

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

**SAC ŞEKİLLENDİRME PROSESİNDE POT
ÇEMBERİ KUVVETİNİN ELEKTROMİKNATIS İLE
KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Mak. Y. Müh. Sedat İRİÇ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Recep KOZAN

Şubat 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

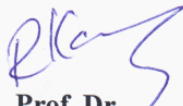
SAC ŞEKİLLENDİRME PROSESİNDE POT
ÇEMBERİ KUVVETİNİN ELEKTROMİKNATIS İLE
KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ

Mak. Y. Müh. Sedat İRİÇ


Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

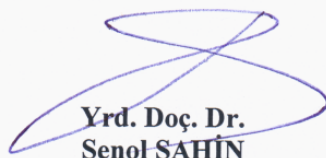
Bu tez 13 / 02 /2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Recep KOZAN
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Vahdet UÇAR
Üye


Prof. Dr.
Saadettin AKSOY
Üye


Doç. Dr.
Sedat KARABAY
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Şenol ŞAHİN
Üye

TEŞEKKÜR

Doktora süreci boyunca danışman hocam, sayın Prof. Dr. Recep KOZAN'a akademik çalışmalarında ve doktora tez sürecinde bana desteklerini esirgemediği için minnettarlığımı sunarım.

Doktora tez izleme komitesinde bulunan hocalarım, sayın Prof. Dr. Vahdet UÇAR ve sayın Prof. Dr. Saadettin AKSOY'ya, tez çalışmamdaki eksik noktaların belirlenmesi ve düzeltilmesi sürecinde göstermiş oldukları destek ve ilgiden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Aysun Eğrisöğüt TİRYAKİ'ye ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Deney tesisatında kullanılan ekipmanların hazırlanması konusunda yardımcı olan TEKNOROT Firmasından Murat IŞIK ve Murat KOÇ'a, AKSA MAGNET Firmasından Zafer AKSOY'a, PULS elektronik ve ALFASANAYİ firması çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

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

Çalışmalarım esnasında desteklerini esirgemeyen sevgili eşim Derya İRİÇ'e ve canım kızım Tuğçe Cansu İRİÇ'e ayrıca teşekkür ve minnettarlıklarımı sunarım.

Bu çalışma 2009-50-02-015 proje numarası ile SAÜ BAPK tarafından desteklenmiştir. Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	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	16
1.3. Çalışmanın Ana Hatları	18

BÖLÜM 2.

REGRESYON ANALİZİ.....	19
2.1. Giriş	19
2.2. Doğrusal Regresyon Model	20
2.2.1. Basit doğrusal regresyon modeli.....	20
2.2.2. Çoklu doğrusal regresyon modeli	24

BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMA	28
3.1. Giriş	28
3.2. Deney Düzenegi	28
3.3. Deneylerin Yapılışı.....	32
3.4. Deney Sonuçları	37

BÖLÜM 4.

ELEKTROMİKNATIS FRENLEME KUVVETİNİN MODELLENMESİ	42
4.1. Giriş	42
4.2. Eğri Uydurma ile Modelleme	43
4.2.1. 100 mm sac genişliği ve 1mm sac kalınlığı için polinom model.....	44
4.2.2. 100 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığı için polinom model.....	45
4.2.3. 100 mm sac genişliği ve 1,5 mm sac kalınlığı için polinom model.....	45
4.2.4. 50 mm sac genişliği ve 1 mm sac kalınlığı için polinom model.....	47
4.2.5. 150 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığı için polinom model.....	47
4.2.6. 150 mm sac genişliği ve 1,5 mm sac kalınlığı için polinom model.....	48
4.2.7. 250 mm sac genişliği ve 1 mm sac kalınlığı için polinom model.....	48
4.2.8. 250 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığı için polinom model.....	50
4.2.9. 250 mm sac genişliği ve 1,5 mm sac kalınlığı için polinom model.....	50
4.3. Regresyon Model.....	52
4.3.1. Doğrusal regresyon model	53
4.3.2. İkinci dereceden regresyon model	55
4.3.3. Etkileşimli regresyon model	57
4.3.4. İkinci dereceden etkileşimli regresyon model	59

BÖLÜM 5.

MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL	63
5.1. Giriş	63
5.2. Kayan Ufuk Kavramı	66
5.3. Öngörü Modeli	67
5.3.1. Darbe cevabı modeli	67
5.3.2. Basamak cevabı modeli	68
5.3.3. Transfer fonksiyonu modeli.....	69
5.3.4. Durum uzayı modeli	70
5.4. Amaç Fonksiyonu.....	70
5.5. Kontrol Kuralı	71
5.6. MÖK'ün Genel Algoritması.....	72
5.7. MÖK'ün Temel Parametreleri.....	74
5.7.1. Öngörü ufku	74

5.7.2. nKontrol ufku.....	75
5.7.3. Referans yörüngesi	75
5.7.4. Ağırlık matrisleri.....	75

BÖLÜM 6.

BASKI PLAKASI FRENLEME KUVVETİNİN ELEKTROMİKNATIS KULLANILARAK MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ.....	76
6.1. Giriş	76
6.2. Elektromıknatısın Öngörü Modeli.....	77
6.2.1. ARX modeli.....	78
6.2.2. ARMAX modeli	79
6.2.3. Çıkış-hatası modeli	81
6.2.4. Box-Jenkins modeli	82
6.3. Model Öngörülü Kontrolör Tasarımı	85

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR	90
7.1. Giriş	90
7.2. Öngörü ve Kontrol Ufku Parametrelerinin Karşılaştırılması	90
7.3. Değişik EMFK'ların MÖK'e Referans Verilmesi	92
7.4. Model Öngörülü Kontrolör ile PID Kontrolörün Karşılaştırılması.....	99
7.4.1. MÖK ve PID'nin sabit referans altında çalıştırılması	100
7.4.2. MÖK ve PID'nin değişken referans altında çalıştırılması.....	101

BÖLÜM 8.

TARTIŞMA VE ÖNERİLER	103
----------------------------	-----

KAYNAKLAR	106
-----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	116
----------------	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Durum matrisi
A(q)	: q cinsinden proses çıkışına ait polinom
ARMA	: Otoregresif hareketli ortalama
ARMAX	: Dış kaynak girişli oto-regresif hareketli ortalama
ARX	: Dış kaynak girişli oto-regresif
B	: Giriş matrisi
B(q)	: q cinsinden proses girişine ait polinom
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
du_{\max}	: Giriş işaretindeki maksimum değişim
du_{\min}	: Giriş işaretindeki minimum değişim
e(t)	: Hata
EMBR	: Elektromanyetik baskı plakası
EMG	: Elektromıknatıs gerilimi
EMFK	: Elektromıknatıs frenleme kuvveti
E_{EMFK}	: Süzdürme çubuğu frenleme kuvvetinin referans değeri ile proses cevabı arasındaki hata
F_r	: Frenleme kuvveti
F_b	: Baskı plakası kuvveti
F_{bp}	: Sabit baskı plakası kuvveti
F_{de}	: Deney sonucu ölçülen frenleme kuvveti

F_e	: Elektromıknatıs çekme kuvveti
F_{emfk}	: Elektromıknatıs frenleme kuvveti
F_{fk}	: Kalıp seti frenleme kuvveti
$F(q)$: q cinsinden proses girişine ait polinom
SSD	: Şekillendirme sınır diyagramı
G	: Sac genişliği
G	: Bozucu büyüklük matrisi
h_i	: Sisteme uygulanan giriş (darbe, basamak)
HKT	: Hataların kareleri toplamı
IA	: Ters yaklaşım
K	: Sac kalınlığı
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	: Örnek sayısı
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
PI	: Orantısal-İntegral
PID	: Orantısal-İntegral-Türev
PI	: Orantısal artı integral kontrolör

Q	: Zamansal kaydırma operatörü
QP	: Karesel programlama
R^2	: Korelasyon katsayısı
RMSE	: Hataların kareleri ortalamasının karekökü
R_{EMFK}	: Referans süzdürme çubuğu frenleme kuvveti
RSM	: Cevap yüzey metodu
EMFK	: Elektromıknatıs frenleme kuvveti
SSE	: Hataların kareleri toplamı
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
SISO	: Tek giriş-tek çıkış
SG	: Sac genişliği
SK	: Sac kalınlığı
SQP	: Ardışık karesel programlama
SSE	: Hataların kareleri toplamı
T	: Örnekleme anı
T_s	: Örnekleme zamanı
U(t)	: Proses 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
V	: Elektromıknatıs gerilimi
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
$\Delta u(t)$: Şu anki proses girişi ile bir adım önceki giriş arasındaki fark
$\lambda(j)$: Kontrol ağırlıkları matrisi

μ	:	Kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünme katsayısı
μ_{bp-em}	:	Baskı plakası ile elektromıknatıs arasındaki sürtünme katsayısı
$\beta_{0,1,\dots}$:	Regresyon parametreleri
ε	:	Hata değişim değeri
σ_y	:	Akma gerilmesi
σ_u	:	Kopma gerilmesi
ε_{min}	:	Toplam Uzama
$r_{90}^{\circ}_{min}$:	Anizotropi faktörü
$n_{90}^{\circ}_{min}$:	Pekleşme üssü
$x_{1,2,\dots}$:	Regresyon değişkenleri

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Flanş verme işlemi [5].....	2
Şekil 1.2.	Çekme işlemi [5].....	2
Şekil 1.3.	Gererek şekillendirme işlemi [5].....	3
Şekil 1.4.	Sac metal şekille'ndirmede en sık rastlanan kusurlar (a) yırtılma, (b) buruşma, (c) geri esneme [5].....	4
Şekil 1.5.	Sac şekillendirme kalıplarında kullanılan süzdürme çubuğu (a) ve elektromıknatısın (b) şematik gösterimi.....	4
Şekil 1.6.	Elektromıknatıs kullanılan sac metal şekillendirme kalıbının şematik gösterimi.....	17
Şekil 1.7.	Sac şekillendirme işleminin şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.1.	Doğrusal regresyon.....	19
Şekil 2.2.	Doğrusal ilişkinin grafik gösterimi [65].....	21
Şekil 2.3.	Üç regresyon katsayısına sahip çoklu regresyon modelinin grafik gösterimi [65].....	25
Şekil 3.1.	Baskı plakası kuvveti ve elektromıknatıs çekme kuvvetinin pres üzerinde şematik gösterimi.....	28
Şekil 3.2.	Modernize edilmiş 100 tonluk atölye tipi pres.....	29
Şekil 3.3.	Pres üzerine monte edilen kalıp seti ve donanımların şematik gösterimi.....	30
Şekil 3.4.	Pres üst tablasının konumu ayarlayan ve yük hücrelerinde gelen bilgileri kaydeden arayüz.....	31
Şekil 3.5.	Deneyler sırasında kullanılan elektromıknatıs (a) ve kontrol panosunun (b) görünüşü.....	32
Şekil 3.6.	Deneyler sırasında kullanılan sac levhaların boyutları.....	33
Şekil 3.7.	Sac levhanın kalıp seti içindeki hareketinin şematik gösterimi....	34

Şekil 3.8.	EMG-EMFK grafiğinin sac genişliğine göre değişimi (1,0 mm kalınlığındaki levha için).....	38
Şekil 3.9.	EMG-EMFK grafiğinin sac genişliğine göre değişimi (1,2 mm kalınlığındaki levha için).....	38
Şekil 3.10.	EMG-EMFK grafiğinin sac genişliğine göre değişimi (1,5 mm kalınlığındaki levha için).....	39
Şekil 3.11.	EMG-EMFK grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (100 mm genişliğindeki levha için).....	39
Şekil 3.12.	EMG-EMFK grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (150 mm genişliğindeki levha için).....	40
Şekil 3.13.	EMG-EMFK grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (250 mm genişliğindeki levha için).....	40
Şekil 4.1.	100 mm sac genişliği ve 1mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata	45
Şekil 4.2.	100 mm sac genişliği ve 1,2mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata	46
Şekil 4.3.	100 mm sac genişliği ve 1,5mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata	46
Şekil 4.4.	150 mm sac genişliği ve 1 mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata	47
Şekil 4.5.	150 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata	48
Şekil 4.6.	150 mm sac genişliği ve 1,5mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata	49
Şekil 4.7.	250 mm sac genişliği ve 1mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata	49

Şekil 4.8.	250 mm sac genişliği ve 1,2mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata	50
Şekil 4.9.	250 mm sac genişliği ve 1,5mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata	51
Şekil 4.10.	Doğrusal regresyon model ve deneysel EMFK değerleri.....	53
Şekil 4.11.	Doğrusal regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası.....	54
Şekil 4.12.	İkinci dereceden regresyon model ve deneysel EMFK değerleri..	55
Şekil 4.13.	İkinci dereceden regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası.....	56
Şekil 4.14.	Etkileşimli regresyon model ve deneysel EMFK değerleri.....	57
Şekil 4.15.	Etkileşimli regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası.....	58
Şekil 4.16.	İkinci dereceden Etkileşimli regresyon model ve deneysel EMFK değerleri.....	59
Şekil 4.17.	İkinci dereceden etkileşimli regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası.....	60
Şekil 4.18.	Deneysel veriler ile ikinci dereceden modellerin karşılaştırılması	61
Şekil 4.19.	Deneysel veriler ile hazırlanan modellerin karşılaştırılması.....	62
Şekil 5.1.	MÖK temel yapısı [69].....	64
Şekil 5.2.	Model öngörülü kontrolün temel prensibi [2].....	66
Şekil 5.3.	Darbe cevabı modeli [2].....	68
Şekil 6.1.	Elektromıknatısın kapalı çevrim kontrolüne ait blok diyagramı...	76
Şekil 6.2.	ARX model çıkışları ile deneysel verilerin karşılaştırılması.....	79
Şekil 6.3.	ARMAX model çıkışları ile deneysel verilerin karşılaştırılması...	80
Şekil 6.4.	Çıkış hatası modeli çıkışları ile deneysel verilerin karşılaştırılması.....	82
Şekil 6.5.	Box-Jenkins model çıkışları ile deneysel verilerin karşılaştırılması.....	83
Şekil 6.6.	Elektromıknatıs için hazırlanan model öngörülü kontrollü benzetim modeli.....	85
Şekil 6.7.	N2 Öngörü ufku değişiminin kontrol performansına etkisi, (a) EMFK'ya etkisi, (b) EMG'ye etkisi.....	86

Şekil 6.8.	N2, Öngörü ufku değişiminin kontrol performansına etkisi, (a) EMG'ye etkisi, (b) EMFK'ya etkisi.....	87
Şekil 6.9.	Nu, Kontrol ufku değişiminin kontrol performansına etkisi, (a) EMG'ye etkisi, (b) EMFK'ya etkisi	88
Şekil 6.10.	Kontrol ufku Nu=7 'nin kontrol performansına etkisi.....	89
Şekil 7.1.	N2 Öngörü ufku değişiminin kontrol performansına etkisi.....	90
Şekil 7.2.	N2 Öngörü ufku değişiminin kontrol performansına etkisi.....	91
Şekil 7.3.	EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 3200 N).....	92
Şekil 7.4.	MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref. 3200N).....	92
Şekil 7.5.	EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 3600 N).....	93
Şekil 7.6.	MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref. 3600N).....	93
Şekil 7.7.	Farklı sac genişlikleri için EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 4000 N).....	94
Şekil 7.8.	MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref. 4000N).....	94
Şekil 7.9.	EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 0-0.3 sn 3200N, 0.3-0.6 sn 3600 N).....	95
Şekil 7.10.	MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref: 0-0.3 sn 3200N, 0.3-0.6 sn 3600 N).....	96
Şekil 7.11.	EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 3500N, genlik 500 N)	96
Şekil 7.12.	MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref: 3500N, genlik 500 N).....	97
Şekil 7.13.	EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Bozucu büyüklük 400 N)...	97
Şekil 7.14.	Farklı sac kalınlıkları için MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata.....	98
Şekil 7.15.	Elektromıknatis için tasarlanan PID kontrollü benzetim modeli...	100
Şekil 7.16.	PID kontrolör ile MÖK'ün sabit referans altında karşılaştırılması (Ref: 3600N).....	100
Şekil 7.17.	MÖK ile PID kontrolörün değişken referans altında karşılaştırılması (Ref: 0-0.3 sn 3200N, 0.3-0.6 sn 3600 N).....	101

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında sık kullanılan ilişkiler.	20
Tablo 3.1.	Soğuk haddelenmiş çelik sacın mekanik özellikleri [59].....	32
Tablo 3.2.	Elektromıknatısa gerilim uygulanmadan ölçülen frenleme kuvvetleri.....	35
Tablo 3.3.	Her bir sac levha için elde edilen sürtünme katsayıları.....	36
Tablo 3.4.	Denklem 2.1'den elde edilen elektromıknatıs frenleme kuvveti...	37
Tablo 4.1.	Model girişleri.....	42
Tablo 4.2.	EMFK'yı kestirmek için oluşturulan polinom modellerin performansına ait veriler.....	51
Tablo 4.3.	DeneySEL veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması.....	54
Tablo 4.4.	DeneySEL veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması.....	56
Tablo 4.5.	DeneySEL veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması.....	58
Tablo 4.6.	DeneySEL veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması.....	60
Tablo 4.7.	Oluşturulan regresyon modelleri için hesaplanan R2 ve RMSE değerleri.....	61
Tablo 6.1.	Öngörü modellerinin deneySEL veriler ile uyumu.....	84
Tablo 7.1.	MÖK ile PID kontrolörün karşılaştırılması.....	102

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Sac Metal Şekillendirme, Elektromıknatıs, 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 malzemedeki şekillendirme esnasında oluşacak kusurları engellemek veya minimuma indirmek için malzeme akışını düzenleyen pot çemberi baskı kuvveti ve süzdürme çubuğu gibi kontrol mekanizmaları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada sözü edilen kontrol mekanizmalarına ek olarak şekillendirme sırasında elektromıknatıs destekli pot çemberi kullanılması düşünülmüştür. Bu amaçla, deney düzeneği kurulmuş ve elde edilen veriler kullanılarak sac kalınlığı ve genişliği ile elektromıknatıstaki gerilim değişimine karşılık elde edilen frenleme kuvvetinin hesaplanabildiği matematiksel bir model geliştirilmiştir. Matematiksel modelin sonuçları ile deneysel veriler karşılaştırılmış ve elektromıknatıs frenleme kuvvetine ait kestirimler deney sonuçları ile oldukça iyi uyum göstermiştir.

Geliştirilen matematiksel model elektromıknatısı temsil etmek üzere kullanılmış ve sac üzerinde istenen frenleme kuvvetini sağlamak için elektromıknatısa uygulanan gerilimi 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.

CONTROL OF BLANKHOLDER FORCE WITH ELECTROMAGNET IN SHEET METAL FORMING

SUMMARY

Keywords: Sheet Metal Forming, Electromagnet, 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. The control mechanism such as blankholder force and drawbead of the sheet to minimize or prevent defects that occur on sheet during a sheet metal forming process are used.

In this study, using electromagnet to obtain expected sensitive changes during forming in addition to mentioned control mechanism have been planned. For this purpose, a experimental setup built and using the experimental data, a mathematical model to investigate magnetic force obtained as response to changes in voltage in the electromagnet has been developed. Comparison of the results of mathematical model with the corresponding experimental results has been showed in excellent agreement.

Furthermore, model predictive controller regulated voltage to obtain reference of electromagnetic 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

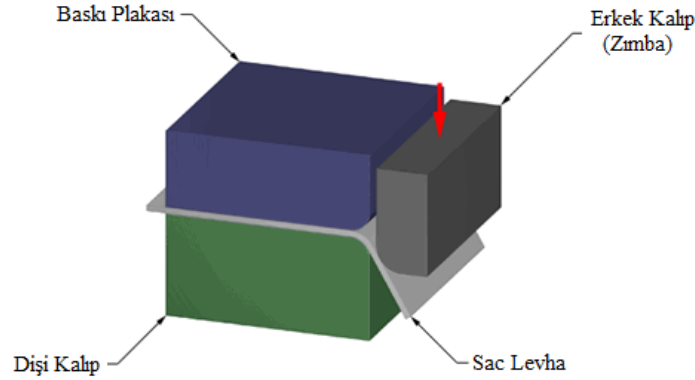
Çelik saclar, günümüz modern toplumunun artan ihtiyaçlarını karşılama doğrultusunda çok büyük öneme sahiptir. Kara, deniz, hava ve uzay taşıtları, çeşitli ev eşyaları ve makineleri, endüstriyel araç-gereçler, endüstriyel yapılar ile makine imalatı, inşaat sektörü ve daha birçok alandaki uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. Bu şekilde yaygın kullanılmalarındaki ön önemli etkenlerden bazıları, diğer alternatif malzemelere nazaran daha dayanımlı, ucuz, kolay işlenebilme, şekillendirilebilme ve birleştirilebilme özellikleri olmaları şeklinde sıralanabilir [1].

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 konusudur. 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 [2].

Günlük hayatta kullanılan bir binek araç ortalama 4000 kadar mekanik elemandan oluşmakta [3] 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 kullanılan parçalarda önemli bir orana sahiptir. Sac şekillendirme işleminde bükme, çekme, gererek şekillendirme gibi yöntemlerden birisi kullanılmaktadır.

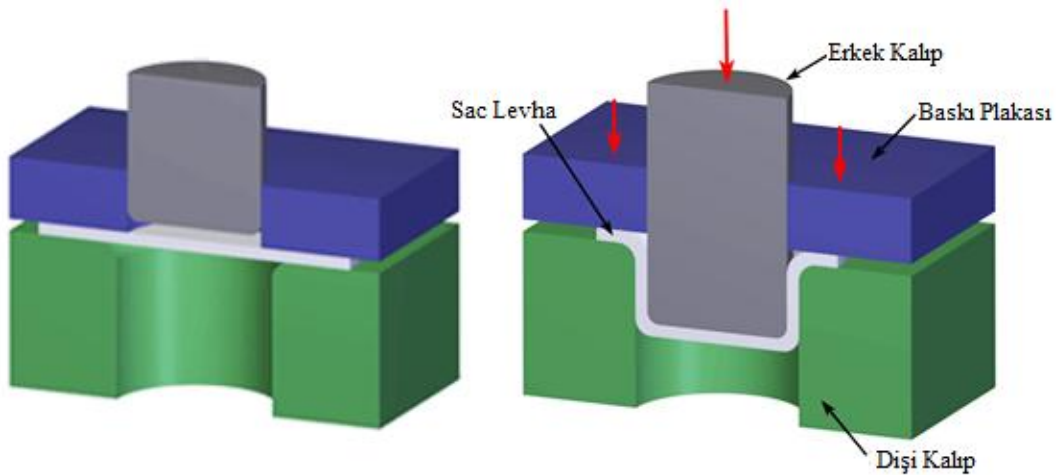
Bükme işlemi sac metal malzemenin belli bir eksen etrafında döndürülerek plastik deformasyona uğraması prensibine dayanan bir şekillendirme işlemidir ve bu işlem esnasında malzeme alanında değişim yok denecek kadar azdır [4]. Bükmenin endüstriyel alanda en çok bilinen uygulaması flanş verme işlemidir (Şekil 1.1). Flanş

işleminde, erkek kalıbın alt formunun şekillendirmeye etkisi yoktur, erkek kalıbın kenarı ile dişi kalıbın kenarı arasında saca şekil verilir.



Şekil 1.1. Flanş verme işlemi [5]

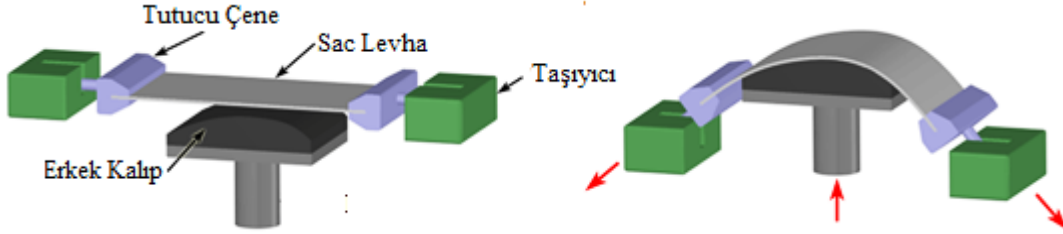
Çekme işlemi endüstride en çok karşılaşılan sac metal şekillendirme yöntemlerinden birisidir. Mekanik ya da hidrolik tahrik ile oluşturulan baskı altında, malzeme üzerinde çekme geriliminin oluşturduğu plastik şekil değiştirme sonucu saca şekil verilir. Sac kalınlığında belli bölgelerde bir miktar incelme meydana gelmektedir. Şekil 1.2’de basit bir derin çekme işlemi görülmektedir. Bu çalışmada derin çekme işlemi esnasında baskı plakası tarafından sac levha üzerinde oluşturulan frenleme kuvveti, elektromıknatis ile kontrol edilmiştir.



Şekil 1.2. Çekme işlemi [5]

Gererek şekillendirme işlemi, iki-eksenli çekme gerilmeleri altında sac malzeme yüzeyinin orantısız olarak arttığı şekillendirme işlemidir. Genellikle iki uçundan

veya bazen tüm çevresi boyunca çenelere bağlanan sac malzeme, istenen formdaki erkek kalıpla gerilerek şekillendirilir (Şekil 1.3).



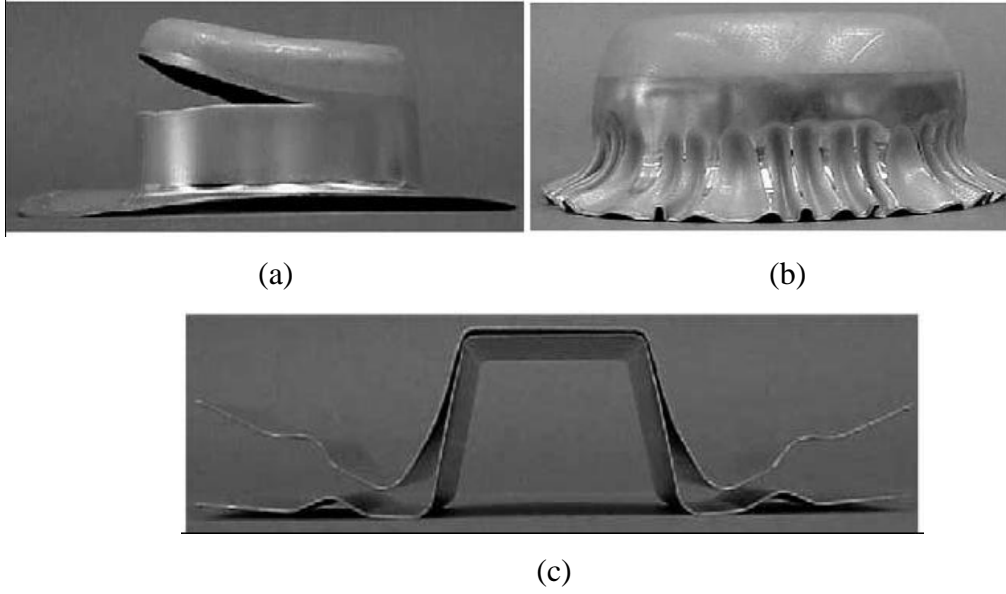
Şekil 1.3. Gererek şekillendirme işlemi [5]

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.

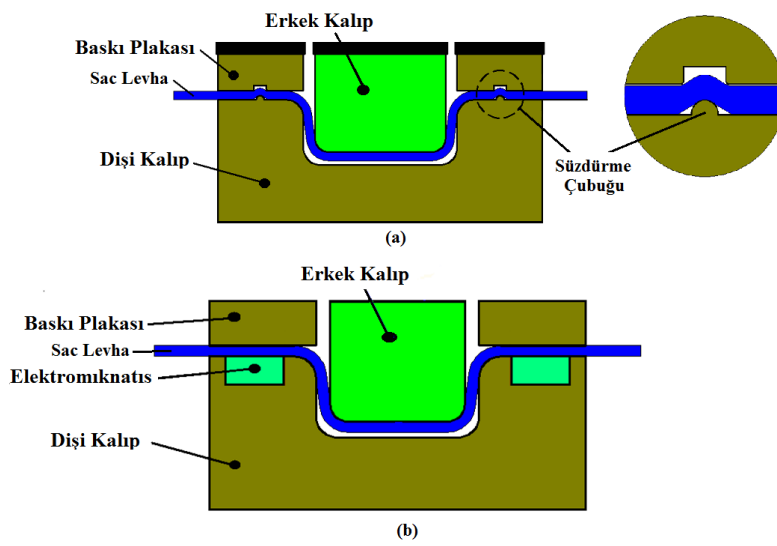
Buruşma, yırtılma, aşırı incelme, yüzey bozunması ve geri esneme gibi kusurlar sac malzemedeki şekillendirme esnasında oluşan en sık rastlanan kusurlardandır (Şekil 1.4). Bu tür kusurlar genellikle sac malzemenin kalıp boşluğuna kontrolsüz ve istenmeyen oranda akışından dolayı meydana gelmektedir. Değişken 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 günümüz imalat sanayinde kullanılan preslerin bu tür uygulamalarda kullanılabilmesi için büyük maliyet gerektiren modernizasyon ihtiyaçları bulunmaktadır. Günümüz rekabetçi ortamında üreticiler, bu tür büyük maliyetli yatırımlar yerine daha düşük maliyetli ve modüler çözümler üzerinde yoğunlaşmışlardır. Bu ihtiyaçlar ışığında kalıp boşluğu içine akan sac malzemenin

kontrolü veya belirli bölgelerde düzenlenmesi amacıyla süzdürme çubuğu veya elektromıknatıs [6] gibi kontrol mekanizmalarının kullanılması fikri ortaya çıkmıştır.

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



Şekil 1.4. Sac metal şekillendirmede en sık rastlanan kusurlar (a) yırtılma, (b) buruşma, (c) geri esneme [5].



Şekil 1.5. Sac şekillendirme kalıplarında kullanılan süzdürme çubuğu (a) ve elektromıknatısın (b) şematik gösterimi

1.1. Literatür Araştırması

Literatürde baskı plakası kuvvetinin belirlenmesi ve kontrolü ile ilgili farklı yaklaşımlarda bulunulmuştur.

Tiryaki [2], kalıp boşluğu içine akan sac malzemenin kontrolü için kullanılan süzdürme çubuğunun oluşturduğu frenleme kuvvetini kestirmek için bir matematiksel model geliştirmiştir. Modelde sac malzeme özellikleri, sac kalınlığı ve süzdürme çubuğunun batma miktarına bağlı süzdürme çubuğu frenleme kuvveti hesaplanabilmektedir. Geliştirilen matematiksel model süzdürme çubuğunu temsil etmek üzere kullanılmış ve sac üzerinde istenen frenleme kuvvetini sağlamak için batma miktarını ayarlayan bir model öngörülü kontrolör geliştirmiştir. Model öngörülü kontrolör farklı referanslar altında çalıştırılmış ve elde edilen proses cevabı referansları oldukça yakından kararlı bir şekilde yakalamıştır.

Demirci ve arkadaşları [7], derin çekme prosesinde, baskı plakası kuvvetinin sac malzemenin et kalınlığı ve üründeki kırışma üzerindeki etkisini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemlerini (SEY) kullanarak incelemişlerdir. Bunun için AL 1050 malzemeyi SEY kullanarak farklı baskı plakası kuvvetleri ile derin çekme işlemine tabi tutmuş ve elde ettikleri sonuçları yapmış oldukları deneysel çalışmalar ile karşılaştırmışlardır. Böylece şekillendirme için optimal baskı plakası kuvvetini elde etmişlerdir.

Yoshihara ve arkadaşları [8], 300° sıcaklıkta magnezyum alaşımli sac malzemelerin derin çekme prosesindeki et kalınlığı değişimini, deneysel ve SEY ile incelemişlerdir. Çalışmada sabit ve değişken baskı plakası kuvvetleri kullanılarak malzemedeki et kalınlığı değişimi ölçülmüş ve sonuç olarak değişken baskı plakası kuvvetinin, malzemenin derin çekme prosesindeki kullanılabilirliğini önemli ölçüde arttırdığı gözlemlenmiştir.

Obermeyer ve Majlessi [9], baskı plakası kuvvetinin, malzemenin farklı şekil değiştirme durumlarında şekillendirilebilirlik sınırlarını büyük (major) ve küçük (minor) birim şekil değiştirme (strain) oranları cinsinden ifade eden şekillendirme

sınır diyagramı (ŞSD) üzerine olan etkisini inceleyen bir derleme yapmışlardır. Bu derlemede kalıp parametrelerinin (malzeme, geometri vs.) yanı sıra değişken baskı plakası kuvvetinin malzemenin şekillendirilebilirliği üzerinde olumlu etkisi olduğu vurgulanmıştır. ŞSD diyagramı basit çekme deneyinden başlayarak, düzlem birim şekil değiştirme ve iki eksenli gerdirme hallerinin hepsini ihtiva etmektedir. Bu diyagramlar çok yaygın olarak metallerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmede ve şekil verme esnasında ortaya çıkan problemlerin analizi ve çözümlerinde kullanılmaktadırlar. Bir malzemenin ŞSD farklı geometrilerde hazırlanmış sac metal numunelerin üzerlerine özel gridler uygulanarak ve bu gridlerin şekil değiştirmeden sonraki ölçüleri değerlendirilerek elde edilir. Her bir geometri bir şekil değiştirme durumunu ihtiva eder.

Krichen ve arkadaşları [10], alüminyum alaşımlı sac malzemeler üzerinde yapılan delik bükme operasyonunda, baskı plakası kuvvetinin etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada şekillendirmede baskı plakasının olmadığı ve baskı plakası kuvvetinin farklı değerlerde etki ettiği durumlar karşılaştırılarak, baskı plakası kuvvetinin nihai ürün üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

Traversin ve Kergen [11], çeşitli sac şekillendirme prosesi değişkenlerine göre baskı plakası kuvvetini değiştiren kapalı çevrim kontrol sisteminin, şekillendirmeye etkisini ve avantajlarını araştırmışlardır. Çalışmada patentli bir ürün olan kapalı çevrim sistemini SEY ile modelleyerek baskı plakası kuvvetinin ŞSD'nın iyileştirilmesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Sheng ve arkadaşları [12], şekillendirme esnasında değişken baskı plakası kuvvetinin kullanılabilmesi için, içinde PI (Proportional-Integral, Orantısal-İntegral) kontrolörün bulunduğu ve SEY ile entegre çalışan bir sistem hazırlamışlardır. Bu sistem sayesinde erkek kalıbın hareketine bağlı olarak baskı plakası kuvveti değiştirilerek sac şekillendirme prosesinin önemli problemlerinden olan kırışma ve yırtılma ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.

Zhong-qin ve arkadaşları [13], ŞSD'nin iyileştirilmesi için şekillendirme esnasında PID (Proportional-Integral-Derivative, Orantısal-İntegral-Türev) kontrolörün SEY ile

entegre çalıştığı çok noktalı baskı plakası kullanmışlardır. Bu sistemde baskı plakası çok parçalı üretilerek herbir parçaya farklı kuvvetlerin etki ettirilmesi sağlanmıştır.

Siegert ve Ziegler [14], derin çekme prosesinde baskı plakası kuvvetini dalga formunda değiştirerek, malzemenin şekillendirilebilirliğini ve dolayısıyla prosesteki çekme derinliğinin arttırılabileceğini göstermişlerdir.

Wang ve arkadaşları [15], cevap yüzey metodunu (RSM-Response Surface Methodology) kullanarak, baskı plakası kuvvetini zamana ve kalıp ile sac arasındaki sürtünme katsayısına bağlı olarak değiştiren bir model geliştirmişlerdir. Bu modeli oluşturmak için SEY'ni kullanarak analizler yapmışlar ve sonuçları deneysel veriler ile doğrulamışlardır. RSM model kullanılarak değiştirilen baskı plakası kuvvetinin sac şekillendirme prosesinin her aşamasında kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Seok Oh ve arkadaşları [16], sac malzemelerin şekillendirilebilirliğinin testi için SEY'i kullanarak erkek kalıbın konumuna bağlı baskı plakası kuvvetini gösteren diyagramı da içeren yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem ile erkek kalıbın konumuna bağlı olarak baskı plakasına uygulanacak kuvvet belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırıldığında yöntemin geçerliliği kanıtlanmıştır.

Gavas ve İzçiler [17], sac malzemenin kalıp boşluğu içine kontrollü bir şekilde akabilmesi için baskı plakası üzerine spiral yay eklemişlerdir. Bu yöntem ile kalıp ile sac malzeme arasındaki sürtünme alanı azaltılmış ayrıca spiral yayların arasına yağ akıtılarak sac malzemenin daha homojen bir şekilde yağlanması sağlanmıştır.

Demirci ve arkadaşları [18], alüminyum alaşımlı sac malzemenin derin çekme operasyonunu SEY'i kullanarak modellemişler ve şekillendirmede ortaya çıkan problemlerden kırılma ve yırtılmanın oluşmadığı baskı plakası kuvvet aralığını bulmuşlardır. Elde edilen verileri kullanarak deneysel çalışmalar yapmışlar ve sonuçların deneysel veriler ile %85 oranında uyduğunu belirtmişlerdir.

Gunnarsson ve arkadaşları [19], derin çekme prosesinde baskı plakası kuvvetini oluşturan gazlı yayları bilgisayar kontrollü kullanarak, sabit ve değişken baskı kuvvetlerinin ürün üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

Wu-rong ve arkadaşları [20], sac şekillendirme prosesinde değişken baskı plakası kuvvetini farklı yapıdaki baskı plakası tasarımları üzerinde SEY’i kullanarak denemiş ve elde ettikleri verileri deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Değişken baskı plakası kuvveti ile kritik bölgelerde sac malzemenin et kalınlığında iyileşmelerin olduğu görülmüştür.

Hsu ve arkadaşları [21], U kanal şekillendirme prosesinde, erkek kalıbın hareketine göre daha önceden tanımlanan baskı plakası kuvveti uygulayan bir sistem tasarlamışlardır. Bu sistemde baskı plakası kuvvetini erkek kalıbın hareketine göre kontrol eden PID kontrolör kullanmışlardır.

Ingarao ve Lorenzo [22], sac şekillendirme prosesinde baskı plakası ile birlikte süzdürme çubuğunu kullanarak, sac üzerinde meydana gelen frenleme kuvvetinin malzemedeki incelmeye ve şekillendirme sonrasında ortaya çıkan geri esneyeme etkisini incelemiştir.

Liu ve arkadaşları [23,24], U şekilli parçanın şekillendirilmesi sonrasında ortaya çıkan geri esneme problemini ortadan kaldırmak için baskı plakası kuvvetini zamana bağlı değişen yörüngeli olarak uygulamışlardır. Bunun için SEY’i kullanarak sistemin bir modelini oluşturmuşlar ve farklı zaman-kuvvet yörüngeleri deneyerek geri esnemeyi en aza indirmişlerdir.

Lorenzo ve arkadaşları [25], alüminyum alaşımlı malzemelerin derin çekilmesi esnasında erkek kalıbın hareketine göre baskı plakasının kuvvetini düzenleyen bulanık mantık (Fuzzy Logic) temelli kontrolör geliştirmişlerdir. Kontrolöre giriş olarak erkek kalıp hareketi ve tepki kuvveti ile sac malzemedeki incelmeye verilmiş çıkış olarak ise baskı plakası kuvveti alınmıştır.

Siegert ve arkadaşları [26], baskı plakası kuvvetinin gazlı silindirler ile tahrik edilerek oluşturulması fikrini ortaya atmışlardır. Bu yöntem ile baskı plakasının farklı noktalarında farklı kuvvetler elde edilmiş ve kuvvetlerin kapalı bir çevrim ile kontrol edilerek ürün kalitesinde artışlar sağlanmıştır.

Pahl [27], sac şekillendirme işlemi esnasında geleneksel olarak kullanılan tek veya çift tesirli preslerin kullanımını yerine çok noktadan tesirli preslerin kullanımını fikrini ortaya atmıştır. Bu sayede parça geometrisine bağlı olarak baskı plakası kuvvetinin her bir bölgede istenilen düzeyde olması sağlanmış ve bu düşüncüyü deneysel olarakta inceleyerek prodesteki iyileşmeyi karşılaştırmıştır.

Yagami ve arkadaşları [28], derin çekme prosesinde çok parçalı baskı plakası kullanarak sac malzemenin kalıp boşluğuna akışını kontrol etmişlerdir. Bu sistemde SEY ile elde edilen veriler kullanılarak bulanık mantık tabanlı kontrolör hazırlanmış ve her bir baskı plakasının üreteceği kuvvet bu kontrolör tarafından düzenlenmiştir.

Ali ve arkadaşları [29], derin çekme prosesinde baskı plakası kuvvetini sabit ve istenilen frekansta değiştirilebilir hale getirmişlerdir. Bu yöntem ile sac üzerinde kırılma ve yırtılma oluşmadan uygulanabilecek kuvvet değişim frekansını bulmuşlar ve bunu sabit baskı plakası kuvveti ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak değişken baskı plakası ile malzemenin çekilebileceği derinlik miktarında artış sağlanmıştır.

Mosse ve arkadaşları [30], sac metal levhaları fiber malzemeler ile kaplayarak elde ettikleri kompozit malzemelerin şekillendirilmesi konusunu incelemiştir. Kompozit malzemenin şekillendirilmesi esnasında baskı plakası kuvveti, erkek kalıbın hızı ile kalıp yarıçapının değişiminin nihai ürün üzerindeki etkisini deneysel olarak karşılaştırmışlardır.

Hinduja ve arkadaşları [31], derin çekme prosesinde, çekme işleminden sonra malzeme üzerinde oluşacak kırışmaları ortadan kaldırmak için deney sonuçlarını kullanarak oluşturdukları yapay sinir ağı modeli ile gerekli olan baskı plakası kuvvetini kestirmişlerdir. Ayrıca bulanık mantık tabanlı kontrolör kullanarak

şekillendirme esnasında kırışma ve yırtılmanın oluşmaması için gerekli olan baskı plakası kuvveti ve yağlamanın kontrol edilmesi sağlanmıştır.

Cherril ve arkadaşları [32], derin çekme prosesinde kullanılmak üzere 24 adet hidrolik silindirden oluşan bir pres hazırlamışlardır. Bu silindirleri elektromekanik kontrol sistemine entegre ederek baskı plakası kuvvetini her bir bölgede farklı şekilde uygulayabilmişlerdir. Çalışmanın devamında baskı plakası kuvvetinin eş zamanlı gözlenebilmesi için bir sistem geliştirilmiş ve istenilen baskı plakası kuvvet yörüngesinin, erkek kalıbın hareketine göre elde edilebildiği görülmüştür.

Morovvati ve arkadaşları [33], derin çekme işleminde alüminyum ve paslanmaz çelikten oluşan iki katmanlı sac malzemenin şekillendirilmesi esnasında kırışmanın oluşmaması için gerekli olan minimum baskı plakası kuvvetini nümerik olarak hesaplamışlardır. Şekillendirme parametrelerinden olan şekillendirilecek sac boyutu, malzeme özellikleri gibi değerlere göre gereken baskı kuvveti ise SEY kullanılarak bulunmuştur. Elde edilen bu veriler deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında verilerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Garcia [34], 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 [35], kare kap derin çekme prosesine dayanan genel bir çekme prosesi için proses bilgisini depolayan bir veritabanı ve SEY yardımcı pres kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmada bulanık ara yüz, proses kontrolü 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 istenilen ürün, sisteme dışarıdan herhangi bir müdahale olmaksızın üretilebilmiştir.

Manabe ve arkadaşları [36], derin çekme prosesi için erkek kalıp hızı ve baskı plakası bulanık kontrol kombinasyonunu kullanan yeni bir kontrol sistemi ve yeni geliştirilen derin çekme aparatları kullanmışlardır. Bu sistem yardımıyla, proses süresince hem baskı plakası baskı kuvveti hem de erkek kalıp hızı için eşzamanlı bulanık kontrol sayesinde şekillendirme zamanında %25 azalma ve sabit hıza kıyasla çekme kalitesinde artış sağlamışlardır.

Lorenzo ve arkadaşları [37], derin çekme prosesi için genetik algoritma kullanılan bir bulanık kontrol sistemi tasarlamışlardır. Bulanık kontrolörü eğitmek için gerekli bilgiyi prosesi SEY ile modelleyerek 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 [38], 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 erkek kalıp hareketine bağlı istenen sürtünme kuvveti eğrisini elde etmek için baskı plakası kuvvetini ayarlayan bir kapalı çevrim kontrol oluşturmuşlardır.

Lo ve Yang [39], 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 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 [40], 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.

Li ve Qianzhu [41], derin çekme prosesi esnasında baskı plakası kuvvetini sistemden elde edilen veriler yardımıyla gerçek zamanlı olarak kontrol eden akıllı bir sistem geliştirmişlerdir.

Fenn [42], 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.

Cao ve arkadaşları [43], adımlı 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 [44], yapay sinir ağı ve adımlı baskı plakası kuvveti yörüngesi kullanarak çelik kanal şekillendirme prosesinde geri esnemeyi kontrol ettikleri çalışmada erkek kalıp kuvveti için uydurulan polinom eğrisinin ilk üç katsayısı yapay sinir ağlarının girişini, adımlı erkek kalıp 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°-12° lik geri esneme açısı elde ederek prosesi başarılı bir şekilde kontrol etmişlerdir.

Hsu ve arkadaşları [45], sac metal şekillendirme prosesine ait model, oldukça iyi izleme performansına sahip bir proses kontrolör ve optimal bir erkek kalıp kuvveti yörüngesi geliştirmiştir. U-kanal şekillendirmeden elde edilen deneysel sonuçlar, benzetimler sayesinde uygun bir proses kontrolörün tasarlanabileceğini ve deneyler sayesinde optimal bir referans erkek kalıp kuvveti yörüngesinin sentezlenebileceğini göstermiştir. Yine Hsu ve arkadaşları [46], sac metal şekil verme prosesine ait kontrolör tasarımı için gerekli olan proses modelini oluşturmuşlardır. U-kanal şekillendirmede prosesi modellemek için baskı plakası kuvveti ve erkek kalıp kuvveti arasındaki matematiksel ilişkiyi tanımlamışlar ve deneysel olarak doğrulamışlardır.

Krishnan ve Cao [47], dairesel olmayan bir parçada parçalı baskı plakası kullanarak her bir plaka 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, Otoresif Hareketli Ortalama) model ile güncellenmiştir. Modeli sistem girişinin ayarlanmasıyla öngörülen baskı plakası kuvvetini kontrol etmek için kullanmışlardır. Önerilen stratejinin doğruluğu için SEY'ni kullanmışlar ve benzetim sonuçları ARMA modelin çoklu baskı plakası durumunda etkin olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Sac metal şekillendirme alanında Northwestern University Advanced Materials Processing Laboratory'da yönetilen araştırmaları özetledikleri çalışmada Cao ve arkadaşları [48], 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 ve arkadaşları [49], bir PI kontrolör kullanarak şerit-çekme prosesinin geri besleme kontrolünü gerçekleştirdikleri çalışmada, erkek kalıp 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 [50], sac metal şekillendirmede geri beslemeli 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 [51], 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 yapmışlardır. 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 (dairese, dikdörtgen) olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca benzetim ile hesaplanan sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmışlar ve iyi bir uyum elde etmişlerdir.

Shuhui ve arkadaşları [52], 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 nonlineer 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 [53], 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.

Samuel [54], 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 değiştirmenin bir fonksiyonu olarak süzdürme çubuğu frenleme kuvvetine cevap verdiğini göstermiştir.

Li ve arkadaşları [55], 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.

Donglai ve arkadaşları [56], 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 [57], 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.

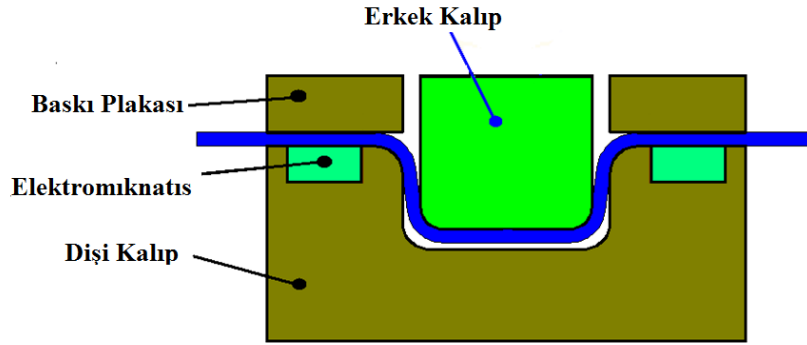
Seo [58], sac metal şekillendirme prosesinde sacın hareketinin kontrolü için demir içerikli malzemelerin manyetik çekim gücüne dayanan (EMBR-Elektromagnetik Blank Restrainer, Elektromanyetik Baskı Plakası) yeni bir teknoloji geliştirmiştir. EMBR kalıp içine yerleştirmiş ve şekillendirme sırasında aktif olarak kontrol etmiştir. EMBR kullanılarak şekillendirilmiş sac incelendiğinde şekillendirme kalitesinin arttığı görülmüştür.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

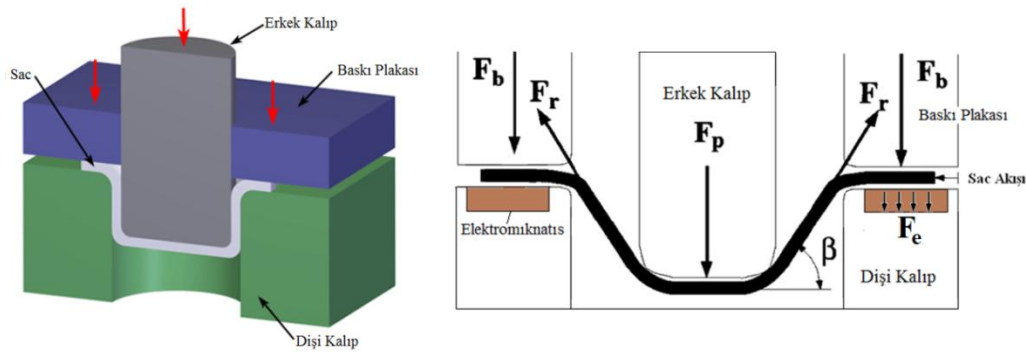
Günümüzde sanayide uygulanan soğuk sac şekillendirme ve kalıpcılık teknikleri amprik metotlara dayalı, deneysel ve çok maliyetli yöntemlerdir. Şekillendirme prosesinde kalıp tasarımı, malzeme seçimi, parça geometrisi, baskı kuvveti, yağlayıcı ve şekillendirme hızı gibi faktörler kalıp boşluğuna akan sac miktarını değiştirerek ürün kalitesini etkilemektedir [35]. Malzeme seçimi ve parça geometrisine göre kalıp tasarımı yapıldıktan sonra sac akışını düzenleyerek ürün kalitesine etki eden kontrol edilebilir proses parametreleri; baskı plakası kuvveti, yağlayıcı ve şekillendirme hızıdır. Şekillendirme hızı genel olarak ürün kalitesinden çok şekillendirilen ürün adedini artırmak amacıyla değiştirilmektedir. Yağlayıcı kullanımından ise şekillendirme sonrası arındırma gibi işlemlerden kurtulmak ve atık miktarını azaltmak amacıyla kaçınılmaktadır. Bu etmenler göz önüne alındığında şekillendirme prosesi için en uygun kontrol edilebilir parametre baskı plakası kuvvetidir [47].

Bu tez çalışmasında, baskı plakası kuvvetinin kontrolünü daha basit, modüler ve hassas hale getirmek için proseste baskı plakası ile birlikte elektromıknatis kullanımı önerilmiş ve sac kalınlığı ve genişliği ile gerilim (Voltaj) değişimine karşı elde edilecek frenleme kuvveti deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneysel veriler kullanılarak bir kontrolör tasarlanmış ve istenilen referans frenleme kuvvetinin elde edilebilmesi için elektromıknatisa uygulanacak gerilim bu kontrolör yardımıyla ayarlanmıştır. Bu sayede şekillendirme esnasında ortaya çıkan kusurların en aza

indirilmesine çalışılmıştır. Ayrıca kontrol edilebilir frenleme kuvveti sağlayan elektromıknatis, modüler olmasından dolayı farklı kalıplarda da tekrar kullanılarak kalıp maliyeti ve tasarımı açısından da büyük fayda sağlamıştır. Şekil 1.6'da elektromıknatis kullanılan sac metal şekillendirme kalıbının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.6. Elektromıknatis kullanılan sac metal şekillendirme kalıbının şematik gösterimi



Şekil 1.7. Sac şekillendirme işleminin şematik gösterimi

Sac şekillendirme işlemi esnasında sac levha dişi kalıp üzerine yerleştirildikten sonra, baskı plakası dişi kalıba doğru hareket eder. Bu hareket ile sac levha üzerinde baskı plakasından doğan F_b kuvveti oluşur. Kapanma işlemi tamamlandıktan sonra erkek kalıp sac levhayı şekillendirmek için dişi kalıba doğru hareket eder. Bu hareket esnasında sac levha üzerinde F_r kuvveti oluşur. F_r kuvveti, baskı plakası kuvvetinin kalıp elemanları (baskı plakası ve dişi kalıp) ile sac levha arasındaki sürtünme katsayısının (μ) çarpımı ile hesaplanabilir (Şekil 1.7). Deneylerde yatay frenleme kuvveti ölçüleceğinden β açısı 0 kabul edilmiştir.

$$F_r = \frac{F_b \cdot \mu}{\cos \beta} \quad (1.1)$$

Çalışmada, 10000 N'luk sabit baskı plakası kuvveti altında, elektromıknatis çekim kuvveti F_e kullanılarak sac üzerinde oluşan F_r kuvveti miknatisa uygulanan gerilim değiştirilerek kontrol edilmiştir.

$$F_r = F_b * \mu + F_e * \mu \quad (1.2)$$

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 baskı plakası üzerine yapılmış belli başlı çalışmalar ve bunlardan elde edilen sonuçların özetlendiği literatür araştırması, çalışmanın amacı, içeriği ve önemi anlatılmıştır.

Tezin 2. bölümünde yapılan deneysel çalışma anlatılmış, kullanılan cihazlar, malzemeler ve elde edilen veriler hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Tezin 3. bölümünde eğri uydurma yöntemi kullanılarak elektromıknatisa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti herbir sac genişliği ve kalınlığı için modellenmiştir.

Tezin 4. bölümünde regresyon analizi ve doğrusal regresyon modelleri hakkında bilgi verilmiş ve sac genişliği, sac kalınlığı ve elektromıknatisa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti için modeller geliştirilerek bunların içinde en uygun modele karar verilmiştir.

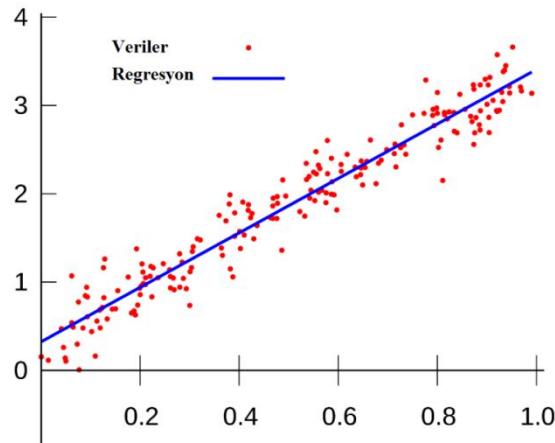
Tezin 5. ve 6. bölümünde model öngörülü kontrol ve teorisi hakkında bilgi verilmiş ve elektromıknatisa uygulanan gerilimi kontrol etmek için model öngörülü kontrolör tasarlanmıştır.

Tezin 7. bölümünde çalışmanın sonucunda varılan temel sonuçlar paylaşılmış ve bu konuda çalışma yapacak araştırmacılara önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. REGRESYON ANALİZİ

2.1. Giriş

Regresyon analizi aralarında sebep sonuç ilişkisi olan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi incelemek ve o konuyla ilgili tahmin yapabilmek amacıyla oluşturulan ve matematiksel bir model ile belirtilen istatistiksel bir analizdir (Şekil 2.1). Bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasında kurulan istatistiksel modelle bağımsız değişkenlerin belirli değerleri için bağımlı değişkenlerin alacağı değeri tahmin etme yöntemidir [60]. Burada bir bağımlı değişken (Y) ile bir bağımsız değişken (X1) arasındaki bağıntıyı inceleyen yönteme basit regresyon, bir bağımlı değişken (Y) ile iki ya da daha fazla bağımsız değişken (X1, X2, X3,....., Xp) arasındaki bağıntıları modeller aracılığı ile inceleyen yönteme ise çoklu regresyon adı verilmektedir [61]. Bu çalışmada kullanılan doğrusal regresyon modeli alt başlık olarak verilmiştir.



Şekil 2.1. Doğrusal regresyon

Basit ve çoklu regresyon modelleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [62].

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

Basit doğrusal model

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

Çoklu doğrusal model

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

Çok değişkenli doğrusal model

Uygulamada çok karşılaşılan bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişki şekilleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir [63].

Tablo 2.1.Bağımlı ve bağımsız değişkenler 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

2.2. Doğrusal Regresyon Model

Bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkinin doğrusal bir fonksiyon ile ifade edildiği modeldir. Bağımlı değişkeni (y) kestirmek için tek bağımsız değişken (x) kullanılıyorsa Basit Doğrusal Regresyon Model, bağımlı değişkeni (y) kestirmek için birden fazla bağımsız değişken (x_1, x_2, \dots, x_k) var ise Çoklu Doğrusal Regresyon Model adı verilmektedir [64].

2.2.1. Basit doğrusal regresyon modeli

Değişkenler arasında bulunduğu varsayılan gerçek doğrusal ilişki, tek bir serbest değişken içeren bir doğru denklemi ile gösterilirse, basit doğrusal regresyon modeli elde edilir.

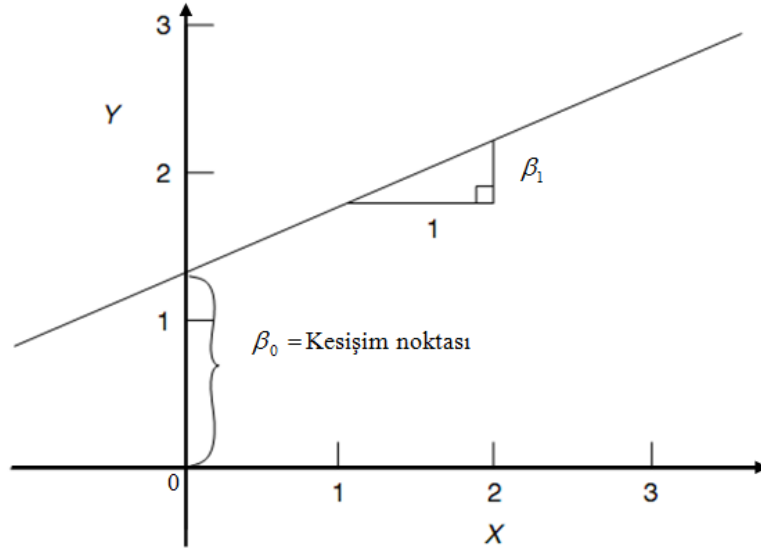
Basit doğrusal regresyon modeli,

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

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



Şekil 2.2. Doğrusal ilişkinin grafik gösterimi [65]

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,

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

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

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

yazılabilir.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

normal denklemleri elde edilir. (2.8) nolu eşitlikte β_0 katsayısı çekilirse,

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

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

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

olur ve bu denklem β_1 için çözüldüğü takdirde,

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

bulunur. Eğer,

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

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

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

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

olarak elde edilir. β_0 ise (2.10) nolu denklem kullanılarak,

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

olarak bulunur [65, 66].

2.2.2. Çoklu doğrusal regresyon modeli

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

k adet bağımsız değişken ile çoklu doğrusal regresyon modeli,

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

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

β_0 = y-ksenini 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

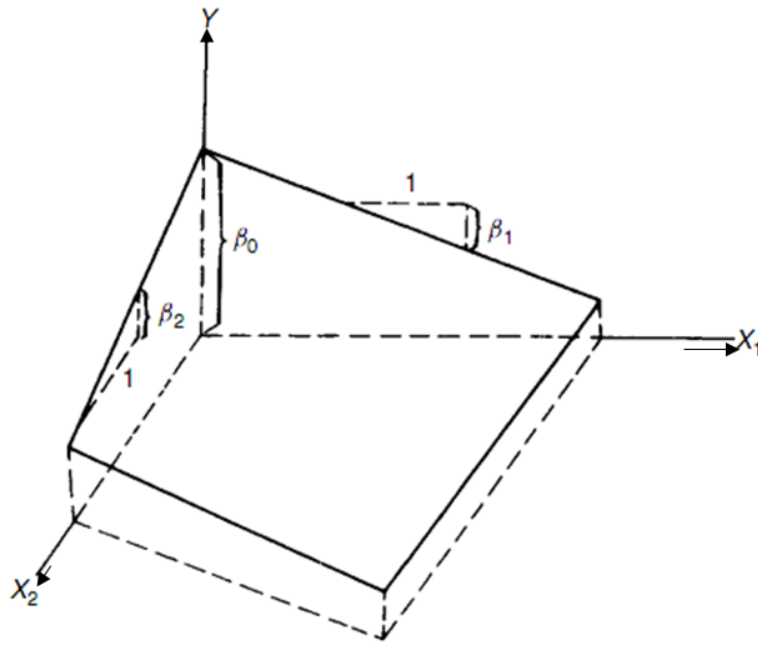
$\beta_2 = x_1, x_3, \dots, x_k$ değişkenleri sabit tutulduğunda x_2 değişkeniyle y'nin eğimi

$\beta_3 = x_1, x_2, x_4, \dots, x_k$ 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 [64].

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



Şekil 2.3. Üç regresyon katsayısına sahip çoklu regresyon modelinin grafik gösterimi [65]

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

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

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

olur. Burada,

$y = (n \times 1)$ gözlem vektörünü,
 $x = (n \times (p + 1))$ değişken matrisi,
 $\beta = ((p + 1) \times 1)$ katsayı vektörünü,
 $\varepsilon = (n \times 1)$ hata vektörünü

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

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

elde edilir. (2.19) nolu eşitlikten,

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

bulunur. Hataların kareleri alınırsa,

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

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

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

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

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

olur. Hataların karelerini minimize edecek β matrisini bulmak için (2.23) nolu eşitliğin β 'ya göre türevini alıp sifira eşitlemek gerekir.

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

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

buradan β çekilirse,

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

elde edilir ve çoklu regresyon modelin katsayı matrisi bulunmuş olur [65,66].

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

a. Doğrusal (Linear) Model:

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

b. İkinci Dereceden (Purequadratic) Model:

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

c. Etkileşimli (Interaction) Model:

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

d. İkinci Dereceden-Etkileşimli (Quadratic) Model:

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

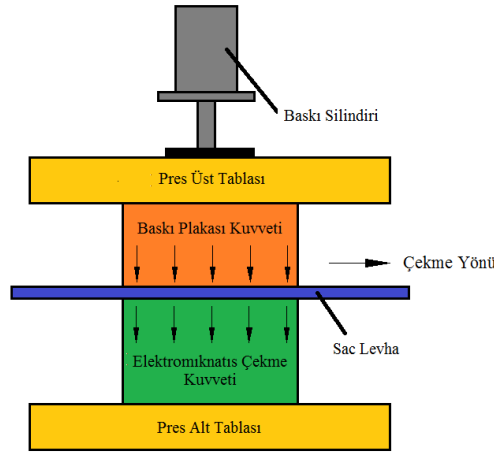
olarak gösterilebilir [67].

Bu modeller kullanılarak; frenleme kuvveti, deneylerden elde edilen veriler kullanılarak elektromıknatısa uygulanan gerilim, sac levha genişliği ve kalınlığının değişimine bağlı olarak modellenecektir.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Giriş

Literatür araştırmasında da görüldüğü üzere baskı plakası kuvveti ve kuvvetin sac üzerinde oluşturduğu frenleme kuvveti, sac metal şekillendirme prosesinde nihai ürün kalitesini etkileyen başlıca faktörlerden birisidir. Bu çalışmada baskı plakası kuvvetine ek olarak sisteme adapte edilen elektromıknatısın çekim kuvveti kullanılmıştır. Böylelikle baskı plakası mıknatısa doğru çekilerek elde edilen frenleme kuvveti artırılmıştır. Bu yöntem ile kontrol edilebilir frenleme kuvveti (baskı plakası kuvveti) elde edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Baskı plakası kuvveti ve elektromıknatıs çekme kuvvetinin pres üzerinde şematik gösterimi

3.2. Deney Düzenegi

Baskı plakası kuvveti ve elektromıknatısa uygulanan gerilim değişimi ile elde edilecek frenleme kuvvetinin ölçülebilmesi için 100 tonluk ve 22mm/s hıza sahip atölye tipi hidrolik pres modernize edilmiştir (Şekil 3.2).



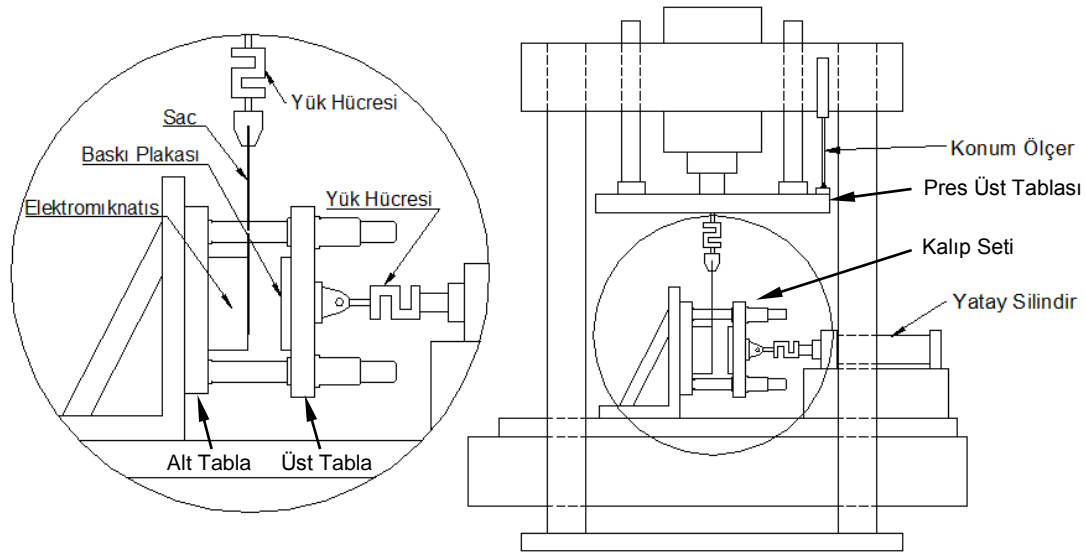
Şekil 3.2. Modernize edilmiş 100 tonluk atölye tipi pres

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

1. Yatay silindir yük hücresi: Yatay silindirin baskı plakasını elektromıknatısa doğru hareket ettirmesi esnasında, baskı plakasının sac levha ve elektromıknatısa uyguladığı kuvveti ölçmek için kullanılan donanımdır.
2. Düşey silindir yük hücresi: Baskı plakası ve elektromıknatısın sac üzerinde oluşturduğu frenleme kuvvetinin ölçülmesi amacıyla kullanılan donanımdır.
3. Konum Ölçer: Sac levhanın bağlı olduğu pres üst tablasının konumunun ölçülmesi amacıyla kullanılan donanımdır.
4. Yatay silindir: Baskı plakasının elektromıknatısa doğru ittirilmesi amacıyla kullanılan donanımdır.
5. Düşey silindir: Sac levhanın bağlı olduğu pres üst tablasını düşey yönde hareket ettirmek amacıyla kullanılan donanımdır.

6. Elektromıknatıs: Baskı plakası ve sacı kendine doğru çekerek kontrol edilebilir frenleme kuvveti elde etmek için kullanılan donanımdır.
7. Kontrol panosu: Elektromıknatısa uygulanan gerilim değerinin kontrol edildiği donanımdır.
8. Bilgisayar: Yük hücreleri ve konum ölçerden gelen bilgileri eş zamanlı olarak kaydetmek ve hazırlanan yazılım ile pres konum ve hareketlerini kontrol etmek amacıyla kullanılan donanımdır.
9. Tutucu çene: Frenleme kuvvetinin ölçülmesi için sac levhanın kaymadan sabit bir şekilde tutulması için kullanılan donanımdır.

Şekillendirme esnasında sac levha üzerine etkiyen frenleme kuvvetinin deneysel olarak incelenebilmesi için elektromıknatıs ve baskı plakasından oluşan bir kalıp seti hazırlanmıştır. Şekil 3.3’de şematik olarak gösterilen pres üzerine bu kalıp seti dikey olarak monte edilmiştir.



Şekil 3.3. Pres üzerine monte edilen kalıp seti ve donanımların şematik gösterimi

Dikey pozisyondaki kalıp setinin alt tablasına elektromıknatıs, üst tablasına ise baskı plakası monte edilmiştir. Ayrıca bu tablanın diğer kısmına ise yatay silindirin oluşturduğu itme kuvvetinin ölçülmesi amacıyla yük hücresi (Load Cell) yerleştirilmiştir. Bu kalıp seti pres alt tablasına hazırlanan aparat yardımıyla dikey olarak bağlanarak sabitlenmiştir. Bu sayede sistemin her bir deney tekrarında aynı şekilde kalması sağlanmıştır. Aynı şekilde pres alt tablasına sabitlenmiş olan yatay

silindir yardımıyla kalıp seti açılıp kapatılabilmekte ve sete bağlı olan yük hücresi yardımıyla baskı plakasına uygulanan kuvvet, silindire uygulanan basınç değiştirilerek istenilen miktarda ayarlanabilmektedir.

Pres üst tablasına yük hücresi ile bağlı olan tutucu çene, üst tablanın sac malzemeyi kaymadan sabit bir şekilde yukarı yönlü çekebilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Çekme esnasında oluşan frenleme kuvvetinin ölçülmesi ise tutucu çene ile pres üst tablası arasında monte edilmiş yük hücresi tarafından yapılmaktadır. Elde edilen veriler cihazın bağlı olduğu indikatör yardımıyla bilgisayarın RS232 portu üzerinden eş zamanlı olarak kaydedilmektedir.

Pres üst tablası ile pres gövdesi arasına monte edilen konum ölçer, pres üst tablasının konumunu eş zamanlı olarak kayıt yapan bilgisayara RS232 portu yardımıyla göndermektedir. Bu sayede sac levha üzerinde oluşan frenleme kuvvetinin, sac levhanın konumuna bağlı olarak ölçülmesi sağlanmaktadır. Ayrıca bu konum ölçerden gelen bilgiler, pres üst tablasının konumunun ayarlanması amacıyla da kullanılmaktadır. Deneylerin aynı şartlarda uygulanabilmesi için pres üst tablasının her bir deney başlangıç durumunda aynı pozisyonda olması gerekmektedir. Bunun için MATLAB GUI ortamında hazırlanan program yardımıyla konum ölçerden gelen bilgilere göre presin üst tablasının konumu ayarlanabilmektedir (Şekil 3.4).

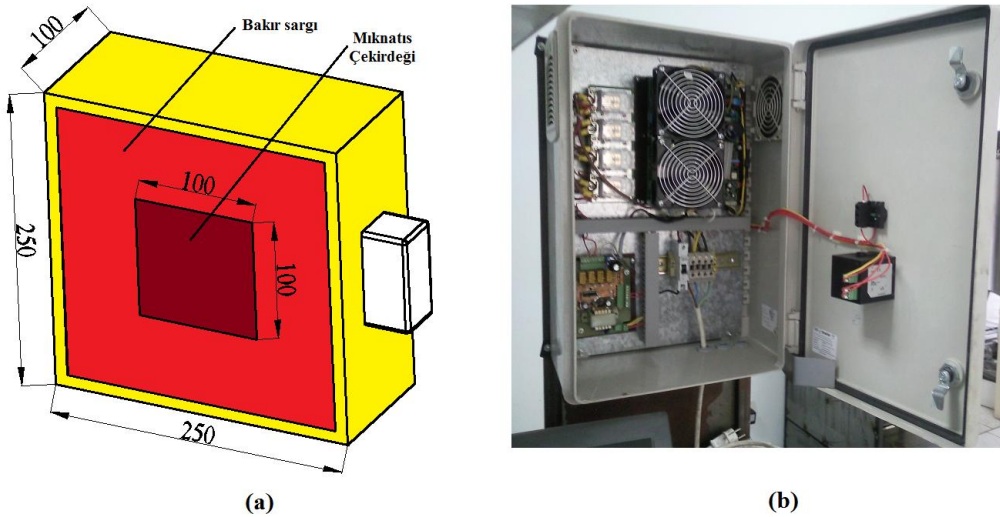


Şekil 3.4. Pres üst tablasının konumu ayarlayan ve yük hücrelerinde gelen bilgileri kaydeden arayüz

Matlab GUI ortamında hazırlanan bu programda, arayüze girilen değerler (Malzeme kodu, E.M. voltaj sac genişliği ve sac kalınlığı), pres üzerinde bulunan donanımlardan gelen bilgilerin kaydedildiği dosyanın adı olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile dosya adına bakılarak incelenen verilerin hangi deney şartlarında elde edildiği görülebilmektedir. Ayrıca hazırlanan bu arayüz ile pres manuel olarak veya

otomatik olarak istenilen pozisyona getirilebilmektedir. Arayüz üzerinde bulunan bağlama ref. tuşu ile pres üst tablası sac levhanın bağlanacağı pozisyona, deney ref. tuşu ile tabla deney başlama pozisyonuna gelmektedir. Tabla yukarı ve aşağı tuşları ile pres üst tablası tabla manuel olarak istenilen pozisyona getirilebilmektedir. Başlat tuşuna basılarak deney başlatılmakta ve bu esnada arayüze girilen değerlere göre isimlendirilen dosya içine yük hücresi ve konum ölçerlerden gelen bilgiler kaydedilmektedir.

Deneylerde kullanılan mıknatıs ve kontrol panosu AKSA MAGNET firmasına şekil 3.5’de gösterilen boyutlarda hazırlanmıştır.



Şekil 3.5. Deneyler sırasında kullanılan elektromıknatıs (a) ve kontrol panosunun (b) görünüşü

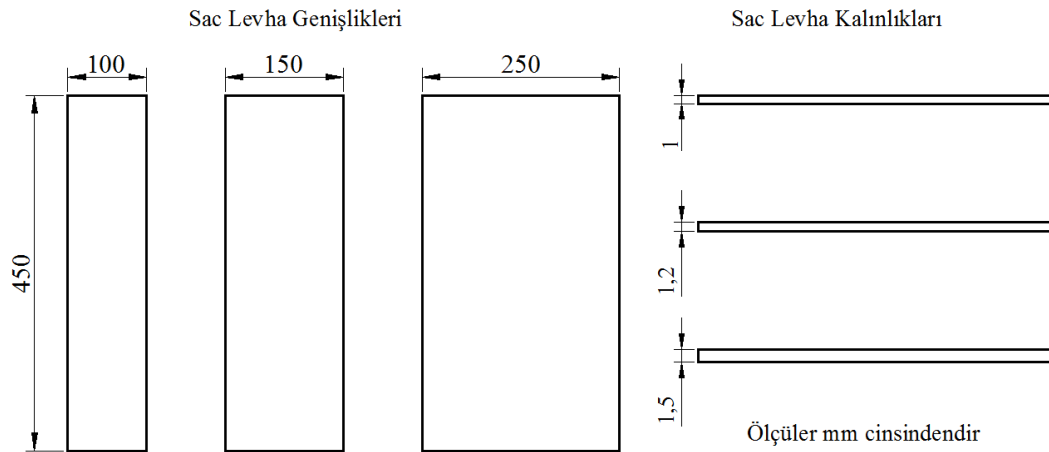
3.3. Deneylerin Yapılışı

Deneyler esnasında Ereğli Demir Çelik fabrikasının ürünü olan derin çekme işlemine uygun, otomotiv ve beyaz eşya sektöründe sıklıkla kullanılan 7114 (DC 04) kalitesinde soğuk çekme çelik sac levhalar kullanılmıştır. Bu levhaların mekanik özellikleri tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Soğuk haddelenmiş çelik sacın mekanik özellikleri [59]

Standart	Kalite	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	ϵ_{min} (%)	r_{90}^0 min	n_{90}^0 min
DIN EN 10130	DC 04	210	270-350	38	1.6	0.18

Sac levhalar, elektromıknatısa uygulanan gerilim ile elde edilen frenleme kuvvetinin, sac kalınlığı ve genişliğine göre değişiminin incelenmesi amacıyla 9 farklı boyutta kesilmiştir. Şekil 3.6'da deneyler sırasında kullanılan sac levhaların genişlik ve kalınlıkları gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Deneyler sırasında kullanılan sac levhaların boyutları

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi sac levhaların boyları 450 mm ile sabit tutulmuştur. Bundaki amaç levhanın tutucu çene ile rahat tutulabilmesi ve sacın diğer ucunun elektromıknatıs ile baskı plakasından dışarı taşmasıdır. Bu sayede çekilen sac levhanın kalıp setine (Elektromıknatıs-baskı plakası) tam temas ettiği durumda ve sacın kalıp setinin içine doğru hareket etmesiyle meydana gelen temas kaybında, ölçülen frenleme kuvvetinin değişimi incelenebilmiştir. Şekil 3.7'de sac levhanın elektromıknatıs ile baskı plakası arasına bağlanması ve pres üst tablasının hareketiyle sacın yapmış olduğu 240 mm'lik strok şematik olarak gösterilmiştir.

Sac levhaların genişlikleri, deneyde kullanılan elektromıknatısın boyutlarına göre hazırlanmıştır. Mıknatısın ortasında bulunan nüve olarak tanımlanan çekirdek kısmının genişliği olan 100mm, mıknatısın gövde genişliği olan 250mm ve bu iki değer arasında bir değer olan 150mm, sac genişlikleri olarak seçilmiştir.

Sac levhaların kalınlıkları ise sanayide sıklıkla kullanılan ve tedarik açısında sorun çıkarmayan 1, 1.2 ve 1.5 mm olarak seçilmiştir.

Baskı plakası ile elektromıknatis arasındaki sürtünme katsayısının bulunması için, deneyler elektromıknatisa gerilim uygulanmadan tekrarlanmıştır. Bu yöntem ile elde edilen frenleme kuvveti, baskı plakasına uygulanan 10000 N'luk normal kuvvetin oluşturduğu sürtünme kuvvetine eşittir. Tablo 3.2'de bu deneyler sonucunda elde edilen veriler gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Elektromıknatisa gerilim uygulanmadan ölçülen frenleme kuvvetleri

Voltaj (V)	Sac Kalınlığı (mm)	Sac Genişliği (mm)	Ölçülen Frenleme Kuvveti (N)
0	1	100	3458,19
0	1	150	3480,55
0	1	250	3450,75
0	1,2	100	3448,85
0	1,2	150	3425,48
0	1,2	250	3438,15
0	1,5	100	3491,74
0	1,5	150	3490,22
0	1,5	250	3420,76

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

$$F_{fk} = F_b * \mu_{b-em} \quad (3.2)$$

F_{fk} : Kalıp seti frenleme kuvveti (Tablo 2.)

F_b : Baskı plakası kuvveti (10000 N)

μ_{b-em} : Baskı plakası ile elektromıknatis arasındaki sürtünme katsayısı

Buradan sürtünme katsayısı çekilirse denklem 3.3. elde edilir.

$$\mu_{b-em} = \frac{F_{fk}}{F_b} \quad (3.3)$$

Tablo 3.2'deki değerler denklem 3.3'de yerine konularak herbir numunenin sürtünme katsayısı hesaplanabilir. Tablo 3.3'de elde edilen bu sürtünme katsayıları ve ortalama sürtünme katsayısı gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Her bir sac levha için elde edilen sürtünme katsayıları

Sürtünme katsayıları					Ortalama Sürtünme Katsayısı
		Sac Genişliği (mm)			
		100	150	250	
Sac Kalınlığı (mm)	1	0,346	0,348	0,345	0,346
	1,2	0,345	0,343	0,344	
	1,5	0,349	0,349	0,342	

Tablo 3.3'deki değerler incelendiğinde her bir levhanın sürtünme katsayıları birbirine çok yakındır. Bu sonuç işiğinde aynı seriden (aynı üretim hattından çıkan) olan sac levhaların yüzey kalitelerinin birbirine çok yakın olduğunu ve sürtünme katsayısının beklenildiği şekilde sac kalınlığı ve genişliği ile değişmediği görülmektedir. Bu da denklem 3.1 ile sadece elektromıknatıs ile elde frenleme kuvvetinin hesaplanabileceğini göstermektedir.

Kalıp seti içindeki sürtünme katsayısı hesaplandıktan sonra prosesteki ana değişken olan elektromıknatısa uygulanan gerilim değişimine göre elde edilen frenleme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bunun için herbir sac kalınlığı ve genişliği için elektromıknatısa sırasıyla 3,6,9,12,15,18,21 Volt değerlerinde gerilim uygulanmıştır. Bu yöntem ile 63 adet veri elde edilmiştir.

Tablo 3.4'de deneyler sonucunda elde edilen 63 veriden ilk 10 tanesi kullanılarak elde edilen elektromıknatıs frenleme kuvveti gösterilmiştir. Burada deney sonucunda elde edilen veriler Denklem 3.1'de yerine konularak hesaplama yapılmıştır.

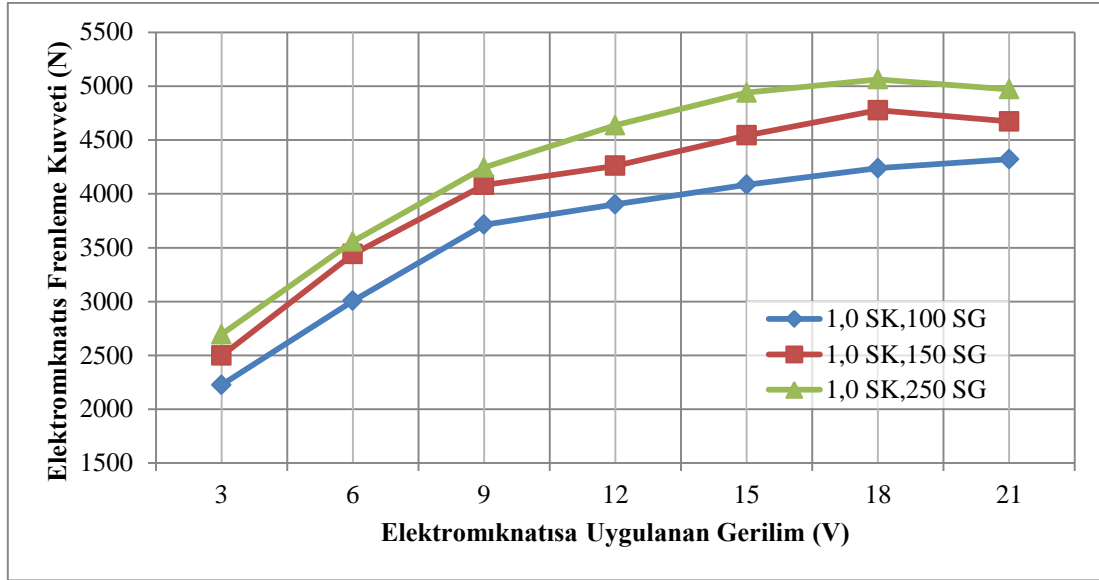
Tablo 3.4. Denklem 2.1'den elde edilen elektromıknatis frenleme kuvveti

Voltaj (V)	Sac Kalınlığı (mm)	Sac Genişliği (mm)	Ölçülen Frenleme Kuvveti (N)
3	1	100	2225,99
3	1	150	2497,46
3	1	250	2695,18
3	1,2	100	2128,01
3	1,2	150	2337,52
3	1,2	250	2467,01
3	1,5	100	2016,14
3	1,5	150	2167,97
3	1,5	250	2223,95
6	1	100	3005,86

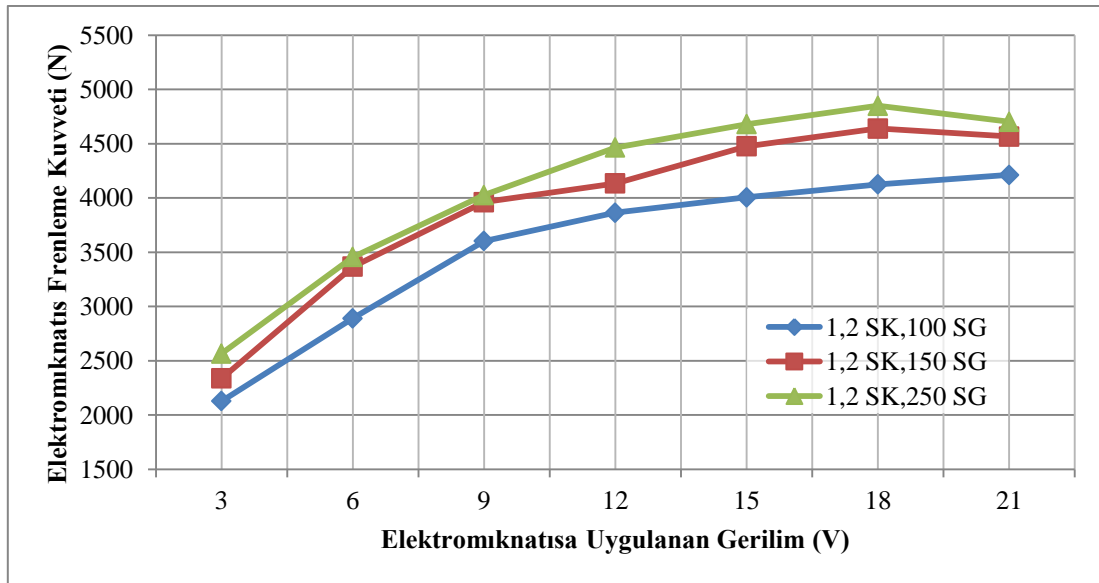
3.4. Deney Sonuçları

Deneyler sırasında Ereğli Demir Çelik fabrikasının ürettiği 7114-DC 04 kalitesindeki sac lavhalar, 3 farklı kalınlık ve genişlikte kesilerek kullanılmıştır. Bu levhalar, baskı plakası kuvveti sabit (10000N) ve elektromıknatisa 7 farklı değerde gerilim uygulanarak çekilmiştir. Bu işlem her bir şart için 3'er kez tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Elde edilen bu veriler Denklem 2.1'de yerine konularak sadece elektromıknatisın üretmiş olduğu frenleme kuvveti elde edilmiştir.

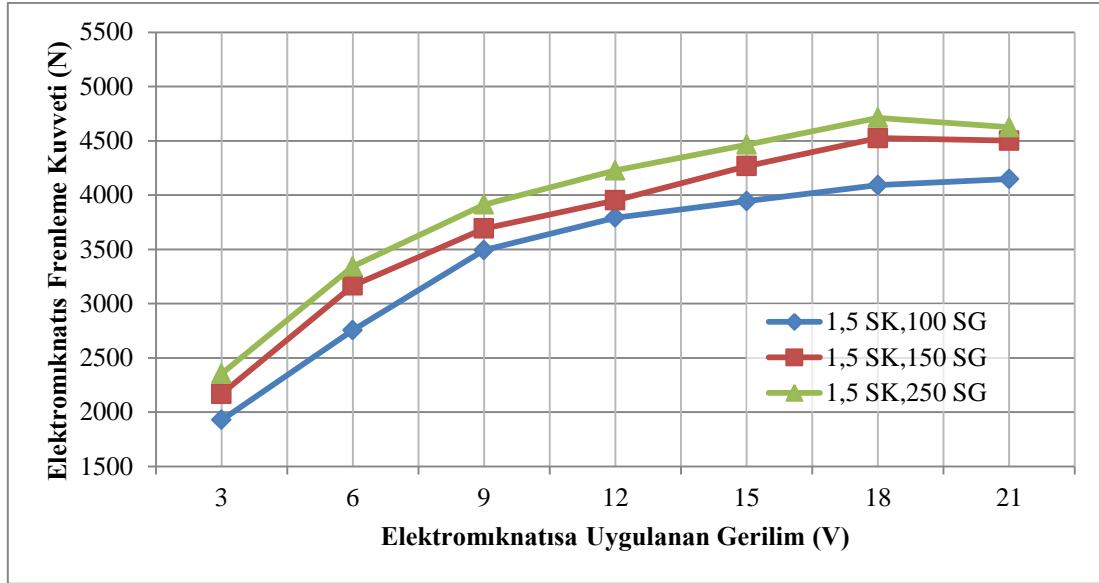
Bu bölümde elektromıknatisa uygulanan gerilime (EMG) karşılık elde edilen elektromıknatis frenleme kuvvetinin (EMFK) sac kalınlığı ve genişliğine göre değişimi grafiklerle karşılaştırılacaktır. Grafiklerde sac kalınlığı SK ve sac genişliği SG ile gösterilecektir.



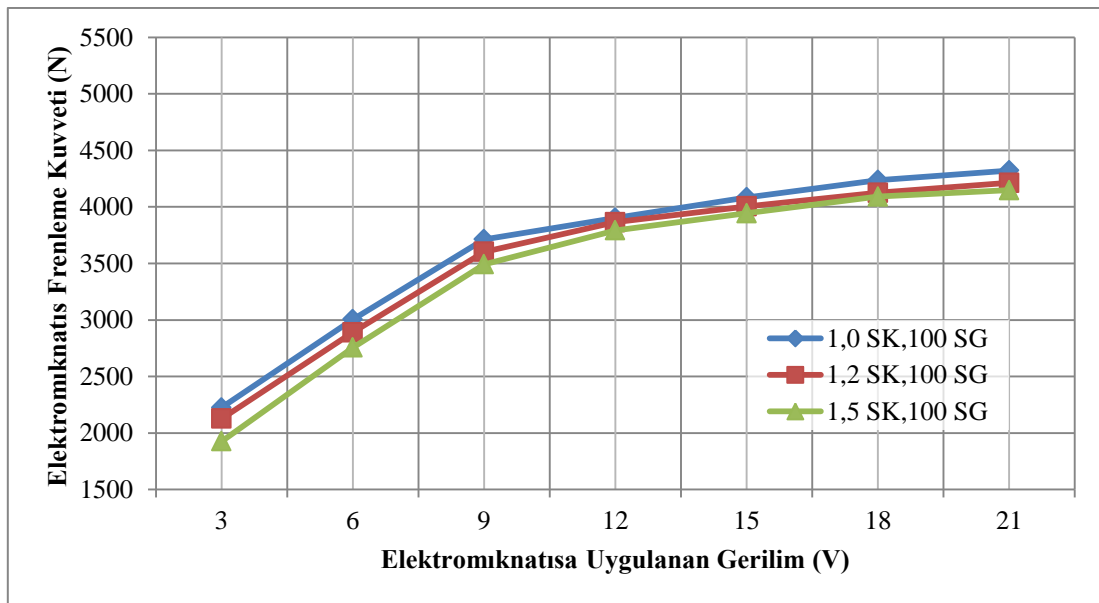
Şekil 3.8. EMG-EMFK grafiğinin sac genişliğine göre değişimi (1,0 mm kalınlığındaki levha için)



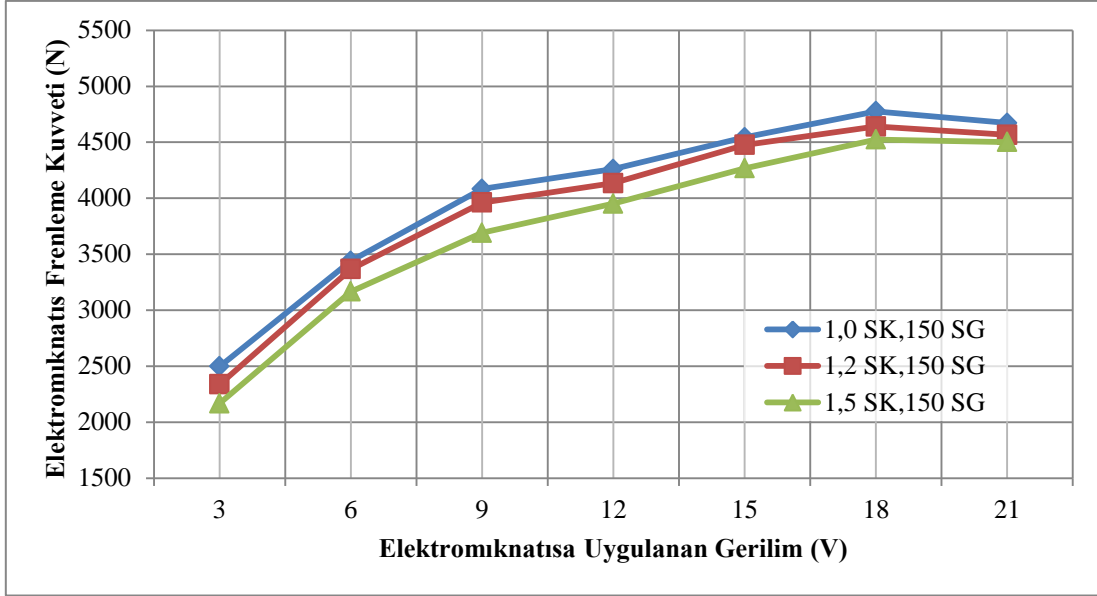
Şekil 3.9. EMG-EMFK grafiğinin sac genişliğine göre değişimi (1,2 mm kalınlığındaki levha için)



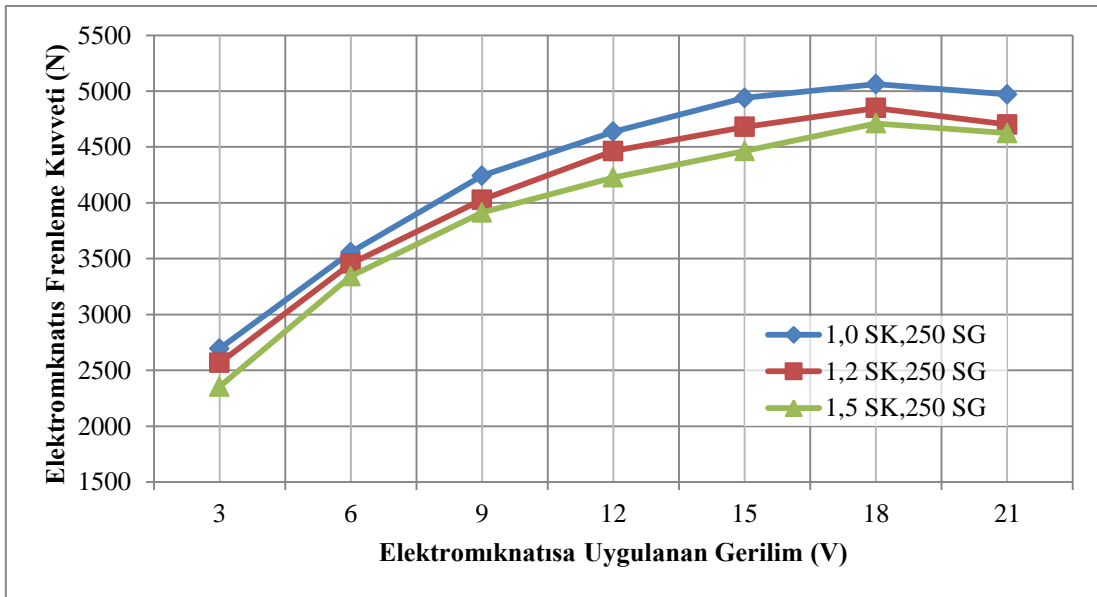
Şekil 3.10. EMG-EMFK grafiğinin sac genişliğine göre değişimi (1,5 mm kalınlığındaki levha için)



Şekil 3.11. EMG-EMFK grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (100 mm genişliğindeki levha için)



Şekil 3.12. EMG-EMFK grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (150 mm genişliğindeki levha için)



Şekil 3.13. EMG-EMFK grafiğinin sac kalınlığına göre değişimi (250 mm genişliğindeki levha için)

Deney sonuçlarına göre çizilen EMG-EMFK grafikleri incelendiğinde, aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Elektromıknatısa uygulanan gerilim arttıkça elde edilen frenleme kuvveti de artmaktadır. Ancak uygulanan gerilim 18 voltu geçtikten sonra elektromıknatıs doyuma ulaştığından dolayı frenleme kuvvetindeki artım durmakta yada bir miktar azalmaktadır.
- Uygulanan gerilim 18 voltu geçtikten sonra mıknatıs çekirdeği ile aynı genişlikte olan sac malzemedeki frenleme kuvveti artmaya devam etmekte, diğer malzemelerde ise çok büyük değişim olmamaktadır. Bu olay elektromıknatısın doyuma ulaşmasından kaynaklanmaktadır.
- Sac malzemenin genişliği arttıkça elde edilen frenleme kuvveti artmaktadır.
- Sac malzeme kalınlığı arttıkça elde edilen frenleme kuvveti azalmaktadır.
- Sac malzemenin kalınlığı, elektromıknatıs ile baskı plakası arasındaki çekim kuvvetini azaltmakta, buda frenleme kuvvetinin azalmasını sebep olmaktadır.
- Ancak elektromıknatısa uygulanan gerilim arttıkça, çekim kuvveti de arttığından sac malzemenin kalınlığının etkisi de azalmaktadır.
- Frenleme kuvvetinin sac kalınlığına bağlı azalma miktarı %1-13 arasında değişmektedir. Bu azalmadaki temel faktör uygulanan gerilim değeridir. %13'lük değer gerilimin en az olduğu 3 V'luk değerde meydana gelmektedir. Gerilim değeri arttıkça frenleme kuvvetindeki azalma miktarı küçülmektedir.
- Sac genişliği arttıkça frenleme kuvvetindeki azalma miktarı da artmaktadır. Bundaki temel faktör elektromıknatıs ile baskı plakası arasındaki çekim alanının daha büyük bir levha ile kapatılmasıdır.

BÖLÜM 4. ELEKTROMİKNATIS FRENLEME KUVVETİNİN MODELLENMESİ

4.1. Giriş

Baskı plakası kuvveti, sac şekillendirme işlemi esnasında, malzemenin kalıp boşluğu içine kontrollü bir şekilde akması amacıyla kullanılır. Sac malzemenin bu hareketi, baskı plakası kuvveti nedeniyle sac malzeme ile kalıp elemanları arasında oluşan sürtünmeden kaynaklı frenleme kuvvetinin değiştirilmesi ile ayarlanabilir.

Bu bölümde; frenleme kuvveti, deneylerden elde edilen veriler kullanılarak modellenecektir. Deneyler esnasında veriler, sabit baskı plakası kuvveti altında elektromıknatısa uygulanan gerilim, sac levha genişliği ve kalınlığının değişimine bağlı olarak elde edilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan, sac kalınlığı, sac genişliği, elektromıknatısa uygulanan gerilim modellerin girişleri (Tablo 4.1), elektromıknatıs frenleme kuvveti (EMFK) ise modelin çıkışı olacaktır. Tablo 4.1’de görüldüğü gibi her bir sac kalınlığı ve genişliği için elektromıknatısa 7 farklı gerilim uygulanarak 63 adet veri toplanmıştır.

Tablo 4.1. Model girişleri

Model Girişleri		
Sac Kalınlığı (mm)	Sac Genişliği (mm)	Elektromıknatısa Uygulanan Gerilim (V)
1	100	3
1,2	150	6
1,5	250	9
		12
		15
		18
		21

4.2. Eğri Uydurma ile Modelleme

Bir fonksiyonun nokta nokta verilen değerlerinde, fonksiyona en yakın başka bir fonksiyonun belirlenmesi veya pratikte kullanımı zor olan fonksiyonların yerine geçerek hesaplamalarda kolaylık sağlayabilecek yeni fonksiyonların araştırılması “eğri uydurma” problemidir [68].

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

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

burada,

$f(x)$ = EMFK: Elektromıknatıs frenleme kuvveti (N),

$x = V$: Elektromıknatısa uygulanan gerilim (V),

olarak gösterilmiştir.

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

Korelasyon katsayısı,

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

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

Hataların kareleri toplamı,

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

Hataların karelerinin ortalamasının karekökü

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

olarak ifade edilir. Burada,

y : Gerçek çıkış değeri,

\hat{y} : Modelden kestirilen çıkış değeri,

\bar{y} : Çıkış değerlerinin ortalaması ve

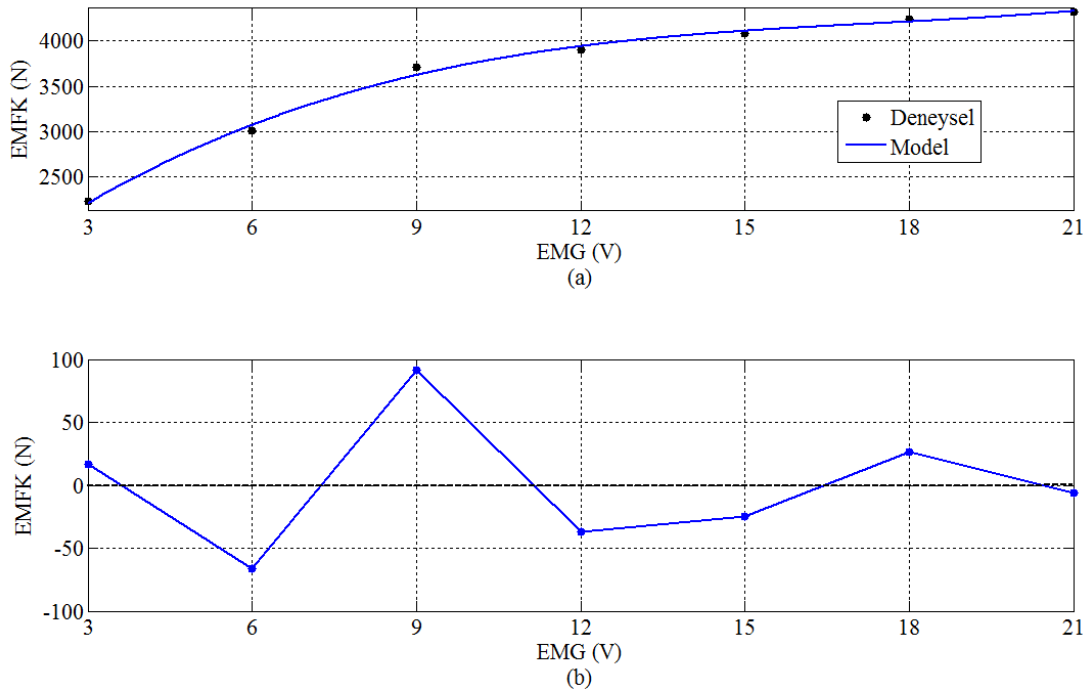
n : Örnek sayısını

gösterir [2].

4.2.1. 100 mm sac genişliği ve 1mm sac kalınlığı için polinom model

$$EMFK = 0,5065 V^3 - 26,52 V^2 + 494,4 V + 951,2 \quad (4.5)$$

Şekil 4.1'de, 100 mm sac genişliği ve 1mm sac kalınlığındaki sac levha için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,9955$, $SSE = 15717,87$ ve $RMSE = 72,38$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1. 100 mm sac genişliği ve 1mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

4.2.2. 100 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığı için polinom model

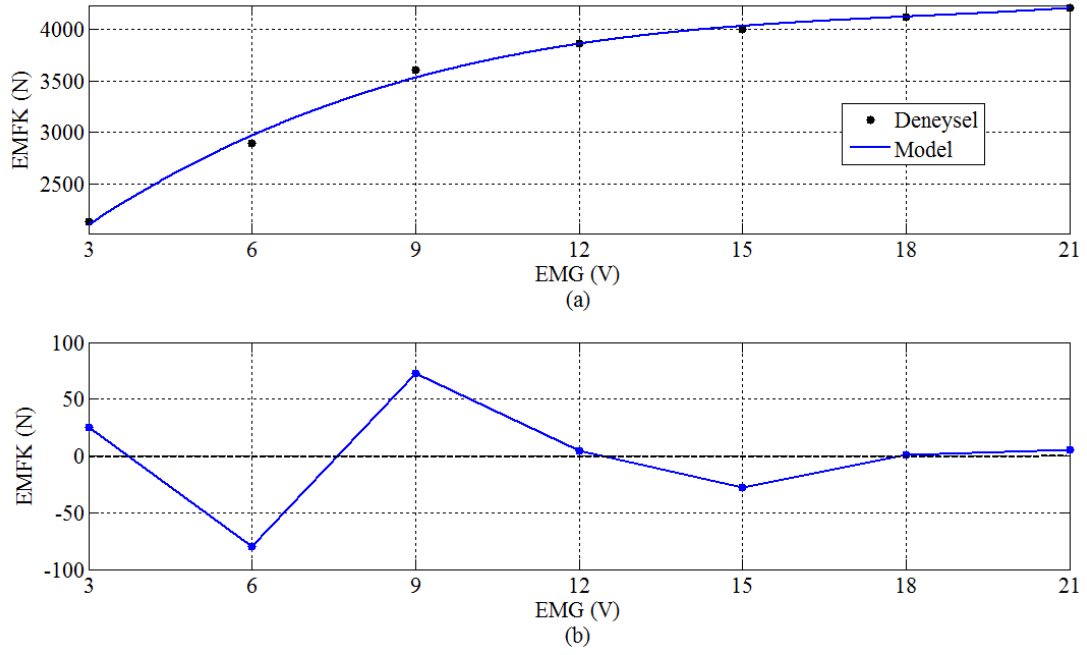
$$EMFK = 0,4609 V^3 - 25,3 V^2 + 487,6 V + 855,4 \quad (4.6)$$

Şekil 4.2'de, 100 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığındaki sac levha için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,9963$, $SSE = 12997,15$ ve $RMSE = 65,82$ olarak hesaplanmıştır.

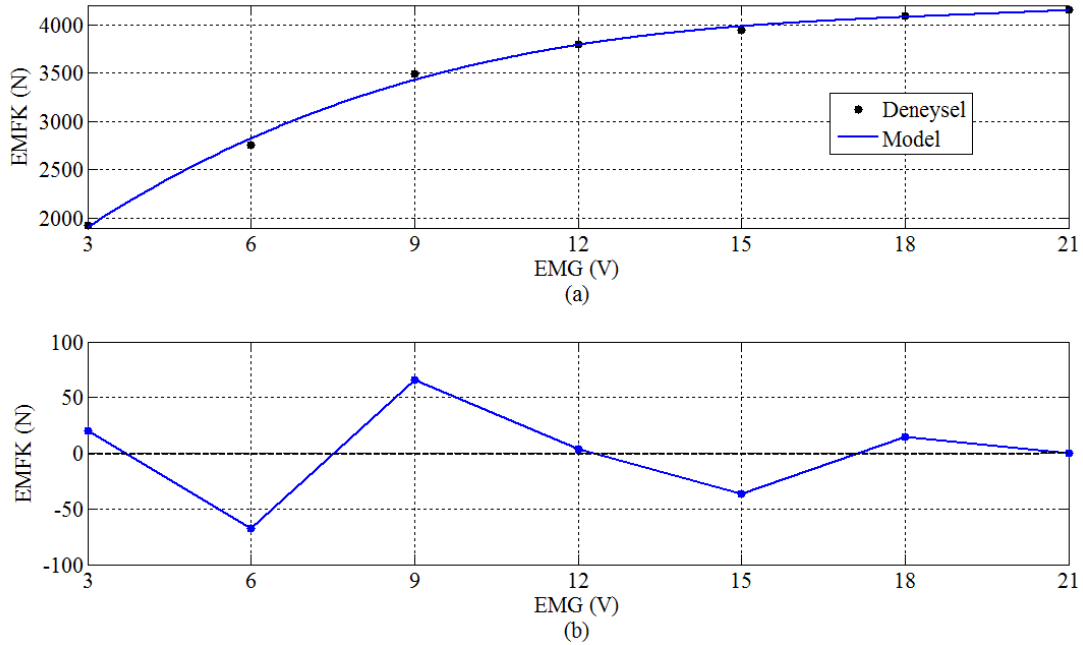
4.2.3. 100 mm sac genişliği ve 1,5 mm sac kalınlığı için polinom model

$$EMFK = 0,4459 V^3 - 25,45 V^2 + 506,5 V + 604,2 \quad (4.7)$$

Şekil 4.3'de, 100 mm sac genişliği ve 1,5 mm sac kalınlığındaki sac levha için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,9973$, $SSE = 10859,66$ ve $RMSE = 60,17$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. 100 mm sac genişliği ve 1,2mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata



Şekil 4.3. 100 mm sac genişliği ve 1,5mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

4.2.4. 50 mm sac genişliği ve 1 mm sac kalınlığı için polinom model

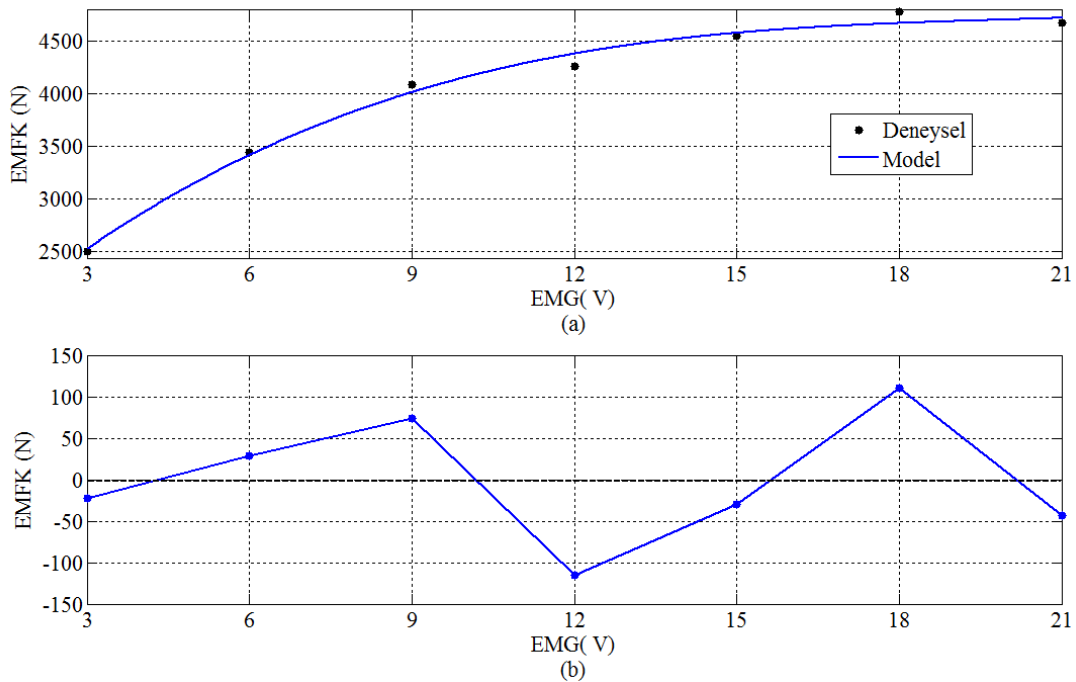
$$EMFK = 0,3886V^3 - 23,34 V^2 + 482,7 V + 1272 \quad (4.8)$$

Şekil 4.4'de, 150 mm sac genişliği ve 1 mm sac kalınlığındaki sac levha için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,9912$, $SSE = 35106,67$ ve $RMSE = 108,2$ olarak hesaplanmıştır.

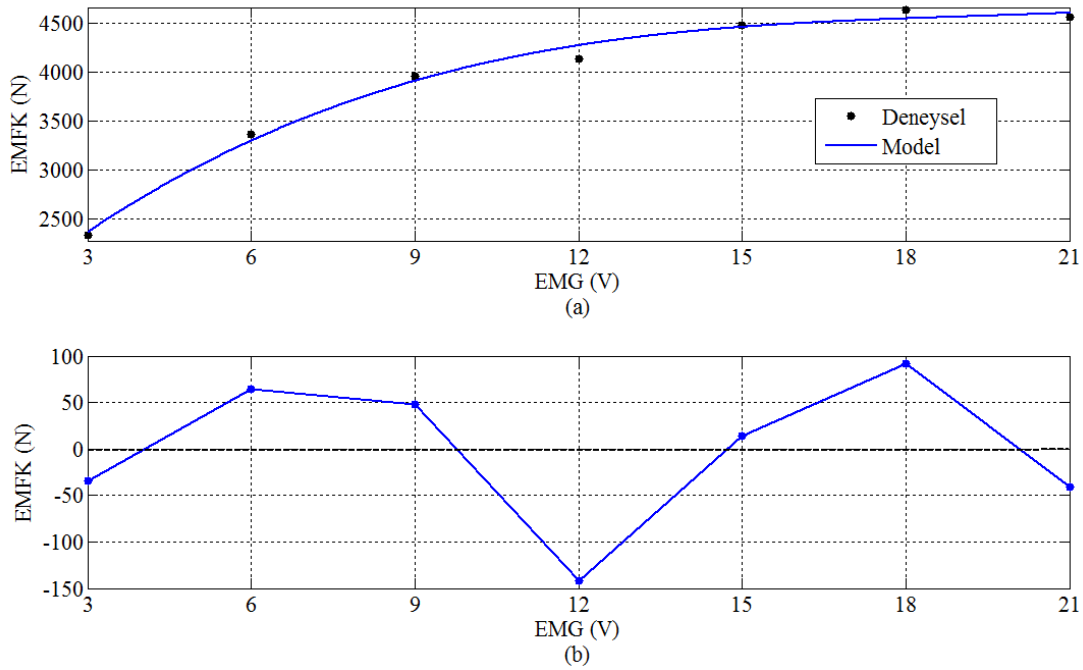
4.2.5. 150 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığı için polinom model

$$EMFK = 0,4524V^3 - 25,99 V^2 + 515,8 V + 1046 \quad (4.9)$$

Şekil 4.5'de, 150 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığındaki sac levha için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,9908$, $SSE = 37773,11$ ve $RMSE = 112,2$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. 150 mm sac genişliği ve 1 mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata



Şekil 4.5. 150 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

4.2.6. 150 mm sac genişliği ve 1,5 mm sac kalınlığı için polinom model

$$EMFK = 0,4107V^3 - 23,16 V^2 + 475,1 V + 978,7 \quad (4.10)$$

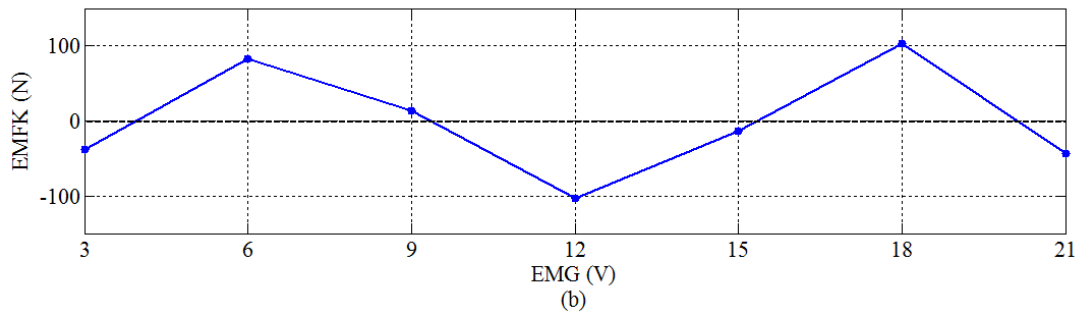
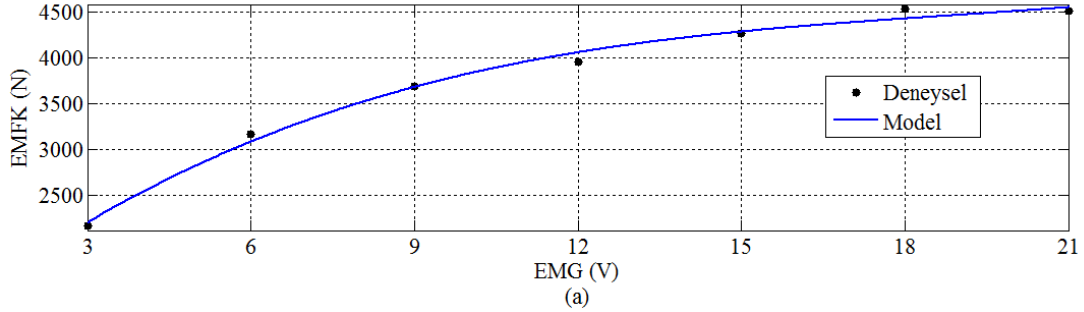
Şekil 4.6'de, 150 mm sac genişliği ve 1,5 mm sac kalınlığındaki sac levha için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,9926$, $SSE = 31933,85$ ve $RMSE = 103,2$ olarak hesaplanmıştır.

4.2.7. 250 mm sac genişliği ve 1 mm sac kalınlığı için polinom model

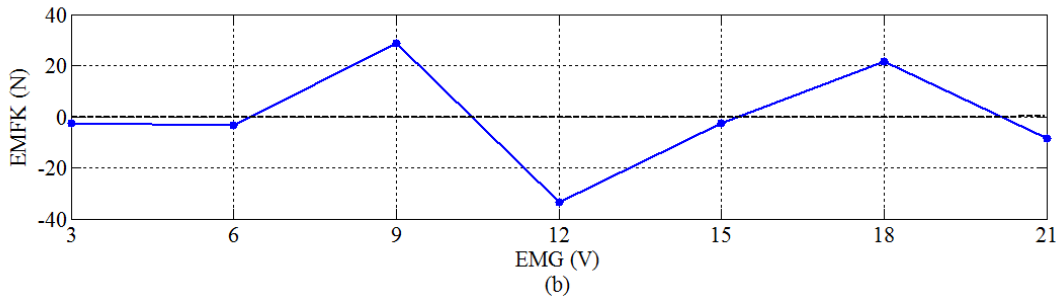
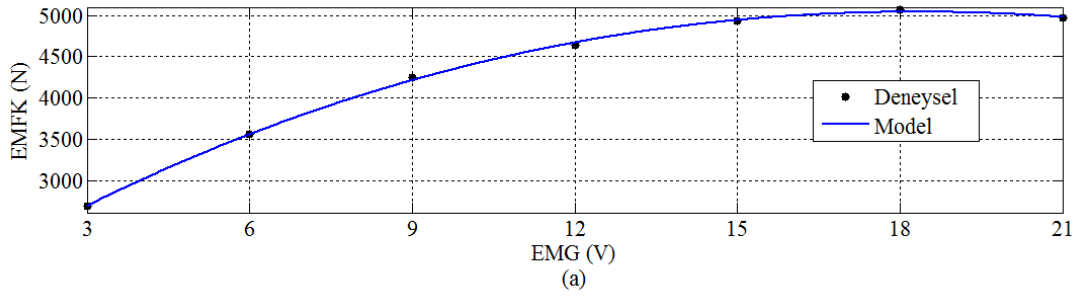
$$EMFK = 0,077V^3 - 13,05 V^2 + 400,3V + 1612 \quad (4.11)$$

Şekil 4.7'de, 250 mm sac genişliği ve 1 mm sac kalınlığındaki sac levha için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri,

model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,9995$, $SSE = 2523,33$ ve $RMSE = 29$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.6. 150 mm sac genişliği ve 1,5mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

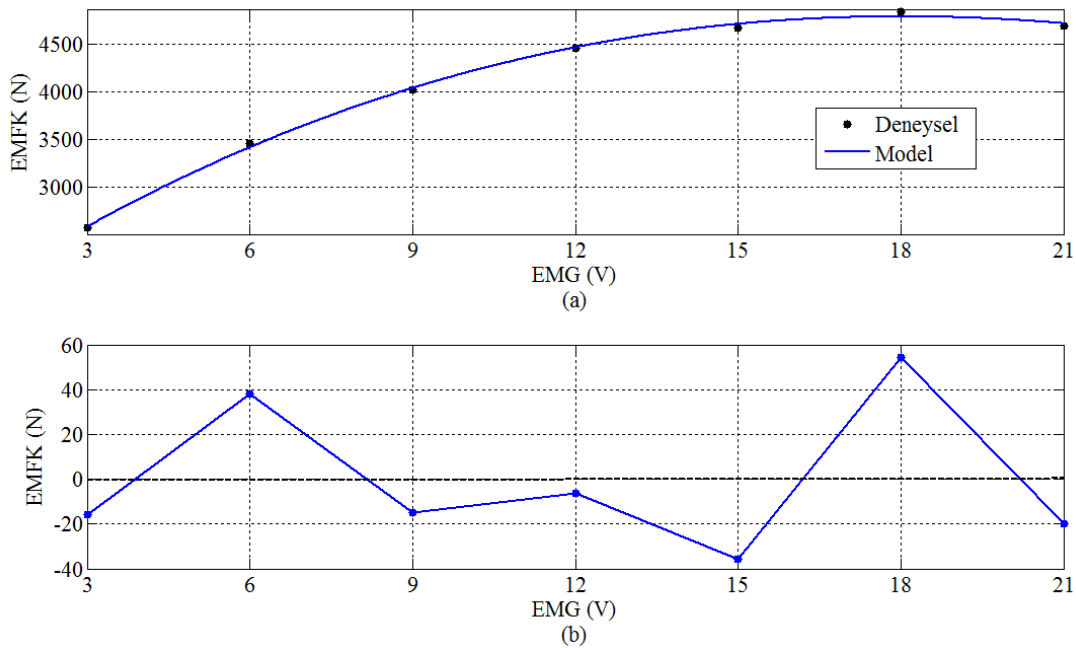


Şekil 4.7. 250 mm sac genişliği ve 1mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

4.2.8. 250 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığı için polinom model

$$EMFK = 0,09V^3 - 13,35 V^2 + 392,93V + 1522 \quad (4.12)$$

Şekil 4.8’de, 250 mm sac genişliği ve 1,2 mm sac kalınlığındaki sac levha için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,9984$, $SSE = 6586,55$ ve $RMSE = 46,86$ olarak hesaplanmıştır.

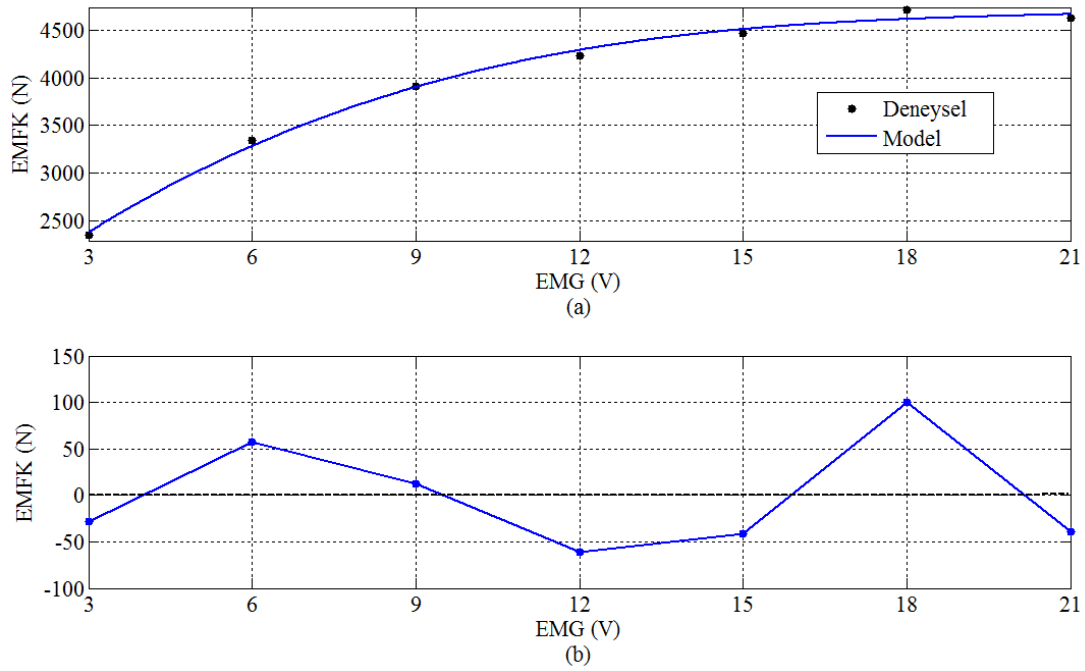


Şekil 4.8. 250 mm sac genişliği ve 1,2mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG’ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

4.2.9. 250 mm sac genişliği ve 1,5 mm sac kalınlığı için polinom model

$$EMFK = 0,359V^3 - 22,37 V^2 + 479,5V + 1135 \quad (4.13)$$

Şekil 4.9’da, 250 mm sac genişliği ve 1,5 mm sac kalınlığındaki sac levha için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvveti değerleri, model sonuçları ve aralarındaki hatalar görülmektedir. Korelasyon Katsayısı $R^2 = 0,995$, $SSE = 21376,1$ ve $RMSE = 84,41$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.9. 250 mm sac genişliği ve 1,5mm sac kalınlığındaki sac levha için EMG'ye bağlı (a) deneysel EMFK değerleri ve kübik polinom model sonuçları, (b) deneysel ve model sonuçları arasındaki hata

Eğri uydurma yöntemi ile her bir sac genişliği ve sac kalınlığı için elektromıknatısa uygulanan gerilime karşılık elde edilen frenleme kuvvetini veren kübik polinom modellerin performansı Tablo 4.2'de özetlenmiştir.

Tablo 4.2. EMFK'yı kestirmek için oluşturulan polinom modellerin performansına ait veriler

Sac Levha		R ²	SSE	RMSE
Genişliği (mm)	Kalınlığı (mm)			
100	1	0,9955	15717,87	72,38
100	1,2	0,9963	12997,15	65,82
100	1,5	0,9973	10859,66	60,17
150	1	0,9912	35106,67	108,2
150	1,2	0,9908	37773,11	112,2
150	1,5	0,9926	31933,85	103,2
250	1	0,9995	2523,33	29
250	1,2	0,9984	6586,55	46,86
250	1,5	0,995	21376,1	84,41

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 [64].

Tablo 4.2'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 EMFK sadece EMG'ye bağlı değişmekte olup her bir sac levha için ayrı model kullanmak gerekmektedir. Bu da, kontrol çevrimi içerisinde kullanımı açısından bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu yüzden sac kalınlığı ve genişliği de birer bağımsız değişken olarak kullanan regresyon modeller geliştirilmiştir [2].

4.3. Regresyon Model

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

Modelde, bağımsız değişken olarak tanımlanan sac genişliği ve kalınlığı ile elektromıknatisa uygulanan gerilim yerine konularak, bağımlı değişken olarak tanımlanan elektromıknatıstan elde edilen frenleme kuvveti hesaplanabilmektedir.

Deneylerden elde edilen 63 veriden 59 tanesi kullanılarak, Bölüm 3.2.2'de tanımlanan Doğrusal (Linear), İkinci Dereceden (Purequadratic), Etkileşimli (Interaction) ve İkinci Dereceden-Etkileşimli (Quadratic) olmak üzere 4 farklı regresyon model oluşturulmuştur. Regresyon modelleri elde etmek için MATLAB Statistics Toolbox 7 kullanılmış ve modellerin doğruluğunu ölçmek ve karşılaştırabilmek için korelasyon katsayısı R^2 ve RMSE değerleri hesaplanmıştır [2].

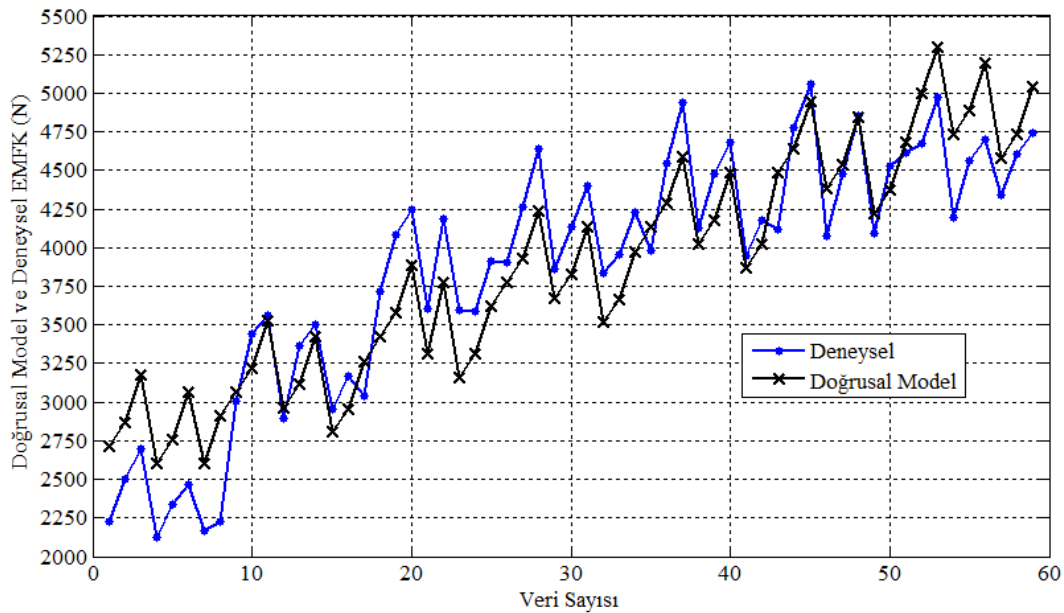
Bunun yanında 63 veriden modellerin hazırlanmasında kullanılmayan 4 veri ise modellerin deney sonuçları ile ne kadar uyumlu olduğunun karşılaştırılması için kullanılmıştır.

4.3.1. Doğrusal regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (K), sac genişliği (G) ve elektromıknatısa uygulanan gerilim (V) ile bağımlı değişken elektromıknatıs frenleme kuvvetine (EMFK) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir doğrusal regresyon model elde edilmiştir.

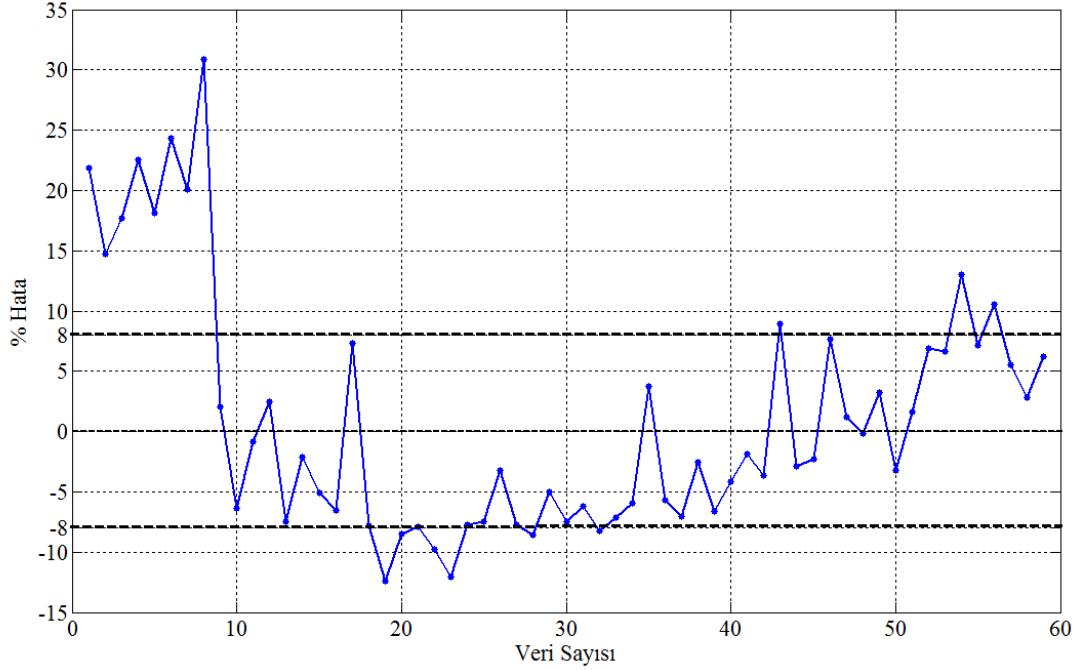
$$EMFK = 2575,457 + 118,325 * V - 524,952 * K + 3,069 * G \quad (4.14)$$

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, RMSE = 324,34 ve korelasyon katsayısı, $R^2 = 0,8447$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.10'da belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen elektromıknatıs frenleme kuvveti ile doğrusal regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Doğrusal regresyon model ve deneysel EMFK değerleri

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



Şekil 4.11. Doğrusal regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası

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

Tablo 4.3. Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Gerilim (V)	Sac Kalınlığı (mm)	Sac Genişliği (mm)	Deneysel Veri	Matematik Model	% Hata
			Frenleme kuvveti (N)	Frenleme kuvveti (N)	
3	1,5	100	2016,14	2449,9	17,8
9	1,2	150	3861,31	3470,79	-11,25
15	1,5	250	4403,97	4330,15	-1,7
21	1	100	4321,45	4842,23	10,75

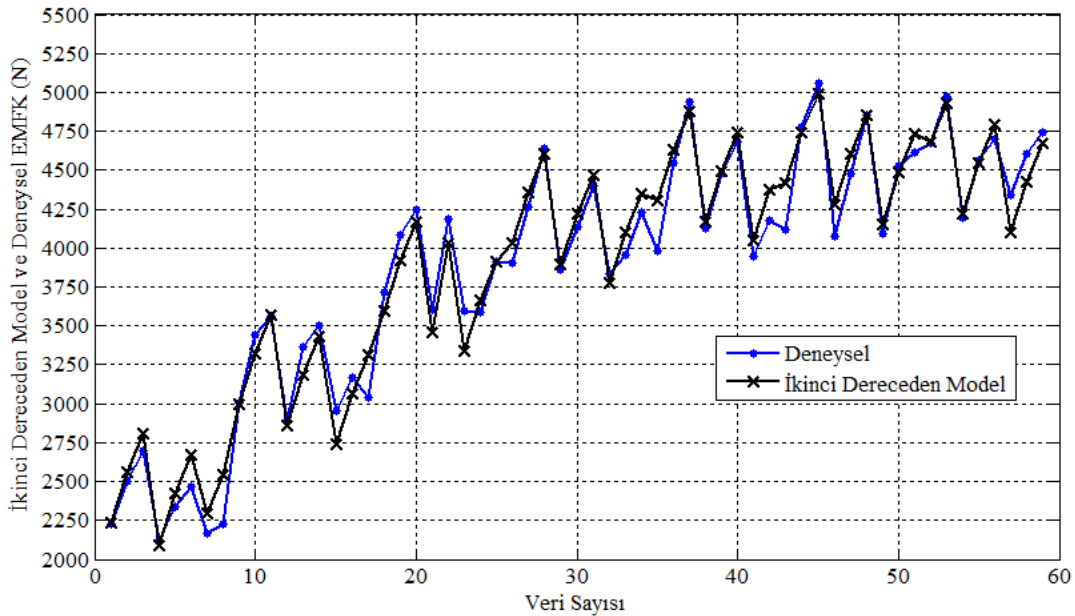
Şekil 4.11 ve Tablo 4.3 incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürde kabul gören %8’lik hata oranının üstünde kaldığı görülmüştür [54].

4.3.2. İkinci dereceden regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (K), sac genişliği (G) ve elektromıknatısa uygulanan gerilim (V) ile bağımlı değişken elektromıknatıs frenleme kuvvetine (EMFK) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir ikinci dereceden regresyon model elde edilmiştir.

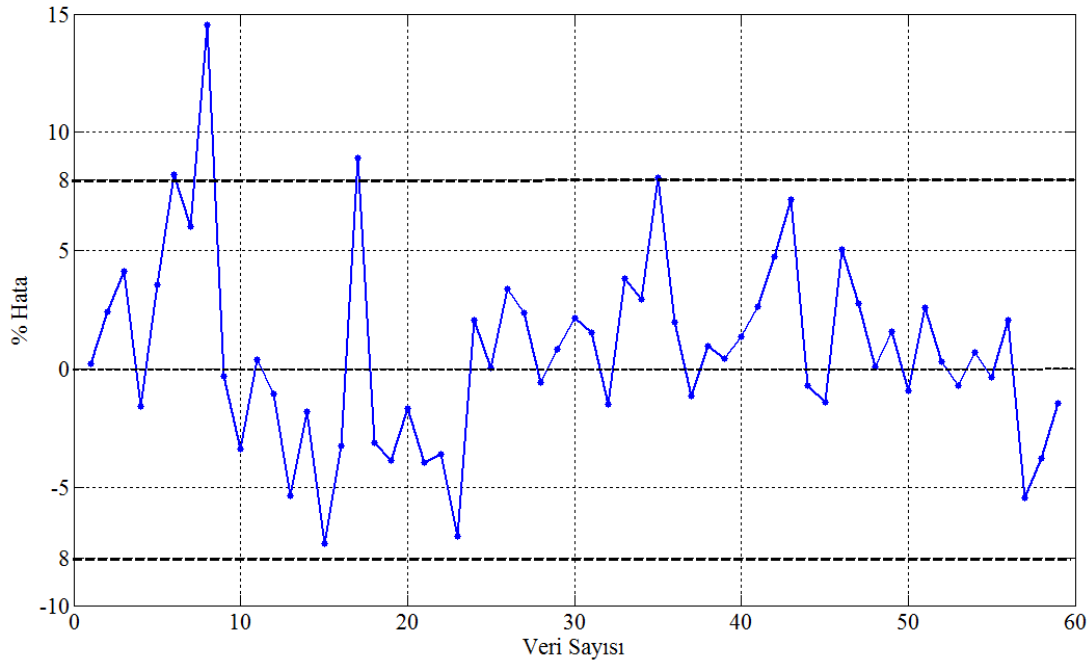
$$\begin{aligned} \text{EMFK} = & 1597.913 + 337.153 * V - 1912.479 * K + 13.285 * G \\ & - 9.121 * (V^2) + 557.755 * (K^2) - 0.027 * (G^2) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, RMSE = 139,67 ve korelasyon katsayısı, $R^2 = 0,9728$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.12’de belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen elektromıknatıs frenleme kuvveti ile ikinci dereceden regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.12. İkinci dereceden regresyon model ve deneysel EMFK değerleri

Şekil 4.13’de, Şekil 4.12’de gösterilen model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark, % cinsinden gösterilmiştir.



Şekil 4.13. İkinci dereceden regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası

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

Tablo 4.4. Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Gerilim (V)	Sac Kalınlığı (mm)	Sac Genişliği (mm)	Deneysel Veri	Matematik Model	% Hata
			Frenleme kuvveti (N)	Frenleme kuvveti (N)	
3	1,5	100	2016,14	1972,01	-2,23
9	1,2	150	3861,31	3786,93	-1,96
15	1,5	250	4403,97	4622,96	4,73
21	1	100	4321,45	4359,54	0,87

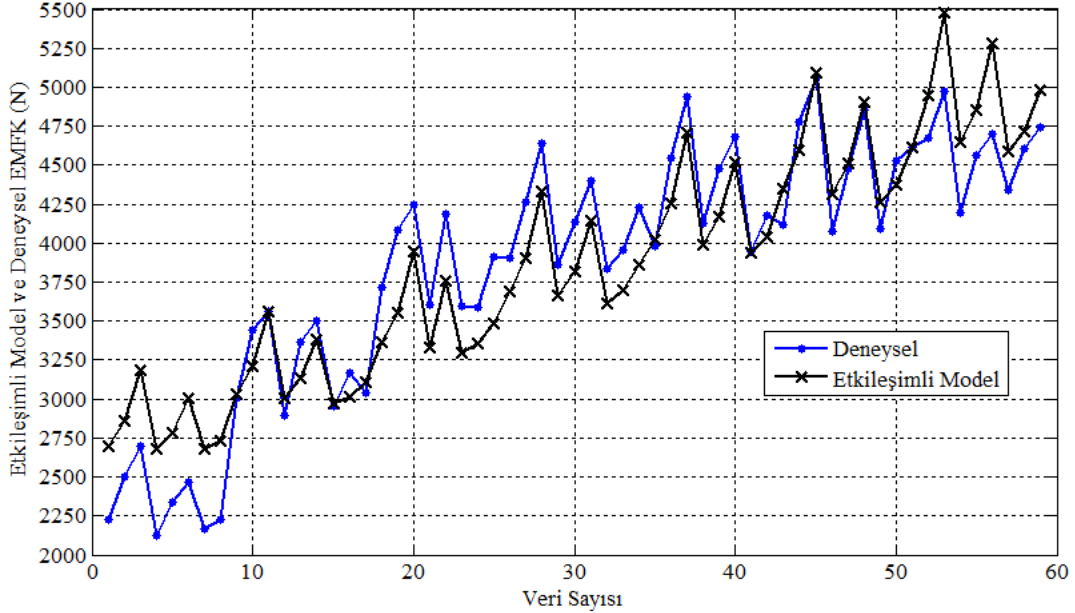
Şekil 4.13 ve Tablo 4.4 incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürde kabul gören %8’lik hata oranının üstünde kaldığı görülmüştür [54].

4.3.3. Etkileşimli regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (K), sac genişliği (G) ve elektromıknatısa uygulanan gerilim (V) ile bağımlı değişken elektromıknatıs frenleme kuvvetine (EMFK) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir etkileşimli regresyon model elde edilmiştir.

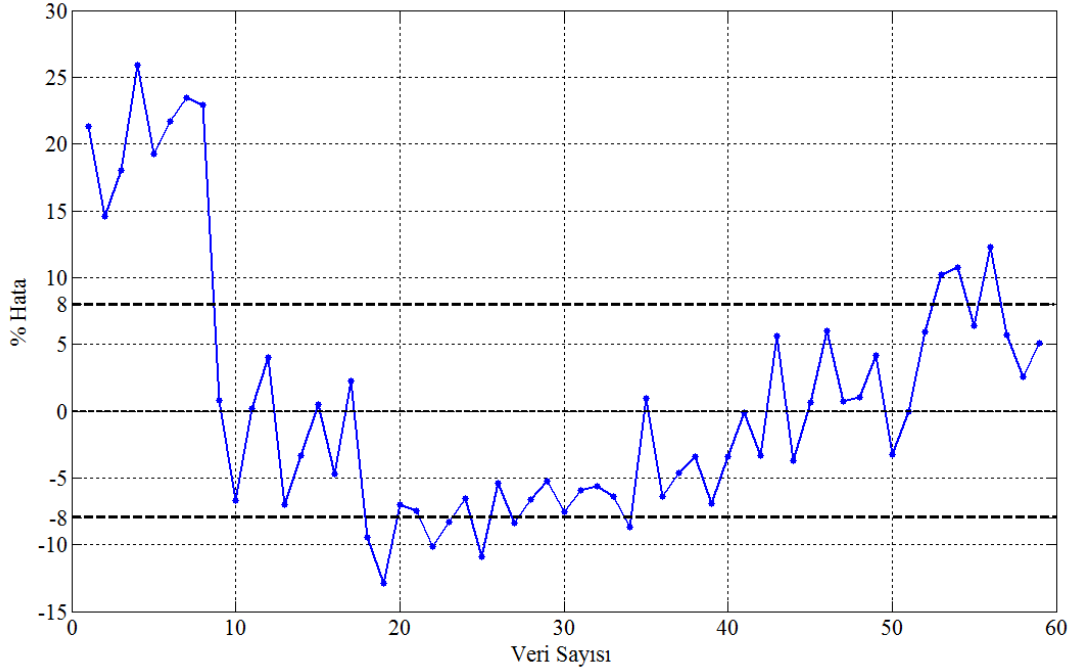
$$\begin{aligned} \text{EMFK} = & 1648.808 + 103.514 * V + 435.152 * K + 8.117 * G \\ & - 4.955 * V * K + 0.116 * V * G - 5.258 * K * G \end{aligned} \quad (4.16)$$

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, RMSE = 323,55 ve korelasyon katsayısı, $R^2 = 0,8539$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.14'de belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen elektromıknatıs frenleme kuvveti ile doğrusal regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Etkileşimli regresyon model ve deneysel EMFK değerleri

Şekil 4.15’de, Şekil 4.14’de gösterilen model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark, % cinsinden gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Etkileşimli regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası

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

Tablo 4.5. Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Gerilim (V)	Sac Kalınlığı (mm)	Sac Genişliği (mm)	Deneysel Veri	Matematik Model	% Hata
			Frenleme kuvveti (N)	Frenleme kuvveti (N)	
3	1,5	100	2016,14	2647,58	23,85
9	1,2	150	3861,31	3476,81	-11,06
15	1,5	250	4403,97	4235,25	-3,98
21	1	100	4321,45	4683,2	7,72

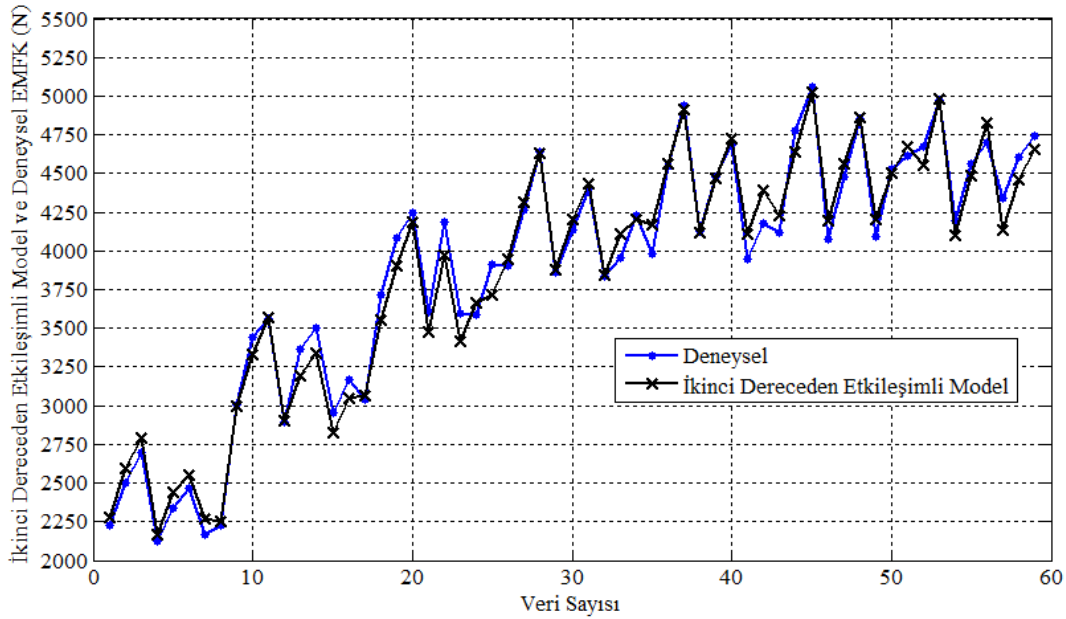
Şekil 4.15 ve Tablo 4.5 incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürde kabul gören %8’lik hata oranının üstünde kaldığı görülmüştür [54].

4.3.4. İkinci dereceden etkileşimli regresyon model

Bağımsız değişken sac kalınlığı (K), sac genişliği (G) ve elektromıknatısa uygulanan gerilim (V) ile bağımlı değişken elektromıknatıs frenleme kuvvetine (EMFK) ait deneysel veriler kullanılarak katsayılar hesaplanmış ve aşağıdaki gibi bir ikinci dereceden etkileşimli regresyon model elde edilmiştir.

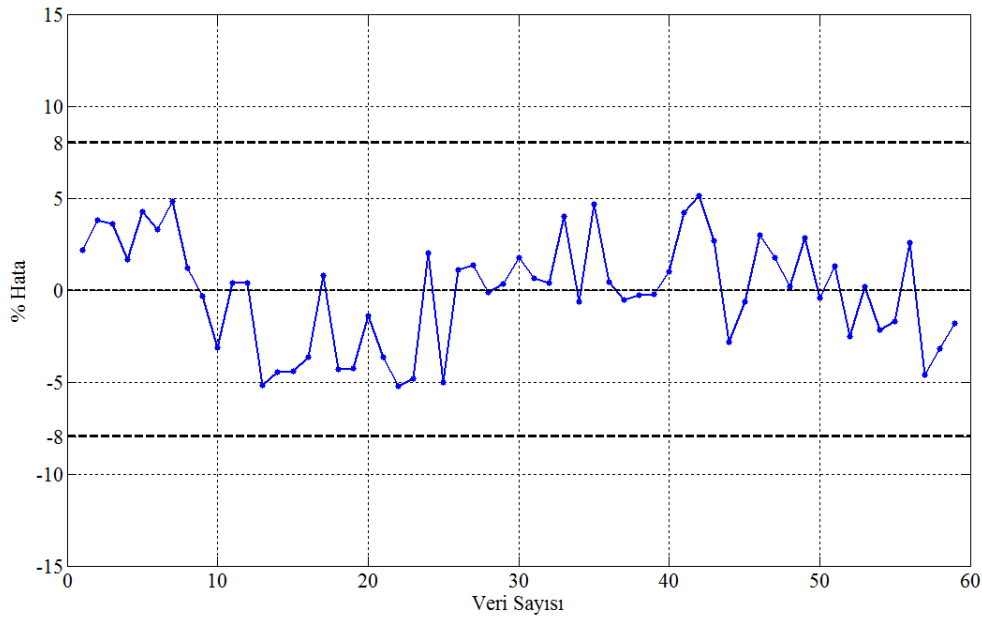
$$\begin{aligned} \text{EMFK} = & 1081.42 + 286.462 * V - 1182.624 * K + 17.672 * G + 24.576 * V * K \\ & + 0.125 * V * G - 4.446 * K * G - 9.198 * V^2 + 454.985 * K^2 - 0.029 * G^2 \end{aligned} \quad (4.17)$$

Elde edilen modelin performansı hakkında bilgi veren hataların karelerinin ortalamasının karekökü, RMSE = 117,05 ve korelasyon katsayısı, $R^2 = 0,982$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.16'da belirlenen giriş parametreleri için deneylerden elde edilen elektromıknatıs frenleme kuvveti ile ikinci dereceden etkileşimli regresyon modelin sonuçları birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.16. İkinci dereceden Etkileşimli regresyon model ve deneysel EMFK değerleri

Şekil 4.17'de, Şekil 4.16'da gösterilen model sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki fark, % cinsinden gösterilmiştir.



Şekil 4.17. İkinci dereceden etkileşimli regresyon model sonuçlarının % cinsinden hatası

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

Tablo 4.6. Deneysel veriler ile model sonuçlarının karşılaştırılması

Gerilim (V)	Sac Kalınlığı (mm)	Sac Genişliği (mm)	Deneysel Veri	Matematik Model	% Hata
			Frenleme kuvveti (N)	Frenleme kuvveti (N)	
3	1,5	100	2016,14	2068,61	-2,6
9	1,2	150	3861,31	3788,1	1,89
15	1,5	250	4403,97	4533,25	-2,93
21	1	100	4321,45	4126,72	4,5

Şekil 4.17 ve Tablo 4.6 incelendiğinde elde edilen sonuçların literatürde kabul gören %8’lik hata oranının altında kaldığı görülmüş ve modelin elektromıknatıs frenleme kuvvetini kontrol etmek için tasarlanan kontrol çevriminde kullanılması uygun görülmüştür [54].

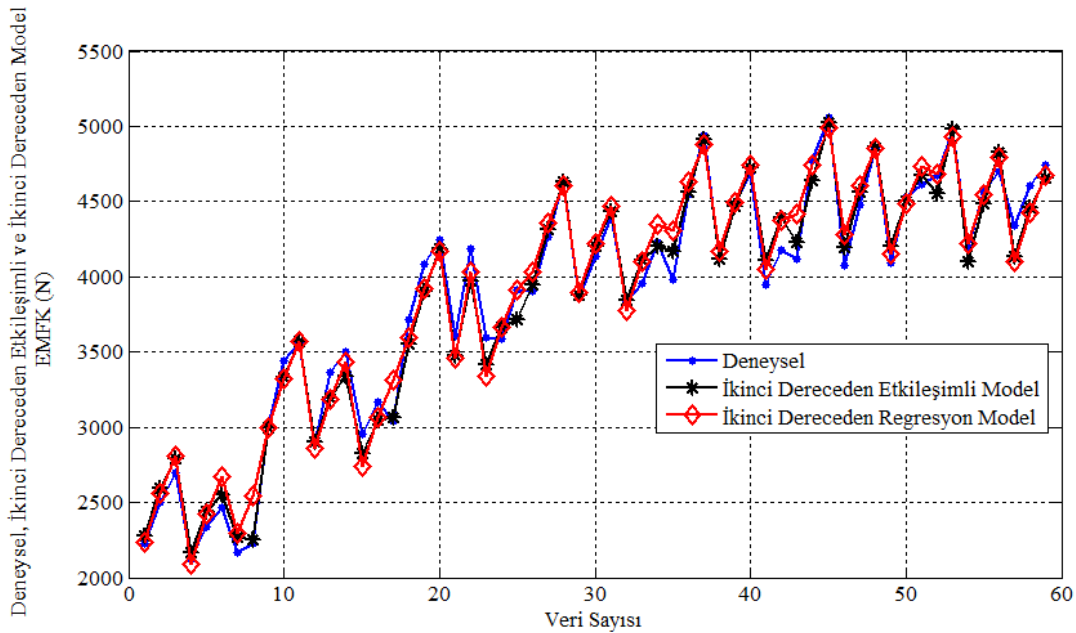
Sac kalınlığı ve genişliği ile elektromıknatısa uygulanan gerilimin farklı seviyelerde etkilediği modellerin doğruluğunu ölçmek ve karşılaştırabilmek için hesaplanan korelasyon katsayısı ve RMSE değerleri Tablo 4.7’de görülmektedir.

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

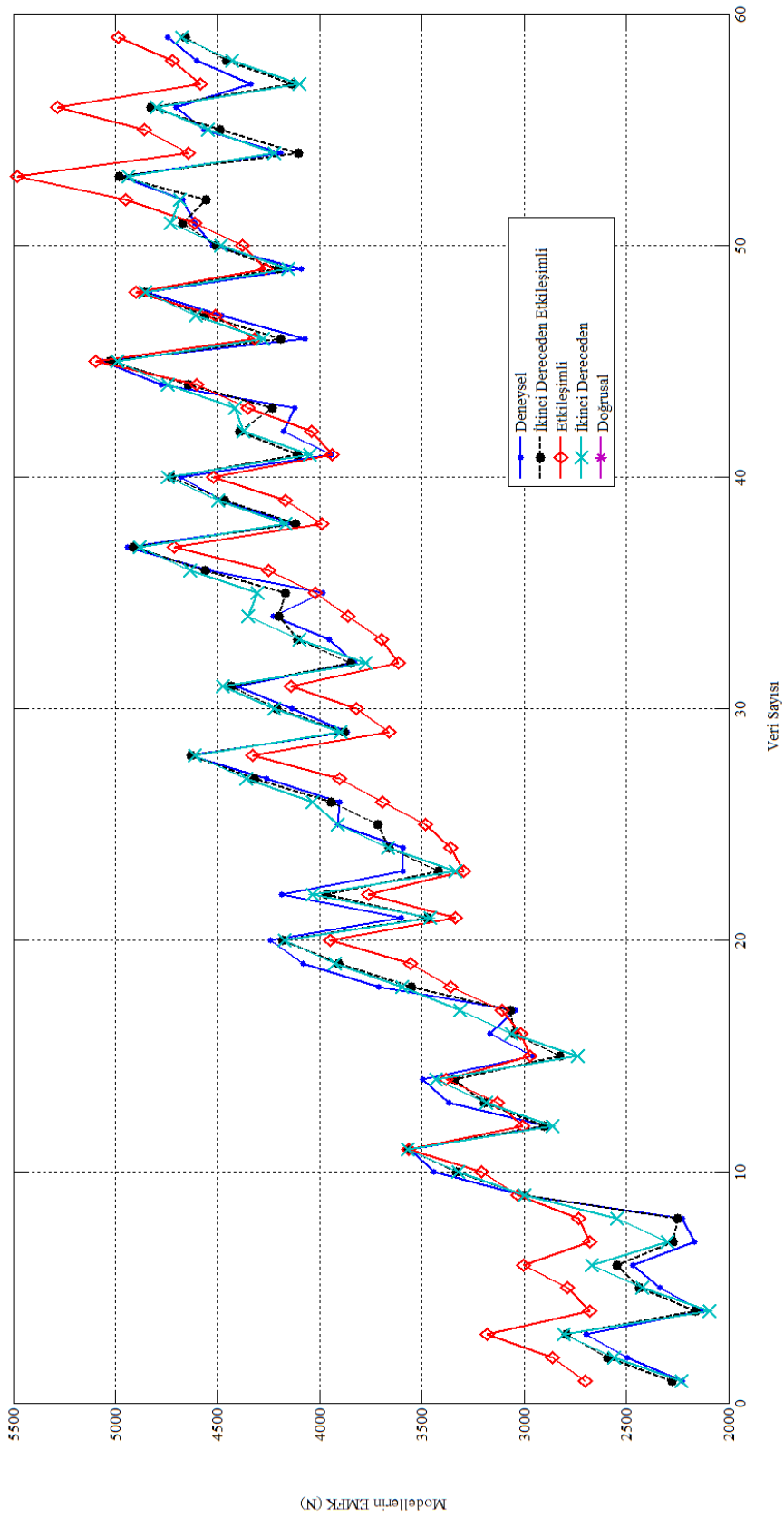
Regresyon Model	R^2	RMSE
Doğrusal	0,8447	324,34
İkinci Dereceden	0,9728	139,67
Etkileşimli	0,8539	323,55
İkinci Dereceden - Etkileşimli	0,982	117,05

Oluşturulan regresyon modellerin korelasyon katsayıları, RMSE değerleri, Şekil 4.18-4.19'da gösterilen modellerin deneysel veriler ile uyumu ve model sonuçlarının modellerde kullanılmayan verilere olan yakınlığı dikkate alındığında uygun modelin ikinci dereceden-etkileşimli regresyon ile sağlandığı görülmüştür. Bu yüzden elektromıknatis frenleme kuvvetini kontrol etmek için tasarlanan kontrol çevriminde, prosesin modeli ikinci dereceden-etkileşimli regresyon model ile tanımlanmıştır.

İkinci dereceden-etkileşimli regresyon model sonuçları incelendiğinde korelasyon katsayısı 0,982 ile diğer modellere göre en iyi sonucu vermiştir. Bunun yanında deney sonuçlarına ve modellerin hazırlanışı sırasında kullanılmayan 4 veriye, maksimum %5'lik bir hata ile yaklaşarak literatürdeki kabul görmüş hata payı [54] içinde kalmıştır.



Şekil 4.18. Deneysel veriler ile ikinci dereceden modellerin karşılaştırılması



Şekil 4.19. Deneysel veriler ile hazırlanan modellerin karşılaştırılması

BÖLÜM 5. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL

5.1. Giriş

Model öngörülü kontrol (MÖK) 1970'lerde ortaya atılmış ve günümüze değin büyük ölçüde geliştirilmiştir. MÖK terimi tek bir kontrolör tasarım yöntemini değil, çok geniş bir kontrol tasarım yöntemleri bütünü tanımlar. Bu yöntemlerin ortak özelliği sistem modelinin doğrudan kullanılması ve kontrol işaretinin belirli bir ölçüte göre minimumlaştırarak elde edilmesidir. Bu tasarım yöntemleri ile elde edilen kontrolörler lineer yapıdadır [69].

Modele Dayalı Öngörülü Kontrol yöntemlerinin temel ilkeleri

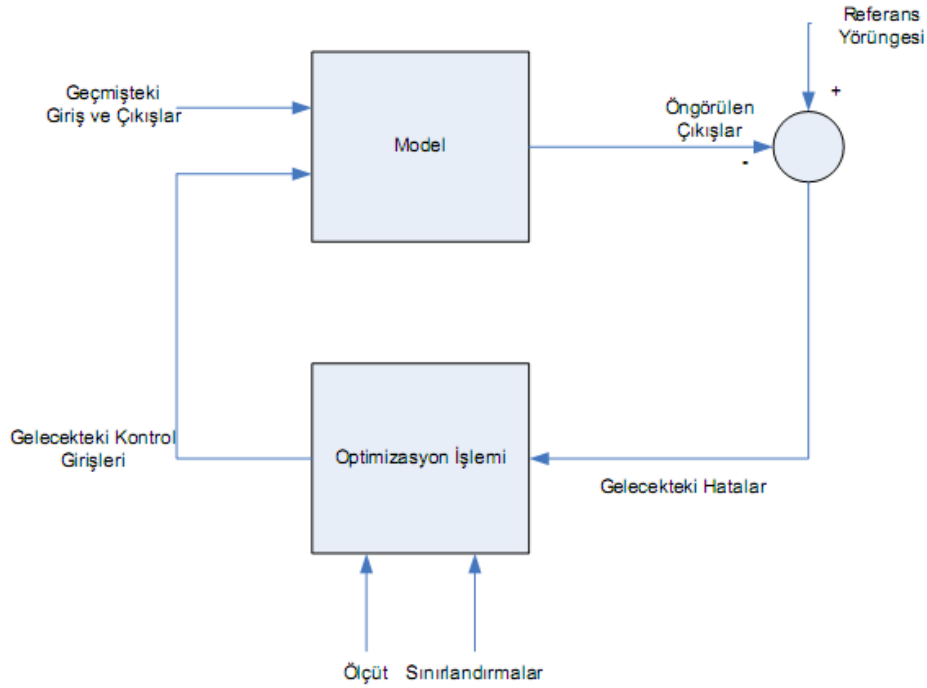
- Gelecekteki bir zaman dilimindeki sistem yanıtını öngörebilmek için sistem modelinin kullanılması
- Bir ölçütü minimumlaştırarak bir kontrol girişi dizisinin hesaplanması
- Kaydırma işlemi, yani her örnekleme anında ufkun geleceğe doğru bir adım kaydırılması, her adımda elde edilen kontrol işareti dizisinin ilk elemanının uygulanması olarak verilebilir.

Modele Dayalı Öngörülü Kontrol algoritmalarının temel adımları şu şekilde sıralanabilir:

- Sistem modelinden yararlanarak, öngörü ufku denilen, belirlenmiş bir ufuk boyunca gelecekteki sistem yanıtı hesaplanır. Bu yanıtlar o ana kadar bilinen değerler (geçmişteki girişler ve sistem yanıtları), o andaki sistem yanıtı ve gelecekteki kontrol çıkışları kullanılarak hesaplanır.

- Geleceğe ilişkin kontrol işareti dizisi bir başarım ölçütünü, genellikle öngörülen sistem çıkışı ile referans yörüngesi arasındaki hatayı minimumlaştırarak hesaplanır.
- Sadece o andaki kontrol çıkışı sisteme uygulanır. Bir sonraki örnekleme zamanında ölçülür ve birinci adım tekrarlanır. Böylece kaydırma yöntemi ile sistemin yanıtı hesaplanmış olur. Minimumlaştırılan ölçüt genellikle öngörülen çıkış ile referans yörüngesi arasındaki hatanın karesel fonksiyonudur.

MÖK'ün temel yapısı Şekil 5.1'de verilmiştir. Model önceki sistem giriş ve çıkışları ve öngörülen kontrol girişlerine bağlı olarak sistemin gelecekteki yanıtını öngörmekte kullanılır. Bu kontrol girişleri optimizasyon işlemi ile elde edilir [69].



Şekil 5.1. MÖK temel yapısı [69]

MÖK algoritmasının temel prensibi Şekil 5.2'de de görüldüğü gibi geçmişteki bilgilere dayanarak geleceği kestirmek üzerinedir. Şekil 5.2'de u_{\min} kontrol çıkışının alabileceği minimum değerini, u_{\max} kontrol çıkışının alabileceği maksimum değerini, y_{\min} proses cevabının alabileceği minimum değerini, y_{\max} proses cevabının alabileceği maksimum değerini temsil etmektedir [2].

MÖK'ün diğer kontrol yöntemlerine göre üstünlüklerinden bazılarını şu şekilde sıralayabiliriz [71].

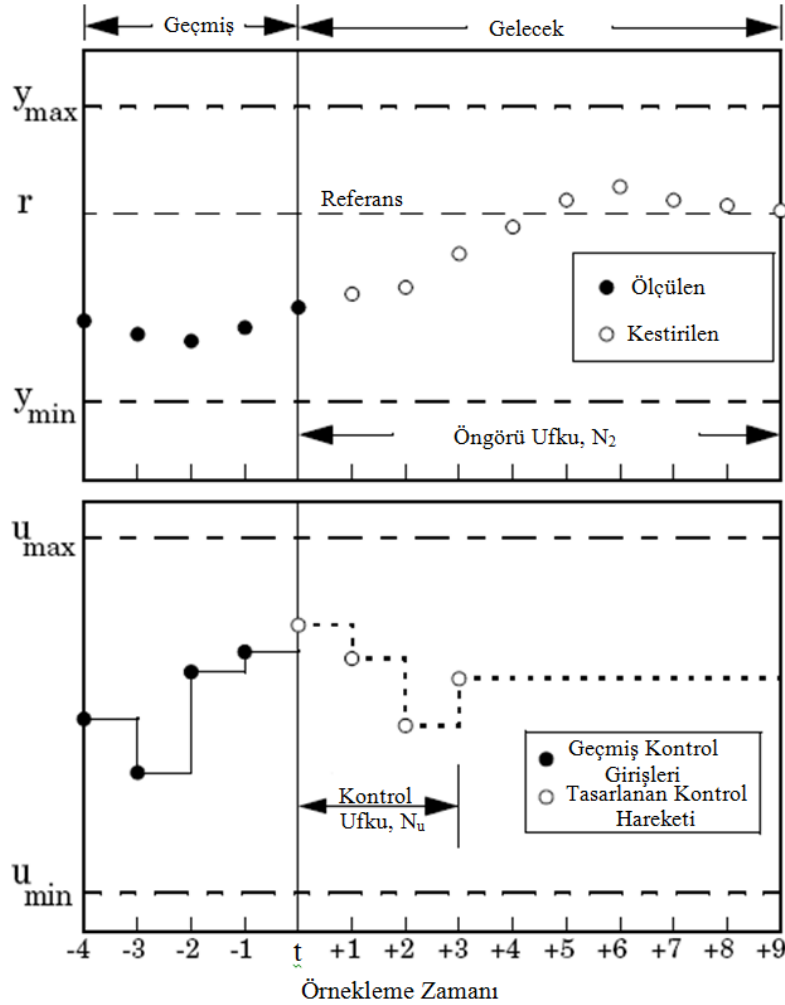
- Kavramlar sezgisel olduğu ve aynı zamanda parametre ayarları diğer yöntemlere göre kolay olduğu için kontrol bilgisi sınırlı olan çalışanlara çekici gelmektedir.
- Çok basit dinamiğe sahip olan proseslerden kararsız, minimum fazlı olmayan, çok uzun ölü zamanı bulunan prosesler gibi daha karmaşık dinamiklere sahip olan çok çeşitli proseslerin kontrolünde kullanılabilir.
- Çok değişkenli sistemlerin kontrolünde kullanılabilir.
- Ölü zaman etkisini giderme özelliğine sahiptir.
- Uygulaması kolay doğrusal bir kontrol kuralı elde edilir.
- Geleceğe ilişkin giriş işareti bilindiğinde oldukça yararlı ve kullanışlıdır.
- Belirli temel ilkeler üzerine kurulmuş geliştirilmeye tamamen açık bir yöntemdir.

Bu üstünlüklerin yanı sıra MÖK'ün eksik yönleri de vardır.

- Sistem dinamiğinin değişmediği durumlarda kontrolörün elde edilme işlemi önceden yapılabilir ancak uyarlamalı kontrol yapılıyorsa tüm hesap işlemleri her örnekleme zamanında tekrarlanır.
- En önemli sorun ise sisteme ilişkin uygun modelin elde edilmesidir. Algoritma sistem modelinden yararlanılarak geleceğe ilişkin sistem yanıtının elde edilmesine dayandığından dolayı gerçek sistemle yanıt arasındaki farklılık arttıkça istenilen sistem yanıtını elde etmekte sorunlar yaşanır.

5.2. Kayan Ufuk Kavramı

MÖK'ün temeli kayan ufuk kavramına dayanmaktadır. Bu kavrama göre kontrol işlemi, aşağıdaki adımlar halinde yapılır.



Şekil 5.2. Model öngörülü kontrolün temel prensibi [2]

- Sistemin süreç modeli kullanılarak, belirlenmiş öngörü ufku boyunca (N_2) gelecekte oluşacak çıkış değeri öngörülürü hesaplanır. Yapılan hesaplama geçmişteki giriş ve çıkış değerlerine, gelecekte uygulanması planlanan giriş değerlerine bağlıdır.
- Gelecekte uygulanacak olan kontrol sinyali, çıkış değerlerini referans değerine yaklaştıracak ve belirlenen maliyet fonksiyonunu minimize edecek şekilde hesaplanır.

- Kontrol sinyali, kontrol ufkunun (N_u) sonuna kadar hesaplanır. Kontrol ufkü ile öngörü ufkü arasında kalan sürede kontrol sinyalinin sabit olduğu kabul edilir.
- Hesaplanan kontrolcü sinyallerinden sadece birincisi sisteme gönderilir. Diğer kontrol sinyali değerleri kullanılmaz. Bunun nedeni de sistemde oluşabilecek belirsizlikler, doğrusalsızlıklar ve bozucular nedeniyle çıkış değerlerinin öngörülen değerlerden farklı olabilme durumudur [70].

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

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

5.3. 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.

5.3.1. Darbe cevabı modeli

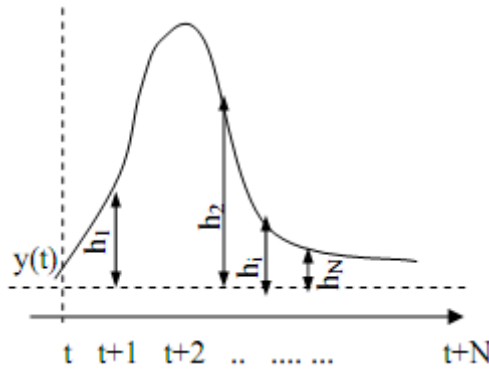
Yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Bu modelin uygulanması kolaydır, çünkü prosese darbe girişi uygulandığında proses çıkışını ölçmek için model parametrelerini bulmak yeterlidir. Bu model çok değişkenli prosesler için de kullanılabilirdiğinden endüstride oldukça sık kullanılmaktadır.

Modelde giriş çıkış ilişkisi,

$$y(t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t-i) = H(q^{-1})u(t) \quad (5.1)$$

şeklinde ifade edilir. h_i prosese darbe girişi uygulandığında elde edilen örneklenmiş çıkış değeridir (Şekil 5.3). Burada $H(q^{-1}) = h_1q^{-1} + h_2q^{-2} + \dots + h_Nq^{-N}$ ile tanımlanır. Bu model kullanılarak elde edilen öngörü ifadesi denklem (5.2)'de verilmiştir [71].

$$\hat{y}(t+j|t) = \sum_{i=1}^N h_i u(t+j-i|t) = H(q^{-1})u(t+j|t) \quad (5.2)$$



Şekil 5.3. Darbe cevabı modeli [2]

5.3.2. Basamak cevabı modeli

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

$$y(t) = y_0 + \sum_{i=1}^N h_i \Delta u(t-i) = y_0 + H(q^{-1})(1-q^{-1})u(t) \quad (5.3)$$

denklemlerle ifade edilir. h_i prosese basamak girişi uygulandığında elde edilen örneklenmiş çıkış değeri ve $\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$ olarak verilmiştir. y_0 ise çıkış değerinin başlangıç değeridir. Bu modelin kullanıldığı öngörü çıkışı,

$$\hat{y}(t+j|t) = y_0 + \sum_{i=1}^N h_i \Delta u(t+j-i|t) = y_0 + H(q^{-1})(1-q^{-1})u(t+j|t) \quad (5.4)$$

şeklinde verilebilir [71].

Basamak cevabı modeli, darbe cevabı modeli gibi çok değişkenli proseslerde kullanılabilmesi ve model parametrelerini bulmak için prosese basamak girişi uygulanıp çıkışın ölçülmesinin yeterli olması gibi avantajlara sahiptir.

5.3.3. Transfer fonksiyonu modeli

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

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) \quad (5.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (5.6)$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{nb}q^{-nb} \quad (5.7)$$

olarak gösterilir. Bu model kullanılarak elde edilen öngörü ifadesi,

$$\hat{y}(t+j|t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t+j|t) \quad (5.8)$$

şeklindedir [71].

5.3.4. Durum uzayı modeli

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

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t-1) \quad (5.9)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (5.10)$$

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 processe ait matrislerdir. Bu model için öngörü ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\hat{\mathbf{y}}(t+j|t) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t+j|t) = \mathbf{C} \left[\mathbf{A}^j \mathbf{x}(t) + \sum_{i=1}^j \mathbf{A}^{j-i} \mathbf{B}\mathbf{u}(t+j-i|t) \right] \quad (5.11)$$

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

5.4. Amaç Fonksiyonu

Genel amaç, gelecek zaman dilimlerindeki çıkışın (\mathbf{y}) belirlenen bir referans sinyalini (\mathbf{y}_r) mümkün olduğunca yakın olarak takip etmesini sağlamaktır. Amaç fonksiyonunun genel ifadesi,

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} w_j [\hat{\mathbf{y}}(t+j|t) - \mathbf{y}_r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta \mathbf{u}(t+j-1)]^2 \quad (5.12)$$

şeklinde verilebilir. Burada,

N_1 : En küçük öngörü ufkunu,

N_2 : En büyük öngörü ufkunu,

N_u : Kontrol ufkunu,

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 $u(t)$, 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.

$$\begin{aligned} u_{\min} &\leq u(t) \leq u_{\max} & \forall t \\ du_{\min} &\leq u(t) - u(t-1) \leq du_{\max} & \forall t \\ y_{\min} &\leq y(t) \leq y_{\max} & \forall t \end{aligned} \quad (5.13)$$

5.5. Kontrol Kuralı

Kontrol değişkeni $u(t+j|t)$ 'yi elde etmek için (5.12) 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.

$$q(x) = \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \quad (5.14)$$

Kısıtlamalar; $Ax \leq b$ (eşitsizlik kısıtlaması)

$Ex = d$ (eşitlik kısıtlaması)

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

5.6. MÖK'ün Genel Algoritması

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

$$\min_{u[t|t], \dots, u[t+N_2-1|t]} \sum_{j=1}^{N_2} w_j (\hat{y}[t+j|t] - y_r)^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) \Delta u[t+j-1|t]^2 \quad (5.15)$$

Giriş ve çıkışa ait kısıtlamalar,

$$u_{\max} \geq u[t+j-1|t] \geq u_{\min}, \quad j = 1, \dots, N_u \quad (5.16)$$

$$\Delta u_{\max} \geq \Delta u[t+j-1|t] \geq -\Delta u_{\max}, \quad j = 1, \dots, N_u \quad (5.17)$$

$$y_{\max} \geq y[t+j|t] \geq y_{\min}, \quad j = 1, \dots, N_2 \quad (5.18)$$

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

Buna göre,

$$u[t+j|t] = u[t+N_u-1|t], \quad j = N_u, \dots, N_2-1 \quad (5.19)$$

yazılabilir. y_r referans değeri ve Δ fark işlemi,

$$\Delta u[t+j-1|t] \cong u[t+j-1|t] - u[t+j-2|t] \quad (5.20)$$

olarak gösterilir.

Prosesle ait öngörü modeli,

$$y[t] = \sum_{i=1}^n h_i u[t-i] + d[t] \quad (5.21)$$

olarak alınır,

$$\hat{y}[t+j|t] = \sum_{i=1}^n h_i u[t+j-i|t] + d[t+j|t] \quad (5.22)$$

$$u[t+j-i|t] = u[t+j-i], \quad j-i < 0 \quad (5.23)$$

olur. Burada h_j model katsayıları ve d bozuculardır. Gelecekteki bozucu $d[t+j|t]$ öngörmek zordur ancak basitleştirmek için,

$$d[t+j|t] = d[t|t] = y[t] - \sum_{i=1}^n h_i u[t-i] \quad (5.24)$$

yazılabilir. Burada, $y[t]$ örnekleme noktası t 'deki proses çıkışının ölçülen değeri ve $u[t-i]$ proses girişi u 'nun geçmiş değeridir. (5.22) ve (5.24) nolu denklemler (5.15)'de yerine koyulur ve düzenlenirse,

$$\min_{u[t|t], \dots, u[t+N_2-1|t]} \sum_{j=1}^{N_2} w_j \left(\sum_{i=1}^n h_i u[t+j-i|t] - \sum_{i=1}^n h_i u[t-i] + y[t] - y_r \right)^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) \Delta u[t+j-1|t]^2 \quad (5.25)$$

şeklinde elde edilir. Giriş ve çıkışa ait kısıtlamalar,

$$u_{\max} \geq u[t+j-1|t] \geq u_{\min}, \quad j = 1, \dots, N_u \quad (5.26)$$

$$\Delta u_{\max} \geq \Delta u[t + j - 1|t] \geq -\Delta u_{\max}, j = 1, \dots, N_u \quad (5.27)$$

$$y_{\max} \geq \sum_{i=1}^n h_i u[t + j - i|t] - \sum_{i=1}^n h_i u[t - i] + y[t] \geq y_{\min}, i = 1, \dots, N_2 \quad (5.28)$$

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, (5.25) nolu denklemde verilen amaç fonksiyonunun türevi 0'a eşitlenerek bulunabilir. Başka bir ifadeyle amaç fonksiyonunun türevi 0'a eşitlendiğinde fonksiyonu minimum yapacak Δu değerleri ve dolayısıyla o anki kontrol büyüklüğü $u(t)$ elde edilir.

Proses için eşitlik veya eşitsizlik kısıtlamaları bulunması durumunda, verilen kısıtlamalar ile çelişmeden denklem (5.25)'i minimize eden kontrol büyüklüğü $u(t)$ değeri iteratif olarak karesel programlama yöntemine göre elde edilir [2] .

5.7. MÖK'ün Temel Parametreleri

Bu bölümde MÖK tasarımına dâhil olan en önemli parametreler ve bu parametrelerin seçiminde dikkat edilmesi gereken konular açıklanacaktır. Bu parametrelerin seçimi sistem çıkışlarını direkt etkilemekte ve kararlılık, dayanıklılık ve kontrolcü performansını önemli ölçüde değiştirmektedir.

5.7.1. Öngörü ufku

Öngörü ufku N_2 ile tanımlanır. Kayan ufukla hesaplama yapılırken her ufkun ne kadar uzun olacağını belirler. Öngörü ufkunun örnekleme süresi ile çarpımı, en azından kapalı çevrim sistemin kararlı duruma geçmesi için gereken süre kadar olmalıdır. Tipik öngörü ufku değerleri 20 ile 30 arasındadır. Ancak modelin yapısına göre daha uzun olabilir. Çok büyük seçilmesi durumunda MPC'nin işlem yükü artacaktır. (Uzun seçilmesi durumunda sistem daha yumuşak ve yavaş bir şekilde referans değerine ulaşacaktır. Kısa seçilmesi durumunda kontrolcü daha agresif olarak çalışacak, bazı durumlarda da kararsızlığa yol açabilecektir)

5.7.2. Kontrol ufku

Öngörü modeli hesaplama yaparken kaç örnekleme süresi boyunca hesaplanacak kontrolcü sinyalinin değişebileceğini belirler ve N_u ile tanımlanır. Kontrol ufku, sistemin düşük hesaplama gücü kullanarak kararlı ve iyi bir kontrol performansı sunması açısından mümkün olduğunca düşük değerde tutulmalıdır. Ufuk değerinin artması optimizasyon yapılacak matris boyutunu da büyüteceğinden genel olarak bu değer 1 ila 4 arasında seçilmektedir [74]. Kayan ufuk kavramı bölümünde açıklandığı üzere, N_2-N_u boyunca giriş sinyali sabit kabul edilir. Kontrol ufkunun boyutu büyütüldüğünde daha agresif bir kontrol uygulanır, hesaplama yükü artar, sistem daha hızlı cevap verir, bozuculara karşı daha duyarlı hale gelir ve dayanıklılığı düşer. Bağıl olarak küçük seçilmesi tavsiye edilir. Tasarıma başlarken, öngörü ufkunun üçte biri veya dörtte biri oranında seçilebilir.

5.7.3. Referans yörüngesi

MÖK'ün diğer bir avantajı da, referans değerlerinin önceden bilinmesi durumunda kontrolcü buna göre hesaplamalar yaparak daha verimli bir şekilde çalışır. Özellikle robotik, servo sistemler ve yığılı çalışmada (batch) referansın değişimi çoğu zaman önceden bilinir. Referans değeri sabit olduğu durumlarda bile, referansın değişme zamanının bilinmesi kontrolcü cevabının iyileşmesini sağlar.

5.7.4. Ağırlık matrisleri

MÖK tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri de ağırlık matrislerinin seçimidir. Hangi durumun değişiminin daha küçük olması isteniyorsa, onun ağırlık değeri büyük alınır, hangisinin değişimi daha önemsiz ise onun ağırlık değeri daha küçük alınır. Ağırlık matrislerinin değerleri değiştirilerek sistemin cevapları incelenir ve elde edilen performansa göre ağırlık değerleri ayarlanır [70].

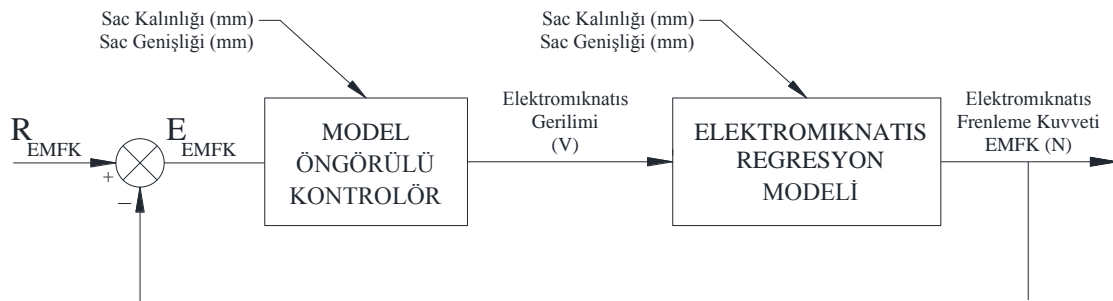
BÖLÜM 6. BASKI PLAKASI FRENLEME KUVVETİNİN ELEKTROMİKNATIS KULLANILARAK MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROLÜ

6.1. Giriş

Sac şekillendirme işlemi esnasında karşılaşılan buruşma, yırtılma, aşırı incelme, yüzey bozunması ve geri esneme gibi kusurlar, sac malzemenin kalıp boşluğuna kontrolsüz ve istenmeyen oranda akışından dolayı meydana gelmektedir. Bu kusurları ortadan kaldırmak için, sac üzerinde baskı plakası kuvveti nedeniyle oluşan frenleme kuvvetinin hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu kontrolün modüler bir yapı ile hassas bir şekilde yapılabilmesi için elektromıknatıs kullanılmıştır. Baskı plakası frenleme kuvveti, sac genişliği ve kalınlığına bağlı olarak elektromıknatısa uygulanacak gerilim ile kontrol edilmiştir.

Çalışmada model öngörülü kontrolör, çok değişkenli sistemlerin kontrolünde kullanılabilmesi, ölü zaman etkisini giderme özelliğine sahip olması ve uygulaması kolay doğrusal bir kontrol kuralı elde edilebilmesinden dolayı tercih edilmiştir.

Şekil 6.1'de elektromıknatısın kapalı çevrim kontrolünün blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Elektromıknatısın kapalı çevrim kontrolüne ait blok diyagramı

6.2. Elektromıknatısın Öngörü Modeli

Elektromıknatısın kontrolünde kullanılacak öngörü modelinde, deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu verilerden sac kalınlığı ve genişliği ile elektromıknatısa uygulanan gerilim modelin girişi, elde edilen frenleme kuvveti ise modelin çıkış olarak tanımlanmıştır.

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) ve Box-Jenkins (BJ) olmak üzere 4 farklı model elde edilmiş ve karşılaştırılarak kontrolöre uygun olan modele karar verilmiştir.

Doğrusal parametrik modellerin genel eşitliği 6.1'de gösterilmiştir.

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t) \quad (6.1)$$

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

$$B(q) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{nb}q^{-nb}$$

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

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} + \dots + d_{nd}q^{-nd}$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + a_{nf}q^{-nf}$$

Burada $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$, $F(q)$, modelin polinomlarıdır. Bu ifadelerden $B(q)$ ve $F(q)$ polinomları, sistemin giriş değişkenlerinin sayısı kadar hesaplanmaktadır. Aşağıda ifade edilen parametrik modeller 6.1 eşitliği ile tanımlanan genel eşitliğin özel durumlarıdır. Model yapıları arasındaki temel fark bozucu etkilerin modelleme şekline kaynaklanmaktadır. na , nb , ..., nk gibi model parametreleri, Matlab System Identification Toolbox kullanılarak model sonuçlarının deney sonuçlarına en yakın değere ulaşacağı şekilde denemeler yapılarak bulunmuştur.

6.2.1. ARX modeli

ARX model, $C(q)$, $D(q)$, $F(q)$ gibi bozucu büyüklükleri 1 kabul ederek sadece sistemi tanımlayan $A(q)$ ile $B(q)$ polinomlarını dikkate alır. Bu basit ve temel yapısı sayesinde ARX model, sistemlerin tanımlanmasında sıklıkla kullanılmaktadır. ARX modelin ayrık zamandaki genel yapısı,

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (6.2)$$

şeklinde gösterilir. Burada, q zamansal kaydırma operatörünü, $y(t)$ çıkış işaretini, $u(t)$ giriş işaretini, $e(t)$ model hatalarını, t ise örnekleme anını simgelemektedir. $A(q)$ ve $B(q)$, q cinsinden polinomlardır.

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (6.3)$$

$$B(q) = b_1q^{-nk} + b_2q^{-(nk+1)} + \dots + b_{nb}q^{-(nk+nb-1)} \quad (6.4)$$

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 [2].

Elektromıknatısın öngörü modeli için deneysel veriler ile en uyumlu ayrık zamanlı ARX model parametreleri, model sonuçlarının deney sonuçları ile en uyumlu olduğu $na=9$, $nb=8$, $nk=1$ katsayıları kullanılarak aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

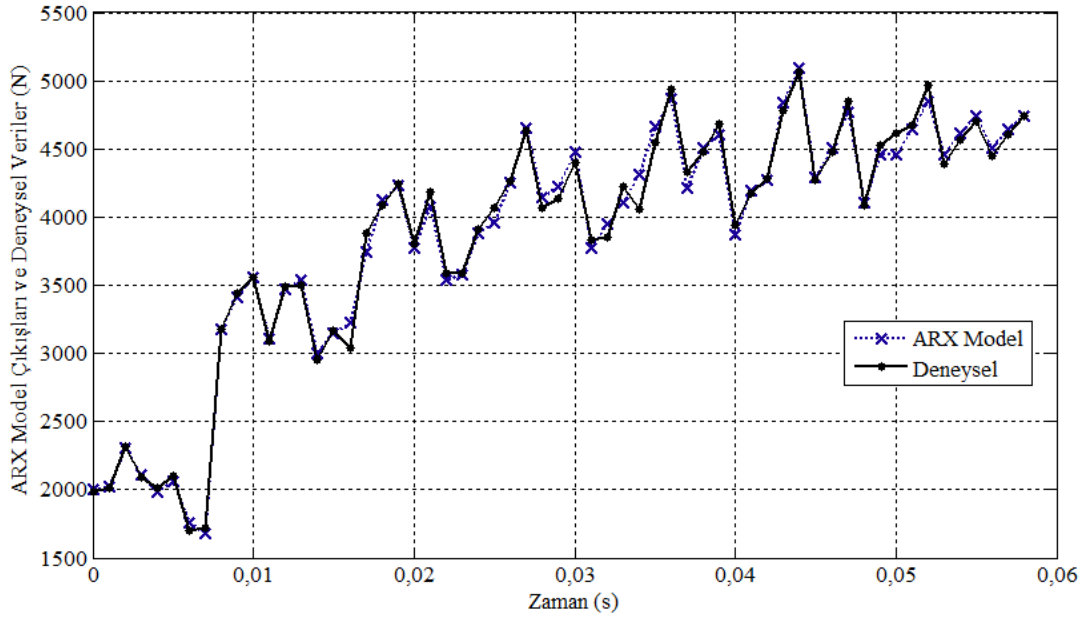
$$A(q) = 1 - 0,1743q^{-1} + 0,09864q^{-2} - 0,3848q^{-3} + 0,1989q^{-4} + 0,2346q^{-5} - 0,1232q^{-6} + 0,06113q^{-7} - 0,1107q^{-8} - 0,1919q^{-9} \quad (6.5)$$

$$B_1(q) = -294,1q^{-1} - 65,58q^{-2} + 746,8q^{-3} - 439,5q^{-4} - 285,2q^{-5} + 600,9q^{-6} + 186,2q^{-7} - 432,9q^{-8} \quad (6.6)$$

$$B_2(q) = -965,2q^{-1} - 256,5q^{-2} + 4556q^{-3} - 1453q^{-4} - 1609q^{-5} + 3138q^{-6} + 946,9q^{-7} - 1647q^{-8} \quad (6.7)$$

$$B_3(q) = -5,141q^{-1} - 2,78q^{-2} + 0,6773q^{-3} - 2,359q^{-4} - 0,6598q^{-5} + 2,394q^{-6} + 0,3451q^{-7} - 2,031q^{-8} \quad (6.8)$$

ARX model çıkışları ile deneysel veriler Şekil 6.2'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. ARX model ile deney verileri arasında %91,66'lık uyum sağlanmıştır.



Şekil 6.2. ARX model çıkışları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

6.2.2. ARMAX modeli

ARX model ile benzer yapıda olan ARMAX model, bozucu büyüklüklerden sistemdeki gürültünün de modellenmesinin istendiği durumlarda iyi sonuç vermektedir. ARMAX modelin ayrık zamanda genel yapısı,

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t) \quad (6.9)$$

şeklinde gösterilir. Burada, $C(q)$ q cinsinden bir polinom olup diğer tüm parametreler ARX model için verilen (6.2) denklemindekiler ile aynıdır [2].

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \quad (6.10)$$

Elektromıknatısın öngörü modeli için deneysel veriler ile en uyumlu ayrık zamanlı ARMAX model parametreleri, model sonuçlarının deney sonuçları ile en uyumlu olduğu $n_a=9$, $n_b=7$, $n_c=1$, $n_k=1$ katsayıları kullanılarak aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$A(q) = 1 - 0,6361q^{-1} - 0,02428q^{-2} - 0,256q^{-3} + 0,35q^{-4} + 0,09406q^{-5} - 0,167q^{-6} + 0,12q^{-7} - 0,1573q^{-8} - 0,05163q^{-9} \quad (6.11)$$

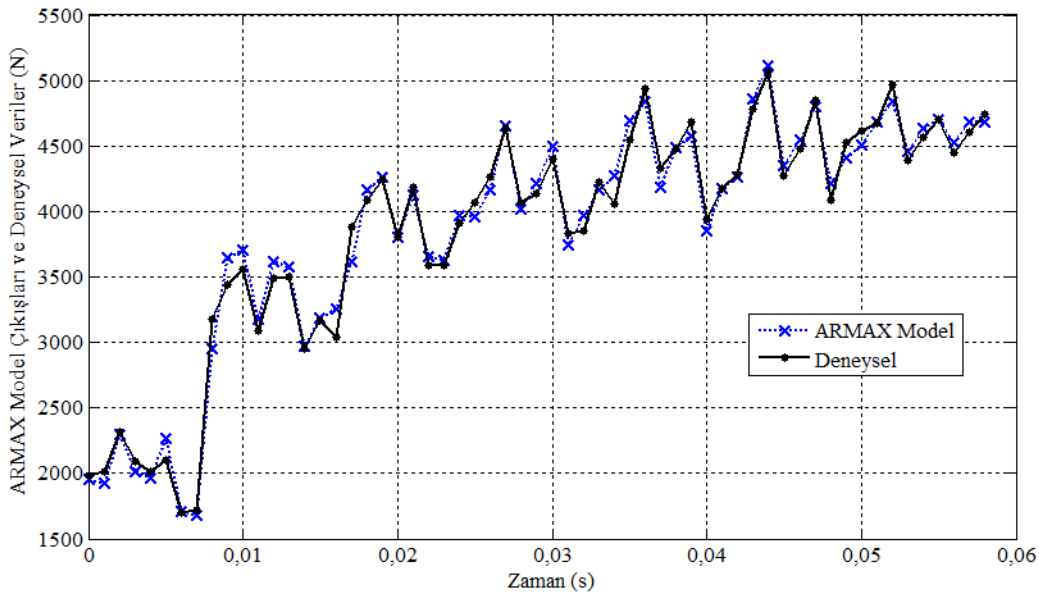
$$B_1(q) = 188,8q^{-1} + 54,14q^{-2} + 635,3q^{-3} - 874,8q^{-4} + 255,2q^{-5} + 552,7q^{-6} - 421,5q^{-7} \quad (6.12)$$

$$B_2(q) = -510,5q^{-1} + 343,6q^{-2} + 3969q^{-3} - 4023q^{-4} - 753q^{-5} + 3156q^{-6} - 1778q^{-7} \quad (6.13)$$

$$B_3(q) = -4,751q^{-1} - 1,087q^{-2} + 1,038q^{-3} - 3,514q^{-4} + 1,333q^{-5} + 1,313q^{-6} - 2,295q^{-7} \quad (6.14)$$

$$C(q) = 1 - q^{-1} \quad (6.15)$$

ARMAX model çıkışları ile deneysel veriler Şekil 6.3'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. ARMAX model ile deney verileri arasında %88,53'lük uyum sağlanmıştır.



Şekil 6.3. ARMAX model çıkışları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

6.2.3. Çıkış-hatası modeli

Çıkış hatası modeli, sistemdeki bozucu büyüklüklerin yok sayılarak sadece modeldeki hataların incelenmesi istendiği durumlarda kullanılır. Çıkış-Hatası modelinin ayrık zamandaki genel yapısı,

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t) + e(t) \quad (6.16)$$

şeklinde gösterilir. Burada, q zamansal kaydırma operatörünü, $y(t)$ çıkış işaretini, $u(t)$ giriş işaretini, $e(t)$ model hatalarını, t ise örnekleme anını simgelemektedir. $B(q)$ ve $F(q)$, q cinsinden polinomlardır ve aşağıdaki gibi ifade edilir [2].

$$B(q) = b_1 q^{-nk} + b_2 q^{-(nk+1)} + \dots + b_{nb} q^{-(nk+nb-1)} \quad (6.17)$$

$$F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2} + \dots + f_{nf} q^{-nf} \quad (6.18)$$

Elektromıknatısın öngörü modeli için deneysel veriler ile en uyumlu ayrık zamanda Çıkış-Hatası model parametreleri, model sonuçlarının deney sonuçları ile en uyumlu olduğu $nb=9$, $nf=2$, $nk=1$ katsayıları kullanılarak aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$B_1(q) = -307,7q^{-1} - 271,4q^{-2} + 735,4q^{-3} - 222,9q^{-4} - 126,7q^{-5} \\ + 141,2q^{-6} + 337,8q^{-7} - 57,52q^{-8} - 330,4q^{-9} \quad (6.19)$$

$$B_2(q) = -760,9q^{-1} - 622,6q^{-2} + 4642q^{-3} + 1557q^{-4} - 1077q^{-5} \\ + 2303q^{-6} + 2442q^{-7} + 881,5q^{-8} - 559,8q^{-9} \quad (6.20)$$

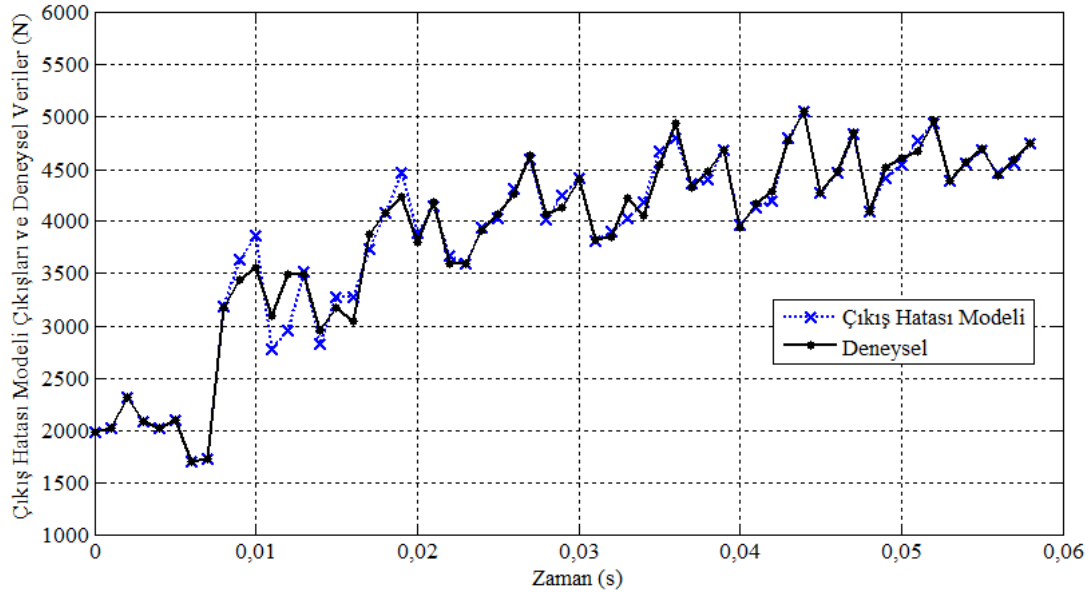
$$B_3(q) = -6,203q^{-1} - 2,228q^{-2} - 1,623q^{-3} - 5,338q^{-4} + 1,729q^{-5} \\ - 1,886q^{-6} + 2,507q^{-7} - 1,454q^{-8} - 0,2058q^{-9} \quad (6.21)$$

$$F_1(q) = 1 - 0,2646q^{-1} - 0,06299q^{-2} \quad (6.22)$$

$$F_2(q) = 1 + 0,07111q^{-1} - 0,7902q^{-2} \quad (6.23)$$

$$F_3(q) = 1 - 1,034q^{-1} - 0,08734q^{-2} \quad (6.24)$$

Çıkış-Hatası model çıkışları ile deneysel veriler Şekil 6.4'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çıkış-Hatası model ile deney verileri arasında %86,55'lik uyum sağlanmıştır.



Şekil 6.4. Çıkış hatası modeli çıkışları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

6.2.4. Box-Jenkins modeli

Box-Jenkins modelin ayrık zamanda genel yapısı,

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (6.25)$$

şeklinde gösterilir. Diğer modellerde olduğu gibi burada da $B(q)$, $F(q)$, $C(q)$ ve $D(q)$ q cinsinden polinomlar olup $B(q)$ ve $F(q)$ sırasıyla (6.17) ve (6.18) nolu denklemde, $C(q)$ (6.10) nolu denklemde verilmişti. $D(q)$ ise,

$$D(q) = 1 + d_1 q^{-1} + d_2 q^{-2} + \dots + d_{nd} q^{-nd} \quad (6.26)$$

olarak ifade edilir. Burada nd parametresi na , nb , nf ve nc parametreleri gibi modelin derecesini gösterir [2].

Elektromıknatısın öngörü modeli için deneysel veriler ile en uyumlu ayrık zamanda Box-Jenkins modeline ait parametreler, model sonuçlarının deney sonuçları ile en uyumlu olduğu $nb=2$, $nc=2$, $nd=2$, $nf=7$, $nk=0$ katsayıları kullanılarak aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$B_1(q) = -113,8 - 2,024q^{-1} \quad (6.27)$$

$$B_2(q) = -549 + 967q^{-1} \quad (6.28)$$

$$B_3(q) = 0,1042 - 3,232q^{-1} \quad (6.29)$$

$$C(q) = 1 - 1,101q^{-1} + 0,1241q^{-2} \quad (6.30)$$

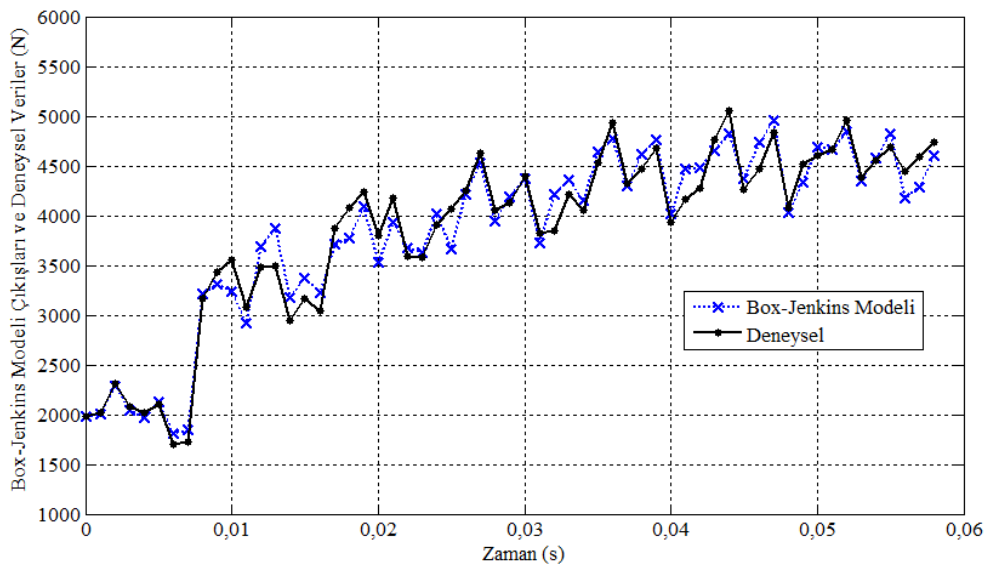
$$D(q) = 1 - 1,686q^{-1} + 0,9351q^{-2} \quad (6.31)$$

$$F_1(q) = 1 - 0,1474q^{-1} - 0,2103q^{-2} + 0,5577q^{-3} - 0,07894q^{-4} - 0,3075q^{-5} + 0,3365q^{-6} - 0,2427q^{-7} \quad (6.32)$$

$$F_2(q) = 1 - 1,151q^{-1} - 0,09459q^{-2} + 0,3277q^{-3} - 0,03195q^{-4} - 0,1234q^{-5} + 0,3365q^{-6} - 0,2427q^{-7} \quad (6.33)$$

$$F_3(q) = 1 - 0,7418q^{-1} + 0,3048q^{-2} - 0,6354q^{-3} - 0,05843q^{-4} - 0,3369q^{-5} + 0,2968q^{-6} + 0,206q^{-7} \quad (6.34)$$

Box-Jenkins model çıkışları ve deneysel veriler Şekil 6.5’de karşılaştırmalı olarak verilmiş ve model ile deney verileri arasında %80,56’lık uyum sağlanmıştır.



Şekil 6.5. Box-Jenkins model çıkışları ile deneysel verilerin karşılaştırılması

Deneysel sonuçlarda elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan ARX, ARMAX; Çıkış Hatası ve Box-Jenkins modellerinin, deneysel veriler ile uyumu Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Öngörü modellerinin deneysel veriler ile uyumu

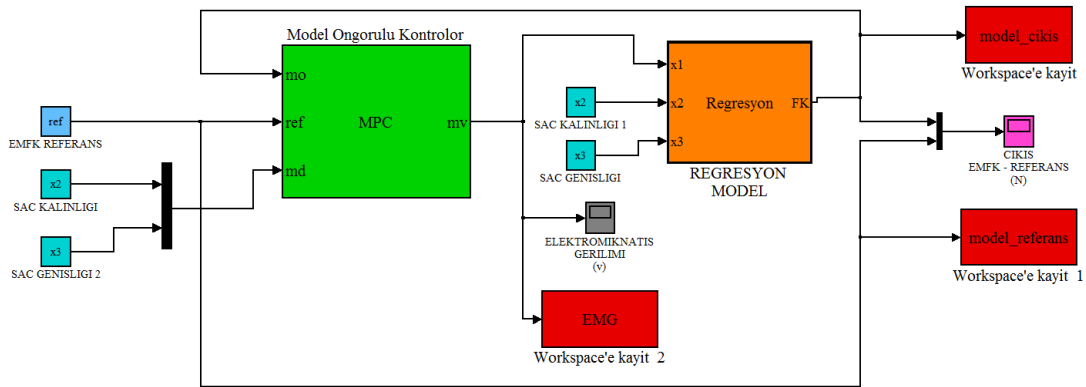
Öngörü Modeli	Deneysel Veriler ile Uyum (%)
ARX	91,66
ARMAX	88,53
ÇIKIŞ –HATASI	86,55
BOX-JENKINS	80,56

Tablo 6.1 incelendiğinde, basit ve temel yapıda olan ARX model, deneysel veriler ile %91,66 ile en iyi uyum sonucunu verdiği için dolayı, kontrolör tasarımında kullanılacak öngörü modeli olarak seçilmiştir. Diğer model sonuçları incelendiğinde modellere katılan bozucu büyüklük etkisinin, model sonuçlarını deneysel verilerden bir miktar uzaklaştırdığı görülmüştür. Bunda yapılan deneylerde, sonuçları etkileyebilecek herhangi bir bozucu büyüklüğün olmaması etkili olabilir.

Modellerin testi sırasında kullanılan n_a , n_b , ... n_k gibi model parametreleri, Matlab System Identification Toolbox ortamında teker teker deneyerek sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır

6.3. 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 6.7’de verilmiştir.

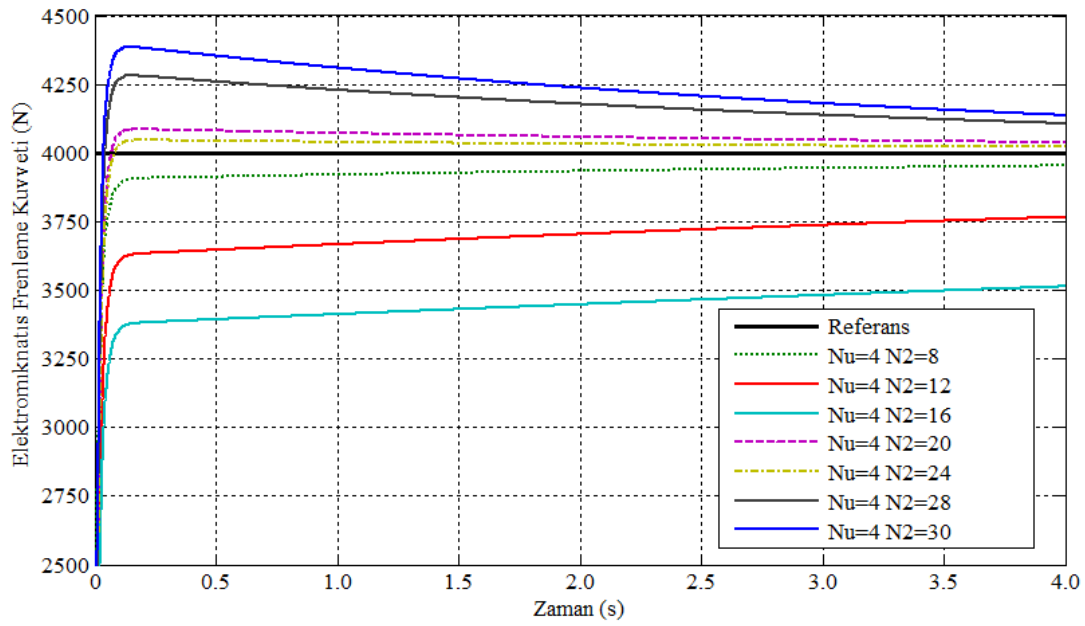


Şekil 6.6. Elektromıknatis için hazırlanan model öngörülü kontrollü benzetim modeli

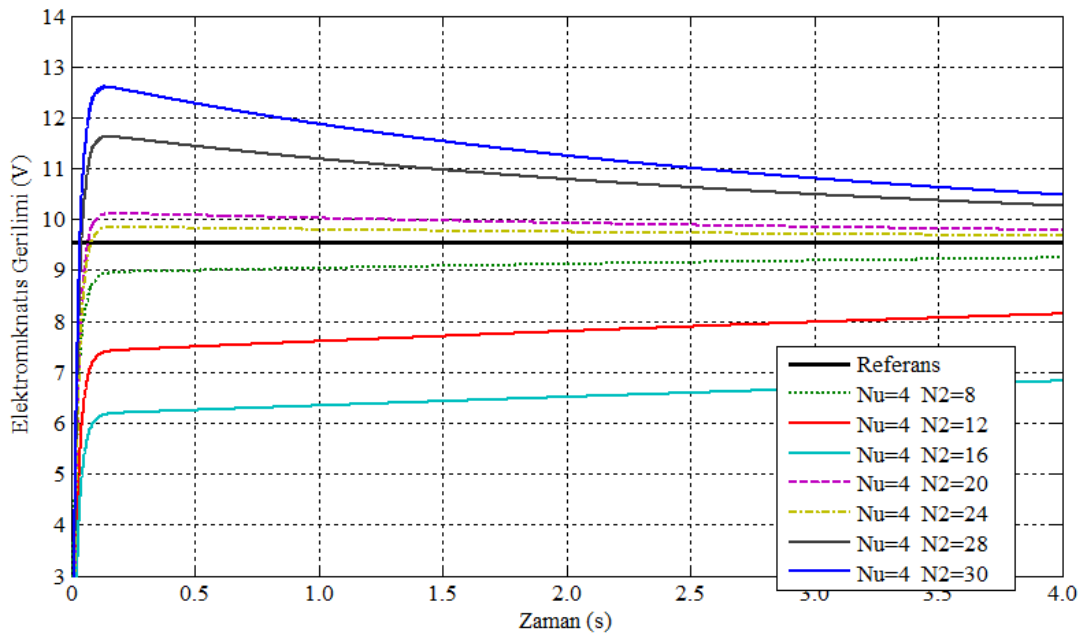
Kontrolöre ait parametrelerin değişik değerleri ile yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak verilen referansa en iyi uyum sağlayan parametre değerleri bulunmuş ve elektromıknatisin kapalı çevrim kontrolünde bu parametre değerleri kullanılmıştır.

Denemeler sırasında Bölüm 5.7’de bahsi geçen MÖK temel parametrelerinden öngörü ufku 8-30 arasında, kontrol ufku 2-7 arasında seçilmiş ve en uygun sonucu veren değerler bulunmuştur.

Uygun parametrelerin seçilmesi esnasında EMFK’nın 4000N olduğu sabit bir referans için Bölüm 5’de bahsi geçen tavsiye edilen kontrol ufku değerinden $N_u=4$ değerinde sabit tutulmuş ve öngörü ufku olan N_2 değeri 8, 12, 16, 20, 24, 28, 30 olacak şekilde değiştirilerek Şekil 6.8’deki gibi karşılaştırılmıştır.



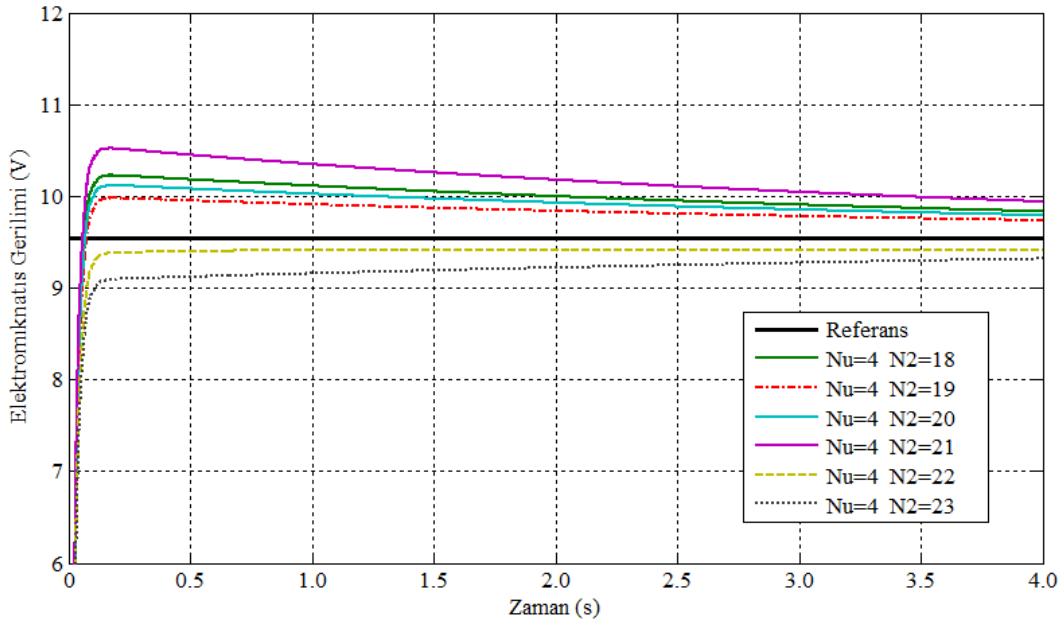
(a)



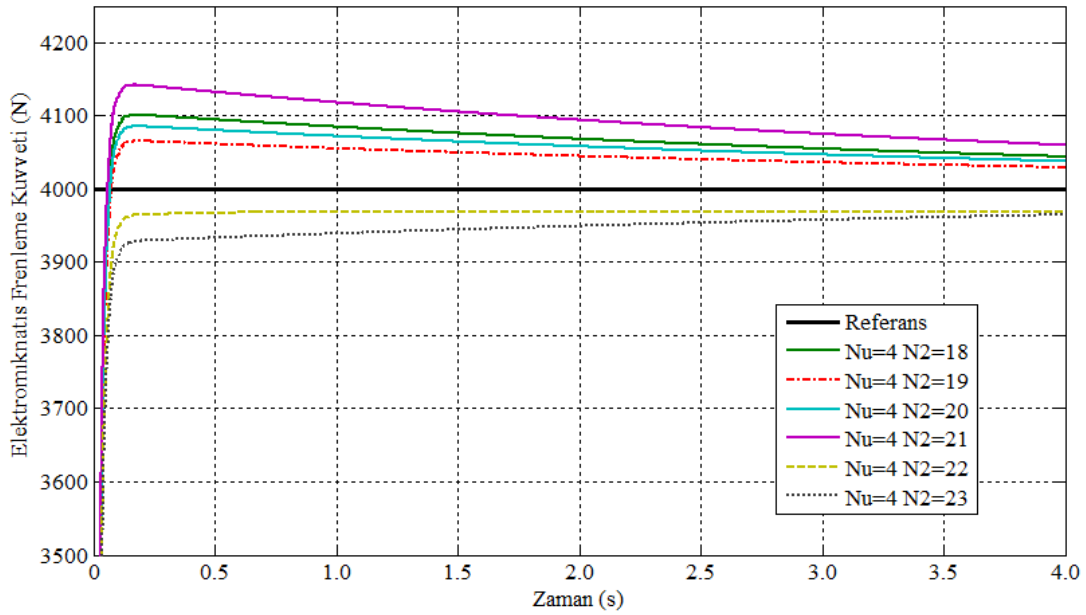
(b)

Şekil 6.7. N2 Öngörü ufku değişiminin kontrol performansına etkisi, (a) EMFK'ya etkisi, (b) EMG'ye etkisi

Şekil 6.8 incelendiğinde proses cevabının öngörü ufkunun 20 ile 24 arasında olduğu durumlarda, referansa %1 kalıcı hata ile yaklaşarak iyi sonuç verdiği görülmüştür. Prosesin daha iyi sonuç verebilmesi için Nu aynı değerde tutulmuş, N2 değeri 18, 19, 20, 21, 22, 23 olarak değiştirilerek Şekil 6.9'daki gibi karşılaştırılmıştır.



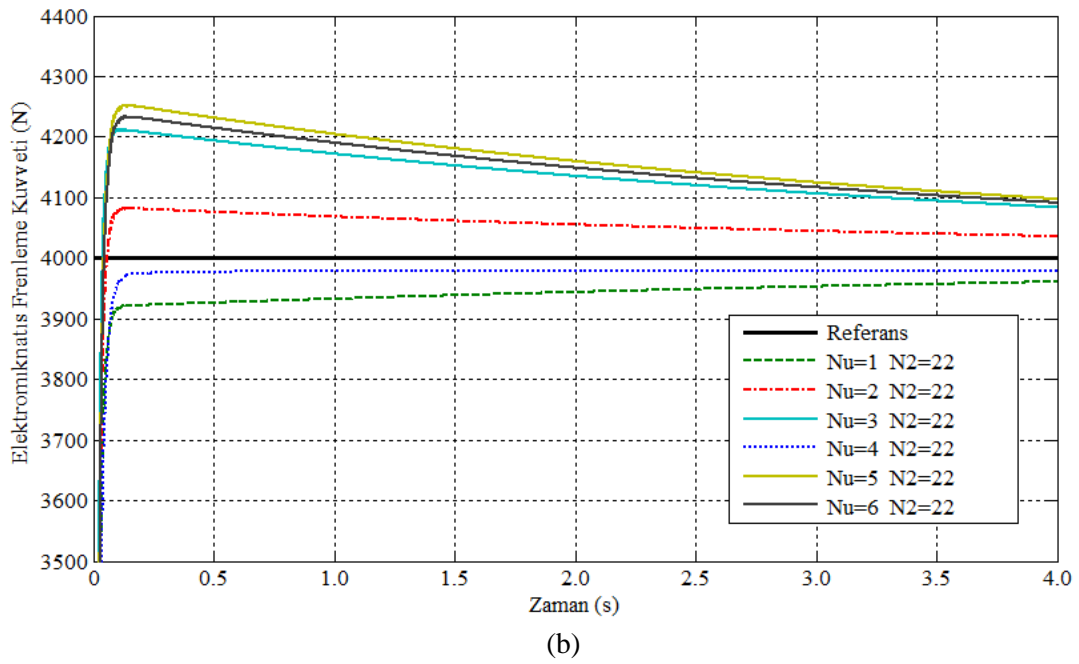
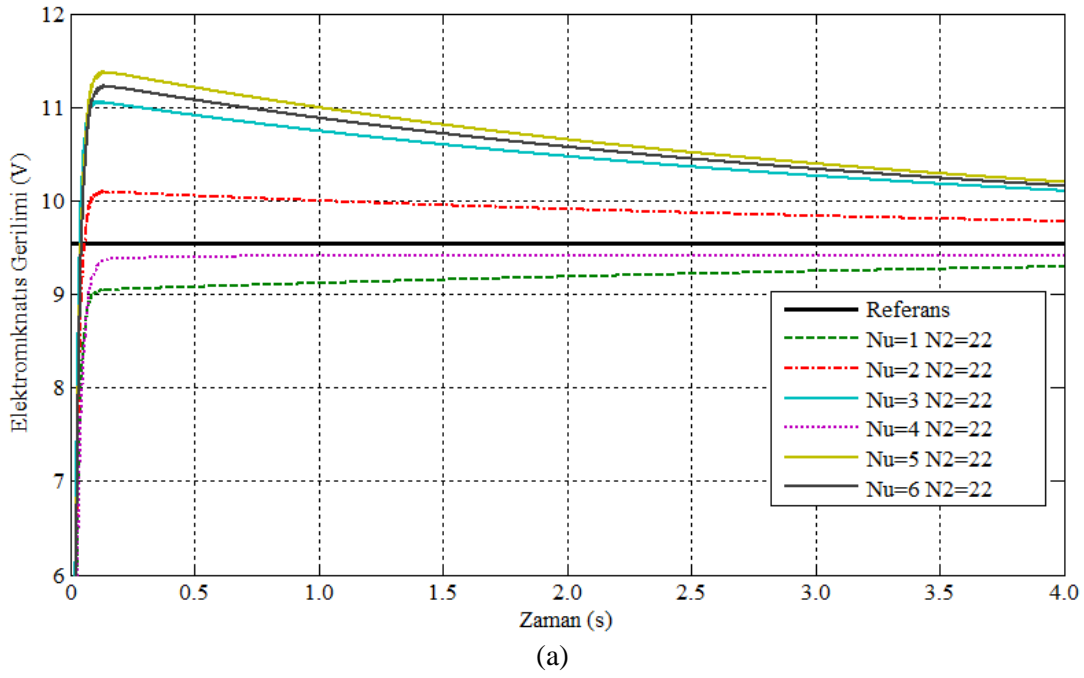
(a)



(b)

Şekil 6.8. N2, Öngörü ufku değişiminin kontrol performansına etkisi, (a) EMG'ye etkisi, (b) EMFK'ya etkisi

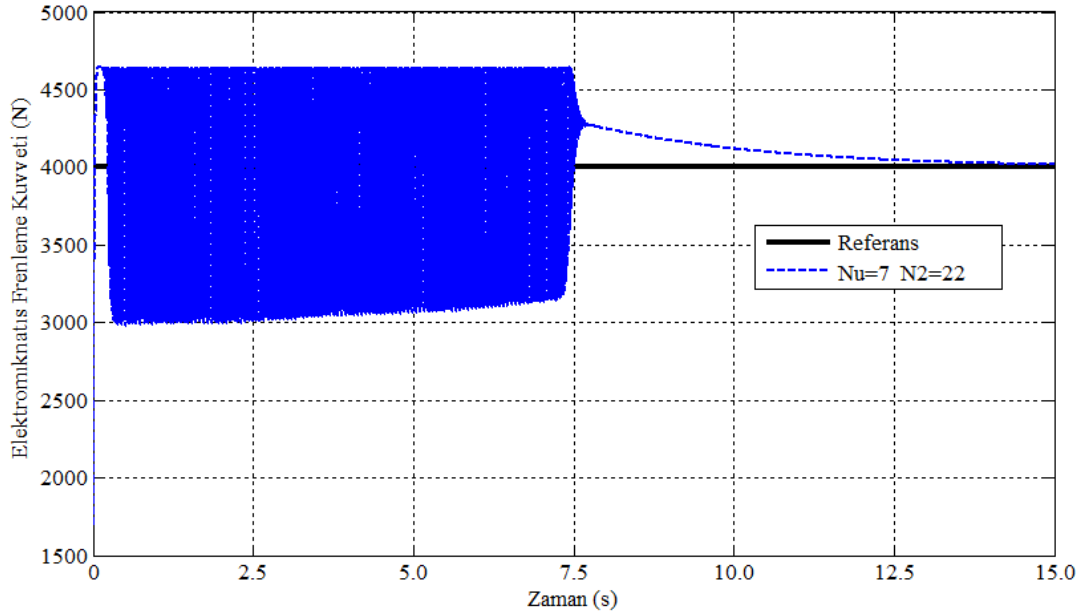
Şekil 6.9 incelendiğinde öngörü ufkunun 22 değerinde proses cevabı, referansa %0.5 kalıcı hata ile alttan yaklaşarak en uygun cevabı vermektedir. Kontrol ufkunun bulunmasında ise öngörü ufku değeri 22 de sabit tutularak kontrol ufku değeri 1, 2, 3, 4, 5, 6 olarak değiştirilerek Şekil 6.10'da karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.9. Nu, Kontrol ufku değişiminin kontrol performansına etkisi, (a) EMG'ye etkisi, (b) EMFK'ya etkisi

Kontrol ufkunun 6'dan daha büyük değerleri aldığı durumlarda Şekil 6.11'de görüldüğü gibi kontrolör uzun bir süre kararsız halde kalmakta ve daha sonra referansa %2 hata ile yaklaşmaktadır. Bunun temel sebebi kontrol ufkunun

gereğinden fazla artırılması, matris boyutunu büyütürken hesapsal yükün artmasına sebep olmakta ve kontrol değişkeninde istenmeyen salınımlara neden olmaktadır [74].



Şekil 6.10. Kontrol ufku Nu=7 'nin kontrol performansına etkisi

Şekil 6.9 ve 6.10 incelendiğinde Öngörü ufku N2'nin 22 ve kontrol ufku Nu'nun 4 olduğu durumlarda yapılan benzetimlerde, proses çıkışının oldukça küçük kalıcı hatalar ile istenilen referansa ulaşabildiği görülmüştür. Sonuçlar kısmında bu parametrelerin etkileri detaylı incelenmiş ve bu bölümde yapılan benzetimlerde, öngörü ve kontrol ufku bu değerler kabul edilerek proses cevapları ile referanslar karşılaştırılmıştır.

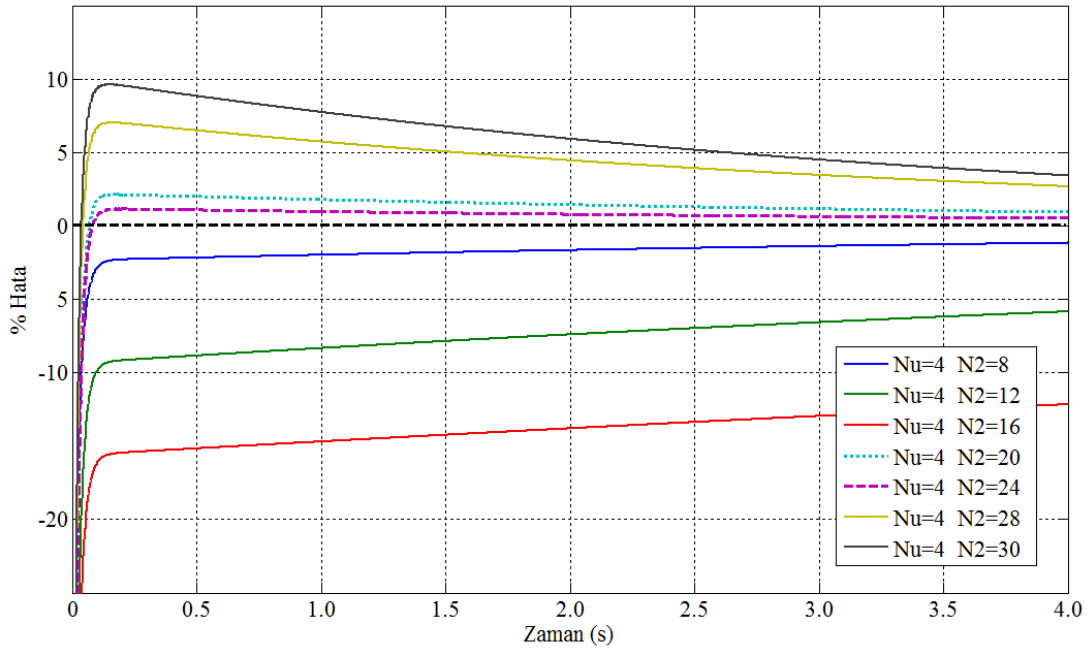
BÖLÜM 7. SONUÇLAR

7.1. Giriş

Bu bölümde, Bölüm 6.3'de bulunun öngörü ve kontrol ufku parametreleri kullanılarak hazırlanan kontrolöre, Seo'nun [6] doktora çalışmasında kullandığı farklı elektromıknatıs frenleme kuvvetleri referans olarak verilmiş ve elde edilen sonuçlar, kalıcı hatalar incelenerek karşılaştırılmıştır. Benzetimlerde örnekleme zamanı 0.001 olarak alınmıştır.

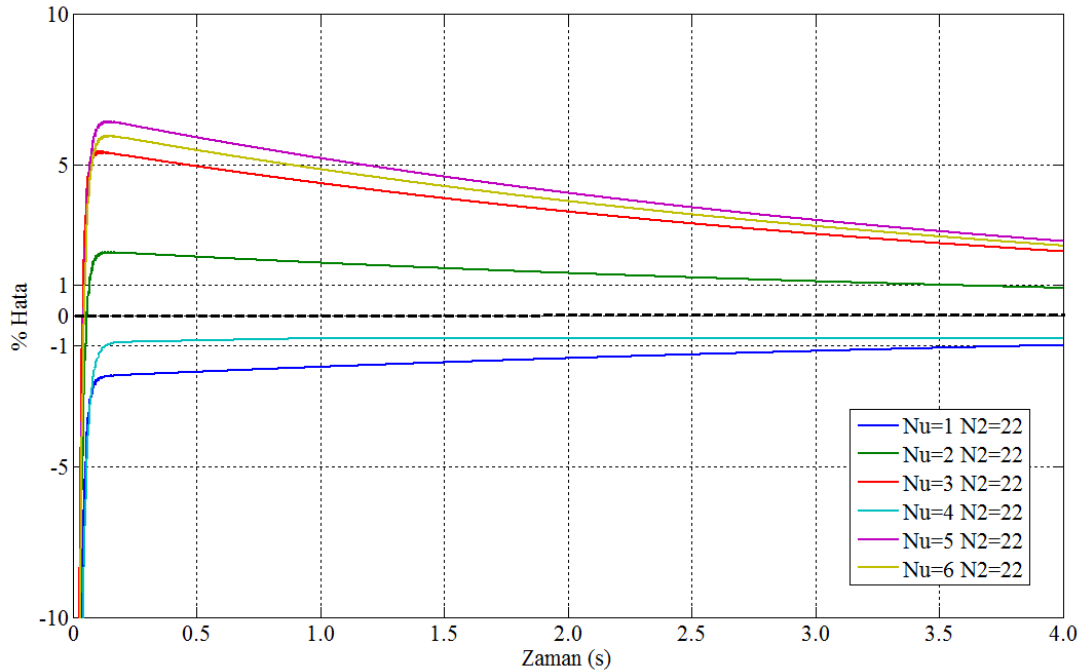
7.2. Öngörü ve Kontrol Ufku Parametrelerinin Karşılaştırılması

Bölüm 6.3'de model öngörülü kontrolör tasarımında kullanılan ve değişimleri incelenen Nu ve N2 parametrelerinin değişiminin proses çıkışına etkisi % Hata cinsinden incelenmiştir.



Şekil 7.1. N2 Öngörü ufku değişiminin kontrol performansına etkisi

Şekil 7.1 incelendiğinden Nu kontrol ufkü 4 olarak sabit tutulmuş ve N2 öngörü ufkü 8-30 arasında değiştirilmiştir. Değerler incelendiğinde öngörü ufkünün 24 olduğu durumda, proses cevabı 1. sn'de referansa %1 hata ile 4. sn'de ise %0,5 in altında bir değer ile oturmuştur. Diğer bir öngörü ufkü değeri olan 20 değeri için ise bu hata oranları 1. sn'de %2, 4. Sn'de ise %1'in altında olmuştur. Bu değerlere en yakın değer olan 8 için bu sonuçlar, 1. sn'de %3, 4. sn'de %2 mertebesinde kalmıştır. Bu sonuçlar incelendiğinde öngörü ufkü 24'den büyük olduğu durumlarda %hata referansın üzerinde artmaya başlamış, öngörü ufkünün 20'nin altında durumlarda ise referansın altında artmaya başlamıştır.

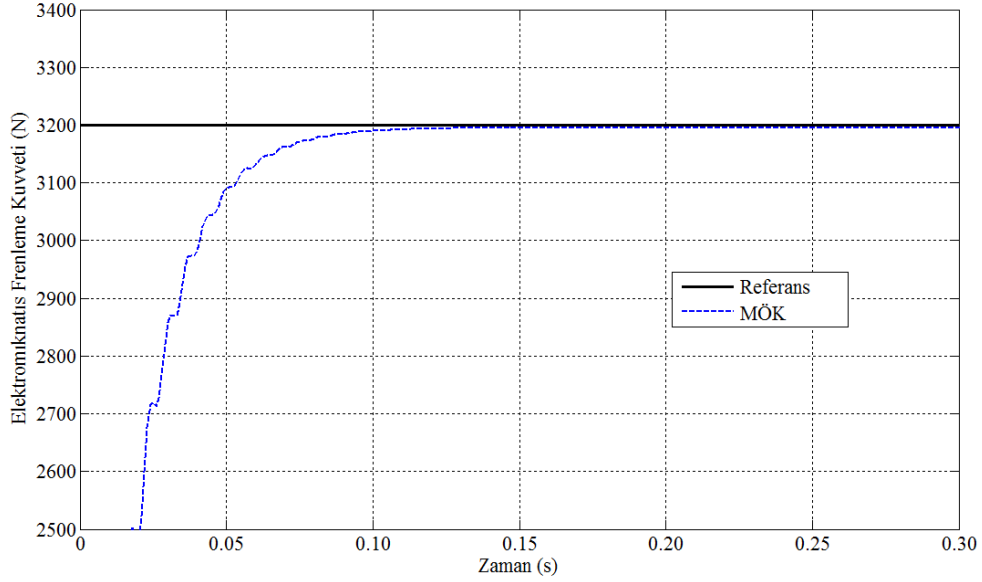


Şekil 7.2. N2 Öngörü ufkü değişiminin kontrol performansına etkisi

Şekil 7.2 incelendiğinde kontrol ufkünün 4 değerini aldığı durumda proses cevabı 1. sn'de % 0.8 hata ile referansa oturmuş ve 4. sn'nin sonuna kadar bu hata oranını çok düşük bir değişim ile korumuştur. Nu değeri 1 den başlayarak arttığı durumlarda % hata değeri de artmaktadır.

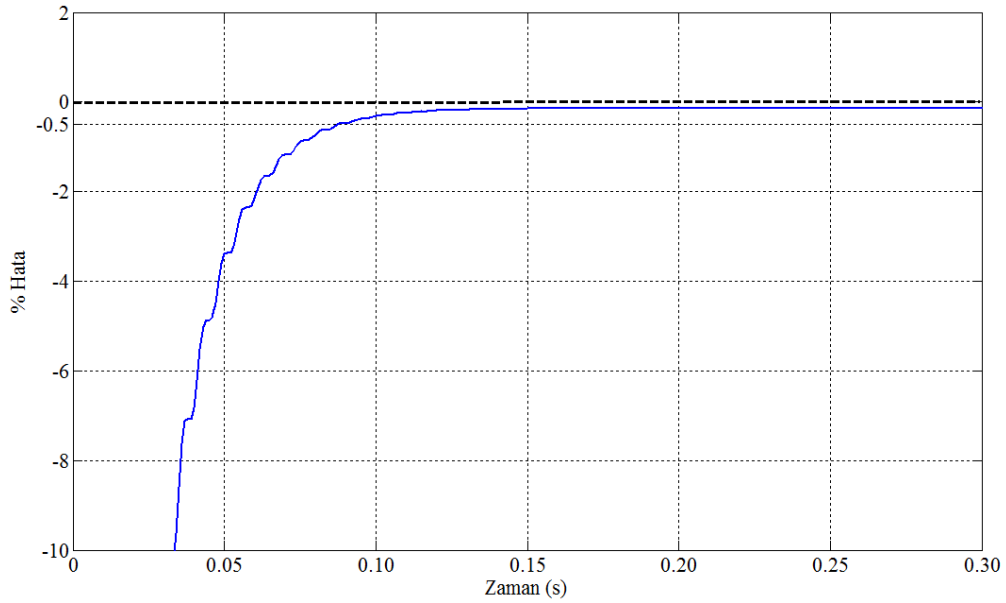
7.3. Değişik EMFK'ların MÖK'e Referans Verilmesi

Şekil 7.3'de sac kalınlığı 1mm, sac genişliği 150mm ve referans EMFK'nın 3200N olduğu durumda proses cevabı gösterilmiştir.



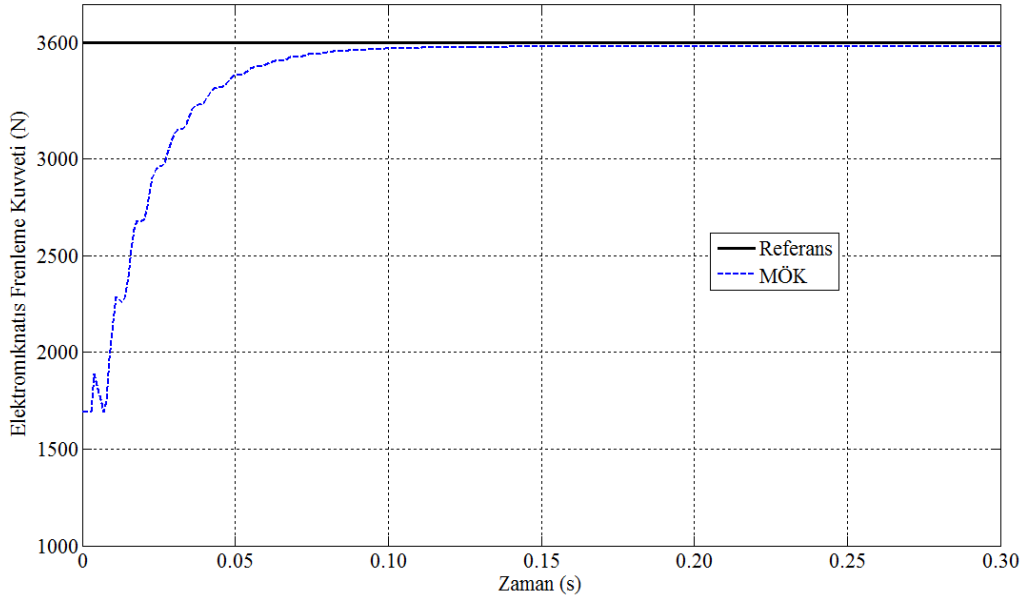
Şekil 7.3. EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 3200 N)

Şekil 7.4'de MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kontrolör ile elde edilen proses cevabı, 0.15 sn sonra referans değere % 0,15'lik kalıcı hata ile yerleşmiştir.



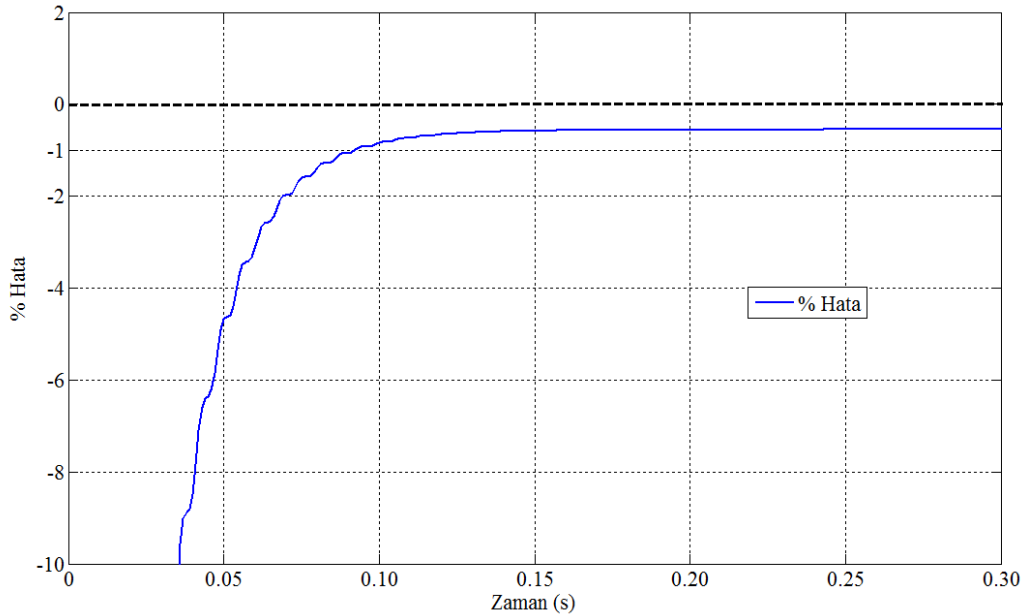
Şekil 7.4. MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref: 3200N)

Şekil 7.5’de sac kalınlığı 1mm, sac genişliği 150mm ve referans EMFK’nın 3600N olduğu durumda proses cevabı gösterilmiştir.



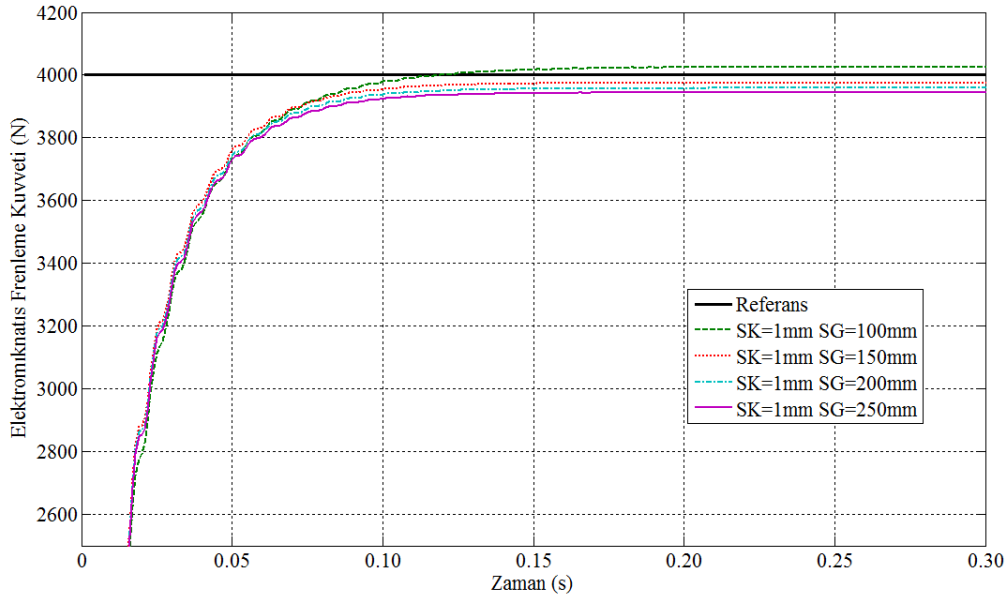
Şekil 7.5. EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 3600 N)

Şekil 7.6’da MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kontrolör ile elde edilen proses cevabı, 0.20 sn sonra referans değere % 0,5’lik kalıcı hata ile yerleşmiştir.



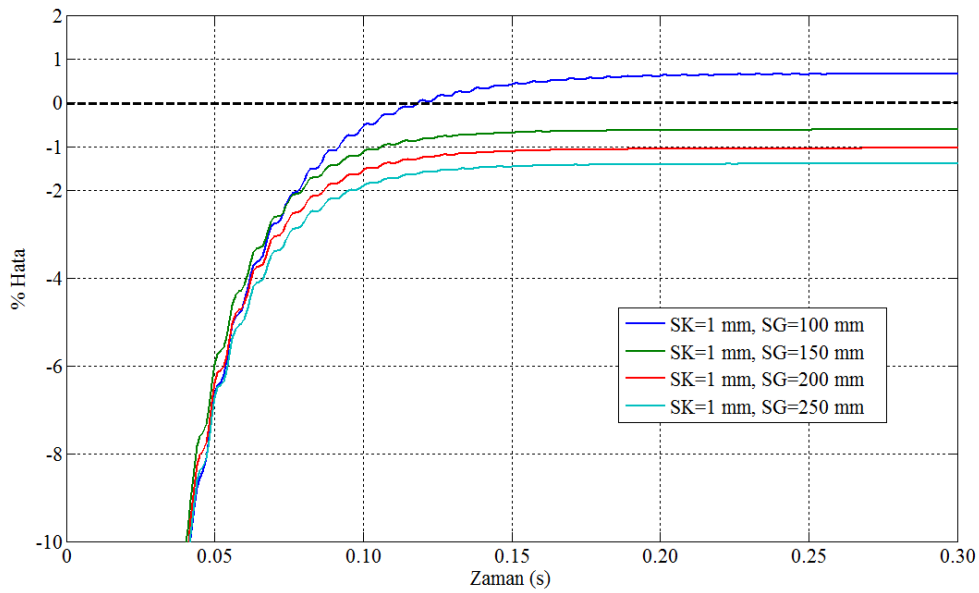
Şekil 7.6. MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref. 3600N)

Şekil 7.7’de sac kalınlığı 1mm, sac genişliği 100, 150, 200 ve 250 mm ile referans EMFK’nın 4000N olduğu durumlardaki proses cevapları gösterilmiştir.



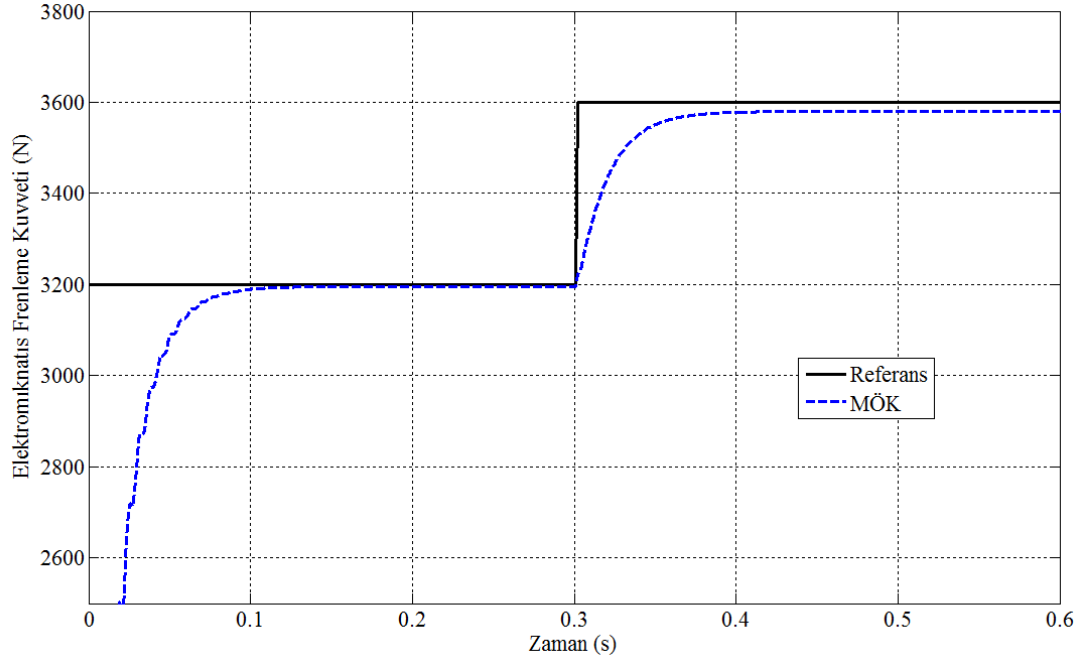
Şekil 7.7. Farklı sac genişlikleri için EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 4000 N)

Şekil 7.8’de MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata farklı sac genişlikleri için gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kontrolör ile elde edilen proses cevabı, 0.25 sn sonra referans değere 100 mm sac genişliği için % 0, 65’lik, 150 mm sac genişliği için % 0, 60’lik, 200 mm sac genişliği için % 1’lik ve 250 mm sac genişliği için % 1,40’lık kalıcı hata ile yerleşmiştir.



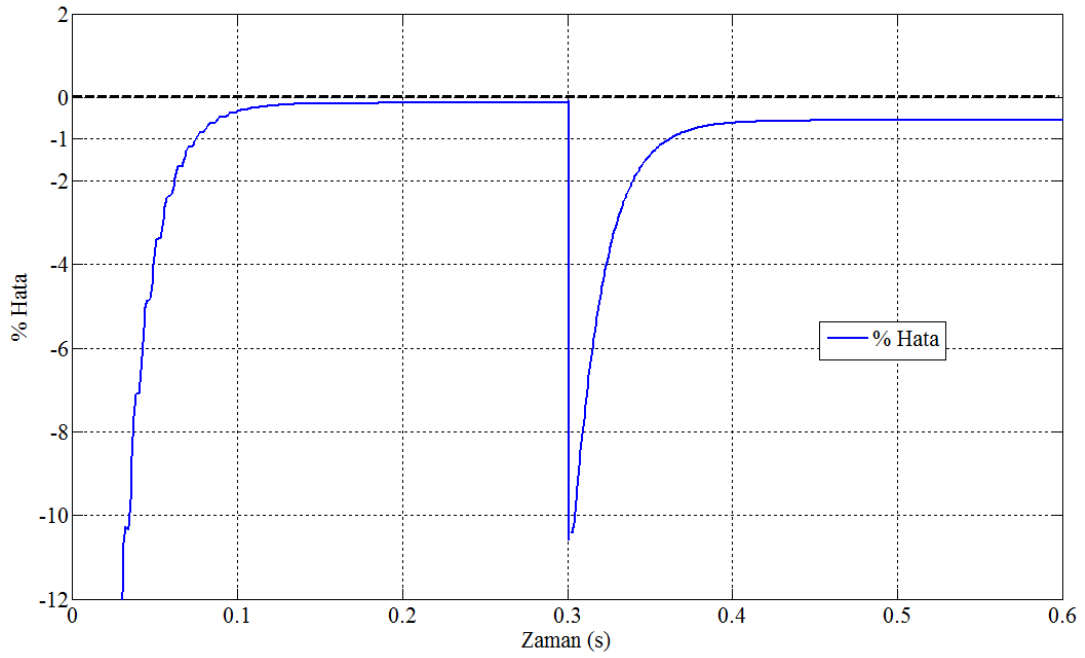
Şekil 7.8. MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref: 4000N)

Şekil 7.9’da sac kalınlığı 1mm, sac genişliği 150mm ve referans EMFK’nın 0-0,3 sn’de 3200N ve 0,3-0,6.sn’de 3600N olduğu basamak fonksiyonu durumdaki proses cevabı gösterilmiştir.



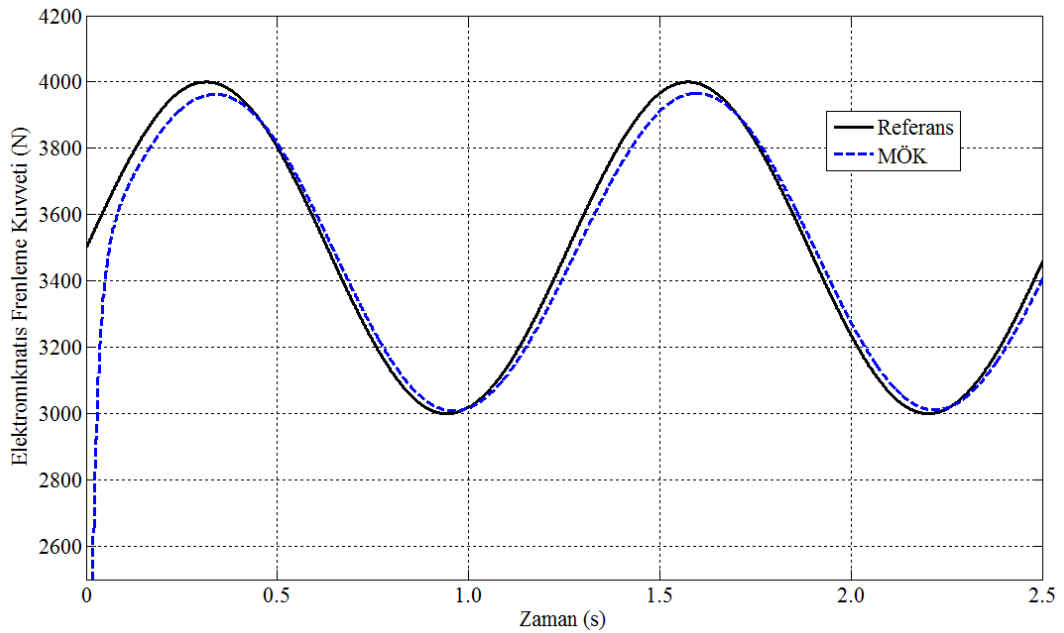
Şekil 7.9. EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 0-0.3 sn 3200N, 0.3-0.6 sn 3600 N)

Şekil 7.10’da MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kontrolör ile elde edilen proses cevabı, 0-0,3 sn arasında uygulanan 3200 N’luk kuvvete, 0,20 sn sonra % 0,15’lik kalıcı hata ve 0,3-0,6 sn arasında uygulanan 3600 N’luk kuvvete, 0,20 sn sonra %0,55’lik kalıcı hata ile yerleşmiştir.

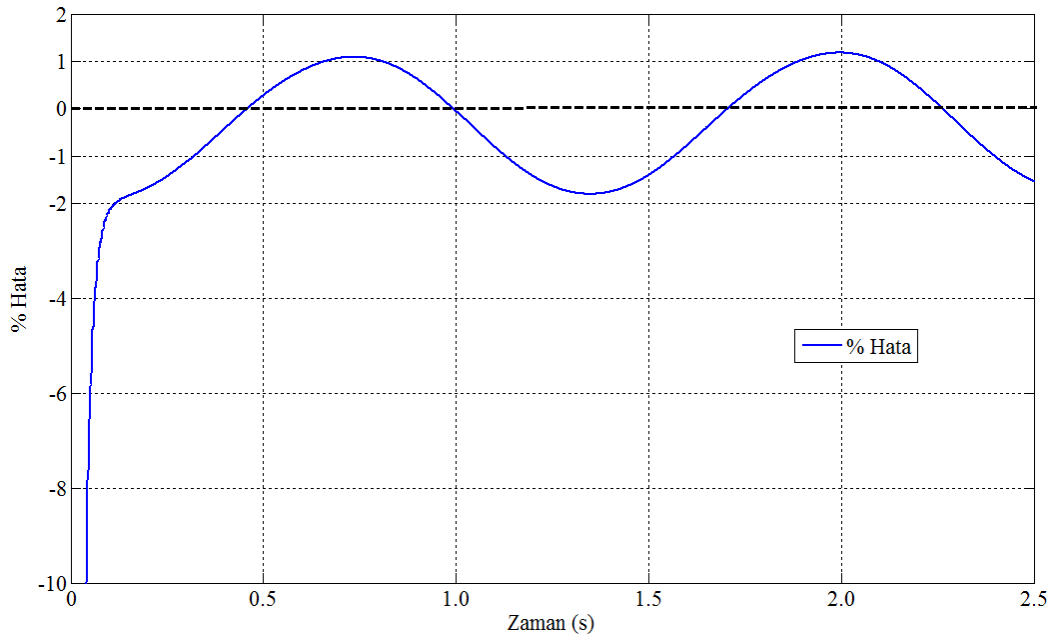


Şekil 7.10. MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref: 0-0.3 sn 3200N, 0.3-0.6 sn 3600 N)

Şekil 7.11'de sac kalınlığı 1mm, sac genişliği 150mm ve referans EMFK'nın 3500N ve genliğin 500N olduğu durumdaki proses cevabı gösterilmiştir.

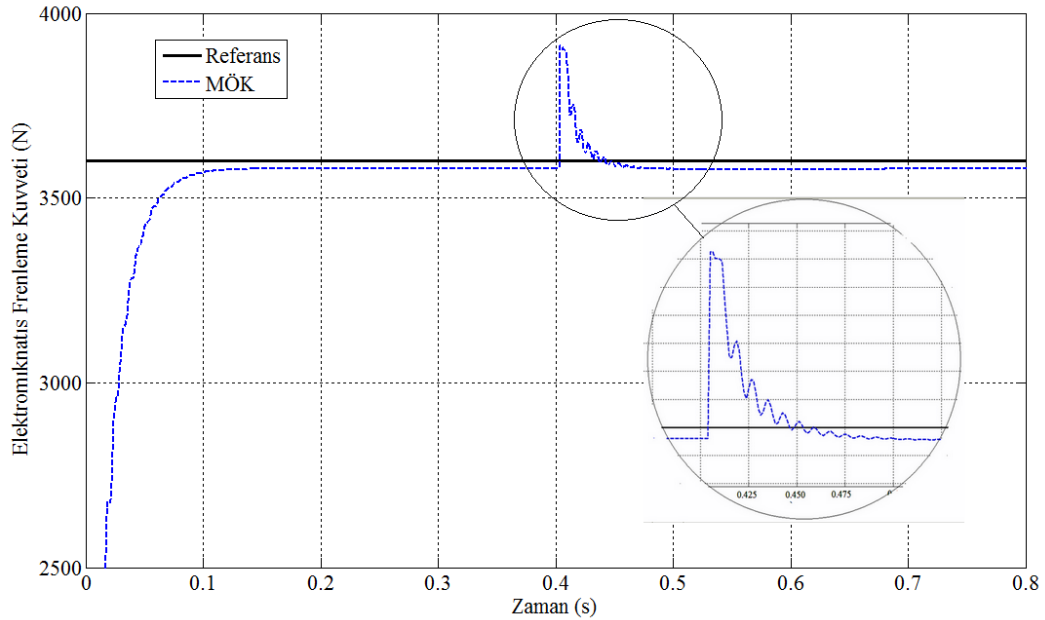


Şekil 7.11. EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Ref: 3500N, genlik 500 N)



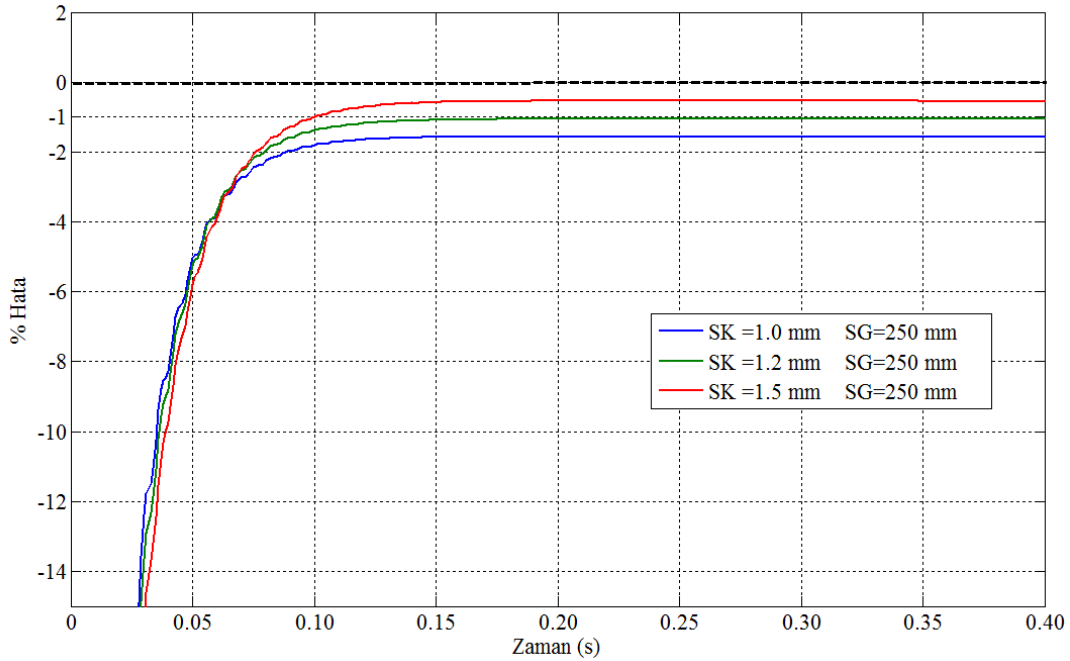
Şekil 7.12. MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata (Ref: 3500N, genlik 500 N)

Şekil 7.12'de MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kontrolör ile elde edilen proses cevabı, sinüs dalgasına maksimum % 1,8 lik kalıcı hata ile yerleşmiştir.



Şekil 7.13. EMFK'nın model öngörülü kontrolü (Bozucu büyüklük 400 N)

Şekil 7.13’de sac kalınlığı 1mm, sac genişliği 150mm ve referans EMFK’nın 3600N olduğu durumda, sisteme 0,4. Sn’de etkiyen 400N’luk bozucu büyüklüğe karşı proses cevabı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde sisteme etkiyen bozucu büyüklüğün etkisi kontrolör tarafından 0,2 de ortadan kaldırılarak proses cevabı eski durumdaki kalıcı hataya getirilmiştir.



Şekil 7.14. Farklı sac kalınlıkları için MÖK kullanılan prosesin cevabı ile referans arasındaki hata

Şekil 7.14’de MÖK kullanılan proseste farklı sac kalınlıkları için 4000N’luk referans giriş değeri için prosesin cevapları % hata cinsinden incelenmiştir. Cevaplar incelendiğinde sac kalınlığı 1,5mm için hata %1,6, 1,2 mm için hata %1 ve 1mm için hata %0,4 mertebesinde olmuştur. Bu sonuçlar çerçevesinde MÖK kullanılan prosesin bütün sac kalınlıklarında rahatlıkla kullanılabilceğini görülmüştür.

Genel olarak prosesin cevapları incelendiğinde sistem yaklaşık 0.2 sn’de kararlı hale gelmekte ve istenilen referansa yaklaşık %1’lik kalıcı hata ile yaklaşmaktadır. Bu değer literatürdeki kabul görmüş kalıcı hata değerlerinin altında kalmaktadır [54].

Prosesin giriş parametrelerinden sac kalınlığı ve sac genişliğinin değiştiği durumlarda da sistemin çıkışında aynı şekilde maksimum %1'lik kalıcı hatalar ile istenilen referansa yaklaşılmıştır.

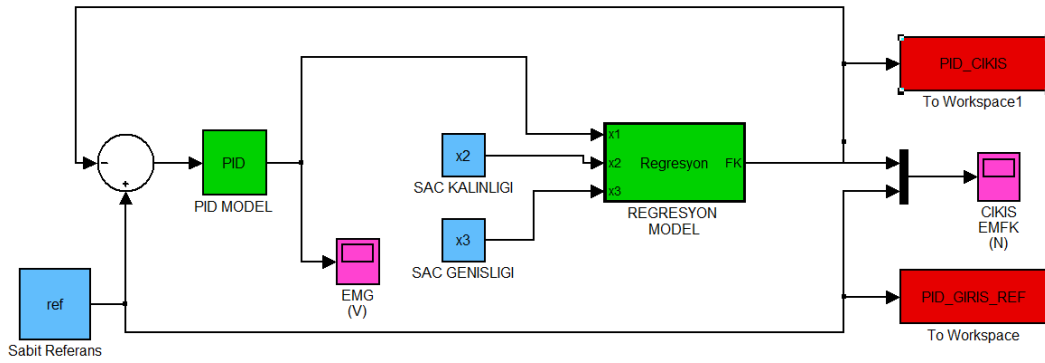
Prosesle değişken basamak fonksiyonları ile referans değerler atandığında sistem, sabit basamak fonksiyonlarında olduğu gibi maksimum %1'lik kalıcı hatalar ile istenilen referansları yakalayabilmiştir. Bu hata oranlarının literatürde kabul edilebilir ölçüler arasında kaldığı düşünülürse, kontrol çevriminden elde edilen sonuçların güvenilir olduğu anlaşılmaktadır.

Prosesin çalışması esnasında sisteme dışarıdan bir bozucu büyüklük etkiğinde, kontrolör bozucu büyüklüğü etkisini 0.2 sn gibi kısa bir sürede ortadan kaldırarak, sistemi istenilen referans değerine döndürmüştür.

7.4. Model Öngörülü Kontrolör ile PID Kontrolörün Karşılaştırılması

PID algoritması proses üretime yönelik faaliyet gösteren endüstride en çok bilinen ve kullanılan bir geri beslemeli kontrol şeklidir. Tüm dünya üzerinde 50 yılı aşkın süredir kullanılmakta olup, kolay, anlaşılabilir ve güvenilir algoritması ile iyi bir performans sağlamakta, değişken ve dinamik karakteristik özellikleri ile sanayide en çok tercih edilen kontrol tipi olarak ön plana çıkmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı geliştirilen model öngörülü kontrolör ile karşılaştırmak amacıyla aynı proses için bir de PID kontrolör tasarlanmıştır. PID kontrolör parametreleri deneme yöntemi ile $K_p=3$, $K_i=6$ ve $K_d=0.5$ olarak alınmıştır. MÖK ve PID kontrolör karşılaştırılırken sac kalınlığı 1mm ve sac genişliği 150mm olarak alınmıştır.

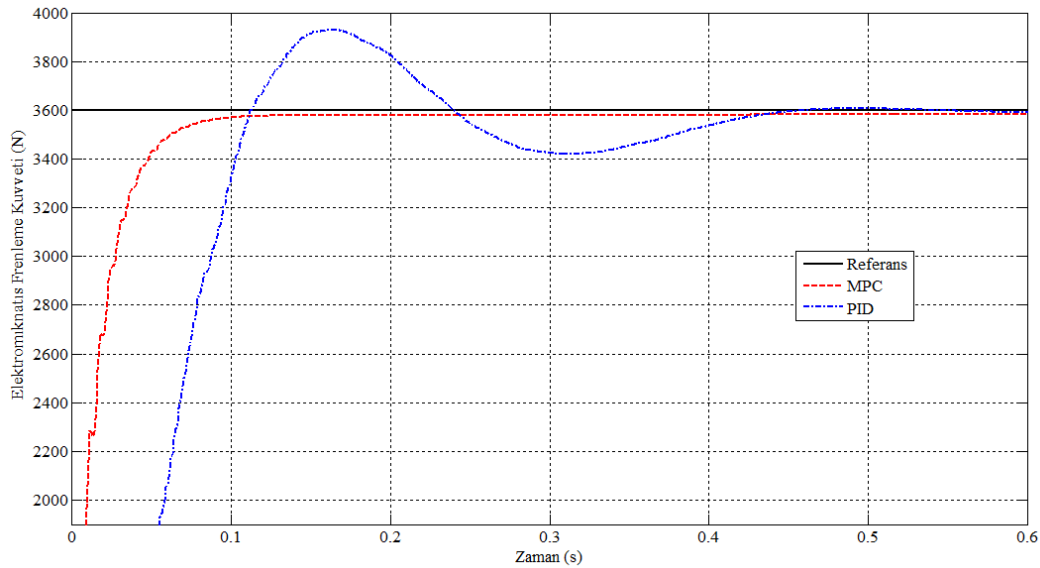
PID kontrol için Simulink'de hazırlanan benzetim model görüntüsü Şekil 7.14'de verilmiştir. Model öngörülü kontrolör ve PID kontrolör aynı şartlarda hem sabit referans hem de değişken referans altında çalıştırılmıştır.



Şekil 7.15. Elektromıknatis için tasarlanan PID kontrollü benzetim modeli

7.4.1. MÖK ve PID'nin sabit referans altında çalıştırılması

Şekil 7.15'de, 3600 N'luk sabit bir referans altında PID kontrolör ile MÖK karşılaştırılmıştır.

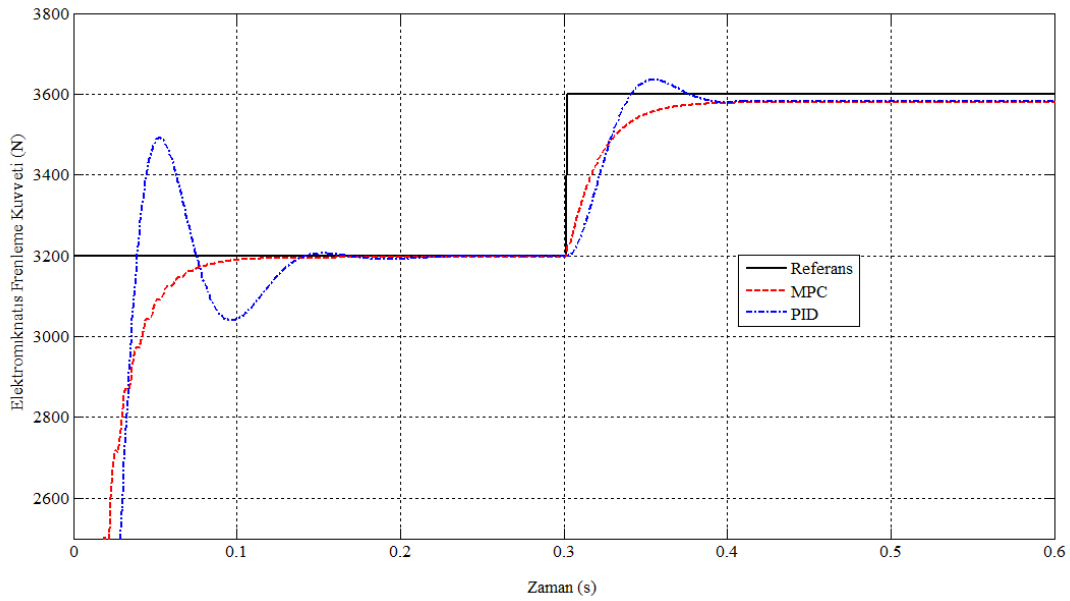


Şekil 7.16. PID kontrolör ile MÖK'ün sabit referans altında karşılaştırılması (Ref: 3600N)

Şekil 7.15 incelendiğinde MÖK, istenilen referansa 0.2 sn'de, %0.5'lik kalıcı hata ile yerleşmişken, PID kontrolör bu kalıcı hataya 0.6 sn'de ulaşmaktadır. Ayrıca PID kontrolör bu zaman zarfında salınım yaparak istenilen referans değerinin üzerine çıkmış ve ancak 0.6 sn sonra MÖK ile benzer hata oranına gelerek kararlı bir yapıya bürünmüştür. MÖK, PID kontrolöre göre daha hızlı cevap vermiştir. Her iki kontrolör de istenilen referans değere literatürdeki kabul edilebilir kalıcı hatalar ile yerleşmiştir [54].

7.4.2. MÖK ve PID'nin değişken referans altında çalıştırılması

Şekil 7.16'da, MÖK ile PID kontrolör ün değişken referans altında karşılaştırılmıştır. Her iki kontrolöründe karşılaştırılmasında sisteme 0-0,3 sn arasında 3200 N'luk ve 0,3-0,6 sn arasında 3600N'luk referans giriş verilmiş ve sistemin cevabı incelenmiştir.



Şekil 7.17. MÖK ile PID kontrolörün değişken referans altında karşılaştırılması (Ref: 0-0.3 sn 3200N, 0.3-0.6 sn 3600 N)

Şekil 7.16 incelendiğinde değişken referanslar altında çalıştırılan MÖK ve PID kontrole ait proses cevapları, sabit referans altındaki cevaplar ile benzerlik taşımaktadır. MÖK her iki referans değerinde de benzer bir yörünge takip ederek istenilen referansa %1'in altında bir hata ile ulaşırken, PID kontrolör ile her iki durumda da salınım yaparak istenilen referansın üzerine çıkmış ve 0.2 sn sonra MÖK ile benzer bir hata oranı ile referansa yerleşmiştir.

Her iki kontrolöründe cevapları incelendiğinde MPC'nin PID kontrolöre göre daha hızlı cevap verdiği ve performansının daha iyi olduğu görülmüştür. MÖK, prosesden alınan sabit referans değerleri altında çalıştırıldığında, proses cevabını referans değere kararlı bir şekilde yaklaşmaktadır. Ayrıca değişken referans ve bozucu etkiler altında da çalıştırıldığı durumda da MÖK'ün proses cevabının, referansı kararlı bir

şekilde ve oldukça küçük hatalar ile takip etmektedir. Tablo 7.1’de MÖK ve PID kontrolör, proses cevapları incelenerek karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.1. MÖK ile PID kontrolörün karşılaştırılması

	Kontrol Performansı	Hesaplama Zamanı	Bozucu Büyüklükler	Bellek	Mühendislik Performansı
MÖK	Çok iyi	Yüksek	Az Etkileniyor	Yüksek	İyi
PID	İyi	Düşük	Fazla Etkileniyor	Düşük	Orta

BÖLÜM 8. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tezde sac şekillendirme prosesi esnasında oluşan şekillendirme kusurlarını ortadan kaldırmak veya aza indirmek amacıyla, kalıp boşluğu içine akan sac malzemenin kontrolü veya belirli bölgelerde düzenlenmesi amacıyla baskı plakası kuvvetine ek olarak elektromıknatıs çekim kuvveti kullanılarak sac malzeme üzerinde frenleme kuvveti oluşturulmuştur.

Elde edilen bu frenleme kuvvetinin kestirimi için deneysel veriler kullanılarak her bir sac kalınlığı ve genişliği için, elektromıknatısa uygulanan gerilime bağlı olarak frenleme kuvvetini veren kübik polinom modeller elde edilmiştir. Bu modeller incelendiğinde güvenilirlik katsayısı olarakta bilinen korelasyon katsayısının (R^2) 0,99'dan daha büyük çıktığı görülmüştür. Ancak bu yöntem, sadece deneylerde kullanılan sac genişlikleri ve kalınlıkları için frenleme kuvvetinin hesaplanabilmesine olanak tanımaktadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak amacıyla sac kalınlığı, sac genişliği ve gerilim bir değişken olarak tanımlandığı yeni bir modelin hazırlanması gerekmiştir.

Regresyon yöntemi kullanılarak bu değişkenlerin kullanıldığı farklı modeller hazırlanmış ve bu modeller deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak elde edilen modeller arasından hem deneysel veriler ile en uyumlu olan hem de hataların karelerinin ortalamasının karekökü (RMSE) ve korelasyon katsayısının (R^2) hesaplanmasıyla 0,982 ile en başarılı sonucu, ikinci dereceden-etkileşimli regresyon model vermiştir. Güvenirlik katsayısı da denen bu değer 1'e oldukça yakın olması, hesaplanan polinom modellerin başarılı sonuç verdiğini ve performansının iyi olduğunu gösterdiğinden dolayı bu model, EMFK'yı kontrol etmek için tasarlanan kapalı çevrim kontrol sisteminde, sistemin matematik modeli olarak kullanılmıştır.

Elde edilen bu ikinci dereceden-etkileşimli regresyon model sayesinde herhangi bir deney veya analiz yapmaya gerek kalmadan, genişliği ve kalınlığı belli olan sac malzeme üzerinde, elektromıknatısa uygulanan gerilim değiştirilerek istenilen miktarda frenleme kuvveti oluşturulabilir. Bu sayede zaman kaybı ve deney/analiz maliyetleri ortadan kalkmıştır.

Deney sonuçları incelendiğinde elektromıknatısın sac şekillendirme prosesinde, sac üzerinde oluşturulan frenleme kuvvetinin arttırılması ve kontrolünde baskı plakası ile birlikte uyumlu bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu yöntem ile kalıp içerisinde sac akışının kontrol edilmesinin istendiği bölgelere elektromıknatıs yerleştirilerek sac üzerinde istenilen frenleme kuvvetleri oluşturulabilir.

Elektromıknatısın modüler bir yapıda olması sayesinde, sistem farklı kalıplarda da kullanılarak zaman ve enerji tasarrufu ile kalıp tasarımında esneklik sağlayacaktır.

Elektromıknatıs tarafından oluşturulan mıknatıslanma, proses sonunda ortadan kaldırılmaktadır. Ancak sac üzerinde kalan az miktardaki mıknatıslanma bir sonraki operasyonda sac malzemenin kalıp üzerine konumlandırılmasına yardımcı olacaktır.

Deneysel veriler kullanılarak hazırlanan model öngörülü kontrolör ve sistemin matematik modeli kullanılarak hazırlanan kapalı çevrim kontrol sistemine, literatürden alınan referans frenleme kuvvetleri giriş olarak verildiğinde proses cevabının referans değere kararlı bir şekilde yaklaştığı görülmüştür.

Tüm çalışmaların sonucunda frenleme kuvvetinin kestirimi için kullanılan yöntemlerin %5 hatanın altında ve kontrolü için kullanılan yöntemlerin ise %2 hatanın altında sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuç literatür ile karşılaştırıldığında model ve kontrolörün güvenilir sonuçlar verdiği ve performansının iyi olduğu görülmüştür [54].

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 kontrolörün giriş ve çıkışlarına uygulanabilen kısıtlamalar da göz önüne alındığında sonuç olarak bu proses için model öngörülü kontrolörün PID kontrolöre göre daha sağlıklı çalıştığı kanaatine varılmıştır. Ancak karşılaştırma esnasında PID kontrol parametreleri deneme yanılma ile bulunduğundan dolayı, parametre seçiminde optimizasyon yöntemleri kullanılarak PID kontrol çıkışları daha da iyileştirilebilir.

Bu tezde deneysel çalışma yapılarak sac kalınlığı ve genişliği ile elektromıknatısa uygulanan gerilime bağlı olarak elde edilen frenleme kuvveti ölçülmüş olup, yağlama, çekme hızı gibi bazı hususlar üzerinde durulmamıştır. İleriye dönük yapılması önerilen çalışmalar şunlar olabilir;

- Elektromıknatısın üretiminde kullanılan malzemeler değiştirilerek elde edilecek çekme kuvveti artırılabilir. Bu sayede daha küçük ve modüler elektromıknatıslar üretilebilir.
- Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, sistem bilgisayar ortamında simule edilerek deneysel veriler ile karşılaştırılabilir. Elde edilen bilgisayar modeli bu sonuçlar ile doğrulandıktan sonra farklı deney şartları için bilgisayar ortamında denemeler yapılarak elde edilen frenleme kuvvetinin değişimi incelenebilir.
- Farklı özellikteki sac malzemeler kullanılarak, malzeme özelliklerinin elde edilen frenleme kuvvetine etkisi incelenebilir.
- Yağlama, çekme hızı, kalıp malzemeleri gibi proses parametreleri değiştirilerek, her bir değişkenin elde edilen frenleme kuvvetine etkisi incelenebilir.
- Sac malzemelerin proses sonucundaki metalografik özellikleri incelenerek elektromıknatısın kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için karşılaştırılabilir.
- Sistem pres üzerine monte edilerek gerçek zamanlı testler yapılabilir ve pres ve şekillendirme prosesine uyumu incelenebilir.
- Elektromıknatısın kontrol paneli ve yazılımı geliştirilerek sistemin kararlı hale geliş süresi kısaltılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] DEĞİRMENCİ, H., Çelik sacların mekanik özelliklerinde ortaya çıkan değişimler ve nedenleri ile bunların şekillendirme prosesi üzerindeki etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [2] TİRYAKİ, A.E., Sac metallerin şekillendirilmesinde kullanılan süzdürme çubuğunun modellenmesi ve kontrolü, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [3] STONE, R., BALL, J.K., Automotive engineering fundamentals, SAE International, 2004.
- [4] HOSFORD, W.F., CADDELL, R.M., Metal forming: mechanics and metallurgy, Prince-Hall, NJ, 1993.
- [5] <http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming> (Erişim Tarihi: 10.10.2011)
- [6] SEO, Y.R., Electro-magnetic blank restrainer, PhD Thesis, Michigan University, 2006
- [7] DEMİRCİ, H.İ., YAŞAR, M., DEMİRAY, K., KARALI M., The theoretical and experimental investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL 1050 material, Materials and Design, 29, pp. 526-532, 2008

- [8] YOSHIHARA, S., MANABE, K., NISHIMURA, H., Effect of blank holder force control in deep-drawing process of magnesium alloy sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 170, pp. 579-585, 2005.
- [9] OBERMEYER, E.J., MAJLESSI, S.A., A review of recent advances in the application of blank-holder force towards improving the forming limits of sheet metal parts, *Journal of Materials Processing Technology*, 75, pp. 222-234, 1998.
- [10] KRICHEN, A., KACEM, A., HBAIEB, M., Blank-holding effect on the hole-flanging process of sheet aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, pp. 619-626, 2011.
- [11] TRAVERSIN, M., KERGEN, R., Closed-loop control of the blank-holder force in deep-drawing: finite-element modeling of its effects and advantages, *Journal of Materials Processing Technology*, 50, pp. 306-317, 1995.
- [12] SHENG, Z.Q., JIRATHEARANAT, S., ALTAN, T., Adaptive FEM simulation for prediction of variable blank holder force in conical cup drawing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, pp. 487-494, 2004.
- [13] ZHONG-QIN, L., WU-RONG, W., GUAN-LONG, C., A new strategy to optimize variable blank holder force towards improving the forming limits of aluminum sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 183, pp. 339-346, 2007.
- [14] SIEGERT, K., ZIEGLER, M., Pulsating blankholder forces in the deep-drawing processes, *Annals of the CIRP*, 46, pp. 205-208, 1997.

- [15] WANG, L., CHAN, L.C., LEE, T.C., Process modeling of controlled forming with time variant blank holder force using RSM method, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, pp. 1929-1940, 2007.
- [16] SEOK OH, K., HWAN OH, K., JANG, J.H., KIM, D.J., HAN, K.S., *Journal of Materials Processing Technology*, 211, pp. 695-707, 2011.
- [17] GAVAS, M., IZCILAR, M., Design and application of blank holder system with spiral spring in deep drawing of square cups, *Journal of Materials Processing Technology*, 171, pp. 274-282, 2006.
- [18] DEMIRCI, H.I., ESNER C., YASAR, M. Effect of the blank holder force on drawing of aluminum alloy square cup: Theoretical and experimental investigation, *Journal of Materials Processing Technology*, 206, pp. 152-160, 2008.
- [19] GUNNARSSON, L., ASNAFI, N., SCHEDIN, E., In-process control of blank holder force in axi-symmetric deep drawing with degressive gas spring, *Journal of Materials Processing Technology*, 73, pp. 89-96, 1998.
- [20] WU-RONG, W., GUAN-LONG, C., ZHONG-QIN, L., The effect of binder layouts on the sheet metal formability in the stamping with variable blank holder force, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, pp. 1378-1385, 2010.
- [21] HSU, C.W., ULSOY, A.G., DEMERI, M.Y., Development of process control in the sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 127, pp. 361-368, 2002.
- [22] INGARAO, G., LORENZO, R.D., A new progressive design methodology for complex sheet metal stamping operations: Coupling spatially differentiated restraining forces approach and multi-objective optimization,

- Computers and Structures, 88, pp. 625-638, 2010.
- [23] LIU, G., LIN, Z., XU, W., BAO, Y., Variable blankholder force in U-shaped part forming for eliminatcing springback error, *Journal of Materials Processing Technology*, 120, pp. 259-264, 2002.
- [24] LIU, G., LIN, Z., BAO, Y., Improving dimensional accuracy of a u-shaped part through an ortogonal design experiment, *Finite Elements in Analysis and Design*, 39, pp. 107-118, 2002.
- [25] LORENZO, R.D., FRATINI, L., MICARI, F., Optimal blankholder force path in sheet metal forming processes: an AL based procedure, *Annals of the CIRP*, 48, pp. 231-234, 1999.
- [26] SIEGERT, K., HAUSSERMANN, M., HALLER, D., WAGNER, S., ZIEGLER, M., Tendencies in presses and dies for sheet metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 98, pp. 259-264, 2000.
- [27] PAHL, K.J., New developments in multi-point die-cushion technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 71, pp. 168-173, 1997.
- [28] YAGAMI, T., MANABE, K., YANG, M., KOYAMA, H., Intelligent sheet stamping process using segment blankholder modules, *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, pp. 2099-2105, 2004.
- [29] ALI, S., HINDUJA, S., ATKINSON, J., BOLT, P., WERKHOVEN, R., The effect of ultra-low frequency pulsations on tearing during deep drawing of cylindrical cups, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48, pp. 558-564, 2008.
- [30] MOSSE, L., COMPSTON, P., CANTWELL, W.J., CARDEW-HALL, M. KALYANASUNDARAM, S., Stamp forming of polypropylene based fiber-metal laminates: The effect of process variables on formability,

- Journal of Materials Processing Technology, 172, pp. 163-168, 2006.
- [31] HINDUJA, S., ATKINSON, J., LAU, D.K.Y., LABIB, A.W., AGIRREZABAL, P., An intelligent controller for improving the quality of deep drawn components, *Annals of the CIRP*, 49, pp. 221-224, 2000.
- [32] CHERRILL A.P., ZHANG, S., OUSTERHOUT, K.B., A variable force binder for a draw press, *Journal of Materials Processing Technology*, 73, pp. 7-17, 1998.
- [33] MOROVVATI, M.R., MOLLAEI-DARIANI, B., ASADIAN-ARDAKANI, M.H., A theoretical, numerical and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in the deep drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, pp. 1738-1747, 2010.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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, 1998.

- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] LI, X., QIANZH S., On intelligent control of sheet metal forming, *Proceedings of the 27th Chinese Control Conference*, pp. 302-305, Kunming, unnan, China, July 16-18, 2008.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.

- [45] 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.
- [46] 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, Nov 2000.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] MICHLER, J.R., WEINMANN, K.J., KASHANI A.R., MAJLESSI, S.A., A strip-drawing 112 ort he 112 r with computer-controlled drawbead penetration and blankholder pressure, *Journal of Materials Processing Technology*, 43, Issues 2-4, pp. 177-194, June 1994.
- [50] WEINMANN, K.J., MICHLER, J.R., RAO, V.D., KASHANI A.R., Development of a computer-controlled drawbead 112ort he112r for sheet metal forming, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 43, Issue 1, pp. 257-261, 1994.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] CHEN, F.-K., LIU, J.-H., Analysis of an equivalent drawbead model
113ort he finite element simulation of a stamping process, International
Journal of Machine Tools and Manufacture, 37-4, pp. 409-423, 1997.
- [54] SAMUEL, M., Influence of drawbead geometry on sheet metal forming,
ournal of Materials Processing Technology, 122, pp. 94-103, 2002.
- [55] 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.
- [56] 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
- [57] 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.
- [58] SEO, Y.R., Electromagnetic blank restrainer in sheet metal forming
processes, International Journal of Mechanical Sciences, 50, 743–751,
2008.
- [59] http://www.erdemir.com.tr/images/urun_hizmetler/Katalog2011TR.pdf,
pp. 159, (Erişim Tarihi: 15.10.2011)
- [60] SAHİNLER, S., En küçük kareler yöntemi ile doğrusal regresyon modeli
oluşturmanın temel prensipleri, Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat
Fakültesi Dergisi, 5(1-2), pp 57-73, 2000.

- [61] ÖZDAMAR, K., Paket programlar ile istatistiksel veri analizi, Kaan kitap evi, pp 137-210.
- [62] BİÇKİCİ, B., Çok değişkenli varyans analizi ve çoklu doğrusal regresyon analizinin uygulamalı olarak karşılaştırılması, Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [63] YILDIZ, N., AKBULUT, Ö., BİRCAN, H., İstatistiğe giriş uygulamalı temel bilgiler çözümlü ve cevaplı sorular, Aktif Yayınevi, Sayfa 247, 2002.
- [64] LEVINE, D.M., RAMSEY, P.P., SMIDT, R.K., Applied statistics for engineers and scientists, Prentice Hall, 2001.
- [65] WEISBERG, S., Applied linear regression, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [66] DRAPER, N.R., SMITH, H., Applied regression analysis, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [67] MATLAB, Statistics Toolbox 7 User's Guide, The MathWorks Inc.
- [68] <http://www.yildiz.edu.tr/~nguzel/...>
Egri_Uydurma_ve_En_Kucuk_Kareler_Yontemi.docx (Erişim Tarihi: 26.10.2011)
- [69] UCUN, L., Modele dayalı öngörülü kontrol algoritmaları, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [70] FRANKO, S., İnsansız helikopterin model öngörülü kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010
- [71] CAMACHO, E.F., BORDONS, C., Model predictive control, Springer-Verlag London, 2004.

- [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] AGACHI, P. S, Model based control : Case studies in process engineering, Wiley-VCH., 2006

ÖZGEÇMİŞ

Sedat İRİÇ 1976 yılında Sakarya'da doğdu. 1993 yılında Adapazarı Atatürk Lisesi'nden mezun oldu. 1993 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne girdi. 1998 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl Sakarya Üniversitesinde Makine Tasarım İmalat bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2001 yılında yüksek lisans programından mezun olduktan sonra aynı yıl, Makine Tasarım İmalat bilim dalında Doktora eğitimine başladı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen bu bölümde görevine devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.