: Ardışık karesel programlama
SSE	: Hataların kareleri toplamı
T	: Örnekleme anı
t_0	: Sac kalınlığı
T_s	: Örnekleme zamanı
$U(t)$: Porses girişi, kontrol çıkışı
$U[t-i]$: Proses girişi u'nun geçmiş değeri
$u[t + j t]$: Gelecekteki öngörülen kontrol çıkışı
u_{max}	: Kontrol çıkışının maksimum değeri
u_{min}	: Kontrol çıkışının minimum değeri
w_j	: Ağırlık matrisi
X	: Durum vektörü
$y(t)$: Proses çıkışı (cevabı)
$\hat{y}(t + j t)$: Gelecekteki öngörülen proses çıkışı
y_0	: Çıkışın başlangıç değeri
y_{max}	: Proses cevabının maksimum değeri
y_{min}	: Proses cevabının minimum değeri
y_r	: Referans çıkış

$\Delta \mathbf{u}(t)$: Şu anki proses girişi ile bir adım önceki giriş arasındaki fark
 $\lambda(j)$: Kontrol ağırlıkları matrisi

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Flanş verme işlemi [3]	2
Şekil 1.2. Çekme işlemi [3]	2
Şekil 1.3. Gererek şekillendirme işlemi [3].....	2
Şekil 1.4. Sac metal şekillendirmede en sık rastlanan kusurlar [5]	4
Şekil 1.5. Sac şekillendirme kalıplarında kullanılan süzdürme çubuğunun şematik gösterimi	4
Şekil 1.6. Hareketli süzdürme çubuğu ile sac metal şekillendirme kalıbının şematik gösterimi	20
Şekil 2.1. Doğrusal ilişkinin grafik gösterimi [63]	23
Şekil 2.2. Üç regresyon katsayısına sahip çoklu regresyon modelinin grafik gösterimi [63].....	26
Şekil 3.1. Kesit şekillerine göre süzdürme çubukları ve kanalları [67]	29
Şekil 3.2. 300 tonluk hidrolik pres [68]	30
Şekil 3.3. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti aparatı [68]	31
Şekil 3.4. A/SP kanal çekme kalıbı şematiği[68]	32
Şekil 3.5. Kare süzdürme çubuğu ölçüleri a) genişliği, b) yarıçapları ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 4$ mm) [68]	32
Şekil 3.6. % batma miktarının şematik gösterimi, a) % 0 batma, b) % 100 batma [68]	33
Şekil 3.7. AKDQ-CR 0,7 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata.....	35

Şekil 3.8. AKDQ-CR 1,2 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata.....	36
Şekil 3.9. HSLA-HDG 0,8 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata.....	37
Şekil 3.10. HSLA-CR 1,2 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata.....	38
Şekil 3.11. BH210-EG 0,8 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata.....	38
Şekil 3.12. DP600-HDG 1,2 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata.....	39
Şekil 3.13. Süzdürme çubuğu modeli giriş ve çıkışları.....	41
Şekil 3.14. Farklı malzemelere ait M değerleri	42
Şekil 3.15. Doğrusal regresyon modele göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin değişim grafiği	43
Şekil 3.16. Doğrusal regresyon model ve deneysel süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri.....	44
Şekil 3.17. İkinci dereceden regresyon modele göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin değişim grafiği	45
Şekil 3.18. İkinci dereceden regresyon model ve deneysel süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri	46
Şekil 3.19. Etkileşimli regresyon modele göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin değişim grafiği	47
Şekil 3.20. Etkileşimli regresyon model ve deneysel süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri	48

Şekil 3.21. İkinci dereceden-etkileşimli regresyon modele göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin değişim grafiği	49
Şekil 3.22. İkinci dereceden-etkileşimli regresyon model ve deneysel süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri.....	50
Şekil 4.1. Model öngörülü kontrolün genel yapısı [70]	51
Şekil 4.2. Model öngörülü kontrolün temel prensibi [71].....	53
Şekil 4.3. Darbe cevabı modeli [70]	54
Şekil 5.1. Hareketli süzdürme çubuğunun kapalı çevrim kontrolüne ait blok diyagramı	60
Şekil 5.2. Öngörü modelinin oluşturulmasına ait akış diyagramı	61
Şekil 5.3. ARX model çıkışları ve deneylerden ölçülen SÇFK değerleri	63
Şekil 5.4. ARMAX model çıkışları ve deneylerden ölçülen SÇFK değerleri.....	64
Şekil 5.5. Çıkış-Hatası model çıkışları ve deneylerden ölçülen SÇFK değerleri	65
Şekil 5.6. Box-Jenkins model çıkışları ve deneylerden ölçülen SÇFK değerleri	67
Şekil 5.7. Durum-uzay modeli çıkışları ve deneylerden ölçülen SÇFK değerleri	69
Şekil 5.8. Süzdürme çubuğu için tasarlanan model öngörülü kontrol benzetim modeli	70
Şekil 5.9. N_u kontrol ufkunun değişiminin kontrol performansına etkisi a) M1 kodlu malzeme için $u(t)$ kontrol sinyali değişimi, b) M1 kodlu malzeme için proses cevabı, c) M2 kodlu malzeme için $u(t)$ kontrol sinyali değişimi, d) M2 kodlu malzeme için proses cevabı.....	73
Şekil 5.10. N_2 öngörü ufkunun değişiminin kontrol performansına etkisi a) M1 kodlu malzeme için $u(t)$ kontrol sinyali değişimi, b) M1 kodlu malzeme için proses cevabı, c) M2 kodlu malzeme için $u(t)$ kontrol sinyali değişimi, d) M2 kodlu malzeme için proses cevabı.....	75
Şekil 5.11. Hareketli süzdürme çubuğunun model öngörülü kontrol arayüzü	77

Şekil 6.1. Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin model öngörülü kontrolü (Ref=69,77 N/mm)	78
Şekil 6.2. Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin model öngörülü kontrolü (Ref=112 N/mm)	79
Şekil 6.3. Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin model öngörülü kontrolü (Ref=296 N/mm)	80
Şekil 6.4. Süzdürme çubuğu için tasarlanan PID kontrollü benzetim modeli	81
Şekil 6.5. MÖK ve PID kontrol altında sabit referans değeri için proses cevabı a) düşey eksen yakın görünüşü, b) yatay eksen yakın görünüşü	82
Şekil 6.6. MÖK ve PID kontrol altında değişken referans için proses cevabı a) Basamak fonksiyonu, b) Sinüs fonksiyonu	84
Şekil 6.7. MÖK ve PID kontrol altında sabit referans değeri için prosesin bozucu etkiye karşı cevabı	85

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Bağımlı ve bağımsız değişken arasında sık kullanılan ilişkiler	22
Tablo 3.1. SÇFK'ni kestirmek için oluşturulan polinom modellerin performansına ait veriler	40
Tablo 3.2. Sac malzeme özellikleri ve kalınlıkları [68]	41
Tablo 3.3. Oluşturulan regresyon modeller için hesaplanan R^2 ve RMSE değerleri	50
Tablo 5.1. Oluşturulan öngörü modellerinin karşılaştırılması	69

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Sac Metal Şekillendirme, Süzdürme Çubuğu, Model Öngörülü Kontrol

Günümüzde otomotiv sektörü başta olmak üzere sac metal malzemeleri şekillendirme işlemi hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Buruşma, yırtılma ve geri esneme gibi kusurlar sac şekillendirme sırasında oluşan en bilindik kusurlardır. Bu gibi kusurlara genellikle sac malzemenin kalıp boşluğuna kontrolsüz ve istenmeyen bir oranda akışı neden olur. Sac malzemenin akışını kontrol etmek için bazı yöntemler kullanılır. Bunlar baskı plakası kuvvetinin ayarlanması ve kalıp ile sac yüzeyleri arasındaki sürtünmenin azaltılması gibi. Ancak bu yöntemler sadece sac malzemenin tamamının genel akışını düzenlemek için kullanılabilir. Malzeme akışını belirli bölgelerde düzenleyen süzdürme çubuğunun batma miktarının ayarlanmasıyla oluşturulan kontrol edilebilir frenleme kuvveti şekillendirilebilirliği iyileştirebilir.

Bu çalışmada, ilk olarak süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini kestirmek için bir matematiksel model geliştirildi. Modelde sac malzeme özellikleri, sac kalınlığı ve süzdürme çubuğunun batma miktarına bağlı süzdürme çubuğu frenleme kuvveti hesaplanabilmektedir. Matematiksel modelin sonuçları ile literatürdeki deneysel veriler karşılaştırılmış ve süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine ait kestirimler deney sonuçları ile oldukça iyi uyum göstermiştir.

Geliştirilen matematiksel model süzdürme çubuğunu temsil etmek üzere kullanılmış ve sac üzerinde istenen frenleme kuvvetini sağlamak için batma miktarını ayarlayan bir model öngörülü kontrolör geliştirilmiştir. Model öngörülü kontrolör farklı referanslar altında çalıştırılmış ve elde edilen proses cevabı referansları oldukça yakından kararlı bir şekilde yakalamıştır.

MODELLING AND CONTROL OF DRAWBEAD USED IN SHEET METAL FORMING

SUMMARY

Keywords: Sheet Metal Forming, Drawbead, Model Predictive Control

Nowadays, sheet metal forming process is used in almost every area especially in the automotive industry. The defects such as wrinkles, fractures and springback are common failures that usually occur on the sheets during sheet metal forming process. Such failures are caused by the use of an unwanted and uncontrolled flow rate of the sheet material. A number of techniques generally are used to control of the flow rate of the metal sheet: regulating the blank holder force and reducing the friction between the die and metal sheet surfaces. However, these techniques can only be used to regulate the overall flow rate of the whole metal sheet. A controllable restraining force caused by adjusting the penetration of drawbeads, which are regulated the flow rate at certain parts of the sheet, can improve the formability.

In this study, mathematical model was developed to predict drawbead restraining force. Drawbead restraining force depends on material properties, sheet thickness and penetration of the drawbead can be calculated with model. Comparison of the results of mathematical model with the corresponding experimental results shows that the predictions of drawbead restraining force in excellent agreement with experimental data in the literature.

Furthermore, model predictive controller regulated penetration of drawbead to obtain reference of drawbead restraining force was developed. Model predictive controller was run with given different references and obtained process response closed to reference in a stable manner.

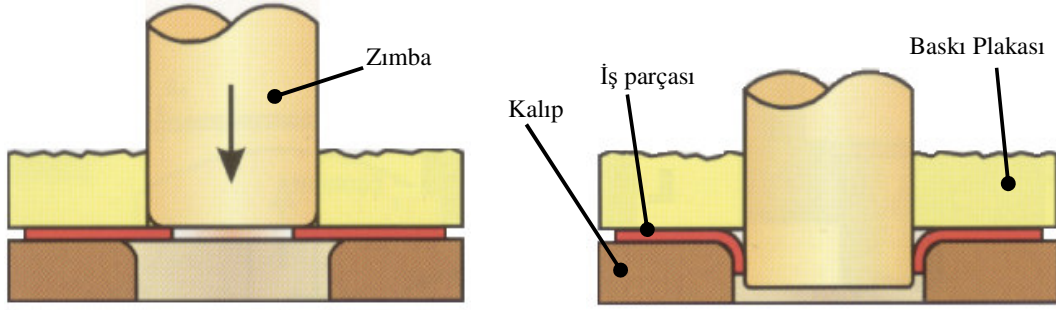
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde sac metal şekillendirme işlemi, başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisi uzun yıllardır dünya ekonomisini etkileyen en önemli sektörlerden biri olmuş ve sektörde maliyet, kalite, ürün çeşitliliği gibi birçok nedene dayanan güçlü bir rekabet söz konusu haline gelmiştir. Günümüz rekabet ortamında otomotiv şirketlerinin kendilerine yer bulabilmek adına araç üretiminde karşılaşılan problemleri en etkin yollarla çözmeye çalışmasıyla birlikte pek çok teknolojik ve bilimsel gelişim ortaya çıkmıştır.

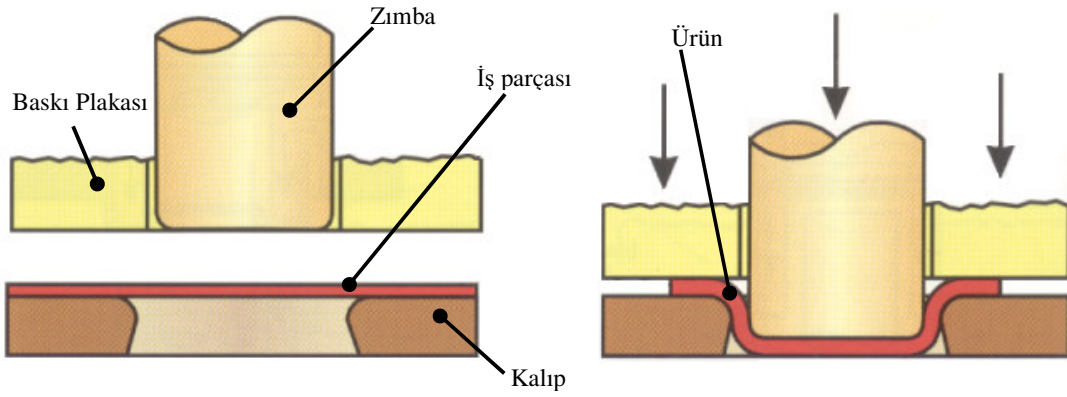
Günlük hayatta kullanılan bir binek araç ortalama 4000 kadar mekanik elemandan oluşmakta [1] ve bu ihtiyaçlar oldukça karmaşık üretim ve montaj süreçlerini içermektedir. Diğer taraftan bir aracı oluşturan ana taşıyıcı ve gövde sisteminde kullanılan sac levha malzemelerin şekillendirme işlemleri araç üretiminde önemli bir orana sahiptir. Sac şekillendirme işleminde bükme, çekme, gererek şekillendirme gibi yöntemlerden birisi kullanılmaktadır.

Bükme işlemi sac metal malzemenin belli bir eksen etrafında döndürülerek plastik deformasyona uğraması prensibine dayanan bir şekillendirme işlemidir ve bu işlem esnasında malzeme alanında değişim yok denecek kadar azdır [2]. Bükmenin endüstriyel alanda en çok bilinen uygulaması flanş verme işlemidir (Şekil 1.1). Flanş işleminde, zımbanın alt formunun şekillendirmeye etkisi yoktur, zımba kenarı ile kalıp kenarı arasında saca şekil verilir.

Çekme işlemi endüstride en çok karşılaşılan sac metal şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Mekanik ya da hidrolik olarak oluşturulan baskı altında, malzeme üzerinde çekme geriliminin oluşturduğu plastik şekil değiştirme sonucu saca şekil verilir. Sac kalınlığında belli bölgelerde bir miktar incelme meydana gelmektedir. Şekil 1.2'de basit bir çekme işlemi görülmektedir.

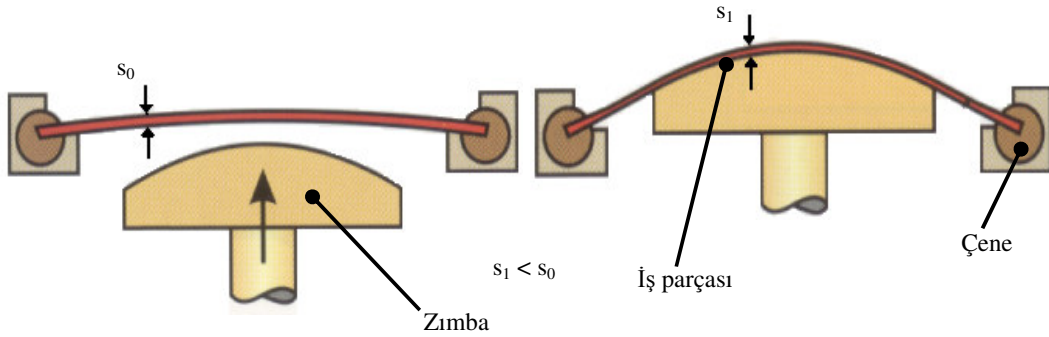


Şekil 1.1. Flanş verme işlemi [3]



Şekil 1.2. Çekme işlemi [3]

Gererek şekillendirme işlemi, iki-eksenli çekme gerilmeleri altında sac malzeme yüzeyinin orantısız olarak arttığı imalat şekillendirme işlemidir. Genellikle iki ucundan veya bazen tüm çevresi boyunca çenelere bağlanan sac malzeme istenen formdaki zımbayla gerilerek şekillendirilir (Şekil 1.3).

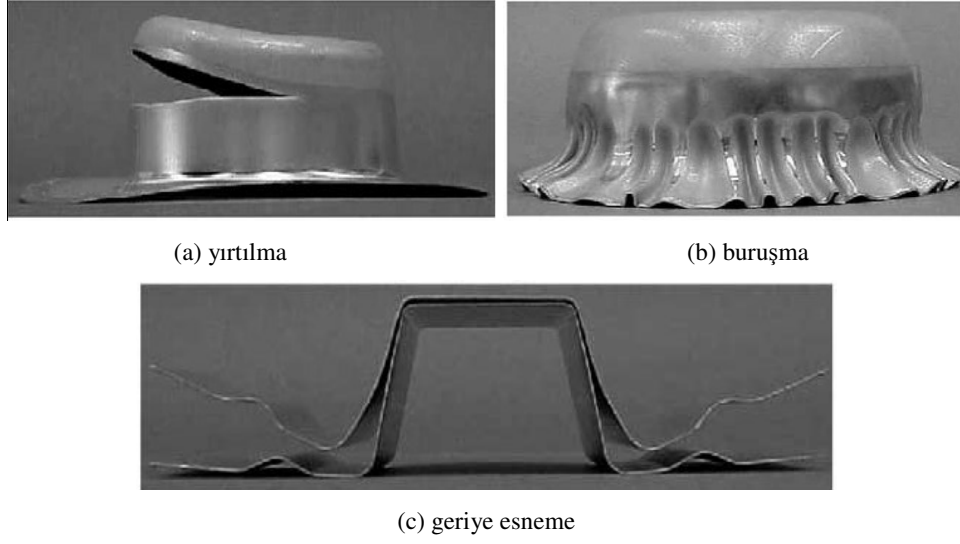


Şekil 1.3. Gererek şekillendirme işlemi [3]

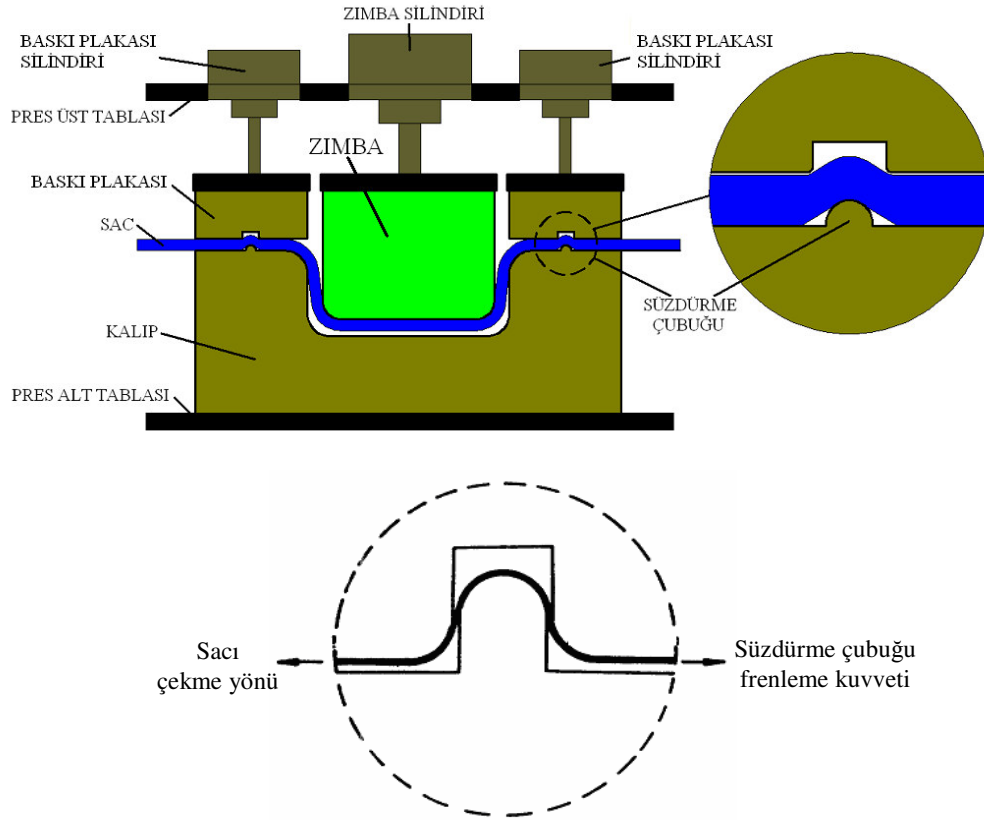
Montajda ve nihai ürün performansında oluşacak problemlerden kaçınmak için şekillendirilen parçanın kalitesi önemlidir. Sac plastik deformasyona uğrayarak şekillenmektedir. Sac levhaların şekillendirilmesi sırasında sac kalınlığında istenenden daha farklı bir değişim olursa sacda buruşmalar ya da yırtılmalar görülmektedir. Başarılı olarak yapılmış bir şekillendirme işleminden sonra karşılaşılan diğer bir problem ise; şekillendirilmiş parça geometrisi üzerinde bulunan elastik yer değişimlerinin, 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 1.4). Bu tür kusurlar genellikle sac malzemenin kalıp boşluğuna kontrolsüz ve istenmeyen oranda akışından dolayı meydana gelmektedir. Değişken baskı plakası kuvveti uygulaması ve kalıp ile sac yüzey arasındaki sürtünmenin azaltılması gibi bir dizi yöntem sac malzemenin kalıp boşluğuna akışını kontrol etmede kullanılabilir. Ancak bu yöntemler sadece sac malzemenin tamamının genel akışını düzenleyebilir. Sac malzemede oluşacak kusurları engellemek veya minimuma indirmek için malzeme akışının belirli bölgelerde düzenlenmesi gerekmektedir. Bu, malzeme akışını gerekli bölgelerde frenleme yaparak engelleyen bir tür kontrol mekanizması olan süzdürme çubuğunun kullanılması fikrini ortaya çıkarmıştır [4].

Sac şekillendirme kalıplarında kullanılan süzdürme çubuğu Şekil 1.5’de görülmektedir.



Şekil 1.4. Sac metal şekillendirmede en sık rastlanan kusurlar [5]



Şekil 1.5. Sac şekillendirme kalıplarında kullanılan süzdürme çubuğunun şematik gösterimi

1.1. Literatür Araştırması

Garcia [6], sac şekillendirme kusurlarından kaçınmak ve şekillendirme prosesinin güvenilirliğini artırmak için sensörler, yapay görme, tanı için sinir ağları ve bulanık mantığa dayanan zeki karar sisteminden oluşan tümleşik bir otomatik kontrol sistemi tasarlamış ve test etmiştir. Bulanık mantığa dayanan bir otomatik kontrol sistemi ve parça durum bilgisini elde etmek için izleme sistemi sayesinde makine parametrelerini (baskı plakası kuvveti ve kuvvet dağılımı) değiştirerek yeni üretilen parçalarda kusurlardan kaçınmaya çalışmıştır.

Koyama ve arkadaşları [7], kare kap derin çekme prosesine dayanan genel bir çekme prosesi için proses bilgisini depolayan bir veritabanı ve sonlu elemanlar yöntemi yardımcı pres kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada bulanık ara yüz proses kontrol için kullanılmıştır. Analizör sensörlerden gelen veriler sayesinde iş parçasındaki deformasyon durumunu tanımlamış ve işlemci tarafından tasarlanan bulanık kurallara dayanan proses kontrolü belirlenmiştir. Bu zeki pres kontrol sistemi sayesinde mühendis uzmanlığından herhangi bir yardım almaksızın hedef şekli elde edebilmişlerdir.

Manabe ve arkadaşları [8], derin çekme prosesi için zımba hızı ve baskı plakası bulanık kontrol kombinasyonunu kullanan yeni bir kontrol sistemi ve yeni geliştirilen derin çekme aparatları ile proses süresince hem baskı plakası baskı kuvveti hem de zımba hızı için on-line eşzamanlı bulanık kontrol sayesinde şekillendirme zamanında %25 azalma ve sabit hıza kıyasla çekme kalitesinde artış sağlamışlardır.

Lorenzo ve arkadaşları [9], derin çekme prosesi için genetik algoritma kullanılan bir bulanık kontrol sistemi tasarlamışlardır. Bulanık kontrolörü eğitmek için gerekli bilgiyi prosesin Sonlu Elemanlar (SE) benzetimleri ile elde etmişlerdir. Kontrolörün geçerliliğini kanıtlamak için tasarlanan kontrolör cevabını test ederek karmaşık üretim proseslerine bulanık kontrolörün uygunluğunu ve bunun gibi uygulamalar için bulanık kontrol sistemlerinin tasarım aşamasında genetik algoritmaların ümit verici bir rolü olduğunu doğrulamışlardır.

Siegert [10], ve arkadaşları derin çekme prosesinde, çekilen parçada buruşma ve yırtılma olmaması için malzeme akışının kontrolünü alt ve üst baskı plakası arasında akan malzemede oluşan sürtünme kuvveti ile sağlamışlar ve zımba hareketine bağlı istenen sürtünme kuvveti eğrisini elde etmek için baskı plakası kuvvetini ayarlayan bir kapalı çevrim kontrol oluşturmuşlardır.

Lo ve Yang [11], baskı plakası kuvvetini ayarlayan yırtılma-buruşma-kontrol olarak adlandırdıkları bir kontrol algoritması geliştirmiş ve referans olarak yan duvarlardaki minimum kalınlık ve flanşın buruşma yüksekliğini vermişlerdir. Kalınlığın ve flanş buruşma yüksekliğinin güvenli sınırlarda kalması için baskı plakası kuvvetini sabit-varyans ve sabit-oran yöntemi ile ayarlamış ve PID (Proportional-Integral-Derivative, Orantısal-İntegral-Türev) kontrolöre giriş olarak vermişlerdir. Sabit-oran yöntemi yüksek hızdaki işlemlerde servo sisteme hızlı tepki gösterme imkanı vermiştir. Her iki durumda da başlangıçta düşük baskı plakası kuvveti uygulamasında optimal düzgün dağılımı elde etmişlerdir. Diğer taraftan, değişken baskı plakası kuvvetinin aynı başlangıç baskı kuvveti için sabit baskı plakası kuvvetine göre daima üstün olduğu sonucuna varmışlardır.

Ahmetoğlu ve arkadaşları [12], alüminyum alaşımlı 2008-T4 kullanılan dikdörtgen şekilli parçaların şekillendirilebilirliği üzerine çalışmışlardır. Buruşma ve yırtılma sınırlarını belirlemiş ve kusurları yok etmek, parça kalitesini iyileştirmek ve çekme derinliğini artırmak için baskı plakası kuvveti kontrolünü geliştirmişlerdir. Kontrol işleminde baskı plakası kuvvetinin sadece zamana bağımlı çalışmasının yeterli olmadığını, konumun da bir fonksiyonu olarak kontrol edilmesi gerektiğini göstermişlerdir.

Hsu [13], sac metal şekillendirmede proses kontrolü, proses kontrolör tasarımı ve referans zımba kuvveti yörüngesi tasarımı olmak üzere iki kısımda geliştirmiştir. Proses kontrol tasarımında, sac metal şekillendirme için elde edilen birinci dereceden nonlineer dinamik model ve kullanılan geri beslemeli PI (Proportional-Integral, Orantısal-İntegral) kontrolör, kap şekillendirmeye uygulanmış ve geliştirilen yaklaşımların başarılı bir şekilde genellenebileceğini göstermiştir. Ayrıca elde edilen optimum referans zımba kuvveti yörüngesi deneysel olarak doğrulanmıştır.

Li ve Qianzhu [14], derin çekme prosesinde akıllı sistem ile elde edilen optimal baskı plakası kuvveti ile şekillendirme prosesinin gerçek zamanlı kontrolünü yapmışlardır.

Fenn [15], baskı plakası kuvvetini hesaplamak için alternatif bir metot olarak kapalı-çevrim geri besleme kontrol tekniği kullanmış ve PI kontrolör ile çalışmıştır. Kontrol sistem performansını, üç farklı kalıp geometrisi ve tipik proses değişkenleriyle deneysel olarak test etmiştir.

Liu ve arkadaşları [16], sac metal şekillendirme prosesi optimizasyonu probleminin çözümü için gelişmiş evrimsel stratejiye dayanan bir geri esneme kontrol metodu sunmuştur. Amaç en küçük sac metal şekillendirme geri esnemesini sağlayacak en iyi proses parametrelerini elde etmektir. Deney sonuçları geri esnemenin bu şekilde kontrol edilebileceğini ve etkili olarak azaltılabileceğini göstermiştir.

Yoshida ve arkadaşları [17], yüksek dirençli çelik sacların şekillendirmesinde en zor problemlerden biri olan geri esneme davranışına kalıp boşluğundaki terse bükmenin, alt ölü noktadaki duvar gerilimini artırmanın, kalınlık yönünde basınç uygulamanın, sıcak çalışma şartlarında şekillendirmenin ve baskı plakası kuvveti yokluğunda kalıp omzundaki bükme geriniminin azaltılmasının etkisini araştırmışlardır. Bir parçanın sonlu elemanlar metodu ile benzetimini yaparak geri esneme miktarı kestirmişler ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

Cao ve arkadaşları [18], adımli baskı plakası kuvveti yörüngesi ile birlikte yapay sinir ağlarını kullanarak, benzetimi yapılan alüminyum kanal şekil verme prosesindeki maksimum gerinme ve geri esneme problemini kontrol etmeye çalışmışlardır. Malzeme özellikleri, sac kalınlığı ve sürtünme şartlarında değişimler söz konusu olduğunda tasarladıkları kontrol sistemi kabul edilebilir düzeyde maksimum gerinme ve geri esneme değerlerini sağlamıştır.

Viswanathan ve arkadaşları [19], yapay sinir ağı ve adımli baskı plakası kuvveti yörüngesi kullanarak çelik kanal şekillendirme prosesinde geri esnemeyi kontrol ettikleri çalışmada zımba kuvveti için uydurulan polinom eğrisinin ilk üç katsayısı yapay sinir ağlarının girişini, adımli zımba kuvveti parametreleri de yapay sinir

ağının çıkışını oluşturmuştur. Malzeme özellikleri, kalınlık ve yağlama şartlarında büyük değişimler olduğunda üç nöronlu bir gizli katmanlı sinir ağı ile 10^0 - 12^0 lik geri esneme açısı elde ederek başarılı olarak kontrol edilmiştir.

Hsu ve arkadaşları [5], sac metal şekillendirme prosesine ait model, oldukça iyi izleme performansına sahip bir proses kontrolör ve optimal bir zımba kuvveti yörüngesi geliştirmiştir. U-kanal şekillendirmeden elde edilen deneysel sonuçlar, benzetimler sayesinde uygun bir proses kontrolörün tasarlanabileceğini ve deneyler sayesinde optimal bir referans zımba kuvveti yörüngesinin sentezlenebileceğini göstermiştir. Yine Hsu ve arkadaşları [20], sac metal şekil verme prosesine ait kontrolör tasarımı için gerekli olan proses modelini oluşturmuşlardır. U-kanal şekillendirmede prosesi modellemek için baskı plakası kuvveti ve zımba kuvveti arasındaki matematiksel ilişkiyi tanımlamışlar ve deneysel olarak doğrulamışlardır.

Krishnan ve Cao [21], dairesel olmayan bir parçada parçalı baskı plakası kullanarak her biri için baskı kuvveti yörüngesini belirlemeye çalışmışlardır. Sistem girişi olarak baskı plakası kuvvetini, sistem çıkışı olarak ise buruşma eğiliminin bir ölçüsü olan baskı plakasının yer değişimini kullanmışlardır. Sistem parametreleri sürekli olarak belirlenmiş ve kararlı bir ARMA (Auto-Regressive Moving-Average, Otoregresif Hareketli Ortalama) model ile güncellenmiştir. Modeli sistem girişinin ayarlanmasıyla öngörülen baskı plakası kuvvetini kontrol etmek için kullanmışlardır. Önerilen stratejinin doğruluğu için Sonlu Elemanlar benzetimini kullanmışlar ve benzetim sonuçları ARMA modelin çoklu baskı plakası durumunda etkin olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

Cai ve Li [22], çok noktalı şekillendirme prosesinin kontrolüne ait üç anahtar problem tartışmış ve ilgili sayısal yaklaşımlar sunmuşlardır. Çok noktalı şekillendirme prosesi için kalıp tasarımı yapmış ve sacda herhangi bir kusura neden olmayacak optimum şekillendirme yörüngesini hesaplamışlardır. Sayısal örnekler ile önerilen yaklaşımın uygulanabilirliğinin kolay olduğunu göstermişlerdir.

Fillatreau ve arkadaşları [23], metal şekillendirme için yapay zeki tekniklere dayanan bir global kontrol sistemini kurdukları çalışmada kuvvet/akustik ve yapay görme sistemi olmak üzere iki tip geri besleme sensörü kullanmıştır.

Sac metal şekillendirme alanında Northwestern University Advanced Materials Processing Laboratory'da yönetilen araştırmaları özetledikleri çalışmada Cao ve arkadaşları [24], sisteme karşı kendi yaklaşımlarını kusur kestirimi, değişken bir baskı plakası kuvveti tasarımı ve kontrolü ve yerel adaptif kontrolörler ile parçalı kalıp tasarımı alanındaki bireysel projelerini özetleyerek vermişlerdir.

Michler [25], sac metal şekil verme prosesinin kontrolünü süzdürme çubukları üzerine kurmuştur. Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini süzdürme çubuğu konumu ve hızının bir fonksiyonu olarak Sonlu Elemanlar yöntemi kullanarak benzetimini yapmış ve deney sonuçları ile oldukça uyumlu olduğunu göstermiştir. Kontrol modeli, istenen çıkış olarak süzdürme çubukları frenleme kuvvetini ve kontrol değişkeni olarak da süzdürme çubuklarının konumunu kullanarak oluşturmuştur. Kontrol model ile süzdürme çubukları için optimal bir PI kontrolör tasarlamış ve kontrolörü test ederek iyi çalıştığını göstermiştir.

Bohn [26], hareketli kalıp elemanı olarak süzdürme çubuğu kullanan sac metal şekil verme prosesini optimize etmek için kapalı çevrim bir metot geliştirmiştir. Süzdürme çubuğu yörüngesinin seçiminin çatlama maksimum ulaşılabilir çekme derinliği üzerinde etkileyici bir etkiye sahip olduğunu ve aktif süzdürme çubuğunun şekillendirilebilirliği, parça geometrisini ve kritik noktalardaki gerinim seviyesini etkileyebildiğini göstermiştir. Çalışma, hareketli süzdürme çubuklarının eksenel simetrik olmayan bir parça için şekil verme prosesini iyileştirebildiği ilk deneysel doğrulamayı sağlamaktadır. Deneysel sonuçlar Sonlu Elemanlar metodu kullanılan kestirimler ile iyi uyum göstermiştir. Ayrıca kapalı çevrim yönteminde hareketli süzdürme çubuğu lokal bozucuları elediği için tutarlı bir zımba kuvveti sağlamıştır.

Emblom [27], sığ oval kap şekillendirilirken oluşacak kusurlara engel olmak için hareketli süzdürme çubukları ve hareketli baskı plakası kullanarak kapalı çevrim kontrol çalışmıştır. Süzdürme çubuğu ve baskı plakası kuvveti yörüngesini Sonlu

Elemanlar yöntemi kullanarak nominal yağlama şartları için belirlemiştir. Baskı plakası kuvvetini PID kontrolör ile süzdürme çubuklarını ise bulanık mantık kontrolör ile kontrol etmiştir.

Michler ve arkadaşları [28], bir PI (Proportional Plus Integral Controller, Orantısal Artı İntegral Kontrolör) kullanarak şerit-çekme prosesinin geri besleme kontrolünü gerçekleştirdikleri çalışmada, zımba kuvvetinin istenen kuvvet değerinden sapmasını engellemek için kontrolör süzdürme çubuğunun konumunu ayarlamıştır. Sonuçlar prosese geri besleme kontrolün eklenmesi ile çıkış üzerindeki bozucular gibi istenmeyen girişlerin etkisini azalttığını göstermiştir.

Weinmann ve arkadaşları [29], sac metal şekillendirmede geri besleme kontrolün etkinliğini araştırmak için hidrolik sac metal şerit çekme test düzeneği kurmuştur. Şerit çekilirken hem baskı plakası kuvvetini hem de süzdürme çubuğu dalma miktarını ayarlayabilmişlerdir.

Yang ve arkadaşları [30], sac metal şekillendirmenin 2D elasto-plastik benzetimi için geliştirilen bir statik-kapalı adımlı (implicit) sonlu elemanlar yazılımı ile dairesel ve dikdörtgen şekilli süzdürme çubuğuna sahip çekme prosesinin benzetimini yapmıştır. Süzdürme çubuğu geometrik parametrelerinin, baskı plakasının 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 (daireysel, dikdörtgen) olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca benzetim ile hesaplanan sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmışlar ve iyi bir uyum elde etmişlerdir.

Vahdat ve arkadaşları [31], kap şeklinde parçaların derin çekilmesi sırasında sacdaki düzlemsel anizotropinin ve sac parça ile zımba/kalıp arasındaki sürtünmenin neden olduğu kulak oluşumunu minimuma indirmek için optimum süzdürme çubuğu konturu (açınım ölçüsü) verecek sayısal bir algoritma oluşturmuştur. Sonlu elemanlar yazılımı ile derin çekme prosesinin benzetimi yapılan döngülü bir algoritma kullanarak her bir döngü sonunda hata hesaplanmış ve önceden belirlenen bir

yakınsama ölçütünü yerine getirinceye kadar süzdürme çubuğunun konturu ayarlanarak çevrim tekrarlanmıştır.

Chen ve Tszeng [32], çekme kalıp yüzeyine yerleştirilen süzdürme çubuğunun oluşturduğu sac frenleme kuvvetini hesaplamak için Virtüel İşler prensibine dayanan bir teorik model önermiştir. Modelin doğruluğunu test etmek için çeşitli çeliklere ait süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini hesaplayan sonlu elemanlar benzetimi sonuçları ile birlikte daha önce yayınlanan çalışmalardan alınan deneysel verileri, önerilen teorik model kullanılarak kestirdikleri değerler ile karşılaştırmışlardır. Teorik modelden hesaplanan değerler ve benzetim sonuçları arasında oldukça iyi uyum sağlanırken deneysel veriler ile teorik model arasında ihmal edilen bazı değerler nedeniyle aynı uyumun gözlenmediği sonucuna varmışlardır.

Shuhui va arkadaşları [33], gerçek süzdürme çubuğunun formu yerine kullanmak için geliştirilen bir eşdeğer süzdürme çubuğu matematik modeli geliştirmiştir. Kapı direğinin bağlantı panelinin çekilmesinde 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 kuvvetini geliştirilen eşdeğer süzdürme çubuğu modelinde kullanarak nonlinear sınırlı optimizasyon vasıtasıyla gerçekleştirmişlerdir. Optimizasyondan elde edilen geometri parametrelerinin geçerliliğini panellerin başarılı şekillendirilmesiyle göstermişler ve sonlu elemanlar analizi ile optimizasyon metodunun birlikte kullanımının kalıp tasarımı ve proses planlamada etkili olabileceği sonucuna varmışlardır.

Chen ve Liu [34], 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 benzetimi ile hesaplamışlardır. Hesaplanan frenleme kuvvetini, daha önceki yayınlarda bulunan teorik kestirimler ve deneysel veriler ile doğrulamışlardır.

Courvoisier ve arkadaşları [35], süzdürme çubuğu boyunca akan sac metalin bükme/germe işlemini açıklamak için bir analitik model geliştirmiştir. Malzemenin elastik-plastik olduğunu varsayarak izotropik ya da 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.

Keum ve arkadaşları [36,37], sac metallere şekil verme prosesinin sonlu elemanlar analizinde kullanılan süzdürme çubuğunun çekme karakteristiklerini hesaplayan uzman süzdürme çubuğu modeli geliştirmiştir. İlk olarak bükme teorisi, kasnak denklemi ve Coulomb sürtünme yasasını kullanarak, dairesel, kademeli ve kare süzdürme çubuğu gibi işlem ve ölçüleri farklı temel süzdürme çubuklarının matematiksel modelini çıkarmışlar ve sonra süzdürme çubuğunun çekme karakteristiklerini bulmak için deneyler yapmışlardır. Çekme testi ve matematiksel model arasında çekme karakteristiklerindeki farklılıkları minimize etmek için çoklu lineer regresyon kullanarak, temel süzdürme çubuklarının matematiksel modele dayanan uzman modelini geliştirmişlerdir. Modelleri doğrulamak için; çift dairesel süzdürme çubuğu ve dairesel-kademeli süzdürme çubuğuna ait hesaplanan süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ve çubuk-çıkış ön-gerinimini deneylerden elde edilen değerler ile karşılaştırmışlar ve uzman modelin kestirimlerinin deney sonuçlarına oldukça iyi uyum sağladığını göstermişlerdir. Keum ve arkadaşları [38] bir sonraki çalışmalarında, süzdürme çubuğu ölçüleri ve şekillendirme değişkenlerini kullanarak süzdürme çubuğu uzman modelden hesapladıkları frenleme kuvveti ve süzdürme çubuğu çıkışında sacdaki incelmeyi, sonlu elemanlar benzetiminde süzdürme çubuğu konumuna en yakın düğümün sınır şartları olarak kullanmışlardır. Otomotiv gövde panelinin çekme benzetimi için uygulama yapmışlar ve uzman modeller ile yapılan sonlu elemanlar analizinin genel modellerden daha verimli ve hızlı hesaplama zamanına sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Kim ve arkadaşları [39], tek-dairesel ve tek-kare süzdürme çubuğu için teorik ve deneysel çekme karakteristiklerini incelemişlerdir. Sac parçayı tutma işlemi süresince numunenin üst ve alt yüzeylerindeki gerinim dağılımlarını ve kalıp tepki

kuvvetini sonlu elemanlar metodu ile hesaplamış ve benzetim sonuçlarını deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Çekme boyu ve çekme açısının süzdürme çubuğu frenleme kuvveti üzerine etkisini ve çekme numunelerindeki gerinim dağılımları incelemiş ve hesaplamaları deneylerin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Teorik benzetimler ve sonuçların gerçek durumların kestirimleri için kullanışlı olduğu sonucunu çıkarmışlardır.

Li ve Weinmann [40], özellikle simetrik olmayan panel şekillendirmede, alüminyumun şekillendirilebilirliğini iyileştirebilmek için süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini dikkate alarak üç boyutlu ve zamana bağlı sonlu elemanlar modelini tanımlamışlardır. Deney sonuçları ile sayısal benzetim 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.

Samuel [41], 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 baskı plakası 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. Genellikle benzetim, deneysel sonuçlar ile iyi uyumlu (%8) yatay yer değiştirilmenin bir fonksiyonu olarak süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine cevap verdiğini göstermiştir.

Tang ve arkadaşları [42], şekillendirme prosesinin tasarımı için bir optimizasyon tekniği ve basitleştirilmiş tek adımlı sonlu elemanlar metodunun (ters yaklaşım olarak da adlandırılır) birleşimine dayanan bir sayısal yöntem tanımlamışlardır. Cevap Yüzey Metodu (RSM-Response Surface Methodology) kullanan optimizasyona, gerilme veya gerinme bilgisini sağlamak için başlangıç tasarım aşamasında tek adımlı metodu kullanmışlardır. Üretilen iş parçasına ait önce ve

sonraki iki Şekillendirme Sınır Eğrisi (FLC-Forming Limit Curve) optimizasyonu arasındaki karşılaştırma ve zamana bağlı (explicit) dinamik yaklaşıma dayanan benzetim sonuçları, süzdürme çubuğu optimizasyon tasarım metodunun otomobil gövde panellerinin gerçek tasarım parçalarında başarılı olarak uygulanabileceğini doğrulamıştır.

Naceur ve arkadaşları [43], süzdürme çubuklarının optimum tasarımı için şekillendirme analizlerine ait basitleştirilmiş bir ters yaklaşım (IA-Inverse Approach) ile matematiksel programlama metodlarının birleştirilmesiyle basit ve etkin bir metod önermişlerdir. Kalınlık dağılımını mümkün olduğu kadar düzenli olarak veren optimal süzdürme çubuğu kuvvetlerini SQP (Sequential Quadratic Programming, Ardışık Karesele Programlama) ya da BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfard, Shanno) minimizasyon işlemleri ile belirlemişlerdir.

Jung [44], sac malzemenin kalıp boşluğu içine çekilerek şekil verilmesi süresince oluşan sac malzeme akışını kontrol etmek için kullanılan süzdürme çubuğu prosesini statik-zamana bağlı metod kullanarak analiz etmiştir. Analizlerin doğruluğunu daha önceden geçerliliği kabul edilmiş statik-kapalı adımlı metod ile karşılaştırarak göstermiştir. Metodun yakınsamayı hesaba katmayı gerektirmemesi ve yakınsama probleminden oluşacak iterasyon işlemi olmaması nedeniyle hesaplama zamanını azalttığı için avantaj sağladığını belirtmiştir.

Lee ve arkadaşları [45], süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini kestirmek için düzlemgerinime dayanan yarı-analitik karma membran/bükme metodu geliştirmiştir. Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini sürtünme katsayısı ve süzdürme çubuğu derinliğinin fonksiyonu olarak hesaplamışlardır. Süzdürme çubuğu derinliği arttıkça frenleme kuvvetinin sigmoid olarak arttığını sürtünme katsayısı arttıkça ise frenleme kuvvetinin üstel olarak arttığını göstermişlerdir. Hassasiyet testinde malzeme etkisi olarak, farklı pekleşme modelleri ve akma fonksiyonu göz önüne almışlar ve izotropik pekleşme model ile hesaplamada maksimum süzdürme çubuğu frenleme kuvveti elde ederken kinematik pekleşme için minimum değer kestirmişlerdir. İki uç pekleşme modeli için süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinde yaklaşık %26'lık bir farklılık gözlemlenmiştir. SPCC (Soğuk Haddelenmiş Sac Çelik) çelik için

ölçümler ve hesaplamalar arasındaki karşılaştırmaları dikkate alarak anizotropik pekleşme davranışının süzdürme çubuğu benzetiminde süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini tam olarak kestirmek için dikkate alınmasını önermişlerdir. Özellikle, rapor edilen diğer çalışmalardaki sac metallere için yaklaşık Bauschinger oran hesaba katıldığında hesaplanan süzdürme çubuğu frenleme kuvvetlerinin deneyler ile iyi uyum sağladığını göstermişlerdir.

Han ve arkadaşları [46], genetik algoritmalara dayanan değiştirilmiş Tikhonov düzenlenmiş metodu, süzdürme çubuğu modelin parametrelerini (tarafsız katmanın eğimi ve Bauschinger etki) kestirmek için bir tersine operatör olarak kullanmıştır. Önerdikleri metodun bir uygulaması olarak, üç farklı kalınlık durumunda A-K çelik malzeme sac üzerine etki etmesi için bir yarım dairesel süzdürme çubuğu modeli kullanarak elde edilen ters metodun sayısal sonuçlarının mühendislik problemleri için uygulanabilirliğini ve verimliliğini göstermişlerdir.

Li ve arkadaşları [47], sac metal şekillendirme prosesini optimize etmek için hareketli süzdürme çubuğu teknolojisi kullanılan deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Optimal bir süzdürme çubuğu yörünge şeması belirlemek için çeşitli süzdürme çubuğu yörüngelerini kullanarak bir seri test için oval Al 6111-T4 panelleri çekmişlerdir. Kullanılan sabit süzdürme çubukları hareketli süzdürme çubukları ile değiştirildiğinde çekme derinliğinin % 57'ye kadar arttığını fark etmişlerdir. Hareketli süzdürme çubuklarının geleneksel düz baskı plakası ve sabit süzdürme çubuğu kullanarak şekillendirme ile karşılaştırıldığında Al 6111-T4'ün şekillendirilebilirliğinde iyileşme sağladığı sonucuna varmışlardır.

Fırat [48], kare tip bir süzdürme çubuğu ile otomotiv saclarındaki çekme 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 çıkış kalınlığını hesaplamıştır. Farklı batma seviyeleri için geleneksel çekme kalitesindeki ve yüksek dirençli çelik tiplerine ait elde ettiği kuvvet kestirimlerini deneysel veriler ile karşılaştırdığında yeterince doğru olduğu sonucuna varmıştır. Bununla birlikte, dual-faz çelikler için hesaplamalar ve deneysel sonuçları arasında, %38'e kadar, önemli farklılıklar

bulmuştur. Kestirilen sac çıkış kalınlığı ile ilgili olarak, tüm çelikler için süzdürme çubuğunun orta batma aralığına kadar deneyler ile son derece dikkat çekici iyi korelasyon elde ederken yüksek batma seviyeleri için modelin daha zayıf olduğunu belirtmiştir.

You [49], süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin hesaplanması için elastoplastik sonlu deformasyon sonlu elemanlar metoduna dayanan bir sayısal model tanımlamıştır. Kinematik pekleşme temel yarasını süzdürme çubuğu içinden geçerken oluşan bükme, düzelme ve terse bükme deformasyonundan dolayı çevrim özelliği ile birleştirmiş ve Bauschinger etkiyi hesaba katmıştır. Deneyler ile karşılaştırıldığında kinematik pekleşme malzeme modeline dayanan sonuçların genel izotropik pekleşme malzeme modele dayananandan daha iyi olduğunu kanıtlamıştır.

Larsson [50], sac metal şekillendirme benzetiminde süzdürme çubuklarının modellemesindeki davranış ve etkileri daha iyi anlamak için bir sonlu elemanlar modeli geliştirerek eleman büyüklüğü, birleşme noktası sayısı, malzeme pekleşmesi gibi çeşitli modelleme durumlarını, sürtünme ve kalıp geometrisi gibi bazı proses parametrelerini incelemiştir. Tipik eleman uzunluğu 0.5 mm'den daha fazla olmayan sonlu eleman ağı ve bir karma izotropik/kinematik pekleşme malzeme modeli kullanmanın gerekli olduğu, kaldırma ve frenleme kuvvetlerinin sac kalınlığına fazlasıyla bağlı olduğu, 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.

Fırat ve arkadaşları [51], sınırlı bir grup panel şekillendirme deneyleri kullanarak temas-tipi süzdürme çubuğu elemanlarının doğruluğunu araştırmış ve dairesel bir süzdürme çubuğu ile sac çekme özelliklerinin analitik bir tanımını önermiştir. Çekmedeki ve kalınlık dağılımlarındaki model kestirimlerini üretilen panellerin parça üzerindeki ölçümleri ile karşılaştırmıştır.

Oliveira ve arkadaşları [52], 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 kanal 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 esnemedede genel bir azalmaya eşlik ettiğini göstermişlerdir.

Sheriff ve İsmail [53], dikdörtgen şekilli bir süzdürme çubuğunun konumunu optimize etmek için sonlu elemanlar metodu kullanarak süzdürme çubuğu ile kap çekme prosesinde gerinim ve kalınlık dağılımlarını analiz etmiştir. Benzetim çalışmalarını süzdürme çubuğunun tüm olası konumları için gerçekleştirmiş ve en büyük asal gerinimi veren konumu optimize edilen yer olarak almıştır. Sayısal metot sonuçları ve deneyler arasında iyi uyum olduğunu göstermiştir.

Donglai ve arkadaşları [54], sac şekillendirme prosesinin optimizasyonu ve tolerans kestirimi için verimli bir metot oluşturmuş ve bagaj kapağı dış paneli şekillendirmesinin proses tasarımına uygulamışlardır. Uyarlamalı yüzey cevabının (ARSM- Adaptif Response Surface) optimizasyon için yeterli doğruluğu korurken benzetim sayısının azaltılması için verimli bir yol olduğunu göstermiştir.

Hu ve arkadaşları [55], RSM'ye dayanan birleştirilmiş BBNS (Boundary and Best Neighbor Sampling) zeki örnekleme ile sac metal şekillendirme optimizasyonu önermişler ve benchmark testi için başarılı olarak uygulamışlardır.

Zhongqin ve arkadaşları [56], panel şekillendirme tasarımında çekme prosesinin üç süzdürme çubuğu ayarı için nonlineer sonlu elemanlar metodu kullanarak sayısal olarak benzetimini yapmışlar ve üç süzdürme çubuğu ayarını karşılaştırarak şekillendirme kusurlarından kaçınacak şekilde malzeme akışını kontrol edebilen dikdörtgen ve yarı-dairesel süzdürme çubuğunu içeren ayarları seçmişlerdir. Seçtikleri ayarlar ile bagaj kapağının benzetimini yaparak pratik kalıp modu ile uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Seo [57], sac metal şekillendirme prosesinde sacın hareketinin kontrolü için demir içerikli malzemelerin manyetik çekim gücüne dayanan (EMBR-Elektromagnetic

Blank Restrainer, Elektromanyetik Baskı Plakası) yeni bir teknoloji geliştirmiştir. EMBR kalıp içine yerleştirmiş ve şekillendirme sırasında aktif olarak kontrol etmiştir. EMBR kullanılarak şekillendirilmiş sac incelendiğinde şekillendirme kalitesinin arttığı görülmüştür.

Taherizadeh ve arkadaşları [58], sonlu elemanlar yöntemi kullanarak farklı malzeme modelleri için Numisheet 2005 benchmark'ta kullanılan geri esnemenin kestirimi üzerine çalışılmışlardır. Benzetim ve deneysel sonuçların karşılaştırılması sonucunda modeldeki yüksek gerilimden dolayı, izotropik modelde kestirilen geri esneme yüksek çıkmıştır. Diğer bir deyişle geri esnemenin kestiriminde izotropik nonlineer kinematik pekleşme modelinin izotropik pekleşme modeline göre daha doğru sonuç verdiğini göstermişlerdir.

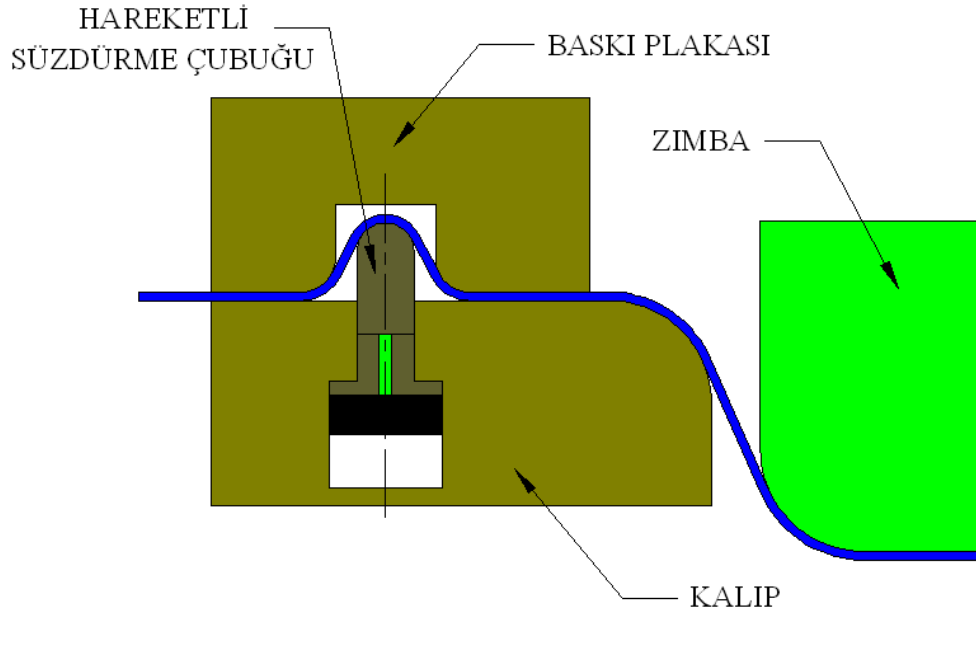
Han ve arkadaşları [59], zamana bağlı dinamik sonlu elemanlar metodu kullanarak bilinen süzdürme çubuğu geometrik parametresine göre maksimum efektif gerilim, maksimum efektif gerinim, ve saçtaki incelme oranını hesaplamışlardır. Yapay sinir ağlarını tersine operatör olarak kullanarak dairesel süzdürme çubuğunun geometrik parametresini bulmuşlardır. Yapay sinir ağının eğitim aşamasında örnekleme metodunu kullanmışlar ve modeldeki örnekler güncellendiğinden yapay sinir ağının yapısını genetik algoritma kullanarak optimize etmişlerdir. Sayısal örnekler ile bu tekniğin etkisini göstererek uzun zaman alan ve büyük bütçelerin gerektiği yöntemlerin yerine genetik algoritma ile birlikte kullanılan yapay sinir ağlarının kullanılabilceği sonucuna varmışlardır.

Çiçek [60], süzdürme çubuklarının kullanımının sac şekillendirmeye 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 kullanılan 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.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Süzdürme çubukları genellikle sabit yükseklikte (saca batma miktarı sabit) üretilir. Yeni bir sac panel üretileceği zaman öncelikle bir deneme kalıbı hazırlanır ve sac çekilir. Tasarlanan kalıp ile başarılı bir şekillendirme elde edilemezse baskı plakası ve/veya süzdürme çubuğu üzerinde değişiklikler yapılır. Süzdürme çubuğunun batma miktarı (yüksekliği) artırılır veya azaltılır, ayrıca tek süzdürme çubuğu tam batma miktarına ulaştığı halde yeterli frenleme kuvveti elde edilemezse ikinci süzdürme çubuğu ilave edilebilir. Bu denemeler oldukça uğraştırıcı, maliyetli ve zaman alıcıdır. Süreç bilgisayar destekli tasarım ve sonlu elemanlar analizleri gibi yöntemler ile minimize edilmeye çalışılmasına rağmen problemler tam olarak çözülememiştir. Prosese etkiyen bozucu büyüklükler gibi nedenlerden dolayı istenen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti (SÇFK) elde edilemeyebilir.

Bu tez çalışmasında, hareketli süzdürme çubukları kullanılarak yani referans bir frenleme kuvveti için süzdürme çubuğunun batma miktarı bir kontrolör ile ayarlanarak sorunlar çözülmeye çalışılmıştır. Ayrıca kontrol edilebilir süzdürme çubukları aynı kalıbı farklı malzemeler ve sac kalınlıklarında da kullanma imkanı vermiştir. Dolayısıyla yeni kalıp maliyeti ve zaman kaybı ortadan kalkmıştır. Şekil 1.6'da hareketli süzdürme çubuğu kullanılan sac metal şekillendirme kalıbının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.6. Hareketli süzdürme çubuğu ile sac metal şekillendirme kalıbının şematik gösterimi

1.3. Çalışmanın Ana Hatları

Tez çalışması 7 ayrı bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1’de konuya giriş yapılarak geçmişten günümüze kadar sac şekillendirme prosesinin kontrolü 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 süzdürme çubuğu hem malzeme bazında eğri uydurma yöntemi ile modellenmiş, hem de malzeme özelliklerinin de değişken kabul edildiği regresyon modeller geliştirilerek bunların içinde en uygun modele karar verilmiştir.

Tezin 4. bölümünde model öngörülü kontrol ve teorisi hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin 5. bölümünde hareketli süzdürme çubuğunu kontrol etmek için model öngörülü kontrolör tasarlanmıştır. Tasarım aşamasında farklı öngörü modelleri hazırlanarak en uygun olanı seçilmiş ve kontrolör parametrelerinin değişik değerleri denenerek en iyi sonucu veren parametre değerleri bulunmuştur.

Tezin 6. bölümünde model öngörülü kontrolöre referans olarak literatürde analiz ve optimizasyon çalışmalarından elde edilen veriler verilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Ayrıca söz konusu proses için bir de PID kontrolör kullanılmıştır. Değişik referanslar için model öngörülü kontrol ve PID kontrollü prosesin cevapları karşılaştırmalı olarak elde edilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Son bölümde yapılan çalışma sonucunda varılan temel sonuçlar paylaşılmış ve bu konuda çalışma yapacak araştırmacılara önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. REGRESYON ANALİZİ

Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi, o konu ile ilgili tahminler ya da kestirimler yapabilmek amacıyla regresyon modeli olarak adlandırılan matematiksel bir model ile tanımlayan bir istatistik analiz tekniğidir. Bağımlı değişken y , bağımsız değişken x kabul edilirse; aralarındaki ilişki,

$$y = f(x) \quad (2.1)$$

fonksiyonu ile gösterilir.

Uygulamada çok karşılaşılan bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişki şekilleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir [61].

Tablo 2.1. Bağımlı ve bağımsız değişken arasında sık kullanılan ilişkiler

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

Regresyon modelleri temelde fonksiyon tipine göre doğrusal regresyon modeli ve doğrusal olmayan regresyon modeli olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan doğrusal regresyon modeli alt başlık olarak verilmiştir.

2.1. Doğrusal Regresyon Modeli

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 [62].

2.1.1. Basit doğrusal regresyon modeli

Basit doğrusal regresyon modeli,

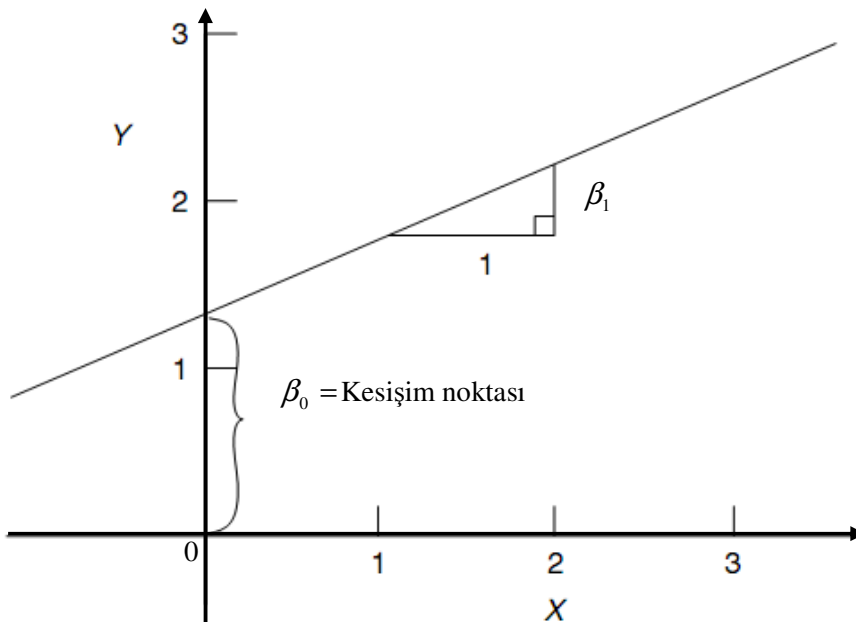
$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad (2.2)$$

olarak gösterilir. Bu eşitlikte β_0 ve β_1 regresyon parametreleri olup,

β_0 = y-eksenini kestiği değer (x=0) olarak başlangıç değerini,

β_1 = Doğrunun eğimi yani x'in birim değişiminde y'de oluşan değişim değerini

ε = Sıfır ortalama ve σ^2 varyansa sahip, normal dağılımlı hata değişim değerini gösterir [62]. Basit doğrusal regresyon modeline ait katsayıların da gösterildiği doğrusal ilişkinin grafik gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Doğrusal ilişkinin grafik gösterimi [63]

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 β_0 ve β_1 değerleri bulunur.

(2.2) nolu eşitlik kullanılarak,

$$\varepsilon = y - \beta_0 - \beta_1 x \quad (2.3)$$

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

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

yazılabilir.

β_0 ve β_1 katsayılarının değerini bulmak için ayrı ayrı *HKT*'nin β_0 ve β_1 'e göre türevleri alınıp sıfıra eşitlenirse,

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

$$\frac{\partial HKT}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) \quad (2.6)$$

elde edilir. (2.5) ve (2.6) nolu eşitlikler sıfıra eşitlenirse,

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

$$\sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0 \quad (2.8)$$

olur. (2.7) ve (2.8) nolu denklemler kullanılarak,

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

$$\beta_0 \sum_{i=1}^n x_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (2.10)$$

normal denklemleri elde edilir. (2.9) nolu eşitlikte β_0 katsayısı çekilirse,

$$\beta_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i - \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i \right)}{n} \quad (2.11)$$

bulunur. (2.11) nolu denklem (2.10) nolu eşitlikte yerine yazılırsa,

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

olur ve bu denklem β_1 için çözüldüğü takdirde,

$$\beta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n \frac{x_i y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{n}} \quad (2.13)$$

bulunur. Eğer,

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

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad (2.15)$$

olarak kabul edilirse ve buna göre (2.13) nolu denklem düzenlenirse,

$$\beta_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.16)$$

olarak elde edilir. β_0 ise (2.11) nolu denklem kullanılarak,

$$\beta_0 = \bar{y} - \beta_1 \bar{x} \quad (2.17)$$

olarak bulunur [63, 64].

2.1.2. Çoklu doğrusal regresyon modeli

k adet bağımsız değişken ile çoklu doğrusal regresyon modeli,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2.18)$$

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

β_0 = y-eksenini kestiği değer ($x=0$) olarak başlangıç değerini,

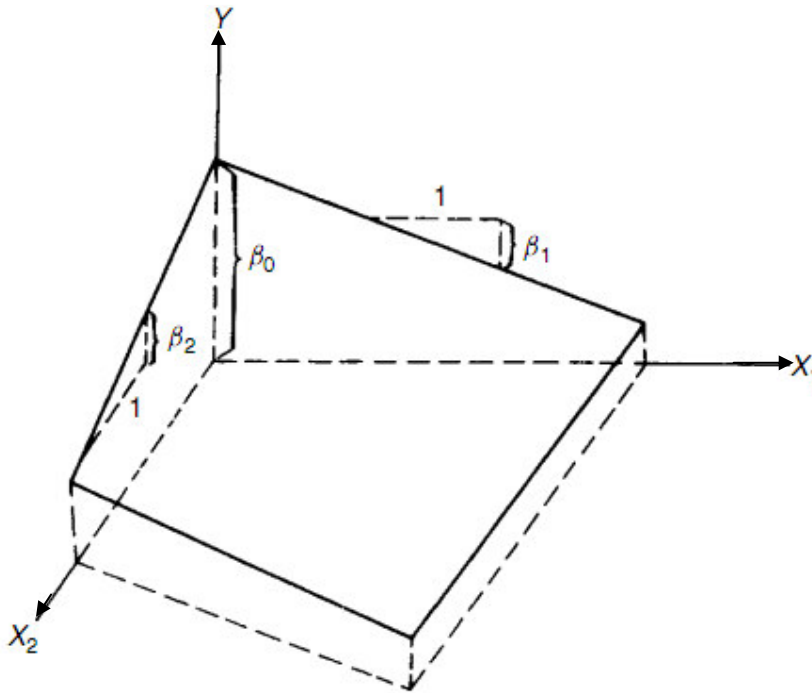
$\beta_1 = x_2, x_3, \dots, x_k$ değişkenleri sabit tutulduğunda x_1 değişkeniyle y'nin eğimi

$\beta_2 = x_1, x_3, \dots, x_k$ 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 [62]. Çoklu doğrusal regresyon modelinde $k=2$ olduğunda Şekil 2.2'de görüldüğü gibi fonksiyon 3-boyutta bir düzleme uyar.



Şekil 2.2. Üç regresyon katsayısına sahip çoklu regresyon modelinin grafik gösterimi [63]

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 (2.18) nolu eşitlikte bulunan terimler matris olarak ifade edilirse,

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

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. (2.18) nolu eşitlik matris formunda ifade edilirse,

$$\mathbf{y} = \mathbf{x}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.20)$$

elde edilir. (2.20) nolu eşitlikten,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{y} - \mathbf{x}\boldsymbol{\beta}) \quad (2.21)$$

bulunur. Hataların kareleri alınırsa,

$$\boldsymbol{\varepsilon}'\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{y} - \mathbf{x}\boldsymbol{\beta})'(\mathbf{y} - \mathbf{x}\boldsymbol{\beta}) \quad (2.22)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}'\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{y}'\mathbf{y} - \boldsymbol{\beta}'\mathbf{x}'\mathbf{y} - \mathbf{y}'\mathbf{x}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\beta}'\mathbf{x}'\mathbf{x}\boldsymbol{\beta} \quad (2.23)$$

elde edilir. $\boldsymbol{\beta}'\mathbf{x}'\mathbf{y}$ (1×1) boyutunda bir matris yani skaler olduğu için, transpozu

$(\boldsymbol{\beta}'\mathbf{x}'\mathbf{y})' = \mathbf{y}'\mathbf{x}\boldsymbol{\beta}$ olmaktadır. Böylece (2.23) nolu eşitlik düzenlenirse,

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

olur. Hataların karelerini minimize edecek $\boldsymbol{\beta}$ matrisini bulmak için (2.24) nolu eşitliğin $\boldsymbol{\beta}$ 'ya göre türevini alıp sıfıra eşitlemek gerekir.

$$\frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}'\boldsymbol{\varepsilon}}{\partial \boldsymbol{\beta}} = -2\mathbf{x}'\mathbf{y} + 2\boldsymbol{\beta}'\mathbf{x}'\mathbf{x} \quad (2.25)$$

$$2\boldsymbol{\beta}'\mathbf{x}'\mathbf{x} - 2\mathbf{x}'\mathbf{y} = 0 \quad (2.26)$$

buradan $\boldsymbol{\beta}$ çekilirse,

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{x}'\mathbf{x})^{-1}\mathbf{x}'\mathbf{y} \quad (2.27)$$

elde edilir ve çoklu regresyon modelin katsayı matrisi bulunmuş olur [63,64].

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

- Doğrusal (Linear) Model:

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

- İkinci Dereceden (Purequadratic) Model:

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

- Etkileşimli (Interaction) Model:

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

- İkinci Dereceden-Etkileşimli (Quadratic) Model:

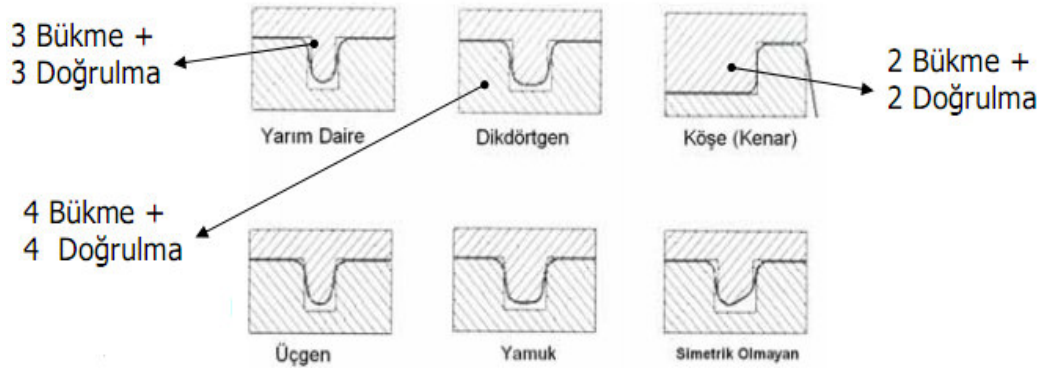
$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + \dots + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + \dots$$

olarak gösterilebilir [65].

BÖLÜM 3. SÜZDÜRME ÇUBUĞUNUN MODELLENMESİ

Süzdürme çubukları, sac metal şekillendirme işleminde malzeme akışını gerekli bölgelerde ayarlayarak daha düzgün dağılımlı bir şekil değişimi elde etmek için kullanılmaktadır. Bükme-doğrulma çevrimleriyle süzdürme çubuğunun malzeme akışına ters yönde oluşturduğu frenleme kuvveti, süzdürme çubuğu geometrisine, proses parametrelerine, sac kalınlığı ve malzeme özelliklerine bağlı değişmektedir [66].

Şekil 3.1’de çekme kalıplarında kullanılan yarım daire, dikdörtgen, köşe (kenar), üçgen, yamuk gibi farklı kesit şekillerine sahip süzdürme çubukları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kesit şekillerine göre süzdürme çubukları ve kanalları [67]

Süzdürme çubuğu ve kanalının çekme kalıbındaki konumunun kararı genellikle Sonlu Elemanlar hesaplaması yapılarak verilmektedir. Ayrıca düzgün dağılımlı bir şekillendirme elde etmek için gereken frenleme kuvvetinin değeri de Sonlu Elemanlar yöntemi yardımıyla elde edilir.

3.1. Modellemede Kullanılan Deneysel Verilerin Elde Edilmesi

Süzdürme çubuklarının modellenmesinde kullanılan veriler A/SP-Enhanced Formability komitesi üyelerinin 1997-2001 yılları arasında tamamladıkları proje içerisinde yapmış oldukları süzdürme çubuğuna ait deneylerden alınmıştır. Proje kapsamında farklı süzdürme çubuğu konfigürasyonları (geometri, sac malzeme özellikleri, yağlayıcı gibi) için süzdürme çubuğu testleri gerçekleştirilmiştir.

Proje kapsamında gerçekleştirilen deneylerde Şekil 3.2’de görülmekte olan 300 tonluk hidrolik pres kullanılmıştır. Tasarladıkları süzdürme çubuğu frenleme kuvveti aparatı (Şekil 3.3), 300 tonluk presi kenarına bağlanabilen bir rijit gövdeye monte edilen 305 mm strok ile 127 mm çapa sahip hidrolik silindiri kapsamaktadır [68].

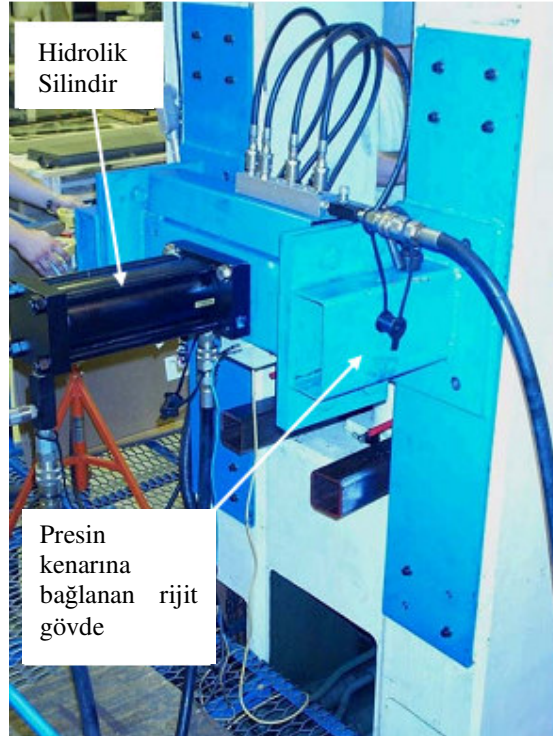


Şekil 3.2. 300 tonluk hidrolik pres [68]

Çalışmada hidrolik silindirin tahriği için 20 beygir gücünde 50 litre/dakika debiye sahip bir pompa kullanılmıştır. Bu silindir yardımıyla 254 mm genişliğindeki sac, kalıp boşluğu içinden 65 mm/sn hız ile çekilebilmektedir [68].

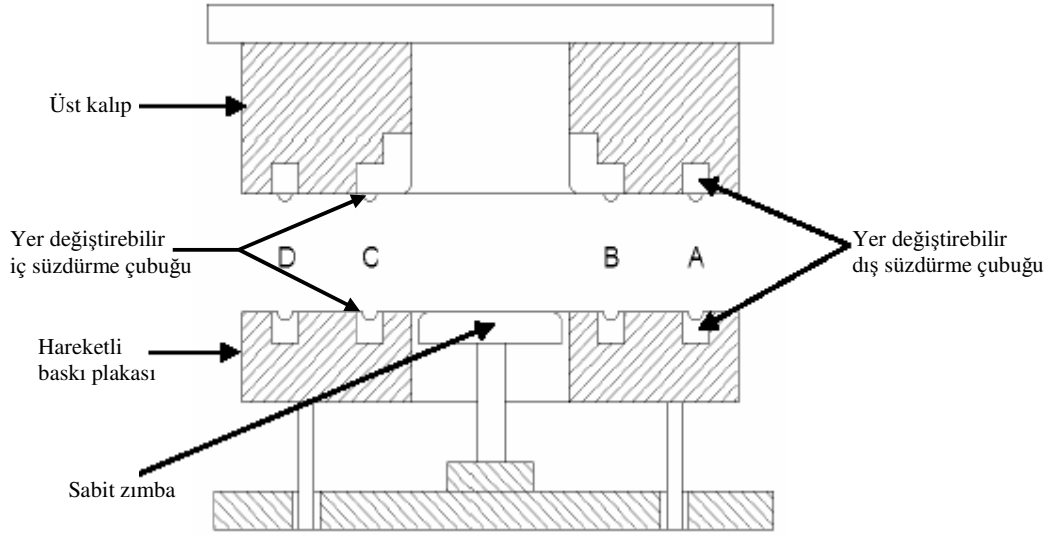
225 kN kapasiteli kuvvet algılayıcı silindir flanşı ile hidrolik tutma çenesi arasına yerleştirilmiştir. Konum algılayıcı ise hidrolik tutma çenesi ile SÇFK aparatı arasına bağlanmıştır. Kalıp kapalı pozisyonda iken sac malzeme çekildiğinden kuvvet

algılayıcı ve konum algılayıcıdan gelen veriler, veri toplama yazılımı yardımıyla kaydedilmiştir. Sistemin çalışması sırasında önemli olan tutma çenesinin ekseni ile kalıp yüzeyinin aynı doğrultuda olması ve ayrıca süzdürme çubuğunun eksenine dik olması gerektiğidir [68].



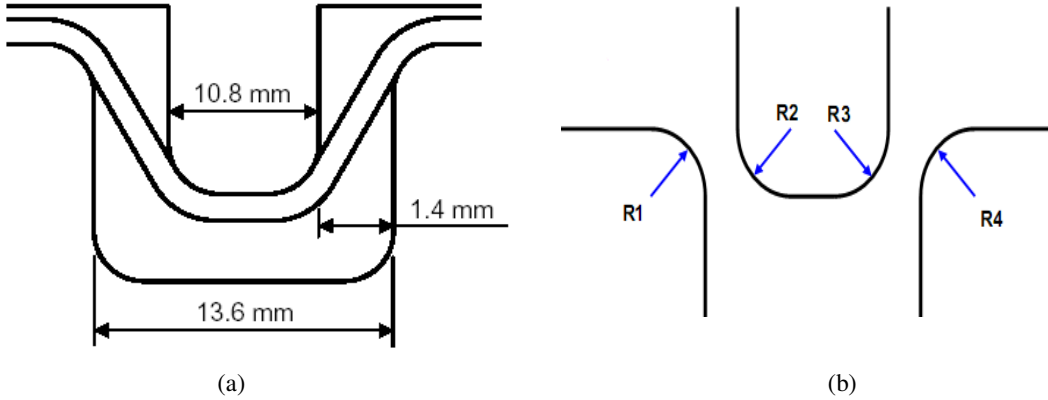
Şekil 3.3. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti aparatı [68]

Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti testleri 254 mm genişliğinde sac metal Şekil 3.4'deki kalıpta çekilerek gerçekleştirilmiştir. Kalıbın sol tarafındaki 'C' ve 'D' süzdürme çubukları çıkarılarak boşlukları kapatılmıştır. Kalıbın sağ tarafındaki dış süzdürme çubuğu kullanılarak kalıba yerleştirilen sac, kalıbın sol tarafından çekilmiş ve sağ tarafta oluşan süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ölçülmüştür. Çekme kalıbında üst kalıp ve baskı plakası arasında sabit bir açıklık (yaklaşık sac kalınlığının 0,4 mm fazlası kadar) bulunur [68].



Şekil 3.4. A/SP kanal çekme kalıbı şematığı[68]

Çalışmada, dört bükme-doğrulma çevrimine sahip kare geometrili süzdürme çubuğu kullanılmıştır. Süzdürme çubuğunun boyutları Şekil 3.5'te gösterilmiştir [68].



Şekil 3.5. Kare süzdürme çubuğu ölçüleri a) genişliği, b) yarıçapları ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 4 \text{ mm}$) [68]

Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti deneyleri aşağıdaki malzemeler için gerçekleştirilmiştir [68]:

- AKDQ-CR 0,7: Alüminyumdan arındırılmış çekme kalitesindeki sac, soğuk haddelenmiş-kaplama yok, sac kalınlığı 0,716 mm.

- AKDQ-CR 1,2: Alüminyumdan arındırılmış çekme kalitesindeki sac, soğuk haddelenmiş-kaplama yok, sac kalınlığı 1,198 mm.
- HSLA-HDG 0,8: Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik, sıcak daldırma çinko kaplama, sac kalınlığı 0,787 mm.
- HSLA-CR 1,2: Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelik, soğuk haddelenmiş-kaplama yok, sac kalınlığı 1,168 mm.
- BH210-EG 0,8: Fırında sertleştirilmiş, elektro çinko kaplama, sac kalınlığı 0,780 mm.
- DP600-HDG 1,2: Dual faz, sıcak daldırma çinko kaplama, sac kalınlığı 1,18 mm.

Her bir malzeme için süzdürme çubuğu batma miktarı yaklaşık olarak %20'den %100'e kadar farklı seviyelerde alınarak oluşan süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ölçülmüştür. Süzdürme çubuğu batma miktarının her biri için aynı şartlarda 5 kez deney yapılmış ve ortalama frenleme kuvveti hesaplanmıştır. Batma miktarı % 0 iken sacda herhangi bir bükme söz konusu değildir. Batma miktarının % 0 ve % 100 olduğu durumlar Şekil 3.6'da görülmektedir. Ayrıca % batma miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [68];

$$\% \text{ Batma miktarı } (P) = \frac{P}{R_1 + R_2 + t_0} \times 100 \quad (3.1)$$

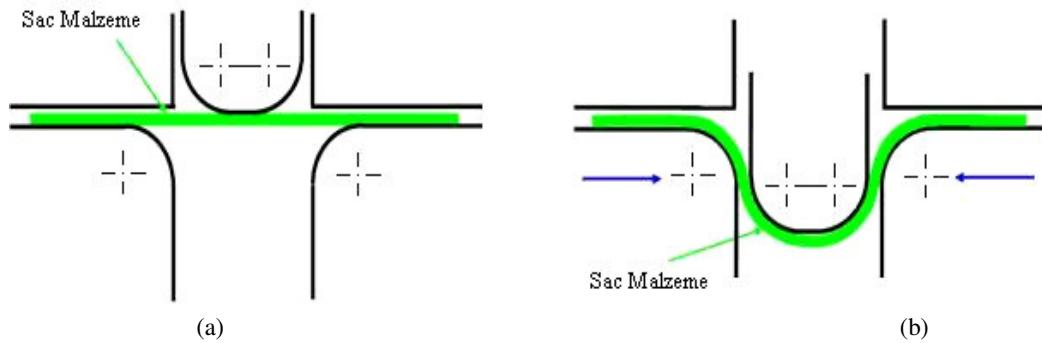
burada,

p: Süzdürme çubuğu batma miktarı (yüksekliği-mm),

R₁: Dişi süzdürme çubuğu yarıçapı (mm),

R₂: Erkek süzdürme çubuğu yarıçapı (mm),

t₀: Sac kalınlığı (mm), olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. % batma miktarının şematik gösterimi, a) % 0 batma, b) % 100 batma [68]

Çalışmada kullanılan verilerin elde edildiği deneylerde yağlayıcı olarak Quaker Ferrocote® 61 MAL-HCL-1 kullanılmıştır [68].

3.2. Eğri Uydurma ile Modelleme

Her bir malzeme ayrı ayrı incelenmiş ve % batma miktarına bağlı süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini veren polinom modeller elde edilmiştir. Böylece bir önceki bölümde bahsi geçen A/SP komitesinin hazırladığı deneysel veriler kullanılarak malzeme bazında 6 farklı model bulunmuştur. Modeller, MATLAB Curve Fitting Toolbox 1.2 kullanılarak aşağıdaki gibi kübik polinom şeklinde elde edilmiştir;

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (3.2)$$

burada,

$$f(x) = SÇFK : \text{Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti (N/mm)},$$

$$x = P : \% \text{ Batma miktarı}$$

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,

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.3)$$

Hataların kareleri toplamı,

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.4)$$

Hataların karelerinin ortalamasının karekökü

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir. Burada,

y : Gerçek çıkış değeri,

\hat{y} : Modelden kestirilen çıkış değeri,

\bar{y} : Çıkış değerlerinin ortalaması ve

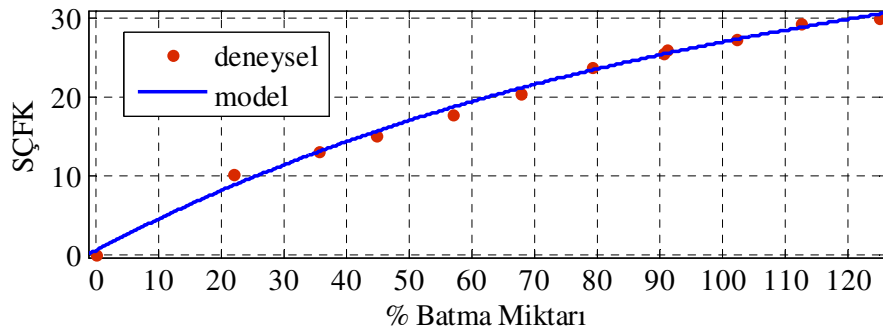
n : Örnek sayısını

gösterir.

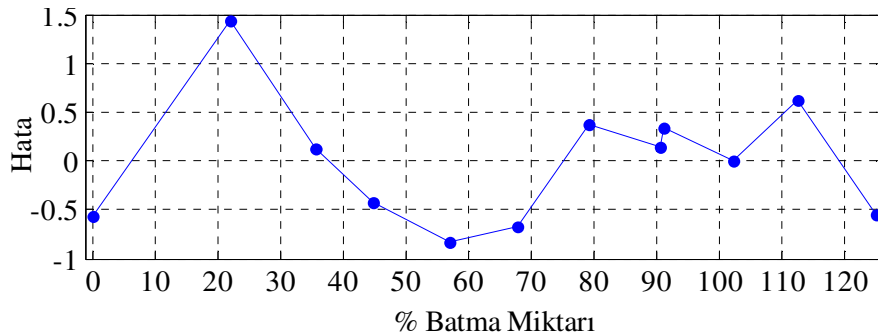
➤ **AKDQ-CR 0,7 için;**

$$S\check{C}FK = 4,294.10^{-6} P^3 - 0,001942 P^2 + 0,4156 P + 0,5679 \quad (3.6)$$

Şekil 3.7'de, alüminyumdan arındırılmış çekme kalitesinde 0,716 mm kalınlığındaki saca ait deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,9947$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca $SSE = 4,745$ ve $RMSE = 0,7701$ olarak bulunmuştur.



(a)



(b)

Şekil 3.7. AKDQ-CR 0,7 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

➤ **AKDQ-CR 1,2 için;**

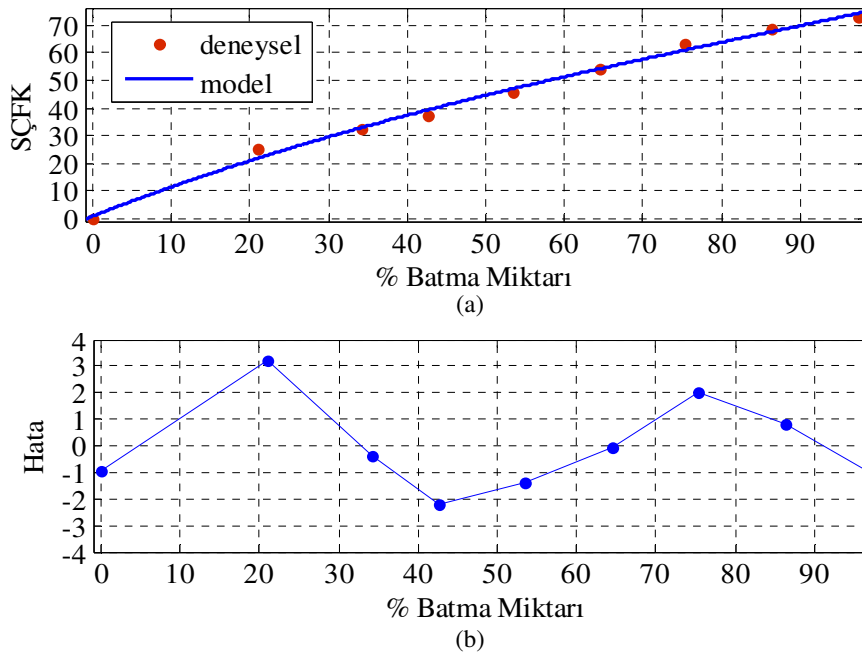
$$S\check{C}FK = 2,24 \cdot 10^{-5} P^3 - 0,00584 P^2 + 1,109 P + 0,9742 \quad (3.7)$$

Şekil 3.8’de, alüminyumdan arındırılmış çekme kalitesinde 1,198 mm kalınlığındaki saca ait deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Modelin performansını belirleyen ölçütler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$R^2 = 0,9944$$

$$SSE = 24,36$$

$$RMSE = 2,207$$



Şekil 3.8. AKDQ-CR 1,2 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

➤ **HSLA-HDG 0,8 için;**

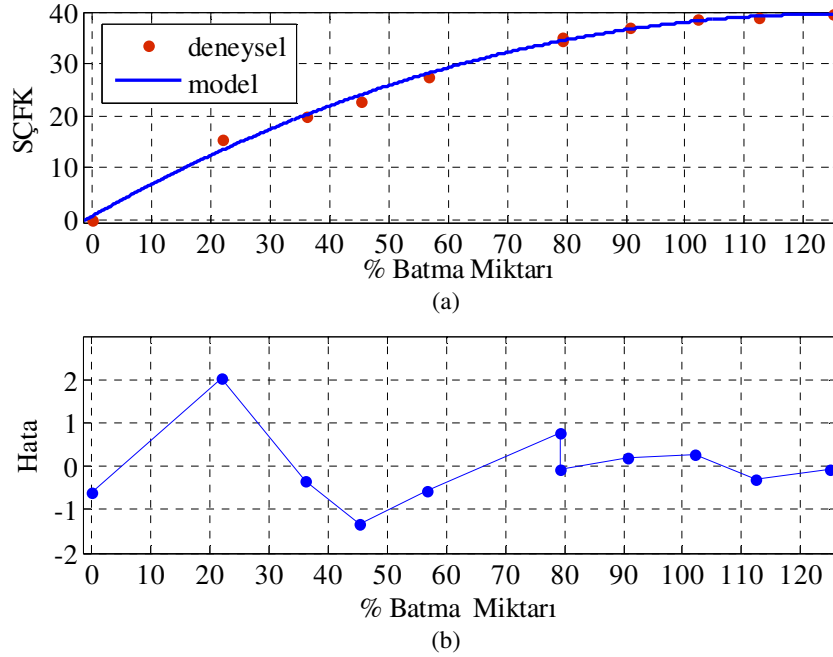
$$S\check{C}FK = 1,59 \cdot 10^{-6} P^3 - 0,002842 P^2 + 0,6438 P + 0,6232 \quad (3.8)$$

Şekil 3.9’da, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı 0,787 mm kalınlığındaki saca ait deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Modelin performansını belirleyen ölçütler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$R^2 = 0,9952$$

$$SSE = 7,581$$

$$RMSE = 1,041$$



Şekil 3.9. HSLA-HDG 0,8 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

➤ **HSLA-CR 1,2 için;**

$$SÇFK = 4,614 \cdot 10^{-5} P^3 - 0,0118 P^2 + 1,614 P + 1,238 \quad (3.9)$$

Şekil 3.10'da, yüksek mukavemetli düşük alaşımlı 1,168 mm kalınlığındaki saca ait deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Modelin performansını belirleyen ölçütler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

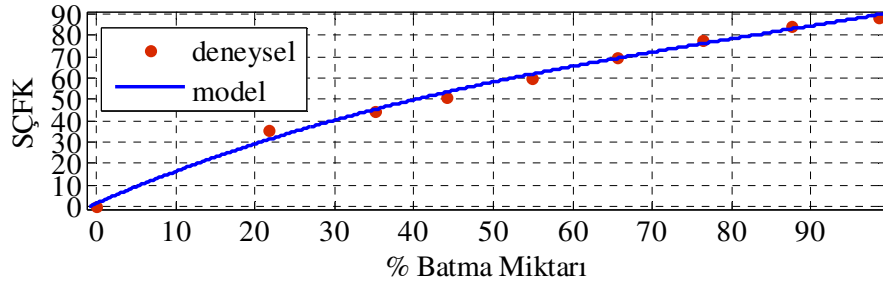
$$R^2 = 0,9934 \quad SSE = 41,55 \quad RMSE = 2,883$$

➤ **BH210-EG 0,8 için;**

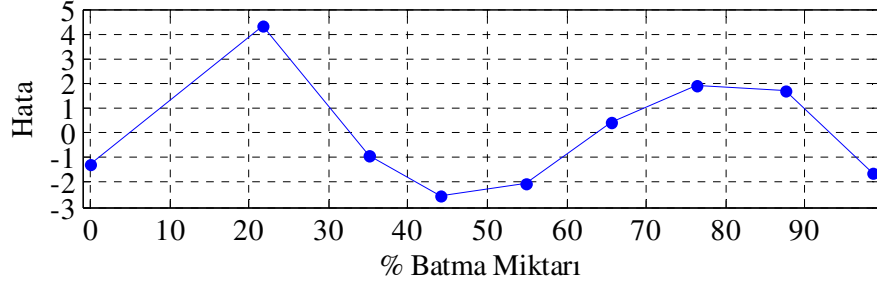
$$SÇFK = 8,298 \cdot 10^{-6} P^3 - 0,002842 P^2 + 0,4987 P + 0,3335 \quad (3.10)$$

Şekil 3.11'de, fırında sertleştirilmiş 0,780 mm kalınlığındaki saca ait deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Modelin performansını belirleyen ölçütler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$R^2 = 0,9954 \quad SSE = 3,459 \quad RMSE = 0,8318$$

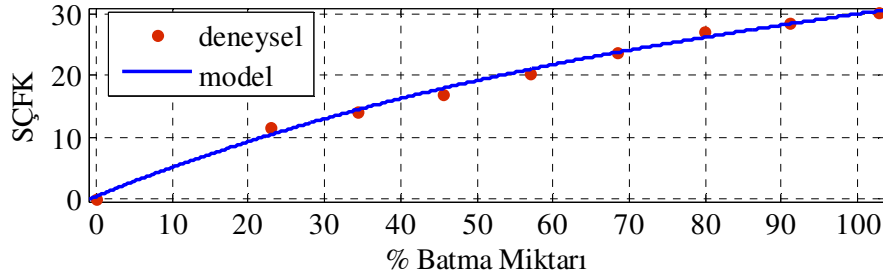


(a)

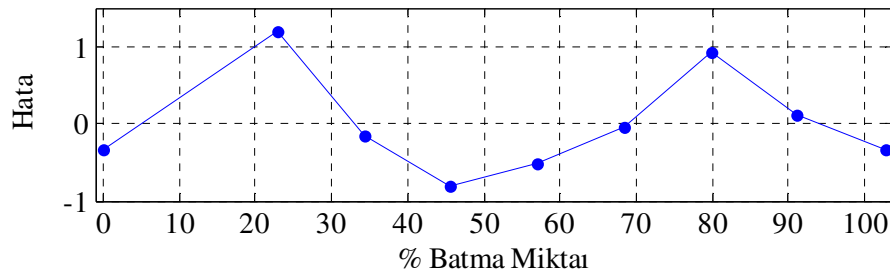


(b)

Şekil 3.10. HSLA-CR 1,2 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata



(a)



(b)

Şekil 3.11. BH210-EG 0,8 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

➤ **DP600-HDG 1,2 için;**

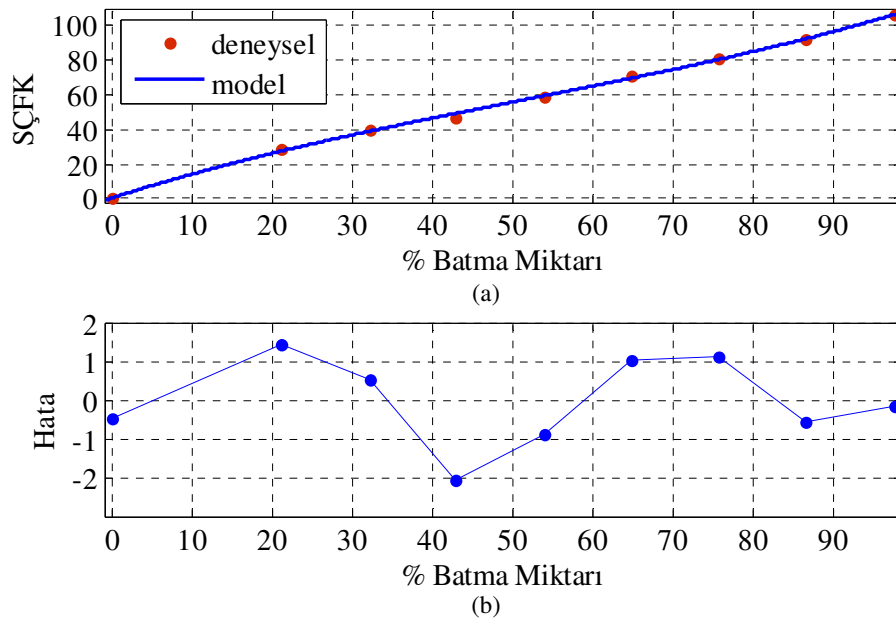
$$S\check{C}FK = 6,976.10^{-5} P^3 - 0,01078 P^2 + 1,496 P + 0,4552 \quad (3.11)$$

Şekil 3.12’de, dual faz 1,180 mm kalınlığındaki saca ait deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Modelin performansını belirleyen ölçütler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$R^2 = 0,9988$$

$$SSE = 10,15$$

$$RMSE = 1,425$$



Şekil 3.12. DP600-HDG 1,2 için % batma miktarına bağlı, a) deneysel SÇFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

Eğri uydurma yöntemi ile elde edilen % batma miktarına bağlı SÇFK’ni veren kübik polinom modellerin performansı Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

Tablo 3.1. SÇFK'ni kestirmek için oluşturulan polinom modellerin performansına ait veriler

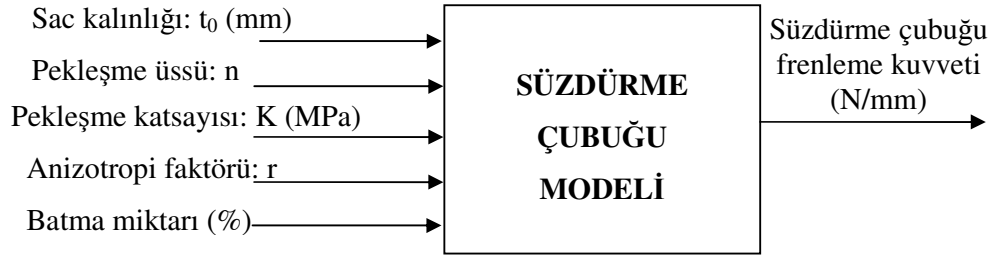
Malzeme	R^2	SSE	RMSE
AKDQ-CR 0,7	0,9947	4,745	0,7701
AKDQ-CR 1,2	0,9944	24,36	2,207
HSLA-HDG 0,8	0,9952	7,581	1,041
HSLA-CR 1,2	0,9934	41,55	2,883
BH210-EG 0,8	0,9954	3,459	0,8318
DP600-HDG 1,2	0,9988	10,15	1,425

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 [62].

Tablo 3.1'de farklı malzemeler için hesaplanan polinom modellerin korelasyon katsayısının 1'e oldukça yakın olduğu dikkate alındığında modelin doğruluğu ve başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak bu yöntemde süzdürme çubuğu frenleme kuvveti sadece süzdürme çubuğu geometrisine bağlı değişmekte olup her bir malzeme için ayrı model kullanmak gerekmektedir. Bu da, kontrol çevrimi içerisinde kullanımı açısından bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu yüzden sac kalınlığı ve malzeme özelliklerini de birer bağımsız değişken olarak kullanan regresyon modeller geliştirilmiştir.

3.3. Regresyon Model

Süzdürme çubuğu çoklu doğrusal regresyon kullanılarak modellenmiştir. Süzdürme çubuğuna ait regresyon modelin giriş ve çıkış parametreleri Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Süzdürme çubuğunun oluşturduğu frenleme kuvveti çıkış olarak alınmış ve frenleme kuvvetine etki eden parametreler modelin girişini oluşturmuştur.



Şekil 3.13. Süzdürme çubuğu modeli giriş ve çıkışları

Süzdürme çubuğu modelinin giriş parametreleri olarak kullanılan sac malzeme özellikleri ve kalınlıkları Tablo 3.2’de özetlenmiştir.

Tablo 3.2. Sac malzeme özellikleri ve kalınlıkları [68]

	AKDQ-CR		HSLA-HDG	HSLA-CR	BH210-EG	DP600-HDG
t_0 (mm)	0,716	1,198	0,787	1,168	0,780	1,180
K (MPa)	559,4	543,9	736,1	761,6	548	936,9
n	0,212	0,209	0,168	0,149	0,156	0,136
r	1,702	1,652	1,054	1,057	1,546	1,125

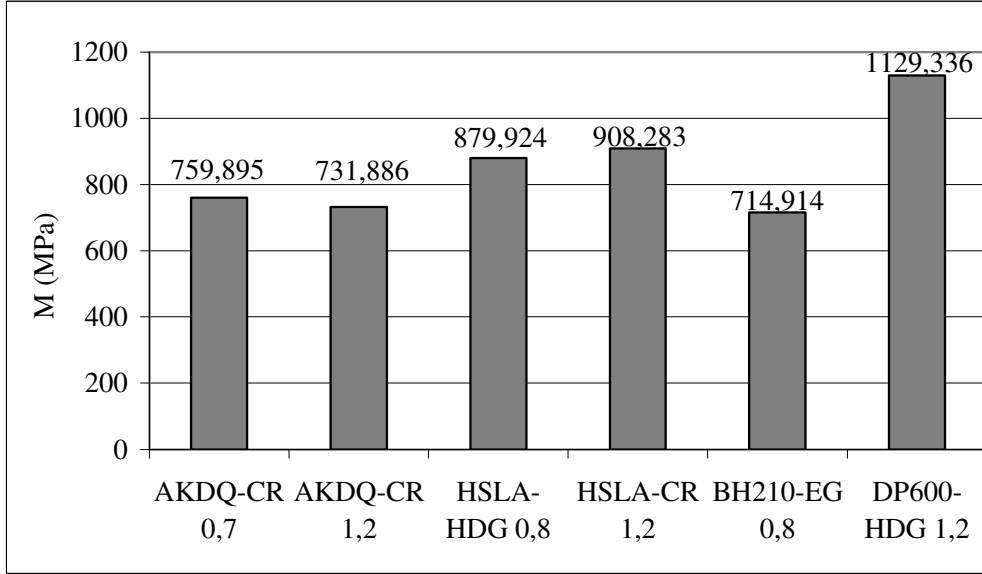
Tablo 3.1’de belirtilen sac malzemelere ait farklı % batma miktarları için yapılan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak Bölüm 2.1.2’de tanımlanan Doğrusal (Linear), İkinci Dereceden (Purequadratic), Etkileşimli (Interaction) ve İkinci Dereceden-Etkileşimli (Quadratic) olmak üzere 4 farklı regresyon model oluşturulmuştur. Regresyon modelleri elde etmek için MATLAB Statistics Toolbox 7 kullanılmıştır. Modellerin doğruluğunu ölçmek ve karşılaştırabilmek için korelasyon katsayısı R^2 ve RMSE değerleri hesaplanmıştır.

Regresyon analizinde hesaplamalarda zorluk çıkmaması ve elde bulunan verilerin katsayı tahmini için yeterli gelmesi açısından malzeme özellikleri M olarak adlandırılan bir parametre içerisine dahil edilmiştir. M değeri,

$$M = K \frac{(1+r)^{n+1}}{(\sqrt{1+2r})^{n+1}} \quad (3.12)$$

olarak ifade edilebilir [69].

Çalışmada kullanılan malzemeler için elde edilen M değerleri Şekil 3.14'deki grafikte verilmiştir.



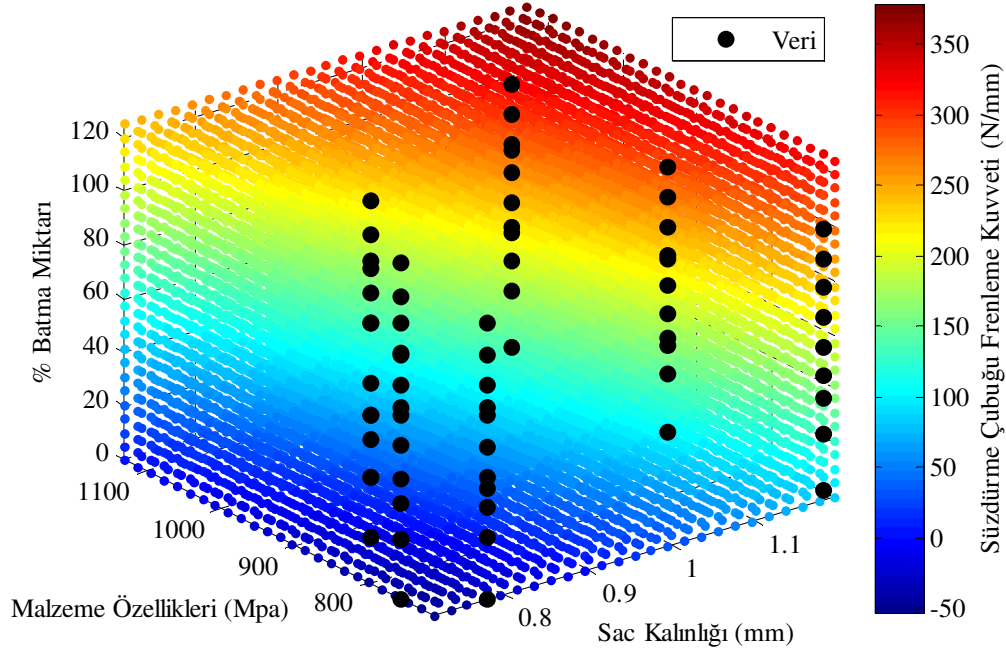
Şekil 3.14. Farklı malzemelere ait M değerleri

3.3.1. Doğrusal regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (t_0), malzeme özellikleri (M) ve % batma miktarı (P) ile bağımlı değişken süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine (SÇFK) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir doğrusal regresyon model elde edilmiştir.

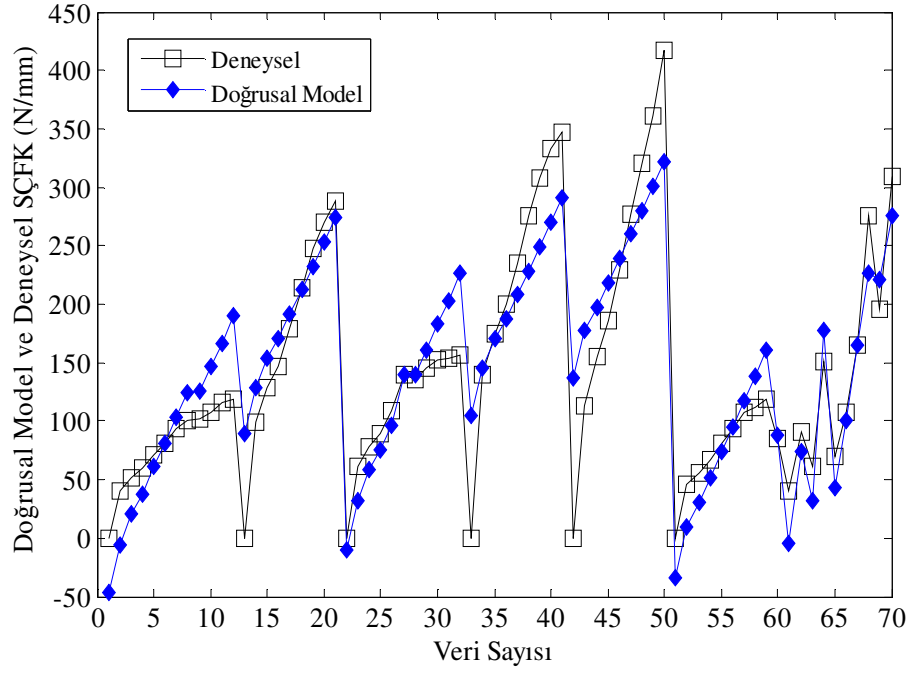
$$S\check{C}FK = -355,691 + 291,101 t_0 + 0,132 M + 1,894 P \quad (3.13)$$

(3.13) denkleminde göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin sac kalınlığına, malzeme özelliklerine ve % batma miktarına bağlı değişimi Şekil 3.15'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Doğrusal regresyon modele göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin değişim grafiği

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, $RMSE = 42,14817$ ve korelasyon katsayısı, $R^2 = 0,8239$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.16'da belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ile doğrusal regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



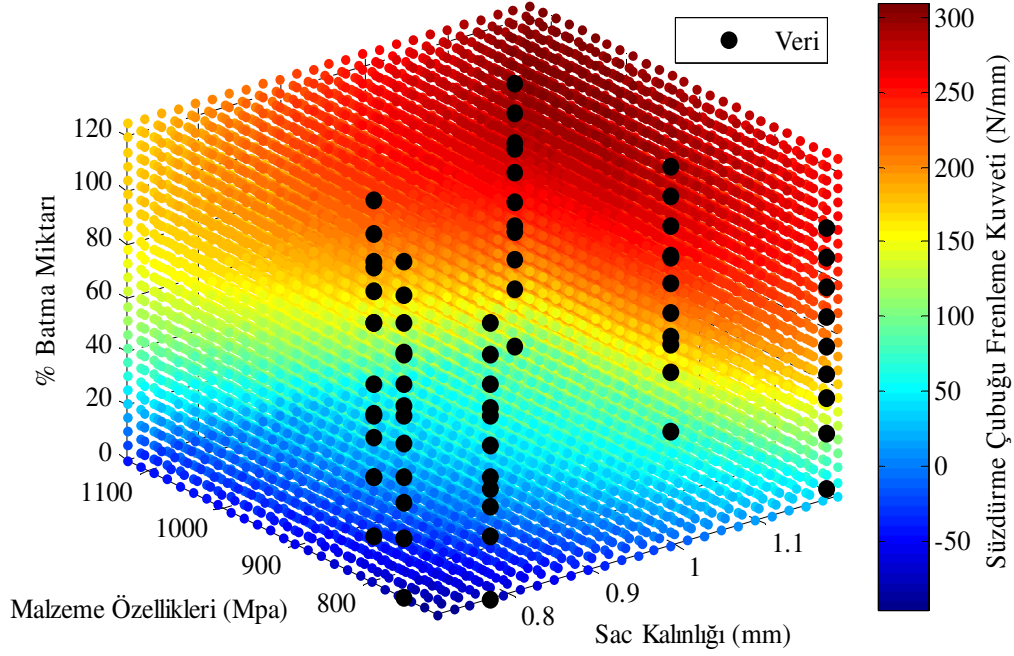
Şekil 3.16. Doğrusal regresyon model ve deneysel süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri

3.3.2. İkinci dereceden regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (t_0), malzeme özellikleri (M) ve % batma miktarı (P) ile bağımlı değişken süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine ($SÇFK$) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir ikinci dereceden regresyon model elde edilmiştir.

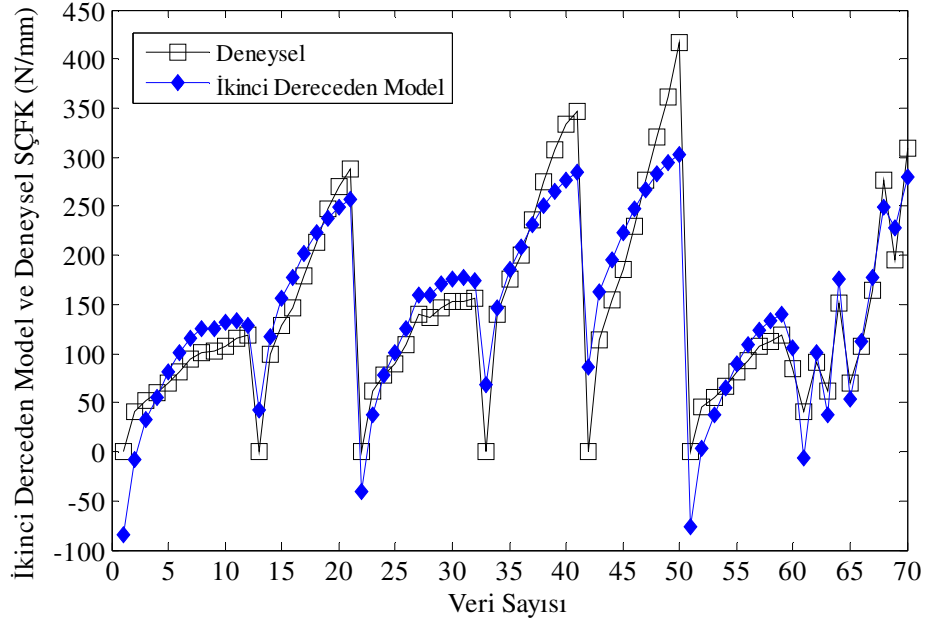
$$SÇFK = -691,411 + 372,375 t_0 + 0,726 M + 3,931 P - 49,232 t_0^2 - 0,000323 M^2 - 0,0177 P^2 \quad (3.14)$$

(3.14) denkleminde göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin sac kalınlığına, malzeme özelliklerine ve % batma miktarına bağlı değişimi Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. İkinci dereceden regresyon modele göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin değişim grafiği

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, $RMSE = 37,3119$ ve korelasyon katsayısı, $R^2 = 0,8633$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.18’de belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ile ikinci dereceden regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



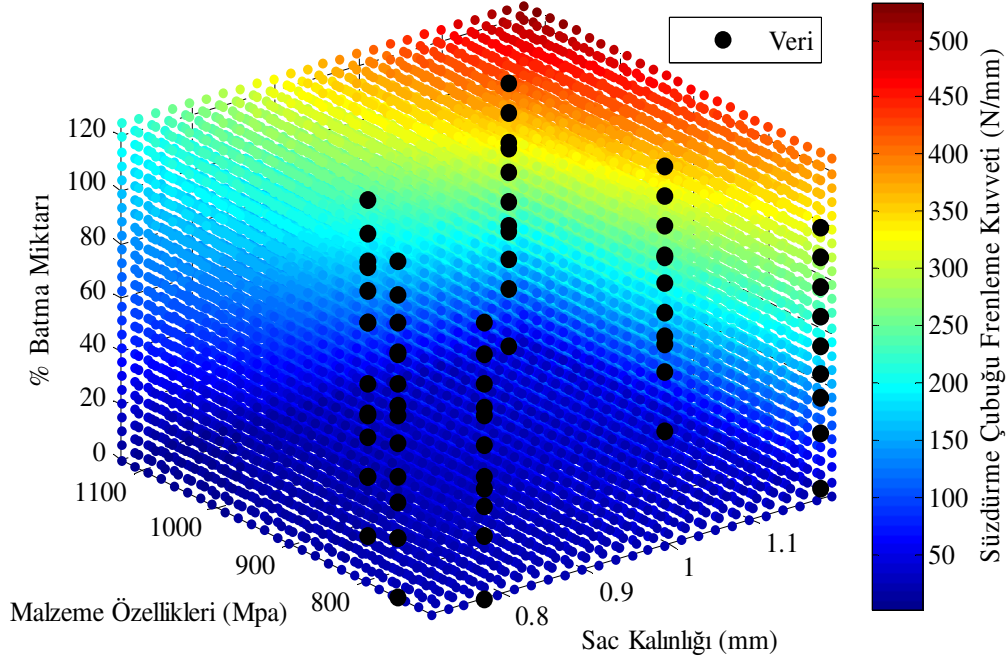
Şekil 3.18. İkinci dereceden regresyon model ve deneysel süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri

3.3.3. Etkileşimli regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (t_0), malzeme özellikleri (M) ve % batma miktarı (P) ile bağımlı değişken süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine ($SÇFK$) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir etkileşimli regresyon model elde edilmiştir.

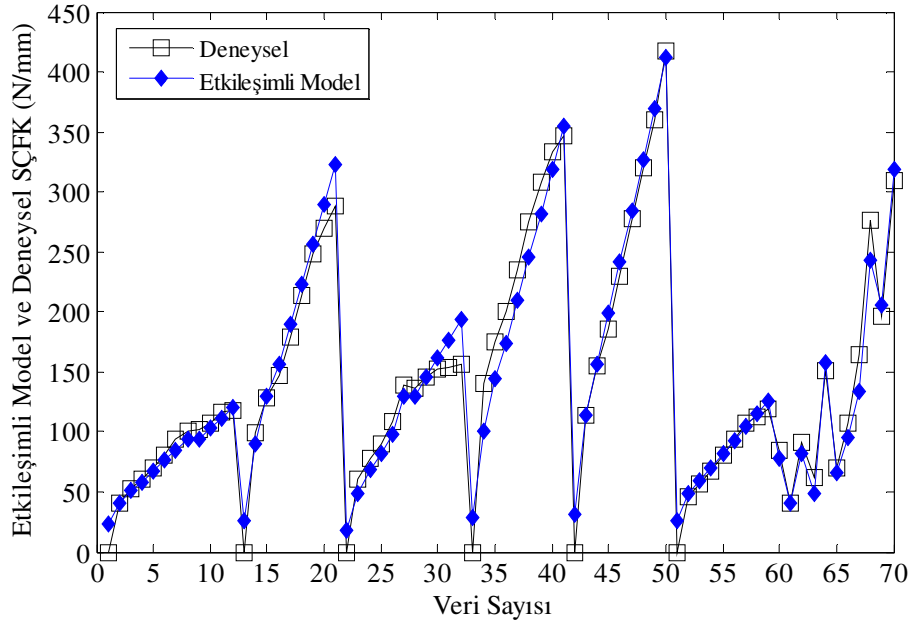
$$SÇFK = 143,8775 - 107,3077 t_0 - 0,1658 M - 4,5024 P + 0,1509 t_0 M + 4,8369 t_0 P + 0,0024 MP \quad (3.15)$$

(3.15) denkleminde göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin sac kalınlığına, malzeme özelliklerine ve % batma miktarına bağlı değişimi Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Etkileşimli regresyon modele göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin değişim grafiği

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, $RMSE = 16,8064$ ve korelasyon katsayısı, $R^2 = 0,9733$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.20’de belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ile etkileşimli regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



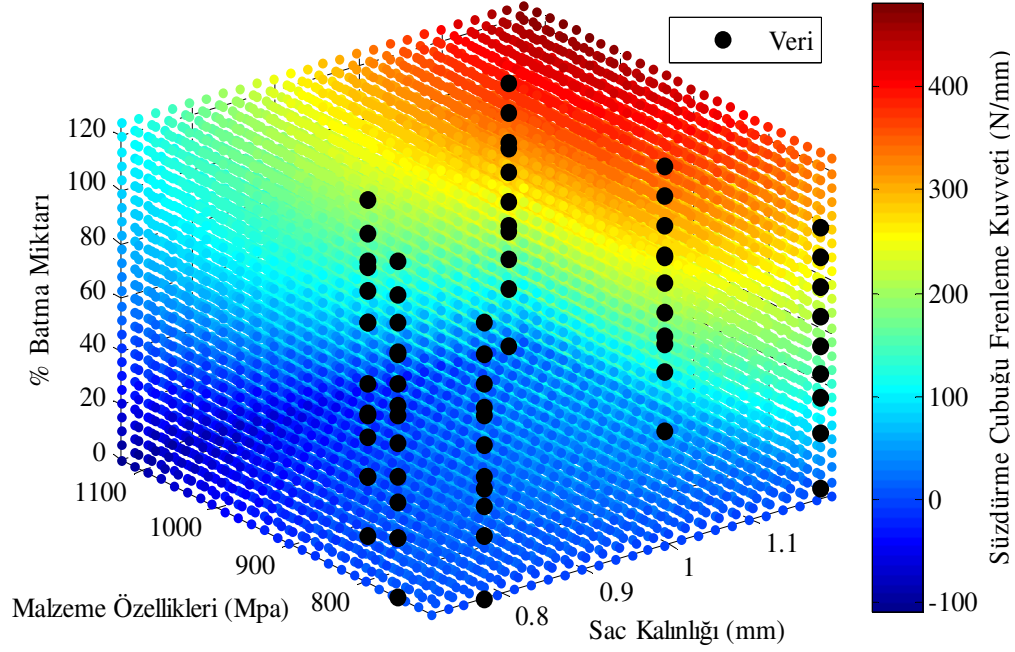
Şekil 3.20. Etkileşimli regresyon model ve deneysel süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri

3.3.4. İkinci dereceden-etkileşimli regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (t_0), malzeme özellikleri (M) ve % batma miktarı (P) 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.

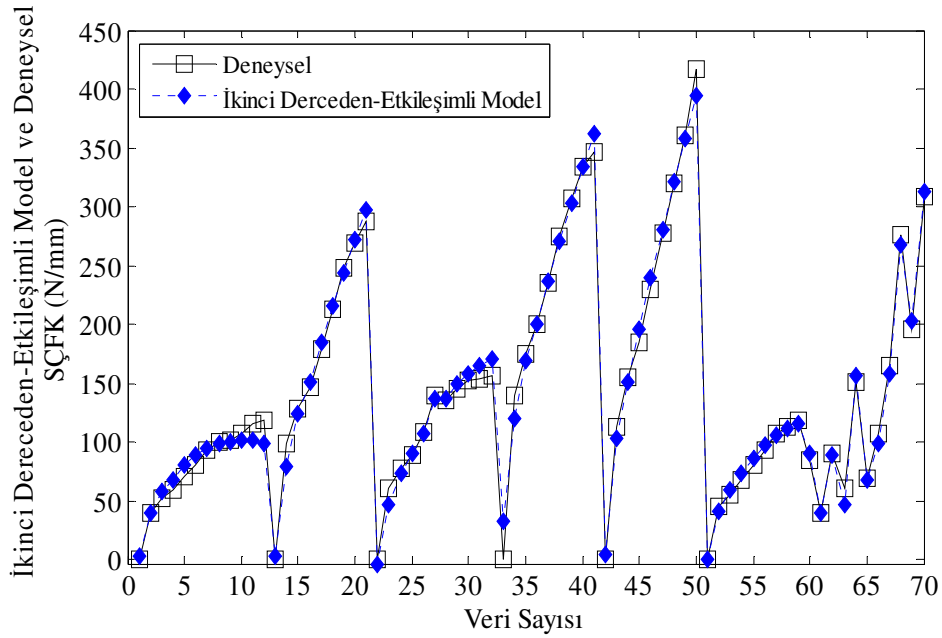
$$\begin{aligned}
 SÇFK = & -91,6481 - 516,607 t_0 + 0,7486 M - 3,2855 P \\
 & + 0,6178 t_0 M + 4,3321 t_0 P + 0,0026 MP \\
 & + 33,3512 t_0^2 - 0,0007912 M^2 - 0,0085 P^2
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

(3.16) denkleminde göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin sac kalınlığına, malzeme özelliklerine ve % batma miktarına bağlı değişimi Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. İkinci dereceden-etkileşimli regresyon modele göre süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin değişim grafiği

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, $RMSE = 9,4943$ ve korelasyon katsayısı, $R^2 = 0,9919$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.22’de belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen süzdürme çubuğu frenleme kuvveti ile ikinci dereceden-etkileşimli regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.22. İkinci dereceden-etkileşimli regresyon model ve deneysel süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değerleri

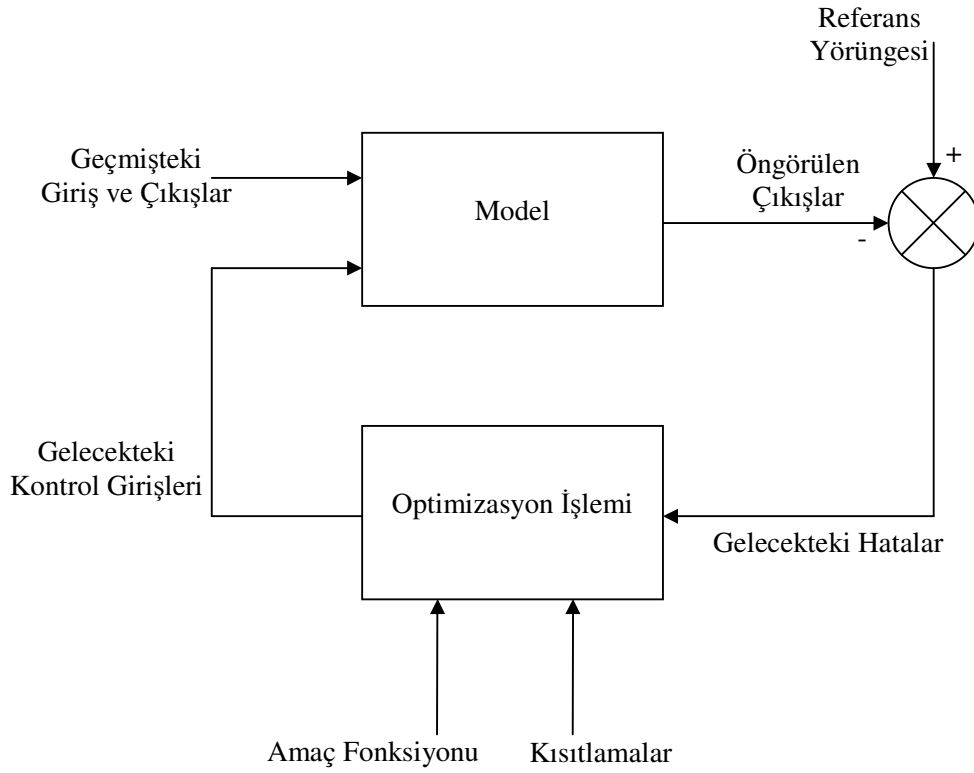
Malzeme, sac kalınlığı ve % batma miktarının farklı seviyelerde etkilediği modellerin doğruluğunu ölçmek ve karşılaştırmak için hesaplanan korelasyon katsayısı ve RMSE değerleri Tablo 3.3’de görülmektedir. Oluşturulan regresyon modellerin korelasyon katsayısı, RMSE değerleri ve deneysel veriler ile uyumu dikkate alındığında en uygun modelin ikinci dereceden-etkileşimli regresyon ile sağlandığı görülmüştür. Bu yüzden süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini kontrol etmek için tasarlanan kontrol çevriminde prosesin modeli ikinci dereceden-etkileşimli regresyon model ile tanımlanmıştır.

Tablo 3.3. Oluşturulan regresyon modeller için hesaplanan R^2 ve RMSE değerleri

Regresyon Model	R^2	RMSE
Doğrusal	0,8239	42,14817
İkinci Dereceden	0,8633	37,3119
Etkileşimli	0,9733	16,8064
İkinci Dereceden - Etkileşimli	0,9919	9,4943

BÖLÜM 4. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL

Model Öngörülü Kontrol (MÖK), prosesin gelecekteki davranışını optimize etmek için uygulanması gereken kontrol işaretini hesaplamaktadır. Bu hesaplama için proses modelini kullanarak bir amaç ölçütü içerisinde kontrol işaretini minimum yapacak bir optimizasyon yöntemi kullanılmaktadır. Model öngörülü kontrolün genel yapısı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Model öngörülü kontrolün genel yapısı [70]

Model Öngörülü Kontrol; proses modeli kullanılarak gelecekte bir zaman dilimindeki proses cevabını öngörme, bir amaç fonksiyonunu minimum yapacak kontrol işaretini üretme, her örnekleme anında ufkun geleceğe doğru kaydırılması ve

üretileen kontrol işaretinin şu anki yani ilk elemanının prosesese uygulanması ilkelerini içerir [70].

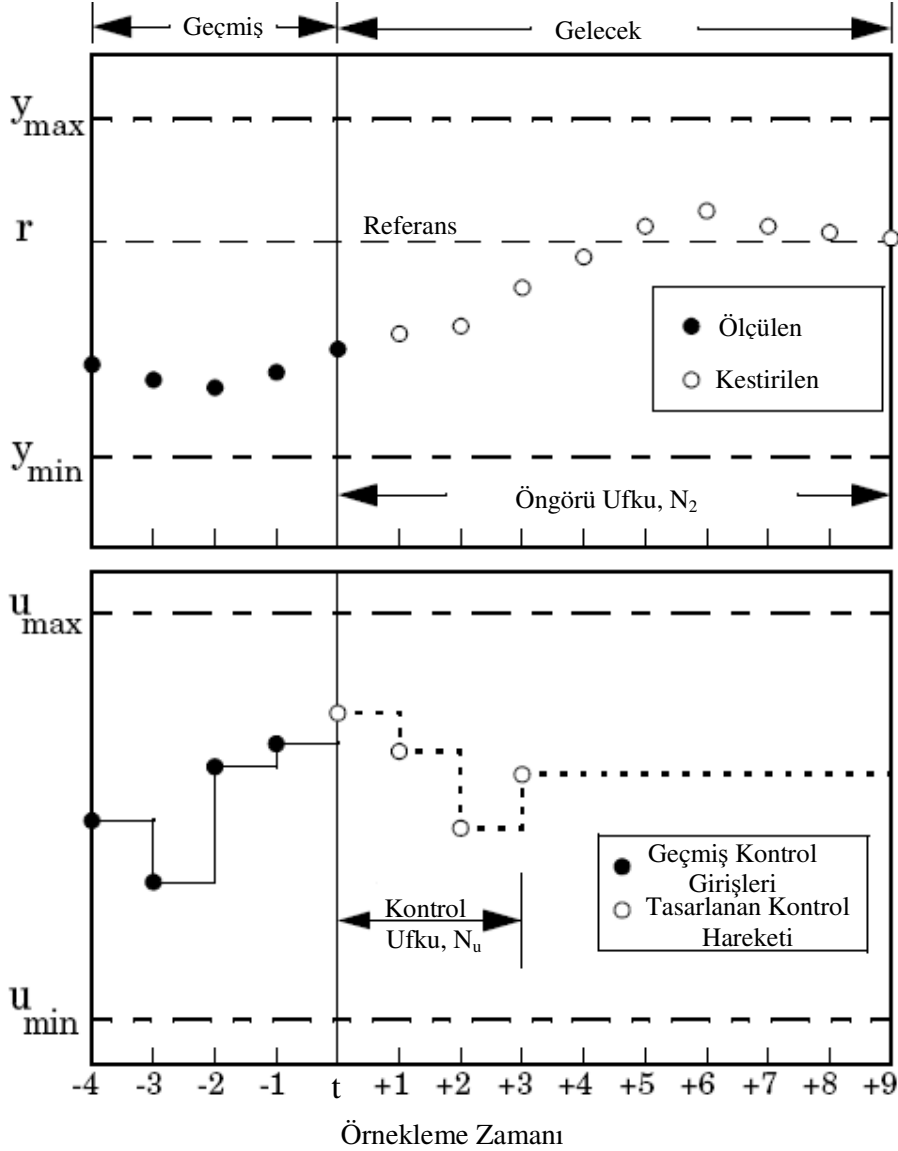
Model Öngörülü Kontrol algoritmasının temel prensibi Şekil 4.2'de de görüldüğü gibi geçmişteki bilgilere dayanarak geleceği kestirmek üzerinedir. Şekil 4.2'de u_{\min} kontrol çıkışının minimum değerini, u_{\max} kontrol çıkışının maksimum değerini, y_{\min} proses cevabının minimum değerini, y_{\max} proses cevabının maksimum değerini temsil etmektedir [71].

Ayrıca aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Proses modelinden yararlanarak, öngörü ufku boyunca gelecekteki proses cevabı hesaplanır. Bu hesaplama için; o ana kadar bilinen değerler (geçmişteki girişler ve proses cevapları), o andaki proses cevabı ve gelecekteki kontrol çıkışları kullanılır.
- Geleceğe ilişkin kontrol işareti dizisi bir amaç fonksiyonunu (genellikle öngörülen çıkış ile referans arasındaki hatayı) minimumlaştırarak hesaplanır.
- Sadece o andaki kontrol çıkışı prosesese uygulanır. Bir sonraki örnekleme zamanında proses cevabı ölçülür ve birinci adım tekrarlanır. Böylece kaydırma yöntemi ile hesaplanmış olur. Eğer model doğrusal, amaç fonksiyonu karesel ise ve sınırlandırmalar yoksa analitik bir çözüm bulunabilir, aksi durumlarda iteratif optimizasyon yöntemlerini kullanmak gerekir [70].

Tüm MÖK algoritmalarının sahip olduğu 3 temel kavram bulunmaktadır. Bunlar,

- Öngörü modeli,
- Amaç fonksiyonu,
- Kontrol kuralının elde edilmesidir.



Şekil 4.2. Model öngörülü kontrolün temel prensibi [71]

4.1. Öngörü Modeli

MÖK'ün temel taşı olan öngörü modeli prosesin davranışını tanımlayarak giriş ve çıkış arasındaki bağıntıyı vermektedir. Model gelecekte bir zaman diliminde prosesin cevabını yani öngörülen çıkışı $\hat{y}(t+j|t)$ hesaplamak için kullanılmaktadır. Farklı MÖK algoritmalarında kullanılan çeşitli modeller vardır. Genellikle en çok kullanılan proses modelleri Darbe Cevabı, Basamak Cevabı, Transfer Fonksiyonu ve Durum Uzayı modelidir.

Prosesi tanımlamak için bu modellerin yanı sıra yapay sinir ağları ve bulanık mantık gibi nonlineer modeller de kullanılabilir, ancak bunlar optimizasyon probleminin daha karmaşık olmasına neden olur.

4.1.1. Darbe cevabı modeli

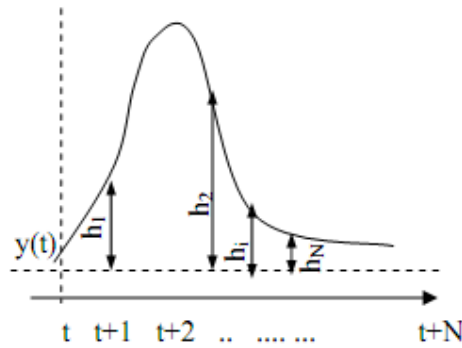
Yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Bu modelin uygulanması kolaydır, çünkü prosese giriş olarak uygulandığında proses çıkışını ölçmek için model parametrelerini bulmak yeterlidir. Bu model çok değişkenli prosesler için de kullanılabilirdiğinden endüstride oldukça sık kullanılmaktadır.

Modelde giriş çıkış ilişkisi,

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i \mathbf{u}(t-i) = \mathbf{H}(q^{-1})\mathbf{u}(t) \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilir. \mathbf{h}_i prosese darbe girişi uygulandığında elde edilen örneklenmiş çıkış değeridir (Şekil 4.3). Burada $\mathbf{H}(q^{-1}) = h_1 q^{-1} + h_2 q^{-2} + \dots + h_N q^{-N}$ ile tanımlanır. Bu model kullanılarak elde edilen öngörü ifadesi denklem (4.2)'de verilmiştir [70].

$$\hat{\mathbf{y}}(t+j|t) = \sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i \mathbf{u}(t+j-i|t) = \mathbf{H}(q^{-1})\mathbf{u}(t+j|t) \quad (4.2)$$



Şekil 4.3. Darbe cevabı modeli [70]

4.1.2. Basamak cevabı modeli

Darbe cevabı modeline çok benzemektedir. Prosese basamak girişi uygulandığında modelin giriş çıkış ilişkisi,

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{y}_0 + \sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i \Delta \mathbf{u}(t-i) = \mathbf{y}_0 + \mathbf{H}(q^{-1})(1-q^{-1})\mathbf{u}(t) \quad (4.3)$$

ifade edilir. \mathbf{h}_i prosese basamak girişi uygulandığında elde edilen örneklenmiş çıkış değeri ve $\Delta \mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-1)$ olarak verilmiştir. \mathbf{y}_0 ise çıkış değerinin başlangıç değeridir. Bu modelin kullanıldığı öngörü çıkışı,

$$\hat{\mathbf{y}}(t+j|t) = \mathbf{y}_0 + \sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i \Delta \mathbf{u}(t+j-i|t) = \mathbf{y}_0 + \mathbf{H}(q^{-1})(1-q^{-1})\mathbf{u}(t+j|t) \quad (4.4)$$

şeklinde verilebilir [70].

Basamak cevabı modeli darbe cevabı modeli ile aynı avantajlara sahiptir.

4.1.3. Transfer fonksiyonu modeli

Lineer sistemlerin hepsine uyum sağladığı ve parametre sayısı az olduğu için bu model birçok uygulamada kullanılmaktadır. Giriş $\mathbf{u}(t)$ ve çıkış $\mathbf{y}(t)$ olmak üzere giriş çıkış ilişkisi,

$$\mathbf{A}(q^{-1})\mathbf{y}(t) = \mathbf{B}(q^{-1})\mathbf{u}(t) \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$$\mathbf{A}(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{B}(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb} \quad (4.7)$$

olarak gösterilir. Bu model kullanılarak elde edilen öngörü ifadesi,

$$\hat{\mathbf{y}}(t+j|t) = \frac{\mathbf{B}(q^{-1})}{\mathbf{A}(q^{-1})}\mathbf{u}(t+j|t) \quad (4.8)$$

şeklindedir [70].

4.1.4. Durum uzayı modeli

Çok değişkenli proseslerin kolaylıkla tanımlanabildiği bir modeldir. Durum uzay modeli,

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t-1) \quad (4.9)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (4.10)$$

şeklinde gösterilir. Burada \mathbf{x} durum vektörünü, \mathbf{u} giriş vektörünü, \mathbf{y} ise çıkış vektörünü temsil etmektedir. Ayrıca \mathbf{A} durum matrisi, \mathbf{B} giriş matrisi ve \mathbf{C} çıkış matrisi olmak üzere procese ait matrislerdir. Bu model için öngörü ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\hat{\mathbf{y}}(t+j|t) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t+j|t) = \mathbf{C}\left[\mathbf{A}^j\mathbf{x}(t) + \sum_{i=1}^j \mathbf{A}^{j-i}\mathbf{B}\mathbf{u}(t+j-i|t)\right] \quad (4.11)$$

Burada, $\hat{}$ işareti gelecekte tahmin edilecek yani öngörülen bilgiler için kullanılmıştır.

4.2. Amaç Fonksiyonu

Genel amaç, gelecek zaman dilimlerindeki çıkışın (y) belirlenen bir referans sinyalinin (y_r) mümkün olduğunca yakın olarak takip etmesini sağlamaktır. Amaç fonksiyonunun genel ifadesi,

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \mathbf{w}_j [\hat{\mathbf{y}}(t+j|t) - \mathbf{y}_r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta \mathbf{u}(t+j-1)]^2 \quad (4.12)$$

şeklinde verilebilir. Burada,

N_1 : En küçük öngörü ufkunu,

N_2 : En büyük öngörü ufkunu,

N_u : Kontrol ufkunu,

\mathbf{w}_j : Ağırlık matrisi ($w > 0$)

$\lambda(j)$: Kontrol ağırlıkları matrisi ($0 < \lambda < 1$)

temsil eder.

Prosesin ölü zamanı d ise, bu durumda proses çıkışı $\mathbf{u}(t)$, girişinden $d+1$ örnekleme zamanından sonra etkilenecektir. Bu nedenle eğer prosesin ölü zamanı biliniyorsa

öngörü ufkunu $d+1$ 'den daha küçük seçmemek gerekir. Kontrol ufku ise $N_u = N_2 - N_1$ olarak seçilebilir [72].

Çok değişkenli proseslerin kontrolünde çeşitli kısıtlamalar bulunabilir. Bunlar hem proses girişlerinde hem de çıkışlarında olabilir. MÖK yöntemi kısıtlamaların kolaylıkla eklenmesine imkan veren bir formülasyon yapısına sahiptir. Giriş ve çıkış üzerindeki bu kısıtlamalar aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{\min} &\leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_{\max} && \forall t \\ d\mathbf{u}_{\min} &\leq \mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t-1) \leq d\mathbf{u}_{\max} && \forall t \\ \mathbf{y}_{\min} &\leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{y}_{\max} && \forall t \end{aligned} \quad (4.13)$$

4.3. Kontrol Kuralı

Kontrol değişkeni $u(t+j|t)$ 'yi elde etmek için (4.12) nolu denklemi minimize etmek gerekir. Bunu yapmak için öngörülen çıkış $\hat{y}(t+j|t)$ değeri hesaplanır. Eğer model doğrusal ve sınırlandırmalar yoksa karesel ölçüt için analitik bir çözüm elde edilebilir, aksi durumlarda iteratif optimizasyon yöntemlerini kullanmak gerekir. Bunun için matematiksel bir optimizasyon yöntemi olan karesel programlama (Quadratic Programming-QP) yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem, kısıtlamaların doğrusal eşitlik veya eşitsizlik fonksiyonları ile tanımlandığı amaç fonksiyonunun karesel formda (ikinci dereceden bir polinom) olduğu bir optimizasyon problemidir. Kısıtlamaları sağlayan bir başlangıç noktasından başlanarak her adımda amaç fonksiyonunu iyileştiren ve kısıtlamalar ile çelişmeyen bir hareket yönünün bulunması amaçlanır.

Karesel programlamanın genel formu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$q(x) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{f}^T \mathbf{x} \quad (4.14)$$

Kısıtlamalar; $\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ (eşitsizlik kısıtlaması)

$$\mathbf{E} \mathbf{x} = \mathbf{d} \quad (\text{eşitlik kısıtlaması})$$

burada $q(x)$ amaç fonksiyonu, \mathbf{H} , \mathbf{A} ve \mathbf{E} matris, \mathbf{f} , \mathbf{b} , \mathbf{d} ve \mathbf{x} vektördür.

4.4. Model Öngörülü Kontrolün Genel Algoritması

\mathbf{u} giriş ve \mathbf{y} çıkış olacak şekilde tek giriş-tek çıkışlı (SISO) bir prosese ait MÖK'ün t zaman dilimindeki formülasyonu aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$\min_{\mathbf{u}[t|t], \dots, \mathbf{u}[t+N_2-1|t]} \sum_{j=1}^{N_2} \mathbf{w}_j (\hat{\mathbf{y}}[t+j|t] - \mathbf{y}_r)^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) \Delta \mathbf{u}[t+j-1|t]^2 \quad (4.15)$$

Giriş ve çıkışa ait kısıtlamalar,

$$\mathbf{u}_{maks} \geq \mathbf{u}[t+j-1|t] \geq \mathbf{u}_{min}, \quad j = 1, \dots, N_u \quad (4.16)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{maks} \geq \Delta \mathbf{u}[t+j-1|t] \geq -\Delta \mathbf{u}_{maks}, \quad j = 1, \dots, N_u \quad (4.17)$$

$$\mathbf{y}_{maks} \geq \mathbf{y}[t+j|t] \geq \mathbf{y}_{min}, \quad j = 1, \dots, N_2 \quad (4.18)$$

burada, $N_u < N_2$ olmak üzere N_u kontrol ufku ve N_2 öngörü ufkunu temsil eder.

Buna göre,

$$\mathbf{u}[t+j|t] = \mathbf{u}[t+N_u-1|t], \quad j = N_u, \dots, N_2-1 \quad (4.19)$$

yazılabilir. \mathbf{y}_r referans değeri ve Δ fark işlemi,

$$\Delta \mathbf{u}[t+j-1|t] \equiv \mathbf{u}[t+j-1|t] - \mathbf{u}[t+j-2|t] \quad (4.20)$$

olarak gösterilir.

Proses a ait öngörü modeli,

$$\mathbf{y}[t] = \sum_{i=1}^n \mathbf{h}_i \mathbf{u}[t-i] + d[t] \quad (4.21)$$

olarak alınırsa,

$$\hat{\mathbf{y}}[t+j|t] = \sum_{i=1}^n \mathbf{h}_i \mathbf{u}[t+j-i|t] + \mathbf{d}[t+j|t] \quad (4.22)$$

$$\mathbf{u}[t+j-i|t] = \mathbf{u}[t+j-i], \quad j-i < 0 \quad (4.23)$$

olur. Burada \mathbf{h}_j model katsayıları ve \mathbf{d} bozuculardır. Gelecekteki bozucu $\mathbf{d}[t+j|t]$ öngörmek zordur ancak basitleştirmek için,

$$\mathbf{d}[t+j|t] = \mathbf{d}[t|t] = \mathbf{y}[t] - \sum_{i=1}^n \mathbf{h}_i \mathbf{u}[t-i] \quad (4.24)$$

yazılabilir. Burada, $\mathbf{y}[t]$ örnekleme noktası t 'deki proses çıkışının ölçülen değeri ve $\mathbf{u}[t-i]$ proses girişi \mathbf{u} 'nun geçmiş değeridir. (4.22) ve (4.24) nolu denklemler (4.15)'de yerine koyulur ve düzenlenirse,

$$\min_{\mathbf{u}[t|t], \dots, \mathbf{u}[t+N_2-1|t]} \sum_{j=1}^{N_2} \mathbf{w}_j \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{h}_i \mathbf{u}[t+j-i|t] - \sum_{i=1}^n \mathbf{h}_i \mathbf{u}[t-i] + \mathbf{y}[t] - \mathbf{y}_r \right)^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) \Delta \mathbf{u}[t+j-1|t]^2 \quad (4.25)$$

şeklinde elde edilir. Giriş ve çıkışa ait kısıtlamalar,

$$\mathbf{u}_{maks} \geq \mathbf{u}[t+j-1|t] \geq \mathbf{u}_{min}, \quad j = 1, \dots, N_u \quad (4.26)$$

$$\Delta \mathbf{u}_{maks} \geq \Delta \mathbf{u}[t+j-1|t] \geq -\Delta \mathbf{u}_{maks}, \quad j = 1, \dots, N_u \quad (4.27)$$

$$\mathbf{y}_{maks} \geq \sum_{i=1}^n \mathbf{h}_i \mathbf{u}[t+j-i|t] - \sum_{i=1}^n \mathbf{h}_i \mathbf{u}[t-i] + \mathbf{y}[t] \geq \mathbf{y}_{min}, \quad i = 1, \dots, N_2 \quad (4.28)$$

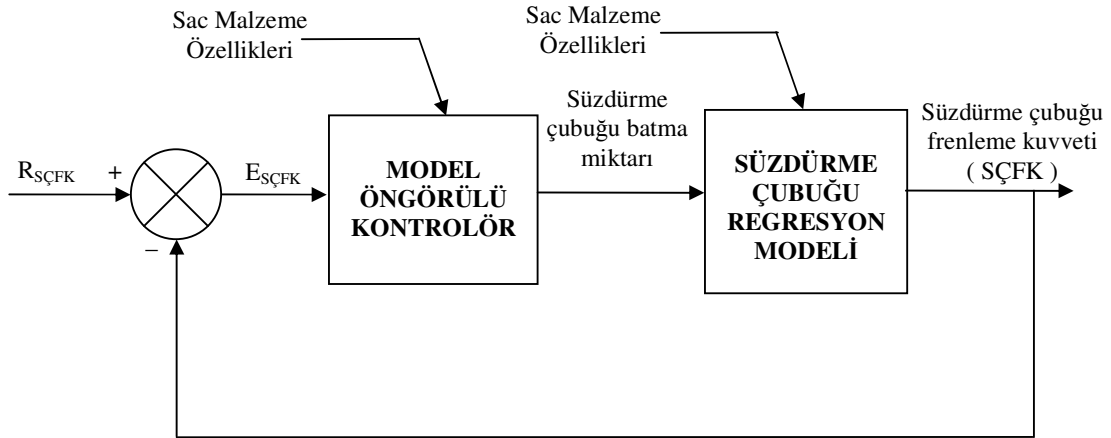
olur. Elde edilen optimizasyon problemi, her bir t anında çözümlenebilen bir karesel programlama problemi şeklindedir [73].

Eğer proses için herhangi bir kısıtlama bulunmuyorsa kontrol kuralı, (4.25) nolu denklemde verilen amaç fonksiyonunun türevi 0'a eşitlenerek bulunabilir. Başka bir ifadeyle amaç fonksiyonunun türevi 0'a eşitlendiğinde fonksiyonu minimum yapacak $\Delta \mathbf{u}$ değerleri ve dolayısıyla o anki kontrol büyüklüğü $\mathbf{u}(t)$ elde edilir.

Proses için eşitlik veya eşitsizlik kısıtlamaları bulunması durumunda, verilen kısıtlamalar ile çelişmeden denklem (4.25)'i minimize eden kontrol büyüklüğü $\mathbf{u}(t)$ değeri iteratif olarak karesel programlama yöntemine göre elde edilir.

BÖLÜM 5. HAREKETLİ SÜZDÜRME ÇUBUĞUNUN MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ

Genellikle sabit yükseklikte üretilen süzdürme çubukları ile istenen frenleme kuvveti elde edilemediği takdirde yükseklik değiştirilerek yeni denemeler yapılmaktadır. Bu da oldukça uğraştırıcı, maliyetli ve zaman alıcıdır. Bilgisayar destekli tasarım ve sonlu elemanlar analizleri gibi yöntemler sayesinde optimize edilmeye çalışılsa da problemler tam olarak çözülememiştir. Prosese etkiyen bozucu büyüklükler de göz önüne alınır, referans bir frenleme kuvvetini elde etmek için hareketli süzdürme çubuğunun saca batma miktarı kontrolör ile ayarlanarak bahsedilen problemlere çözüm bulunabilir. Ayrıca kontrol edilebilir süzdürme çubukları aynı kalıbı farklı malzemeler ve sac kalınlıklarında da kullanma imkanı vermiştir. Dolayısıyla yeni kalıp maliyeti ve zaman kaybı ortadan kalkmıştır. Hareketli süzdürme çubuğunun kapalı çevrim kontrolünü özetleyen blok diyagramı Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Sac Malzeme Özellikleri:

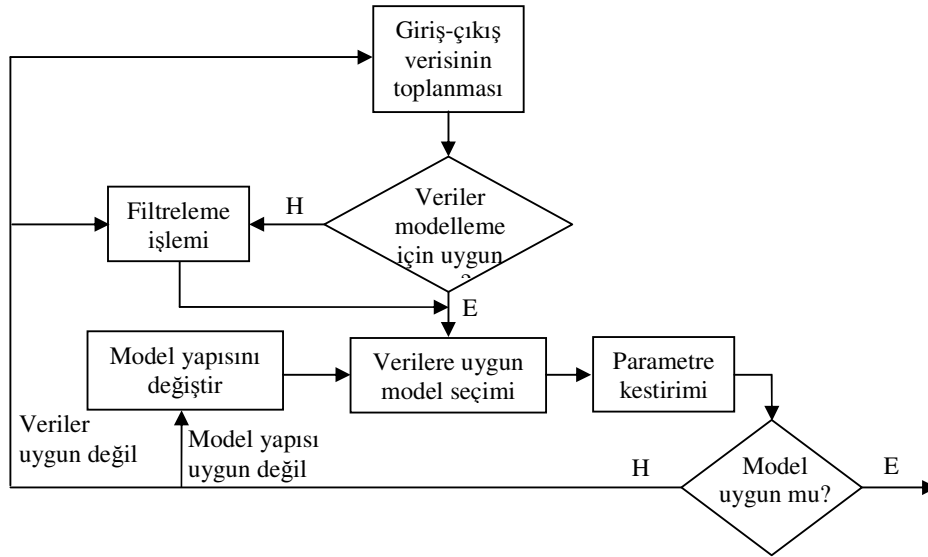
- Sac Kalınlığı: t_0 (mm)
- Anizotropi Faktörü: r
- Pekleşme Üssü: n
- Pekleşme Katsayısı: K (MPa)

Şekil 5.1. Hareketli süzdürme çubuğunun kapalı çevrim kontrolüne ait blok diyagramı

5.1. Süzdürme Çubuğunun Öngörü Modeli

Süzdürme çubuğunun kontrolünde kullanılacak öngörü modeli prosese ait deneysel verilerin analizine dayanmaktadır. Deneylemlerden elde edilen giriş çıkış verilerinin kullanılmasıyla süzdürme çubuğunun matematik modeli oluşturularak öngörü modeli elde edilmiştir. Kısaca Şekil 5.2'deki akış diyagramı ve aşağıdaki sıra ile özetlenebilir:

1. Deneysel verilerin elde edilmesi,
2. Verilerin incelenmesi ve gerekiyorsa filtrelenmesi,
3. Bir model tipi seçilerek yapısının tanımlanması,
4. Giriş çıkış verileri kullanılarak seçilen model tipine göre modelin hesaplanması ve parametrelerin belirlenmesi,
5. Elde edilen model sonuçları incelenerek yeterli ise öngörü modelinin tamamlanması, aksi takdirde 3.adıma geri dönülerek yeni bir model kullanılmaktadır.



Şekil 5.2. Öngörü modelinin oluşturulmasına ait akış diyagramı

Öngörü modelini hazırlamak için doğrusal parametrik modellerin elde edilebildiği MATLAB System Identification Toolbox 7.1 kullanılmıştır. Böylece Dış Kaynak Girişli Oto-Regresif (ARX-Auto-Regressive with eXogenous Input), Dış Kaynak Girişli Oto-Regresif Hareketli Ortalama (ARMAX- Auto-Regressive Moving

Average with eXogenous Input), Çıkış-Hatası (OE-Output-Error), Box-Jenkins (BJ) ve Durum-Uzay olmak üzere 5 farklı model elde edilmiş ve karşılaştırılarak kontrolöre uygun olan modele karar verilmiştir.

5.1.1. ARX modeli

ARX modelin ayrık zamandaki genel yapısı,

$$\mathbf{A}(q)\mathbf{y}(t) = \mathbf{B}(q)\mathbf{u}(t) + \mathbf{e}(t) \quad (5.1)$$

şeklinde gösterilir. Burada, q zamansal kaydırma operatörünü, $\mathbf{y}(t)$ çıkış işaretini, $\mathbf{u}(t)$ giriş işaretini, $\mathbf{e}(t)$ model hatalarını, t ise örnekleme anını simgelemektedir.

$\mathbf{A}(q)$ ve $\mathbf{B}(q)$, q cinsinden polinomlardır.

$$\mathbf{A}(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (5.2)$$

$$\mathbf{B}(q) = b_1q^{-nk} + b_2q^{-(nk+1)} + \dots + b_{nb}q^{-(nk+nb-1)} \quad (5.3)$$

burada, na modele çıkış işaretinin kaç örnekleme zamanı gerisine kadar olan kısmının katılacağını, benzer şekilde nb de modele giriş işaretinin kaç örnekleme zamanı gerisine kadar olan kısmının katılacağını göstermekte olup modelin derecesini ifade ederler. nk ise giriş-çıkış arasındaki gecikmeyi gösterir.

Süzdürme çubuğu öngörü modeli için deneysel veriler ile en uyumlu ayrık zamanlı ARX model parametreleri,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(q) = & 1 - 0,0397q^{-1} + 0,09184q^{-2} - 0,2242q^{-3} - 0,09452q^{-4} - 0,175q^{-5} \\ & + 0,9467q^{-6} - 0,3056q^{-7} + 0,3512q^{-8} - 1,376q^{-9} - 0,1159q^{-10} \end{aligned} \quad (5.4)$$

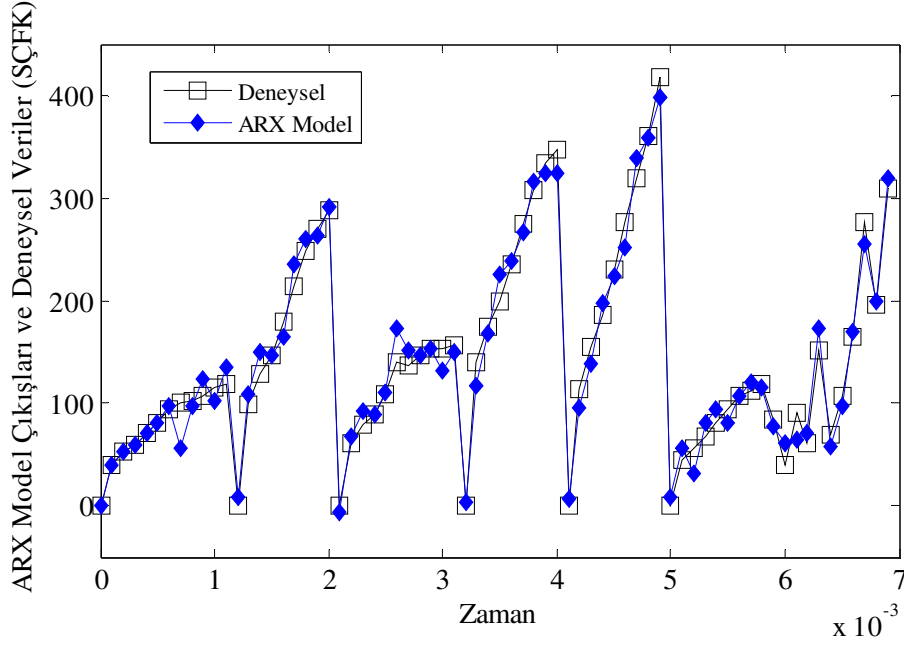
$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1(q) = & 1,475q^{-6} - 0,7444q^{-7} + 1,377q^{-8} - 0,9903q^{-9} + 0,5512q^{-10} \\ & + 0,9569q^{-11} - 0,1763q^{-12} + 0,2075q^{-13} + 0,2256q^{-14} + 1,487q^{-15} \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_2(q) = & 2,273q^{-6} + 20,03q^{-7} + 175,6q^{-8} - 668,5q^{-9} + 32,86q^{-10} \\ & + 128,7q^{-11} - 3,617q^{-12} + 5,351q^{-13} + 48,94q^{-14} - 255,4q^{-15} \end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_3(q) = & 0,4519q^{-6} + 0,0176q^{-7} + 0,1485q^{-8} - 0,2881q^{-9} + 0,02885q^{-10} \\ & - 0,3055q^{-11} + 0,2457q^{-12} - 0,1536q^{-13} + 0,2471q^{-14} - 0,09878q^{-15} \end{aligned} \quad (5.7)$$

olarak elde edilmiştir.

ARX model çıkışları ve deneysel veriler Şekil 5.3'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. ARX model ile deney verileri arasında %85,22'lik uyum sağlanmıştır.



Şekil 5.3. ARX model çıkışları ve deneylerden ölçülen SÇFK değerleri

5.1.2. ARMAX modeli

ARMAX modelin ayrık zamanda genel yapısı,

$$\mathbf{A}(q)\mathbf{y}(t) = \mathbf{B}(q)\mathbf{u}(t) + \mathbf{C}(q)\mathbf{e}(t) \quad (5.8)$$

şeklinde gösterilir. Burada, $\mathbf{C}(q)$ q cinsinden bir polinom olup diğer tüm parametreler ARX model için verilen (5.1) denklemindekiler ile aynıdır.

$$\mathbf{C}(q) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \quad (5.9)$$

Süzdürme çubuğu öngörü modeli için deneysel veriler ile en uyumlu ayrık zamanlı ARMAX model parametreleri,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(q) = & 1 - 0,5627q^{-1} - 0,1766q^{-2} + 0,1655q^{-3} - 0,03463q^{-4} + 0,09797q^{-5} \\ & + 0,7198q^{-6} - 1,253q^{-7} - 0,1732q^{-8} \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1(q) = & 0,8826q^{-5} + 1,787q^{-6} - 3,052q^{-7} + 0,3696q^{-8} + 1,944q^{-9} \\ & - 0,8655q^{-10} + 0,8345q^{-11} \end{aligned} \quad (5.11)$$

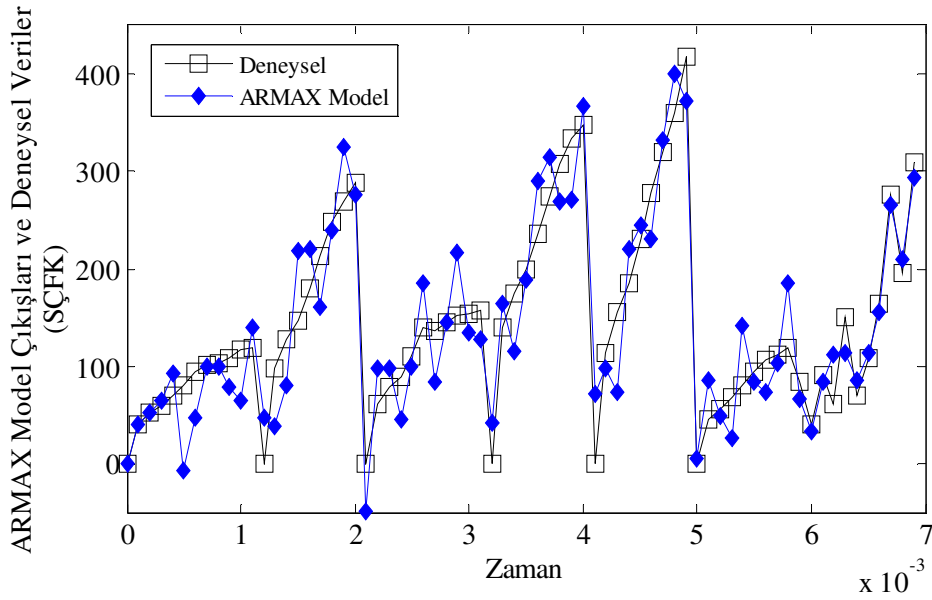
$$\mathbf{B}_2(q) = 34,61q^{-3} - 151,1q^{-4} + 226,8q^{-5} + 369,1q^{-6} - 610,4q^{-7} \quad (5.12)$$

$$\mathbf{B}_3(q) = 0,2883q^{-5} - 0,1849q^{-6} + 0,07812q^{-7} - 0,1044q^{-8} - 0,09591q^{-9} \quad (5.13)$$

$$\mathbf{C}(q) = 1 - 0,7386q^{-1} - 0,7445q^{-2} + 0,7227q^{-3} + 0,7414q^{-4} - 0,9383q^{-5} \quad (5.14)$$

olarak hesaplanmıştır.

ARMAX model çıkışları ve deneysel veriler Şekil 5.4'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. ARMAX model ile deney verileri arasında %60,29'luk uyum sağlanmıştır.



Şekil 5.4. ARMAX model çıkışları ve deneylerden ölçülen SÇFK değerleri

5.1.3. Çıkış-hatası modeli

Çıkış-Hatası modelinin ayrık zamandaki genel yapısı,

$$\mathbf{y}(t) = \frac{\mathbf{B}(q)}{\mathbf{F}(q)} \mathbf{u}(t) + \mathbf{e}(t) \quad (5.15)$$

şeklinde gösterilir. Burada, q zamansal kaydırma operatörünü, $\mathbf{y}(t)$ çıkış işaretini, $\mathbf{u}(t)$ giriş işaretini, $\mathbf{e}(t)$ model hatalarını, t ise örnekleme anını simgelemektedir.

$\mathbf{B}(q)$ ve $\mathbf{F}(q)$, q cinsinden polinomlardır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\mathbf{B}(q) = b_1 q^{-nk} + b_2 q^{-(nk+1)} + \dots + b_{nb} q^{-(nk+nb-1)} \quad (5.16)$$

$$\mathbf{F}(q) = 1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2} + \dots + f_{nf} q^{-nf} \quad (5.17)$$

Süzdürme çubuğu öngörü modeli için deneysel veriler ile en uyumlu ayırık zamanda Çıkış-Hatası model parametreleri,

$$\mathbf{B}_1(q) = 2,022 - 2,306q^{-1} \quad (5.18)$$

$$\mathbf{B}_2(q) = 261,4 - 239,9q^{-1} \quad (5.19)$$

$$\mathbf{B}_3(q) = -0,01211 + 0,02617q^{-1} \quad (5.20)$$

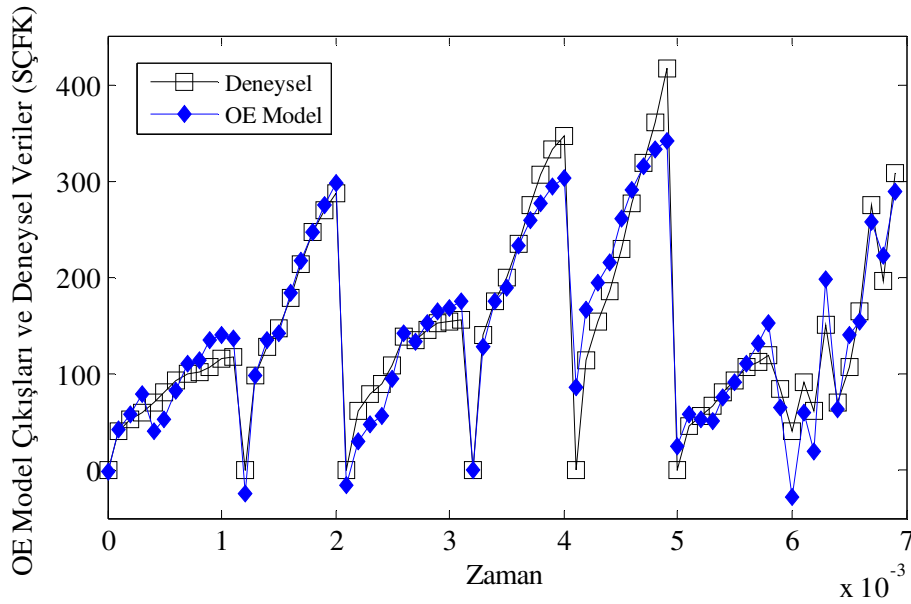
$$\mathbf{F}_1(q) = 1 - 0,8841q^{-1} - 0,08702q^{-2} - 0,03504q^{-3} + 0,1001q^{-4} \quad (5.21)$$

$$\mathbf{F}_2(q) = 1 - 1,31q^{-1} + 0,3835q^{-2} \quad (5.22)$$

$$\mathbf{F}_3(q) = 1 - 1,657q^{-1} + 0,8782q^{-2} \quad (5.23)$$

olarak hesaplanmıştır.

Çıkış-Hatası model çıkışları ve deneysel veriler Şekil 5.5'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çıkış-Hatası model ile deney verileri arasında %72,6'lık uyum sağlanmıştır.



Şekil 5.5. Çıkış-Hatası model çıkışları ve deneylerden ölçülen SÇFK değerleri

5.1.4. Box-Jenkins modeli

Box-Jenkins modelin ayrık zamanda genel yapısı,

$$\mathbf{y}(t) = \frac{\mathbf{B}(q)}{\mathbf{F}(q)} \mathbf{u}(t) + \frac{\mathbf{C}(q)}{\mathbf{D}(q)} \mathbf{e}(t) \quad (5.24)$$

şeklinde gösterilir. Diğer modellerde olduğu gibi burada da $\mathbf{B}(q)$, $\mathbf{F}(q)$, $\mathbf{C}(q)$ ve $\mathbf{D}(q)$ q cinsinden polinomlar olup $\mathbf{B}(q)$ ve $\mathbf{F}(q)$ sırasıyla (5.16) ve (5.17) nolu denklemde, $\mathbf{C}(q)$ (5.9) nolu denklemde verilmişti. $\mathbf{D}(q)$ ise,

$$\mathbf{D}(q) = 1 + d_1 q^{-1} + d_2 q^{-2} + \dots + d_{nd} q^{-nd} \quad (5.25)$$

olarak ifade edilir. Burada nd parametresi na , nb , nf ve nc parametreleri gibi modelin derecesini gösterir.

Süzdürme çubuğu öngörü modeli için deneysel veriler ile en uyumlu ayrık zamanda Box-Jenkins modeline ait parametreler,

$$\mathbf{B}_1(q) = 2,176 - 0,8634q^{-1} - 1,658q^{-2} + 0,1367q^{-3} \quad (5.26)$$

$$\mathbf{B}_2(q) = 313,2 + 177,4q^{-1} - 145,7q^{-2} - 29,35q^{-3} + 5,334q^{-4} + 25,26q^{-5} \quad (5.27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_3(q) = & 0,09818q^{-1} - 0,1729q^{-2} + 0,1985q^{-3} - 0,1528q^{-4} \\ & + 0,05661q^{-5} + 0,01746q^{-6} \end{aligned} \quad (5.28)$$

$$\mathbf{C}(q) = 1 - 1,342q^{-1} + 0,7105q^{-2} \quad (5.29)$$

$$\mathbf{D}(q) = 1 - 1,686q^{-1} + 0,9351q^{-2} \quad (5.30)$$

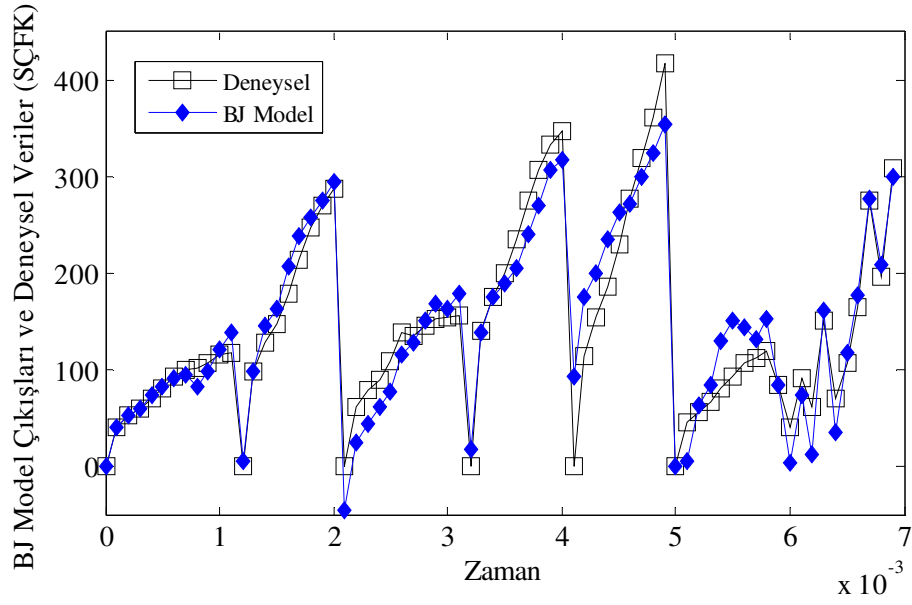
$$\mathbf{F}_1(q) = 1 - 0,2461q^{-1} - 0,7068q^{-2} \quad (5.31)$$

$$\mathbf{F}_2(q) = 1 + 0,3719q^{-1} - 0,75612q^{-2} \quad (5.32)$$

$$\mathbf{F}_3(q) = 1 - 0,8353q^{-1} + 0,9582q^{-2} \quad (5.33)$$

olarak hesaplanmıştır.

Box-Jenkins model çıkışları ve deneysel veriler Şekil 5.6'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Box-Jenkins model ile deney verileri arasında %70,73'lük uyum sağlanmıştır.



Şekil 5.6. Box-Jenkins model çıktıları ve deneylerden ölçülen SCFK değerleri

5.1.5. Durum-uzayı modeli

Durum-Uzayı modelin ayrık zamanda genel yapısı,

$$\mathbf{x}(t + T_s) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{G}\mathbf{e}(t) \quad (5.34)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) + \mathbf{e}(t) \quad (5.35)$$

olarak gösterilir. Burada, $\mathbf{u}(t)$ giriş işaretini, $\mathbf{y}(t)$ çıkış işaretini, $\mathbf{x}(t)$ durum vektörünü, $\mathbf{e}(t)$ model hatalarını, T_s örnekleme zamanını, t ise örnekleme anını simgelemektedir. \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} ve \mathbf{G} ise birer matrisi olup \mathbf{A} durum matrisi, \mathbf{B} giriş matrisi, \mathbf{C} çıkış matrisi, \mathbf{D} direkt transmisyon matrisi ve \mathbf{G} bozucu büyüklük matrisi olarak adlandırılmaktadır.

Süzdürme çubuğu öngörü modeli için deneysel veriler ile en uyumlu ayrık zamanda Durum-Uzayı modeline ait parametreler,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ x_1 & 0,81813 & -0,2304 & 0,34712 & 0,077736 & 0,031264 & 0,094474 \\ x_2 & 0,32952 & -0,33434 & -0,29661 & -0,32436 & -0,38217 & -0,18399 \\ x_3 & -0,36822 & -0,82458 & 0,19785 & -0,17124 & 0,16422 & 0,4851 \\ x_4 & -0,010126 & -0,26333 & -0,40274 & 0,50476 & -0,10459 & -0,30559 \\ x_5 & -0,13195 & 0,0998999 & 0,40573 & 0,37506 & -0,55288 & 0,4734 \\ x_6 & -0,050978 & -0,047764 & -0,31542 & -0,20408 & -0,64551 & 0,37012 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} & u_1 & u_2 & u_3 \\ x_1 & 0,19537 & -65,612 & -0,017309 \\ x_2 & 0,081955 & -25,857 & -0,0072164 \\ x_3 & -0,17963 & 59,564 & 0,01675 \\ x_4 & 0,07228 & -22,25 & -0,0072565 \\ x_5 & 0,044301 & -5,0831 & -0,0022856 \\ x_6 & 0,18779 & -57,754 & -0,0174433 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

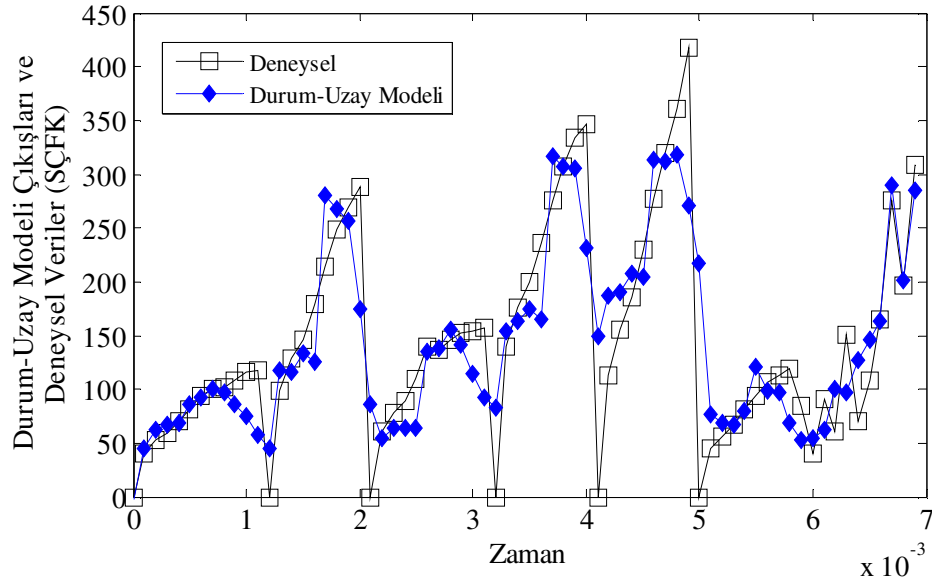
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ y_1 & 38,975 & 35,664 & 77,326 & -272,51 & -2,9555 & 122,59 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} & u_1 & u_2 & u_3 \\ y_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} & y_1 \\ x_1 & 0,0012631 \\ x_2 & -0,081955 \\ x_3 & 0,0024514 \\ x_4 & -0,001616 \\ x_5 & 8,5689 \times 10^{-5} \\ x_6 & -0,00062972 \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

olarak elde edilmiştir.

Durum-Uzayı modeline ait çıkışlar ve deneysel veriler Şekil 5.7’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Durum-Uzayı modeli ile deney verileri arasında %46,23’lük uyum sağlanmıştır.



Şekil 5.7. Durum-uzay modeli çıktıları ve deneylerden ölçülen ŞÇFK değerleri

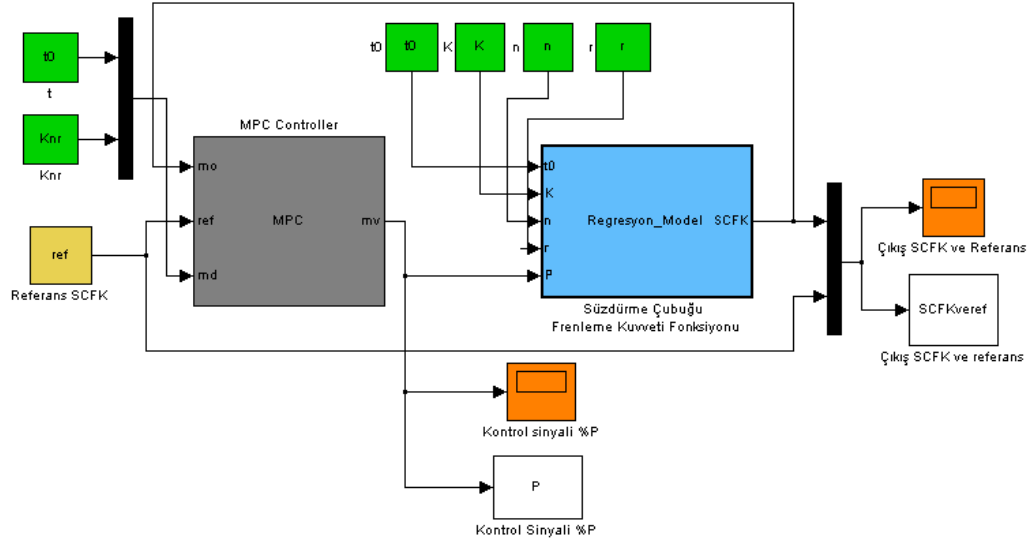
Bölüm 3.1’de bahsi geçen deneylerden elde edilen verilerin kullanılmasıyla geliştirilen ARX, ARMAX, OE, BJ ve Durum-Uzayı modellerinin deneysel veriler ile uyumu Tablo 5.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Deneysel verilere %85,22 ile en iyi uyumu ARX modelin sağladığı görülmüştür. Ayrıca Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7 incelendiğinde, ARX Model dışındaki diğer modellerin süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin özellikle ‘0 N/mm’ değeri başta olmak üzere bir çok noktada yaklaşım sağlayamadığı görülmektedir. Böylece kontrolör tasarımında kullanılmak üzere öngörü modeli olarak deneysel veriler ile en iyi uyumun sağlandığı ARX Model seçilmiştir.

Tablo 5.1. Oluşturulan öngörü modellerinin karşılaştırılması

Öngörü Modeli	Deneysel Veriler ile % Uyum
ARX	% 85,22
ARMAX	%60,29
OE	%72,6
BJ	%70,73
Durum-Uzayı	% 46,23

5.2. Model Öngörülü Kontrolör Tasarımı

Kontrolöre ait benzetim modelin oluşturulmasında Matlab Simulink altında çalışan 'Model Predictive Control Toolbox-MPC' (Model Öngörülü Kontrol Araç kutusu) kullanılmıştır. Model öngörülü kontrol için Simulink'de hazırlanan benzetim model görüntüsü Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Süzdürme çubuğu için tasarlanan model öngörülü kontrol benzetim modeli

Kontrolöre ait parametrelerin değişik değerleri ile yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak verilen referansa en iyi uyum sağlayan parametre değerleri bulunmuş ve hareketli süzdürme çubuğunun kapalı çevrim kontrolünde bu parametre değerleri kullanılmıştır.

İlk olarak öngörü ufku $N_2 = 10$ değeriyle sabit kabul edilmiş ve kontrol ufku için sırayla $N_u = 1, 2, 3, 4, 5$ değerleri kullanılmıştır. Daha sonra en iyi sonucu veren kontrol ufku değeri seçilmiş ve öngörü ufku için $N_2 = 8, 10, 12, 16, 20$ değerleri kullanılmıştır. Kontrolör için örnekleme zamanı $T_s=0.001$ olarak alınmıştır. Öngörü ufku ve kontrol ufkunun seçimi için kontrol çevrimine ait benzetimler yapılırken kullanılan malzeme özellikleri ve referans süzdürme çubuğu frenleme kuvveti;

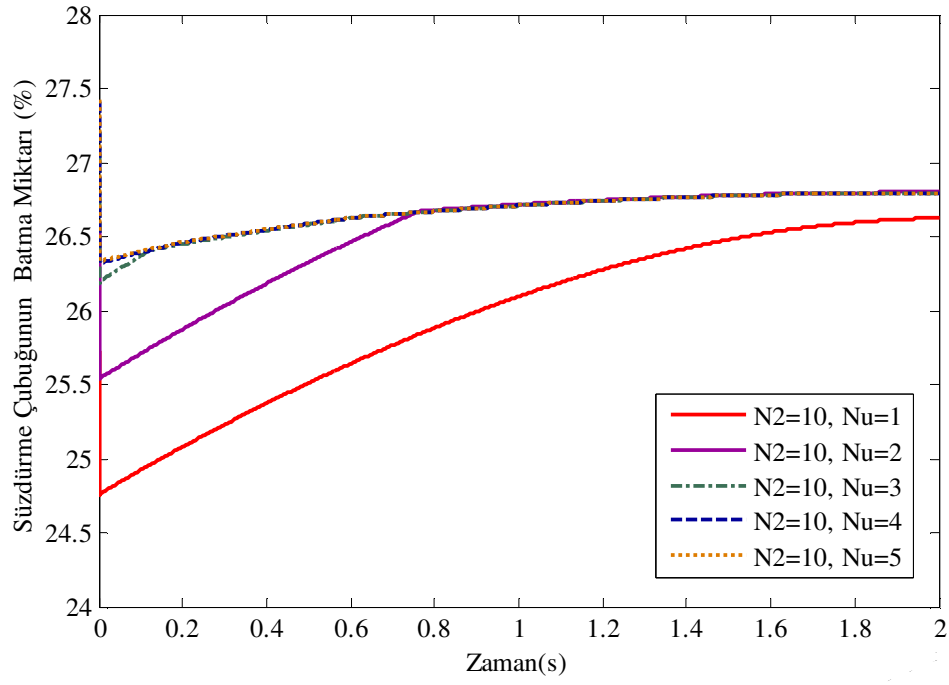
Malzeme1 (M1): $t_0 = 1,198$ mm,
 $K = 543,9$ MPa,
 $n = 0,209$
 $r = 1,652$

Malzeme2 (M2): $t_0 = 0,787$ mm,
 $K = 736,1$ MPa,
 $n = 0,168$
 $r = 1,054$

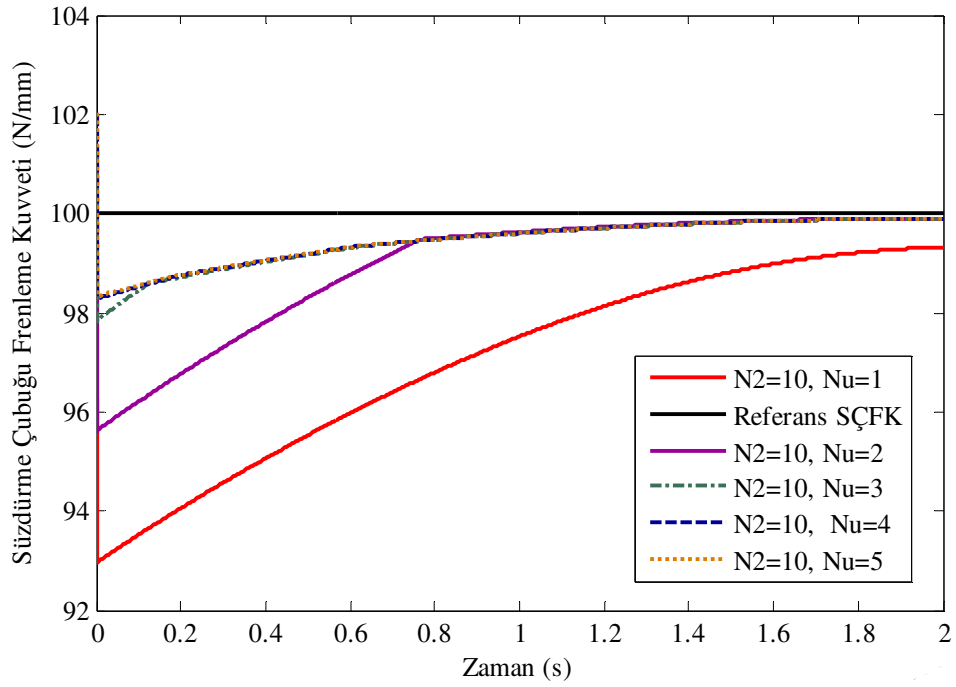
$Ref_{\text{ÇFK}} = 100$ N/mm
olarak alınmıştır.

Kontrolör parametrelerinden öngörü ufkunun $N_2=10$ ve kontrol ufkunun $N_u=1, 2, 3, 4, 5$ değerleri kullanılarak Şekil 5.8'de görülmekte olan benzetim modelinin çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar Şekil 5.9'da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

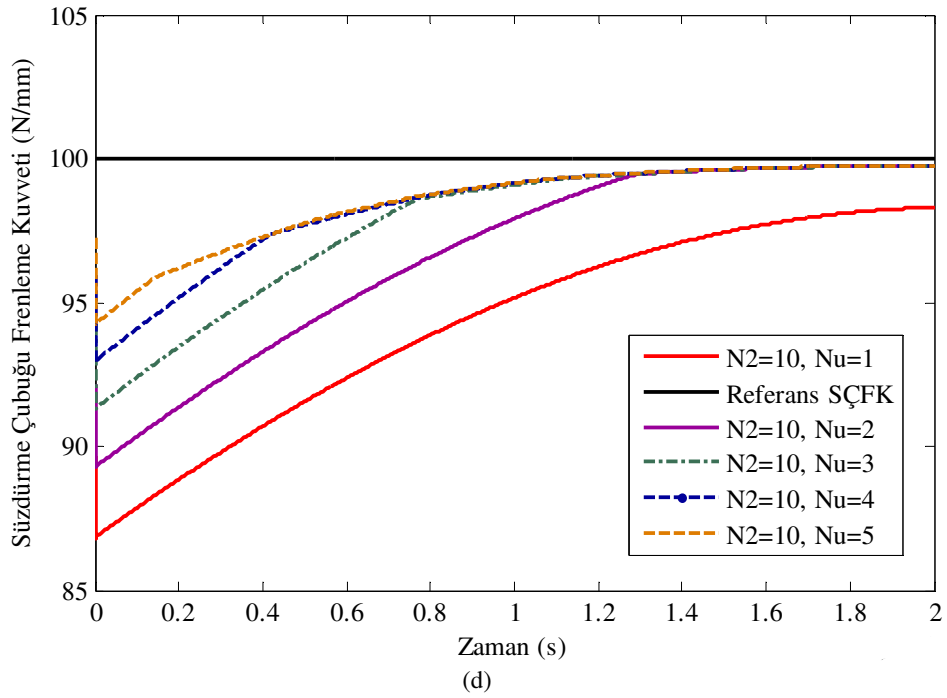
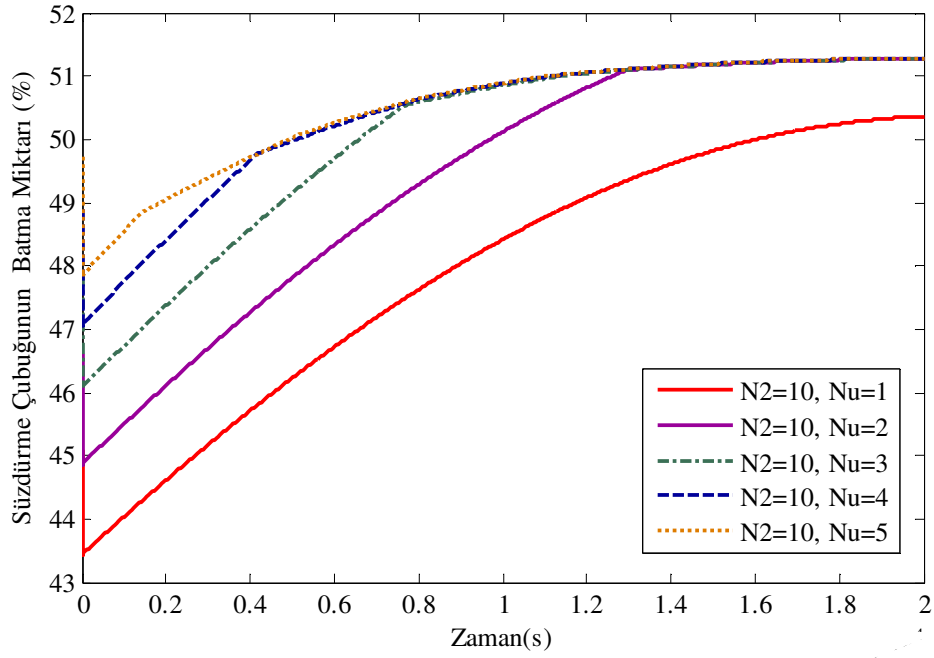
Şekil 5.9 incelendiğinde M1 ve M2 kodlu iki malzeme için de gerçekleştirilen benzetimlerde kontrol ufkunun artırılmasıyla yükselme zamanının düştüğü görülmektedir. Böylece kontrol ufkundaki artış kontrolör performansını artırmakta ve çıkış y 'nin alacağı değerlerin istenen referans değere daha çabuk ulaşmasını sağlamaktadır. Ancak kontrol ufkunun gereğinden fazla artırılması hesapsal yükün artmasına sebep olur ve yüksek değerleri kontrol değişkeninde istenmeyen salınımlara neden olarak kontrol değişkeni ve kontrol sinyalini denge durumundan uzaklaştırır. $N_u=1$ alındığında istenen çıkış değerine ulaşamamış, diğer tüm durumlarda farklı zamanlarda istenen çıkış değeri oldukça küçük hatalar (maksimum % 0,24) ile elde edilebilmiştir. $N_u=1, 2, 3$ ve 4 değerlerinin kullanılması sonucundaki çıkış değerleri arasında daha büyük farklar görünürken $N_u=4$ ve 5 alındığında elde edilen çıkışlar arasında proses için farklılık yaratacak bir sonuç bulunmamaktadır. Tüm bunlar dikkate alındığında kontrol ufku için $N_u=4$ değeri seçilmiştir.



(a)

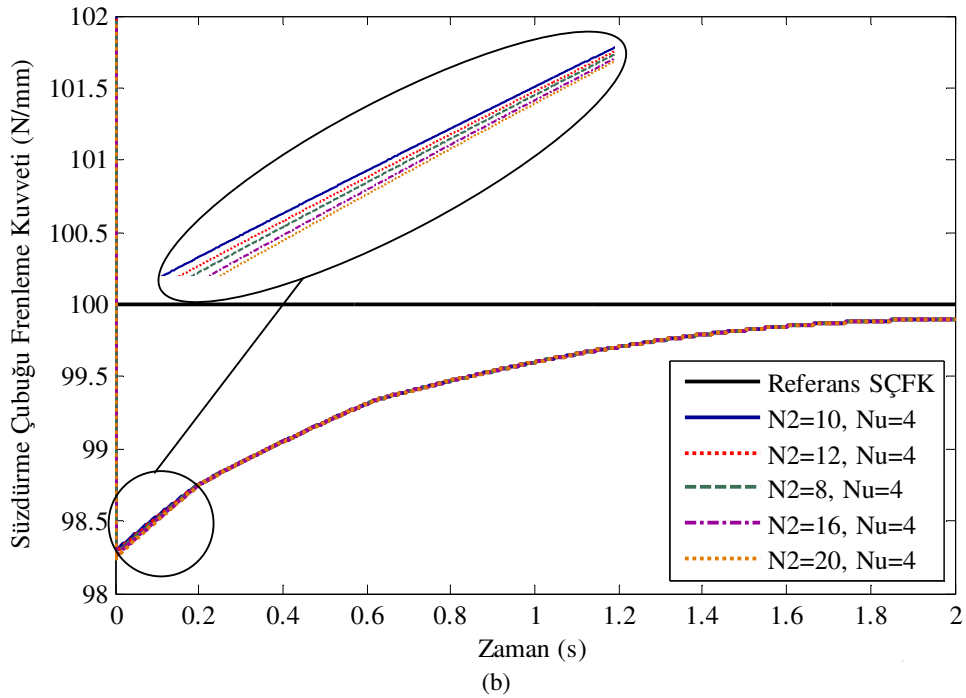
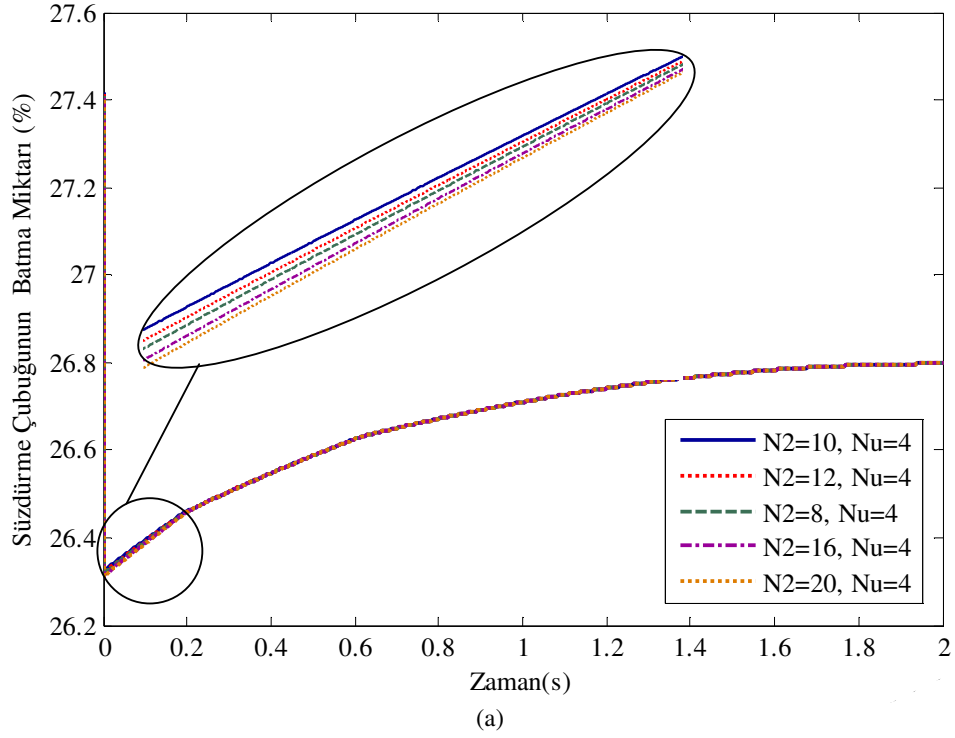


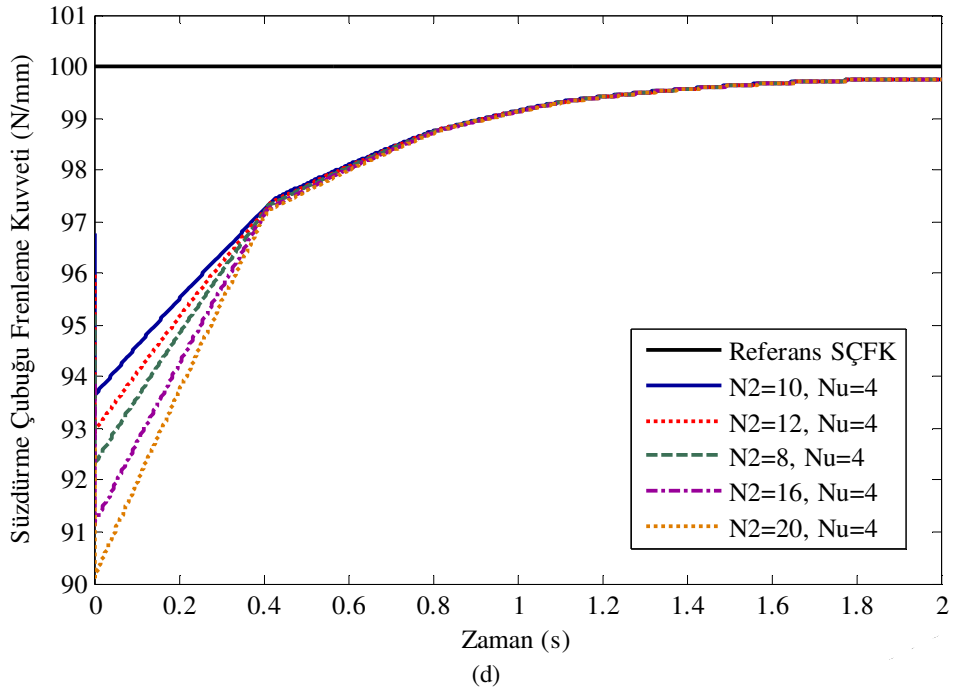
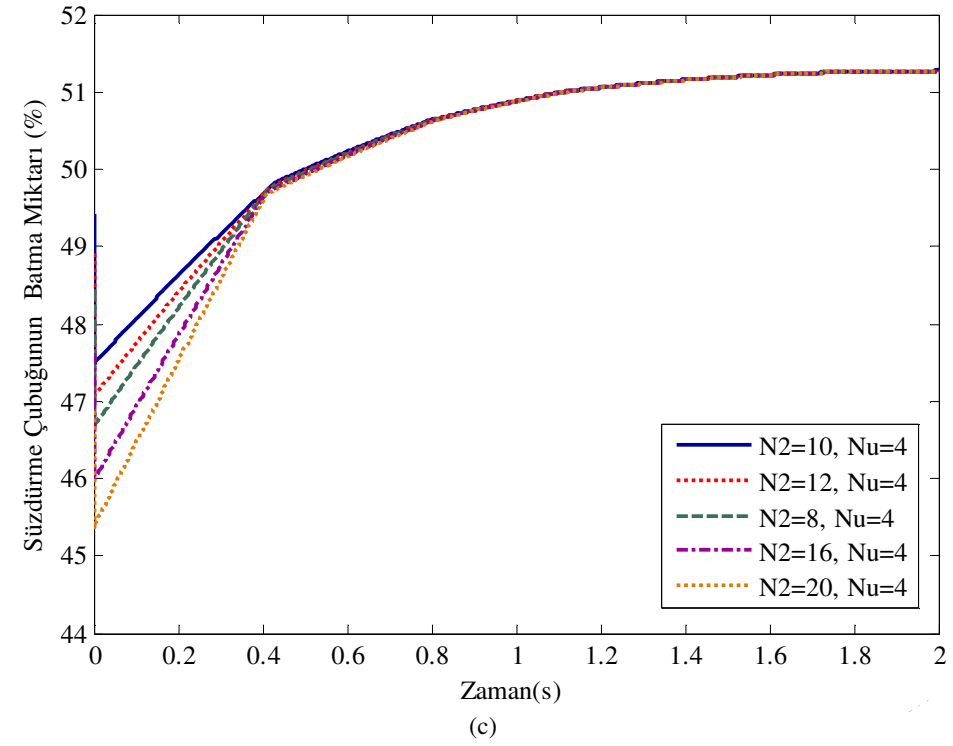
(b)



Şekil 5.9. N_u kontrol ufkunun değişiminin kontrol performansına etkisi a) M1 kodlu malzeme için $u(t)$ kontrol sinyali değişimi, b) M1 kodlu malzeme için proses cevabı, c) M2 kodlu malzeme için $u(t)$ kontrol sinyali değişimi, d) M2 kodlu malzeme için proses cevabı

Kontrolör parametrelerinden kontrol ufkunun seçilen $N_u=4$ ve öngörü ufkunun $N_2=8, 10, 12, 16, 20$ değerleri için Şekil 5.8'deki benzetim modelinin çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar Şekil 5.10'da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

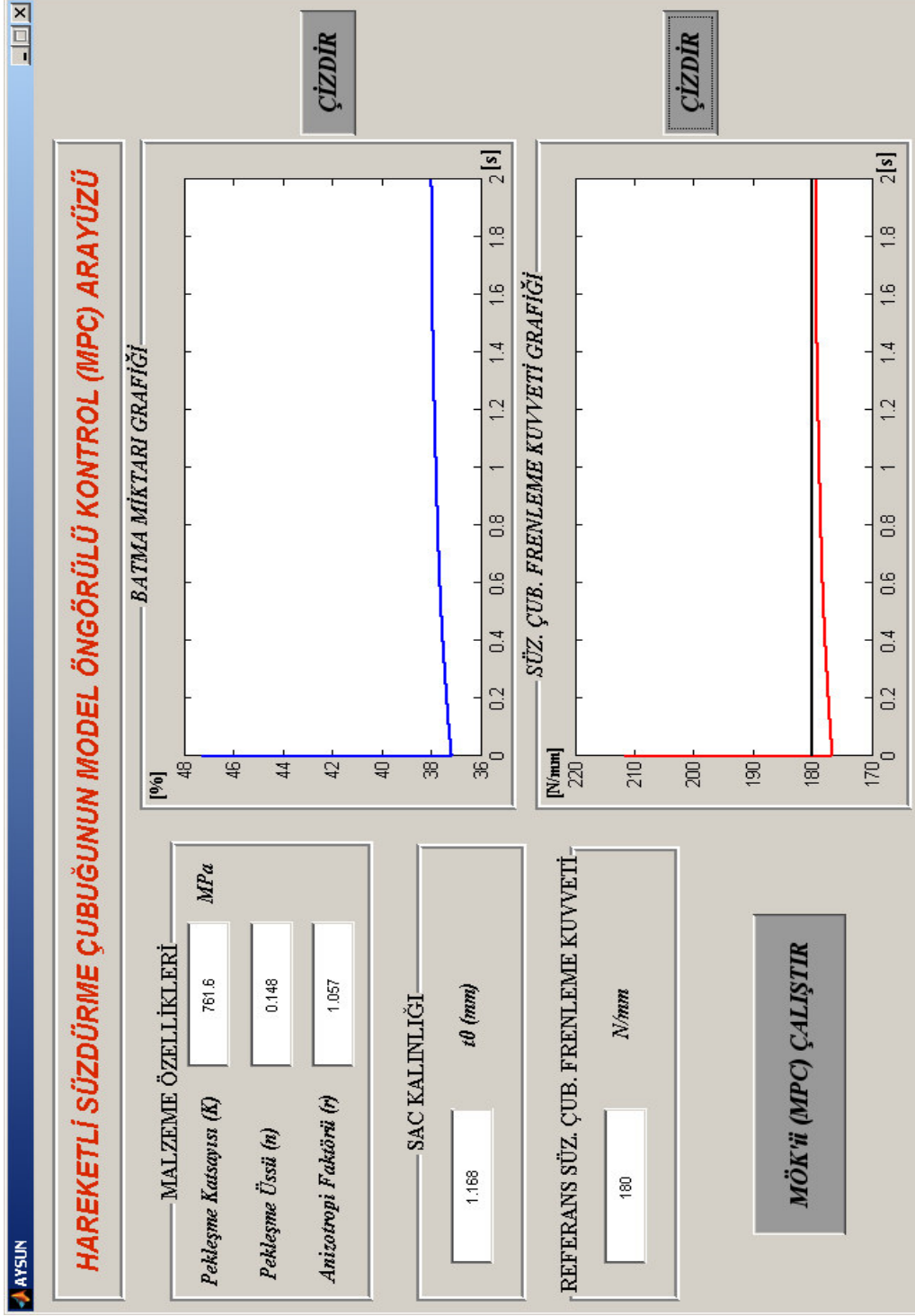




Şekil 5.10. N_2 öngörü ufkunun değişiminin kontrol performansına etkisi a) M1 kodlu malzeme için $u(t)$ kontrol sinyali değişimi, b) M1 kodlu malzeme için proses cevabı, c) M2 kodlu malzeme için $u(t)$ kontrol sinyali değişimi, d) M2 kodlu malzeme için proses cevabı

Şekil 5.10 incelendiğinde M1 ve M2 kodlu iki malzeme için de kontrol ufkunun seçilen $N_u=4$ değeri alınarak gerçekleştirilen benzetimlerde öngörü ufkunun tüm değerlerinde istenen çıkışa oldukça küçük kalıcı hatalar (maksimum %0.25) ile ulaşılmıştır. Öngörü ufkunun artırılmasıyla kontrolör performansı artmaktadır. Ancak öngörü ufkunun gereğinden fazla artırılması proses çıkışında iraksamaya sebep olur. M1 kodlu malzeme için öngörü ufkunun değişen değerleri arasında belirgin bir farklılık görülmemiştir. M2 kodlu malzeme için gerçekleştirilen benzetim sonuçları incelendiğinde ise öngörü ufkunun değişik değerleri arasındaki farklılık daha net görülebilmektedir. Öngörü ufkunun $N_2=10$ değeri için kontrolör en iyi performansı göstermiş ve bu tez çalışması için $N_2=10$ değeri kullanılmaya karar verilmiştir.

Tasarlanan kontrolör kullanılarak süzdürme çubuğunun model öngörülü kontrol benzetim modeli ve bu modeli çalıştıran bir arayüz tasarlanmıştır. Bu sayede malzeme özellikleri, sac kalınlığı ve referans süzdürme çubuğu frenleme kuvveti kullanıcı tarafından girilerek kontrolör çalıştırılabilmekte ve kontrolör çıkışı olan % batma miktarının değişimi ile proses cevabının referans SÇFK değerine ne kadar yaklaştığı grafikler üzerinden izlenebilmektedir. Ayrıca kullanıcı tarafından girilen parametre değerleri üzerinde yapılan herhangi bir değişikliğin sonucu kolaylıkla grafikler üzerinde tekrar görülebilmektedir. Hareketli süzdürme çubuğunun model öngörülü kontrolüne ait hazırlanan arayüz Şekil 5.11’de görülmektedir.

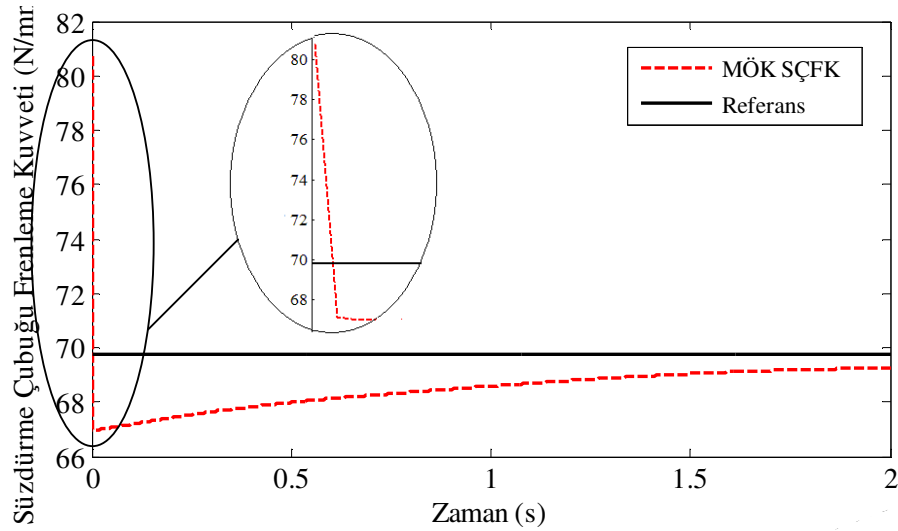


Şekil 5.11. Hareketli süzdürme çubuğunun model öngörülü kontrol arayüzü

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

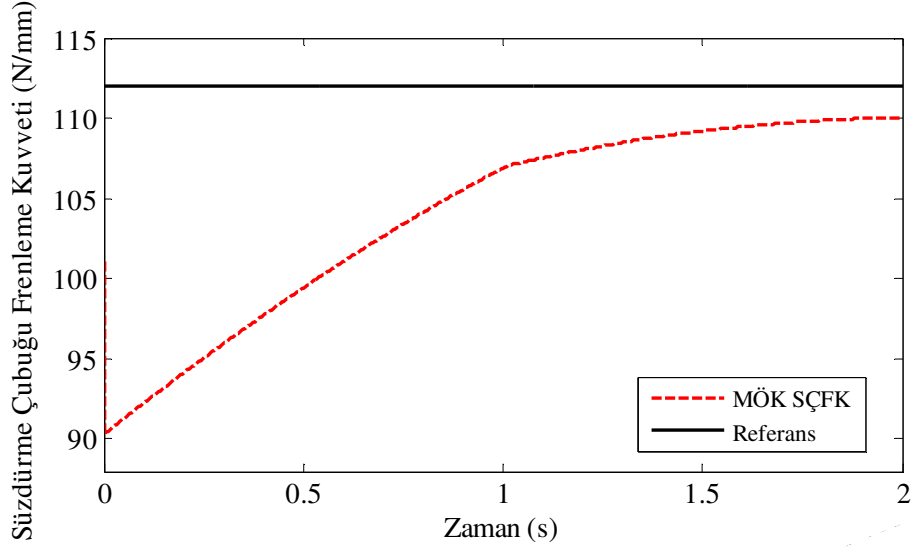
6.1. Analizlerden Elde Edilen Optimum SÇFK'nin MÖK'e Referans Verilmesi

Düzgün sac kalınlığı dağılımına sahip iyi bir şekillendirmenin elde edilebilmesi için süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin optimum değerleri Şekillendirme Sınır Eğrisinden faydalanılarak analiz programları ve optimizasyon yöntemleriyle elde edilebilmektedir. Daha önce bu konuda yapılan, optimum frenleme kuvvetinin elde edildiği çalışmalarda bulunan veriler bu tez çalışmasında geliştirilen kontrol yönteminin doğruluğunu göstermek için kullanılmıştır. Bae ve arkadaşlarının [74] çalışmalarında kullandığı malzeme özellikleri; $K=765,8$ MPa, $n=0,283$ ve $r=1,78$, sac kalınlığı $t_0=0,9$ 'dur. İyi bir şekillendirme için hesapladıkları optimum süzdürme çubuğu frenleme kuvvetlerinden SÇFK=69,77 N/mm değeri bu çalışmada tasarlanan kontrolöre referans değer olarak verilmiş ve Şekil 6.1'de elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.



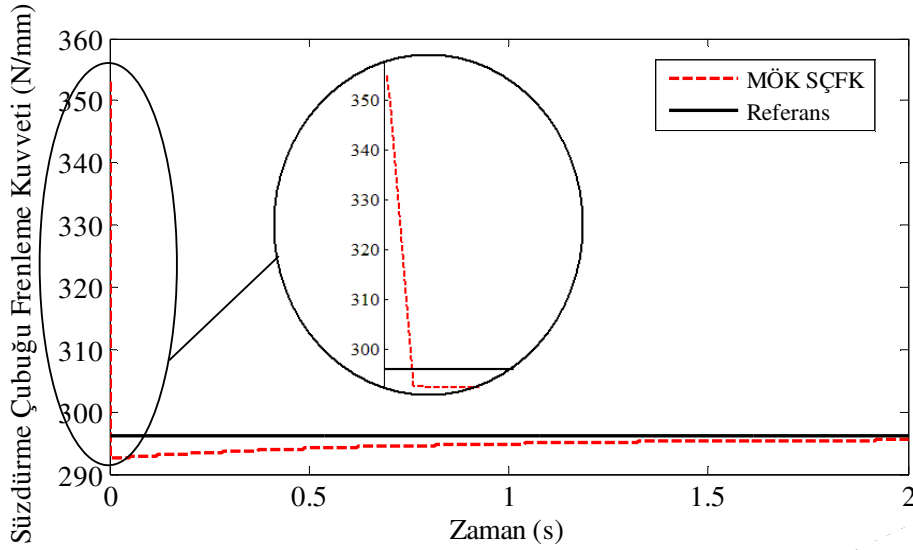
Şekil 6.1. Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin model öngörülü kontrolü (Ref=69,77 N/mm)

Tang ve arkadaşları [42] tarafından gerçekleştirilen çalışmada malzeme özellikleri; $K=628$ MPa, $n=0,246$ ve $r=2,126$, sac kalınlığı $t_0=0,7$ olan bir sac malzeme kullanmışlar ve elde ettikleri optimum süzdürme çubuğu frenleme kuvvetlerinden $SÇFK=112$ N/mm değeri bu çalışmada tasarlanan kontrolöre referans değer olarak verilmiş ve Şekil 6.2’de elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin model öngörülmesi (Ref=112 N/mm)

Naceur ve arkadaşları [43], çalışmalarında malzeme özellikleri; $K=624$ MPa, $n=0,176$ ve $r=0,995$, sac kalınlığı $t_0=1,97$ mm olan bir sac malzeme kullanmışlar ve elde ettikleri optimum süzdürme çubuğu frenleme kuvvetlerinden $SÇFK=296$ N/mm değeri bu çalışmada tasarlanan kontrolöre referans değer olarak verilmiş ve Şekil 6.3’de elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

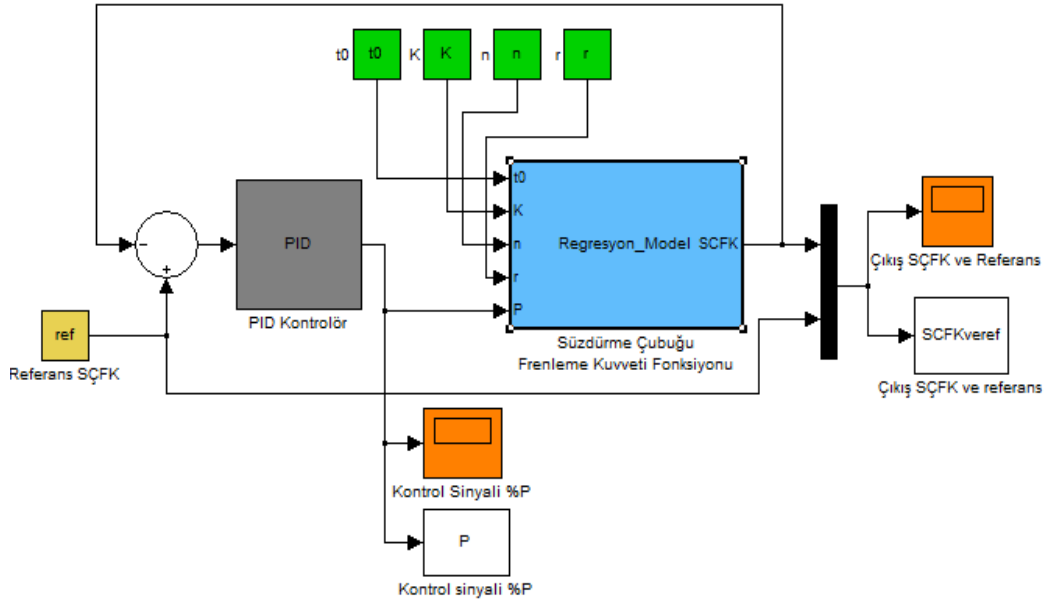


Şekil 6.3. Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin model öngörülü kontrolü (Ref=296 N/mm)

Literatürdeki farklı geometriye sahip parçalar için tasarlanan kalıplarda, malzeme özellikleri ve kalınlığı verilen sacın çekilmesi sırasında süzdürme çubuğundan beklenen optimum frenleme kuvveti, tasarlanan model öngörülü kontrolöre referans olarak verildiğinde elde edilen proses cevabı optimum süzdürme çubuğu frenleme kuvvetlerine Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de görüldüğü gibi oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir. En büyük hata oranı %2 ile Şekil 6.2’de görülmekte olan model öngörülü kontrol cevabındadır. Daha önce yapılan çalışmalarda süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin %5 civarında hatalar ile kestirildiği görülmüş ve deneysel veriler ile iyi uyum sağladığı belirtilmiştir [25,26]. Bu çalışmadaki %5’e kadar olan hata oranının literatürde kabul edilebilir ölçüler arasında kaldığı düşünülürse, kontrol çevriminden elde edilen sonuçların güvenilir olduğu anlaşılmaktadır.

6.2. Model Öngörülü Kontrolör ile PID Kontrolörün Karşılaştırılması

Geliştirilen model öngörülü kontrolör ile karşılaştırmak amacıyla aynı proses için bir de PID kontrolör tasarlanmıştır. PID kontrolör parametreleri $K_p=10$, $K_i=10$ ve $K_d=2$ olarak alınmıştır. PID kontrol için Simulink’de hazırlanan benzetim model görüntüsü Şekil 6.4’de verilmiştir. Model öngörülü kontrolör ve PID kontrolör aynı şartlarda hem sabit referans hem de değişken referans altında çalıştırılmıştır.



Şekil 6.4. Süzdürme çubuğu için tasarlanan PID kontrollü benzetim modeli

6.2.1. Sabit referans altında çalıştırılması

Sabit bir referans süzdürme çubuğu frenleme kuvveti değeri verilerek PID kontrolör ve model öngörülü kontrolör çalıştırılmış ve Şekil 6.5’de karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir.

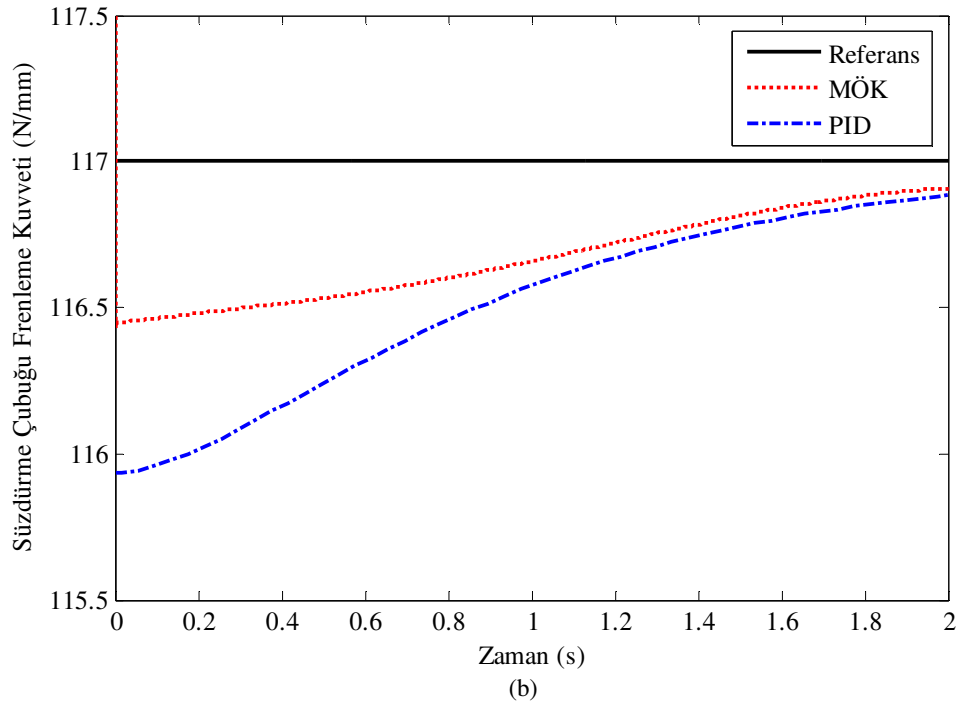
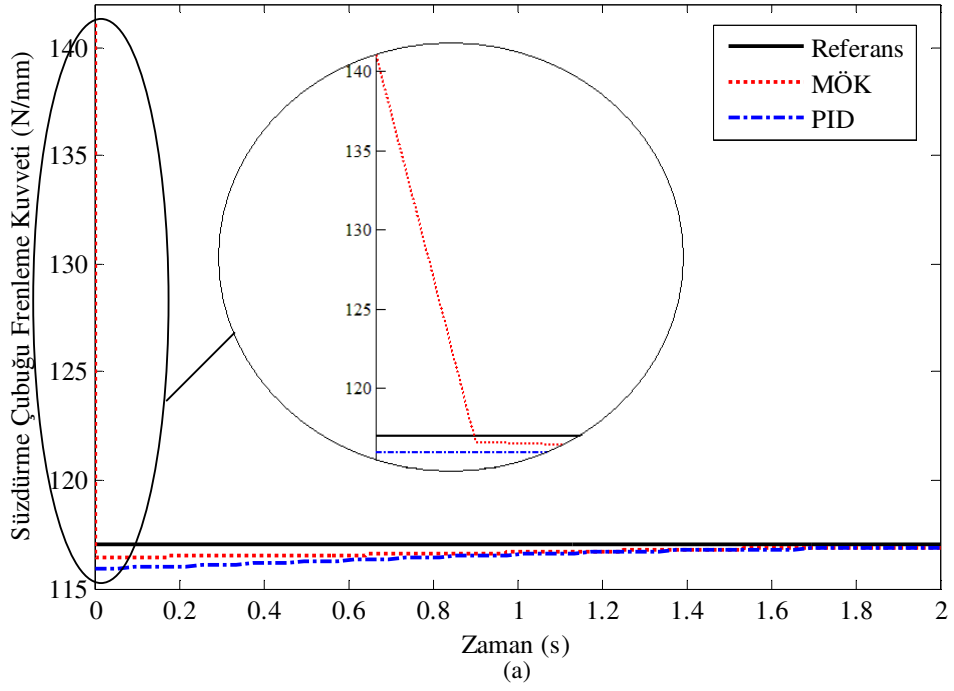
Kullanılan malzeme özellikleri, sac kalınlığı ve referans değer;

$$t_0 = 1,97 \text{ mm}, \quad K = 624 \text{ MPa}, \quad n = 0,176 \quad r = 0,995$$

$$\text{Ref}_{\text{SÇFK}} = 117 \text{ N/mm}$$

olarak literatürde bulunan verilerden alınmıştır [43].

Şekil 6.5 incelendiğinde model öngörülü kontrolör ile ilk 0,003 saniyede proses cevabı 116,45 N/mm değerini alırken PID kontrolör ile 115,93 N/mm değerine ulaşılmıştır. Model öngörülü kontrolör PID kontrolöre göre daha hızlı cevap vermiştir. Her iki kontrolör de süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin verilen sabit referans değerine %1’in altında hata ile yerleşmesini sağlamıştır.

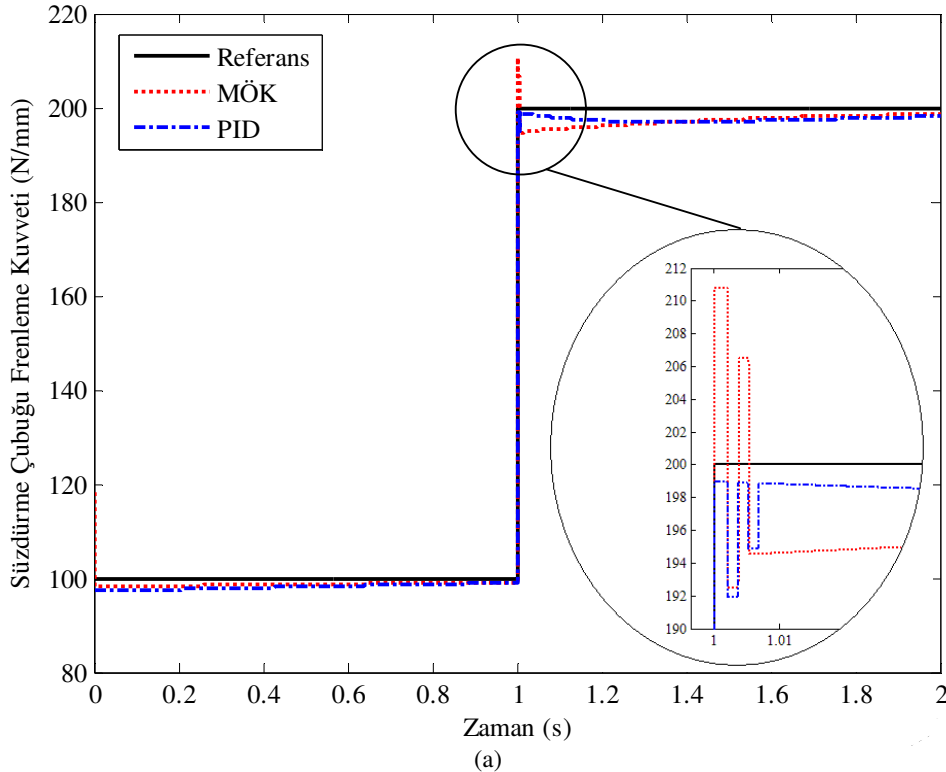


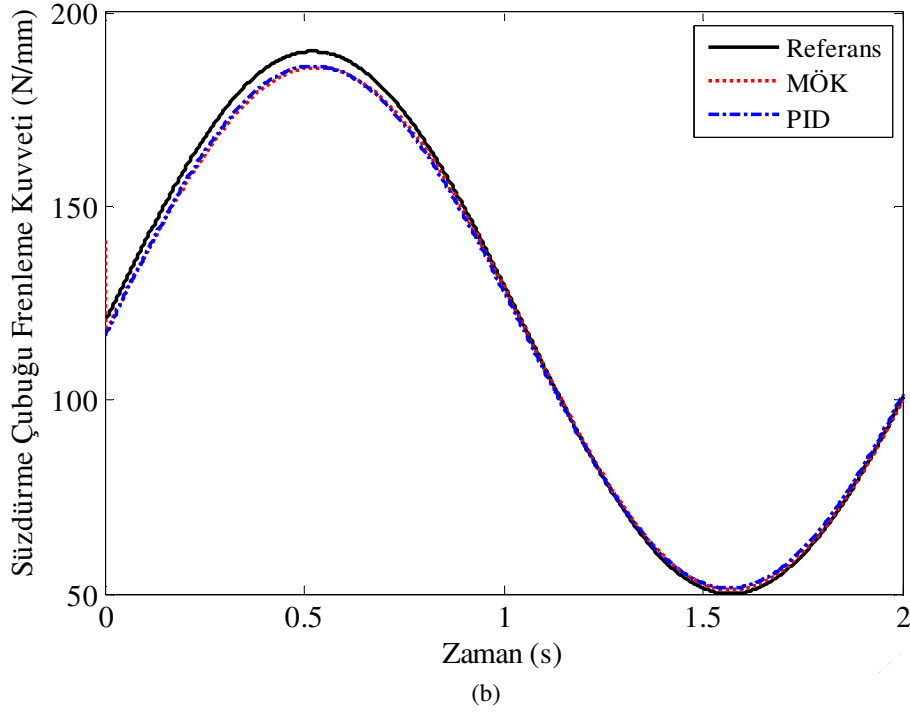
Şekil 6.5. MÖK ve PID kontrol altında sabit referans değeri için proses cevabı a) düşey eksen yakın görüntüsü, b) yatay eksen yakın görüntüsü

6.2.2. Değişken referans altında çalıştırılması

PID kontrolör ve Model Öngörülü Kontrolör basamak ve sinüs fonksiyonu olmak üzere değişken referanslar altında, soğuk haddelenmiş-alüminyumdan arındırılmış çekme kalitesindeki sac malzeme özellikleri $K=543,9$ MPa, $n=0,209$, $r=1,652$ ve sac kalınlığı $t_0=1,198$ mm verilerek çalıştırılmış ve karşılaştırmalı sonuçları Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Basamak girişi referans verildiğinde ilk 1s 100 N/mm daha sonraki değerler 200 N/mm seçilmiştir. Sinüs eğrisi referans verildiğinde başlangıç değeri 120 N/mm ve genlik 70 N/mm verilmiştir.

Şekil 6.6'da görüldüğü üzere değişken referanslar altında çalıştırılan MÖK ve PID kontrole ait proses cevapları arasında belirgin bir fark bulunmamakla birlikte MÖK'ün PID kontrolöre göre daha hızlı cevap verdiği görülmektedir. MÖK yönteminde süzdürme çubuğu frenleme kuvveti basamak referans değerine %1'in altında kalıcı hata ile PID kontrol yönteminde ise %1 civarında kalıcı hata ile yerleşmiştir. Sinüs referans değerine ise proses, MÖK altında maksimum %2, PID kontrol altında maksimum %3 hata ile cevap vermiştir.





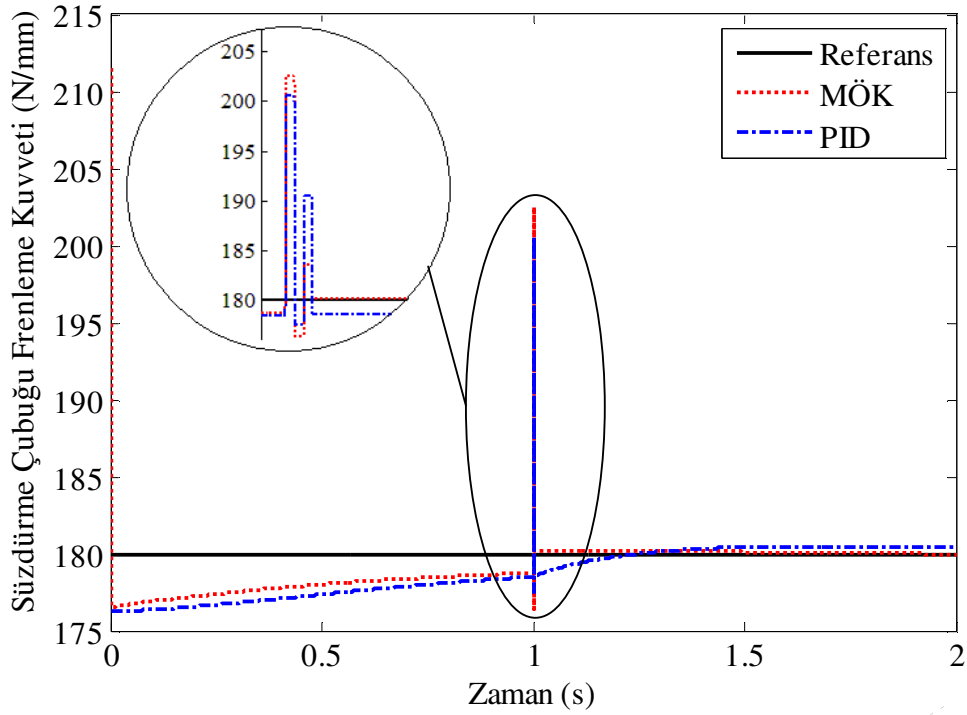
Şekil 6.6. MÖK ve PID kontrol altında değişken referans için proses cevabı a) Basamak fonksiyonu, b) Sinüs fonksiyonu

6.2.3. Bozucu etkiler altında çalıştırılması

Geliştirilen model öngörülü kontrolörün bozucu etkiler karşısındaki davranışını izleyebilmek için proses üzerine 1. saniyede 60 N/mm’lik etkiye sahip bir bozucu büyüklük uygulanmıştır. Süzdürme çubuğu frenleme kuvveti için 180 N/mm’lik sabit referans seçilmiş ve prosesin MÖK altında bozucu büyüklüğe vereceği cevap incelenmiştir. Bu uygulamalar sırasında kullanılan soğuk haddelenmiş-yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliğin malzeme özellikleri ve sac kalınlığı;

$t_0 = 1,168$ mm, $K = 761,6$ MPa, $n = 0,149$ $r = 1,057$
olarak alınmıştır.

Ayrıca PID kontrolörün de bozucu etkiler karşısındaki davranışı incelenmiştir. MÖK ve PID kontrol altında sabit referans değeri için bozucu etkiye karşı proses cevabı Şekil 6.7’de karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.7. MÖK ve PID kontrol altında sabit referans değeri için prosesin bozucu etkiye karşı cevabı

Şekil 6.7 incelendiğinde 1. saniyede bozucu büyüklük uygulanması ile proses cevabının, MÖK altında referans değerine 23 N/mm bir aşımından 0,003 saniye sonra yerleştiği görülmektedir. PID kontrolör ile elde edilen proses cevabının, 20 N/mm'lik bir aşımından 0,5 saniye sonra referans değeri ile arasında yaklaşık % 0,25'lik kalıcı hata ile yerleştiği gözlenmiştir. Ayrıca bozucu büyüklük uygulanmadan önce 0,9. saniyede MÖK ile proses cevabı 178,64 N/mm iken PID ile 178,3 N/mm olmuştur. Daha önceki uygulamalarda da olduğu gibi MÖK'ün PID kontrolöre göre daha hızlı cevap verdiği ve performansının daha iyi olduğu görülmüştür.

BÖLÜM 7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Süzdürme çubuğunun oluşturduğu frenleme kuvvetini kestirmek için ilk olarak eğri uydurma yöntemi kullanılarak her bir malzeme için % batma miktarının (süzdürme çubuğu yarıçapları, batma yüksekliği ve sac kalınlığına bağlı hesaplanır) değişimine bağlı kübik bir polinom model elde edilmiştir. Bu modeller incelendiğinde hepsinde korelasyon katsayısının (R^2) 0,9950 civarında olduğu görülmüştür. Güvenirlik katsayısı da denen bu değer 1'e oldukça yakın olması hesaplanan polinom modellerin başarılı sonuç verdiğini ve performansının iyi olduğunu göstermektedir. Ancak burada farklı malzemelerde farklı bir modelin kullanılma zorunluluğunun bulunması bir dezavantaj oluşturmaktadır.

Süzdürme çubuğunun oluşturduğu frenleme kuvvetini kestirmek için bir matematiksel model daha geliştirilmiştir. Bu modelde % batma miktarının yanı sıra sac malzeme özellikleri ve sac kalınlığı da değişken parametreler olarak sunulmuştur. Regresyon yöntemi kullanılarak değişken parametrelerin farklı şekilde etki ettiği 4 farklı regresyon model elde edilmiştir. Bu modeller deneysel veriler ile karşılaştırıldığında ve her bir model için hataların karelerinin ortalamalarının karekökü (RMSE) ve korelasyon katsayısının (R^2) değerleri hesaplandığında en başarılı sonuçların ikinci dereceden-etkileşimli regresyon model ile elde edildiği görülmüştür. Bu yüzden süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini kontrol etmek için tasarlanan kontrol çevriminde prosesin modelini temsil etmek üzere ikinci dereceden-etkileşimli regresyon model seçilmiştir. Ayrıca bu model sayesinde herhangi bir deney veya analiz yapmaya gerek kalmadan, geometrisi belli olan süzdürme çubuğunun malzeme özellikleri ve kalınlığı belli olan sac üzerinde oluşturduğu frenleme kuvvetinin değeri bulunabilir. Bu sayede zaman kaybı ve ek bir maliyet ortadan kalkmıştır.

Geliştirilen model öngörülü kontrolör literatürden de alınan farklı malzemeler ve farklı referans değerleri altında çalıştırılmış ve proses cevabının referans değere kararlı bir şekilde yaklaştığı görülmüştür. Kontrolörün değişken referans ve bozucu etkiler altında çalıştırıldığı durumda da proses cevabının referansı kararlı bir şekilde oldukça yakından takip ettiği gözlenmiştir. Tüm bu çalışmaların sonucunda %5'in altında kalan hata oranının literatürde süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin değişimi için kabul edilebilir değerler arasında kaldığı dikkate alınırsa geliştirilen model öngörülü kontrolörün güvenilir sonuçlar verdiği ve performansının iyi olduğu anlaşılmaktadır.

Model öngörülü kontrolör PID kontrolör ile karşılaştırıldığında PID kontrolörün de prosesi başarıyla kontrol ettiği görülmüştür. Ancak model öngörülü kontrolör PID kontrolöre göre referansa daha hızlı cevap vermekte ve bozucu etkiler altında daha iyi performans sergilemektedir. Model öngörülü kontrolöre uygulanabilen kısıtlamalar da göz önüne alındığında sonuç olarak bu proses için model öngörülü kontrolörün PID kontrolöre göre daha sağlıklı çalıştığı kanaatine varılmıştır.

7.1. Öneriler

Süzdürme çubuğunun oluşturduğu frenleme kuvvetini kestiren matematiksel modeli oluşturmak için yapılan deneylerde sabit değerlere sahip olan bazı parametrelerin (yağlayıcı-sürtünme kuvveti, baskı plakası kuvveti vb.) de farklı değerleri kullanılarak bu parametrelerin etkileri incelenebilir. Bu deneylerden elde edilen verilerin kullanılmasıyla değişken sayısı daha fazla olan daha genel bir matematiksel model geliştirilebilir.

İyi bir şekillendirme sağlamak için kullanılan frenleme kuvvetini elde etmek için süzdürme çubuğuna alternatif olarak elektronik sistemler denenerek bunların kontrolü gerçekleştirilebilir.

Kontrolöre referans olarak verilen süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin iyi şekillendirme için gerekli optimum sabit değerleri yerine şekillendirme prosesi

sırasında zamana bağlı değişken kuvvet değerleri kullanılarak elde edilen şekillendirme sonuçları araştırılabilir.

Ayrıca geliştirilen kontrolör sac şekillendirme işleminin gerçekleştirildiği preslere entegre edilebilir. Bu sayede proses ile eş zamanlı çalıştırılarak nihai ürün kalitesi artırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] STONE, R., BALL, J.K., Automotive engineering fundamentals, SAE International, 2004.
- [2] HOSFORD, W. F., CADDELL, R. M., Metal forming: mechanics and metallurgy, Prince-Hall, NJ, 1993.
- [3] SCHULER, Metal forming handbook, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- [4] ÇİÇEK, O., Effect of drawbeads in sheet metal forming, MSc Thesis, Istanbul Technical University, Department of Mechanical Engineering, August, 2005.
- [5] HSU, C.W., ULSOY, A.G., DEMERI M.Y., Development of process control in sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, 127, pp. 361-368, 2002.
- [6] GARCIA, C., Artificial intelligence applied to automatic supervision, diagnosis and control in sheet metal stamping processes, Journal of Materials Processing Technology, 164-165, pp. 1351-1357, 2005.
- [7] KOYAMA, H., WAGONER, R.H., MANABE, K., Blank Holding Force Control in Panel Stamping Process Using Database and FEM-Assisted Intelligent Process Control System, Journal of Materials Processing Technology, pp. 190-196, 2004.
- [8] MANABE, K., KOYAMA, H., YOSHIHARA, S., YAGAMI, T., Development of a Combination Punch Speed and Blank-Holder Fuzzy Control System for The Deep-Drawing Process, Journal of Materials Processing Technology, pp. 440-445, 2002.
- [9] LORENZO, R.D., PERRONEZ, G., DIEGA, S.N.L., Design of a fuzzy controller for the deep drawing process by using GAS, Second International Conference on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems, pp. 102-108, Adelaide, Australia, 21-23 April 1998.
- [10] SIEGERT, K., ZIEGLER, M., WAGNER, S., Closed loop control of the friction force. Deep drawing process, Journal of Materials Processing Technology, 71, pp. 126-133, 1997.

- [11] LO, S.-W., YANG, T.-C., Closed-loop control of the blank holding force in sheet metal forming with a new embedded-type displacement sensor, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 24, pp. 553-559, 2004.
- [12] AHMETOĞLU, M.A., KINZEL, G., ALTAN T., Forming of aluminum alloys-application of computer simulations and blank holding force control, *Journal of Materials Processing Technology*, 71, pp. 147-151, 1997.
- [13] HSU, C.-W., Analysis, Design and Experiments for Punch Force Control in Sheet Metal Forming, Doctor of Philosophy, Michigan Technology University, Department of Mechanical Engineering, 2000.
- [14] LI, X., QIANZH S., On intelligent control of sheet metal forming, *Proceedings of the 27th Chinese Control Conference*, pp. 302-305, Kunming, Yunnan, China, July 16-18, 2008.
- [15] FENN, R.C., Closed-loop control of forming stability during metal stamping, Doctor of Philosophy, Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering, August 1989.
- [16] LIU, W., LIANG, Z., HUANG, T., CHEN, Y., LIAN J., Process optimal control of sheet metal forming springback based on evolutionary strategy, *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 7940-7945, Chongqing, China, June 25-27, 2008.
- [17] YOSHIDA, T., KATAYAMA, T., HASHIMOTO, K., KURIYAMA Y., Shape control techniques for high strength steel in sheet metal forming, *Nippon Steel Technical Report*, No. 88, pp. 27-32, July 2003.
- [18] CAO, J., KINSEY, B., SOLLA, S.A., Consistent and Minimal Springback Using a Stepped Binder Force Trajectory and Neural Network Control, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 122, pp.113-118, January 2000.
- [19] VISWANATHAN, V., KINSEY, B., CAO, J., Experimental Implementation of Neural Network Springback Control for Sheet Metal Forming, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 125, pp. 141-147, April 2003.
- [20] HSU, C.-W., ULSOY, A.G., DEMERI, M.Y., An approach for modeling sheet metal forming for process controller design, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 122, pp. 717-724, November 2000.
- [21] KRISHNAN, N., CAO J., Estimation of optimal blank holder force trajectories in segmented binders using an ARMA model, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 125, pp. 763-770, Nov. 2003.

- [22] CAI, Z.-Y., LI M.-Z., Multi-point forming of three-dimensional sheet metal and the control of forming process, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79, pp. 289-296, 2002.
- [23] FILLATREAU, P., BERNARD, F.X., AZTIRIA, A., SAENZ DE ARGANDONA, E., GARCIA, C., ARANA, N., IZAGUIRRE A., Sheet metal forming global control system based on artificial vision system and force- acoustic sensors, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, pp. 780- 787, 2008.
- [24] CAO, J., KINSEY, B.L., YAO, H., VISWANATHAN, V., SONG N., Next generation stamping dies-controllability and flexibility, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 17, pp. 49-56, 2001.
- [25] MICHLER, C.R., The drawbead as a controller element in sheet metal forming, Doctor of Philosophy, Michigan Technology University, 1994.
- [26] BOHN, M.L., Optimization of the sheet metal stamping process: Closed-loop active drawbead control combined with in-die process sensing, Doctor of Philosophy, Michigan Technology University, Mechanical Engineering-Engineering Mechanics, 1994.
- [27] EMBLOM, W.J., Closed-loop control of the sheet metal stamping process with active drawbeads, a flexible blankholder and variable active blank holder forces, Doctor of Philosophy, Michigan Technology University, Mechanical Engineering-Engineering Mechanics, 2006.
- [28] MICHLER, J.R., WEINMANN, K.J., KASHANI A.R., MAJLESSI, S.A., A strip-drawing simulator with computer-controlled drawbead penetration and blankholder pressure, *Journal of Materials Processing Technology*, 43, Issues 2-4, pp. 177-194, June 1994.
- [29] WEINMANN, K.J., MICHLER, J.R., RAO, V.D., KASHANI A.R., Development of a computer-controlled drawbead simulator for sheet metal forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 43, Issue 1, pp. 257-261, 1994.
- [30] 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.
- [31] VAHDAT, V., SANTHANAM, S., CHUN Y.W., A numerical investigation on the use of drawbeads to minimize ear formation in deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 176, pp. 70-76, 2006.
- [32] CHEN, F.-K., TSZENG, P.-C., An analysis of drawbead restraining force in the stamping process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38, pp. 827-842, 1998.

- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] COURVOISIER, L., MARTINY, M., FERRON G., Analytical modelling of drawbeads in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 133, pp. 359-370, 2003.
- [36] KEUM, Y.T., KIM J.H., GHOO, B.Y., Expert drawbead models for finite element analysis of sheet metal forming processes, *International Journal of Solids and Structures*, 38, pp. 5335-5353, 2001.
- [37] GHOO, B.Y., KEUM, Y.T., Expert drawbead models for sectional fem analysis of sheet metal forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 105, pp. 7-16, 2000.
- [38] KEUM, Y.T., GHOO, B.Y., KIM J.H., Application of an expert drawbead model to the finite element simulation of sheet forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 111, pp. 155-158, 2001.
- [39] KIM, C., IM, Y., HEO, Y., KIM, N., JUN, G., SEO D., Finite element analysis and experimental verification for drawbead drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 72, pp. 188-194, 1997.
- [40] LI, R., WEINMANN K.-J., Formability in non-symmetric aluminium panel drawing using active drawbeads, *Annals of the CIRP*, 48/1, pp. 209-212, 1999.
- [41] SAMUEL, M., Influence of drawbead geometry on sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 122, pp. 94-103, 2002.
- [42] TANG, B., SUN, J., ZHAO, Z., CHEN, J., RUAN X., Optimization of drawbead design in sheet forming using one step finite element method coupled with response surface methodology, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-005-0208-5, 2005.
- [43] NACEUR, H., GUO, Y.Q., BATOZ, J.L., KNOPF-LENOIR C., Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, pp. 2407-2434, 2001.
- [44] JUNG, D.W., Static-explicit finite element method and its application to drawbead process with spring-back, *Journal of Materials Processing Technology*, 128, pp. 292-301, 2002.

- [45] LEE, M.G., CHUNG, K., WAGONER, R.H., KEUM Y.T., A numerical method for rapid estimation of drawbead restraining force based on non-linear, anisotropic constitutive equations, *International Journal of Solids and Structures*, 45, pp. 3375–3391, 2008.
- [46] HAN, X., WANG, G., LIU, G.P., A modified Tikhonov regularization method for parameter estimations a drawbead model, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 17/4, pp. 437–449, 2009.
- [47] 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.
- [48] FIRAT, M., An analysis of sheet drawing characteristics with drawbead elements, *Computational Materials Science*, 41, pp. 266–274, 2008.
- [49] You, Y., Calculation of drawbead restraining forces with the Bauschinger effect, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 212/B, pp. 549-553, 1998.
- [50] LARSSON M., Computational characterization of drawbeads: A basic modeling method for data generation, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, pp. 376-386, 2009.
- [51] FIRAT, M., LİVATYALI, H., CİCEK, O., ONHON M.F., Improving the accuracy of contact-type drawbead elements in panel stamping analysis, *Materials and Design*, 30, pp. 4003–4011, 2009.
- [52] 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.
- [53] SHERİFF, N.M., İSMAİL M.M., Numerical design optimisation of drawbead position and experimental validation of cup drawing process, *Journal of materials processing technology*, 206, pp. 83–91, 2008.
- [54] DONGLAI, W., ZHENSHAN, C., JUN, C., Optimization and tolerance prediction of sheet metal forming process using response surface model, *Computational Materials Science*, 42, pp. 228–233, 2008.
- [55] HU, W., ENYING, L., YAO, L.G., Optimization of drawbead design in sheet metal forming based on intelligent sampling by using response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, 206, pp. 45–55, 2008.
- [56] 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.

- [57] SEO, Y.R., Electromagnetic blank restrainer in sheet metal forming processes, *International Journal of Mechanical Sciences*, 50, pp. 743–751, 2008.
- [58] TAHERIZADEH , A., GHAEI, A., GREEN, D.E., ALTENHOF W.J., Finite element simulation of springback for a channel draw process with drawbead using different hardening models, *International Journal of Mechanical Sciences*, 51, pp. 314–325, 2009.
- [59] HAN, L.F., LI, G.Y., HAN, X., ZHONG, Z.H., Identification of geometric parameters of drawbead in metal forming processes, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 14/3, pp. 233–244, 2006.
- [60] ÇİÇEK, O., Effects of drawbeads in sheet metal forming, M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University, Mechanical Engineering, August 2005.
- [61] YILDIZ, N., AKBULUT, Ö., BİRCAN, H., İstatistiğe giriş uygulamalı temel bilgiler çözümlü ve cevaplı sorular, Aktif Yayınevi, Sayfa 247, 2002.
- [62] LEVINE, D.M., RAMSEY, P.P., SMIDT, R.K., *Applied statistics for engineers and scientists*, Prentice Hall, 2001.
- [63] WEISBERG, S., *Applied linear regression*, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [64] DRAPER, N.R., SMITH, H., *Applied regression analysis*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [65] MATLAB, *Statistics Toolbox 7 User's Guide*, The MathWorks Inc.
- [66] DEMERI, M.Y., Drawbeads in sheet metal forming, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2/6, pp. 863-866, 1993.
- [67] KAWKA, M., WANG, A., Improving drawbeads and friction models simulations of industrial sheet metal forming process, *Metal Forming in Industry, Conference Proceeding, Baden-Baden*, 1994.
- [68] GREEN, D.E., An experimental study of the effects of prestrain on formability limits, *Industrial Research & Development Institute, Midland-Ontario*, 2002.
- [69] VERMA, R.K., HALDAR, A., Effect of normal anisotropy on springback, *Journal of Materials Processing Technology*, 190, pp. 300–304, 2007.
- [70] CAMACHO, E.F., BORDONS, C., *Model predictive control*, Springer-Verlag London, 2004.
- [71] BEMPORAD, A., MORARI, M., RICKER, N.L., *Model Predictive Control Toolbox 3 User's Guide*, The MathWorks, Inc.

- [72] XU, M., LI, S., Practical generalized predictive control with decentralized identification approach to HVAC systems, *Energy Conversion and Managment*, 48/1, pp. 292-299, 2007.
- [73] NIKOLAOU, M., Model predictive controllers: a critical synthesis of theory and industrial needs, *Advances in Chemical Engineering Series*, Academic Press, 2001.
- [74] 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.

ÖZGEÇMİŞ

Aysun EĞRİSÖĞÜT TİRYAKİ 1979 yılında Akhisar'da doğdu. 1995 yılında Akhisar Lisesinden mezun olduktan sonra aynı yıl, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne girdi. 1999 yılında bu bölümden başarıyla mezun oldu. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Tasarım ve İmalat bilim dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2002 yılında yüksek lisans programından mezun oldu. 2003 yılında aynı bilim dalında Doktora eğitimine başladı. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen bu göreve devam etmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir.

MODELLING AND CONTROL OF DRAWBEAD USED IN SHEET METAL FORMING

Aysun EĞRİSÖĞÜT TIRYAKI

SUMMARY

Keywords: Sheet Metal Forming, Drawbead, Model Predictive Control

Nowadays, sheet metal forming process is used in almost every area especially in the automotive industry. The defects such as wrinkles, fractures and springback are common failures that usually occur on the sheets during sheet metal forming process. Such failures are caused by the use of an unwanted and uncontrolled flow rate of the sheet material. A number of techniques generally are used to control of the flow rate of the metal sheet: regulating the blank holder force and reducing the friction between the die and metal sheet surfaces. However, these techniques can only be used to regulate the overall flow rate of the whole metal sheet. A controllable restraining force caused by adjusting the penetration of drawbeads, which are regulated the flow rate at certain parts of the sheet, can improve the formability.

In this study, mathematical model was developed to predict drawbead restraining force. Drawbead restraining force depends on material properties, sheet thickness and penetration of the drawbead can be calculated with model. Comparison of the results of mathematical model with the corresponding experimental results shows that the predictions of drawbead restraining force in excellent agreement with experimental data in the literature.

Furthermore, model predictive controller regulated penetration of drawbead to obtain reference of drawbead restraining force was developed. Model predictive controller was run with given different references and obtained process response closed to reference in a stable manner.

SAC METALLERİN ŞEKİLLENDİRİLMESİNDE KULLANILAN SÜZDÜRME ÇUBUĞUNUN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

Aysun EĞRİSÖĞÜT TİRYAKİ

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Sac Metal Şekillendirme, Süzdürme Çubuğu, Model Öngörölü Kontrol

Günümüzde otomotiv sektörü başta olmak üzere sac metal malzemeleri Şekillendirme işlemleri hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Buruşma, yırtılma ve geri esneme gibi kusurlar sac Şekillendirme sırasında oluşan en bilindik kusurlardır. Bu gibi kusurlara genellikle sac malzemenin kalıp boşluğuna kontrolsüz ve istenmeyen bir oranda akışı neden olur. Sac malzemenin akışını kontrol etmek için bazı yöntemler kullanılır. Bunlar baskı plakası kuvvetinin ayarlanması ve kalıp ile sac yüzeyleri arasındaki sürtünmenin azaltılması gibi. Ancak bu yöntemler sadece sac malzemenin tamamının genel akışını düzenlemek için kullanılabilir. Malzeme akışını belirli bölgelerde düzenleyen süzdürme çubuğunun batma miktarının ayarlanmasıyla oluşturulan kontrol edilebilir frenleme kuvveti Şekillendirilebilirliği iyileştirebilir.

Bu çalışmada, ilk olarak süzdürme çubuğu frenleme kuvvetini kestirmek için bir matematiksel model geliştirildi. Modelde sac malzeme özellikleri, sac kalınlığı ve süzdürme çubuğunun batma miktarına bağlı süzdürme çubuğu frenleme kuvveti hesaplanabilmektedir. Matematiksel modelin sonuçları ile literatürdeki deneysel veriler karşılaştırılmış ve süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine ait kestirimler deney sonuçları ile oldukça iyi uyum göstermiştir.

Geliştirilen matematiksel model süzdürme çubuğunu temsil etmek üzere kullanılmış ve sac üzerinde istenen frenleme kuvvetini sağlamak için batma miktarını ayarlayan bir model öngörölü kontrolör geliştirilmiştir. Model öngörölü kontrolör farklı referanslar altında çalıştırılmış ve elde edilen proses cevabı referansları oldukça yakından kararlı bir şekilde yakalamıştır.