

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEM
TANILAMA YÖNTEMLERİ İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erman ÇEVİKKALP

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL

HAZİRAN 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEM
TANILAMA YÖNTEMLERİ İLE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Erman ÇEVİKKALP
503031604**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL

HAZİRAN 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503031604 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Erman ÇEVİKKALP, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEM TANILAMA YÖNTEMLERİ İLE MODELLENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Emin Faruk KEÇECİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr.Erkan KAPLANOĞLU
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2017**
Savunma Tarihi : **07 Haziran 2017**





Eşime ve çocuğuma,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında desteğini eksik etmeyen, her aşamada anlayış gösteren, bilgi ve tecrübesini benimle paylaşan saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL'a emekleri ve anlayışı için sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında bilgi paylaşımı ve tüm yardımları için Arş. Gör. Dr. Salih GÜLŞEN'e teşekkür ederim.

Bu zorlu tez sürecinde benden desteğini bir an için bile esirgemeyen sevgili eşim Dr. Senem AKKUŞ ÇEVİKKALP'e, oğlum Anıl Mert'e, tüm arkadaşlarıma ve aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mayıs 2017

Erman ÇEVİKKALP
Makina Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvi
ÖZET	xix
SUMMARY	xxii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
2. ÇİMENTO ENDÜSTRİSİNDE ÖĞÜTME PROSESİ.....	9
2.1 Çimentonun Tarihçesi ve Genel Bilgiler.....	9
2.2 Çimento Üretim Aşamaları ve Enerji Tüketimi Dağılımı	9
2.3 Çimento Öğütme Prosesi.....	10
3. DOĞRUSAL SİSTEM TANILAMA.....	15
3.1 Genel Doğrusal Model	15
3.1.1 AR model	16
3.1.2 ARX model	16
3.1.3 ARMAX model.....	17
3.1.4 Box-Jenkins model.....	17
3.1.5 Output-Error model	18
4. DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEM TANILAMA.....	19
4.1 NARX (Nonlinear AutoRegressive with Exogenous inputs) Modelleri	19
4.1.1 Giriş.....	19
4.2 Hammerstein-Wiener Modelleri.....	20
4.2.1 Giriş.....	20
4.2.2 Hammerstein model	22
4.2.3 Wiener model	23
4.2.4 Wiener-Hammerstein model	23
4.2.5 Hammerstein-Wiener model	24
4.3 Yapay Sinir Ağları (Neural Network) Modelleri	25
4.3.1 Biyolojik nöron	26
4.3.2 Yapay nöron	27
4.3.3 Yapay sinir ağlarının yapısı	28
4.3.4 Yapılarına Göre yapay sinir ağları	29
4.3.4.1 İleri beslemeli tek katmanlı ağlar	29
4.3.4.2 İleri beslemeli çok katmanlı ağlar	29
4.3.4.3 Geri beslemeli ağlar	30
4.3.5 Yapay sinir ağlarında öğrenme algoritmaları.....	31
4.3.5.1 Yapay sinir ağlarında danışmanlı öğrenme.....	31

4.3.5.2 Yapay sinir ağlarında danışmansız öğrenme.....	32
5. GENETİK ALGORİTMA OPTİMİZASYONU	33
5.1 Giriş	33
5.2 Genetik Algoritmanın Elemanları	34
5.2.1 Seleksiyon (Selection / Reproduction).....	34
5.2.2 Çaprazlama (Crossover).....	34
5.2.3 Mutasyon (Mutation).....	34
5.2.4 Genetik algoritmaların çalışma prensibi	35
5.3 Genetik Algoritmanın Diğer Yöntemlerden Farkı	36
6. ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİ MODELLEME ÇALIŞMALARI	37
6.1 Veri Toplama İşlemleri.....	37
6.2 Verinin Hazırlanması (Data Preprocessing).....	38
6.2.1 İncelik (blaine) değerlerinin elde edilmesi.....	38
6.2.2 Verilerin ölçeklendirilmesi (Scaling)	39
6.2.3 Verilerin filtrelenmesi (Filtering).....	39
6.3 Başarım Performans Ölçütleri	40
6.3.1 Hataların ortalama kare kökü [root mean square error (rmse)].....	40
6.3.2 Pearson korelasyon katsayısı (pearson correlation coefficient)	40
7. ELDE EDİLEN MODELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	41
7.1 Çimento Öğütme Prosesinin ARX (AutoRegressive with exogenous terms) ve ARMAX (Autoregressive–moving-average with exogenous terms) ile Modellenmesi	41
7.2 Çimento Öğütme Prosesinin NARX (Nonlinear AutoRegressive with exogenous terms) ile Modellenmesi	45
7.3 Çimento Öğütme Prosesinin Hammerstein-Wiener ile Modellenmesi	48
7.4 Çimento Öğütme Prosesinin Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Modellenmesi.....	53
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	59
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	67

KISALTMALAR

HOKK	: Hataların Ortalama Kare Kökü
RMSE	: Root Mean Square Error
YSA	: Yapay Sinir Ağları
BODOM	: Blok Odaklı Doğrusal Olmayan Modellerin
LTI	: Linear time-invariant
GA	:Genetik Algoritma
OE	: Output Error
LQR	: Linear–quadratic regulator
LM	:Levenberg-Marquardt





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: Çimento üretiminde ton başına ortalama maliyet dağılımı.	1
Çizelge 2.1: Çimento öğütme prosesi elemanlarına ait parametre ve birim tablosu. .	13
Çizelge 7.1: ARX ve ARMAX model yapılarına ait parametreler.	42
Çizelge 7.2: ARX/ARMAX model yapılarına ait parametrelerin değişken sayıları. .	42
Çizelge 7.3: Eniyileme ile bulunan ARX/ARMAX parametreleri.	43
Çizelge 7.4: NARX model yapısına ait parametreler.	46
Çizelge 7.5: NARX model yapısına ait parametrelerin değişken sayıları.	46
Çizelge 7.6: Eniyileme ile bulunan NARX parametreleri.	47
Çizelge 7.7: Hammerstein-Wiener model yapısına ait parametreler.	49
Çizelge 7.8: Hammerstein-Wiener model yapısına ait parametrelerin değişken sayıları.	49
Çizelge 7.9: Eniyileme ile bulunan NARX parametreleri.	50
Çizelge 7.10: YSA Modellerinin başarımlar değerleri tablosu.	55
Çizelge 8.1: Sistem modelleri için eniyileme yapılması gerekli parametre sayısı.	60
Çizelge 8.2: Elde edilen modellerin başarımlar değerleri karşılaştırma tablosu.	60



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Breusegem ve arkadaşlarının çimento değirmeni sistemi [5].	3
Şekil 1.2: Breusegem ve arkadaşlarının 1996'da gerçekleştirdikleri çalışmanın değirmen şeması [7].	4
Şekil 1.3: Magni ve arkadaşlarının 1999 yılında gerçekleştirdikleri çalışma [8].	5
Şekil 1.4: Topalov ve Kaynak'ın tasarladığı sistemin şematik gösterimi.	6
Şekil 1.5: Subbaraj ve Anand'ın genetik algoritma yardımı ile modelin bulanık mantık denetleyicisini oluşturan sistemin blok diyagramı [19].	7
Şekil 2.1: Çimento üretim aşamalarının enerji tüketimleri.	10
Şekil 2.2: Çimento değirmeni hattı.	12
Şekil 3.1: Genel-Doğrusal model yapısı.	15
Şekil 3.2: AR model yapısı.	16
Şekil 3.3: ARX model yapısı.	17
Şekil 3.4: ARMAX model yapısı.	17
Şekil 3.5: Box-Jenkins model yapısı.	18
Şekil 3.6: OE model yapısı.	18
Şekil 4.1: Hammerstein ve Wiener BODOM yapıları.	21
Şekil 4.2: Hammerstein-Wiener (NLN) ve Wiener-Hammerstein (LNL).	22
Şekil 4.3: Hammerstein blok diyagramı.	23
Şekil 4.4: Wiener blok diyagramı.	23
Şekil 4.5: Wiener-Hammerstein (LNL) blok diyagramı.	24
Şekil 4.6: Hammerstein-Wiener (NLN) blok diyagramı.	25
Şekil 4.7: Biyolojik sinir hücresi.	27
Şekil 4.8: Yapay sinir hücresi.	28
Şekil 4.9: İleri beslemeli tek katmanlı yapay sinir ağı [63].	29
Şekil 4.10: İleri beslemeli çok katmanlı yapay sinir ağları.	30
Şekil 4.11: Geri beslemeli yapay sinir ağı.	31
Şekil 4.12: Danışmanlı öğrenme yapısı [42].	31
Şekil 4.13: Danışmansız öğrenme yapısı.	32
Şekil 5.1: Genetik algoritmaya ait akış diyagramı.	35
Şekil 7.1: ARX ve ARMAX modelleri ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması.	44
Şekil 7.2: ARX ve ARMAX modelleri için yüzde hata değerleri.	44
Şekil 7.3: NARX (Nonlinear AutoRegressive with exogenous terms) model yapısı.	45
Şekil 7.4: NARX modeli ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması.	47
Şekil 7.5: NARX modeli için yüzde hata değerleri.	48
Şekil 7.6: Hammerstein-Wiener modelleri ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması.	51

Şekil 7.7: Hammerstein-Wiener modelleri için yüzde hata değerleri ve hataların kutu grafik gösterimi.	52
Şekil 7.8: Hammerstein-Wiener modelleri ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin ayrı ayrı grafiklerde karşılaştırılması.....	53
Şekil 7.9: YSA modeli ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 7.10: YSA için yüzde hata değerleri.	57





ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİNİN DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEM TANILAMA YÖNTEMLERİ İLE MODELLENMESİ

ÖZET

Çimento endüstrisi demir-çelik, kimya, petrokimya ve kağıt endüstrisi gibi enerji-yoğun bir endüstri olup yüksek bir enerji ihtiyacı vardır. Günümüzde pek çok çimento üreticisinin üretim kapasiteleri enerji talebi ile sınırlı kalmakta, üretim kapasitesini artırmak ancak ve ancak enerji ihtiyacının azaltılması ile mümkün olmaktadır.

Çimento üretim proseslerinin tamamı incelendiğinde en fazla enerji tüketiminin çimento öğütme prosesinde olduğu görülmektedir, ancak çimento öğütme prosesi yapısı itibarıyla stokastik bir prosestir. Çimento kalitesi, bir çok işletme ve proses parametresine bağlı olarak değişmektedir, bu parametreler hem zaman içinde hem de sistemden sisteme değişkenlik gösterebilmektedir. Bu parametreler arasında bilyalı değirmenin bilya boyu ve tonajı, besleme boyut dağılımı, besleme hızı, besleme tonajı, malzeme sertliği ve tane boyu dağılımı, değirmen ve ayrıştırıcıdaki (separatör) havanın hızı sayılabilir. Çimento kalitesinde istenen değer ve enerji tüketimi bu değişkenlerin en uygun değerleri almasıyla ve devrenin en iyi biçimde kontrol edilmesiyle mümkündür. Bahsi geçen parametreler nedeniyle sistemin deterministik bir modelinin çıkarılması pek mümkün değildir, dolayısıyla sistem tanılama gibi deneysel yöntemler sisteme ait en iyi modelin tek alternatifi olarak durmaktadır.

Bu çalışmada, çimento endüstrisinde çimento öğütme prosesinin doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler ile modellenmesi incelenmiştir. Çimento öğütme prosesi öncelikle sistem tanılamada ilk olarak uygulanması gereken doğrusal parametrik bir model yapısı olan ARX ve ARMAX model ile tanılanmıştır. Elde edilen başarımın yetersiz görülmesi ile sistem sırasıyla NARX, Hammerstein-Wiener ve yapay sinir ağları (YSA) ile modellenmiştir.

Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan modelleme çalışmalarında sistem bir bütün olarak modellenmeye çalışılmıştır. Sistemin modelinde beş giriş ve tek çıkış yer

aldığı için çimento öğütme prosesinin her bir modeli için on ile onaltı arasında bilinmeyen parametrenin kestirilmesi gerekmiştir. Parametrelerin ve çözüm uzayının büyüklüğünden dolayı bu parametrelerin eniyileme çalışmalarında Genetik Algoritma (GA) Optimizasyon Yöntemi kullanılmıştır.

Birinci bölümde tez hakkında genel bilgi verilmekte, tezin amacı ve daha önce yapılan literatür çalışmalarına yer verilmektedir.

İkinci bölümde çimento, çimento üretim aşamaları ve üretim aşamalarında enerji tüketimi dağılımı hakkında genel bilgi verilmektedir. Bölümün sonuna doğru, tez çalışması boyunca modelleme çalışmaları yapılacak olan çimento öğütme prosesi tanıtılmaktadır.

Üçüncü ve dördüncü bölümlerde, doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik sistemlerin tanımlanmasından bahsedilmektedir. Doğrusal sistem tanımlama modelleri olarak AR, ARX, ARMAX, BJ ve OE modellerinin yapıları anlatılmaktadır. Dördüncü bölümde ise doğrusal olmayan sistem tanımlama modellerinden NARX, Hammerstein-Wiener ve yapay sinir ağlarının (YSA) genel tanımı ve özellikleri hakkında bilgi verilmektedir.

Beşinci bölümde parametrelerin eniyileme çalışmalarında kullanılan Genetik Algoritma (GA) Optimizasyon Yöntemi hakkında bilgi verilmektedir.

Altıncı bölümde çimento öğütme prosesi modelleme çalışmalarına geçilmeden önce verilerin toplanması, hazırlanması ve modellerin başarımların ölçütleri anlatılmaktadır.

Yedinci bölümde çimento öğütme prosesi farklı modelleme şekillerine göre incelenmektedir. Modellerle ilgili sonuçlar elde edilmekte ve karşılaştırılmaktadır.

Son bölüm olan sekizinci bölümde, kısaca çalışma boyunca elde edilen sonuçlar bir araya getirilmekte ve özetlenmektedir. Ayrıca bu sonuçlar karşılaştırılarak bir özet halinde çalışmanın katkısı açıklanmaya çalışılmaktadır.



NON-LINEAR MODELING OF CEMENT GRINDING PROCESS

SUMMARY

The cement industry is an energy-intensive industry like chemical, iron-steel, petrochemicals and paper industries and has high-energy demands. Today, the cement production capacities of many cement producers are limited to their energy consumption. It is possible to increase the production capacity but only if the energy consumption of process is reduced.

When all of the cement production processes of the cement industry are examined, it can be seen that the most energy consumption is in the cement grinding process but it is a stochastic process due to the presence of several sources of noise and fluctuations. The quality of cement varies depending on many operating and process parameters, which may vary from system and time. These parameters include the ball size, feed size distribution, feed rate and tonnage, material hardness and grain size distribution and the speed of air in the mill and separator. The desired value of cement quality and energy consumption is possible by taking the most suitable values of these variables and by controlling the best way of the system. It is not possible to derive a deterministic model of the system because of the parameters that are covered by the bet, so experimental methods such as system identification stand as the only alternative of the best model of the system.

In this study, the modeling of the cement grinding process by linear and non-linear methods is investigated in the cement industry. The cement grinding process was first described by the ARX and ARMAX models, which are linear parametric model structures that must be applied first in system diagnosis. The system was modeled with NARX, Hammerstein-Wiener and artificial neural networks (ANN), respectively, with the result being considered inadequate.

In both linear and nonlinear modeling studies, the system was modeled as a whole. Since there are five inputs and one output in the system model, unknown parameters between ten and sixteen must be estimated for each model of the cement grinding

process. Because of the parameters and the size of the solution space, Genetic Algorithm (GA) Optimization Method has been used for optimization of these parameters.

In the first part, general information is given about the thesis, the aim of the thesis and previous literature studies are given.

The second part gives general information about cement, cement production stages and energy consumption distribution in production stages. At the end of the chapter, the cement grinding process, in which modeling studies are carried out during the thesis work, is introduced.

In the third and fourth chapters, the description of linear and nonlinear dynamical systems is mentioned. As the linear system diagnosis models, AR, ARX, ARMAX, BJ and OE models are explained. In the fourth part, nonlinear system identification models are given information about NARX, Hammerstein-Wiener and artificial neural networks (ANN).

In the fifth section, we give information about Optimization Method of Genetic Algorithm (GA), which is used in optimization studies of parameters.

In the sixth chapter, before the cement grinding process modeling studies are started, the collection, preparation and performance criteria of the models are explained.

In the seventh chapter, the cement grinding process is investigated according to different modeling patterns. Results related to models are obtained and compared.

In the last chapter, chapter 8, briefly the results obtained during the study are brought together and summarized. In addition, these results are compared and the contribution of working in a summary is tried to be explained.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Çimento fabrikasındaki ana proseslerden biri olan çimento öğütme prosesinin görevi, klinker ve arzu edilen ölçüde alçı ve katkı maddesinin karıştırılıp öğütülerek, istenen incelikte homojen hale getirilmesini sağlamaktır. Bu prosesin sonunda elde edilen çimento, ürün paketleme hattına sevk edilir. Günümüzde çimento tüketimi dünyada yıllık 4,3 milyar ton, Türkiye’de ise yaklaşık 72 milyon tondur. Bu oran her yıl dünyada %1, Türkiye’de ise %3,5 oranında artış göstermektedir [1, 2].

Çimento öğütme prosesi, enerji sarfiyatı yüksek bir prosestir ve dünya çapında toplam elektrik enerjisinin %2’si, endüstride kullanılan elektriğin ise %5’i çimento öğütme prosesinde kullanılmaktadır. Standart bir çimento üretim tesisinde 110 kWh/ton’luk bir enerji sarfiyatı gerçekleşmektedir ve sarfiyatın %30’u hammadde öğütme prosesinde, %40’ı da çimento öğütme prosesinde gerçekleşmektedir [1, 2]. Her bir ton çimento üretimi için hesaplanan ve Çizelge 1.1’de gösterilen ortalama maliyet dağılımı incelendiğinde enerji maliyetinin, toplam maliyetin %30’unu oluşturduğu görülmektedir [3]. Bu nedenle enerji verimliliği oldukça büyük önem arz etmektedir.

Çizelge 1.1: Çimento üretiminde ton başına ortalama maliyet dağılımı.

Maliyet	Toplam (%)
Enerji	30
Hammadde /Sarf Malzemesi	32
İşçilik, Bakım ve Diğer	26
Yıpranma	12
Toplam	100

Çimento fabrikasında enerji verimliliğini artırma ihtiyacı, çimento öğütme prosesi sırasındaen yüksek dolulukta ve hedeflenen incelik aralığında üretim yapılması gerekliliğini doğurmaktadır.

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği’nin 2016 yılı verilerine göre, Türkiye’nin yıllık çimento üretim kapasitesi yaklaşık 133 milyon tondur [4]. Halihazırda

kullanılan öğütme sistemlerinin verimliliğinin %10 kadar artırılmasının hem üretimde büyük miktarlarda artışa sebep olacağı, hem de önemli miktarlarda enerji tasarrufu sağlayacağı öngörülmüştür.

Operatör eğitiminin uzun soluklu bir süreç olmasının yanı sıra, sisteme hakim operatörler tarafından kullanılması durumunda dahi en yüksek dolulukta ve aynı zamanda da hedeflenen incelik değerlerinde sistemi çalıştırmak zorlayıcı bir işlemdir. Bundan dolayı, sistemin yüksek dolulukta ve hedeflenen çimento incelik değerlerinde operatör müdahalesinden bağımsız bir şekilde çalıştırılması oldukça büyük bir önem arz etmektedir.

Sistemin zaman gecikmeli bir sistem olması, sisteme beslenen hammaddenin fiziksel ve kimyasal yapısının değişken olması, çimento incelik değerini algılayan veya kontrol eden bir sistemin var olmaması, bilyalı değirmenin bilya boyu ve değişken olması sistemin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bunun yanısıra bilyalı değirmenin bilya boyu ve tonajı, besleme boyut dağılımı, besleme hızı, besleme tonajı, malzeme sertliği ve tane boyu dağılımı, değirmen ve separatörde havanın hızı gibi bir çok değişken sistemi stokastik bir yapıya sokmaktadır.

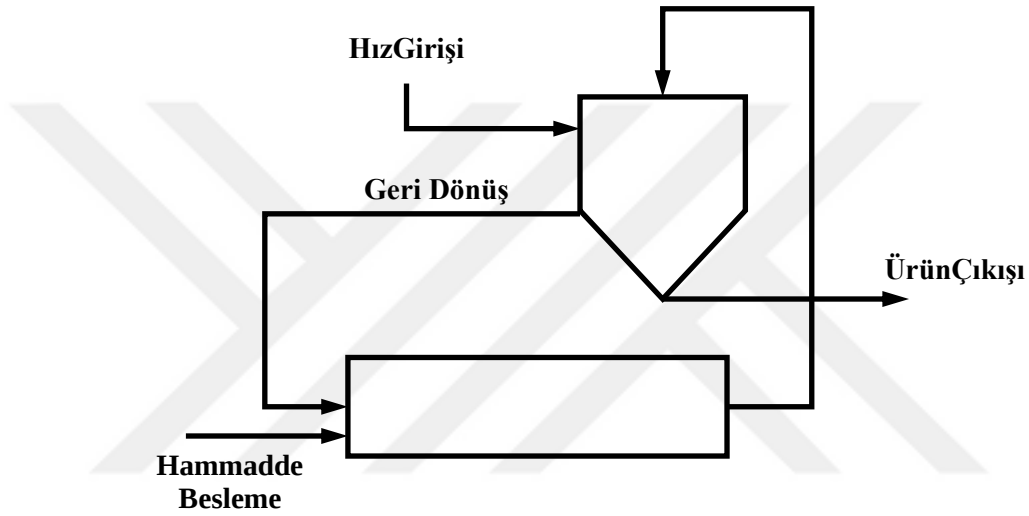
Bahsedilen nedenlerden ötürü bu tez çalışmasında, deterministik bir modelinin çıkarılması pek mümkün olmayan çimento öğütme prosesinin doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle sistem tanılama çalışmalarının yapılması amaçlanmaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

Çimento incelik değerinin kontrolü ve değirmen sistemlerinin modellenmesi konusunda literatürde bulunan çalışmalar, modern kontrol algoritmaları ile modelleme ve/veya kontrol, akıllı kontrol algoritmaları ile modelleme ve/veya kontrol ve hibrit sistemler şeklinde gruplandırılabilir.

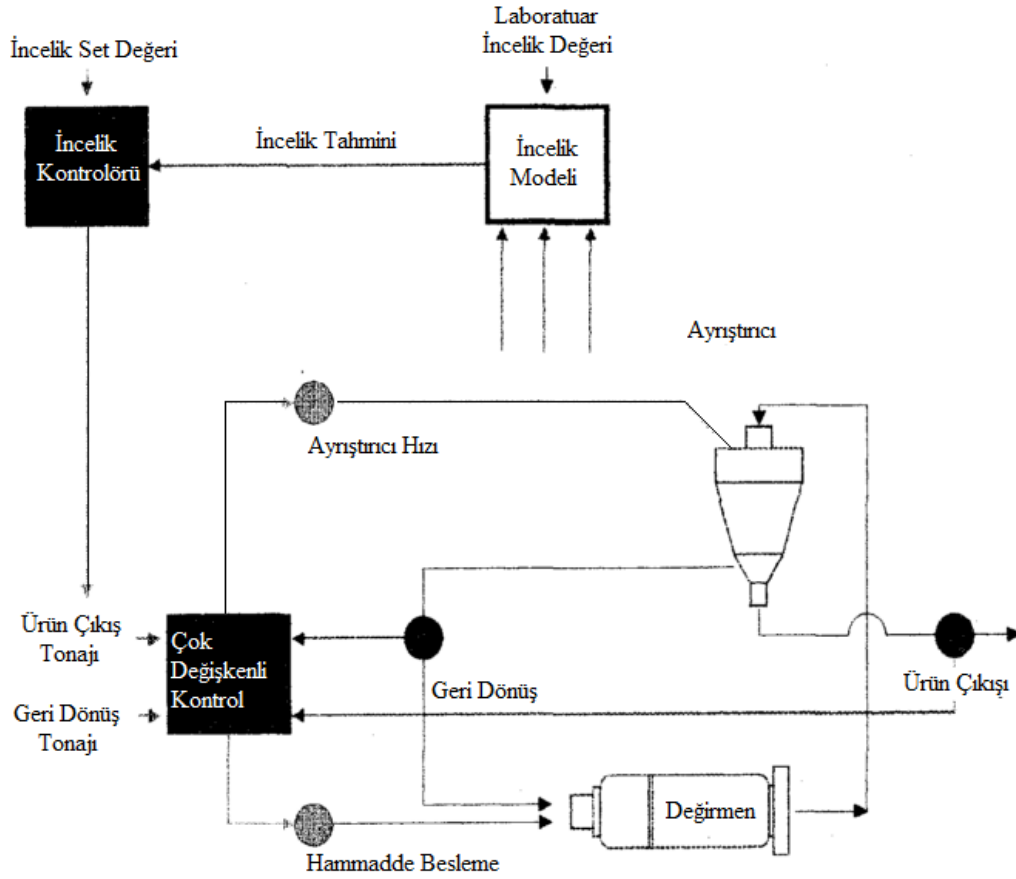
Literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde, ilk olarak, konvansiyonel kontrol uygulamalarının denendiği ancak çok giriş-çok çıkışlı sistemlerde bu kontrol uygulamalarının verimli çalışmadığının tespit edildiği görülmektedir. Bu uygulamaların denenmesinden sonra ise, modern kontrol algoritmaları kullanılarak modelleme ve kontrol sistemi tasarlanmaya başlanmıştır. Breusegem ve arkadaşlarının 1994 yılında gerçekleştirdiği çalışma, çimento değirmen otomasyonuna yönelik çok giriş-çok çıkışlı sistemden yola çıkılan ilk çalışma olarak

değerlendirilebilir (Şekil 1.1) [5]. Geri dönen çimento değerinden seperatör hızının veya besleme miktarının kontrolünün sıkıntılarında bahsedilen çalışmada, bu sıkıntıların geri dönen çimento ve çıkan ürün miktarının bir Linear Quadratic Regulator (LQR) tarafından besleme miktarı ve seperatör hızının ayarlanması ile çözülebileceği vurgulanmıştır. Bir fabrikadan alınan geri dönen çimento, seperator hızı, besleme miktarı ve ürün miktarı verilerinin MATLAB Identification Toolbox ile işlenmesiyle elde edilen sistem modeli doğrulanarak uygun, Linear Quadratic denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan bir PI kontrol ile karşılaştırılarak denetleyicinin verimliliği, gösterilmiştir.



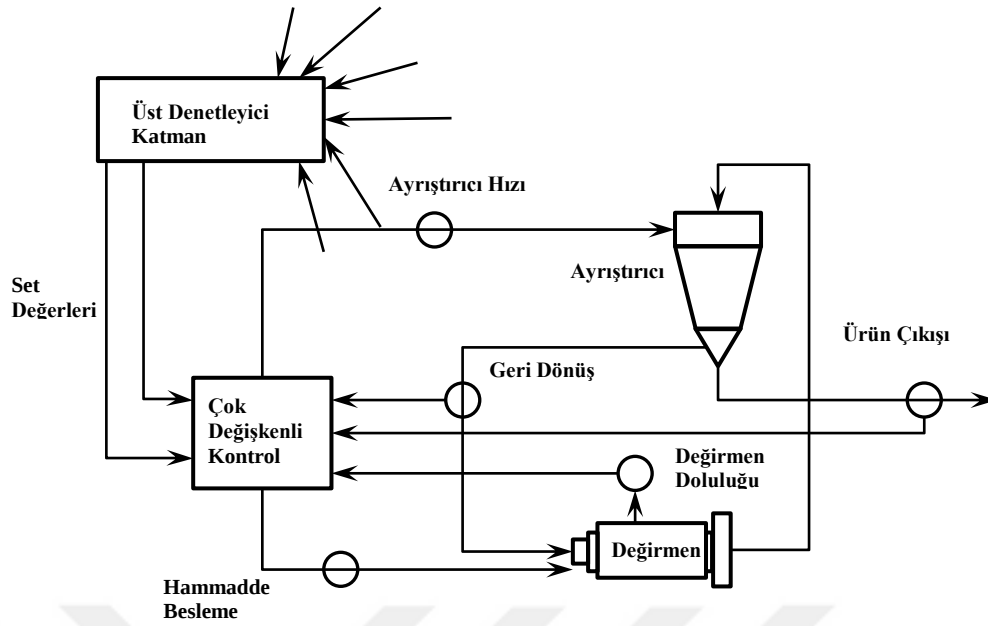
Şekil 1.1: Breusegem ve arkadaşlarının çimento değirmeni sistemi [5].

Haas ve arkadaşları ise 1995 yılında Linear Quadratic Regulator tabanlı sistemin verimli çalışmasına rağmen belirlenmiş çalışma sınırları dışında sistem veriminin düştüğünü göstererek bir Bulanık Mantık Kontrol sistemi önermiştir. Çalışma kapsamında Bulanık Mantık ile elde edilen sistemin çoğu durumda LQR tabanlı sistemden daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [6]. Breusegem ve arkadaşları 1996 yılında, daha önceki çalışmada elde ettikleri sistemi ani değişikliklere karşı daha dayanıklı hale getirmiş, kontrol mekanizmasına incelik kontrolünü ilave ederek incelik değerinin tahmin edilmesini sağlayan bir algoritmayı kontrol sistemine eklemiştir [7]. Böylece istenilen incelik değerine göre seperatör hızının ve besleme miktarının kontrolüne imkan sağlanmıştır. Tanımlanan kontrol sistemi Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2: Breusegem ve arkadaşlarının 1996'da gerçekleştirdikleri çalışmanın değirmen şeması [7].

1999 yılında aynı ekipten Magni ve arkadaşlarının, sistemin daha geniş kontrol alanında çalışabilmesi için doğrusal olmayan (non-linear) ve LQ-kontrol tasarlayarak önerdikleri modelde, değirmen doluluğunun tespit edilmesinin kritik olduğundan ve değirmen akımının ölçümünün çözüm üretmediği, değirmenin akımının beslendikten belirli bir zaman sonrasında düştüğünden bahsedilmiştir [8]. Çözüm olarak ise değirmenin sesinin dinlenmesi önerilmiştir. Çalışmada baz alınan değirmen sistemi, Şekil 1.3'te görülmektedir.

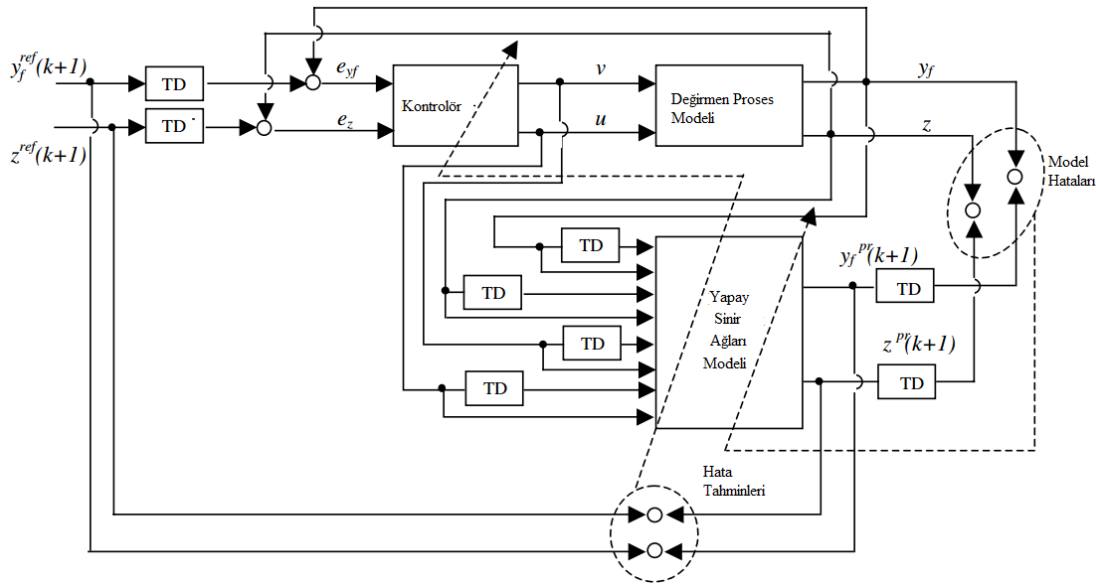


Şekil 1.3: Magni ve arkadaşlarının 1999 yılında gerçekleştirdikleri çalışma [8].

2001 yılında Grognaud ve arkadaşları, bu çalışmanın değirmenin çalışma aralığını genişletmesine rağmen değirmenin tıkanmasının önüne geçemediğini ve durum geri beslemeli (state feedback) bir denetleyicinin tasarlanmasıyla bu sorunu tamamen çözdüklerini belirtmişlerdir [9]. Çimento değirmeni sistemini değişken yapıli sistem (VSS) olarak kabul eden Dağcı ve arkadaşları, 2001 yılında Magni'nin 1999 yılında önerdiği doğrusal olmayan modele, ayarlanabilir öğrenme tekniği (ADALINE) ile bir denetleyici tasarlamışlardır. Bu sistemde, değirmen yükü, seperatörden dönen karışım miktarı ve ürün çıkışı değerleri besleme değeri ve seperatör hızı ile kontrol edilmeye çalışılmış ve benzetim ortamında başarı sağlanmıştır [10]. 2002'de Lepore ve arkadaşları, kapalı-çevrim öğütme sistemlerinde kullanılan modelleme çalışmalarını çimento değirmenleri için uygulayarak yeni ancak daha basit bir model yapısı ve parametrisasyonu önermiştir [11]. 2003 yılında Boulvin ve arkadaşları tarafından, değirmen sistemine oluşturulan doğrusal olmayan parametrik dağılımlı model yapısının bilinmeyen çoğu parametresi, gerçek bir çimento sisteminden elde edilen veriler aracılığıyla öngörülmüştür [12]. Bu modelde incelik için bir PI denetleyici ve besleme için de sirküle olan karışımın ölçülmesinde yaşanan zorlukları aşmak amacıyla, ileri beslemeli PI+P kaskat denetleyici tasarlanmıştır.

Modern kontrol teknikleri ile modelleme üzerine yapılan en son çalışmalardan olan ve değirmen farklılıklarından, bozuculardan ve ürün özelliklerinden bağımsız bir sistem modeli elde etmenin amaçlandığı Tsamatsoulis'in 2010 ve 2011 yılında

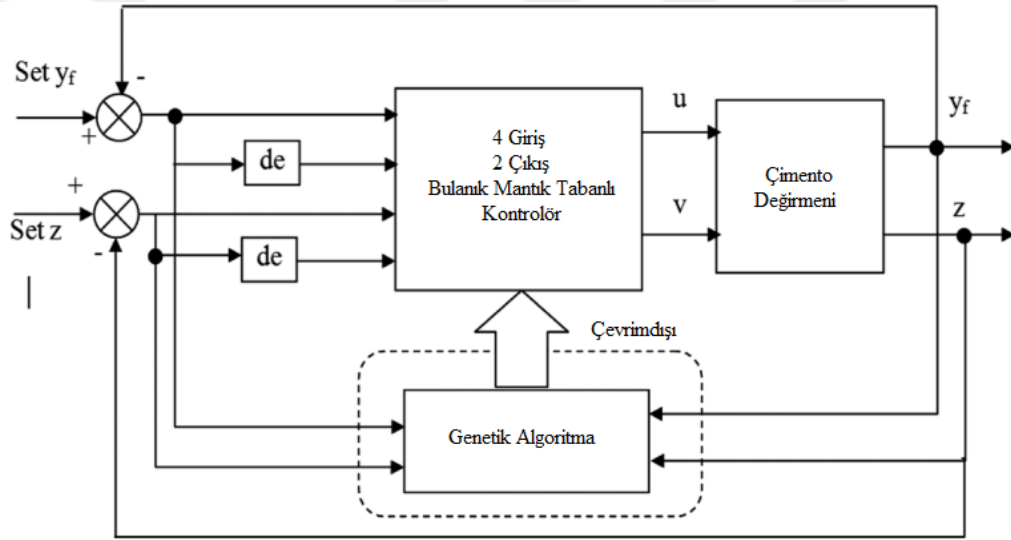
gerçekleştirdiği çalışmalarda beş farklı çimento değirmeninden farklı türdeki çimentolar için sistem parametre verileri toplanmış, parametrelerin belirsizlikleri belirlenmiş ve verilerden dinamik ve otoregresif modeller oluşturulmuştur [13, 14]. Oluşturulan modellerin ve denetleyicilerin benzetim ortamında test edilmesinin yanı sıra, akıllı sistemler ile modelleme ve kontrol çalışmaları da gerçekleştirilmiştir. 2003 yılında Radhakrishnan tarafından yapılan bir çalışmada, çimento incelik değerini tahmin eden bir Yapay Sinir Ağı modeli geliştirilmiştir. Topalov ve Kaynak ise çalışmalarında, Breusegem ve arkadaşlarının modern kontrol teknikleri ile gerçekleştirdikleri modelleme ve kontrol çalışmalarında çalışma aralığından çıkılmasının değirmende tıkanmaya neden olduğunu belirterek bunun önüne geçecek bir adaptif yapay sinir ağı yapısı tasarlamışlardır [15, 16]. Tasarlanan bu sistem ile kesin bir model oluşturma gereksinimi ortadan kalkmakta, sistemin kendi modelini kendi öğrenmesi sayesinde de bozucular ve diğer sistem belirsizlikleriyle daha kolay başedilmesisağlanırken kayan kipli bir öğrenme algoritması ile de yapay sinir ağlarının çevrimiçi adaptasyonu sağlanabilmektedir. Bu sistem, Şekil 1.4'te gösterilmiştir.



Şekil 1.4: Topalov ve Kaynak'ın tasarladığı sistemin şematik gösterimi.

Avşar tarafından 2006 yılında gerçekleştirilen tez çalışmasında, yapay sinir ağları ve bulanık mantık kullanılarak çimento değirmeni işletme parametreleri ile incelik değeri arasındaki ilişki modellenmiştir [17]. Bu modellerde giriş değişkenleri olarak devir yüzdesi, falofon yüzdesi ve yükselticiden (elevatör) ayırıcıya (separatör) giden maddenin miktarını gösteren yükseltici (elevatör) akımı kullanılmış ve çıkış

değişkeni olarak da elek üstü değeri olan 32 mikrometre eleğin üzerinde kalan ürünün ağırlıkça yüzdesi (incelik) alınmıştır. Subbaraj ve Anand tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada, çimento değirmeni gibi doğrusal olmayan sistemlerde bulanık mantık algoritmalarının modern kontrol uygulamalarından daha verimli çalışabileceği ancak bu tür karmaşık sistemlerin denetleyicisini bulanık mantıkla oluşturmanın zor olacağı belirtilmiştir. Dolayısıyla, bulanık mantık kontrol sistemi genetik algoritmaların yardımıyla tasarlanmış ve bir çimento değirmeni benzetim sistemi üzerinde oluşturulan denetleyici ile diğer kontrol sistemleri denenerek sonuçları karşılaştırıldığında genetik algoritma ile oluşturulan bulanık mantık kontrol sisteminin diğer denetleyicilere göre başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiştir [18, 19]. Çalışmaya ait kontrol mekanizması Şekil 1.5’de verilmiştir.



Şekil 1.5: Subbaraj ve Anand’ın genetik algoritma yardımı ile modelin bulanık mantık denetleyicisini oluşturan sistemin blok diyagramı [19].



2. ÇİMENTO ENDÜSTRİSİNDE ÖĞÜTME PROSESİ

2.1 Çimentonun Tarihçesi ve Genel Bilgiler

İnsanlık tarihinde uygarlıkların oluşumundan itibaren taşları birarada tutacak ve onları katı şekilde muhafaza edecek bir malzeme aranmıştır. İlk defa Asurlular ve Babilliler tarafından kilin bu amaçla kullanıldığı bilinmektedir. Devam eden uygarlık tarihinde sırasıyla Mısırlılar Piramit gibi devasa yapıların inşasında kireç ve alçıtaşı harcını kullanmışlar, Yunanlılar da bu yapıyı daha da geliştirmişlerdir. Günümüzde kullandığımız çimento yapısı benzeri bir yapı ise ilk defa Romalılar tarafından insanlığın kullanımına sunulmuştur [20].

Uygarlıkların gelişiminde oldukça büyük bir öneme sahip olan çimento endüstrisi günümüzde de hala dünya ekonomisindeki bu önemli yerini korumaktadır. Günümüzde çimento günlük yaşamımızda yoğun olarak kullandığımız bir malzemedir, öyle ki dünyada en çok tüketilen maddelerde sudan sonra ikinci sırada yer almaktadır. Bir başka deyişle dünyanın en çok kullanılan insan yapımı malzemesidir [21]. Ancak insan yapımı bir malzemenin bu kadar çok kullanımı beraberinde yüksek bir enerji ihtiyacını doğurmaktadır, çünkü çimento endüstrisi, demir-çelik, petrokimya ve kağıt endüstrisi gibi enerji-yoğun bir endüstridir [22].

Tipik bir modern çimento fabrikası, çimento üretiminde ton başına yaklaşık olarak 110-120 kWh enerji tüketmektedir [23].

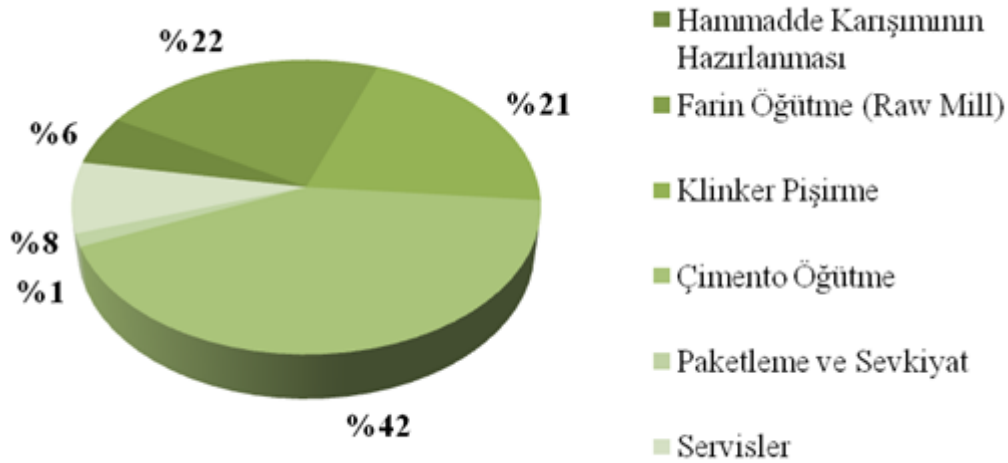
2.2 Çimento Üretim Aşamaları ve Enerji Tüketimi Dağılımı

Çimento üretimi temelde çimento üretim prosesi öncesinde hammadde karışımının hazırlanması, farin öğütme (raw mill), klinker pişirme, çimento öğütme, paketleme ve sevkiyat aşamalarından oluşmaktadır.

Hammadde karışımının hazırlanması aşaması çimento üretiminin ana hammaddeleri olan kireçtaşı, kil ile birlikte demir cevheri, boksit, kum v.b. yardımcı malzemelerin ocak işletmesinden fabrika sahasına sevk edilmesinden, bir ön karıştırma

(homojenizasyon) ve bazı kırma işlemlerine tabi tutulmasından oluşmaktadır. Sonrasında bu karışım farin değirmeninde (raw mill) öğütülerek farin adı verilen ince bir toz haline getirilmekte ve devam eden aşamalarda klinker eldesi için homojenize edilerek silolarda stoklanmaktadır. Stoklanan bu farin daha sonra silolardan ön ısıtıcıya gönderilmekte ve ön ısıtıcıda fırından yükselen sıcak gaz ile ön kalsilasyon işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlem sonrasında fırın içi sıcaklığın 1500-1600°C'lere kadar çıktığı bir ortamda sinterlenmekte ve fırın çıkışında bir soğutma ünitesinde ani olarak soğutularak klinker stoğuna aktarılmaktadır. Çimento öğütme prosesinde ise klinker, belirli ölçülerdeki alçı ve katkı maddeler ile bir karışıma tabi tutularak istenen homojenlikte ve incelikte bir yapıya gelene kadar öğütülmektedir.

Bütün bu çimento üretim prosesi, çimentonun üretiminde yüksek bir enerji ihtiyacı olduğunu göstermektedir. İlgili üretim aşamalarının enerji kullanım oranları Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Çimento üretim aşamalarının enerji tüketimleri.

Günümüz ekonomik şartlarında firmaların pazar paylarını arttırmaları veya hatta sadece korumaları hem ürün kalitesini mümkün olduğunca yüksek tutmalarını hem de maliyetlerini artırmamalarını, hatta düşürmeye çalışmalarını gerektirmektedir.

2.3 Çimento Öğütme Prosesi

Bir çimento öğütme prosesi temelinde iki ana işlevi yerine getirmektedir.

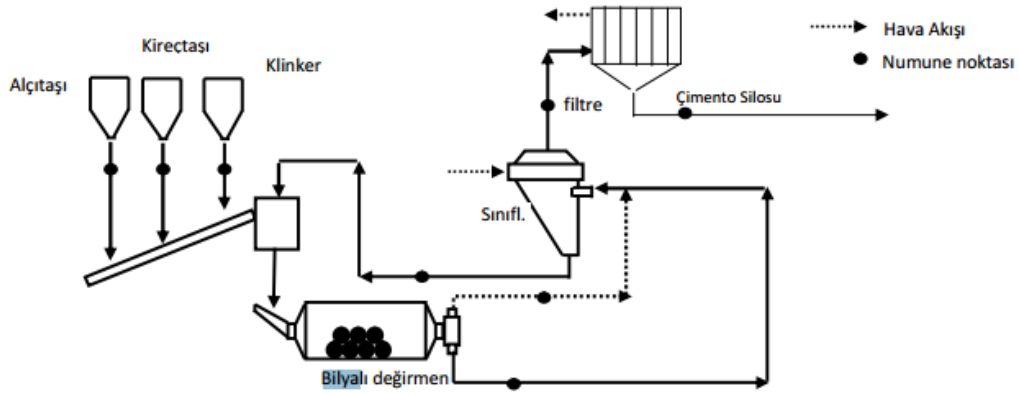
- Çimentonun su ile reaksiyonu için ihtiyaç duyduğu yeterli miktardaki yüzey alanını meydana getirmek

- Reaksiyona karışımındaki bütün partiküllerin katılabileceğinden emin olacağı boyuta kadar karışımı inceltmek

Çimento öğütme prosesinde harmanlanan karışımın istenen özellikleri sağlaması için aşağıdaki adımları takip eder:

- **Besleme Hattı** : Çimento klinkeri, alçıtaşı ve katkı maddelerinin ilgili oranlarda karıştırılarak bilyalı değirmene bir konveyör hattı ile aktarılmasıdır.
- **Bilyalı Değirmen** : Öğütme ortamı çelik bilyalardan oluşan değirmen tipidir. Besleme hattı ile geri besleme hattından gelen karışımın değirmenin içinde yer alan bilyalar ile noktasal teması sonucunda karışımın istenilen inceliğe getirilmesini sağlamaktadır.
- **Yükseltici (Elevatör)** : Bilyalı değirmenden çıkan inceltilmiş çimento karışımı düşeyde yükseltici (elevatör) aracılığı ile ayırıştırıcıya (separatör) gönderilir.
- **Ayrıştırıcı (Separatör)** : Ayrıştırıcı, bilyalı değirmen çıkışından gelen çimento karışımı içindeki partikülleri boyutlarına göre ayıran bir parçadır. Çimentonun istenilen tane boyutunda öğütülen kısmı ayırıştırıcının dönme hızına göre ayrılmakta ve siloya gönderilmektedir. Bu sırada iri taneler ise tekrar öğütülmek üzere değirmene gitmektedir.
- **Geri Besleme Hattı** : İstenen incelikte öğütülmemiş olan kısım separatörden ayrılarak geri besleme hattına gelmekte ve buradan tekrar bilyalı değirmene öğütme işlemine gönderilmektedir.

Çimento öğütme prosesine ait kısımlar Şekil 2.2’de görülebilir.



Şekil 2.2: Çimento değirmeni hattı.

Çimento öğütme prosesinde ilk olarak çimento klinkeri, alçıtaşı ve katkı maddelerinin ilgili oranlarında karışımı besleme hattı olarak adlandırılan bir konveyör sistemi ile bilyalı değirmenin girişine yönlendirilmektedir. Buradan değirmene beslenen malzemeler, değirmenin içinde değişik çaplardaki bilyalar vasıtasıyla noktasal temas ile öğütülmektedir. Değirmen kendi etrafında döndükçe, karışım bilyalar arasında öğütülmekte ve değirmenin çıkışına doğru homojen bir şekilde karışarak hareket etmektedir. Daha sonra bu karışım hava akımı ile yükselticiye (elevatör) aktarılmakta ve daha sonra yükseltici (elevatör) vasıtasıyla ayırıştırıcıya (seperatör) gönderilmektedir.

Burada ince partiküller kütlelerinin düşük olmalarından dolayı ayırıştırıcının (seperatör) oluşturduğu siklonun merkezkaç kuvvetini yenememekte ve çıkışa son ürün olarak sevkedilmektedirler. Kalın partiküller ise bir geri besleme hattı vasıtası öğütme işlemine devam etmek için bilyalı değirmene tekrar aktarılmaktadır.

Geri dönen karışımın miktarı geri besleme hattı üzerinde ölçülmekte ve değere göre besleme hattının göndereceği miktar belirlenmektedir. Bunun belirlenmesi hem değirmenin doluluğunun bilinmesi hem de geri dönüş hattındaki karışımın miktarının bilinmesi ile mümkündür. Özellikle sistemin doluluk oranı, değirmenin veya yükselticinin (elevatör) çektiği akımın ölçülmesi veya falafon adı verilen ses ile değirmen doluluğunu ölçmeye çalışan cihazlar ile gözlemlenebilmektedir.

Çimento üretiminde takip edilmesi gereken en önemli ve en kritik parametrelerden biri olan çimentonun incelik değeri, çalışma esnasında çoklu elek sistemleri ile tane boyu dağılımı gözlemlenerek elde edilmektedir. Çalışma sonrasında ise blaine

değerinin yani 1 gr malzemenin kapladığı alanın sayısal ifadesinin ölçülmesi ile yapılmaktadır. Çoklu elek sistemleri ile yapılan tane boyu dağılımı gözlemlenmesinde,üründen alınan bir miktar numune 32,45 ve 90 mikronluk farklı gözeneklere sahip üç farklı elekten geçirilmekte ve eleklerdeki tane miktarları ile tane boyunun dağılımının elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu dağılım hem tanelerin yüzey alanını hem de homojenliğini göz önüne alarak elde edildiği için numunenin uygunluğu hakkında bir yol gösterici nitelik taşır, ancak çimentonun nihai incelik değeri sadece hassas şekilde blaine değerinin ölçümü ile belirlenebilmektedir. Blaine ölçüm cihazı, belirli ağırlıkta ve hacimdeki çimentonun içinden belirli miktarda havanın ne kadar sürede geçtiğini ölçen ve bu süreye karşılık gelen incelik değerini hesaplayan bir cihazdır. Blaine değeri ölçümü işlemide oldukça uzun süren bir işlem olduğu için sadece saat başı toplanan numuneler üzerinden alınabilmektedir.

Çizelge 2.1’de proses elemanları, parametreleri ve birimleri yer almaktadır.

Çizelge 2.1: Çimento öğütme prosesi elemanlarına ait parametre ve birim tablosu.

Proses Elemanı	Parametre	Birimi
Hammadde besleme hattı	Tonaj	Ton/saat
Geri besleme hattı	Tonaj	Ton/saat
Ayrıştırıcı (Separatör)	Devir	Devir/Dakika
Yükseltici (Elevatör)	Akım	Amper
Falafon	Doluluk Oranı	%
Son Ürün	İncelik Değeri	cm ² /gr



3. DOĞRUSAL SİSTEM TANILAMA

3.1 Genel Doğrusal Model

Bir sistem, genel doğrusal polinom modeli veya kısaca genel doğrusal model olarak da bilinen aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$y(n) = q^{-1}G(q^{-1}, \theta)u(n) + H(q^{-1}, \theta)e(n) \quad (3.1)$$

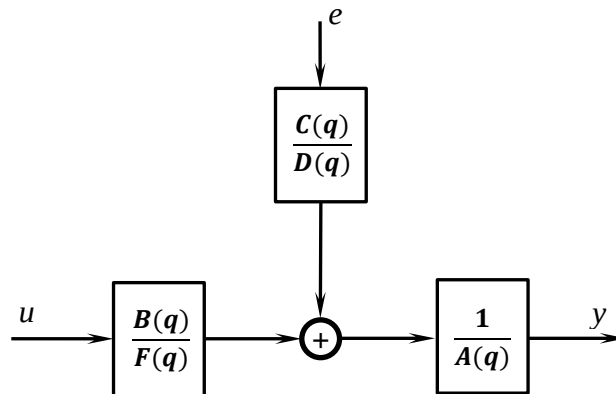
$u(n)$ ve $y(n)$ sırasıyla sistemin girişleri ve çıkışları

$e(n)$ sıfır-ortalama beyaz gürültü veya sistem bozucuları

$G(q^{-1}, \theta)$ Sistemin deterministik kısmının transfer fonksiyonu

$H(q^{-1}, \theta)$ Sistemin stokastik kısmının transfer fonksiyonu

Genel doğrusal model yapısı, hem sistem dinamiklerine hem de stokastik dinamiklere uygun bir yapıdadır (Şekil 3.1). Giriş ve çıkış arasındaki ilişki hakkında ilişkiyi deterministik transfer fonksiyonu sağlarken stokastik transfer fonksiyonu da çıkış sinyali üzerindeki bozucu etki hakkında bilgi vermektedir.



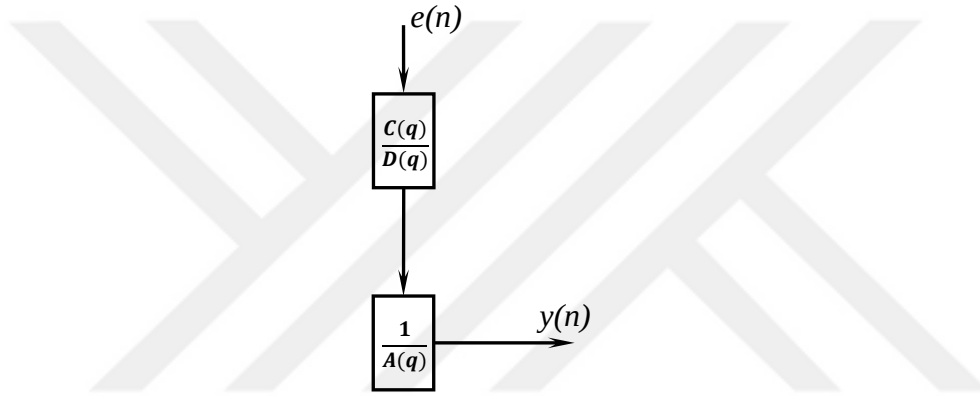
Şekil 3.1: Genel-Doğrusal model yapısı.

Genel doğrusal model yapısında yer alan $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$ veya $F(q)$ polinomlarının 1'e eşitlenmesi ile AR, ARX, ARMAX, Box-Jenkins ve output-error gibi daha basit modeller elde edilmektedir. Herbir modelin kendine göre avantajları

ve dezavantajları olmakla beraber modellenecek sistemin dinamiği ve gürültü karakteristiğine bağlı olarak en uygun model yapısı seçilmektedir.

3.1.1 AR model

AR model yapısında sistem sadece geçmiş çıkış değerlerine bağlı olarak modellenmekte ve hiçbir giriş değerine veya gürültüye yer verilmemektedir. Oldukça basit bu model yapısı nedeniyle sınırlı sayıda problemin çözümünde kullanılmaktadır. Genellikle zaman serileri analizinde karşımıza çıkan AR model, Şekil 3.2’de de görülebileceği üzere yapısı itibariyle aslında sistemin modellenmesi değil, sinyalin modellenmesidir.



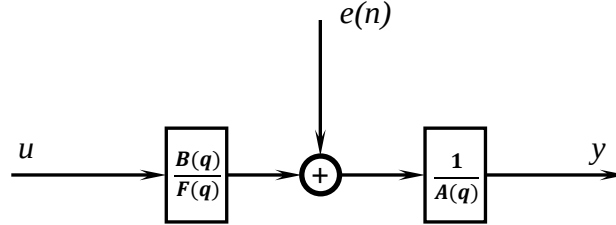
Şekil 3.2: AR model yapısı.

3.1.2 ARX model

Şekil 3.3'te gösterilen ARX modeli, uyarı sinyalini içeren en basit modeldir. Analitik formdaki lineer regresyon denklemlerinin çözülmesi ile elde edildiği için ARX modelinin tahmini, polinom kestirim yöntemleri içinde en verimli olanıdır. Üstelik bulunan çözüm de tekildir. Başka bir deyişle, çözüm her zaman değer fonksiyonunun minimumunu karşılar. Bu nedenle ARX modeli, özellikle model mertebesi yüksek olduğu durumlarda tercih edilir.

ARX modelinin dezavantajı, bozucu etkilerin sistem dinamiklerinin bir parçası olmasıdır. Sistemin deterministik bölümünün $G(q^{-1}, \theta)$ transfer fonksiyonu ile sistemin stokastik bölümünün $H(q^{-1}, \theta)$ transfer fonksiyonu aynı kutuplara sahiptir. Bu her durum için gerçekçi değildir. Sistemin dinamikleri ve stokastik dinamikleri

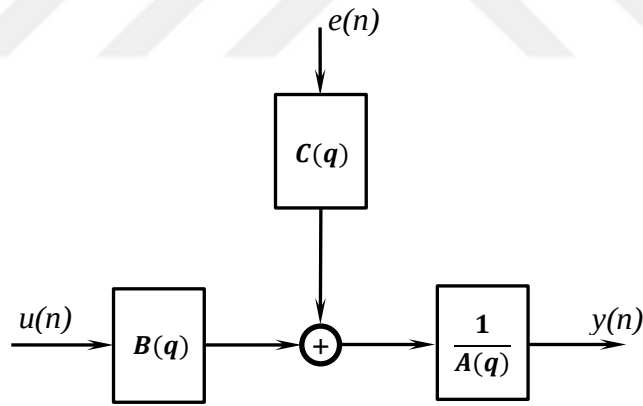
aynı kutup setini her zaman paylaşmaz. Bununla birlikte, iyi bir sinyal-gürültü oranınız varsa, bu dezavantajı azaltabilirsiniz.



Şekil 3.3: ARX model yapısı.

3.1.3 ARMAX model

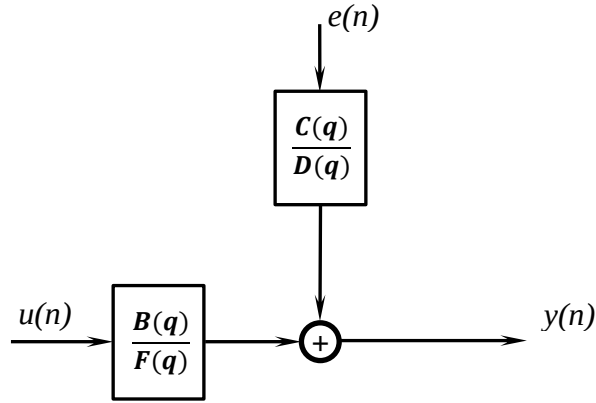
ARMAX model yapısı ARX modelinin aksine bozucuların dinamiklerini de içermektedir (Şekil 3.4). ARMAX modelleri, sisteme etkileyen gürültü işaretini de dikkate alan bir modeldir. Bu özelliğinden dolayı ARMAX modeli, gürültü modellemede ARX modelinden daha fazla esnekliğe sahiptir.



Şekil 3.4: ARMAX model yapısı.

3.1.4 Box-Jenkins model

Box-Jenkins (BJ) yapısı ise gürültü etkilerinin sistem dinamiğinden farklı olarak ayrı bir şekilde modellendiği bir yapı içermektedir (Şekil 3.5).

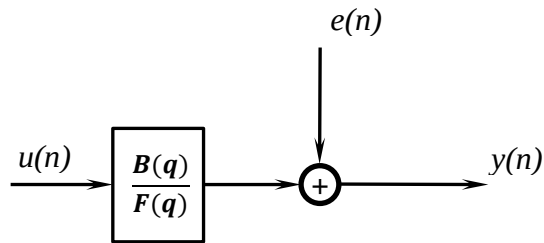


Şekil 3.5: Box-Jenkins model yapısı.

The Box-Jenkins modeli özellikle prosesin sonunda karışan gürültülerde oldukça iyi sonuç vermektedir. Prosese sonradan dahil olan gürültülere örnek olarak sistem çıkışındaki ölçüm gürültüsü verilebilir.

3.1.5 Output-Error model

Output-Error (OE) model yapısı sistem dinamiklerini ayrı olarak tariflemektedir. Gürültüleri modellemek için hiçbir parametre kullanılmamaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: OE model yapısı.

4. DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEM TANILAMA

4.1 NARX (Nonlinear AutoRegressive with Exogenous inputs) Modelleri

4.1.1 Giriş

Lineer olmayan ARX model lineer olmayan durumlar için lineer ARX modelin genişletilmiş halidir ve aşağıdaki yapıya sahiptir:

$$y(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-na), u(t-nk), \dots, u(t-nk-nb+1)) \quad (4.1)$$

burada f fonksiyonu sonlu sayıda u girişlerine ve y çıkışlarına bağlıdır. na, y çıkışlarını tahmin etmek için bir önceki çıkış terimlerinin sayısını ifade etmektedir. nb ise u girişlerini tahmin etmek için bir önceki giriş terimlerini, nk girişten çıkışa olan gecikmedir ve örneklerin sayısını tanımlar.

Genellikle lineer olmayan ARX modelleri black-box yapıları olarak kullanılır. Lineer olmayan ARX modelin lineer olmayan fonksiyonu esnek lineer olmayan kestiricidir.

Bir lineer SISO ARX modelin yapısı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} y(t) + a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \dots + a_{na} y(t-na) \\ = b_1 u(t) + b_2 u(t-1) + \dots + b_{nb} u(t-nb-1) + e(t) \end{aligned} \quad (4.2)$$

burada giriş gecikmesi nk sıfır alınmıştır.

Bu yapıda belirtilen y(t) çıkışı bir önceki çıkış ve giriş değerlerini kullanarak kestirim yapmaktadır. Denklemi aşağıdaki gibi tekrar yazabiliriz:

$$y(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-na), u(t-nk), \dots, u(t-nk-nb+1)) \quad (4.3)$$

burada y(t-1), y(t-2), ..., y(t-na), u(t), u(t-1), ..., u(t-nb-1) ifadesi giriş ve çıkışın gecikmesini ifade etmektedir. Lineer ARX model p y çıkışını regresörlerin toplamı olarak tahmin etmektedir.

4.2 Hammerstein-Wiener Modelleri

4.2.1 Giriş

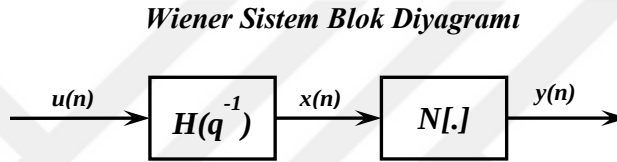
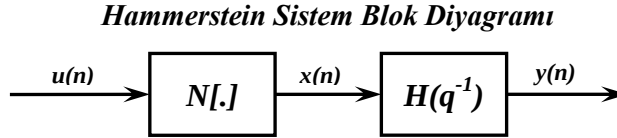
Doğrusal olmayan sistemlerin model kestirimi konusunda bilinen ve uygulanan bir sistem tanılama tekniği de *Blok Odaklı Doğrusal Olmayan (Block-Oriented Nonlinear) Modellerdir*. Bu modeller, doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin kaskat bağlanmasıyla elde edilmektedirler.

Blok Odaklı Doğrusal Olmayan Modellerin (BODOM) yapısında yer alan *Doğrusal ve Zamanla Değişmeyen [linear time-invariant (LTI)] dinamik altsistemler*, parametrik (transfer fonksiyonları, state-space modelleri, FIR, IIR vb.) olabileceği gibi non-parametrik (impulse cevabı, frekans cevabı vb.) de olabilir. Doğrusal olmayan (non-linear) yapı ise duruma göre parametrik ise hafızalı (memory) veya non-parametrik ise hafızasız (memoryless) olarak adlandırılır.

BODOM'un en basit ve en çok bilineni, iki bloğun seri bir şekilde bağlı olduğu yapılardır. Bunlardan ilki olan Hammerstein Sistemi, ilk defa Alman matematikçi A.Hammerstein tarafından 1930 yılında ortaya atılmıştır (Şekil 4.1) [24]. Sistem, doğrusal olmayan statik elemanın ardından gelen doğrusal-zamanla değişmeyen (linear time-invariant) bir dinamik sistemin seri bağlantısından oluşmaktadır. Doğrusal olmayan eleman, hareket elemanının doğrusalsızlığını (nonlinearity) ve sistem girişlerinden gelebilecek doğrusal olmayan etkileri karşılamaktadır. Oldukça basit bir yapıda olan Hammerstein modeli, tüm bu basitliğine rağmen doğrusal olmayan sistemlerin oldukça hassas bir şekilde tanımlanabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışmalarda hammerstein modelleri, kimyasal prosesler [25], elektrik tahrikli kaslar [26], güç yükselticileri [27], elektrik sürücüler [28], termal mikrosistemler [29], fizyolojik sistemler [30], kontrol valfleri [31], katı oksit yakıt hücreleri [32] ve magneto-rheological süspansiyonlar [33] gibi çok geniş bir kullanım alanı içinde ve hassas bir şekilde sistemlerin tanımlanmasında kullanılmıştır [34].

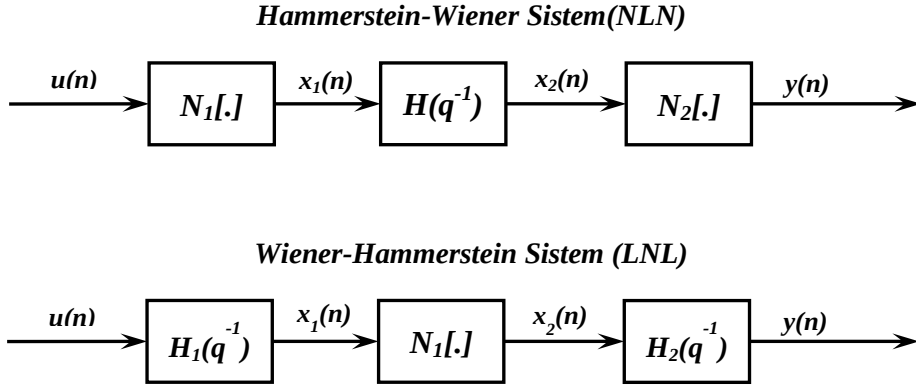
Hammerstein modelinde yer alan doğrusal ve doğrusal olmayan elemanların kaskat bağlantıda yer değiştirmesi ile elde edilen model, genellikle Wiener model (Şekil 4.1) olarak bilinmektedir. İlk defa 1958 yılında N.Wiener tarafından çalışılan bu model, Hammerstein yapıların tam tersi olup doğrusal dinamik sistemin ardından gelendoğrusal olmayan statik bir sistemden oluşur [35]. Bu modelde çıkışta yer alan

doğrusal olmayan statik sistem, sensörlerin doğrusalsızlığını (nonlinearity) ve sistem çıkışlarından gelebilecek doğrusal olmayan etkileri karşılamaktadır. Literatür çalışmaları Wiener model ile neredeyse tüm doğrusal olmayan sistemlerin yüksek bir hassaslıkla tanımlanabileceğini göstermektedir [36]. Bu teorik bilgi, aralarında kimyasal proseslerin [37] [38] ve biyolojik sistemlerin [39] de yer aldığı bir çok pratik uygulamada kendisini kanıtlamıştır.



Şekil 4.1: Hammerstein ve Wiener BODOM yapıları.

Hammerstein modeli ile Wiener modelinin birbirleri ile seri bağlantılarının kombinasyonları da birer yeni model yapısı meydana getirmektedir. Wiener-Hammerstein ve Hammerstein-Wiener isimlerini alan bu yapılar Şekil 4.2'de görülmektedir. Bunlardan özellikle Hammerstein-Wiener modeli giriş ve çıkışlarda yer alan doğrusal olmayan yapılarla hem sensör hem de aktüatör için doğrusalsızlık sunduğu için daha kullanışlıdır.



Şekil 4.2: Hammerstein-Wiener (NLN) ve Wiener-Hammerstein (LNL).

4.2.2 Hammerstein model

Hammerstein sistemler, doğrusal olmayan statik bir sistemin ardından gelen doğrusal dinamik bir sistemden oluşur (Şekil 4.3) [25].

Doğrusal olmayan statik eleman giriş $u(t)$ değerini artırmakta ve $x(t)$ değerine dönüştürmektedir. Dinamikler ise çıkışı $y(t)$ olan bir doğrusal tranfer fonksiyonu ile modellenmektedir. Bir Hammerstein modeli aşağıdaki denklem (4.4) ile ifade edilmektedir.

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_n y(k-n) = b_0 + b_1 x(k-1) + \dots + b_m y(k-m) \quad (4.4)$$

$$x(k) + f(u(k)) = \sum_{i=1}^m c_i g_i(u(k)) \quad (4.5)$$

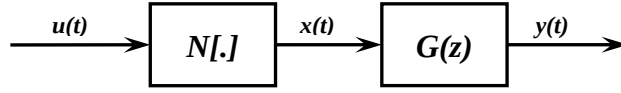
Denklemden sistemin girişi $u(k)$, sistemin çıkışı $y(k)$ ve girişin doğrusal olmayan fonksiyonu da $x(k)$ ile gösterilmektedir. $x(k)$ değeri ölçülemez, fakat denklemden ara değer olarak çıkarılabilir. Buna göre denklem şu şekilde yazılabilir.

$$y(k) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} f(u(k)) \quad (4.6)$$

Denklem 4.6'daki $A(q^{-1})$ ve $B(q^{-1})$ polinomları

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_n q^{-n} \quad (4.7)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_n q^{-n} \quad (4.8)$$



Şekil 4.3: Hammerstein blok diyagramı.

4.2.3 Wiener model

Wiener model yapısı, doğrusal model ile bu modelin ardından gelen doğrusal olmayan bir elemanın kaskat bağlanması ile elde edilir (Şekil 4.4) [35]. Wiener modelin doğrusal dinamik kısmı şu şekildedir.

Doğrusal olmayan kısmın girişi $x(k)$, sistemin girişi $u(k)$ ve $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ polinomları

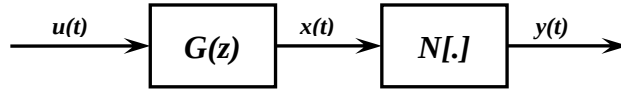
$$x(k) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k) \quad (4.9)$$

denklem 4.7 ve denklem 4.8 ile gösterilmektedir.

Sistemin gözlemlenen çıkışı değeri $y(k)$ ise;

$$y(k) = f(x(k)) = \sum_{i=1}^p c_i g_i(x(k)) \quad (4.10)$$

Böylece sistem tamamıyla giriş ve çıkışlar ile ifade edilmiştir.



Şekil 4.4: Wiener blok diyagramı.

4.2.4 Wiener-Hammerstein model

Wiener-Hammerstein modelin veya bir diğer bilinen adıyla G-Model'in blok diyagram yapısı Şekil 4.5'te görülebilmektedir. Sistem, bir doğrusal G_1 sistemi ile buna kaskat olarak bağlı statik (hafızasız) doğrusal olmayan N elemanı ve doğrusal G_2 sisteminden oluşmaktadır. Bir çok kimyasal ve endüstriyel proses bu tiptedir [40].

Sistemin denklemi denklem 4.11'deki gibidir:

$$\begin{aligned}
y(t) &= \frac{D(q^{-1})}{C(q^{-1})} \sum_{i=1}^p c_i g_i \left[\frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k) \right] \\
y(t) &= \frac{D(q^{-1})}{C(q^{-1})} N \left[\frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(k) \right] \\
y(t) &= \frac{D(q^{-1})}{C(q^{-1})} N[w(k)] \\
y(t) &= \frac{D(q^{-1})}{C(q^{-1})} x(k)
\end{aligned} \tag{4.11}$$

$g_i(\cdot)$ statik doğrusal olmayan p ve k mertebesindeki $N(\cdot)$ altsistemini tanımlayan doğrusal olmayan fonksiyondur.

$(D(q^{-1}), C(q^{-1}))$ ve $(B(q^{-1}), A(q^{-1}))$ polinom çiftleri de sırasıyla $G_2(z)$ and $G_1(z)$ doğrusal bloklardır.



Şekil 4.5: Wiener-Hammerstein (LNL) blok diyagramı.

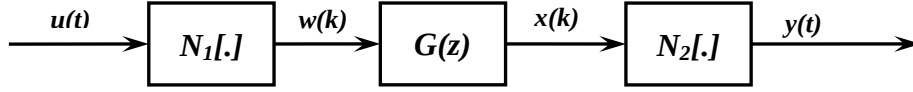
4.2.5 Hammerstein-Wiener model

Hammerstein-Wiener modelleri, dinamik doğrusal bir blok ile bu bloğun girişi öncesinde ve çıkışı sonrasında yer alan statik doğrusal olmayan blokların seri bağlanması ile elde edilmektedir (Şekil 4.6). Yani bir doğrusal blok olan $G(z)$ 'yi çevreleyen iki adet doğrusal olmayan statik eleman $N_1(\cdot)$ ve $N_2(\cdot)$ 'den oluşmaktadır.

Model şu şekilde verilmektedir:

$$\begin{aligned}
y(t) &= \sum_{j=1}^q d_j f_j \left[\frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \sum_{i=1}^p c_i g_i [u(k)] \right] \\
y(t) &= \sum_{j=1}^q d_j f_j \left[\frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} N_1[u(k)] \right] \\
y(t) &= \sum_{j=1}^q d_j f_j [w(k)] \\
y(t) &= N_2[x(t)]
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Burada ($g_i, i= 1,2, \dots, p$) ve ($f_j, j= 1, 2, \dots, q$) sırasıyla N_1 ve N_2 doğrusal olmayan bloklarının doğrusal olmayan fonksiyonlarıdır.



Şekil 4.6: Hammerstein-Wiener (NLN) blok diyagramı.

4.3 Yapay Sinir Ağları (Neural Network) Modelleri

İnsan beyinde; okuma, hareket etme, nefes alma ve düşünme gibi işlemlerin gerçekleşmesi için, çoklu bağlantıya sahip yaklaşık 10^{11} sinir hücresi (nöron) bulunmaktadır [41]. Öğrenme işlemi, bu hücreler arasında yeni bağlantılar kurulması ya da mevcut bağlantıların yenilenmesi sonucu gerçekleşmektedir. Biyolojik sinir ağlarının yapısı ve işlevlerini nasıl yerine getirdiğinin öğrenilmesiyle beraber ortaya çıkan “basit bir yapay sinir ağı kümesi oluşturulabilir mi?” sorusunun cevabı, yapay sinir ağları fikrinin temelini oluşturmaktadır.

Yapay Sinir Ağları (YSA), insanlar tarafından gerçekleştirilmiş örnekleri kullanarak öğrenebilen, dış etkilere karşı nasıl tepkiler üretileceğini belirleyen, birbirine yoğun bir şekilde paralel olarak bağlanan, basit (genelde uyarlanabilir) işlem elemanlarından oluşan ve gerçek dünyadaki nesnelerle biyolojik sinir sisteminin yaptığıyla aynı şekilde etkileşmek için hiyerarşik olarak düzenlenen ağlar olarak tanımlanabilir [42]. Yapay sinir ağlarını oluşturan ve proses elemanları ya da çok giriş–çok çıkışlı, yüksek dereceden doğrusal olmayan dinamik alt devreler olarak nitelendirilen yapay hücrelerin birbirlerine belirli bir geometri ile bağlandıkları ve bu bağlantıların her birinin bir değeri olduğu kabul edilmektedir [41]. YSA’nın istenen davranışı gösterebilmesi için belirlenen amaca uygun olarak hücreler arasında doğru bağlantıların yapılması ve bağlantıların uygun ağırlıklara sahip olması gerekir. Dış girişler, komşu nöronların çıkışları ve yanlılık terimi (bias) bir nöronun girişi olabilir. YSA’nın karmaşık yapısından kaynaklı olarak bağlantılar ve ağırlıkların önceden ayarlı olarak verilememesi nedeniyle istenen davranışı gösterecek şekilde söz konusu problemten aldığı eğitim örneklerini kullanarak problemi öğrenmelidir. Nöronun eğitilmesi bağlantı ağırlıklarının değiştirilmesi ile gerçekleşir.

En çok kullanılan bilgi işlem yöntemleri ile karşılaştırıldığında YSA'nın üstün özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

Genelleme ya da Genelleştirme; YSA'nın eğitim veya öğrenme sürecinde kullanılmayan girişler için de anlamlı ya da uygun tepkileri üretmesi olarak tanımlanır.

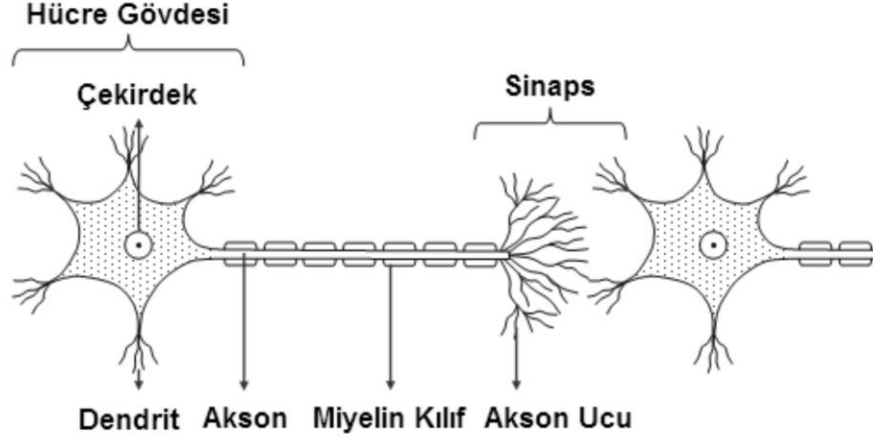
Paralellik: YSA' da aynı katmandaki nöronlar arasında zaman bağımlılığı bulunmaz ve işlemler paralel olarak yapılır. Karmaşık bir işlev çok sayıda küçük nöron aktivitesinin bir araya gelmesiyle oluştuğundan zaman içerisinde herhangi bir nöronun işlev dışı kalması ağ başarımını önemli bir ölçüde etkilemez [43, 44].

Yerel Bilgi İşleme: YSA'da her bir işlem birimi, çözülecek problemin tümü ile değil, sadece bir parçasıyla ilgilenmektedir. Bu görev paylaşımı sayesinde, nöronlar, oldukça basit işlemler yapmalarına rağmen karmaşık ve zor problemler için çözüm üretilmektedir.

Öğrenebilirlik: Birçoğu programlamaya yoluyla hesaplamaya dayanan veri işleme yöntemleri ile tam olarak tanımlanmamış bir problem çözülemez ve çözüm için probleme yönelik algoritma yazmak gerekir. YSA, verilen örnekleri kullanarak problemleri çözdüğünden problem çözümü için algoritma değil, parametreler değiştirilir [43, 44].

4.3.1 Biyolojik nöron

Bir biyolojik nöron, hücre gövdesi, akson ve nöron çevresini saran ince filamentler olan dentritlerden oluşur (Şekil 4.7). Nöron, sinir sisteminin temel işlevsel birimidir ve elektriksel ve kimyasal yolla sinirsel uyarıların iletiminden sorumludur. Hücre gövdesi soma olarak adlandırılır, büyüktür ve çekirdek burada yer alır. Akson ve dentrit arasındaki bağlantı sinaps olarak isimlendirilir ve nöronlar arasında elektrokimyasal bağlantıyı sağlar. Başka hücrelerden gelen uyarılar dendritlerin uçlarından alınır ve uzun uzantılar şeklindeki aksonların uçlarından diğer hücrelere iletilir.

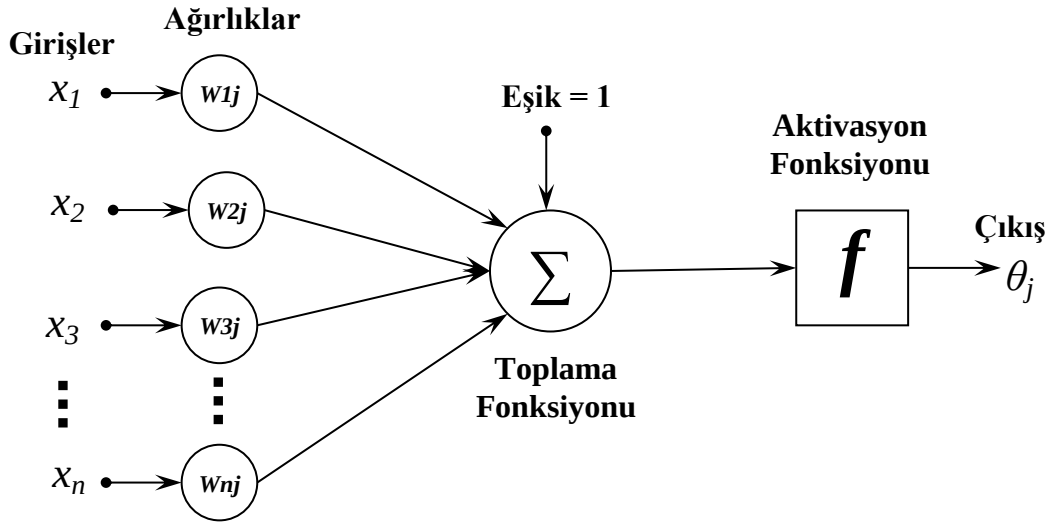


Şekil 4.7: Biyolojik sinir hücresi.

Oldukça yüksek performansa sahip olan biyolojik sinir ağları karmaşık olayları işleyebilecek yetenektedir. İnsanın tüm çevresini anlamasını sağlamanın yanı sıra bütün duyu organlarından gelen bilgiler ile algılama ve anlama mekanizmaları geliştirir ve bu mekanizmaları çalıştırarak olaylar arasındaki ilişkileri öğrenir [42].

4.3.2 Yapay nöron

Biyolojik sinir ağlarına benzer şekilde yapay sinir ağlarının da yapay sinir hücreleri bulunur. Proses elemanı olarak da nitelendirilen yapay sinir hücreleri temelde girişler, ağırlıklar, toplama işlemi, aktivasyon fonksiyonu ve çıkış olarak sıralanan beş kısımdan oluşur (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Yapay sinir hücresi.

Girişler, dış dünyadan veya bir önceki katmandan alınarak yapay sinir hücrelerine gönderilen bilgilerdir ve öğrenme işlemi girişler ile gerçekleşir. Ağırlıklar, öğrenmenin gerçekleşmesini sağlayan ve girişlerin yapay sinir hücreleri üzerindeki etkisini belirleyen katsayılardır. Toplama işlemi ise bir yapay sinir hücresine gelen ve dış ortamdan alınan verilerle bu verilerin ağırlıkların çarpımının bir sonucu olan net girişin hesaplanması olarak ifade edilir. Aktivasyon fonksiyonu genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyondur ve işlem boyunca net çıkışı hesaplar. Bu işlem aynı zamanda nöron çıkışını verir. Sonucun dış dünyaya ya da diğer sinirlere gönderildiği yer çıkıştır. Her bir sinirin tek bir çıkışı vardır ve bir sinirin çıkışı kendinden sonra gelen sinirlerin girişi olabilir. Yapay sinir ağları sadece sayısal giriş bilgileri ile çalıştığı için giriş bilgileri genellikle ölçeklendirilir [42].

4.3.3 Yapay sinir ağlarının yapısı

Yapay sinir ağları, genellikle birkaç katman halinde dizilen birden fazla yapay sinir hücresinin birleşiminden meydana gelir.

Genellikle ilk katman giriş katmanı, son katman ise çıkış katmanıdır. Arada kalan diğer katmanlar gizli katman veya ara katman olarak adlandırılır ve bir yapay sinir ağında birden fazla gizli katman olabilir. Ara katmanların ve bu katmanlarda bulunan nöronların sayısının artması hesaplama karmaşıklığını ve süresini artırır ancak yapay sinir ağının daha karmaşık problemlerin çözümü için kullanılabilmesini sağlar.

Giriş katmanında bulunan proses elemanları, dışardan aldıkları bilgileri sonraki katman olan ara katmana iletirler. Ara katman ya da gizli katmana gelen bu bilgiler işlendikten sonra çıkış katmanına gönderilir. Çıkış katmanında bu bilgiler proses elemanları tarafından işlenerek üretilen çıktı dışarı gönderilir.

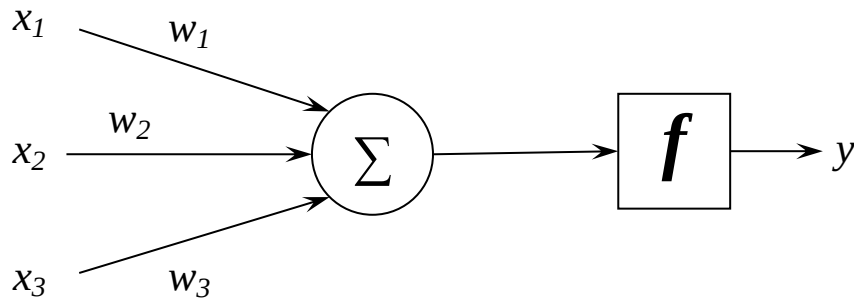
4.3.4 Yapılarına Göre yapay sinir ağları

Yapay sinir ağları, ağın yapısına göre; ileri beslemeli ve geri beslemeli, öğrenme kuralına göre; Hebb, Hopfield, Delta ve Kohonen, öğrenme algoritmasına göre; danışmanlı, danışmansız takviyeli yapay sinir ağları olarak sınıflandırılabilirler.

İleri beslemeli yapay sinir ağları, tek katmanlı ve çok katmanlı olmak üzere ikiye ayrılırlar.

4.3.4.1 İleri beslemeli tek katmanlı ağlar

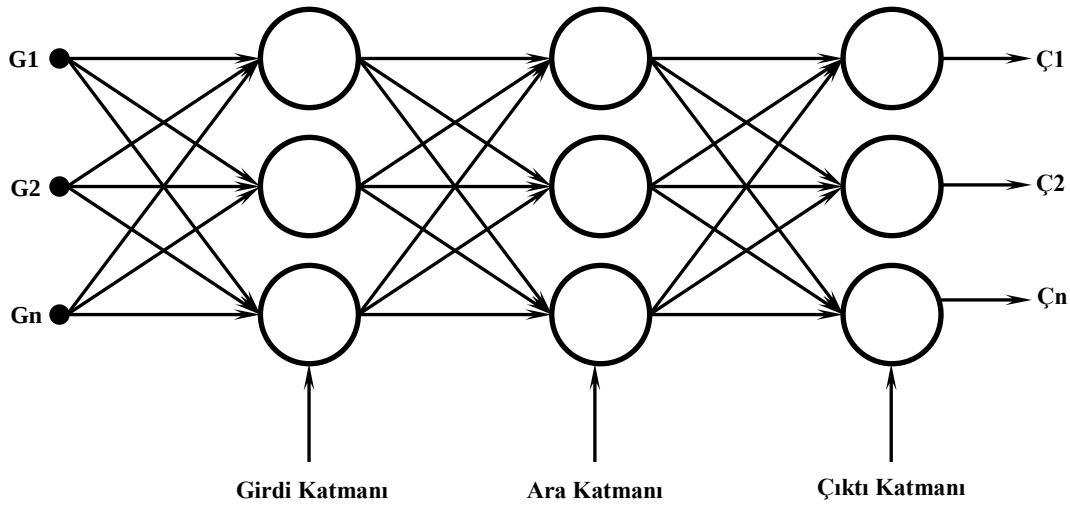
Girdi işaretlerinin ve ağırlıkların bir işlevini hesaplayarak, sonucu sonraki tüm yapay sinir hücrelerine ileten ağlar tek katmanlı ileri beslemeli ağlar olarak isimlendirilir. Şekil 4.9’da ileri beslemeli tek katmanlı yapay sinir ağının bir modeli yer almaktadır. Tek katmanlı ağlarda çıktı fonksiyonu doğrusal fonksiyondur.



Şekil 4.9: İleri beslemeli tek katmanlı yapay sinir ağı [63].

4.3.4.2 İleri beslemeli çok katmanlı ağlar

Bir yapay sinir ağının öğrenmesi istenen olayların girdi ve çıktıları arasındaki ilişkilerin doğrusal olmadığı durumlarda, öğrenmenin gerçekleşmesi için çok katmanlı ağlar gibi daha gelişmiş modellere ihtiyaç duyulur [45].



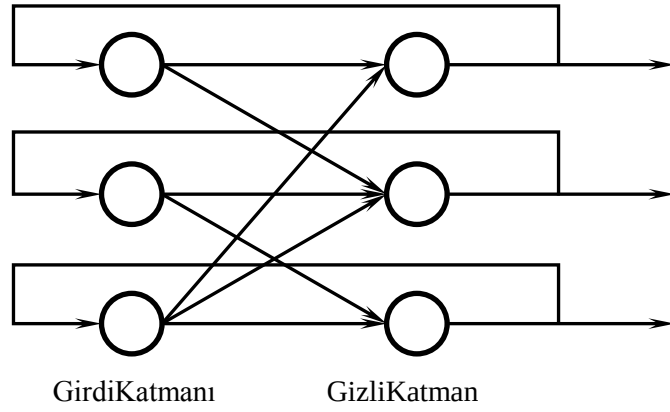
Şekil 4.10: İleri beslemeli çok katmanlı yapay sinir ağları.

Şekil 4.10'da ileri beslemeli çok katmanlı yapay sinir ağları yapısı gösterilmektedir. Bu yapı girdi katmanı, ara katman ve çıktı katmanı olmak üzere üç katmandan oluşur.

4.3.4.3 Geri beslemeli ağlar

Geri beslemeli yapay sinir ağlarında bir hücrenin çıktı değeri, başka bir hücreye veya giriş katmanına giriş olabildiği gibi kendisine de giriş olabilmektedir ve bağlantı çift yönlüdür. Şekil 4.11'de geri beslemeli yapay sinir ağı yapısı gösterilmektedir.

İleri beslemeli yapay sinir ağlarından farklı olarak geri beslemeli sinir ağlarında, gizli tabaka çıktılarını ağırlıklandırarak tekrar gizli tabakaya girdi olarak veren bağlam (context) tabakası bulunur [46].



Şekil 4.11: Geri beslemeli yapay sinir ağı.

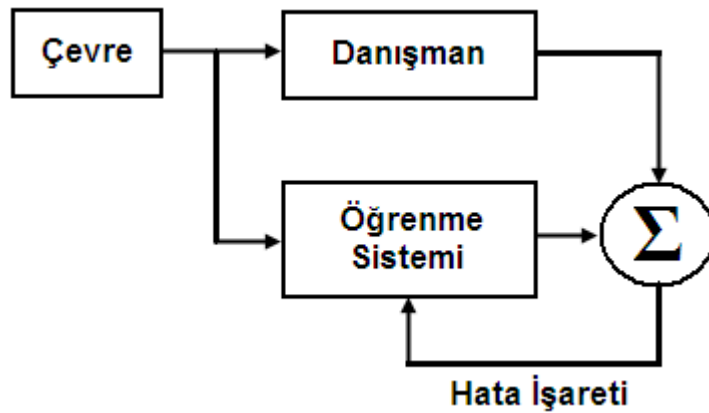
4.3.5 Yapay sinir ağlarında öğrenme algoritmaları

Yapay sinir ağlarında öğrenme işleminin farklı yöntemleri vardır.

4.3.5.1 Yapay sinir ağlarında danışmanlı öğrenme

Danışmanlı öğrenmede yapay sinir ağı önce eğitilmelidir. Eğitim işleminin gerçekleşmesi için giriş ve çıkış çiftlerinden oluşan eğitim bilgileri yapay sinir ağına verilmelidir. Eğitim işlemi istenen istatistiksel doğruluk değerine ulaşıncaya kadar devam eder. Yapay sinir ağına verilen giriş için istenen çıkış üretileniyorsa çıkış değerindeki hata en küçük olacak şekilde bağlantı ağırlıkları değiştirilir [42].

Şekil 4.12’de danışmanlı öğrenme yapısı gösterilmektedir.

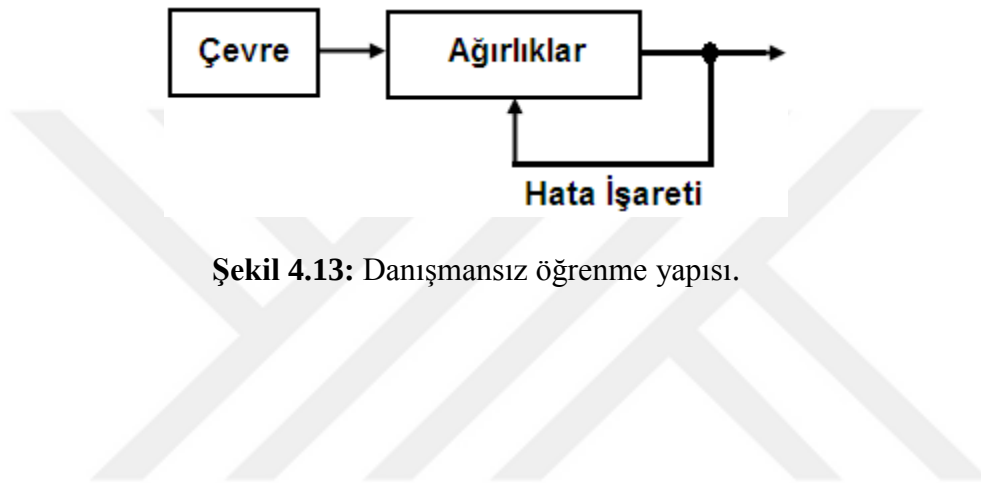


Şekil 4.12: Danışmanlı öğrenme yapısı [42].

4.3.5.2 Yapay sinir ağlarında danışmansız öğrenme

Danışmansız öğrenmede ağ, istenen dış veriler yerine girilen bilgilerle çalışır ve işlem yaparak öğrenir. Bu öğrenme yaklaşımında ağlar istenen veya hedef çıkış olmaksızın giriş bilgilerinin özelliklerine göre ağırlık değerlerini ayarlar ve her örneği benzerleri ile kendi birlikte sınıflandıracak biçimde kendi kurallarını oluşturur.

Şekil 4.13’de danışmansız öğrenme yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.13: Danışmansız öğrenme yapısı.

5. GENETİK ALGORİTMA OPTİMİZASYONU

5.1 Giriş

Kombinatorial optimizasyon (combinatorial optimization) uygulamalı matematiğin son yıllarda üzerinde sıkça durduğu bir alan haline gelmiştir. Kombinatorial optimizasyon, genel bir ifade ile nesnelerin sonlu toplamında bir optimum nesneyi arayan eniyileme yöntemidir. Özellikle de nesnelerin sayısının çok fazla olduğu ve tüm nesnelerin birer birer taranıp kesin çözüme ulaşmanın kabul edilemeyecek kadar uzun sürdüğü durumlarda en iyinin seçilmesi etkin bir metotla gerçekleştirilmelidir.

Genetik algoritmalar (GA) da böyle kompleks problemler için doğada varolan doğal evrim mekanizmasına benzer bir şekilde çalışan stokastik arama algoritmasıdır. Bu yaklaşım ilk defa Michigan Üniversitesi öğretim görevlisi John Holland tarafından 1975 yılında ortaya atılmıştır [47]. Genetik algoritma, temelde doğada geçerli olan en iyinin hayatta kalması kuralına dayanarak evrimsel gelişimde kromozomların değişiminden ilham almıştır. Holland, nasıl ki doğada eniyi hayatta kalabiliyorsa, bu “iyi”nin ne olduğunu belirleyen bir uygunluk fonksiyonu (fitness function) tanımlayarak evrimsel sürece benzer şekilde yeniden kopyalama, değiştirme (mutasyon) gibi operatörleri kullanan bir tarama eniyileme yöntemi geliştirmiştir.

GA doğa bilimlerinden (biyoloji) öğrendiği evrim sürecinin adımlarını izler. Aday çözümlere ait ilk popülasyon ile başlayan bu süreçte, her aday çözüme “kromozom” adı verilir. Her bir aday çözümün yani kromozomun performansını değerlendiren bir de uygunluk fonksiyonu mevcuttur [48]. Süreçte her kromozomun ne kadar iyi olduğu bulunur (fitness function) ve bu kromozomlar eşlenerek seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanır. Bu sayede yeni bir toplum oluşturulur. Böylece Darwin’in en iyi olanın hayatta kalması (survival of the fittest) prensibine dayalı olarak bir popülasyonu oluşturan bireylerin rekabet etmeleri sağlanmakta ve çözüm uzayının büyüklüğüne rağmen iyi bir çözüme kısa zamanda yakınsanmaktadır [49].

5.2 Genetik Algoritmanın Elemanları

Genetik algoritmalar çalışma prensibinde doğa bilimlerinden (biyoloji) faydalandığı için hem kullanılan terimler hem de çalışma mekanizması aynıdır. Genetik algoritma ile optimizasyon elemanları alt başlıklarda kısaca anlatılmıştır.

5.2.1 Seleksiyon (Selection / Reproduction)

Rastlantısal olarak bir başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra yeni popülasyonun oluşturulabilmesi için üretilen çözümlerden uygun olanların seçilip kalanların silinmesi gerekmektedir. Bu noktada tıpkı gerçek doğada olduğu gibi en iyilerin hayatta kalması sağlanmaktadır. Seçim operatörü ile seçilmiş olan bireyler çaprazlama havuzuna girmeye hak kazanırlarken seçilemeyen bireyler yok olmaktadır. Seçim yöntemi olarak geliştirilmiş bir çok yöntem bulunmakla beraber, rulet çemberi, turnuva ve elitist seçim yöntemleri en yaygın kullanılanlardır.

5.2.2 Çaprazlama (Crossover)

Çaprazlama, çoğalmaya uygun çözüm çiftlerinin ikili sayı dizisi parçalarının rastsal olarak değiş tokuş şeklinde yeni çözümler (bireyler) türetmesi olarak tanımlanabilir. Burada önceki çözümde uygunluk fonksiyonu tarafından seçilen çözümler ebevyn (parent) ve bu ebeveynlerin kromozomlarının yer değiştirmesi ile elde edilen yeni çözümler ise çocuk (child) olarak isimlendirilir. Çaprazlamada amaç en iyi bireylerden elde edilen uygunluk fonksiyon sonucu ebeveynlerinden daha yüksek yeni bireyler elde edilmesidir.

Çaprazlama rastsal olarak gerçekleşmektedir dolayısıyla oluşan yeni çözümler daima ebeveynlerden daha iyi sonuç vermeyebilir. Bu nedenle sonucun istenilen yere daha iyi gitmesi için kriterler belirlemek, çaprazlama işlemindeki en büyük zorluktur. Bu kriterler olmadığında sonuç iyi bir yere gidebilir ancak çözüm rastsal olacağından bu noktaya az sayıda popülasyonla ulaşmak mümkün olmayabilir.

5.2.3 Mutasyon (Mutation)

Mutasyonun amacı, mevcut bir kromozomun genlerinin yerlerinin veya değerlerinin değiştirilmesiyle yeni kromozom oluşturulmasıdır. Bunun sebebi ise; yeni nesil üretiminin yeniden ve sürekli gerçekleşmesi sonucunda belirli bir süre sonra nesildeki kromozomların birbirlerini tekrarlaması ve böylece farklı kromozom

üretiminin durması veya azalması ihtimalidir. Çözümün kısır döngüye girmemesi ve seleksiyon ile ortadan kaldırılmış çözümlerin içerisindeki uygunluk değerlerinin test edilebilmesi için kromozomlardan bazıları mutasyona uğratılır.

5.2.4 Genetik algoritmaların çalışma prensibi

Genetik algoritmaların optimizasyon çalışma prensibi Şekil 5.1’de akım şeması ile gösterilmiştir. Temelde yapılan işlemler sırayla aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

Adım 1 : Olası çözümlerin kodlandığı bir çözüm grubu (biyolojideki benzerliği sebebiyle toplum olarak tanımlanır) oluşturulur.

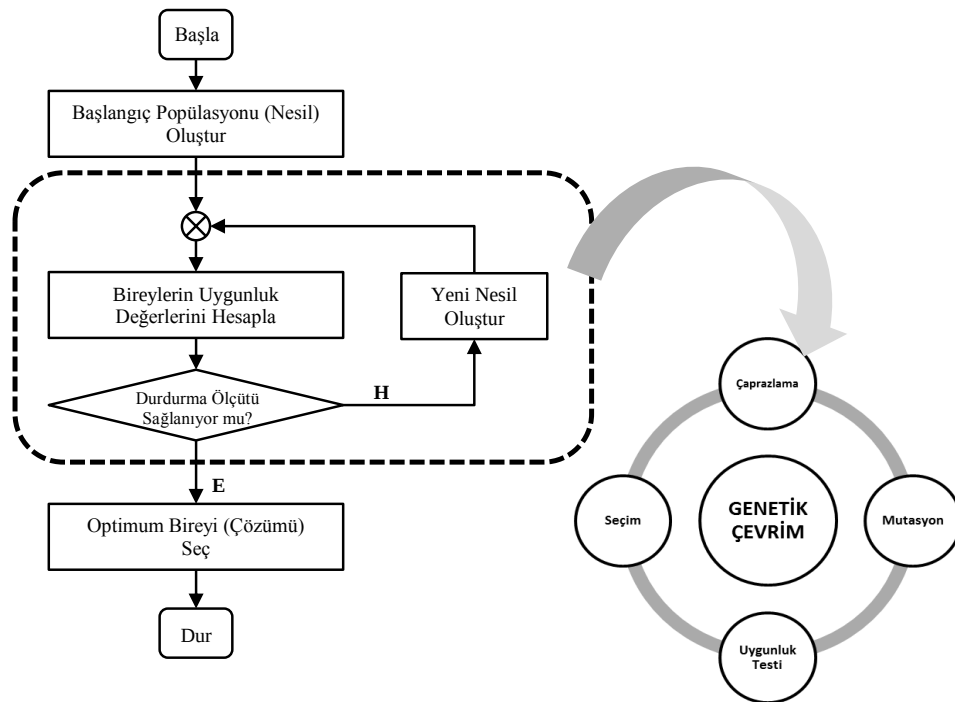
Adım 2 : Her kromozomun ne kadar iyi olduğu bulunur (fitness function).

Adım 3 : Kromozomlar eşlenerek seleksiyon, çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanır ve yeni bir toplum oluşturulur.

Adım 4 : Eski kromozomlar yok edilerek yeni kromozomlara yer açılır.

Adım 5 : En yüksek iterasyon sayısına kadar tüm kromozomların uygunlukları tekrarlanır.

Adım 6 : O ana kadar bulunmuş en iyi kromozom, sonuç olarak nitelendirilir.



Şekil 5.1: Genetik algoritmaya ait akış diyagramı.

5.3 Genetik Algoritmanın Diğer Yöntemlerden Farkı

Genetik algoritma yönteminin diğerlerinden temel ve en önemli farkları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- 1) Genetik algoritmalar problemlerin çözümünü parametrelerin kodlarıyla arar ve parametreler kodlanabildiği sürece çözüm üretilebilir. Dolayısıyla genetik algoritmalar ne yaptığı konusunda bilgi içermez fakat nasıl yaptığını bilir.
- 2) Algoritmalar aramaya tek bir nokta yerine, noktalar kümesinden başladığı için çoğunlukla yerel en iyi çözümde sıkışıp kalmazlar. Ancak genetik algoritmalar bazı durumlarda yerel en iyi çözüme, genel en iyi çözümden daha çabuk ulaşırlar ve bu noktada algoritma sonuçlanır. Böyle bir durumda, genel en iyi çözüme ulaşabilmek için arama uzayındaki çeşitlilik artırılır veya her üreme aşamasında uygunluk fonksiyonu değiştirilir.
- 3) Genetik algoritmalar türev yerine uygunluk fonksiyonunun değerini kullanır. Uygunluk fonksiyonu değerinin kullanılması başka bir yardımcı bir bilginin kullanılmasını gerektirmez.
- 4) Genetik algoritmalar gerekirci kurallar yerine olasılıksal kuralları kullanır.

6. ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİ MODELLEME ÇALIŞMALARI

6.1 Veri Toplama İşlemleri

Veri toplama çalışmaları kapsamında ADOÇİM Çimento Sultanköy Tesisi'nde çalışan bir çimento değirmeninden 1 aylık süre ile veri toplanmıştır.

Verilerin toplanması çalışmalarında mevcut durumunda tesisin prosesinde çalışmakta olan algılayıcılar ve sistem üzerinden veri alınmıştır. Sistem üzerinde yer alan algılayıcılar ve yapılan çalışmalarla elde edilen verilerin durumu şu şekildedir:

- Çimento öğütme hattının geri dönüş (reject) bantı kantarından tonaj bilgileri analog verisi olarak toplanmaktadır.
- Çimento öğütme hattının besleme kantarlarından tonaj bilgileri analog verisi olarak toplanmaktadır.
- Çimento öğütme değirmeninin doluluk oranını ses ölçümü ile gösteren bir adet falafon cihazı ile analog veriler toplanmaktadır
- Silo seviyesi analog veri olarak toplanmaktadır.
- Seperatörün devri (akım değeri) ile seperatöre malzeme ileten elevatörün akım değeri sistem tarafından takip edilebilmekte ve toplanmaktadır
- Çimento öğütme değirmenini tahrik eden elektrik motorunun çektiği akım değeri sistem tarafından toplanmaktadır.
- Değirmende öğütülen son ürün çimentodan alınan numunelerin laboratuvardaki analiz sonuçlarına göre her saat başı incelik (blaine) değerleri toplanmaktadır.
- Çimento öğütme değirmenini giriş-çıkış basınçları sistem tarafından toplanmaktadır.
- Çimento öğütme prosesine giren hammaddelerin laboratuvarda bulunan test değirmeninde yarım saat ara ile “öğünülebilirlik” değeri toplanmaktadır.

- Tüm bu toplanan verilere ilave olarak sistem üzerinde meydana gelen sapmalara müdahale etme durumlarında operatörler tarafından düzeltici teknik müdahale olarak isteme girilen seperatör, besleme giriş değerlerinin de kayıtları toplanmaktadır.

Çalışma kapsamında sistem üzerinde yer alan algılayıcılar tarafından toplanan verilerden modellemelerde aşağıdaki veri setleri kullanılmıştır:

- Hammadde Besleme Tonajı (ton/saat)
- Geri Besleme Tonajı (ton/saat)
- Seperatör Devri (devir/dakika)
- Elevatör Akımı (A)
- Falafon (%)
- İncelik Değeri (Blaine) (cm^2/gr)

Çalışmalar için üretimden yukarıda verilen veri kümeleri 18 gün süreyle CEMIV tipi çimento üretimi için toplanmıştır.

6.2 Verinin Hazırlanması (Data Preprocessing)

6.2.1 İncelik (blaine) değerlerinin elde edilmesi

İncelik (blaine) değeri, öğütme prosesinden çıkan son üründen her saat başı alınan örneklerin laboratuvarında test edilmesi ile elde edilmektedir, ancak sistemin giriş değerleri ise saniyede bir toplanan veri ile elde edilmektedir. Bu nedenle incelik (blaine) değerine ait bilinen veri noktaları arasındaki bilinmeyen değerlerin tahmin edilmesi gerekmektedir.

Bilinmeyen ara değerlerin tahmininde öncelikle elde toplanan incelik (blaine) değeri verilerinin dağınık ve özellikle aşırı heterojen olduğu durumlarda kullanılan parçalı kübik Hermitte interpolasyon (piecewise cubic hermite interpolation) yöntemi ile boş alanlardaki değerlerin bulunması sağlanmıştır. İnterpolasyon ile doğrusal olmayan bir ilişkinin kurulduğu incelik (blaine) değerleri kümesi ile ölçülen incelik (blaine) değeri verilerinin ara değerlerde değişmediği ve sabit kaldığı kabulüne dayalı veri kümesi modellerin oluşturulması ve doğrulanması aşamalarında kullanılmıştır.

Her iki veri kümesi arasında kayda değer bir fark olmadığı görüldüğü için çalışmaların devamında ölçülen incelik (blaine) değeri verilerinin ara değerlerde değişmediği ve sabit kaldığı kabulüne dayalı veriler ile sistem tanılama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

6.2.2 Verilerin ölçeklendirilmesi (Scaling)

Yapay sinir ağları (YSA) yöntemi ile sistemin tanılmasında sistem giriş verilerinin hepsinin aynı ölçek üzerine indirgenmesi gerekebilir. Özellikle sistemin girdileri arasında aşırı büyük veya küçük değerler görülebilir ve bu durumda da bu değerler aşırı büyük veya küçük değerlerin doğmasına neden olacağı için ağı yanlış yönlendirebilirler.

Eğitim ve test verilerinde kullanılacak veri gruplarının yapay sinir ağları tarafından işleme sokulabilmesi ve sistem girişleri arasındaki değer farklarının ortadan kalkması için verilerin ölçeklendirilmesi (scaling) gerekmektedir. Böylece, tüm değişkenlere eşit şans verilmiş olur.

Ölçeklendirmeler (scaling) farklı şekillerde yapılabilirler. Çimento öğütme prosesinin Yapay sinir ağları (YSA) yöntemi ile tanılanması sırasında aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant sigmoid (Tangent Sigmoid) fonksiyonu kullanılmıştır. Bilindiği üzere tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonu -1 ile $+1$ değerleri arasında çalışan bir fonksiyondur. Bu nedenle sistem giriş verileri $[-1 +1]$ değerleri arasında kalacak şekilde ölçeklendirilmiştir.

6.2.3 Verilerin filtrelenmesi (Filtering)

Sistemin giriş ve çıkış değerlerinden toplanan verilerin gürültülü geldiği gözlemlenmiştir. Özellikle sistemin giriş verilerinden biri olan elevatör akımı verilerinin önemli oranda gürültü içerdiği açık bir şekilde görülmektedir.

Elevatör akımı sinyali üzerindeki gürültünün bastırılması için Butterworth bant geçiren filtre tasarlanmış ve sinyale uygulanmıştır, ancak model tanılamadaki başarımının filtreleme ile değişmediği görülmüştür. Hatta bazı sistem tanılamada başarımın düştüğü bile gözlemlenmiştir. Bu nedenle gerçekleştirilen sistem tanılama çalışmalarında giriş ve çıkış verilerinde sinyal gürültüsünün bastırılması için herhangi bir filtre uygulanmamıştır.

Ayrıca sistemin dinamik karakterisliğinde ötürü, özellikle çıkış verilerinin geçmiş giriş ve çıkış verilerine bağlı olması sebebiyle, giriş ve çıkış verileri için yer alan aşırı sapmaya sahip veriler (outliers) bile veri kümesinden çıkarılmamıştır.

6.3 Başarım Performans Ölçütleri

6.3.1 Hataların ortalama kare kökü [root mean square error (rmse)]

Elde edilen modellerin birbirleri ile karşılaştırmasında başarımların ölçütü olarak modellerin hataların karesel ortalaması (HOKK) hesaplanmıştır. HOKK denklem 5.1’de görülebileceği gibi hesaplanmaktadır:

$$HOKK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5.1)$$

ydeğeri ölçülen sistem çıkış değeri, $\hat{y}$ değeri modellenen sistemin çıkış değerini temsil etmektedir.

6.3.2 Pearson korelasyon katsayısı (pearson correlation coefficient)

İki sayısal ölçüm arasında doğrusal bir ilişki olup olmadığını, varsa bu ilişkinin yönünü ve şiddetinin ne olduğunu belirlemek için kullanılan bir istatistiksel yöntemdir.

Korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında değişen değerler alır. Katsayı, etkileşimin olmadığı durumda 0, tam ve kuvvetli bir etkileşim varsa 1, ters yönlü ve tam bir etkileşim varsa -1 değerini alır. Korelasyon katsayısı genellikle r harfiyle gösterilir. Buna göre; korelasyon katsayısını denklem 5.2’de görülebilecek eşitlik ile gösterebiliriz.

$$r = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \hat{y}_i \right) - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \right)}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \right) \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i \right)^2}{n} \right)}} \quad (5.2)$$

7. ELDE EDİLEN MODELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

7.1 Çimento Öğütme Prosesinin ARX (AutoRegressive with exogenous terms) ve ARMAX (Autoregressive–moving-average with exogenous terms) ile Modellenmesi

Sistem tanımlama teknikleri kendi içinde parametrik ve parametrik olmayanlar olarak iki kısma ayrılmaktadır. Bunlardan parametrik modeller, sonlu sayıda parametre ile tanımlanan sistemler olup model yapısı seçildikten sonra seçilen model yapısına ait parametrelerin kestirimi ile bulunurlar.

Parametrik sistem tanımlama teknikleri, parametrik olmayan sistem tanımlama tekniklerine göre daha zor olmakla beraber elde edilen model gürültülerden daha az etkilenmekte ve daha hassas sonuçlar vermektedir. Parametrik modellerle sistem tanımlama, sistemin fiziksel dinamiğini en doğru şekilde yansıttığı için ilk çalışma olarak parametrik metotlardan olan ARX (Auto-Regressive Exogenous) ve ARMAX (Auto-Regressive Moving Average Exogenous) ile modelleme çalışmaları yapılmıştır.

Doğrusal dinamik sistem modeli ARX ve ARMAX denklem 7.1 ve denklem 7.2'deki gibi ifade edilirler:

ARX model;

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + e(t) \quad (7.1)$$

ARMAX model

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + C(q)e(t) \quad (7.2)$$

ARX ve ARMAX modellerinin belirlenmesinde her ikisinde de $A(q)$ ve $B(q)$ polinomlarının mertebelerinin belirlenmesi ile elde edilmektedir. Ayrıca ARMAX modelinde sistemi etkileyen gürültünün modelleme şekli farklı olduğundan $C(q)$ polinomunun mertebesinin de bulunması gerekmektedir. Her iki sistemde bunlara

ilave olarak bir de sistemin girişı ve çıkışları arasındaki gecikmenin (nk) de belirlenmesi gerekmektedir.

ARX ve ARMAX model yapılarında yer alan parametreler Çizelge 7.1'de görölmektedir.

Çizelge 7.1: ARX ve ARMAX model yapılarına ait parametreler.

Parametre	Açıklaması	Matrix Değeri
na	A(q) polinomunun mertebesi	$[na_1]$
nb	B(q) polinomunun mertebesi +1	$[nb_1, nb_2, nb_3, nb_4, nb_5]$
nc	C(q) polinomunun mertebesi [Sadece ARMAX]	$[nc_1]$
nk	Gecikme	$[nk_1, nk_2, nk_3, nk_4, nk_5]$

Çoklu giriş tekli çıkış (MISO) sistemlerde nb ve nk parametreleri matris formunda olup giriş sayısı kadar satır ve çıkış sayısı kadar sütundan oluşurlar. Çimento öğütme prosesi, 5 girişli ve tek çıkışlı bir sistem olarak modelleneceğı için toplamda sadece nb ve nk için 10 parametrenin değıştirilerek eniyileme çalışmasının yapılması gerekmektedir. Buna ek olarak Çizelge 7.2'de görölebileceğı gibi na ve nc (sadece ARMAX'da yer alan C(q) polinomunun mertebesi) de eniyilenmelidir.

Çizelge 7.2: ARX/ARMAX model yapılarına ait parametrelerin değışken sayıları.

Parametre	En Küçük Değeri	EnBüyükDeğeri	ToplamDeğışken
na	0	10	11
nb	0	10	11
nc	0	10	11
nk	0	10	11

na, nb, nc ve nk değıerlerinin 0 ile 10 arasında tam sayı olarak değıştiğı göz önüne alınacak olursa her bir parametre için 11 farklı konfigürasyon ortaya çıkmaktadır. Ayrıca nk ve nb değıerleri de toplam giriş sayısı kadar yani 5 olduğundan dolayı tüm parametrelerin kombinasyonları tam olarak ARX için $11 \cdot 11^5 \cdot 11^5$ yani yaklaşık olarak $2,85 \cdot 10^{11}$ adet olmaktadır. ARMAX için ise nc parametresi için de 11 farklı kombinasyon olacağı için $11 \cdot 11 \cdot 11^5 \cdot 11^5$ yani yaklaşık olarak $3,14 \cdot 10^{12}$ adet olmaktadır. Olası çözümler uzayının bu kadar büyük ve karmaşık olduğ, özellikle

de mevcut bilgiyle sınırlı arama uzayında çözüme gitmenin zor olduğu bu gibi durumlarda Genetik Algoritma Optimizasyon Yöntemi kullanılmaktadır.

Bu çalışmada da tüm bu parametrelerin eniyileme çalışmaları ile elde edilmesinde Genetik Algoritma (GA) Optimizasyon Yöntemi kullanılmıştır.

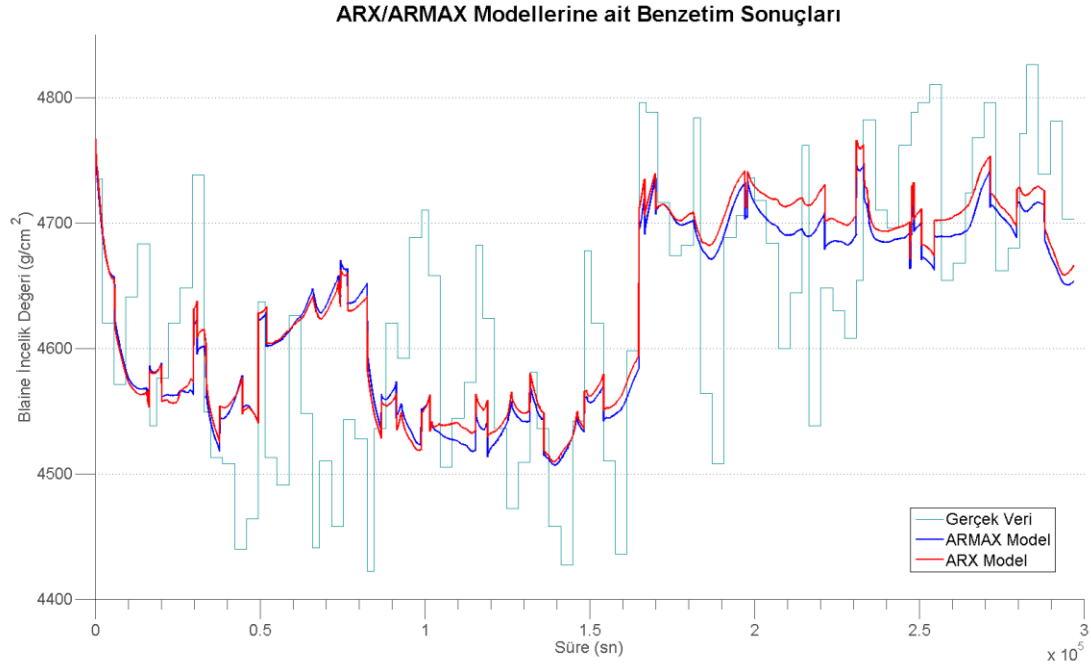
Genetik algoritma ile optimizasyon çalışmalarında problemin çözümlerinin aranan çözümlere yakınlığının ölçüsü olan uygunluk fonksiyonu (fitness function) olarak Pearson Korelasyon Katsayısı (Pearson correlation coefficient) kullanılmıştır.

Genetik algoritma ile gerçekleştirilen optimizasyon sonunda elde edilen en iyi dört modele ait statik doğrusal olmayan blok parametreleriyle dinamik doğrusal blok parametreleri (n_k , n_b , n_f), elde edilen modelin yüzde uyumları ve HOKK değerleri Çizelge 7.3’de verilmiştir.

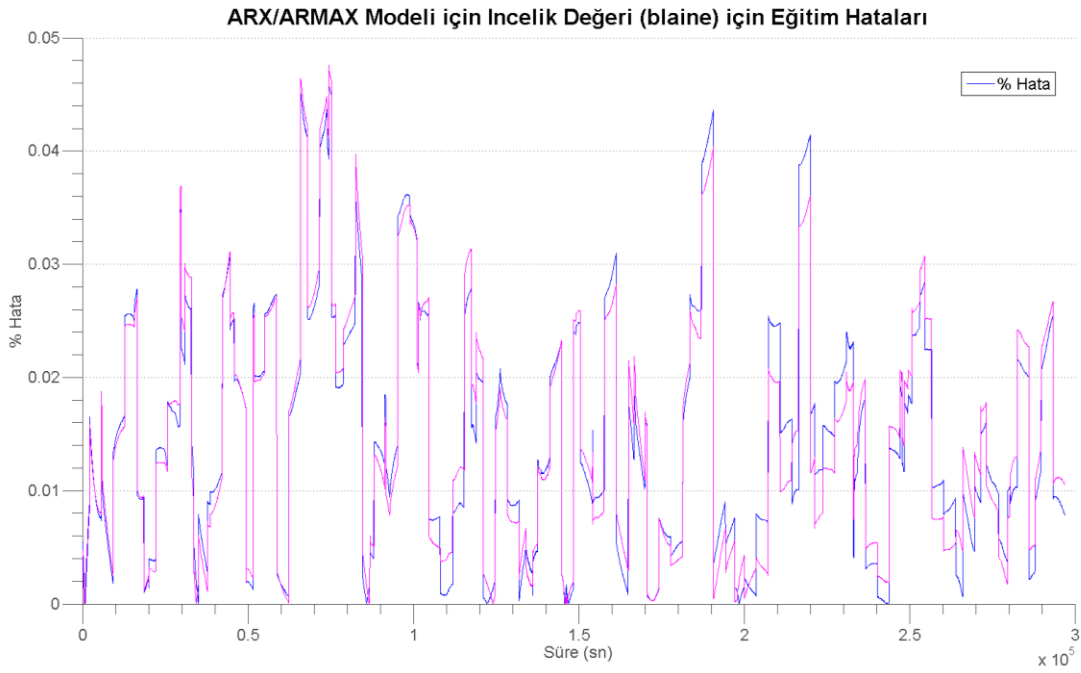
Çizelge 7.3: Eniyileme ile bulunan ARX/ARMAX parametreleri.

Modeller	na	nb	nc	nk	Uyum (%)	HOKK
ARX	2	[10 7 10 7 2]	-	[1 7 5 1 0]	63,5498	82,5042
ARMAX	10	[8 6 7 10 10]	6	[3 6 8 6 0]	62,7587	82,3561

ARX ve ARMAX Modelleri ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması Şekil 7.1’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 7.2’de de ARX ve ARMAX Modelleri için yüzde hata değerleri gösterilmektedir.



Şekil 7.1: ARX ve ARMAX modelleri ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması.



Şekil 7.2: ARX ve ARMAX modelleri için yüzde hata değerleri.

7.2 Çimento Öğütme Prosesinin NARX (Nonlinear AutoRegressive with exogenous terms) ile Modellenmesi

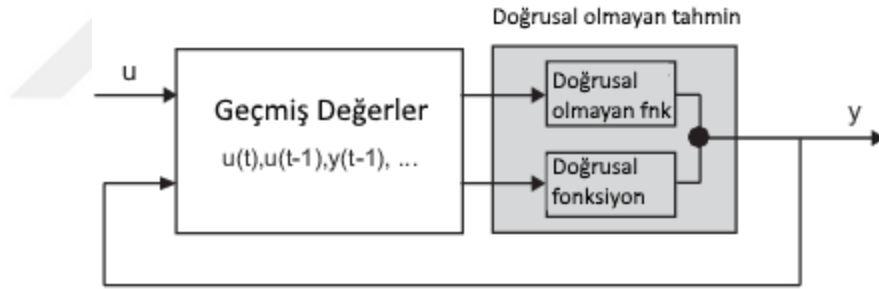
Sistem tanımlama çalışmaları kapsamında ARX/ARMAX ile yeterli miktarda başarımla elde edilemediğinden doğrusal olmayan (non linear) sistem tanımlama teknikleri ile benzetim çalışmalarına geçilmiştir.

İlk çalışma olarak hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemlerin tanımlanmasında oldukça güçlü bir sistem tanımlama tekniği olan NARX (Nonlinear AutoRegressive with exogenous terms) ile çimento öğütme prosesinin tanımlama çalışmaları yapılmıştır.

NARX yapısında çıktının değeri, girdilerin geçmiş değerlerinin ve önceki çıktıların değerlerine bağlı, denklem 7.3 ile verilen fonksiyon olarak elde edilir.

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_y), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-n_u)) \quad (7.3)$$

Ayrıca sistemin genel model gösterimi Şekil 6.3’de yer almaktadır.



Şekil 7.3: NARX (Nonlinear AutoRegressive with exogenous terms) model yapısı.

Burada y sistemin çıkış değeri ve u değeri de sistemin giriş değerleridir. NARX modelinde sistemin çıkış değerlerinin tahmininde u girdilerin geçmiş değerleri ve y çıktıların önceki değerleri de hesaba katılmaktadır. Buradaki F fonksiyonu bir doğrusal olmayan fonksiyon olup yapay sinir ağı, wavelet ağı, sigmoid ağı, kernel fonksiyonu benzeri olabilir.

Bu çalışmada sistem fonksiyonu olarak wavelet ağı seçilmiştir. NARX modellerinin belirlenmesinde n_a , n_b ve n_k değerlerinin belirlenmesi ile elde edilmektedir.

NARX model yapısında yer alan parametreler Çizelge 7.4’de görülmektedir.

Çizelge 7.4: NARX model yapısına ait parametreler.

Parametre	Açıklaması	Matrix Değeri
na	Çıkışın çıkışa göre regressör sayısı	$[na_1]$
nb	Çıkışın girişlere göre regressör sayısı	$[nb_1, nb_2, nb_3, nb_4, nb_5]$
nk	Gecikme	$[nk_1, nk_2, nk_3, nk_4, nk_5]$

Çoklu giriş tekli çıkış (MISO) sistemlerde nb ve nk parametreleri matris formunda olup giriş sayısı kadar satır ve çıkış sayısı kadar sütundan oluşurlar. Çimento öğütme prosesi, 5 girişli ve tek çıkışlı bir sistem olarak modelleneyeceği için toplamda sadece nb ve nk için 10 parametrenin değiştirilerek eniyileme çalışmasının yapılması gerekmektedir. Buna ek olarak Çizelge 7.5’de görülebileceği gibi na değeri, yani çıkış değerini tahmin etmek için geçmiş çıkış datalarından ne kadar geriye doğru değer ile besleneceğini gösteren değer de eniyilenmelidir.

Çizelge 7.5: NARX model yapısına ait parametrelerin değişken sayıları.

Parametre	En Küçük Değer	EnBüyükDeğer	ToplamDeğişken
na	0	10	11
nb	0	10	11
nk	0	10	11

na, nb ve nk değerlerinin 0 ile 10 arasında tam sayı olarak değiştiği göz önüne alınacak olursa her bir parametre için 11 farklı konfigürasyon ortaya çıkmaktadır. Ayrıca nb ve nk değerleri de toplam giriş sayısı kadar yani 5 olduğundan dolayı tüm parametrelerin kombinasyonları tam olarak NARX için $11 \cdot 11^5 \cdot 11^5$ yani yaklaşık olarak $2,85 \cdot 10^{11}$ adet olmaktadır.

Bu çalışmada da tüm bu parametrelerin eniyileme çalışmaları ile elde edilmesinde Genetik Algoritma (GA) Optimizasyon Yöntemi kullanılmıştır.

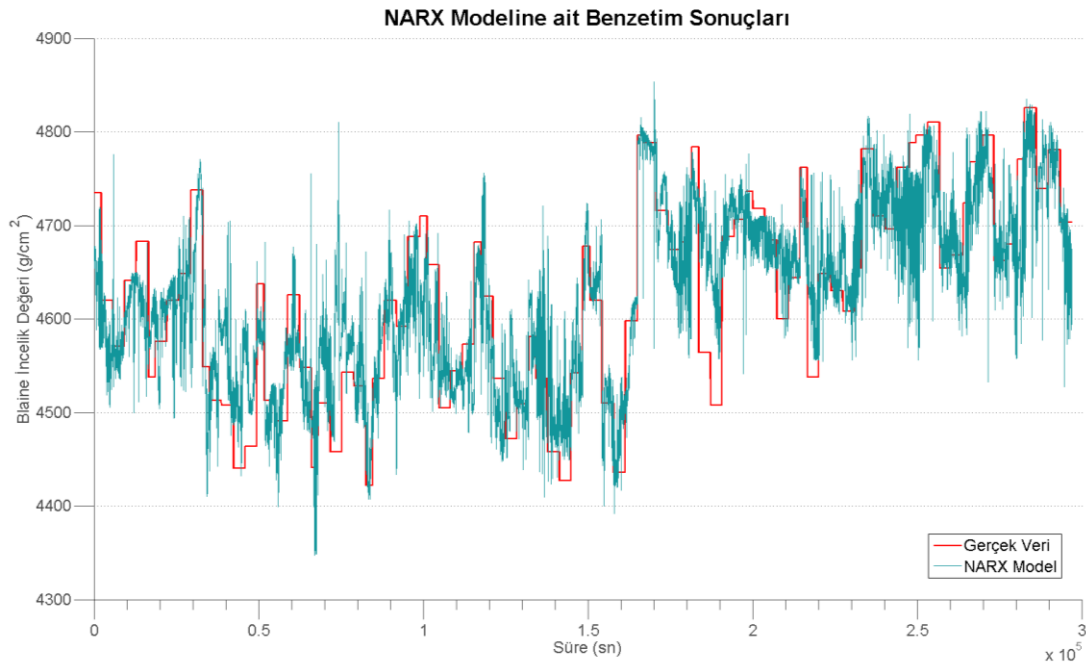
Genetik algoritma ile optimizasyon çalışmalarında problemin çözümlerinin aranan çözümlere yakınlığının ölçüsü olan uygunluk fonksiyonu (fitness function) olarak Pearson Korelasyon Katsayısı (Pearson correlation coefficient) kullanılmıştır.

Genetik algoritma ile gerçekleştirilen optimizasyon sonunda elde edilen en iyi dört modele ait parametreler (n_k , n_b , n_f) ile beraber elde edilen modelin yüzde uyumları ve HOKK değerleri Çizelge 7.6’da verilmiştir.

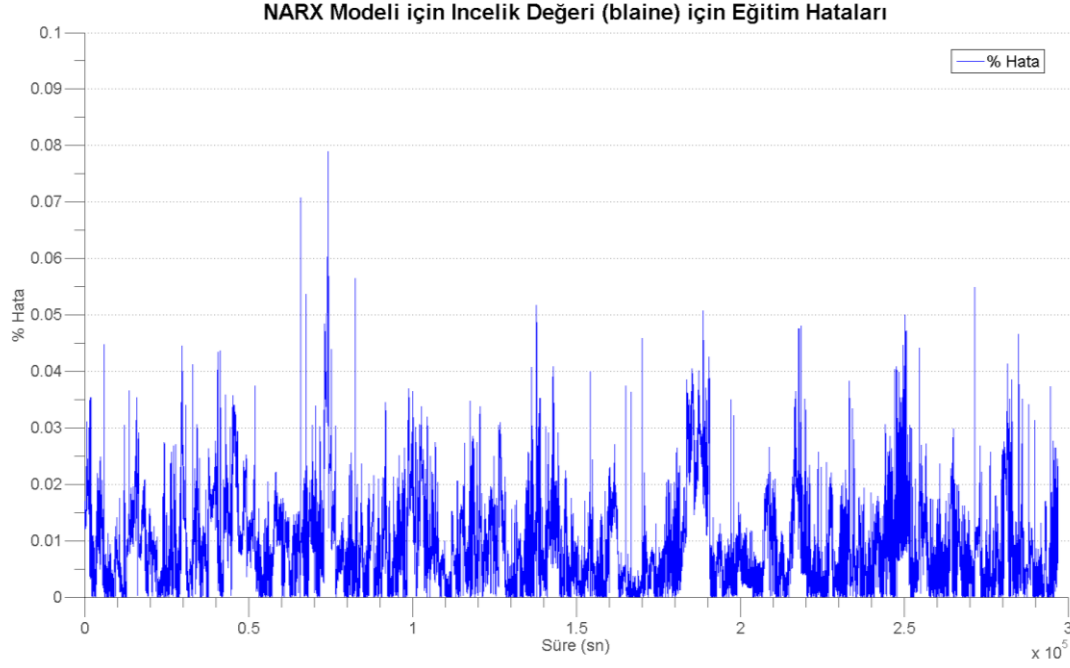
Çizelge 7.6: Eniyileme ile bulunan NARX parametreleri.

Modeller	na	nb	nk	Uyum (%)	HOKK
NARX	[0]	[1 1 1 0 5]	[3 1 0 4 0]	84,4533	56,5152

NARX modeli ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması Şekil 7.4’te ve NARX modeli için yüzde hata değerleri Şekil 7.5’te gösterilmektedir.



Şekil 7.4: NARX modeli ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması.



Şekil 7.5: NARX modeli için yüzde hata değerleri.

7.3 Çimento Öğütme Prosesinin Hammerstein-Wiener ile Modellenmesi

Hammerstein-Wiener, blok odaklı doğrusal olmayan sistem tanılama tekniği olup doğrusal olmayan sistemlerin model kestirimi konusunda bilinen ve uygulanan bir metottur. Model, dinamik doğrusal bir blok ile bu bloğun girişi öncesinde ve çıkışı sonrasında yer alan statik doğrusal olmayan blokların seri bağlanması ile elde edilmektedir.

Sistemin giriş ve çıkışında yer alan doğrusal olmayan bloklar statik (hafızasız) olup bu blokların çıkışında elde edilen veriler geçmiş değerlere bağlı değildir. Bu doğrusal olmayan giriş ve çıkış fonksiyonları sigmoid network, wavelet network, saturasyon (saturation), ölü bölge (dead zone), parçalı doğrusal (piecewise linear) veya tekdereceli polinom (one-dimensional polynomial) olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada dinamik doğrusal bloğun hem girişi öncesinde hem de çıkışı sonrasında yer alan statik doğrusal olmayan blokların doğrusalsızlığı (nonlinearity) için parçalı doğrusal (piecewise linear) fonksiyonu kullanılmıştır.

Sistemde yer alan Dinamik Doğrusal Blok ise sistem fonksiyonunun pay (B) polinomu ve payda (F) polinomunun mertebelerinin belirlenmesi ile elde edilmektedir. Ayrıca bir de sistemin girişi ve çıkışları arasındaki gecikmenin (nk) de belirlenmesi gerekmektedir. Hammerstein model yapılarında yer alan statik doğrusal

olmayan blok parametreleri ve dinamik doğrusal blok parametreleri Çizelge 7.7'de görülmektedir.

Çizelge 7.7: Hammerstein-Wiener model yapısına ait parametreler.

Parametre	Açıklaması	Matrix Değeri
nk	GirişlerleÇıkışlararasındakiGecikme	$[nk_1, nk_2, nk_3, nk_4, nk_5]$
nb	B derecesi (sıfırlar)	$[nb_1, nb_2, nb_3, nb_4, nb_5]$
nf	F derecesi (kutuplar)	$[nf_1, nf_2, nf_3, nf_4, nf_5]$

Çoklu giriş tekli çıkış (MISO) sistemlerde nb, nf ve nk parametreleri matris formunda olup giriş sayısı kadar satır ve çıkış sayısı kadar sütundan oluşurlar. Çimento öğütme prosesi, 5 girişli ve tek çıkışlı bir sistem olarak modelleneneceği için toplamda 15 parametrenin değiştirilerek eniyileme çalışmasının yapılması gerekmektedir. Çizelge 7.8'de görülebileceği gibi nb, nf ve nk parametreleri 1x5'lik satır matrislerdir.

nk, nb ve nf değerlerinin 0 ile 10 arasında tam sayı olarak değiştiği göz önüne alınacak olursa her bir parametre için 11 farklı konfigürasyon ortaya çıkmaktadır (Çizelge 7.8). Ayrıca nk, nb ve nf değerleri de toplam giriş sayısı kadar yani 5 olduğundan dolayı parametrelerin kombinasyonları tam olarak $11^5.11^5.11^5$ yani yaklaşık olarak $4,18.10^{15}$ adet olmaktadır. Olası çözümler uzayının bu kadar büyük ve karmaşık olduğu, özellikle de mevcut bilgiyle sınırlı arama uzayında çözüme gitmenin zor olduğu bu gibi durumlarda Genetik algoritma Optimizasyon Yöntemi kullanılmaktadır.

Tüm bu parametrelerin eniyileme çalışmaları ile elde edilmesinde Genetik Algoritma (GA) Optimizasyon Yöntemi kullanılmıştır.

Çizelge 7.8: Hammerstein-Wiener model yapısına ait parametrelerin değişken sayıları.

Parametre	En Küçük Değer	EnBüyükDeğer	ToplamDeğişken
nk	0	10	11
nb	0	10	11
nf	0	10	11

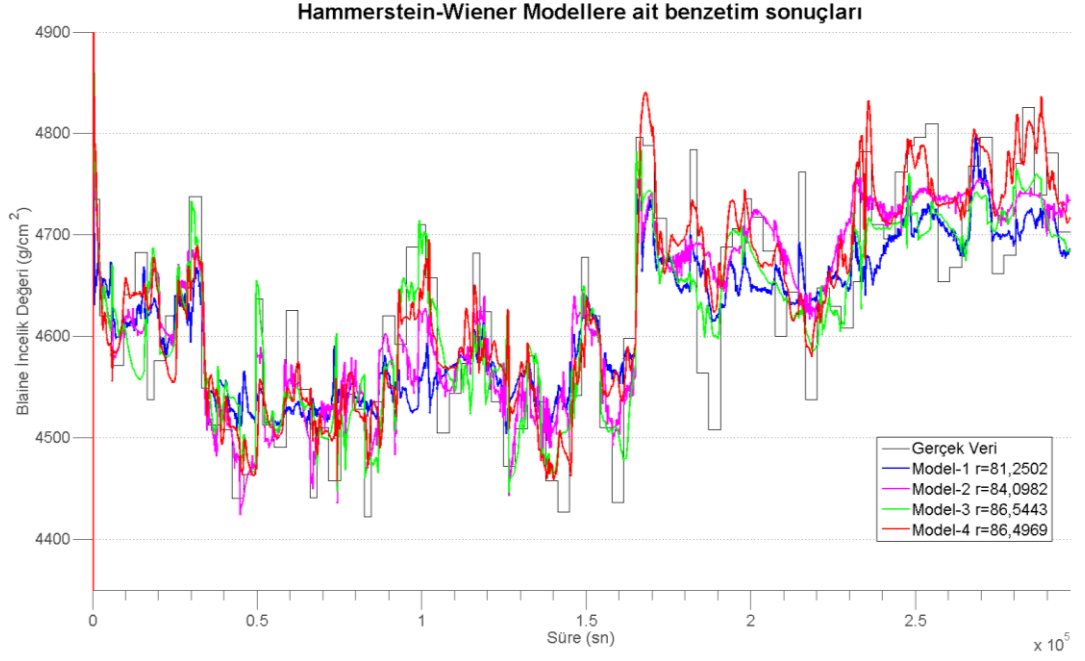
Genetik algoritma ile optimizasyon çalışmalarında problemin çözümlerinin aranan çözümlere yakınlığının ölçüsü olan uygunluk fonksiyonu (fitness function) olarak Pearson Korelasyon Katsayısı (Pearson correlation coefficient) kullanılmıştır.

Genetik algoritma ile gerçekleştirilen optimizasyon sonunda elde edilen en iyi dört modele ait statik doğrusal olmayan blok parametreleriyle dinamik doğrusal blok parametreleri (n_k , n_b , n_f), elde edilen modelin yüzde uyumları ve HOKK değerleri Çizelge 7.9’da verilmiştir.

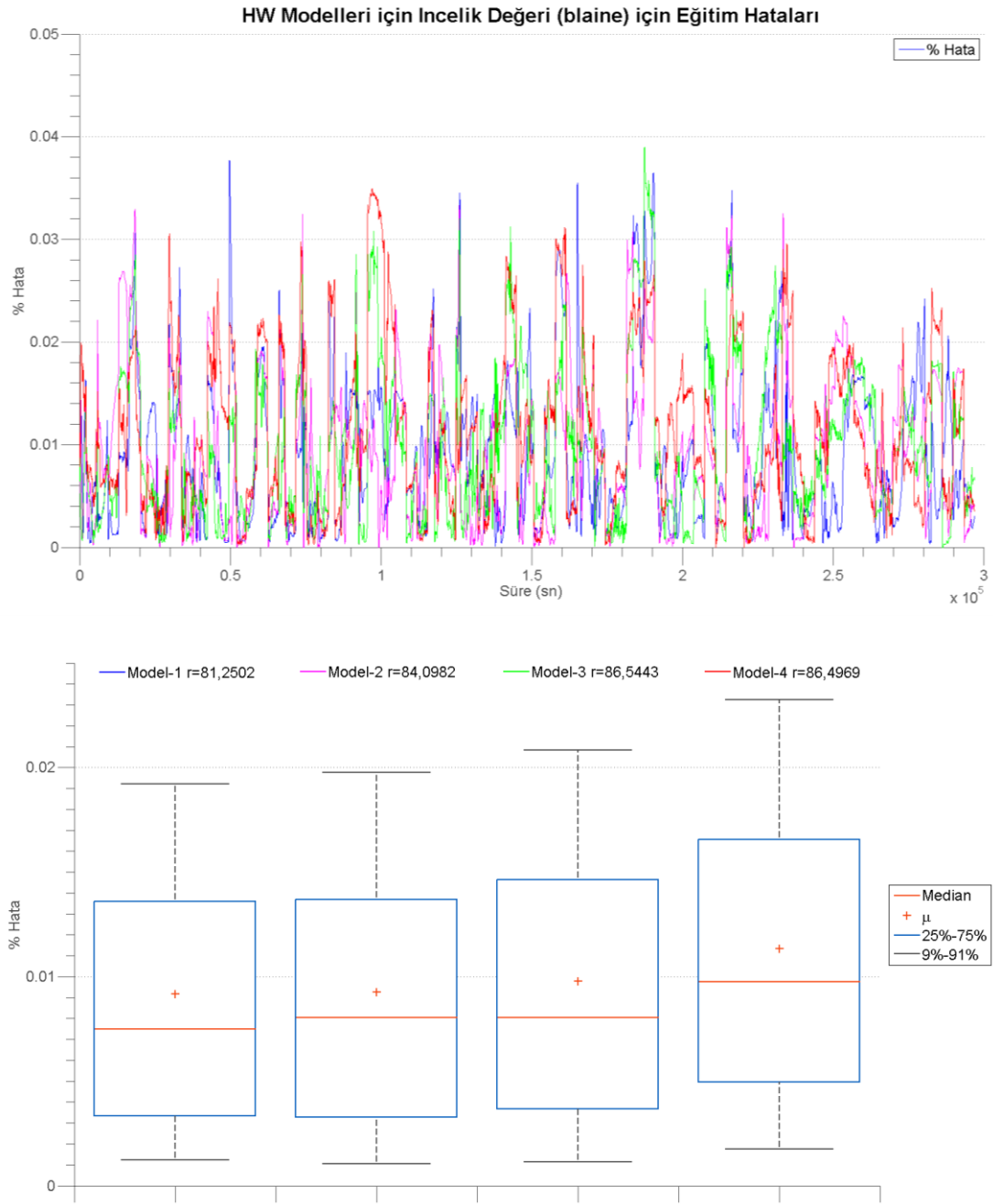
Çizelge 7.9: Eniyileme ile bulunan NARX parametreleri.

Modeller	n_b	n_f	n_k	Uyum (%)	HOKK
Model 1	[8 7 2 5 4]	[3 5 0 2 4]	[1 7 1 9 5]	81,2502	64,0106
Model 2	[1 8 1 4 9]	[9 2 5 1 4]	[5 2 0 10 5]	84,0982	57,1931
Model 3	[4 2 1 1 10]	[9 6 4 8 7]	[10 4 1 2 3]	86,5443	54,0224
Model 4	[1 1 3 9 1]	[9 4 7 1 8]	[3 8 6 8 2]	86,4969	53,9053

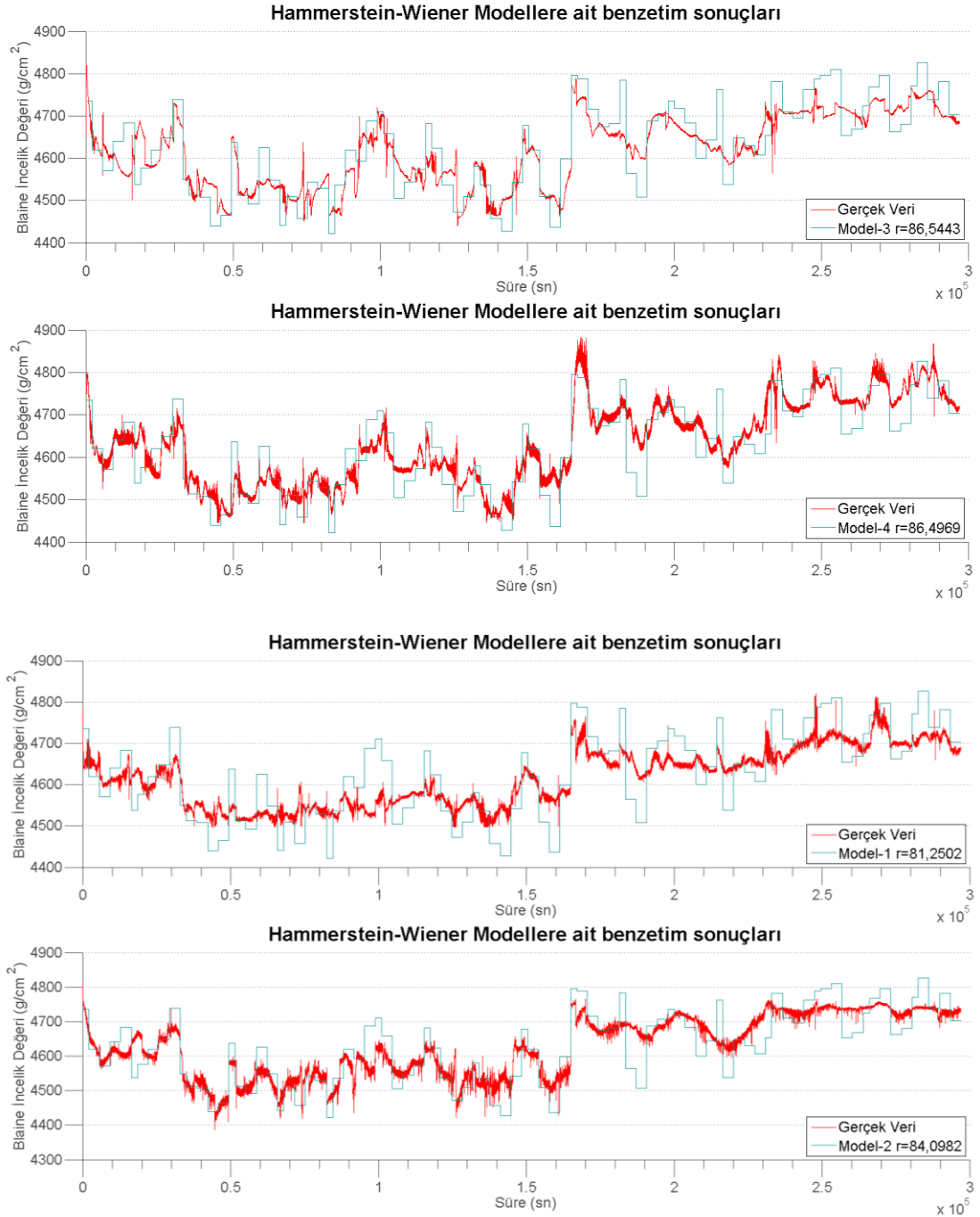
Genetik algoritma ile gerçekleştirilen optimizasyon sonunda elde edilen en iyi dört Hammerstein-Wiener model ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılmasına ait grafikler Şekil 7.6’da yer almaktadır. Ayrıca Şekil 7.7’de elde edilen Hammerstein-Wiener modellerin yüzde hata değerleri ve bu hata değerlerine göre kutu grafikleri (boxplot) yer almaktadır.



Şekil 7.6: Hammerstein-Wiener modelleri ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması.



Şekil 7.7: Hammerstein-Wiener modelleri için yüzde hata değerleri ve hataların kutu grafik gösterimi.



Şekil 7.8: Hammerstein-Wiener modelleri ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin ayrı ayrı grafiklerde karşılaştırılması.

7.4 Çimento Öğütme Prosesinin Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Modellenmesi

Yapay Sinir Ağları (YSA) tabanlı doğrusal olmayan model çıkarılmasında yapay sinir ağının performansını etkileyen bir çok faktör ve tasarım parametresi mevcuttur. Bunlardan birisi eğitim algoritması olup yapılan denemeler sonucunda eğitim algoritması olarak geriye yayılım algoritmasının değiştirilmesi ile elde edilen

Levenberg-Marquardt (LM) algoritması kullanılmıştır. Ayrıca yapılan denemeler sonunda gizli katman ve gizli katman nöron sayısı için en uygun olan değere karar verildikten sonra Levenberg-Marquardt (LM) algoritması yanısıra Quasi-Newton (QN) algoritması ile de eğitim gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bir diğer yapay sinir ağı modellerinin tasarımında yer alan parametre de YSA modellerinin eğitimleri için çevrim (epoch) sayısıdır. Yapılan çalışmalarda çevrim (epoch) sayısı bir çok deneme sonunda belirlenmekle beraber, görülmüştür ki 1.000 çevrim (epoch) sayısından sonra HOKK değeri düşmemekte ve sabit kalmaktadır. Ayrıca bilindiği üzere YSA artan çevrim (epoch) sayısı ile gürültülere karşı daha duyarlı bir hale gelmekte ve gerçek sistem karakteristiğini kaybedebilmektedir. Seçilen bu çevrim sayısı ile aslında genelleştirme, gürbüzlük ve kesinlik arasında optimum bir nokta belirlenmiş olmaktadır.

Saklı katmandaki en uygun nöron sayısını ve aktivasyon fonksiyonunu bulabilmek için yapılan denemeler aşağıdaki tabloda görülmektedir. Çıkış katmanında doğrusal aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Bunun yanında tek saklı katman ile istenen performans elde edilememiş ve gizli katman sayısı ikiye çıkarılmıştır. Çift katman, istenen sonucun elde edilmesinde yeterli olmuştur. Çizelge 7.10'da elde edilen modellerin hataların ortalama karekökü (HOKK) ve çıkışın yüzde uyumları verilmiştir.

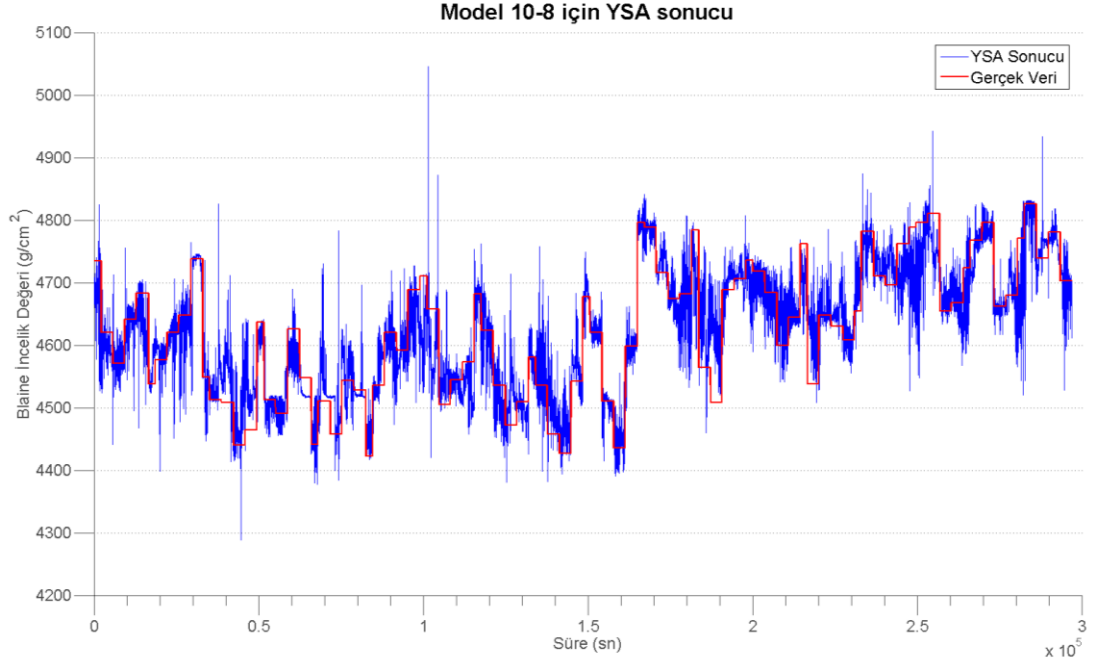
Saklı katmanda tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Saklı katmanlardaki en uygun nöron sayısı ise 10 ve 8 olarak bulunmuş, model çıkışları ve yüzde hataları tabloda verilmiştir.

Çizelge 7.10: YSA Modellerinin başarımlar değerleri tablosu.

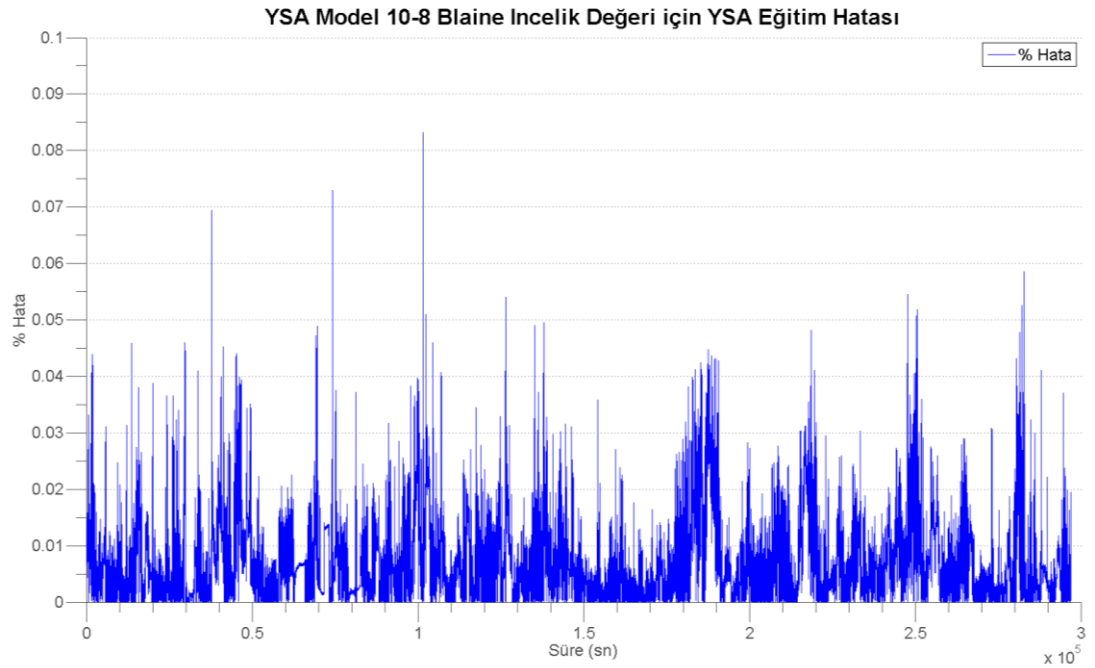
Öğrenme Yöntemi	Gizli Katman Sayısı	Gizli Katmanlardaki Nöron Sayısı	Gizli Katmanlardaki Etkinlik Fonksiyonları	Çevrim Sayısı	Yüzde Uyum (%)	Hataların Ortalama Kare Kökü (HOKK)
Levenberg-Marquardt	1	1	Tan Sigmoid	1000	66,4489	78,8167
Levenberg-Marquardt	1	2	Tan Sigmoid	1000	68,5503	76,7888
Levenberg-Marquardt	1	3	Tan Sigmoid	1000	70,0974	75,2191
Levenberg-Marquardt	1	4	Tan Sigmoid	1000	71,1818	74,0776
Levenberg-Marquardt	1	5	Tan Sigmoid	1000	72,9869	72,0972
Levenberg-Marquardt	1	6	Tan Sigmoid	1000	77,1138	67,1487
Levenberg-Marquardt	1	7	Tan Sigmoid	1000	79,1187	64,5021
Levenberg-Marquardt	1	8	Tan Sigmoid	1000	78,7519	64,9994
Levenberg-Marquardt	1	9	Tan Sigmoid	1000	79,2336	64,3450
Levenberg-Marquardt	1	10	Tan Sigmoid	1000	79,5207	63,9498
Levenberg-Marquardt	2	5 - 5	Tan Sigmoid	1000	81,8093	60,6537
Levenberg-Marquardt	2	5 - 6	Tan Sigmoid	1000	81,8614	60,5754

Çizelge 7.10 (devam) : YSA Modellerinin başarımlar değerleri tablosu.

Öğrenme Yöntemi	Gizli Katman Sayısı	Gizli Katmanlardaki Nöron Sayısı	Gizli Katmanlardaki Etkinlik Fonksiyonları	Çevrim Sayısı	Yüzde Uyum (%)	Hataların Ortalama Kare Kökü (HOKK)
Levenberg-Marquardt	2	5 - 7	Tan Sigmoid	1000	82,7648	59,1942
Levenberg-Marquardt	2	5 - 9	Tan Sigmoid	1000	84,6828	56,0954
Levenberg-Marquardt	2	5 - 10	Tan Sigmoid	1000	84,8440	55,8238
Levenberg-Marquardt	2	10 - 5	Tan Sigmoid	1000	85,0832	55,4174
Levenberg-Marquardt	2	10 - 7	Tan Sigmoid	1000	86,8991	47,0996
Levenberg-Marquardt	2	10 - 8	Tan Sigmoid	500	89,9335	46,1173
Levenberg-Marquardt	2	10 - 8	Tan Sigmoid	1000	90,0049	45,9622
Levenberg-Marquardt	2	10 - 8	Tan Sigmoid	2000	86,9057	52,1767
Quasi-Newton	2	10 - 8	Tan Sigmoid	1000	71,8367	73,3836
Levenberg-Marquardt	2	10 - 9	Tan Sigmoid	1000	89,4748	47,0996
Levenberg-Marquardt	2	10 - 10	Tan Sigmoid	1000	87,8389	50,4086



Şekil 7.9: YSA modeli ile CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisinin karşılaştırılması.



Şekil 7.10: YSA için yüzde hata değerleri.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, çimento endüstrisinde üretimde enerji kullanımının en yoğun olduğu çimento öğütme prosesinin doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler ile modellenmesi incelenmiştir. Çimento öğütme prosesi ilk olarak doğrusal parametrik model olan ARX ve ARMAX model yapıları ile tanımlanmıştır. Daha sonra sistem, doğrusal olmayan sistem tanımlama yöntemleri olan NARX, Hammerstein-Wiener ve yapay sinirsel ağları (YSA) ile modellenmiştir.

Çalışma kapsamında çimento öğütme sistemi bir bütün olarak modellenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda da öncelikle doğrusal sistemlerin modellenmesinde kullanılan ARX ve ARMAX yöntemleri ile modellemelere başlanmıştır, çünkü doğrusal modellerde geçmiş giriş ve çıkışların o anki çıkış üzerindeki etkisi çok açık bir şekilde görülebilmektedir. Elde edilen modellerin başarımlarının ölçümünde Pearson Korelasyon Katsayısı (r) ve Hataların Ortalama Kare Kökü (HOKK) değerlerine bakılmıştır. ARX için en yüksek başarımlar $r=63,55$, HOKK=82,50 ve ARMAX için en yüksek başarımlar ise $r=62,76$, HOKK=82,35 olarak elde edilmiştir. Sistemin doğrusal olmayan yapısı göz önüne alındığında böyle bir sonucun çıkması oldukça normaldir, ancak mümkün ise mutlaka doğrusal modelin yeterli performans sağlayıp sağlamadığı kontrol edildikten sonra doğrusal olmayan model ile sistem tanımlamaya geçilmelidir. Bu çalışmada doğrusal modellerden elde edilen başarımların yeterli olmaması sonucunda doğrusal olmayan sistem modellemeye geçilmesine karar verilmiştir.

Doğrusal olmayan sistem modellemeleri çalışmalarında sırasıyla NARX, Hammerstein-Wiener ve YSA yöntemi ile modelleme çalışmaları yapılmıştır. 5 giriş ve tek çıkışlı çimento öğütme prosesinin her bir model için kestiriminde farklı sayılarda bilinmeyen parametrenin kestirilmesi gerekmektedir. Çizelge 8.1’de her bir model için gerekli olan parametre sayıları ve kullanılan eniyileme yöntemi gösterilmiştir.

Çizelge 8.1: Sistem modelleri için eniyileme yapılması gerekli parametre sayısı.

Modeller	Parametre Sayısı	Parametreler	EniyilemeYöntemi
ARX	11	na, nb ve nk	GA
ARMAX	12	na, nb, nc ve nk	GA
NARX	11	na, nb, nk	GA
Hammerstein-Wiener	15	nk, nb, nf	GA
YSA	2	Katman ve Nöron Sayıları	Iterasyon

ARX, ARMAX, NARX ve Hammerstein-Wiener modellerinin parametrelerinin eniyileme çalışmaları ile elde edilmesinde Genetik Algoritma (GA) Optimizasyon Yöntemi kullanılmıştır. YSA'ların eniyilenmesi çalışmalarında parametre uzayında iteratif yaklaşımla başka başka noktalar bulunup yeterli bağımsız parametre sayısına ulaşılarak en iyi başarımlar elde edilmiştir.

Çalışması yapılan modeller üzerinden elde edilen sonuçların dökümü CEMIV tipi çimento üretimi için Çizelge 8.2’de başarımlarına göre gösterilmiştir. Tabloda yer alan sonuçlardan da anlaşılacağı üzere sistemin doğrusal olmayan modelleme çalışmaları daha başarılıdır. Hammerstein-Wiener modeli ile elde edilen başarımlar $r=86,50$ ve $HOKK= 53,91$ değerleri YSA'nın bir miktar aşağısında kalmakla beraber oldukça tatmin edicidir, çünkü çalışma sonunda elde edilen modellerin model becerisi kadar çevrimiçi çalışmaya göre uygunluğu büyük bir önem arz etmektedir.

Çizelge 8.2: Elde edilen modellerin başarımların karşılaştırma tablosu.

Modeller	Uyum (%)	HOKK
ARX	63,5498	82,5042
ARMAX	62,7587	82,3561
NARX	84,4533	56,5152
Hammerstein-Wiener	86,4969	53,9053
YSA	90,0049	45,9622

Özellikle çimento öğütme prosesinin de çevrimiçi hale getirilmesi ile sistemin çok daha yüksek bir performans göstermesi hedeflendiği için modellerden yakın performansa sahip olanların gerçek zamanda problemin global optimum çözümünü en hızlı şekilde çözecek olanı tercih edilmelidir.





KAYNAKLAR

1. Jankovic, A., W. Valery, and E. Davis, *Cement grinding optimisation*. Minerals Engineering, 2004. **17**(11): p. 1075-1081.
2. Pilevneli, C., et al., *Open and closed circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical stirred mill*. Powder Technology, 2004. **139**(2): p. 165-174.
3. Celep, O., Đ. Alp, and T. Türk, *Stirred media mills in ultrafine grinding technology and the applications in ore dressing*. Review of Earth Sciences, Đstanbul, 2008. **21**(2): p. 61.
4. Birlđi, T.Ç.M. *2016 yılı Çimento Kapasite Miktarları*. 2016 [cited 2017].
5. Van Breusegem, V., et al., *Multivariable linear quadratic control of a cement mill: An industrial application*. Control Engineering Practice, 1994. **2**(4): p. 605-611.
6. de Haas, B., et al. *Cement mill optimization: Design parameters selection of the LQG controller*. in *Control Applications, 1995., Proceedings of the 4th IEEE Conference on*. 1995. IEEE.
7. Van Breusegem, V., et al., *An industrial application of multivariable linear quadratic control to a cement mill*. International Journal of Mineral Processing, 1996. **44**: p. 405-412.
8. Magni, L., G. Bastin, and V. Wertz, *Multivariable nonlinear predictive control of cement mills*. IEEE transactions on control systems technology, 1999. **7**(4): p. 502-508.
9. Grognaud, F., et al., *Robust stabilization of a nonlinear cement mill model*. IEEE Transactions on automatic control, 2001. **46**(4): p. 618-623.
10. Dagci, O.H., M.O. Efe, and O. Kaynak. *A nonlinear learning control approach for a cement milling process*. in *Control Applications, 2001.(CCA'01). Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on*. 2001. IEEE.
11. Lepore, R., A.V. Wouwer, and M. Remy, *Modeling and predictive control of cement grinding circuits*. IFAC Proceedings Volumes, 2002. **35**(1): p. 43-48.
12. Jadot, F., et al. *Global state feedback stabilisation of cement mills*. in *Decision and Control, 1998. Proceedings of the 37th IEEE Conference on*. 1998. IEEE.
13. Tsamatsoulis, D. and C. Lungoci. *Effective optimization of controllers stabilizing closed circuit grinding systems of cement*. in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on*. 2010. IEEE.
14. Tsamatsoulis, D. *Modeling of cement milling process based on long term industrial data*. in *Proceedings of the 15th WSEAS international conference on Systems*. 2011. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).
15. Eberhart, R. and J. Kennedy. *A new optimizer using particle swarm theory*. in *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*. 1995. IEEE.

16. Kennedy, J. and Eberhart R. in *Particle swarm optimization*. In. Perth, Australia: proceedings of the IEEE international conference on neural networks. 1995.
17. Avşar, H., *Control, optimization and monitoring of Portland cement (Pc 42.5) quality at the ball mill*. 2006, İzmir Institute of Technology.
18. Subbaraj, P. and P.G. Anand. *Modified particle swarm optimized MIMO FLC for complex industrial process*. in *Communication Control and Computing Technologies (ICCCCT), 2010 IEEE International Conference on*. 2010. IEEE.
19. Subbaraj, P. and P.G. Anand, *Optimal design of a fuzzy logic controller for control of a cement mill process by a genetic algorithm*. Instrumentation Science and Technology, 2011. **39**(3): p. 288-311.
20. Mallinson, L.G., *An historical examination of concrete*. 1986, Department of the Environment.
21. Jämstorp, E., et al., *Mechanically strong geopolymers offer new possibilities in treatment of chronic pain*. Journal of Controlled Release, 2010. **146**(3): p. 370-377.
22. Vivadinar, Y., W.W. Purwanto, and A.H. Saputra, *Tracing the energy footprints of Indonesian manufacturing industry*. Energy Science & Engineering, 2016. **4**(6): p. 394-405.
23. Alsop, P., et al., *The Cement Plant Handbook. 3a edição*. 2001, Tradeship Publications. Portsmouth (RUN).
24. Hammerstein, A., *Nichtlineare integralgleichungen nebst anwendungen*. Acta mathematica, 1930. **54**(1): p. 117-176.
25. Eskinat, E., S.H. Johnson, and W.L. Luyben, *Use of Hammerstein models in identification of nonlinear systems*. AIChE Journal, 1991. **37**(2): p. 255-268.
26. Hunt, K.J., et al., *Investigation of the Hammerstein hypothesis in the modeling of electrically stimulated muscle*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1998. **45**(8): p. 998-1009.
27. Kim, J. and K. Konstantinou, *Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory*. Electronics Letters, 2001. **37**(23): p. 1417-1418.
28. Balestrino, A., et al., *Automatic nonlinear auto-tuning method for Hammerstein modeling of electrical drives*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001. **48**(3): p. 645-655.
29. Sung, S.W., *System identification method for Hammerstein processes*. Industrial & engineering chemistry research, 2002. **41**(17): p. 4295-4302.
30. Dempsey, E.J. and D.T. Westwick, *Identification of Hammerstein models with cubic spline nonlinearities*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004. **51**(2): p. 237-245.
31. Srinivasan, R., et al., *Control loop performance assessment. 2. Hammerstein model approach for stiction diagnosis*. Industrial & engineering chemistry research, 2005. **44**(17): p. 6719-6728.
32. Jurado, F., *A method for the identification of solid oxide fuel cells using a Hammerstein model*. Journal of Power Sources, 2006. **154**(1): p. 145-152.
33. Wang, J., et al., *Identification of Hammerstein systems without explicit parameterisation of non-linearity*. International Journal of Control, 2009. **82**(5): p. 937-952.
34. Giri, F. and E.-W. Bai, *Block-oriented nonlinear system identification*. Vol. 1. 2010: Springer.

35. Wiener, N., *Nonlinear problems in random theory*. 1958. New York.
36. Boyd, S. and L. Chua, *Fading memory and the problem of approximating nonlinear operators with Volterra series*. IEEE Transactions on circuits and systems, 1985. **32**(11): p. 1150-1161.
37. Zhu, Y. *Distillation column identification for control using Wiener model*. in *American Control Conference, 1999. Proceedings of the 1999*. 1999. IEEE.
38. Kalafatis, A.D., L. Wang, and W.R. Cluett, *Identification of time-varying pH processes using sinusoidal signals*. Automatica, 2005. **41**(4): p. 685-691.
39. Hunter, I.W. and M. Korenberg, *The identification of nonlinear biological systems: Wiener and Hammerstein cascade models*. Biological cybernetics, 1986. **55**(2): p. 135-144.
40. Billings, S. and S. Fakhouri. *Identification of a class of nonlinear systems using correlation analysis*. in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1978. IET.
41. Oztemel, E., *Yapay sinir aglari*. Papatya Yayıncılık, İstanbul, 2003.
42. Çelik, E., *Görüntü İşlemeye Dayalı Avuç İçi İzinin Yapay Sinir Ağı ile Tanınması*. 2014.
43. Efe, M. and O. Kaynak, *Yapay sinir ağıları ve uygulamaları*. 2000, Boğaziçi University Press, İstanbul.
44. Yıldızdoğan, M., *Yapay sinir ağıları ile sistem tanıma*. 1995.
45. Bilgin, S., *Kalp Hızı Değişkenliğinin Dalgacık Dönüşümü ve Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Analizi*. Doktora Tezi, 2008.
46. Hopfield, J.J. and D.W. Tank, *"Neural" computation of decisions in optimization problems*. Biological cybernetics, 1985. **52**(3): p. 141-152.
47. Holland, J.H., *Adaptation in natural and artificial systems. an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975, 1975. **1**.
48. Beasley, D., D.R. Bull, and R.R. Martin, *An overview of genetic algorithms: Part 1, fundamentals*. University computing, 1993. **15**(2): p. 56-69.
49. Mayer, D., et al., *Survival of the fittest—genetic algorithms versus evolution strategies in the optimization of systems models*. Agricultural Systems, 1999. **60**(2): p. 113-122.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Erman ÇEVİKKALP
Doğum Tarihi ve Yeri : 23.10.1980 Bursa
E-posta : ermancevikkalp@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2003, İstanbul teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Sistem Dinamiği ve Kontrol Bölümü