

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİNİN MODELLENMESİ
GÖZLEMLEYİCİ VE ÜST DENETLEYİCİ TASARIMI**



DOKTORA TEZİ

Salih GÜLŞEN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİNİN MODELLENMESİ
GÖZLEMLEYİCİ VE ÜST DENETLEYİCİ TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

**Salih GÜLŞEN
518092006**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şeniz ERTUĞRUL

HAZİRAN 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518092006 numaralı Doktora Öğrencisi Salih GÜLŞEN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİNİN MODELLENMESİ GÖZLEMLEYİCİ VE ÜST DENETLEYİCİ TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Z. Yağız BAYRAKTAROĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Pınar BOYRAZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kayhan GÜLEZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erkan KAPLANOĞLU
Marmara Üniversitesi

Teslim Tarihi : 10 Haziran 2016

Savunma Tarihi : 27 Haziran 2016





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, bir çimento değirmeni sisteminin ürün incelik değerlerini tahmin eden bir yazılımsal algılayıcı ile, sistemin istenilen incelik değerleri aralığında maksimum tonajda üretim yapmasını sağlayacak bir üst denetleyicinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yer almaktadır.

Öncelikle bu konuda çalışma yapılmasını öneren ve destekleyen Sayın Adnan Can, Y.Kaya Uluer ve Mehmet Ağce'ye ve diğer Dal Elektrik ve Otomasyon A.Ş. çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Bu konu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların her aşamasında desteğini gördüğüm, yanında çalışmaktan onur duyduğum ve ayrıca tecrübelerinden yararlanırken göstermiş olduğu hoşgörü ve sabırdan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Şeniz Ertuğrul'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez, 1563.STZ.2012-2 kodlu SAN-TEZ projesi tarafından desteklenmiştir. Projeyi destekleyen Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na ve proje aşamasında veri toplamamız için fabrikanın tüm imkanlarını bize sunan ADOÇİM Sultanköy Tesisi Müdürü Sayın Osman Toksoy'a ve yardımlarını esirgemeyen Murat Arı, Mehmet Kütük ve Mehmet Tekiner'e teşekkür ederim.

Son olarak, bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan sevgili aileme ve tez aşamasında beni yalnız bırakmayan, desteğini esirgemeyen sevgili nişanlım Ezgi Altunç'a, süreç boyunca hep yanımda olan çalışma arkadaşlarım ve kadim dostlarım Eren Kayaoğlu ve Adem Candaş'a, sevgili dostlarım Onur Erden, İsmail Gerzeli ve Ayberk Ayaz'a, oda arkadaşım Yunus Onur Yıldız'a, Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma, TEMAG laboratuvarındaki tüm çalışma arkadaşlarıma ve buraya yazamadığım ama bu süreçte bana destek veren diğer tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2016

Salih Gülşen
Araştırma Görevlisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. TEZİN AMACI VE ÖNEMİ.....	3
2.1 Literatürdeki Çalışmalar	5
3. ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİ MODELLEME ÇALIŞMALARI.....	13
3.1 Veri Toplama İşlemi.....	13
3.2 Modelleme Çalışmaları	14
3.2.1 Kullanılan yöntemler.....	14
3.2.2 Doğrusal model elde etme çalışmaları	16
3.2.2.1 Literatürdeki doğrusal modelin test edilmesi.....	16
3.2.2.2 Autoregressive Exogenous Model (ARX) tekniği ile gerçekleştirilen modelleme çalışmaları	20
Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tekniği ile ARX ve NARX parametrelerinin belirlenmesi.....	21
3.2.3 Doğrusal olmayan model elde etme çalışmaları	23
3.2.3.1 Doğrusal olmayan Autoregressive Exogenous Model (NARX) tekniği ile gerçekleştirilen modelleme çalışmaları.....	23
3.2.3.2 Temel Bileşen Analizi (PCA) ve Regresyonu (PCR) teknikleri ile modelleme çalışmaları	24
Korelasyon ve kovaryans matrisleri.....	25
Birinci temel bileşen	25
İkinci temel bileşen	25
Temel bileşen skorları	26
Bileşen yük vektörleri	26
3.2.3.3 Yapay Sinir Ağları Tekniği.....	26
Yapay Sinir Ağları için Levenberg-Marquardt algoritması.....	27
3.2.3.4 Bulanık Çıkarım Sistemi	28
TS Bulanık Çıkarım Sistemi	30
eTS Bulanık Sistemler	32
eTS Bulanık Çıkarım Sistemi kural tabanının çevrimiçi öğrenilmesi	36
Subtractive kümeleme.....	37
Çevrimiçi evrimsel kümeleme tekniği	38
eTS Bulanık Modelin sonuç çıkarım kısmı parametrelerinin çevrimiçi Kestirilmesi	41
4. ELDE EDİLEN MODELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI	49
5. ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİ ÜST DENETLEYİCİ ÇALIŞMALARI ...	53

5.1 Üst Denetleyici Sistemin Optimizasyon.....	58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	67



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : 1 Ton çimento üretimi için ortalama maliyet dağılımı.....	3
Çizelge 2.2 : Sistemin parametreleri.....	6
Çizelge 3.1 : Kullanılan giriş/çıkış kombinasyonları.	15
Çizelge 3.2 : Kuralların x^* değerleri.	45
Çizelge 3.3 : Kuralların alt model parametre vektörü $\hat{\theta}$ değerleri.	46
Çizelge 5.1 : Üst denetleyici sistemin giriş-çıkış dağılımı.	53
Çizelge 6.1 : Modellerin CEMI tipi çimento üretimi performans karşılaştırması.	61
Çizelge 6.2 : Modellerin CEMIV tipi çimento üretimi performans karşılaştırması. .	61
Çizelge 6.3 : Modellerin CEMIV tipi çimento üretimi performans karşılaştırması (Tek günlük veri için).....	62



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çimento değirmeni hattı.....	1
Şekil 2.1 : Breusegem ve arkadaşlarının çimento değirmeni sistemi yaklaşımı.	6
Şekil 2.2 : Breusegem ve arkadaşlarının 1996'da gerçekleştirdikleri çalışmanın değirmen şeması.	7
Şekil 2.3 : Magni ve arkadaşlarının 1999'da gerçekleştirdikleri çalışmanın şeması. .	8
Şekil 2.4 : Besleme ve İncelik kontrol şeması.....	10
Şekil 2.5 : Topalov ve Kaynak'ın tasarladığı sistemin diyagramı.	11
Şekil 2.6 : Subbaraj ve Anand'ın Genetik Algoritma yardımı ile modelin Bulanık Mantık Denetleyicisini oluşturan sistemin blok diyagramı.....	12
Şekil 3.1 : Değirmen sisteminin şematik gösterimi.	14
Şekil 3.2 : Değirmen sisteminin simulink modeli.	16
Şekil 3.3 : Değirmen sistemi Simulink alt modeli.....	17
Şekil 3.4 : Değirmen çıkış Simulink alt modeli.....	17
Şekil 3.5 : Ayırıştırıcı fonksiyonu Simulink alt modeli.....	17
Şekil 3.6 : Ürün çıkışı Simulink alt modeli.	18
Şekil 3.7 : Değirmen doluluğu Simulink alt modeli.	18
Şekil 3.8 : Geri dönüş Simulink alt modeli.	18
Şekil 3.9 : Ölçülen elevatör akımı verileri ile model kullanılarak hesaplanan değirmenden çıkan malzeme miktarının karşılaştırılması.	19
Şekil 3.10 : Değirmenin içindeki malzeme miktarının model kullanılarak elde edilen tahmini tonajı ile falafondan okunan gerçek verinin karşılaştırılması.	19
Şekil 3.11 : Separatörden geri dönen malzeme miktarının model tarafından hesaplanan değeri ile geri dönüş hattında bulunan yük hücrelerinden okunan değerler ile karşılaştırılması.....	20
Şekil 3.12 : NARX model yapısı blok diyagramı.....	23
Şekil 3.13 : Gizli katman parametresinin değişiminin sistem başarımına etkisi.	28
Şekil 3.14 : Bulanık çıkarım sistemi.....	29
Şekil 3.15 : USBÇ olarak eTS bulanık çıkarım sistemi, Angelov ve Filev (2002)'den uyarlanmıştır.	34
Şekil 3.16 : Radius değerinin incelik – değirmen doluluğu arasındaki kural bağıntısına etkisi ($r=0.3$).....	35
Şekil 3.17 : Radius değerinin incelik – değirmen doluluğu arasındaki kural bağıntısına etkisi ($r=0.4$).....	35
Şekil 3.18 : Birinci kuralın bulanık mantık kümeleri	44
Şekil 4.1 : CEMI tipi üretimin gerçek zamanlı verisi ile ARX/NARX ve Yapay sinir ağı modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.	50
Şekil 4.2 : CEMI tipi üretimin gerçek zamanlı verisi ile PCR/PLSR ve eTS modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.	50
Şekil 4.3 : CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisi ile ARX/NARX ve Yapay sinir ağı modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.	51
Şekil 4.4 : CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisi ile PCR/PLSR ve eTS modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.	51

Şekil 4.5 : CEMIV tipi üretimin farklı bir gününde elde edilen gerçek zamanlı veri ile ARX/NARX ve Yapay sinir ağı modelinin çıkışlarının karşılaştırılması	52
Şekil 4.6 : CEMIV tipi üretimin farklı bir gününde elde edilen gerçek zamanlı veri ile PCR/PLSR ve eTS modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.	52
Şekil 5.1 : Üst denetleyici sistemin blok diyagramı.	53
Şekil 5.2 : Çimento öğütme prosesi simulink blok diyagramı.....	55
Şekil 5.3 : İstenilen incelik değeri aralığı ve gerçek zamanlı sistemin incelik verisi ile modelin incelik tahmini çıkışının karşılaştırılması.....	56
Şekil 5.4 : İstenilen falafon değeri ve gerçek zamanlı sistemin falafon değeri ile modelin falafon değerinin karşılaştırılması.	56
Şekil 5.5 : Gerçek zamanlı sistemin hammadde besleme tonajı verisi ile modelin hammadde besleme tonajı çıkışının karşılaştırılması.	57
Şekil 5.6 : Gerçek zamanlı sistemin ayrıştırıcı hızı değeri ile modelin ayrıştırıcı hızı değerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 5.7 : Optimizasyon sisteminin akış diyagramı.....	58
Şekil 5.8 : Optimizasyon öncesi ve sonrası ürünün incelik değeri.	59
Şekil 5.9 : Optimizasyon öncesi ve sonrası taze besleme tonajı.....	59
Şekil 5.10 : Optimizasyon öncesi ve sonrası değirmen doluluk miktarı.	60

ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİNİN MODELLENMESİ GÖZLEMLEYİCİ VE ÜST DENETLEYİCİ TASARIMI

ÖZET

Çimento, suyla karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonlarının etkisiyle sertleşen bir harç halini alan ve sertleştikten sonra, suyun altında olsa dahi, sertliğini ve kararlılığını koruyan bir inorganik malzemedir. Çimentonun kalitesi, basınç mukavemetiyle ölçülmektedir. Çimentonun kimyasal bileşimi, incelik değeri ve son ürünün partikül dağılımının basınç mukavemeti üzerindeki etkisi çok büyüktür. Çimento öğütme prosesi, çimento fabrikasındaki ana proseslerden biridir ve görevi ise, klinker ve istenilen ölçüde alçı ve katkı maddesinin harmanlanarak homojen hale getirilmesidir. Prosesin sonunda çimento elde edilir ve ürün paketleme hattına sevk edilir.

Proses çok giriş çok çıkışlıdır. Girilen besleme miktarının ve ayrıştırıcı (seperatör) hızının ayarlanması ile belirli incelikte çimentonun elde edilmesi hedeflenmektedir. Proses, değirmene klinker, alçı ve istenilen çimento tipine göre katkı malzemesinin beslenmesiyle başlar. Değirmene beslenen hammaddelerin büyük bir kısmı ilk seferde homojen olarak karışmaz. Bu yüzden, karışım bir ayrıştırıcıya sevk edilir. Karışımın ayrıştırıcı motorun merkezkaç kuvvetinin etkisiyle savrulan ince kısmı çıkış hattına iletilir, geri kalanı ise değirmen girişine tekrar harmanlanmak üzere beslenir. Bu geri dönüş miktarı, besleme miktarının bir kaç katı kadardır. Dolayısıyla beslenen karışımın bir kaç kez öğütüldükten sonra ürün olarak çıkması söz konusudur. Bu da, girişin etkisinin ancak birkaç çevrim sonunda gözlenebildiği anlamına gelmektedir. Bu prosesi temsil etmek üzere prosesin daha önceki giriş çıkış değerlerini ve bozucu karakteristiğini kullanan çok giriş ve çıkışlı rastgele bozuculara haiz dinamik bir modele ve istenilen referans incelik değerlerine yaklaştırmak üzere en uygun besleme oranlarını ve ayrıştırıcı motor hızını hesaplayacak bir kontrolör tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanı sıra, otomatik partikül boyutu ve incelik ölçümü yapan sistemlerin çoğunun verimsiz çalışması ve iyi çalışan sistemlerin de çok maliyetli olması nedeniyle incelik ölçümü öngören bir sistemin de tasarlanması gerekmektedir.

Tezde ilk aşamada veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Toplanan veriler işlenerek modelleme çalışmalarında kullanılacak hale getirilmiştir. Sonrasında ise besleme, değirmen vibrasyonu ve akımı, elevatör akımı vb. gibi giriş değerlerinin yardımıyla incelik değerini tahmini için Auto Regressive eXogenous Input (ARX), Nonlinear ARX, Temel Parçacık Analizi (PCA), Yapay Sinir Ağları (NN) ve Evrimsel Takagi Sugeno (eTS) metodları kullanılarak sistemin modeli elde edilmiştir.

Yüzde uyum değeri yüksek bir model elde edildikten sonra, üst denetleyici çalışmalarına geçilmiştir. Oluşturulan model tarafından tahmin edilen incelik değeri ve diğer sistem parametreleri kullanılarak sistemin istenilen referans incelik değeri etrafında çalışmasını sağlayacak seperatör hızı ve tonaj değeri bilgilerini kullanıcıya sunan bir üst denetleyici model elde edilmiştir. Bu model, Evrimsel Takagi Sugeno (eTS) tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Bu sistemin, gerçek zamanlı sisteme uygulanması ve sonrasında ürüne dönüştürülmesi planlanmaktadır.

Üst denetleyici sistemler ile ilgili çalışmalar sürdürülmekle beraber ilk aşamada bir PID tipi denetleyici literatürde bulunan simulink modeline gömülerek denenmiştir. Bununla ilgili çalışma, “Otomasyon Dergisi” Aralık 2015 sayısında yayınlanmıştır.



MODELING, OBSERVER AND SUPERVISORY CONTROLLER DESIGN FOR CEMENT MILL PROCESS

SUMMARY

Cement is a finely ground inorganic material, which, when mixed with water, forms a paste that hardens by means of hydration reactions and, after hardening, retains its strength and stability even under water.

Quality of cement, mostly, is resembled by mortar compressive strength. Chemical structure, fineness and particle size distribution of finished product have a great influence on mortar compressive strength.

Cement grinding process is one of the main processes in a cement plant which has a task of blending clinker with desired amount of gypsum and addition material. At the end of the process, cement is produced and transported to the packaging line.

Cement grinding process is a Multi Input Multi Output (MIMO) system. Controlling the blaine value of cement is aimed by adjusting the feed rate and separator speed parameters. Process begins with feeding clinker, gypsum and addition material depending on the type of cement to the mill. Feed would not mix homogenously at the first pass and due to this fact, the mixture is directed to a separator. The thin particules that are flung by the centrifugal force of the separator are delivered to the packaging line and the rest of the mixture is fed to the mill again for another grind. The part of the mixture that is fed back to the mill is called "reject" and rejected mixture is much greater than the fresh feed, which means inputs' effects can only be observed after several grinding cycles. A dynamical model having MIMO random disturbances that are using past inputs/outputs and disturbance characteristics and a controller which can change the feed rates and the separator speed to keep the actual fineness value close to the reference fineness value should be designed to represent this process. Furthermore, due to the cost of precise automatic fineness measuring systems, an estimator system should be designed to estimate the fineness of the cement.

There are many solutions realized by overseas companies in the market. But these solutions are very expensive and not working as efficiently as they are presented. There is a great need of a cost-effective system in the market.

In this thesis, it is aimed to make an estimator/observer/soft sensor system that is used to estimate the fineness value of the cement by utilizing the real-time parameters of system such as mill vibration, mill sound, bucket elevator current etc. To do this, a data acquisition system is installed in ADOCIM Tekirdag/Sultankoy branch cement factory. The data acquisition system was accessible remotely and collected data for one month with 1 sample/second setting.

Primary data sets collected from the system are :

- Raw material feed rates (tons/h)
- Rejected material rate (tons/h)
- Separator speed (rpm)
- Elevator current (A)
- Folaphone (%)

Besides the data sets collected via the data acquisition system, fineness level of cement was obtained for the production between 1.00-5.00 am every day.

After collecting, data sets were processed to be used in the model. After the process, it was seen that 18 days of CEMIV and 9 days of CEMI type cement production data was collected.

Several input output configurations was used to obtain a model. Since there was not enough blaine data, it was assumed that the fineness level of the cement is stabilized when mill output and reject was kept around a certain level. This approach was tested beforehand. After this, blaine model was obtained directly from the data.

These configurations can be classified as :

- 1 Input (Raw material + Reject rate) and 1 Output (Elevator current) model
- 2 Inputs (Raw material feed rate, Reject rate) and 1 Output (Elevator current) model
- 3 Inputs (Raw material feed rate, Reject rate, Folaphone (mill level)) and 1 Output (Elevator current) model
- 4 Inputs (Raw material feed rate, Reject rate, Folaphone (mill level), Separator Speed) and 1 Output (Elevator Current) model
- 5 Inputs (Raw material feed rate, Reject rate, Folaphone (mill level), Separator speed, Elevator current) and 1 Output (Blaine (fineness)) model

Also, several different modelling techniques were used to model the system. These methods are :

- Auto Regressive eXogenous input (ARX)
- Non-linear Auto Regressive eXogenous input (NARX)
- Transfer Function Estimation
- Principle Component Analysis (PCA)
- Artificial Neural Networks (ANN)
- Evolving Takagi Sugeno (eTS)

The data sets were downsampled for 10 second/sample and 60 seconds/sample settings and models were also obtained with these settings.

After obtaining an estimator system having a high fitness level, a supervisory controller system that is used to keep the fineness value around the set value was designed. This supervisory controller system determines the feed values and separator speed according to the estimated fineness and several other system parameters. Evolving Takagi Sugeno (eTS) technique was used to design the controller model. Controller system will be applied to the real time system, and if successful, will be converted into a market product.

This thesis was funded by STZ 1563.2012-2 project code SAN-TEZ (Ministry of Science, Industry and Technology) project with the co-operation of Dal Elektrik ve Otomasyon A.Ş.

At this stage, a PID model was tested and this work was published with the title “Çimento Öğütme Sistemi Simülör Uygulaması” in “Otomasyon Dergisi” December 2015 issue.

The articles that are prepared to be published are :

“Comparison of models on the fineness estimation for a cement grinding process”

“A Novel Cement Fineness Supervisory Control System”

Both articles are planned to be published in “Int. Journal of Mineral Processing” journal.

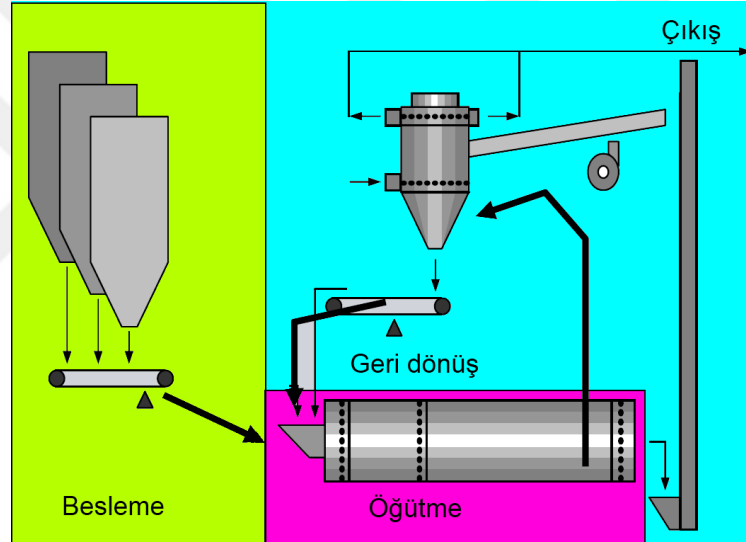


1. GİRİŞ

Bir çimento değirmeni sisteminde üç ana kısım söz konusudur :

- Besleme
- Öğütme
- Geri dönüş hattı

Bu kısımlar Şekil 1.1’de görülebilir.



Şekil 1.1 : Çimento değirmeni hattı.

İlk olarak besleme hattı vasıtasıyla klinker, alçı ve üretilecek çimento cinsine göre katkı çimento değirmenine sevk edilir. Beslenen malzemeler, değirmende demir bilyalar arasında ezilerek öğütülür ve harmanlanır. Karışım, hava akımının yardımıyla elevatöre sevk edilir ve buradan bir bant yardımı ile ayrıştırıcı (seperatör) motoruna aktarılır. Seperatör motorunun oluşturduğu merkezkaç kuvvetini yenemeyen ince partiküller çıkışa son ürün olarak sevk edilir, kalın partiküller ise bir geri dönüş bandı vasıtası ile tekrar değirmene aktarılır. Geri dönen karışım miktarı, sistemden sisteme ve istenen incelik değerine göre değişmekle beraber, beslemeden daha fazladır. Geri dönen karışımın beslenen çimentoya göre oranı, üretici tarafından belirlenebilen bir değerdir.

Bu sistemde değirmenin doluluk miktarının ve geri dönen karışımın miktarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu değer, değirmen veya elevatör akımının ölçülmesiyle veya falafon gibi cihazlar ile gözlemlenmektedir. Bununla beraber, değirmenin vibrasyon değerinden doluluk değerini veren cihazlar da piyasada bulunmaktadır. Doluluk değerine göre, değirmenin içindeki toplam malzeme mutlaka kontrol altında tutulmalıdır.

Çimentonun incelik değeri ise, çalışma esnasında elek üstü değerinin ölçümü ile, çalışma sonrasında ise blaine değerinin ölçülmesi ile takip edilmektedir. Elek üstü değerleri, üründen numune alınarak numunenin 32,45 ve 90 mikronluk gözeneklere sahip 3 elekten geçirilmesi ile elde edilmektedir. Bu değer, ürünün istenilen incelik aralığında olup olmadığının göstergesi olarak kullanılmaktadır. İncelik değeri daha hassas şekilde blaine değerinin ölçümü ile elde edilmektedir. Bu işlem, elek üstü değer ölçümüne göre daha uzun süren bir işlemdir ve blaine ölçüm cihazı ile gerçekleştirilir. Blaine ölçüm cihazı, belirli ağırlıkta ve hacimdeki çimentonun içinden belirli miktarda havanın ne kadar sürede geçtiğini ölçer ve bu süreye karşılık gelen incelik değerini hesaplayan bir cihazdır. Blaine ölçüm cihazlarının çevrimiçi çalışan tipleri vardır ancak maliyeti yüksek olduğu için çoğu fabrikada tercih edilmemektedir.

Bu tez çalışmasında, ADOÇİM Çimento Sultanköy Tesisi'nden 1 aylık veri toplanmış, elde edilen veri ile çimentonun incelik değerini tahmin eden yazılımsal algılayıcı (soft sensor) sistemin modelleri çeşitli modelleme teknikleri ile elde edilerek karşılaştırılmıştır. Sonrasında ise, tahmin edilen ve istenen incelik değerlerine ve doluluk değerine göre sistemin çalışmasını sağlayacak bir üst denetleyici (supervisory controller) sistemin modeli ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2. TEZİN AMACI VE ÖNEMİ

Çimento öğütme prosesi, çimento fabrikasındaki ana proseslerden biridir ve görevi ise, klinker ve istenilen ölçüde alçı ve katkı maddesinin harmanlanıp öğütülerek, istenen incelikte homojen hale getirilmesidir. Prosesin sonunda çimento elde edilir ve ürün paketleme hattına sevk edilir.

Yıllık çimento tüketimi yaklaşık 4.3 milyar metrik tondur ve bu miktar her yıl %3.5 oranında artış göstermektedir (Url-1). Çimento öğütme prosesi, dünya çapında toplam elektrik enerjisinin %2'sinin ve endüstride kullanılan elektriğin ise %5'inin sarfedildiği, enerji sarfiyatı yüksek bir sistemdir. Bir çimento üretim tesisinde, enerjinin %40'ı öğütme prosesinde harcanmaktadır. Standart bir çimento üretim tesisinde 110 kWh/ton'luk bir enerji sarfiyatı söz konusudur. Bu enerji sarfiyatının %30'u hammadde öğütme prosesinde, %40'ı ise çimento öğütme prosesinde gerçekleşmektedir (Jankovic ve diğ., 2004). 1 Ton çimento üretimi için ortalama maliyet dağılımı Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Görülebileceği üzere enerji maliyeti, toplam maliyetin %30'unu oluşturmaktadır.

Çizelge 2.1 : 1 Ton çimento üretimi için ortalama maliyet dağılımı.

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

Enerji maliyetinin, toplam çimento üretim maliyetinin büyük bir bölümünü oluşturması nedeniyle enerji verimliliği önemli bir konu olarak göze çarpmaktadır. Bir çimento fabrikasında enerji verimliliğini arttırmak için, çimento değirmeni prosesinin maksimum dolulukta istenilen incelik aralığında üretim yapması gerekmektedir. Çimento tüketim miktarının her yıl artması ve enerji maliyetlerinin ve sera gazı yayılımının minimize edilmek istenmesi öğütme proseslerinin kontrol edilmesi ihtiyacını doğurmaktadır.

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nin 2015 yılı verilerine göre, Türkiye'nin yıllık çimento üretim kapasitesi 126 milyon ton, üretim miktarı ise TÇMB üyeleri fabrikalarda 73 milyon ton olarak gerçekleşmiştir (Url-2). Verimliliği arttırabilecek bir denetleyici sistemin, mevcut bulunan öğütme sistemlerinin sadece %10'unda uygulanması durumunda bile (7,3 milyon ton), büyük miktarda tasarruf sağlayacağı öngörülmüştür.

Genellikle sisteme hakim operatörler tarafından çalıştırılmasına rağmen, maksimum dolulukta ve aynı zamanda istenilen incelik değerlerinde sistemi çalıştırmak oldukça zordur. Ayrıca operatör eğitimi de uzun bir süreçtir. Bu nedenle, sistemin istenilen çimento incelik değerlerinde ve maksimum tonajda operatör müdahalesi olmadan çalıştırılması büyük bir önem arz etmektedir.

Sisteme beslenen hammaddenin fiziksel ve kimyasal yapısının ve değirmenin içinde bulunan bilya şarjının değişken olması, sistemin zaman gecikmeli bir sistem olması ve sistemin çimento incelik değerini çevrimiçi olarak algılayan bir sistemin genellikle mevcut olmaması sistemin kontrolünü zorlaştıran etkenlerdir. Gerçek zamanlı verilerle elde edilen incelik değerinin tahminini sağlayacak yazılımsal algılayıcı modeli ve model aracılığıyla oluşturulan bir üst denetleyici algoritmasının gerçek zamanlı sisteme uyarlanması literatüre ve uygulamaya önemli katkısının olacağı düşünülmüştür.

Bahsedilen nedenlerden ötürü bu tez çalışmasında, prosesin giriş çıkış değerlerini ve bozucu karakteristiğini kullanan, çok giriş ve çıkışlı, bozuculara haiz incelik değeri tahminini sağlayan dinamik bir değirmen sistemi modeli ile istenilen incelik değeri aralığında ve maksimum değirmen doluluğunda üretim yapmak üzere en uygun hammadde besleme tonajlarını ve ayırıştırıcı motor hızını hesaplayacak bir üst denetleyici sistemin tasarlanması amaçlanmıştır.

2.1 Literatürdeki Çalışmalar

Çimento incelik kontrolü ve değirmen sistemlerinin modellenmesi konusunda literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar :

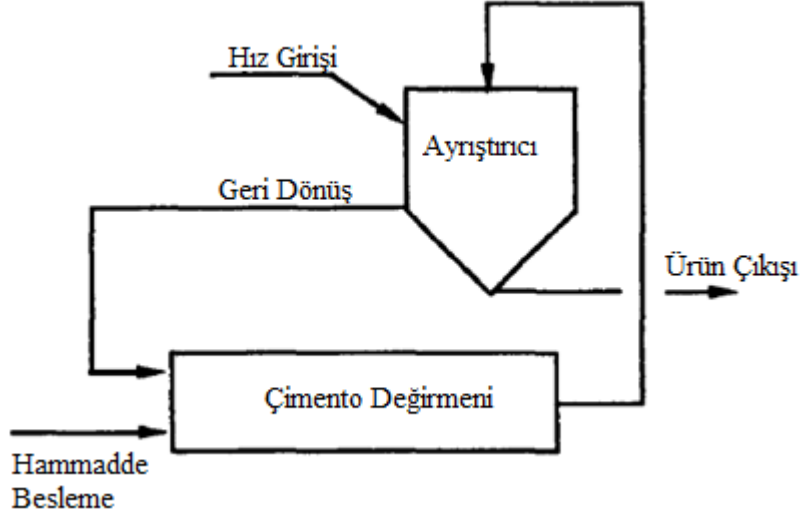
- Modern kontrol algoritmaları ile modelleme ve/veya kontrol
- Akıllı kontrol algoritmaları ile modelleme ve/veya kontrol
- Hibrit sistemler

olarak sınıflandırılabilir.

İlk olarak, konvansiyonel kontrol uygulamaları denenmiş, fakat çok giriş-çok çıkışlı bu sistemlerde bu uygulamaların verimli çalışmadığı görülmüştür. Sonrasında ise, modern kontrol algoritmaları kullanılarak modelleme ve kontrol sistemi tasarlanmaya başlanmıştır.

Bu çalışmalardan çimento değirmen otomasyonuna yönelik çok giriş ve çok çıkışlı bir sistemden yola çıkılan ilk çalışma Breusegem ve arkadaşlarının 1994 yılında gerçekleştirdiği çalışmadır (Şekil 2.1) (van Breusegem ve diğ., 1994).

Çalışmada, sadece geri dönen çimento değerinden seperatör hızının veya besleme miktarının kontrolünün sıkıntılarında bahsedilmiş ve geri dönen çimento ve çıkan ürün miktarının bir Linear Quadratic Regulator (LQR) tarafından besleme miktarı ve seperatör hızının ayarlanması ile çözülebileceği savunulmuştur. Sistemin modeli, Belçika'daki bir fabrikadan elde edilen geri dönen çimento, seperator hızı, besleme miktarı ve ürün miktarı verilerinin MATLAB Identification Toolbox ile işlenmesiyle elde edilmiştir. Bu model doğrulanıp, buna uygun LQ- denetleyici tasarlanmıştır. Denetleyicinin verimliliği, tasarlanan bir PI kontrol ile karşılaştırılmış ve verimliliği gösterilmiştir. Elde edilen sistemin modelinin sistemin sabit çalışma aralığında çalıştığı makalenin sonunda belirtilmiştir. Sistemin modeli ve parametreleri, denklem 2.1-2.4 ve Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Breusegem ve arkadaşlarının çimento değirmeni sistemi yaklaşımı (van Breusegem ve diğ., 1994).

$$\left(t_{11} \frac{d}{dt} + 1\right) y_p = k_{11} u_f \quad (2.1)$$

$$\left(t_{12} \frac{d}{dt} + 1\right) y_p = k_{12} \frac{du_s}{dt} \quad (2.2)$$

$$\left(t_{21} \frac{d}{dt} + 1\right) y_t = k_{21} u_f \quad (2.3)$$

$$\left(t_{22} \frac{d}{dt} + 1\right) y_t = k_{22} u_s \quad (2.4)$$

Çizelge 2.2 : Sistemin parametreleri (van Breusegem ve diğ., 1994).

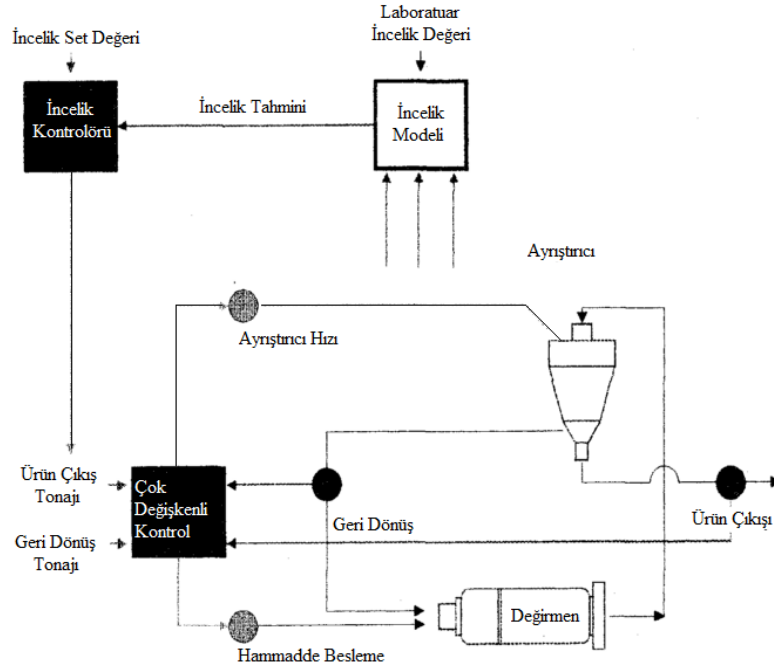
Zaman Sabiti	Sabit Kazanç
$t_{11} = 0,9$ saat	$k_{11} = 1$ ton/ton
$t_{12} = 0,42$ saat	$k_{12} = 1$ ton/saat*rpm
$t_{21} = 0,65$ saat	$k_{21} = 86$ ton/ton
$t_{22} = 0,35$ saat	$k_{22} = 11$ ton/saat*rpm

Yine aynı ekipten de Haas ve arkadaşları, 1995 yılında LQR tabanlı sistemin verimli çalıştığından fakat belirli çalışma sınırları haricinde sistemin veriminin düştüğünden bahsetmiş, bunun için bir Bulanık Mantık Kontrol sistemi önermiştir. Ve verilen sonuçlarda Bulanık Mantık ile elde edilen sistemin çoğu durumda LQR tabanlı sistemden daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir (de Haas ve diğ., 1995).

1996 yılında yine Breusegem ve arkadaşları, 1994 yılında gerçekleştirdikleri kontrol sistemini sistemdeki ani değişikliklere karşı daha gürbüz haline getirmiş, kontrol mekanizmasına incelik kontrolünü de eklemiş ve incelik değerinin tahmin edilmesini sağlayan bir algoritmayı kontrol sistemine eklemişlerdir (Van Breusegem ve diğ., 1996). İncelik değeri tahmininin de sisteme eklenmesiyle, istenilen incelik değerine göre seperatör hızının ve besleme miktarının kontrolü mümkün kılınmış ve daha verimli bir sistem için toplanması ve kontrol edilmesi gereken verileri :

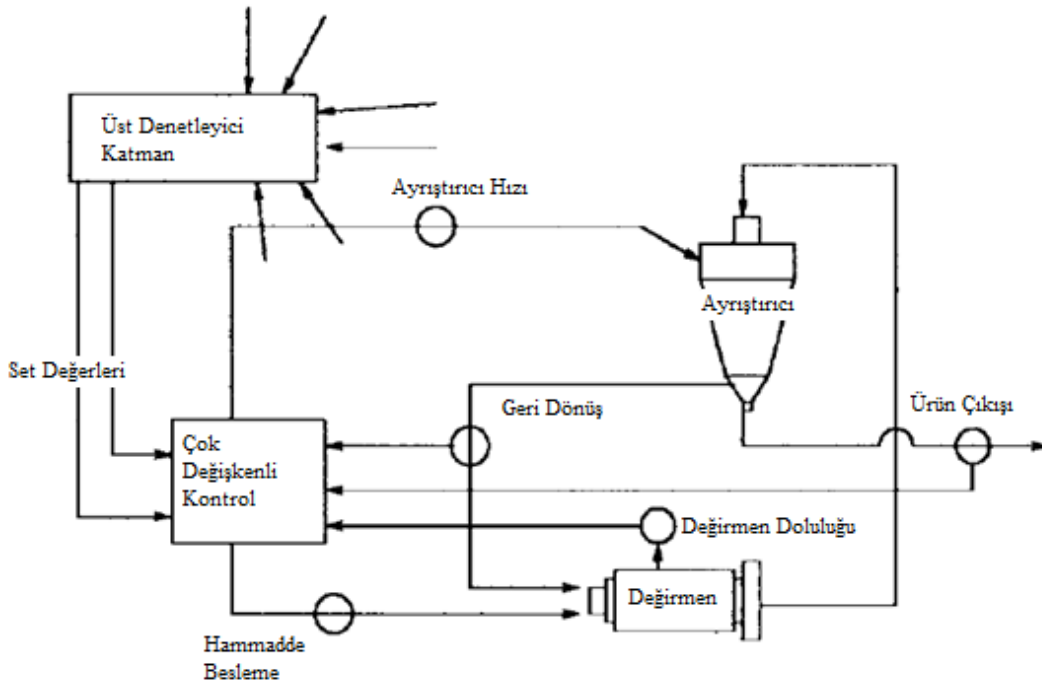
- Besleme miktarı ölçümü ve kontrolü;
- Seperatörden değirmene dönen karışım miktarı ölçümü;
- Seperatör hızının ölçümü ve kontrolü:
- Seperatörden geçen hava miktarının ölçümü ve kontrolü
- Değirmenin sarfettiği güç;
- Değirmenin giriş bölümündeki sesin ölçümü;
- Üretilen ürün miktarı.

olarak belirlemişlerdir. Bu aşamada tanımlanan kontrol sistemi Şekil 2.2'de görülebilir.



Şekil 2.2 : Breusegem ve arkadaşlarının 1996'da gerçekleştirdikleri çalışmanın değirmen şeması (Van Breusegem ve diğ., 1996).

1999 yılında yine aynı ekipten Magni ve arkadaşları, var olan LQR tipi denetleyicinin besleme sertliğinin ciddi şekilde değiştiği durumlarda değirmende tıkanmaya neden olduğunu belirtmiş ve sistemin daha geniş kontrol alanında çalışabilmesi için doğrusal olmayan bir model (non-linear) oluşturarak, elde edilen modeli doğrularlaştırıp modele LQ-kontrol tasarlamışlardır (Magni ve diğ., 1999). Önerilen modelde, değirmen doluluğunun tespit edilmesinin kritik olduğundan bahsedilmiş, değirmen akımının ölçümünün çözüm üretmediği, değirmenin akımının beslendikten belirli bir zaman sonrasında düştüğü belirtilmiştir. Bunun için, değirmenin sesinin dinlenmesi çözüm olarak sunulmuştur. Baz alınan değirmen sistemi, Şekil 2.3'te görülebilir. Sistemin modeli ve model parametreleri de aşağıda görülmektedir.



Şekil 2.3 : Magni ve arkadaşlarının 1999'da gerçekleştirdikleri çalışmanın şeması (Magni ve diğ., 1999).

$$T_f \dot{y}_f = -y_f + (1 - \alpha(z, v, d)) \varphi(z, d) \quad (2.5)$$

$$T_r \dot{y}_r = -y_r + (1 - \alpha(z, v, d)) \varphi(z, d) \quad (2.6)$$

$$\dot{z} = -\varphi(z, d) + u + y_r \quad (2.7)$$

$$\alpha(z, v, d) = \frac{\varphi^m v^n}{L_\alpha + \varphi^m v^n} \quad (2.8)$$

$$\varphi(z, d) = \max\{0; (dL_{\varphi 1} z^2 + L_{\varphi 2} z)\} \quad (2.9)$$

$$L_{\alpha} = 570^m 170^n \left(\frac{570}{450} - 1 \right) (tons/h)^m (r/min)^n \quad (2.10)$$

$$L_{\varphi 1} = 0.1116(Tons\ h)^{-1}, \quad (2.11)$$

$$L_{\varphi 2} = 16(h)^{-1} \quad (2.12)$$

$$m = 0.8 \quad (2.13)$$

$$n = 4 \quad (2.14)$$

Burada ;

Tf = Üretilen ürün zaman sabiti fonksiyonu

$\varphi(z,d)$ = değirmen çıkış

Tr = Geri dönen malzeme zaman sabiti

$\alpha(z, v, d)$ = seperator fonksiyonu

yf = üretilen ürün (ton/saat)

z = değirmen doluluğu (ton)

v = seperatör hızı (rpm)

$L_{\varphi 1}, L_{\varphi 2}, m, n$: değirmen sabitleri

yr = geri dönen karışım (ton/saat)

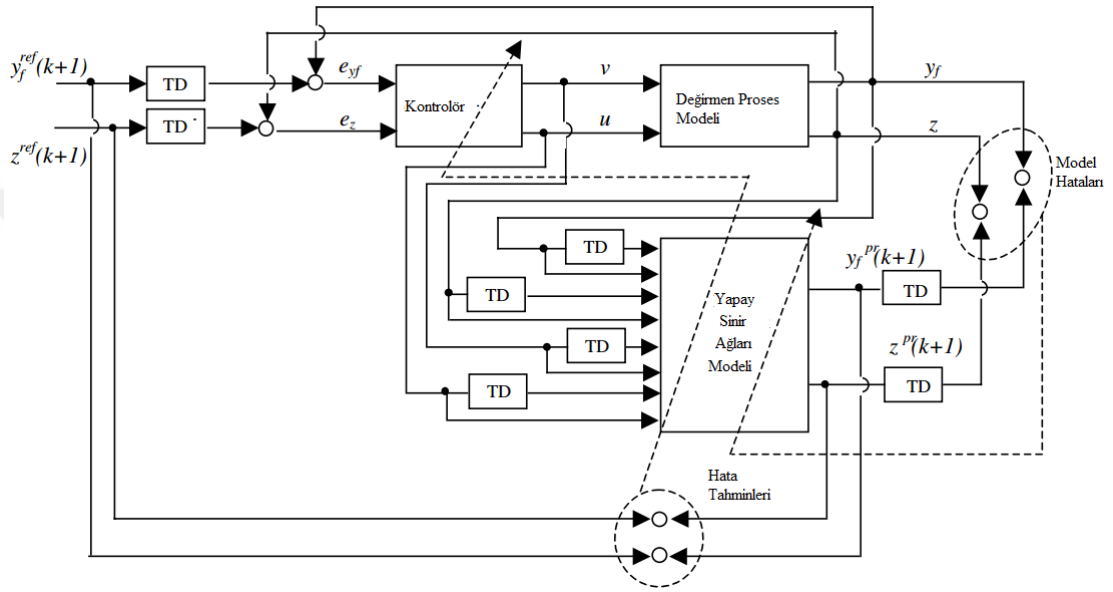
olarak belirtilmiştir (Magni ve diğ., 1999).

2001 yılında Grogard ve arkadaşları, 1999 yılında gerçekleştirilen çalışmanın değirmenin çalışma aralığını genişlettiğini fakat değirmenin tıkanmasının önüne geçemediğini belirterek durum geri beslemeli (state feedback) gürbüz bir denetleyicinin tasarlanmasıyla değirmenin tıkanmasının tamamen önüne geçtiklerini bildirmişlerdir (Grogard ve diğ., 2001). Fakat kararlılık makaledeki esas konu olduğu için, üretimi maksimum verimliliğe taşıyacak verileri elde etmemişlerdir.

Dağcı ve arkadaşları, 2001 yılında çimento değirmeni sistemini değişken yapılı sistem (VSS) olarak kabul ederek, buna göre Magni'nin 1999 yılında önerdiği doğrusal olmayan modele, VSS'ler için etkin olarak kullanılan ve modellenmemiş bozucuların ve dinamiklere karşı gürbüz olan ayarlanabilir doğrusal elemanlarda ayarlanabilir öğrenme tekniği (ADALINE) ile bir denetleyici tasarlamışlardır (Dagci ve diğ., 2001). Bu sistemde, üç durum değişkeni (değirmen yükü, seperatörden dönen karışım miktarı ve ürün çıkışı değerleri) besleme değeri ve seperatör hızı ile kontrol edilmeye çalışılmış, benzetim ortamında başarı sağlanmıştır.

2002'de Lepore ve arkadaşları, kapalı-çevrim öğütme sistemlerinde kullanılan modelleme çalışmalarını çimento değirmenleri için uygulamış ve yeni ve daha basit bir model yapısı ve parametrizasyonu önermiştir (Lepore ve diğ., 2002). Bununla beraber, yapılan modellemedeki bilinmeyen parametreler, maksimum benzeşme

önüne geçecek bir adaptif yapay sinir ağı yapısı tasarlamışlardır (A. V. Topalov ve O. Kaynak, 2004; Andon V. Topalov ve Okyay Kaynak, 2004). Bu sistem ile kesin bir model oluşturma gereksinimi ortadan kalkmakta, sistem kendi modelini kendi öğrenmektedir. Bu da, bozucular ve diğer sistem belirsizlikleriyle daha kolay başedilmesini sağlamaktadır. Ek olarak, kayan kipli bir öğrenme algoritması ile yapay sinir ağlarının çevrimiçi adaptasyonunun sağlanabileceği belirtilmiştir. Bu sistem, Şekil 2.5'te görülebilir.



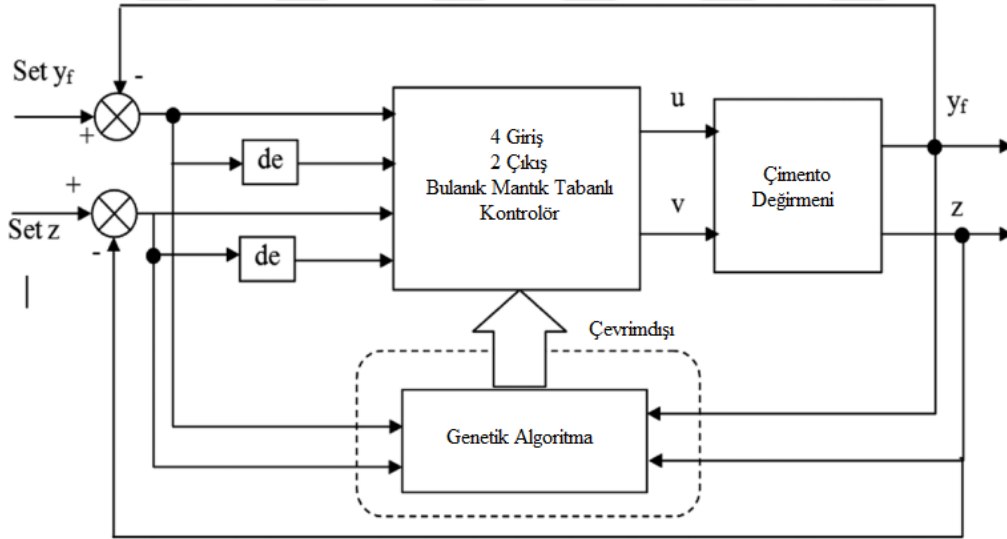
Şekil 2.5 : Topalov ve Kaynak'ın tasarladığı sistemin diyagramı.

Avşar'ın 2006 yılında gerçekleştirdiği tez çalışmasında ise, çimento değirmeni işletme parametreleri ile incelik değeri arasındaki ilişki, yapay sinir ağları ve bulanık mantık kullanılarak modellenmiştir (Avşar, 2006).

Bu modellerde çıkış değişkeni olarak 32 mikrometre eleğin üzerinde kalan ürünün ağırlıkça yüzdesi (incelik) alınırken, giriş parametreleri olarak devir yüzdesi, falofon yüzdesi ve elevatörden ayırıcıya giden maddenin miktarını gösteren elevatör akımı alınmıştır. İlk olarak Yapay Sinir Ağları modeli oluşturulmuş, 32 mikrometre inceliği tahmin etme yeteneğinin yüksek olduğu tespit edilmiştir (Korelasyon katsayısı 0,92 bulunmuştur.). Sonra model üzerinde hassaslık analizi sonucunda karşılık kontur grafikleri giriş parametreleri kullanılarak oluşturulmuştur. Yapay Sinir Ağları modelinin karşılık kontur grafiklerinin parametre değerleri detaylı incelenmesiyle MATLAB'daki bulanık modelde Mamdani tipinde bulanık kural seti oluşturulmuştur.

Bu modelle yine 32 mikrometre incelik (ağırlıkça yüzde) tahmin edilmiş ve modelin korelasyon katsayısı (r) 0,76 bulunmuştur.

Subbaraj ve Anand'ın 2011 yılında gerçekleştirdiği çalışmada, çimento değirmeni gibi doğrusal olmayan sistemlerde bulanık mantık algoritmalarının modern kontrol uygulamalarına nazaran daha verimli çalışabileceği belirtilmiş, fakat bu tür kompleks sistemlerin bulanık mantıkla denetleyicisini oluşturmanın zor olacağı ifade edilmiştir. Bu nedenle, genetik algoritmaların yardımıyla bulanık mantık kontrol sistemi tasarlanmıştır ve bir çimento değirmeni Benzetim sistemi üzerinde oluşturulan denetleyici ile diğer kontrol sistemleri denenerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, genetik algoritma ile oluşturulan bulanık mantık kontrol sisteminin diğer denetleyicilere göre başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Subbaraj ve Anand, 2011). Kontrol mekanizması Şekil 2.6'da görülebilir.



Şekil 2.6 : Subbaraj ve Anand'ın Genetik Algoritma yardımı ile modelin Bulanık Mantık Denetleyicisini oluşturan sistemin blok diyagramı (Subbaraj ve Anand, 2011).

3. ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİ MODELLEME ÇALIŞMALARI

3.1 Veri Toplama İşlemi

İlk aşamada, daha önce de belirtildiği üzere, çalışan bir çimento değirmeni sisteminden veri toplamak için çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

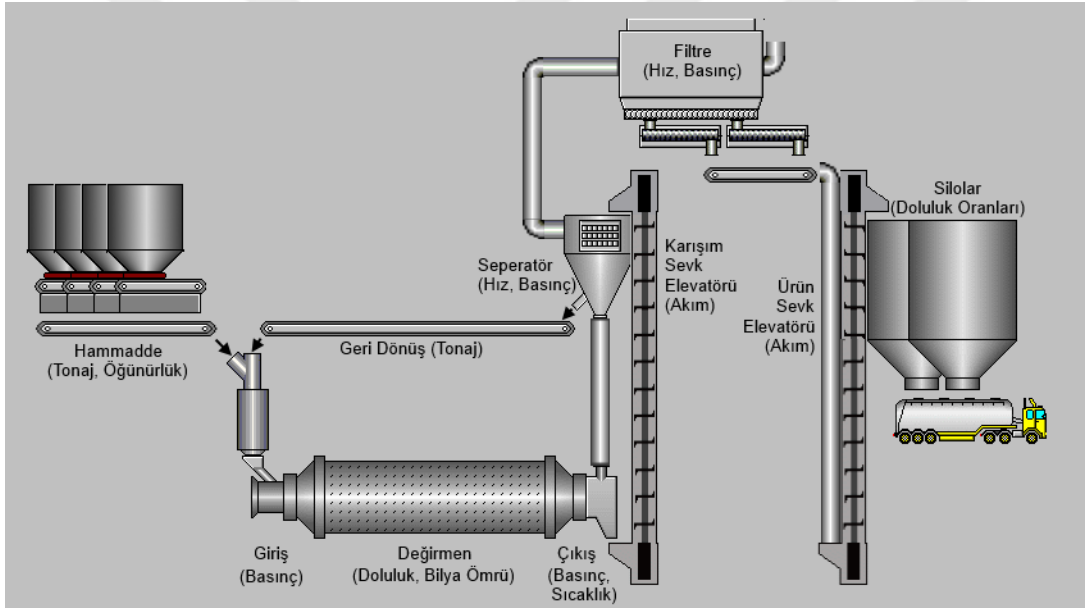
Bunun için, hem proje başvuru aşamasında kendisinden olur alınan ADOÇİM Sultanköy Tesisi Fabrika Müdürü ile yüz yüze görüşmek, hem de tesisi ve tesiste var olan algılayıcıları incelemek için fabrikaya bir ziyaret gerçekleştirilmiştir.

Tesiste yapılan incelemeler sonucunda :

1. Tesiste geri dönüş (reject) bantı kantarının bulunduğu ve tonajının sistem tarafından analog değer olarak okunduğu,
2. Tesiste besleme kantarlarının tonajının sistem tarafından analog değer olarak okunduğu,
3. 2. Kamarada bir adet falafonun bulunduğu ve analog değer olarak sistem tarafından okunduğu,
4. Silo seviyelerinin analog değer olarak sistem tarafından okunabildiği,
5. Seperatörün ve seperatöre malzeme ileten elevatörün akımlarının sistem tarafından okunabildiği,
6. Değirmeni tahrik eden elektrik motorunun akımının sistem tarafından okunabildiği,
7. Değirmen giriş ve çıkış emiş basıncının sistem tarafından okunabildiği,
8. Hammaddenin laboratuvarında bulunan test değirmeninde 30 dk öğütülerek “öğünülebilirlik” değerinin tespit edildiği,
9. Son üründen her saat başı örnek alınarak laboratuvarında “Blaine” (İncelik) değerinin kayıt altına alındığı,
10. Bunlar haricinde operatör tarafından sisteme girilen seperatör, besleme giriş değerlerinin de kayıtlarının sistem tarafından tutulabildiği gözlemlenmiştir.

Bu incelemeden sonra, 1 adet PC geçici olarak talep edilerek gerekli yazılımlar sisteme yüklenmiş ve bilgisayar, yukarıda bahsedilen verileri depolayacak şekilde ayarlanmıştır. Ayarlanan bu sistem, gerçekleştirilen fabrika ziyaretinde sisteme bağlanmış ve sistemden veri alınabildiği teyit edilmiştir. Aynı zamanda, sisteme internet bağlantısı bağlanarak uzaktan erişim ile veri toplama bilgisayarına erişim sağlanmıştır. Bu ziyaret sonrasında bilgisayara uzaktan erişim vasıtası ile erişilerek çalışma ve laboratuvar verileri temin edilmiştir.

Literatür araştırmaları sonucunda, bu konuda yapılan başlıca çalışmalar ve metodlar incelenmiştir. Modellemede en önemli aşamalardan biri olan girişler ve çıkışlar belirlenmiştir. Modellemede kullanılacak giriş çıkış parametreleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Değirmen sisteminin şematik gösterimi.

3.2 Modelleme Çalışmaları

3.2.1 Kullanılan yöntemler

Literatürdeki simulink uygulaması haricinde sistemden toplanan verilerden sistemin modelinin elde edilmesi için birçok giriş çıkış kombinasyonları denenmiştir.

Modelleme çalışmaları gerçekleştirilen giriş/çıkış kombinasyonları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan giriş/çıkış kombinasyonları.

Model Yapısı	Girişler	Çıkışlar
Tek giriş – tek çıkış	Hammadde Besleme + Geri Dönüş tonajı	Değirmen Çıkışı (Elevatör Akımı)
Çok giriş – tek çıkış 1	Hammadde Besleme	Değirmen Çıkışı (Elevatör Akımı)
	Geri Dönüş tonajı	
Çok giriş – tek çıkış 2	Hammadde Besleme	Değirmen Çıkışı (Elevatör Akımı)
	Geri Dönüş tonajı	
	Falafon	
Çok giriş – tek çıkış 3	Hammadde Besleme	Değirmen Çıkışı (Elevatör Akımı)
	Geri Dönüş tonajı	
	Falafon	
	Ayrıştırıcı Hızı	
Çok giriş – tek çıkış 4	Hammadde Besleme	İncelik Değeri (Blaine)
	Geri Dönüş tonajı	
	Falafon	
	Ayrıştırıcı Hızı	
	Değirmen Çıkışı (Elevatör Akımı)	

Bu giriş/çıkış kombinasyonları haricinde, alınan örnekleme süresi değiştirilerek de sistemin modelleri elde edilmiştir. Bunun için, sistemden 1, 10 ve 60 saniyede bir veri alınması senaryoları test edilmiştir. Ancak, en iyi sonuç 1 saniyede bir toplanan veri ile elde edilmiştir.

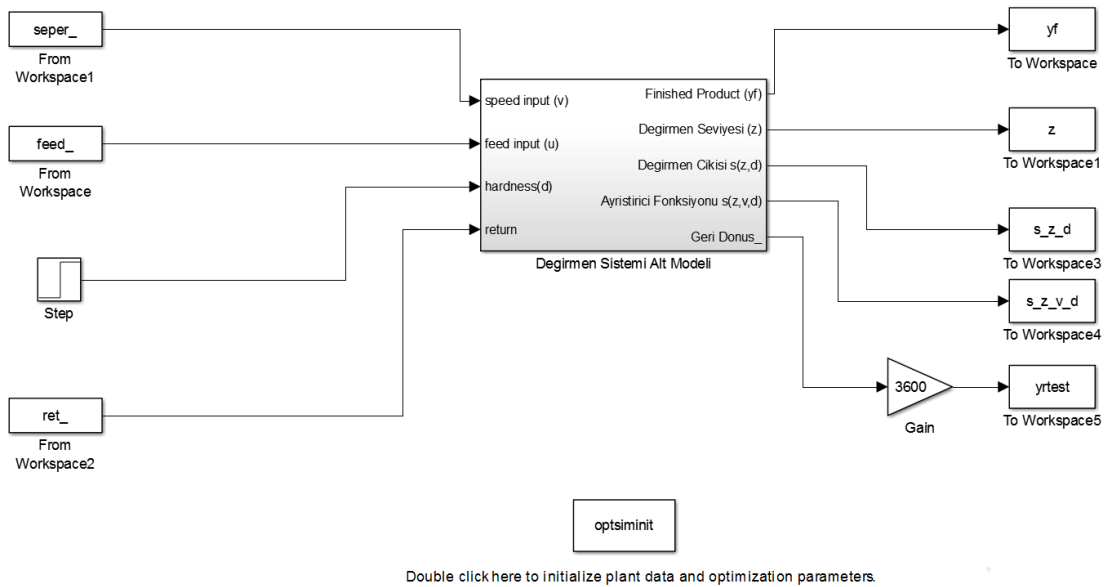
Bunun haricinde, sistemden toplanan elevatör akımı değerinin gürültülü geldiği gözlemlenmiştir. Ancak, elevatör akımı verisi trendini koruyacak şekilde filtrelendiğinde başarımının değişmediği hatta bazı günlerde düştüğü görülmüş ve bu nedenle sonraki çalışmalarda veriler filtrelenmemiştir.

3.2.2 Doğrusal model elde etme çalışmaları

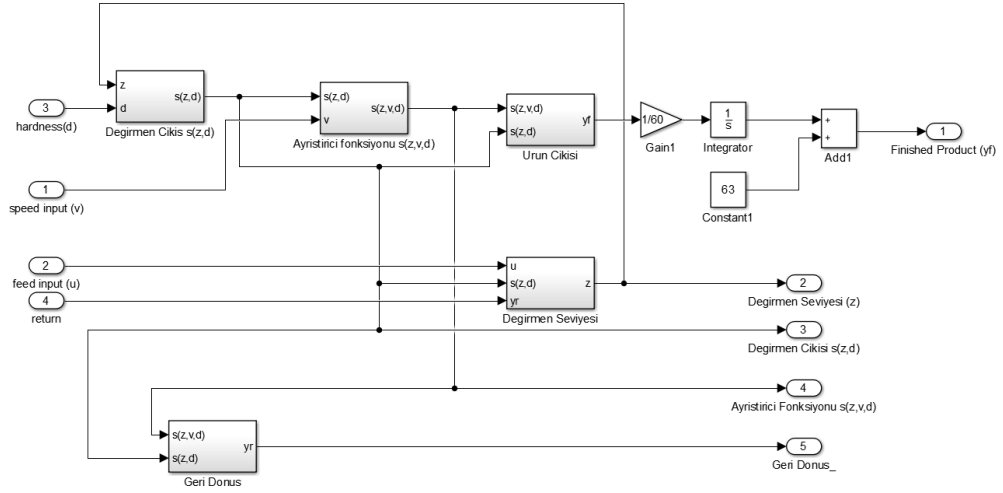
3.2.2.1 Literatürdeki doğrusal modelin test edilmesi

Yapılan literatür araştırması sonucunda, 1994 yılında ilk olarak yayınlanan ve son yıllara kadar birçok araştırmacı tarafından da kullanılan Bastin ve Wertz'in tarafından önerilen çimento değirmeni modeli ilk aşamada kullanılmıştır (de Haas ve diğ., 1995; Grogard ve diğ., 2001; Jadot ve diğ., 1998; Magni ve diğ., 1999; Van Breusegem ve diğ., 1996; van Breusegem ve diğ., 1994). Modelin girişleri: klinker sertlik katsayısı, hammadde tonaj değeri ve seperatör hızı iken, modelin çıkışları da değirmen doluluğu, değirmen çıkış tonajı, değirmen doluluk seviyesi, ürün çıkış tonajı, değirmen geri dönüş tonajı ve seperatör fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Bu model, değirmen çıkışının sabit tutulması ile incelik değerinin regülasyonunun sağlandığı varsayılarak elde edilmiştir (Boulvin ve diğ., 1998; Van Breusegem ve diğ., 1996).

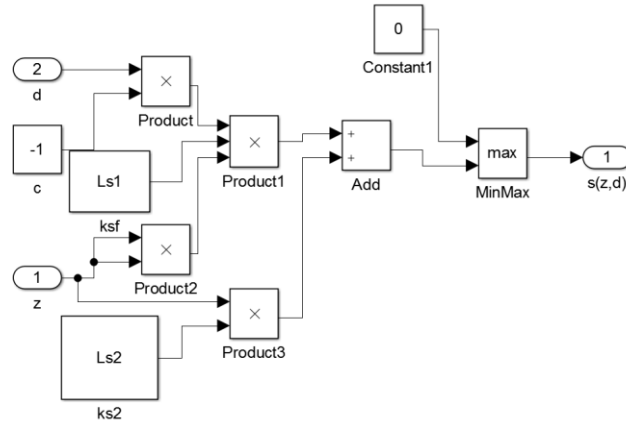
Subbaraj ve Anand'ın çalışmasında bu modelin Simulink diyagramı oluşturulmuştur (Subbaraj ve Anand, 2010). Bu diyagramlar, Şekil 3.2-8 arasındaki şekillerde gösterilmiştir.



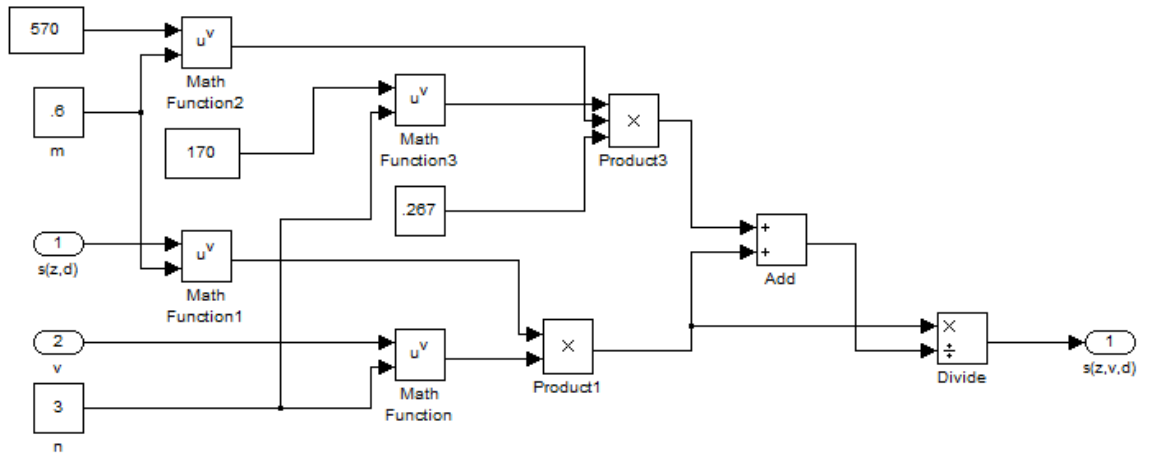
Şekil 3.2 : Değirmen sisteminin simulink modeli.



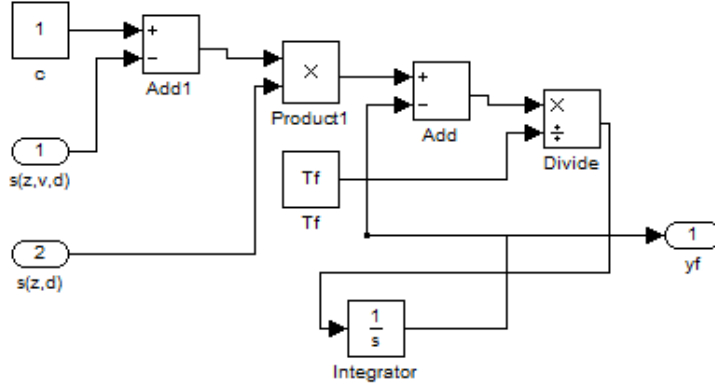
Şekil 3.3 : Değirmen sistemi Simulink alt modeli.



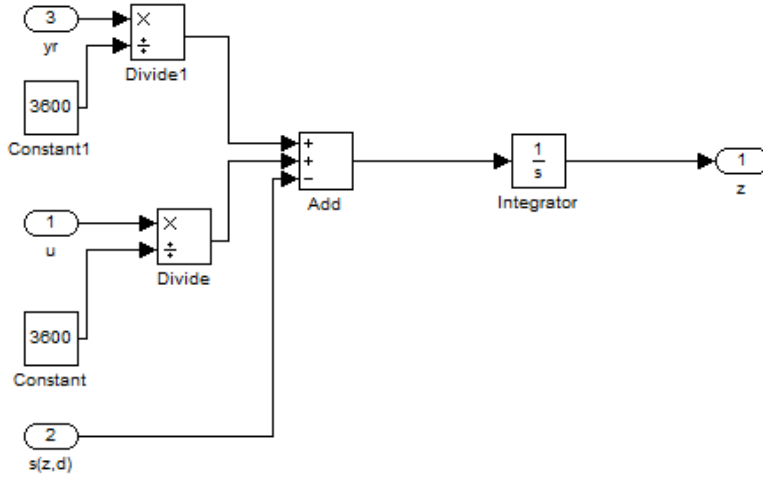
Şekil 3.4 : Değirmen çıkış Simulink alt modeli.



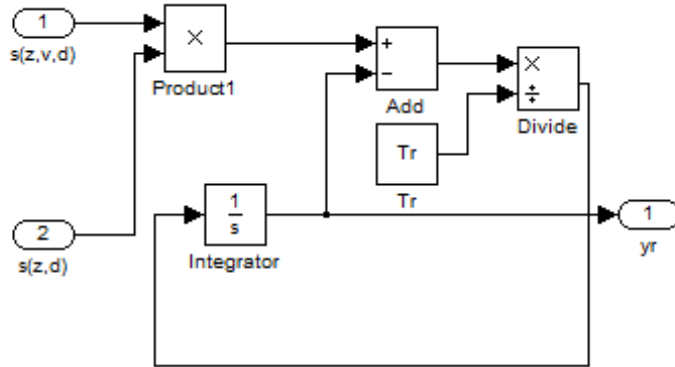
Şekil 3.5 : Ayrıştırıcı fonksiyonu Simulink alt modeli.



Şekil 3.6 : Ürün çıkışı Simulink alt modeli.

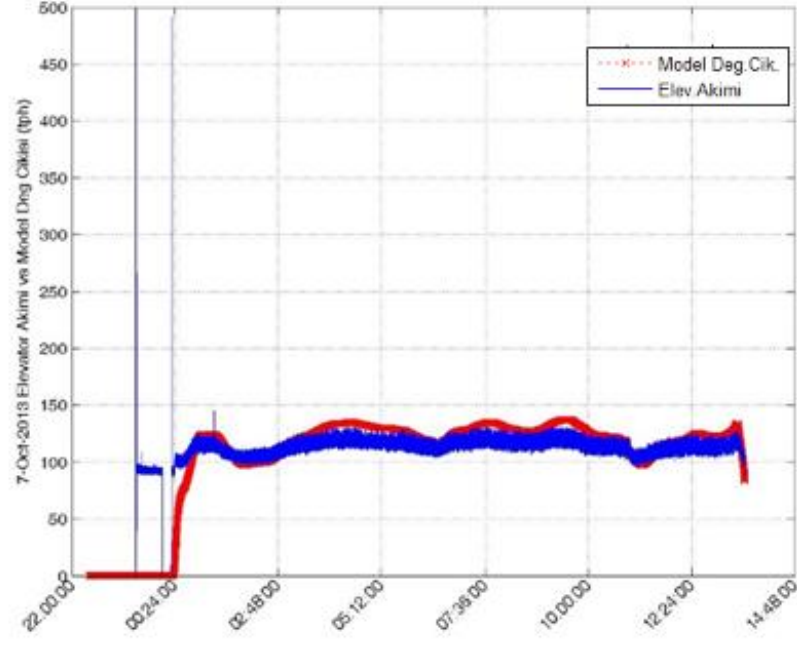


Şekil 3.7 : Değirmen doluluğu Simulink alt modeli.

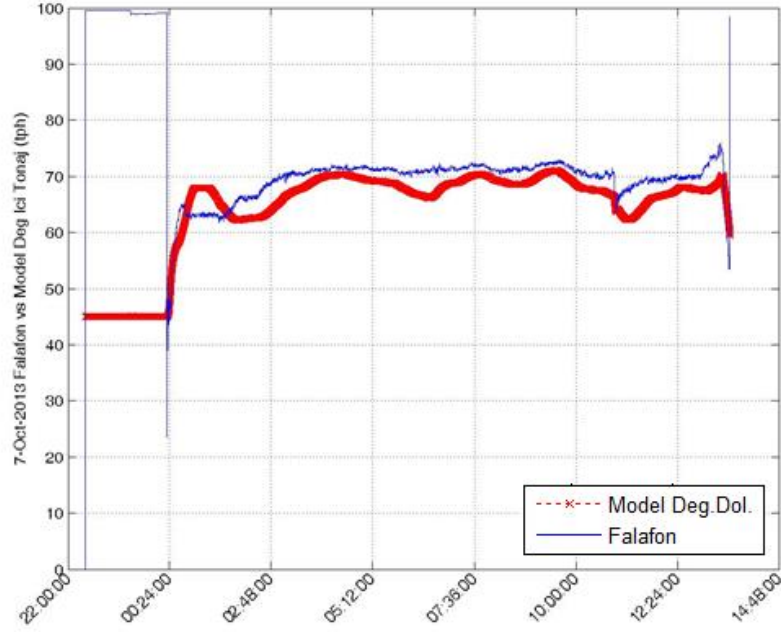


Şekil 3.8 : Geri dönüş Simulink alt modeli.

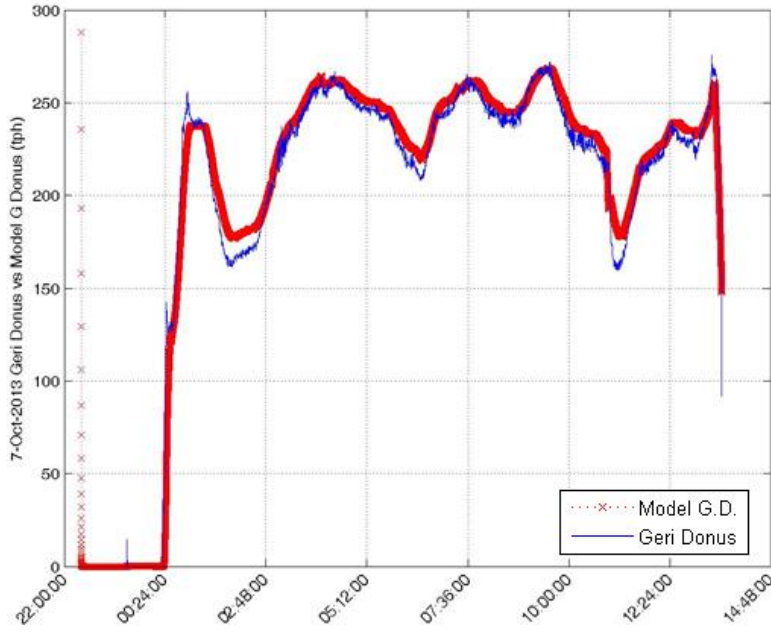
Değirmen Simulink modeli kurularak, modelden elde edilen sonuçlar, Adoçim tesisinden uzaktan erişim ile elde edilen gerçek verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuçların genel olarak uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Modelin çıkışları Şekil 3.9-3.11 arasında gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Ölçülen elevatör akımı verileri ile model kullanılarak hesaplanan değirmenden çıkan malzeme miktarının karşılaştırılması.



Şekil 3.10 : Değirmenin içindeki malzeme miktarının model kullanılarak elde edilen tahmini tonajı ile falafondan okunan gerçek verinin karşılaştırılması.



Şekil 3.11 : Separatörden geri dönen malzeme miktarının model tarafından hesaplanan değeri ile geri dönüş hattında bulunan yük hücrelerinden okunan değerler ile karşılaştırılması.

Model sonuçları ile gerçek verilerin aynı trendleri taşıdığı görülmektedir. Ancak, bu model sadece değirmen doluluğu ve değirmen çıkışı hakkında bilgi verdiği ve blaine değerleri ile elde edilen değirmen çıkışı arasında bir korelasyon bulunamadığı için bu model üzerinden çalışmalara devam edilmemiştir.

3.2.2.2 Autoregressive Exogenous Model (ARX) tekniği ile gerçekleştirilen modelleme çalışmaları

Gerçekleştirilen simulink uygulamasından sonra doğrusal bir model elde edebilmek için ARX tekniği ile modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Standart bir ARX modeli denklemi (3.1)'de gösterilmiştir.

$$y(t)+a_1y(t-1)+\dots+a_{n_a}y(t-n_a)=b_1u(t-n_k)+\dots+b_{n_b}u(t-n_k-n_b+1)+e(t) \quad (3.1)$$

Bu eşitlikteki n_a , n_b parametreleri sırasıyla a ve b polinomlarının mertebesini göstermektedir. n_k ise sistemdeki ölü zaman (dead time) olarak tanımlanmaktadır (Url-3).

ARX Model elde edilebilmesi için ilk planda MATLAB System Identification Toolbox'ta bulunan arayüz kullanılmıştır. Ancak, sistemdeki giriş sayısı artışıyla

parametre sayısının da artması MATLAB komut isteminin kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

ARX komutu denklem 3.2 ile ifade edilmiştir:

$$(Arx_model) = arx(veri,[na nb nk]) \quad (3.2)$$

Komutta bulunan na, nb ve nk gecikme değişkenleri değiştirilerek yüzde uyum değerleri gözlemlenmiştir. Bunun için ilk aşamada söz konusu değerler iç içe döngüler içinde değiştirilerek modeller elde edilmiş ve yüzde uyum değerleri kontrol edilmiştir. Ancak, bu işlem verimi düşük ve uzun sürmüştür, bu nedenle bu değerlerin değiştirilmesinde Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tekniği kullanılarak modeller elde edilmiştir.

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tekniği ile ARX ve NARX parametrelerinin belirlenmesi

Parçacık Sürü Optimizasyonu Eberhart ve Kennedy tarafından 1995 yılında geliştirilmiş bir yöntem olup kuş ve balık sürülerinin besin arama davranışlarından esinlenen popülasyon temelli bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem doğrusal olmayan, çok parametre ve değişken içeren problemlerin çözümü için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Eberhart ve Kennedy, 1995; Kennedy ve Eberhart, 1995). Ayrıca, diğer optimizasyon tekniklerine göre basit yapıda olması, uygulanabilirliğinin yüksek olması, paralel bilgisayarlarda veya işlemcilerde çalıştırılabilmesi ve düşük işlem yüküne sahip olması gibi özellikleri Parçacık Sürü Optimizasyonu tekniğinin avantajları olarak sıralanabilir.

Doğada, besinin nerde olduğu ile ilgili bilgiye sahip olmayan sürü içerisindeki kuşlar belirli bir bölge içerisinde eş zamanlı olarak konum ve yön değiştirerek rastgele dağılmış bir şekilde besin arama işlemini gerçekleştirirler. Bu işlemden sonra, sürü içerisindeki bütün kuşlar bir araya gelerek her kuşun besin kaynağına ne kadar mesafede olduğu konusu ile ilgili bilgi paylaşımında bulunur ve bu bilgiye ve kendi tecrübelerine dayanarak ilgili besine ulaşırlar. Burada söz konusu olan her kuş, PSO metodunda bir parçacığa karşılık gelmektedir ve her bir parçacığa ait konum bilgisi de optimize edilmeye çalışılan sisteme ilişkin bir aday çözümü temsil eder. Parçacığın mevcut ve bir önceki konumu arasındaki fark ise parçacığın hızı olarak tanımlanır.

PSO algoritması temelde dört adımda oluşmaktadır.

Bunlar;

1. Her bir parçacık için başlangıç değerlerinin belirlenmesi

Her bir parçacık için başlangıç konum (x_i) ve hız (v_i) değerleri belirlenen limitler dahilinde rastgele üretilir. Her parçacığın o andaki konumu kendi kişisel en iyi değeri (LBP) olarak tanımlanır ve bu değerleri arasındaki en iyi değer ise evrensel en iyi değer (GBP) olarak tanımlanır.

2. Her bir parçacık için uygunluk (fitness) değerinin belirlenmesi

Her bir parçacık için seçilen hedef fonksiyonu hesaplanır. Her bir parçacığın birinci adımda belirlenen mevcut kişisel en iyi değeri hesaplanan değerden kötüyse yeni hesaplanan değer LBP olarak atanır. Birinci adımda belirlenen sürünün en iyi değeri hesaplanan değerden kötüyse yeni hesaplanan değer sürünün en iyi değeri GBP olarak atanır.

3. Her bir parçacığın hız ve konum değerlerinin güncellenmesi
4. İstenilen uygunluk değerine veya maksimum iterasyon (kuş adımı) sayısına ulaşılmadıysa 2. ve 3. maddelerin tekrarı

olarak sıralanabilir. Hız değerinin fonksiyonu, denklem 3.3'te gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} v[i] &= v[i] + c1 * R1 * (pBest[i] - c_position[i]) + \\ &\quad c2 * R2 * (gBest[i] - c_position[i]) \\ c_position[i] &= c_position[i] + v[i] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Burada:

$v[i]$: i . parçacığın hız değerini

w : Atalet momentini (0.4 – 1.4 aralığında seçilir)

$c1, c2$: Öğrenme faktörü parametrelerini (0..4 aralığında seçilebilir)

$R1, R2$: Sırasıyla LBP'nin ve GBP'nin ağırlıklı olarak etkilediği parçacık matrislerini (0..1 aralığında rastgele değere sahiptir)

$c_position[i]$: i . iterasyondaki konum değerini

$pBest[i]$ ve $gBest[i]$: Sırasıyla iterasyondaki ve geneldeki en iyi pozisyonu göstermektedir.

Elde edilen ARX modellerin çıkışları “Sonuçlar” bölümünde analiz edilmiştir.

3.2.3 Doğrusal olmayan model elde etme çalışmaları

3.2.3.1 Doğrusal olmayan Autoregressive Exogenous Model (NARX) tekniği ile gerçekleştirilen modelleme çalışmaları

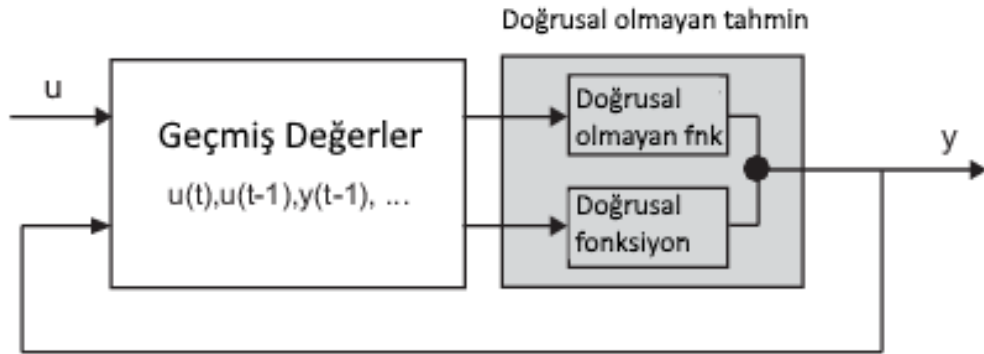
Doğrusal olmayan bir model elde edebilmek için ilk aşamada NARX tekniği ile modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

İlk planda NARX Model elde edilebilmesi için MATLAB System Identification Toolbox'ta bulunan NARX arayüzü kullanılmıştır. Ancak, sistemdeki giriş sayısı artışıyla parametre sayısının da artması MATLAB komut isteminin kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

NARX model elde etmek için iki teknik bulunmaktadır :

1. Sadece gecikmeleri tamamlayarak tamamen doğrusal olmayan bir model elde etmek
2. Gecikmeler ile beraber sistemi kısmen tanımlayan bir doğrusal model tamamlayarak sistemin doğrusal olmayan modelini elde etmek

Model yapısının blok diyagramı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : NARX model yapısı blok diyagramı.

İlk olarak, daha önceden elde edilen ARX modellerin doğrusal model kısmında kullanılmasıyla modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş, ancak bu işlem gerçekleştirilmeden, sadece n_a , n_b ve n_k parametrelerinin tanımlanması ile elde edilen NARX modellerin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

NARX komutu denklem (3.4)'te şekilde çalışmaktadır :

$$(Nlarx_model) = nlarx(veri,[na nb nk], (doğrusal model)) \quad (3.4)$$

Komutta bulunan na, nb ve nk gecikme değişkenleri değiştirilerek yüzde uyum değerleri gözlemlenmiştir. Bunun için ilk aşamada söz konusu değerler iç içe döngüler içinde değiştirilerek modeller elde edilmiş ve yüzde uyum değerleri kontrol edilmiştir. Ancak, bu işlem verimi düşük ve uzun sürmüştü, bu nedenle bu değerlerin değiştirilmesinde yine Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tekniği kullanılarak modeller elde edilmiştir.

Elde edilen NARX modellerin çıktıları “Sonuçlar ve Öneriler” bölümünde analiz edilmiştir.

3.2.3.2 Temel Bileşen Analizi (PCA) ve Regresyonu (PCR) teknikleri ile modelleme çalışmaları

1901 yılında Karl Pearson'un başlattığı temel bileşenler analizi çalışmaları, 1933 yılında Hotelling tarafından geliştirilmiştir (Hotelling, 1933). PCA birbiri ile ilişkili çok sayıda değişken içeren veri setini, veri içerisinde varolan değişimleri mümkün olduğunca koruyarak, doğrusal bileşenleri olan yeni bir veri seti ile ifade etme yöntemidir.

Veri matrisinde yer alan p değişkenin doğrusal bileşenlerini bulmak için kovaryans matrisinin ya da korelasyon matrisinin özdeğerleri ve özvektörleri kullanılır. Eğer değişkenler aynı birim veya karşılaştırılabilir birimlerdeyse, değişken varyansları aynı boyuttaysa varyans-kovaryans matrisi kullanılır.

Bu durumlar sağlanmadığında varyans-kovaryans matrisi yerine korelasyon matrisi kullanılır.

PCA'nın 3 temel amacı vardır. Bu amaçlar :

- Verilerin boyutunu azaltılmasını sağlamak
- Çıkış değerlerinin öngörüsünü gerçekleştirmek
- Veri setini, bazı analizler için görüntülemek

olarak sıralanabilir.

P boyutlu bir veri öbeğine Temel Bileşen Analizi uygulandığında, uzayın gerçek boyutu belirlenir. Bu gerçek boyuta temel bileşenler adı verilir.

Temel bileşenlerin üç özelliği vardır:

- Bileşenlerin arasında korelasyon yoktur.
- Birinci temel bileşen toplam değişkenliği en çok açıklayan değişkendir.
- Bir sonraki temel bileşen kalan değişkenliği en çok açıklayan değişkendir.

Korelasyon ve kovaryans matrisleri

Temel bileşenler analizinde değişkenlerdeki değişim yapısı korelasyon ya da kovaryans matrisleri üzerinden incelenir. Analizin hangi matris üzerinden yapılacağı değişkenlerde birim farklılığı olup olmamasına ve değişken varyanslarının yakın değerler alıp almamasına bağlıdır.

Birinci temel bileşen

Birinci temel bileşen değişkeni Y_1 :

$$Y_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + \dots + a_{1p}X_p \quad (3.5)$$

denklemler ile bulunur ve Varyans-Kovaryans matrisinin (Σ) en büyük özdeğeridir. a_1 vektörü, varyansı en çok açıklayan en büyük özdeğere karşılık gelen özvektördür. Y_1 'in varyans değerinin yüksek olması $a_{11} \dots a_{1p}$ ağırlık değerlerinin büyük değerler seçilmesiyle sağlanabileceğinden, ağırlık değerleri karelerinin toplamı 1 olacak şekilde hesaplanır.

İkinci temel bileşen

İkinci temel bileşen değişkeni Y_2 :

$$Y_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 + \dots + a_{2p}X_p \quad (3.6)$$

denklemler ile elde edilir ve birinci temel bileşen ile korelasyonu bulunmayan ve en yüksek ikinci varyans değerine sahip bileşendir.

Temel bileşenler, toplam değişken sayısı (p) kadar temel bileşen elde edilene kadar hesaplanır. Gerçekleştirilen işlemlerin sonucunda elde edilen temel bileşenlerin toplam varyans değerinin değişkenlerin toplam varyans değerine eşit olması,

dolayısıyla orijinal veri grubunun içerdiği değişimleri içermesi gerekmektedir. Orijinal değişkenlerin karşılığı olan temel bileşenler ise denklem 3.7 ile ifade edilmektedir.

$$Y = AX \quad (3.7)$$

Burada A matrisinin satırları, orijinal verinin varyans-kovaryans matrislerine, yani özvektörlerine karşılık gelmektedir.

Temel bileşen skorları

Temel bileşen değişkenlerini daha sonraki analizlerde kullanabilmek için temel bileşen skorları hesaplanır. r. veri örneğinin k. temel bileşen skoru denklem 3.8 ile hesaplanır:

$$Y_{kr} = a_{k1}x_{k1} + a_{k2}x_{k2} + a_{k3}x_{k3} + \dots + a_{kp}x_{kp} \quad (3.8)$$

Bileşen yük vektörleri

Özvektörlerin karşılaştırılabilir olabilmesi için özvektörlerin normalleştirilmesiyle elde edilir. X_i değişkeninin Y_j temel bileşeni ile korelasyonu denklem 3.9'da gösterilmiştir

$$r_{ij} = \sqrt{a_{ij}^2 \text{Var}(Y_j) / s_{ii}} \quad (3.9)$$

Temel bileşen analizi gerçekleştirildikten sonra elde edilen temel bileşen yapı ile sistemin regresyon analizine ise temel bileşen regresyonu (PCR) denir. Sistemin yüzde uyum kontrolü bu şekilde gerçekleştirilir. Bu yapıda sistemin çıkışları dikkate alınmaz.

Bununla beraber, sistemin çıkışlarının dikkate alınarak bu işlemin gerçekleştirilmesine ise kısmi en küçük kareler regresyonu (PLSR) işlemi adı verilir. Çıkışların dikkate alınması ile daha yüksek yüzde uyum değerleri etmek mümkün olabilmektedir.

PCR ve PLSR modellerinden elde edilen çıkışların diğer modellerle karşılaştırılması, “Sonuçlar ve Öneriler” kısmında gösterilmiştir.

3.2.3.3 Yapay Sinir Ağları Tekniği

Literatürde birçok yapay sinir ağları (YSA) ve gelişmiş öğrenme algoritması bulunmaktadır (Fu, 2003; Jang ve diğ., 1997; Patterson, 1998). Literatürde sıkça görülen Geri yayımlı Çok-Katmanlı-İleri-Beslemeli yapay sinir ağları (MLFF-NN)

yapıları öğrenme algoritması, çoğu dinamik sistem modelleme probleminde başarıyla kullanılabilir (Delice, 2015).

YSA öğrenme gücünü ve genelleştirme yeteneğini yapay nöronlardan ve katmanlar arasındaki bağlantı katsayıları bulunduran paralel yapısından almaktadır. Geri yayımlı gradyan iniş bazlı algoritmalar, basit olmalarına ve düşük işlem gücü gerektirmelerine rağmen uzun öğrenme süreleri ve yakınsama problemleri gibi dezavantajlar bulundurlar. Yakınsama süresini kısaltmak için standart gradyan iniş algoritmalarının modifiye edilmiş halleri kullanılabilir.

Levenberg-Marquardt (LM) algoritması, ikinci dereceden yakınsama sağlaması nedeniyle MLFF-NN sistemlerde kullanılan en gelişmiş geri yayımlı algoritmalarından biridir (Jang ve diğ., 1997). Çalışmalarda bu algoritma kullanılarak modeller elde edilmiştir.

Yapay Sinir Ağları için Levenberg-Marquardt algoritması

Levenberg-Marquardt optimizasyon algoritması, Hagan ve Menhaj tarafından MLFF-NN'lerin çoklu öğrenme işlemlerinde kullanılmak üzere önerilmiştir (Hagan ve Menhaj, 1994). Parametre vektörü Θ ağırlık ve eğilim parametrelerini içermektedir ve minimize edilecek maliyet fonksiyonu denklem 3.10'da gösterilmiştir.

$$\varepsilon^2 = \sum_{k=1}^N (T_k - \hat{y}_k)^2 = \sum_{k=1}^N e_k^t e_k \quad (3.10)$$

Burada T_k hedef değeri, \hat{y}_k ağ çıkışını ve e_k ise k girişinin ağ hatasını ve N ise veri sayısını göstermektedir. Ağırlık değişiminin miktarı ise 3.11'deki denklem ile ifade edilir :

$$\Delta\theta = -(J^T(\theta)J(\theta) + \lambda I)^{-1}J^T(\theta)e(\theta) \quad (3.11)$$

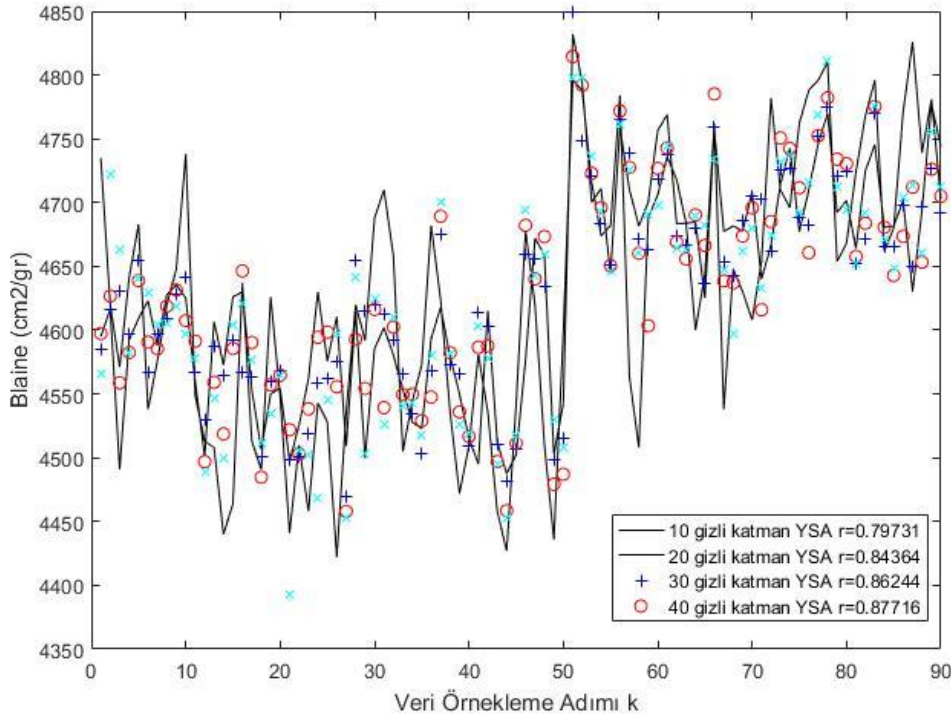
Burada **I** birim matrisi ve Jacobian matrisi ise:

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\theta)}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial e_1(\theta)}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial e_N(\theta)}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial e_N(\theta)}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

şeklinde gösterilmiştir.

Eğer maliyet fonksiyonu herhangi bir işlem adımında artarsa, λ parametresi daha önceden belirlenen bir katsayı ile çarpılır. Maliyet fonksiyonunun düşmesi durumunda ise λ parametresi aynı katsayı ile bölünür. LM algoritması büyük λ değerleri için $1/\lambda$ öğrenme hızına sahip bir gradyan iniş tekniğine dönüşüyor olsa da, küçük λ değerleri için ise Gauss-Newton algoritmasına dönüşmektedir (Nrgaard ve diğ., 2000).

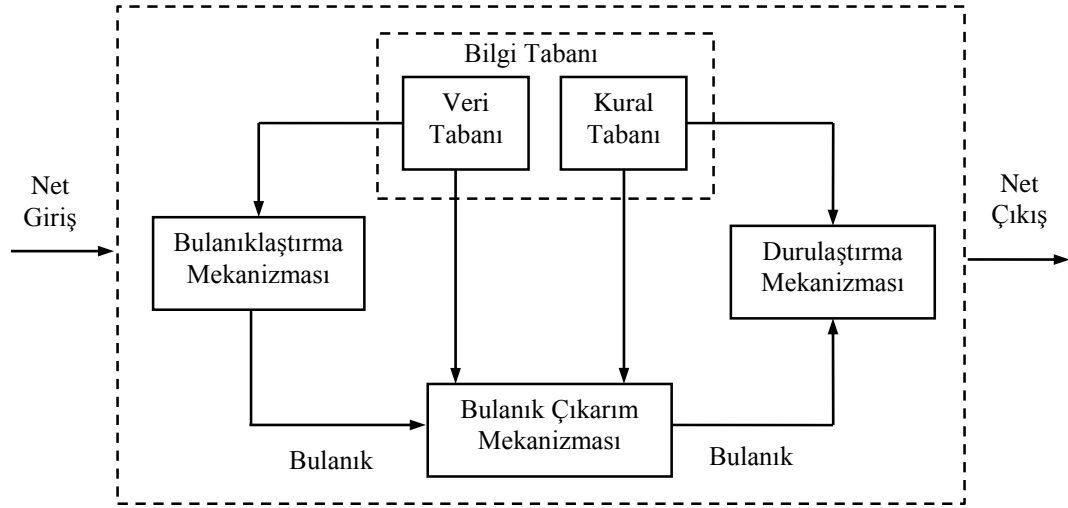
Sistemin modeli, farklı gizli katman parametre değerleri kullanılarak çıkarılmıştır. Gizli katman parametresinin etkileri Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Sistemdeki gizli katman sayısı arttırıldığında başarımlar belirli ölçüde artmaktadır. Ancak, sonuca çok daha yavaş ulaşıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.13 : Gizli katman parametresinin değişiminin sistem başarımına etkisi.

3.2.3.4 Bulanık Çıkarım Sistemi

Bulanık çıkarım sistemi (BÇS), bulanık mantık temelli ve doğrusal olmayan bir modelleme ve kontrol yapısıdır. Bulanık mantık terimi, bugünkü kullanım şekli ile ilk kez Zadeh tarafından önerilmiştir (Zadeh, 1965). Temel yapısı Şekil 3.14'te verilen bulanık çıkarım sistemi, bulanıklaştırma mekanizması; kural tabanı ve veri tabanını içeren bilgi tabanı; çıkarım mekanizması ve durulaştırma mekanizması alt sistemlerinden oluşmaktadır (Akca, 2014).



Şekil 3.14 : Bulanık çıkarım sistemi.

Bulanıklaştırma mekanizmasında, BÇS girişleri çıkarım mekanizmasının kuralları uygulayabileceği bilgilere dönüştürülmektedir. Bu modülde öncül kısımdaki üyelik fonksiyonu ile giriş değişkenleri karşılaştırılarak dilsel değişkenlerin üyelik değerleri hesaplanır.

Kural tabanı, uzman bilgisine dayanan EĞER - İSE kurallarının bulunduğu kümedir. Veri tabanı, bulanık kurallarda kullanılan üyelik fonksiyonlarını tanımlayan modüldür.

Bulanık çıkarım mekanizmasında ise, kural tabanındaki bilgilere ve kurallara göre karar verme ve yorumlama işlemi gerçekleştirilir.

Durulaştırma mekanizması da, çıkarım mekanizmasının çıkışını, net çıkışlara dönüştüren arayüzdür.

Bulanık denetleyicide genellikle Max-Min ve Max-Dot çıkartım metodları kullanılmaktadır. Max-Min çıkartım metodu durulaştırma aşamasında daha kolay ve hızlı sonuçlar verdiği için tercih edilmektedir. Durulaştırma metodlarından ise, ağırlık merkezi ve yüksekliklerin ortalaması metodları çoğunlukla tercih edilmektedir.

Sonuç çıkarım kısmının yapısına bağlı olarak bulanık denetim sistemleri üç ana gruba ayrılmaktadır (Babuska, 1999):

- Linguistic Fuzzy Model (Mamdani ve Assilian, 1975; Zadeh, 1973)
- Fuzzy Relational Model (Pedrycz, 1985; Yi ve Chung, 1993)
- Takagi-Sugeno Bulanık Model (Takagi ve Sugeno, 1985)

Bu bulanık denetim sistemleri arasında en yaygın olarak Mamdani ve Assilian (Mamdani ve Assilian, 1975) tarafından önerilen Mamdani bulanık çıkarım sistemleri ve Takagi ve Sugeno (Takagi ve Sugeno, 1985) tarafından önerilen Takagi-Sugeno (TS) bulanık çıkarım sistemleri kullanılmaktadır. Bu doktora tez çalışmasına kullanılan bulanık değirmen modeli TS bulanık çıkarım sistemini kullandığı için bu sistem daha detaylı olarak ele alınacaktır.

TS Bulanık Çıkarım Sistemi

TS bulanık çıkarım sistemi, doğrusal olmayan bir sistemin bulanık olarak birbirine bağlantılı bir doğrusal modeller takımı ile yaklaşık olarak kestirilmesi yoluyla çıkış üretmektedir. Bu sistemde veri uzayı, bulanık biçimde tanımlanmış bölgelere bölünmektedir. Bu bölgeler ise parametrelerle ifade edilerek, her bölgenin doğrusal bir alt sistem ile ilişkilendirilmesi sağlanmıştır. Her bir kuralın ateşleme derecesi, karşılık gelen doğrusal modelin, TS bulanık modelin bütününe olan katkısının seviyesi ile doğru orantılıdır. Belirli bir çalışma noktası etrafında kesin bir biçimde doğrusallaştırma yapan kazanç-uyarlama denetimi genelleştirerek, giriş veri uzayının bulanık bir biçimde tanımlanmış olan bölgelerinde doğrusallaştırma yapmaktadır. En genel halde, n adet girişi olan çok giriş-tek çıkışlı birinci mertebeden bir TS bulanık çıkarım sistemi denklem 3.13'teki gibi verilebilir.

$$R^i: \text{EĞER } x_1, X_1^i \text{ ve } x_2, X_2^i \text{ ve } \dots \text{ ve } x_n, X_n^i \text{ İSE } f_i = x_e^T \cdot \pi^i \quad (3.13)$$

Burada :

R^i : i . bulanık kural,

$i = [1, R]$: R bulanık kuralların sayısı,

$j = 1, 2, 3, \dots, n$ olmak üzere x_j : girişler,

X_j^i , i . bulanık kuralda j . girişe ait üyelik fonksiyonu olan bulanık küme (öncül parametreler),

$x_e^T = [1 \ x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]$, serbest bir parametre içerecek şekilde boyutu bir arttırılmış giriş vektörü,

y^i , i . doğrusal alt modelin çıkışı,

π^i , i . doğrusal alt model çıkış fonksiyonunun keskin sabit değerleri olarak tanımlanmaktadır.

TS bulanık model çıkışı birbirinden bağımsız kural katkılarının ağırlıklandırılmış ortalaması ile denklem 3.14'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$y = \sum_{i=1}^R \lambda^i(x) y^i = \sum_{i=1}^R \lambda^i(x) x_e^T \pi^i \quad (3.14)$$

$\lambda^i(x)$ değişkeni, i . kuralın normalize edilmiş ateşleme seviyesidir ve denklem 3.15'teki gibi ifade edilmektedir.

$$\lambda^i(x) = \frac{\tau^i(x)}{\sum_{j=1}^R \tau^j(x)} \quad (3.15)$$

Burada τ değeri i . kuralının ateşleme seviyesidir ve denklem 3.16 ile elde edilir.

$$\tau^i = \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j) \quad (3.16)$$

Burada $\mu_j^i(x_j)$ j . girişin i . bulanık kümeye olan üyelik derecesidir.

TS bulanık model çıkışı aşağıdaki şekilde vektör formda da gösterilebilir (3.17):

$$y = \varphi^T \theta \quad (3.17)$$

Burada; θ vektörü lineer model parametrelerinden oluşan bir vektör olup denklem 3.18'de gösterilmiştir:

$$\theta = \left[(\pi^1)^T, (\pi^2)^T, \dots, (\pi^R)^T \right]^T \quad (3.18)$$

φ vektörü ise, kuralların normalize edilmiş olan ateşleme seviyeleri ile ağırlıklandırılmış olan girişlerin vektörüdür (denklem 3.19).

$$\varphi = \left[\lambda^1 x_e^T, \lambda^2 x_e^T, \dots, \lambda^R x_e^T \right]^T \quad (3.19)$$

TS bulanık çıkarım sisteminin hesaplama yükü, matematiksel basitliği ve durulaştırma gerektirmemesi nedeni ile Mamdani bulanık çıkarım sistemininkine göre daha azdır.

eTS Bulanık Sistemler

Bulanık çıkarım sistemlerin tasarımında iki farklı yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlar :

- Yapı ve değişken ayar işlemleri, modellenen veya kontrol edilen sistem hakkında bilgili bir uzman tarafından gerçekleştirildiği yaklaşım,
- Yapı ve değişken ayar işlemlerinin veri ile beslenen öğrenme algoritmaları ile gerçekleştirildiği yaklaşım,

olarak sıralanabilir.

İlk yaklaşım, modellenen veya kontrol edilen sistem hakkında bilgi sahibi bir uzmanın yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Ancak, endüstriyel uygulamalarda uzman bilgiye dayalı olarak yüksek performanslı bulanık çıkarım sistemi tasarlamak genelde kolay değildir. Uzman bilgiye dayalı ifadelerle oluşturulan kurallar ile bulanık çıkarım sisteminin sadece ön tasarımı yapılabilirken; nihai yapı ve değişken ayarı için ayrıca ciddi miktarda efor ve zaman harcanması gerekmektedir. Özellikle doğrusal olmayan karmaşık sistemlerin yapılarında çok fazla serbest parametre bulunması nedeniyle optimum bulanık çıkarım sistemini tasarlamak çoğunlukla mümkün olmamaktadır.

Belirtilen nedenlerden ötürü, bulanık çıkarım sistemlerinin kural yapısının ve değişken ayarlarının otomatik olarak veri yardımıyla yapılandırılmasını sağlayan öğrenme algoritmaları geliştirilmiş ve bulanık çıkarım sistemlerine entegre edilmiştir. Bu sistemler, uzman deneyimine ve ön sistem bilgisine olan gereksinimi önemli ölçüde azaltmıştır.

Çan eğrisi tipi üyelik fonksiyonları kullanan TS tipi bulanık çıkarım sistemi, Jang (Jang ve diğ., 1997) tarafından geliştirilen uyarlamalı sinirsel bulanık çıkarım sisteminin (USBÇS) işlevsel olarak eşdeğeridir. USBÇS yapısı, YSA öğrenme algoritmaları temelli hibrid öğrenme şemalarını kullanarak bulanık çıkarım sistemindeki üyelik fonksiyonlarının konumlarını ve şekillerini toplanan sistem verisine bağlı olarak otomatik ayarlanmasına olanak tanımaktadır.

USBÇS tasarımında kullanılan öğrenme yöntemi iki kısımdan oluşmaktadır:

- İleri geçiş kısmında, bulanık küme değişkenleri sabit alınır ve sonuç kısmındaki doğrusal işlemin değişkenleri en küçük kareler yöntemi ile hesaplanır.

- Geri geçiş kısmında ise bulanık küme değişkenleri eğimli iniş (gradient descent) kullanılarak belirlenmektedir.

Bu döngü, tüm sistem hatası istenen hata değerinden küçük oluncaya kadar veya fazla değişim göstermeyinceye kadar devam ettirilmektedir.

Ancak, bu teknik ve buna alternatif olarak gösterilebilecek genetik algoritma ve diğer doğrusal olmayan arama teknikleri eğitim prosesinin başında tüm verinin mevcut olduğunu varsayarlar. Bu nedenle, bu metodlar ile tüm model yapısının ve parametrelerinin her simülasyon adımında tekrardan iteratif olarak eğitilmesi gerekmektedir.

Angelov ve Filev (P. P. Angelov ve Filev, 2004), TS bulanık çıkarım sisteminin yapısı ve değişkenlerinin sürekli bir biçimde çevrimiçi olarak ayarlanmasına olanak sağlayan eTS bulanık öğrenme algoritmasını geliştirmiştir.

eTS bulanık öğrenme algoritması, ardışık, iteratif olmayan yeni bir veri kümeleme tekniğine dayalı denetimsiz öğrenme (unsupervised learning) ile bulanık kural tabanı ayarını, Kalman filtreleme tabanlı denetimli öğrenme (supervised learning) ile de doğrusal alt model parametrelerin ayarını çevrimiçi olarak gerçekleştirmektedir. Angelov ve diğerleri, eTS bulanık modelleme yaklaşımını çok-giriş çok-çıkışlı (MIMO) sistem modeli durumu için genelleştirmişlerdir (P. Angelov ve diğ., 2004).

eTS bulanık çıkarım sistemi 5 katmanlı ileri yol bir YSA modeli olan USBÇS yapısı ile de tarif edilebilir.

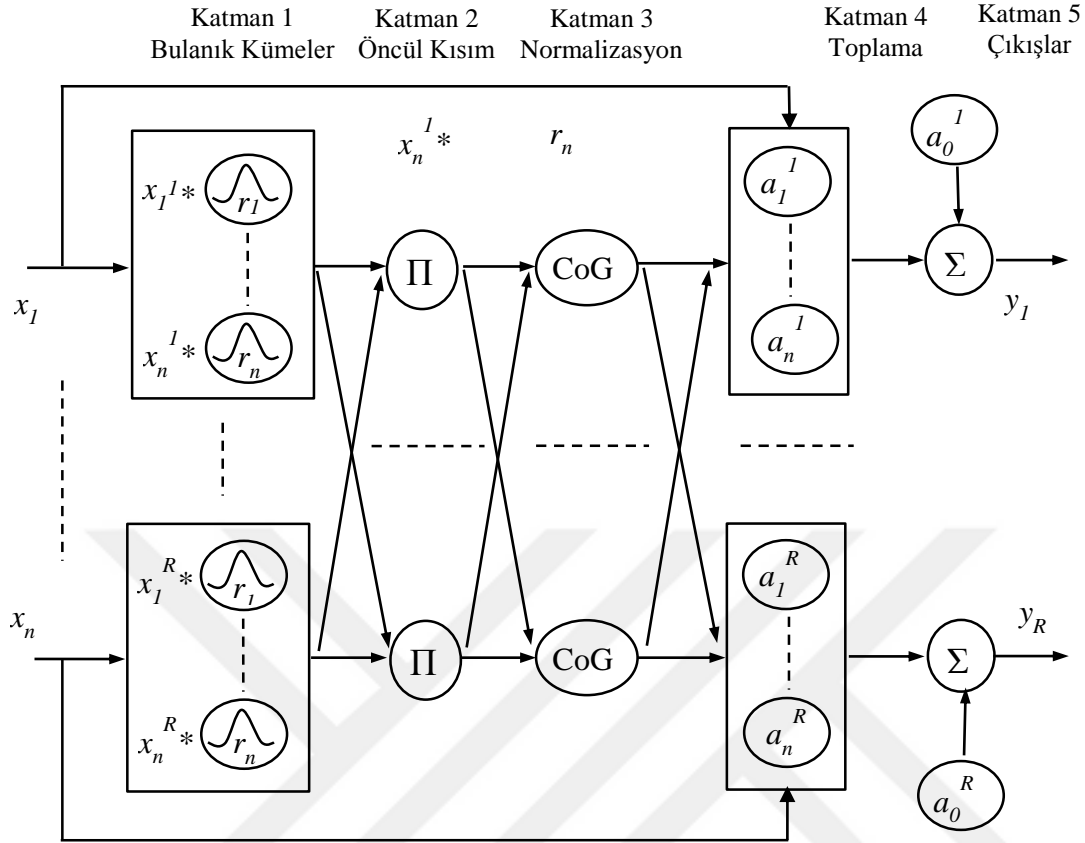
Katman 1, x_k girişlerini alarak belirli bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonları, $\mu_j^i(x)$, tarafından belirlenen aktivasyon fonksiyonları olan nöronların olduğu ikinci katmana beslemektedir. Katman girişlerin μ üyelik değerini Katman 2'ye iletir.

Katman 2'de her bir kuralın ateşleme seviyesi (τ_i) kartezyen çarpım işlemi uygulanarak hesaplanır.

Katman 3'te tetiklenen kuralların ateşleme seviyelerini ağırlık merkezi (CoG) durulaştırma metodunu kullanarak normalize edilmiş λ_i ateşleme seviyesi değerlerini Katman 4'e iletir.

Katman 4, lokal alt sistemleri temsil eden öncül ve sonuç çıkarım kısımlarını birleştirir. Katman 5 ise lokal alt system çıkışları ağırlıklandırıp toplayarak toplam sistem çıkışını hesaplar.

5 katmanlı örnek bir USBÇS yapısı Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : USBÇS olarak eTS bulanık çıkarım sistemi, Angelov ve Filev (2002)'den uyarlanmıştır.

Angelov ve arkadaşları, kural tabanı için bulanık küme fonksiyonu olarak genelleştirme kaybına yol açmadan geniş bir biçimde veri tarif edilmesine olanak tanıdığı için Gaussian üyelik fonksiyonunu seçmişlerdir (P. Angelov ve diğ., 2004):

$$\mu^i(x) = e^{-4 \left\| \frac{x-x^{i*}}{r} \right\|^2} ; i=1,2,\dots,R \quad (3.20)$$

Burada ;

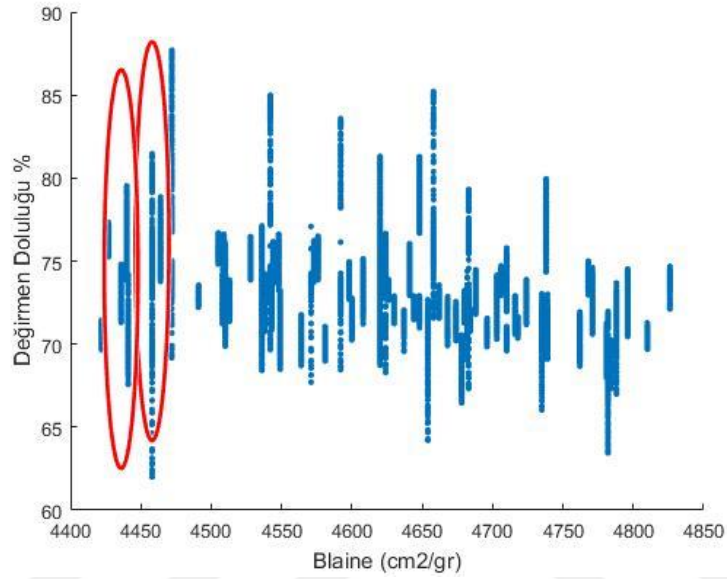
r : kural tabanı yarıçapı,

i : modelin etki alanını tanımlayan pozitif bir sabit,

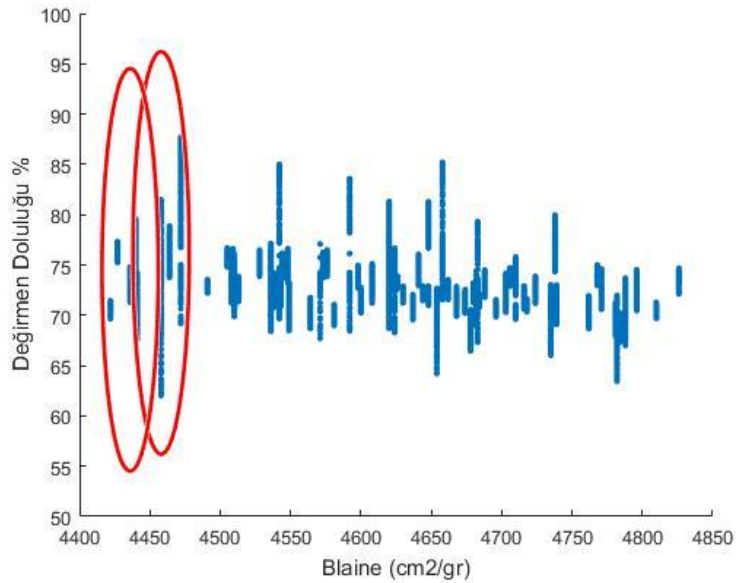
x^{i*} : i . modelin fokal noktası,

olarak tanımlanmıştır.

r yarıçapı, algoritmanın önceden tanımlanması gereken birkaç parametresinden biridir. Bu değer, hassasiyet ve model karmaşıklığı arasındaki dengeyi belirlemektedir. Çok büyük bir r değeri, çözüm kümesinin az sayıda kuralla ve yeteri kadar temsil edilememesine, çok küçük bir r değeri kullanılması durumunda da sistemde çok sayıda kural oluşturulmasına yol açacağı söylenebilir. r değerinin kural yapısına etkisi Şekil 3.16 ve 3.17’de gösterilmektedir.



Şekil 3.16 : Radius değerinin incelik – değirmen doluluğu arasındaki kural bağıntısına etkisi ($r=0.3$).



Şekil 3.17 : Radius değerinin incelik – değirmen doluluğu arasındaki kural bağıntısına etkisi ($r=0.4$).

Bununla beraber, girişlerin değer aralıkları belirgin bir biçimde birbirinden farklı ise yarıçapın vektörel olarak temsil edilmesi daha fazla esneklik verir. Bu durumda, girişlerin maksimum ve minimum değerlerinin farkı alınarak belirlenen r yarıçap değeri ile çarpılmaktadır. Bahsedilen durum, denklem 3.21 ile ifade edilmiştir.

$$r = \bar{r}(\bar{x} - \underline{x}) \quad (3.21)$$

Burada;

$r = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T$ yarıçap vektörü,

$\bar{x} = [\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n]^T$ girişlerin beklenen maksimum değerlerinin vektörü,

$\underline{x} = [\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_n]^T$ ise girişlerin beklenen minimum değerlerinin vektörü,

olarak ifade edilmektedir. $[0,3;0,5]$ arasında bir \bar{r} değeri tavsiye edilmektedir. Çevrimiçi modda girişlerin herbirinin sadece aralığı beklenebilir. Bu durumda, r vektörünü daha önce gerçekleştirilen deneyler ışığında el ile tanımlamak da geçerli bir yöntem olabilir.

TS bulanık çıkarım sistemlerinin tasarımı ise iki alt görevden oluşmaktadır. Bu görevler:

- Üyelik fonksiyonlarının merkezleri ve yayınımları ile fokal noktalarının tespit edilmesinden oluşan modelin kural tabanı kısmının öğrenilmesi,
- Sonuç çıkarım kısmının doğrusal alt sistemlerinin parametrelerinin öğrenilmesi,

olarak sıralanabilir.

eTS Bulanık Çıkarım Sistemi kural tabanının çevrimiçi öğrenilmesi

Bulanık kural tabanında öncül ve sonuç çıkarım kısımlarından oluşan EĞER-İSE bulanık kuralları ile giriş-çıkışı ilişkisi kurulmaktadır. Bu amaçla, ilk olarak seçilen giriş değişkenleri kümesine bağlı olarak oluşan çok boyutlu giriş uzayı bölümlenerek öncül kısım yapısı elde edilmektedir. Bu aşamada giriş uzayının kaç üyelik fonksiyonuna bölüneceği ve üyelik fonksiyonlarının doğru şekilde boyutlandırılması bulanık çıkarım sisteminin performans ve hassasiyetini belirleyecektir. Sonrasında ise

örnekleme verisinden oluşturulan bu alt veri uzaylarının herbiri için EĞER-İSE kuralları atanmaktadır.

Uzman bilgisine dayalı olarak giriş uzayının bölümlenmesine ve karşılık gelen bulanık kuralların oluşturulmasına alternatif üç veri uzayı bölümleme metodu vardır. Bunlar bulanık grid bölümleme, bulanık k-d tree bölümleme ve veri kümelemesidir.

Veri kümelemesi tekniği, giriş verilerinden benzer davranış gösteren veri gruplarını otomatik olarak tespit ederek bu gruplardan sistem yapısı hakkındaki bilgileri elde eder. Bu şekilde, giriş uzayında giriş-çıkış veri çiftleri kümelere gruplanmakta ve her bir küme de bir bulanık kural ile temsil edilmektedir. Diğer metodlar ile kıyaslandığında hesaplama zamanı açısından en verimli giriş uzayı bölümleme tekniğidir. Veri kümeleme tekniğinin dezavantajı ise, sistemin doğru çalışması için çalışma bölgesinin tamamının veri setleri tarafından tam olarak temsil edilmesinin gerekli olmasıdır.

Veri uzayı bölümlenmesi için geliştirilmiş olan birçok veri kümeleme tekniği mevcuttur. Bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanlar, K-means kümeleme; Bulanık C-means kümeleme, Bulanık Gustafson–Kessel kümeleme; Mountain kümeleme ve Mountain kümeleme tekniğinin bir varyasyonu olan Subtractive kümeleme metodlarıdır. Çevrimiçi eTS bulanık öğrenme algoritması Subtractive veri kümeleme tekniğini kullanmaktadır.

Subtractive kümeleme

Subtractive kümeleme tekniğinde n tane veri noktasından oluşan bir veri kümesi için x_i veri noktasındaki yoğunluk ölçütü denklem 3.22’de tanımlanmaktadır:

$$D_i = \sum_{j=1}^n \exp \left(- \frac{\|x_i - x_j\|^2}{\left(\frac{r_a}{2}\right)^2} \right) \quad (3.22)$$

Burada,

D_i = i. yoğunluk ölçütü

n = veri noktası adedi

x_i = x girişinin i. veri noktası

x_j = x girişinin j. küme merkezi

r_a = pozitif bir sabit olarak tanımlanmıştır.

Çok fazla komşu veri noktası olan veri noktalarının yoğunluğu yüksek olacaktır. Bir sonraki aşamada, en yüksek veri yoğunluğuna sahip veri v_1 ilk küme merkezi olarak seçilir ve diğer veri noktalarının etkileri ilk küme merkezinden çıkarılarak denklem 3.23'teki gibi güncellenir.

$$D_{i(\text{yeni})} = D_i - D_{v_1} \exp \left(- \frac{\|x_i - x_{v_1}\|^2}{\left(\frac{r_b}{2}\right)^2} \right) \quad (3.23)$$

Bu denklemde, ilk küme noktasının yoğunluğu sıfır, diğer küme noktaları ise ilk küme noktasına uzaklıklarına göre yoğunluk değerlerine sahiptir. r_b sabiti ile komşu bölgelerin arasındaki mesafe belirlenmektedir ve genelde $1.5 \times r_a$ 'ya eşit seçilir.

İleriki iterasyonlarda en yüksek yoğunluk ölçütüne sahip olan nokta bir sonraki küme merkezi olarak seçilir. Bu işlem yeterli sayıda küme merkezi tespit edilinceye veya elde edilen yoğunluk değeri bir durma değerinden düşük olana kadar devam ettirilir.

Sistemde kullanılan çekirdek yapı, denklem 3.24'te gösterilmiştir. Angelov ve Filev, bu yapıyı çevrimiçi hale getirerek kullanmıştır.

$$\mu_i = \exp \left(- \frac{\|x_i - v_i\|^2}{\left(\frac{r_a}{2}\right)^2} \right) \quad (3.24)$$

Çevrimiçi evrimsel kümeleme tekniği

Angelov ve Filev (2003), subtractive kümeleme tekniğini temel alarak çevrimiçi evrimsel kümeleme tekniğini geliştirmiştir. Bu kümeleme tekniği, veri noktasının bir küme merkezi olup olamayacağını veri noktasının diğer veri noktasına olan mesafesinin bir göstergesi olan bilgi içerme potansiyeline göre değerlendirmektedir. Potansiyel ise denklem 3.25'teki birinci mertebe Cauchy tipi fonksiyon ile ifade edilmektedir.

$$P_k(z_k) = \frac{1}{1 + \frac{1}{(k-1)} \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{n+m} (d_{ik}^j)^2}; k = 2, 3, \dots \quad (3.25)$$

Burada P_k , k , zamanında hesaplanan z_k veri noktasının potansiyelidir. $d_{ik}^j = z_i^j - z_k^j$ ise $j=1,2,\dots,n$ için x^j ve $j=n+m$ için y olmak üzere iki z_i^j ve z_k^j noktası arasındaki mesafenin z^j eksenindeki projeksiyonudur.

Prosedürde, ilk veri birinci kümenin merkezi olarak alınır ve ilk verinin potansiyeli bire eşitlenir. İlk verinin üyelik fonksiyonları ve koordinatları ile kural oluşturulur. Yeni giriş ve çıkış verileri geldikçe çevrimiçi kümeleme devam eder. Evrimsel kümeleme tekniği, yeni verinin potansiyeline göre kural tabanını günceller. Denklem 3.26-3.30 arasında z_k veri noktasının potansiyelinin ardışık olarak hesaplanmasında kullanılan denklemler gösterilmiştir.

$$P_k(z_k) = \frac{(k-1)}{(k-1)(g_k+1)+\sigma_k-2v_k} \quad (3.26)$$

Burada:

$$g_k = \sum_{j=1}^{n+m} (z_k^j)^2 \quad (3.27)$$

$$\sigma_k = \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{n+m} (d_{ik}^j)^2 \quad (3.28)$$

$$v_k = \sum_{j=1}^{n+m} z_k^j \beta_k^j \quad (3.29)$$

$$\beta_k^j = \beta_{k-1}^j + z_{k-1}^j \quad (3.30)$$

Mevcut küme merkezlerinin potansiyelleri ise yeni gelen her veriyle değişeceğinden yeni gelen her veri ile tüm küme merkezleri denklem 3.31'deki ifade kullanılarak güncellenir.

$$P_k(z^{l*}) = \frac{(k-1)P_{k-1}(z^{l*})}{(k-2)+P_{k-1}(z^{l*})+P_{k-1}(z^{l*})\sum_{j=1}^{n+m}(d_{k(k-1)}^j)^2} \quad (3.31)$$

Burada $P_k(z^{l*})$, k . adımda l . kuralın prototipi olan l . küme merkezi z^{l*} 'nin potansiyelidir.

eTS evrimsel kümeleme tekniği, daha az bilgi içeren bir kuralın daha çok bilgi içeren kural ile değiştirilmesi için kural tabanı modifikasyonu mekanizmasını da içermektedir.

Yeni veri örnekleme potansiyeli, mevcut kuralların ortalama potansiyellerinden büyük ise kural tabanına eklenmektedir. Oluşturulan yeni kuralın fokal noktası olarak kabul edilen yeni veri, daha önceden mevcut olan bir kurala çok yakın ise bu eski kural yeni kural ile değiştirilmektedir:

Eğer z_k , yeni veri noktasının potansiyeli mevcut kural merkezlerinin tamamının potansiyelinden büyük veya tamamından küçük ise:

$$P_k(z_k) < P_k(z^{i^*}) \dots \text{VEYA} \dots P_k(z_k) > P_k(z^{i^*}), \dots i = [1, R] \quad (3.32)$$

ve z_k , yeni veri noktasının mevcut kural merkezlerine olan üyeliği $1/3$ 'ten büyük ise:

$$\exists i, \dots i = [1, R]; \dots \mu_i^j > 1/3 \dots \forall j, j = [1, n] \quad (3.33)$$

Bu durumda z_k , yeni veri noktası, denklem 3.33'te verilen kural değiştirme şartını sağlayan kural merkezi veya merkezlerinin yerini alır.

$$x^{i^*} \leftarrow x_k; P_k(z^{i^*}) := P_k(z_k) \quad (3.34)$$

Diğer bir koşulda, sadece denklem 3.32'de verilen yeni bulanık kural ekleme için gerek şart sağlanır; fakat denklem 3.33 ile verilen kural değiştirme şartı sağlanmaz ise z_k , yeni veri noktası kural tabanına yeni bir kural merkezi olarak eklenir ve bu merkezin x eksenindeki projeksiyonuna bağlı olan bir fokal nokta ile yeni bir bulanık kural oluşturulur.

$$R := R + 1; x^{R^*} \leftarrow x_k; P_k(z^{R^*}) = P_k(z_k) \quad (3.35)$$

Eğer denklem 3.32 sağlanmaz ise kural tabanı değiştirilmez ve z_k , yeni veri noktası, mevcut kural merkezlerinden en yakın olanına atanır.

Bulanık çıkarım sisteminin kural tabanı bu şekilde yeterli ön bilgi olmadan da öğrenilebilmektedir. Yeni verilerle var olan kurallar değiştirilmekte ve daha fazla özetleyici bilgiye sahip yeni kurallar kural tabanına eklenmektedir. Çevrimiçi evrimsel kümeleme tekniği ile TS bulanık çıkarım sisteminin kural tabanına “değişerek gelişme”, yani evrim geçirme yeteneği kazandırılmıştır.

eTS Bulanık Modelin sonuç çıkarım kısmı parametrelerinin çevrimiçi kestirilmesi

Bulanık kural tabanı parametrelerinin fokal noktaları evrimsel veri kümeleme tekniği ile çevrimiçi olarak kestirilmektedir. Sabit kural tabanı parametreleri ile TS modeli doğrusal bir modele dönüşür. Her bir kural tabanının bağlantılı olduğu doğrusal modellerin parametreleri, pseudo tersi alınarak veya ardışık en küçük kareler (RLS) metodu kullanılarak elde edilebilirler.

Verilen bir giriş-çıkış verisi için (x_k^T, y_k) , $k = [1, TD]$, burada TD , eğitim veri örneklerinin (çevrimdışı modda sabit) ve sabit öncül (antecedent) parametrelerin sayısıdır. Alt model parametrelerinin vektörü θ aşağıdaki hedef fonksiyonunu minimize etmek zorundadır:

$$J_G = \sum_{k=1}^{TD} (y_k - \varphi_k^T \theta)^2 \quad (3.36)$$

Optimal çözüm, Kalman Filtresi olarak da adlandırılan ardışık en küçük kareler algoritması RLS ile kestirilmektedir. Denklem 3.36'daki hedef fonksiyonu global olarak optimaldir; fakat bu TS modeli oluşturan lokal olarak uygun davranışlarını garanti etmez (P. P. Angelov ve Filev, 2004).

eTS kural tabanı dereceli olarak değişerek gelişmek suretiyle evrim geçirmektedir. Bu nedenle, tüm verileri (değişme zamanından önceki veriler dahil) etkileyen kuralların normalize edilmiş olan ateşleme güçleri λ' değişir. Bu nedenle RLS veya wRLS doğrudan uygulanamamaktadır. Kural tabanına yeni kural eklendiğinde, bu kural ve kalan R adet kuralın karşılık gelen kovaryans ve parametrelerinin ağırlıklandırılmış ortalaması olarak kestirilerek, RLS'nin kovaryans matrisleri sıfırlanır ve parametrelerinin öndeğer atamaları yapılır.

Denklem 3.36'daki hedef fonksiyonu minimize edildiğinde aşağıdaki RLS prosedürü uygulanır.

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + C_k \varphi_{k-1} (y_k - \varphi_{k-1}^T \hat{\theta}_{k-1}), k = 2, 3, \dots \quad (3.37)$$

$$C_k = C_{k-1} - \frac{C_{k-1} \varphi_{k-1} \varphi_{k-1}^T C_{k-1}}{1 + \varphi_{k-1}^T C_{k-1} \varphi_{k-1}} \quad (3.38)$$

Burada:

$$\hat{\theta}_1 = [(\hat{\pi}^1)^T, (\hat{\pi}^2)^T, \dots, (\hat{\pi}^R)^T]^T = \mathbf{0}; C_1 = \Omega I \quad (3.39)$$

Kural tabanına yeni bir kural eklendiğinde ise , RLS aşağıdaki şekilde reset edilir.

- Yeni kuralın parametreleri diğer kuralların parametrelerinin ağırlıklandırılmış ortalamalarından elde edilir. Ağırlıklar, mevcut kuralların ağırlıklandırılmış ateşleme seviyeleridir λ^i . Diğer kuralların parametreleri bir önceki adımdan doğrudan alınır.

$$\hat{\theta}_k = [(\hat{\pi}_{k-1}^1)^T, (\hat{\pi}_{k-1}^2)^T, \dots, (\hat{\pi}_{k-1}^R)^T, (\hat{\pi}_{k-1}^{R+1})^T]^T \quad (3.40)$$

Burada $\hat{\pi}$ değeri denklem 3.41'deki şekilde gösterilmiştir.

$$\hat{\pi}_k^{R+1} = \sum_{i=1}^R \lambda^i \hat{\pi}_{k-1}^i \quad (3.41)$$

- Kovaryans matrisleri denklem 3.42'deki ifade ile sıfırlanır.

$$C_k = \begin{bmatrix} \rho \zeta_{11} & \dots & \rho \zeta_{R(n+1)} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \Omega & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \Omega \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Burada ζ_{ij} ; $i=1,2,\dots,R(n+1)$ ve $j=1,2,\dots,R(n+1)$ kovaryans matrisinin elemanıdır ve ρ denklem 3.43'teki gibi ifade edilir.

$$\rho = \frac{R^2 + 1}{R^2} \quad (3.43)$$

Bir kural, bir başka kural ile değiştirildiğinde ise (“Değiştir” kuralı), kovaryans matrisleri bir önceki adımdan doğrudan alınır.

Son olarak, aynı çevrim içerisinde doğrusal alt modellerin kestirilmiş parametrelerine sahip olunduktan sonra çevrimiçi olarak çıkışların bir sonraki değerlerini denklem 3.44'teki ifade ile kestirilebilir.

$$\hat{y}_{k+1} = \varphi_k^T \hat{\theta}_k, k = 2,3,\dots \quad (3.44)$$

“Ekle” kuralı aktif olduğunda, yeni eklenmiş kuralın parametreleri kalan R adet kuralın parametrelerinin ağırlıklandırılmış ortalaması olarak elde edilir, denklem 3.42'den hesaplanır

“Değiştir” kuralı aktive edilir ve bir kural bir başka kural ile değiştirilirse bu durumda tüm kuralların parametreleri bir önceki adımdan doğrudan alınır:

$$\pi_k^i = \pi_{k-1}^i; i = 1,2,\dots, R \quad (3.45)$$

Yeni eklenmiş bir kuralın (“Ekle”), kovaryans matrisi denklem 3.46'daki ifade ile hesaplanır:

$$c_k^{R+1} = \Omega I \quad (3.46)$$

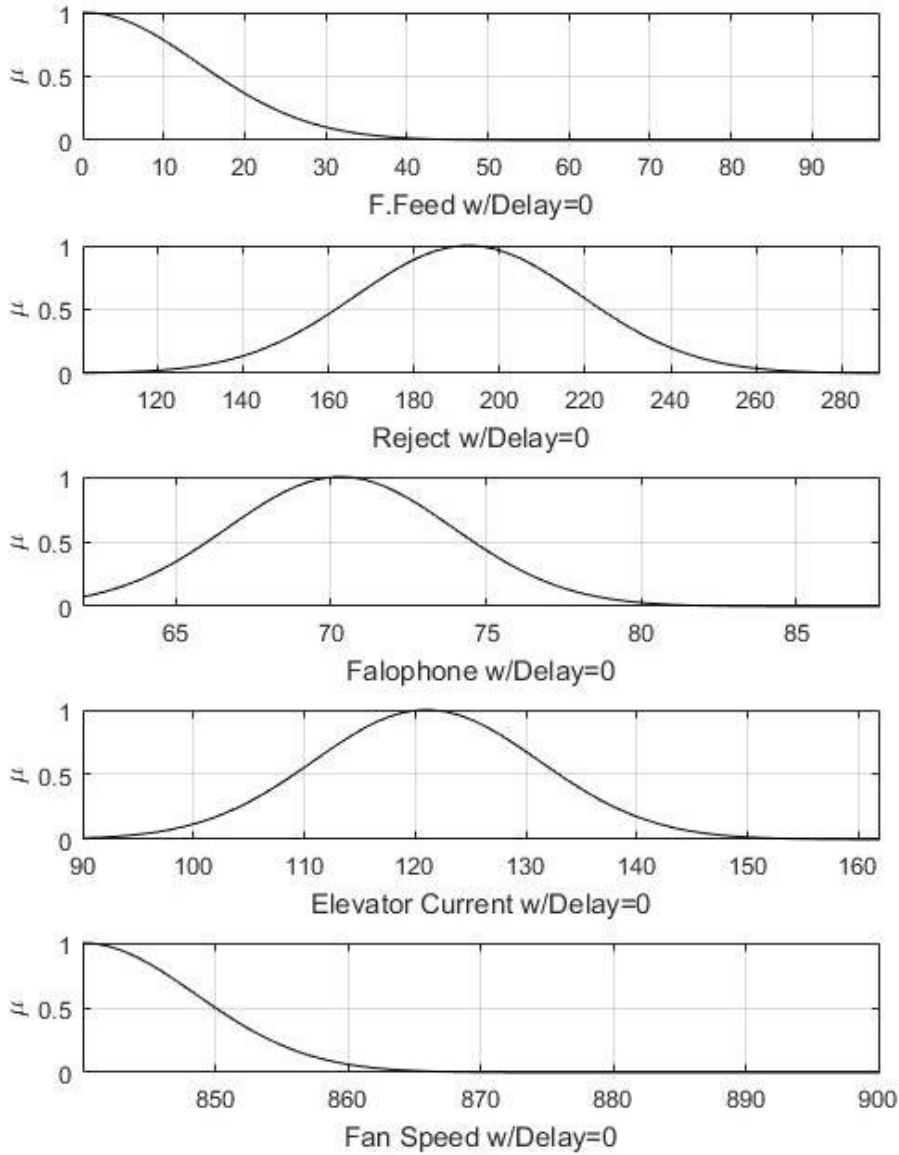
Kalan R tane kuralın kovaryans matrisleri bir önceki adımdan doğrudan alınır.

$$c_k^i = c_{k-1}^i; i = 1,2,\dots, R \quad (3.47)$$

Bu sistemin uygulaması gerçekleştirilmiş ve CEMI ve CEMIV tipi üretim için ayrı ayrı modeller elde edilmiştir. Bir kural yapısı iki ana unsurla izah edilebilir :

1. Kural merkezleri
2. Kuralların ağırlıklandırılmış ateşleme seviyeleri

Oluşturulan eTS tipi 5 giriş 1 çıkışlı incelik yazılımsal algılayıcı modelinin kural merkezleri Çizelge 3.2’de, kuralların ağırlıklandırılmış ateşleme seviyeleri ise Çizelge 3.3’te gösterilmiştir. Kural 1’in bulanık mantık küme yapısı Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 : Birinci kuralın bulanık mantık kümeleri

Çizelge 3.2 : Kuralların x* değerleri.

Giriş Vektörü	Kuralların x* değerleri															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Taze Besleme	0,3	87,4	88,3	84,1	63,7	88,6	0,3	0,3	91,2	91,1	81,7	86,2	0,4	88,4	87,5	87,5
Geri Dönüş	192,7	228,0	107,8	109,9	182,9	102,6	194,4	173,6	227,3	226,5	261,0	287,8	231,8	234,4	280,7	239,2
Değirmen Doluluğu	70,3	78,5	68,7	70,0	74,0	69,9	85,0	76,2	74,5	74,3	72,8	73,0	65,9	70,7	73,5	73,9
Elevatör Akımı	121,0	127,5	99,9	99,9	108,1	97,3	122,8	90,0	121,4	151,6	118,4	129,2	119,3	106,4	132,2	121,9
Seperatör Hızı	840,0	855,0	870,0	840,0	855,0	855,0	840,0	840,0	840,0	840,0	900,1	885,1	870,0	855,0	870,0	870,0

Çizelge 3.3 : Kuralların alt model parametre vektörü $\hat{\theta}$ değerleri.

Giriş Vektörü	Alt model parametre vektörü $\hat{\theta}$ değerleri															
	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}	π_{12}	π_{13}	π_{14}	π_{15}	π_{16}
1	11914,1	5831,3	10314,3	12007,8	-14837,1	-24849,7	11595,1	12141,3	-35,327	7154,8	1015,4	1,551	-15002,2	1859,4	18582,8	11473,7
Taze Besleme	-1,593	8,437	-2,897	15,088	3,715	-30,624	5,640	19,468	-36,758	1479,140	-5,848	4603,880	-2,753	-3,239	-32,918	2,629
Geri Dönüş	-3,996	-0,085	7,558	5,587	0,713	-1,744	12,954	191,396	1,903	65,126	-0,397	-11,473	0,393	0,044	3,949	0,091
Değirmen Doluluğu	-6,255	-41,175	-20,427	-22,889	0,355	2,799	-46,867	150,240	9,822	-2125,72	38,426	-0,034	-18,861	-24,469	-2,806	47,427
Elevatör Akımı	-3,610	8,568	-2,208	-0,520	16,274	-3,722	13,500	-126,885	-4,951	-140,718	1,746	19,853	2,927	-0,470	-0,494	2,812
Seperatör Hızı	-6,773	-0,039	-5,584	-9,442	20,288	38,308	-8,813	-47,871	8,710	27,474	1,551	-0,175	23,717	5,778	-13,482	-12,285

Modelin 16 kuralı bulunmaktadır. Bir eTS modelde bir kuralın yorumlanması şu şekilde gerçekleşir :

EĞER Taze Besleme tonajı 0,3 **VE** Geri dönüş tonajı 192,7 **VE** Değirmen doluluğu 70,3 **VE** Elevatör Akımı 121,0 **VE** Seperatör Hızı 840,0'a yakın **İSE**

İncelik Değeri = 11914,1+ (Taze Besleme x -1,593)+ (Geri Dönüş x -3,996) + (Değirmen Doluluğu x -6,255) + (Elevatör Akımı x -3,610) + (Seperatör Hızı x -6,773)

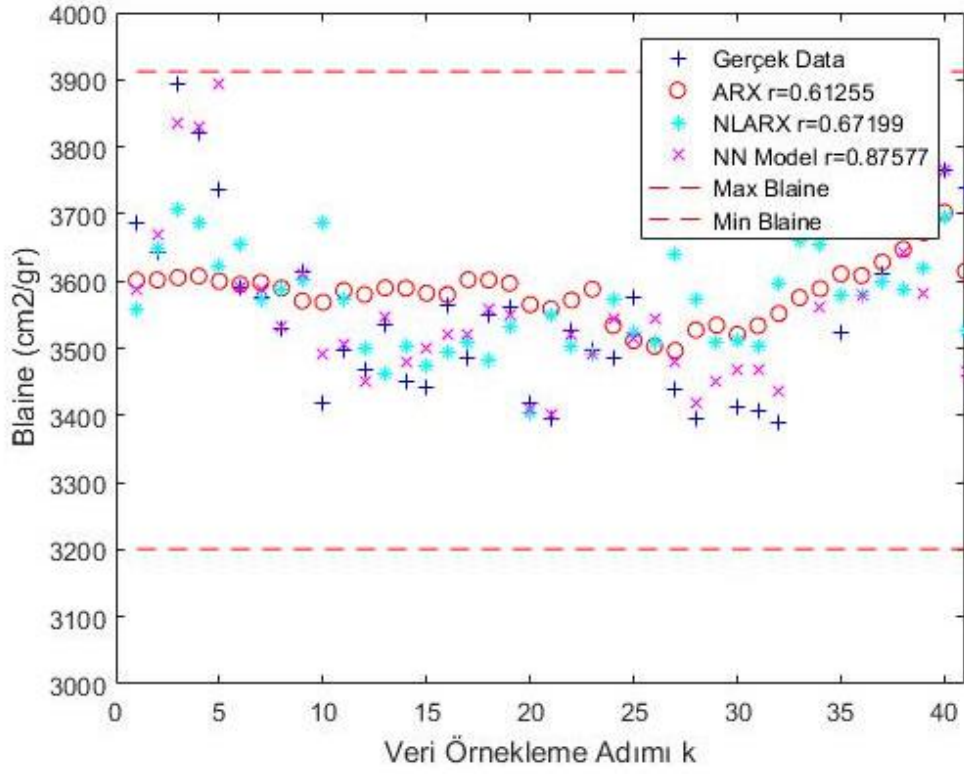




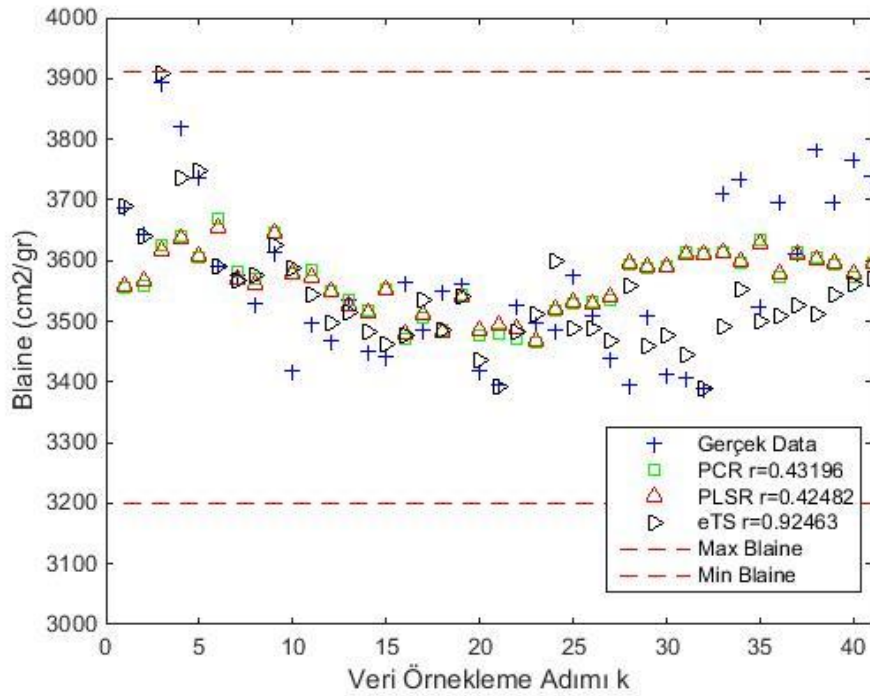
4. ELDE EDİLEN MODELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Sistemden 1 aylık veri elde edilmiş ve bu veri grubu üzerinde çalışmalara yoğunlaşmıştır. Algılayıcıların sorunlu olduğu günler ayıklandığında veri grubunda 27 günlük veri kalmıştır. Bu veri grubundan 9 günlük CEMI, 18 günlük CEMIV tipi çimento üretim verisi elde edilmiş ve bu verilerden her gün için Çizelge 2’de belirtilen giriş/çıkış kombinasyonlarında modeller elde edilmiştir. Ayrıca, 9 günlük CEMI verisi ile 18 günlük CEMIV verisi ayrı ayrı birleştirilerek 2 ayrı veri grubu elde edilmiş, bu veri gruplarından da yine Çizelge 3.1’de belirtilen modeller elde edilmiştir.

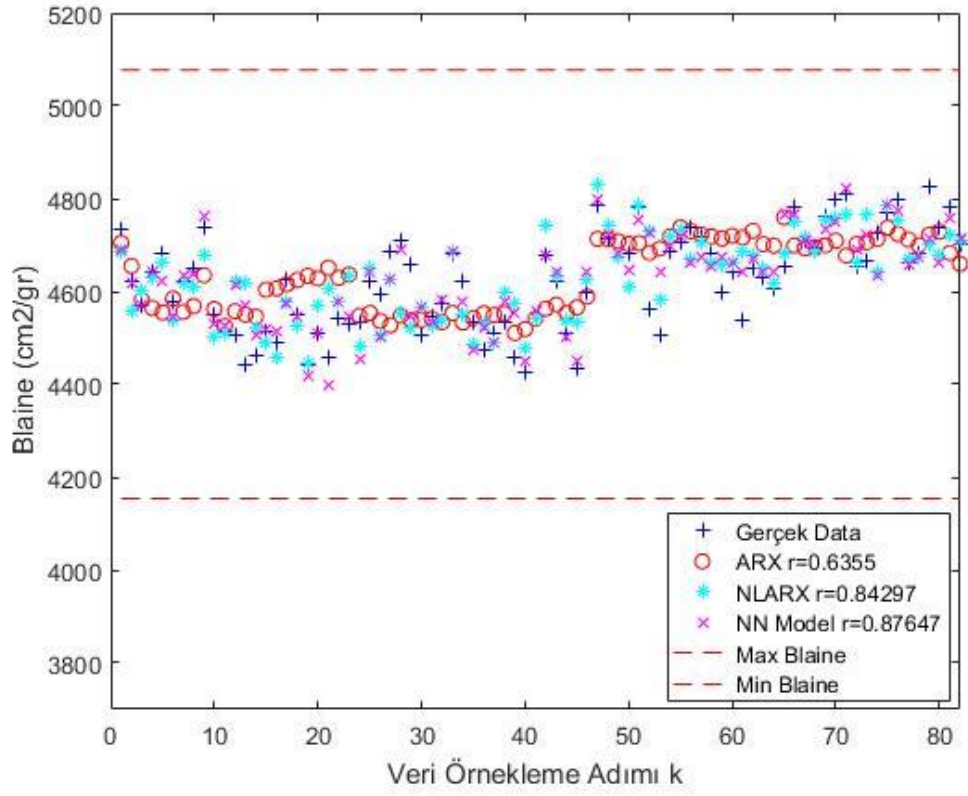
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek başarımlı incelik değeri modelleri, 5 giriş ve 1 çıkışlı ve CEMI ve CEMIV verilerinin ayrı ayrı birleştirilmesi ile elde edilen modeller olmuştur. 9 günlük CEMI verilerinin birleştirilmesi ile elde edilen modellerin çıkışlarının karşılaştırılması Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de, 18 günlük CEMIV verilerinin birleştirilmesi ile elde edilen modellerin çıkışlarının karşılaştırılması Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te, CEMIV verilerinin birleştirilmesi ile elde edilen modellerin, yine CEMIV üretimi gerçekleştirilen fakat 15 dakikada bir incelik değeri ölçümü yapılan başka bir günün incelik değerinin tahmininde kullanılması ile alınan çıkışlar Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Görülebileceği üzere, test edilen modelleme teknikleri arasında en iyi sonucu evrimsel Takagi Sugeno tekniği vermiştir.



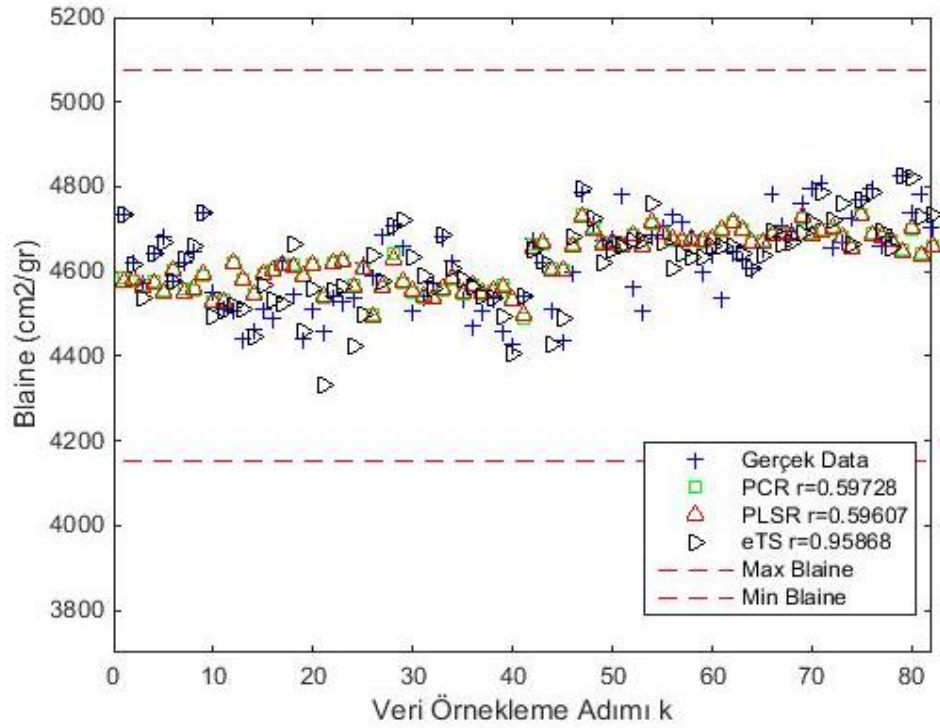
Şekil 4.1 : CEMI tipi üretimin gerçek zamanlı verisi ile ARX/NARX ve Yapay sinir ağı modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.



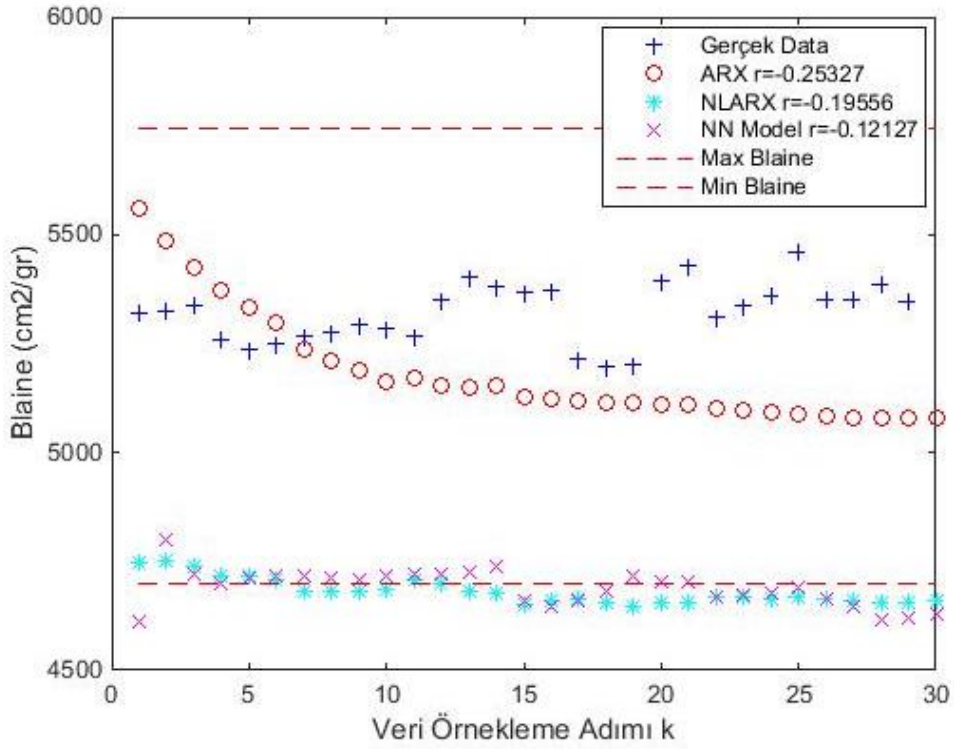
Şekil 4.2 : CEMI tipi üretimin gerçek zamanlı verisi ile PCR/PLSR ve eTS modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.



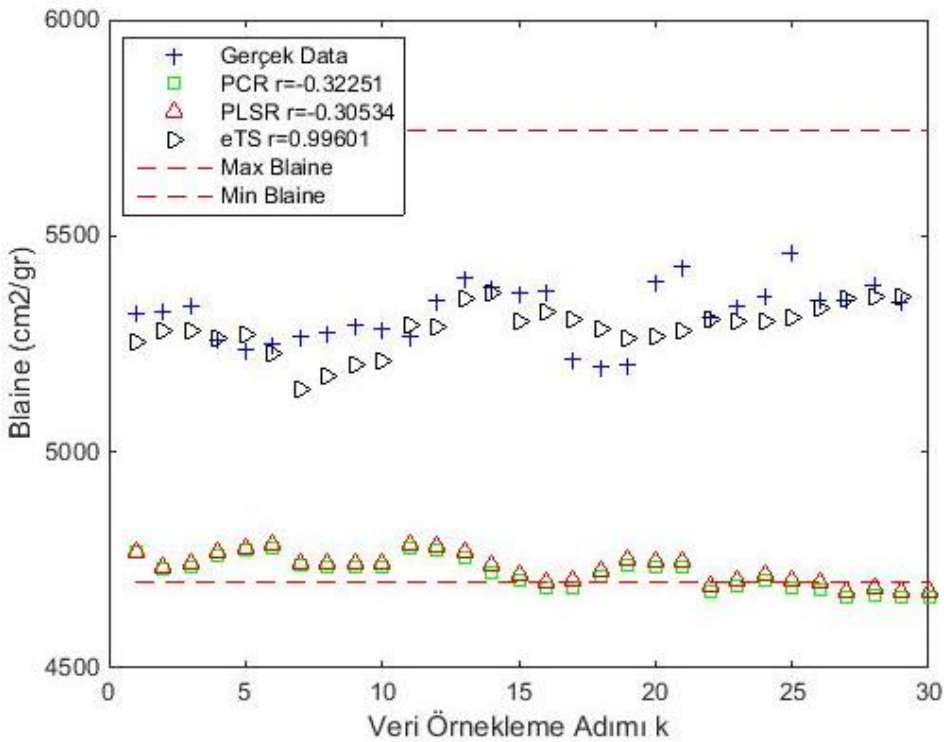
Şekil 4.3 : CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisi ile ARX/NARX ve Yapay sinir ağı modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.4 : CEMIV tipi üretimin gerçek zamanlı verisi ile PCR/PLSR ve eTS modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.5 : CEMIV tipi üretimin farklı bir gününde elde edilen gerçek zamanlı veri ile ARX/NARX ve Yapay sinir ağı modelinin çıkışlarının karşılaştırılması



Şekil 4.6 : CEMIV tipi üretimin farklı bir gününde elde edilen gerçek zamanlı veri ile PCR/PLSR ve eTS modelinin çıkışlarının karşılaştırılması.

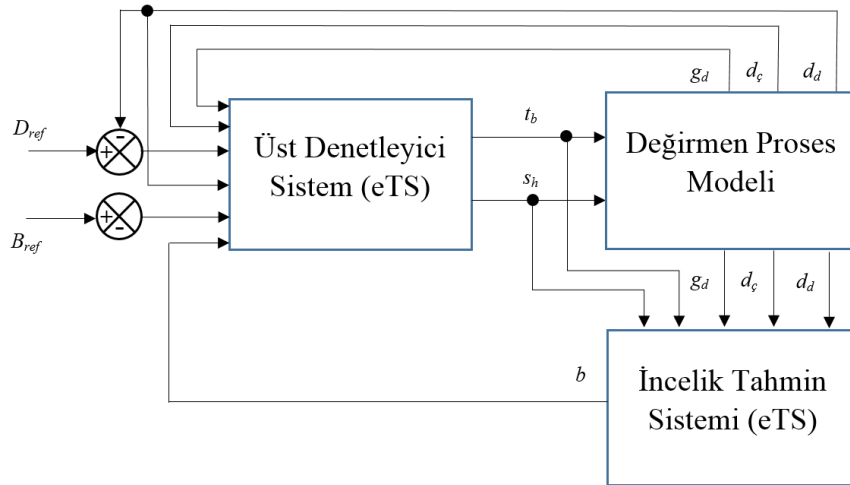
5. ÇİMENTO ÖĞÜTME PROSESİ ÜST DENETLEYİCİ ÇALIŞMALARI

Çimento öğütme prosesinin operatör müdahalesi olmadan çalışabilmesi için sistemden aldığı giriş verilerine karşılık sisteme çıkış verileri uygulayacak bir denetleyiciye ihtiyaç vardır. Çimento öğütme prosesi modelinden yola çıkılarak üst denetleyici sistem eTS tekniği kullanılarak oluşturulmuştur.

Üst denetleyici sistem, 6 girişe ve 2 çıkışa sahiptir. Girişler ve çıkışlar Çizelge 5.1’de, sistemin blok diyagramı ise Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Üst denetleyici sistemin giriş-çıkış dağılımı.

Girişler	Çıkışlar
İncelik hata değeri	Hammadde Besleme Tonajı
Doluluk hata değeri	
İncelik değeri	
Değirmen doluluk değeri	Ayrıştırıcı Hızı
Değirmen çıkış değeri	
Geri dönüş tonajı	



Şekil 5.1 : Üst denetleyici sistemin blok diyagramı.

Burada :

D_{ref} = Değirmen doluluk referans değeri (t/h)	g_d = Geri dönüş tonajı (t/h)
B_{ref} = İncelik referans değeri (cm ² /gr)	$d_ç$ = Değirmen çıkış değeri (A)
t_b = Hammadde besleme tonajı (t/h)	d_d = Değirmen doluluğu (% ses)
s_h = Ayırıştırıcı hızı (d/dk)	b = İncelik değeri

olarak gösterilmiştir.

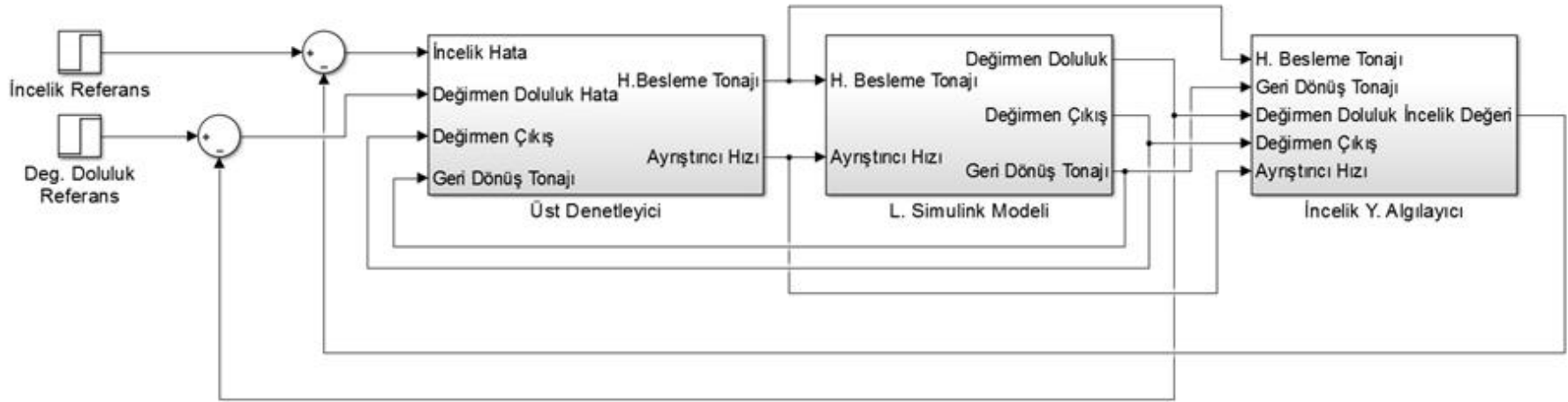
Sistemin eğitimi için üst denetleyici yapısı, geçerli bir değirmen modeli ile kullanılması gerekmektedir. Bunun için, Şekil 5.2’de gösterilen Simulink tabanlı değirmen proses modeli kullanılmıştır.

Üst denetleyici sistem ve incelik tahmin sistemi aynı anda Simulink arayüzü kullanılarak eğitilmektedir. Sistemlerin eğitilmesi için incelik değeri tahmin sisteminin eğitiminde kullanılan 18 günlük CEMIV veri grubu kullanılmıştır.

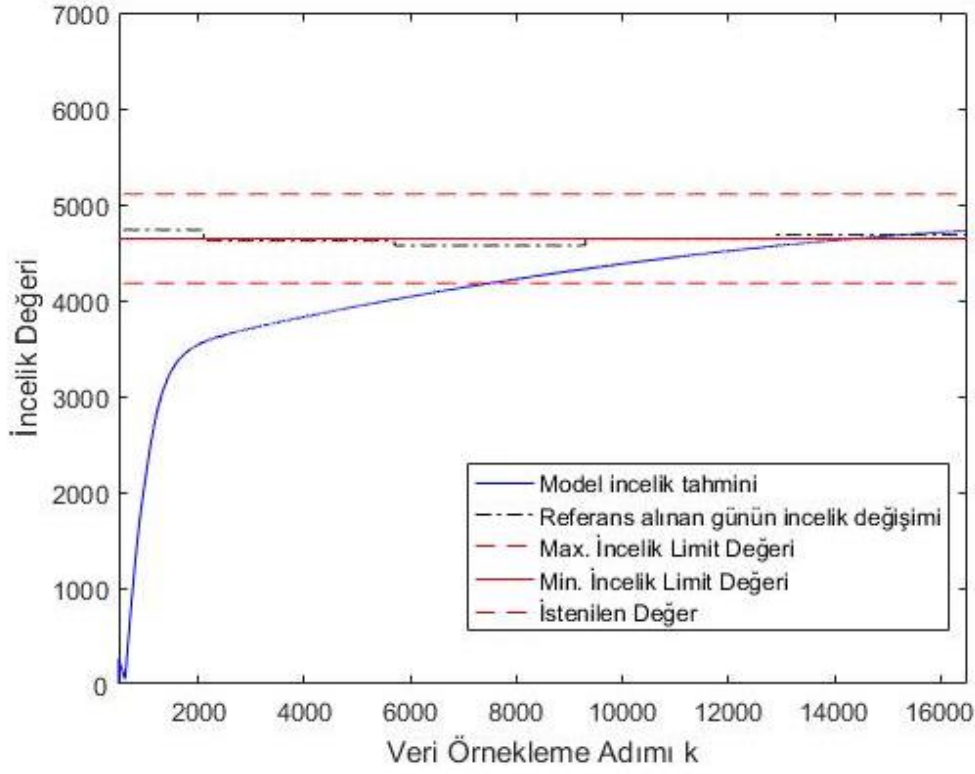
Sistem eğitildikten sonra elde edilen üst denetleyici ve incelik tahmin modellerinin φ ve $\hat{\theta}$ matrisleri (3.57)’deki denklemdeki şekilde kullanılarak her iterasyon için çıkış değerlerini öngörmektedir.

Üst denetleyici, öngördüğü çıkış değerlerini Simulink modeli ve İncelik tahmin modeline iletmektedir. Simulink modelinden çıkan geri dönüş tonajı, değirmen doluluğu ve değirmen çıkışı değerleri de incelik tahmini gerçekleştiren yazılımsal algılayıcı sisteme beslenmektedir. Yazılımsal algılayıcı sistemden elde edilen incelik değeri ve simulink modelinden elde edilen değirmen doluluk değeri istenilen referans incelik ve doluluk değerlerinden çıkarılarak üst denetleyici sisteme incelik ve doluluk hata değerleri olarak iletilmektedir. Simulink modelinden gelen değirmen çıkış değeri ve geri dönüş tonaj değerleri de aynı şekilde üst denetleyici modele iletilerek döngü tamamlanmıştır. Sistemin simulink platformundaki temsili blok diyagramı Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

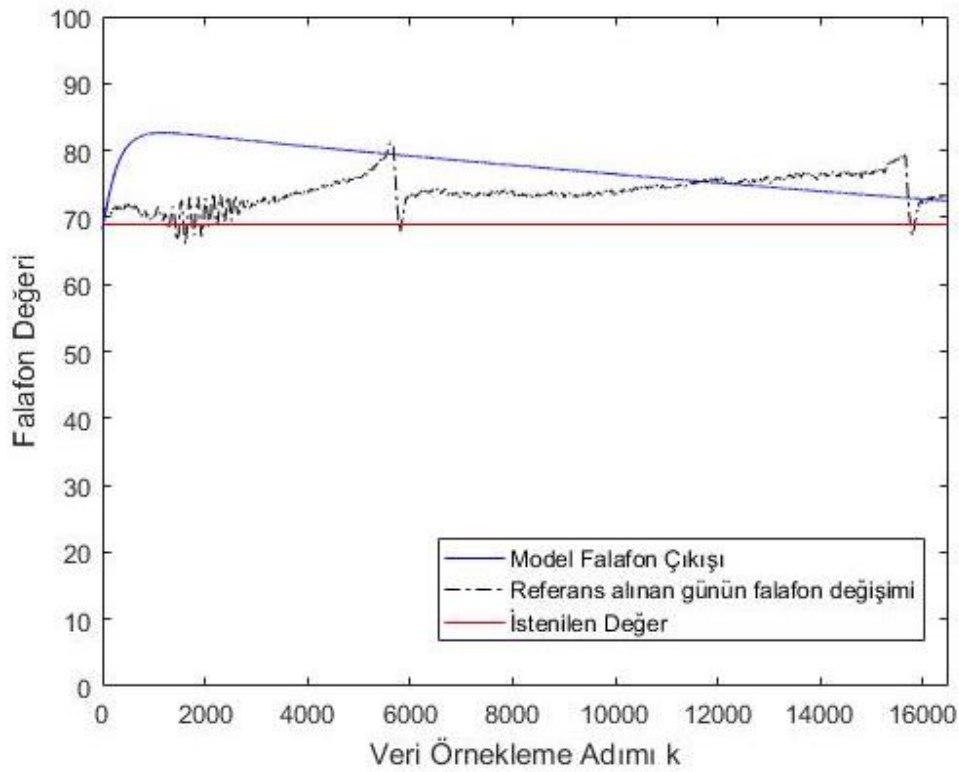
İlk aşamada günlük incelik çalışma ortalaması belirlenerek incelik referans değerleri, doluluk miktarı %5 arttırılacak şekilde de doluluk referans değerleri oluşturulmuştur. Sistemin 1. gün üretiminin başlangıç değerleri kullanılarak belirlenen referans değerlerinde verdiği incelik değeri ve değirmen doluluk eğrisi Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te gösterilmektedir. Gerçek zamanlı sistemin, incelik değeri toplanmaya başladığı saatten 3 saat önce çalışmaya başladığı dikkate alındığında, sistemin istenilen referans değerlerine normal sürede ulaştığı görülmektedir.



Şekil 5.2 : Çimento öğütme prosesi simulink blok diyagramı.

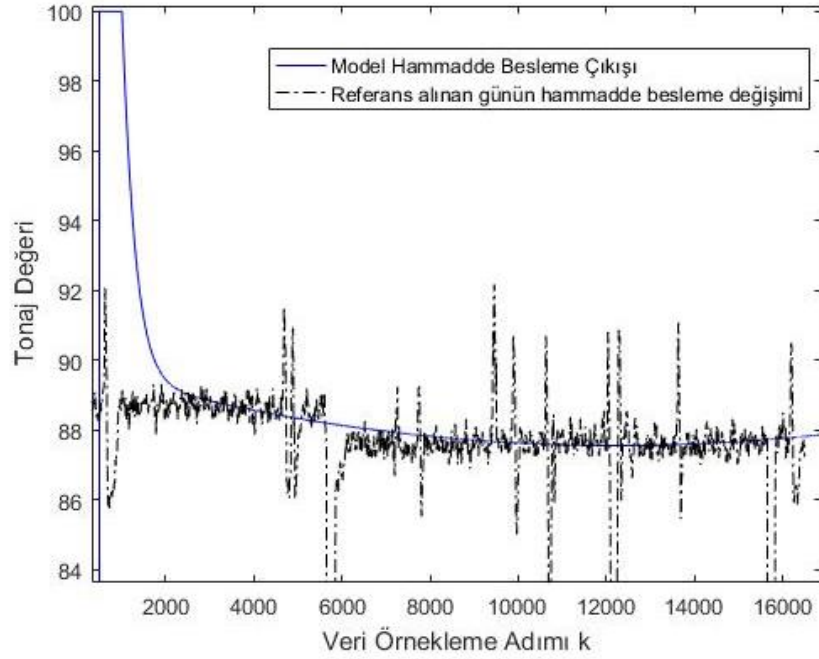


Şekil 5.3 : İstenilen incelik değeri aralığı ve gerçek zamanlı sistemin incelik verisi ile modelin incelik tahmini çıkışının karşılaştırılması.

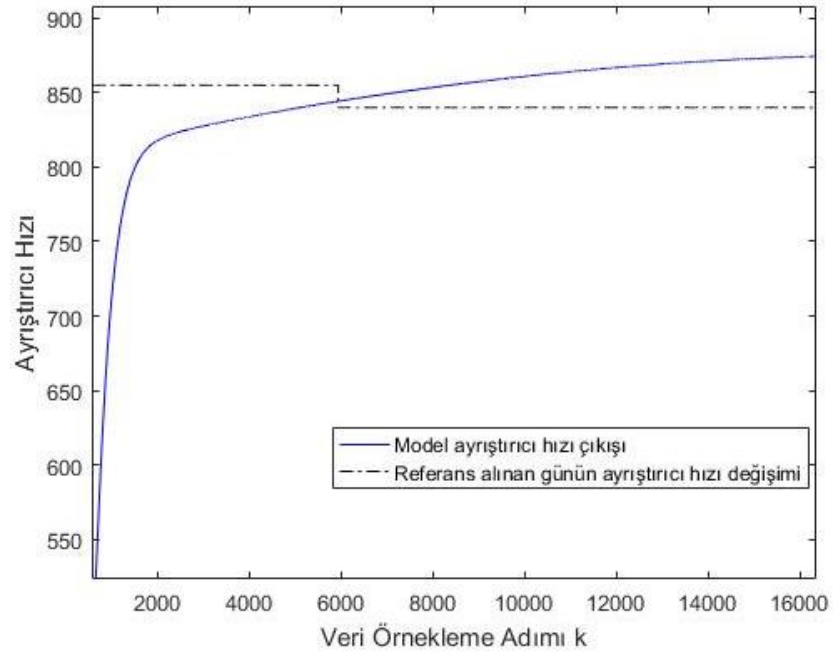


Şekil 5.4 : İstenilen falafon değeri ve gerçek zamanlı sistemin falafon değeri ile modelin falafon değerinin karşılaştırılması.

Bu referans değerlerine üst denetleyici sistemin verdiği çıkışlar ile aynı referans değerlerinde gerçek zamanlı sisteme uygulanan çıkışlar (hammadde besleme ve ayrıştırıcı hızı) ise Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Görülebileceği üzere üst denetleyici sistemin çıkışları, gerçek zamanlı sisteme çok yakındır.



Şekil 5.5 : Gerçek zamanlı sistemin hammadde besleme tonajı verisi ile modelin hammadde besleme tonajı çıkışının karşılaştırılması.



Şekil 5.6 : Gerçek zamanlı sistemin ayrıştırıcı hızı değeri ile modelin ayrıştırıcı hızı değerinin karşılaştırılması.

5.1 Üst Denetleyici Sistemin Optimizasyonu

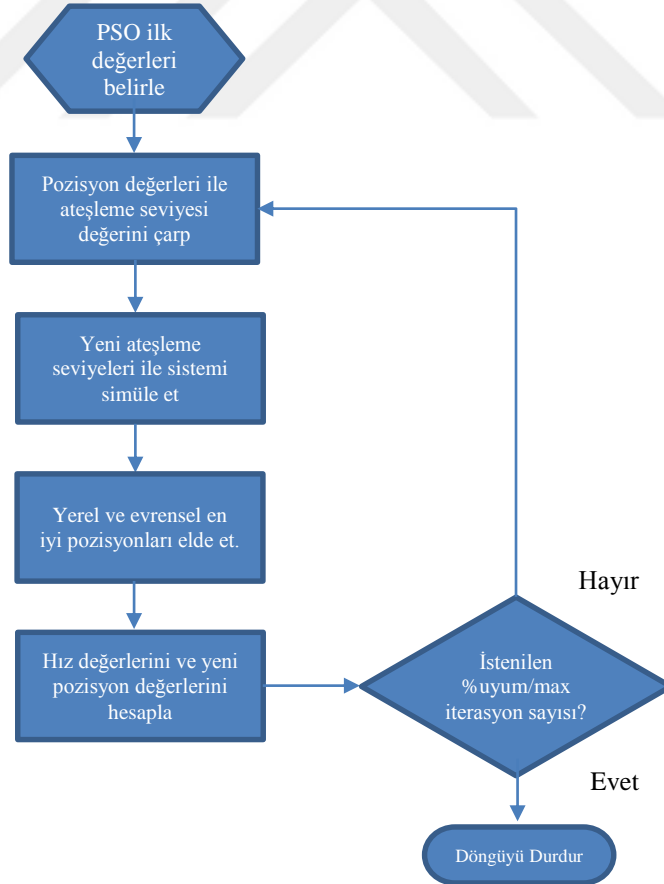
Sonraki çalışmalarda elde edilen üst denetleyici yapının PSO ile optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bunun için bir uyum fonksiyonu oluşturulmuştur.

Bu fonksiyon;

- Eğer çıkış incelik değeri, istenilen değer %95'inden büyükse ve %105'inden küçükse %10 değişim,
- İstenilen incelik değerinin yakınlığına göre maksimum %40 değişim,
- İstenilen değirmen doluluğu değerinin yakınlığına göre maksimum %50 değişim

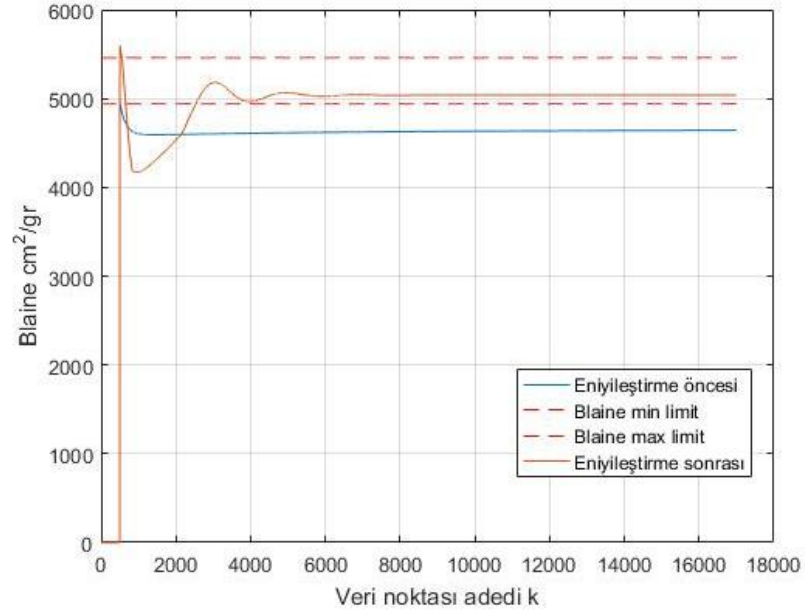
ve toplam uyum değeri %100 olacak şekilde yapılandırılmıştır.

Sistem, optimizasyon işlemlerini Şekil 5.2'deki sistemin kurallarının normalize edilmiş ateşleme seviyesi olan λ değerini değiştirerek gerçekleştirmektedir. Sistemin akış diyagramı Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

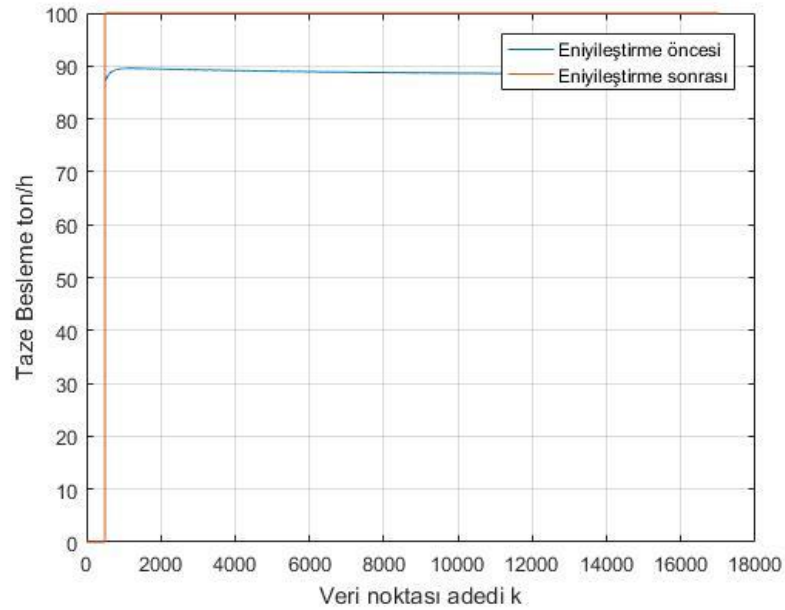


Şekil 5.7 : Optimizasyon sisteminin akış diyagramı.

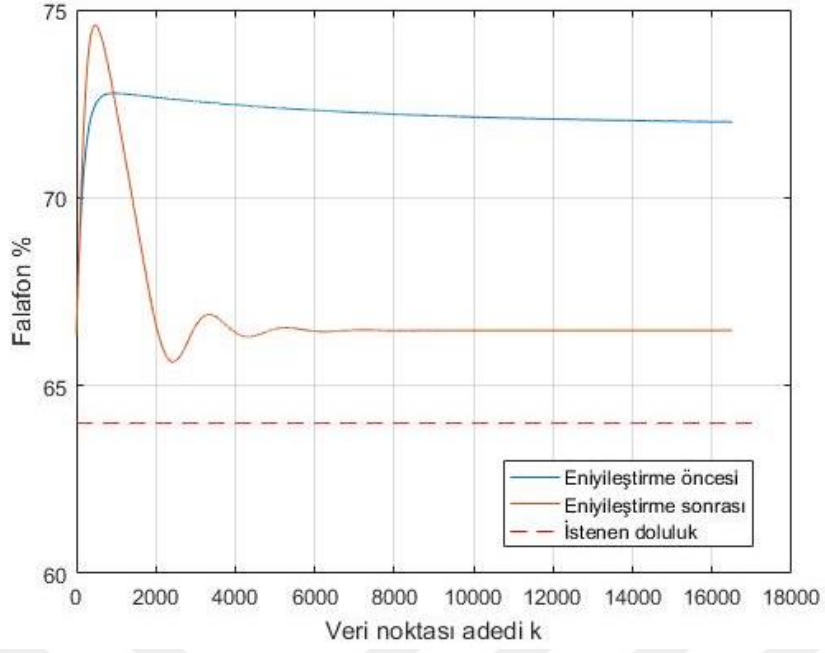
Sistemin 5200 cm²/gr referans değerinde başlangıçtaki ateşleme değerleri ile optimizasyon sonrasındaki ateşleme değerlerinin oluşturduğu fark Şekil 5.8 ve Şekil 5.10 arasında gösterilmektedir. Görülebileceği üzere, sistem optimizasyondan önce istenilen incelik aralığında çalışmazken, optimizasyon sonrası sistem istenilen incelik aralığında çalışmaya başlamıştır. Buna ek olarak, sistem istenilen tonaj değerine yakın ve daha yüksek doluluk oranıyla çalışmaya başlamıştır (Falafonun çıkış değeri ile değirmenin doluluk miktarı ters orantıya sahiptir).



Şekil 5.8 : Optimizasyon öncesi ve sonrası ürünün incelik değeri.



Şekil 5.9 : Optimizasyon öncesi ve sonrası taze besleme tonajı.



Şekil 5.10 : Optimizasyon öncesi ve sonrası değirmen doluluk miktarı.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elde edilen sonuçların dökümü CEMI tipi çimento üretimi için Çizelge 6.1’de, CEMIV tipi çimento üretimi için ise Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Sonuçlarda da görülebileceği üzere, eTS tekniği ile elde edilen model, diğer teknikler ile elde edilen modellere göre daha başarılıdır.

Çizelge 6.1 : Modellerin CEMI tipi çimento üretimi performans karşılaştırması.

Model Tipi	Maksimum Hata Blaine (cm ² /g)	Maksimum Hata (%)	RMSE
ARX	288,7	7,414	706,3
NARX	266,6	7,799	689
YSA	273,5	7,809	701,6
PCR	267,9	6,879	758,2
PLS	277,6	7,129	756,3
eTS	269,6	7,127	635,9

Çizelge 6.2 : Modellerin CEMIV tipi çimento üretimi performans karşılaştırması.

Model Tipi	Maksimum Hata Blaine (cm ² /g)	Maksimum Hata (%)	RMSE
ARX	193,4	4,343	759,5
NARX	177	3,986	582,1
YSA	191,5	4,044	570,2
PCR	176,2	3,789	744,7
PLS	177,7	3,795	749,7
eTS	163,2	3,62	559,3

Çizelge 6.3 : Modellerin CEMIV tipi çimento üretimi performans karşılaştırması
(Tek günlük veri için).

Model Tipi	Maksimum Hata Blaine (cm ² /g)	Maksimum Hata (%)	RMSE
ARX	374,5	6,858	1120,7
NARX	791,7	14,498	3472,8
YSA	770,5	14,263	3424,1
PCR	772,9	14,154	3258,9
PLS	758,1	13,884	3199,3
eTS	148,6	2,723	385,7

Elde edilen üst denetleyici sistemin ilk sonuçları elde edilmiştir. Bu sistemin çevrimiçi çalışmaya uygun hale getirilerek çevrimiçi modelleme ile çok daha yüksek bir performans göstereceği öngörülmektedir.

Bir sonraki aşamada, sistemin çevrimiçi olarak üst denetleyici tarafından önerilen çıkış verileri ile kontrol edilmesi ve operatör eğitiminde kullanılabilmesi için gerekli çalışmaların gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Akca, S.** (2014). *Taşıtın Yanal Ve Doğrusal Hareket Kontrolü İçin Evrimsel-Takagi-Sugeno Bulanık Sürücü Modeli Geliştirilmesi*. (Ph.D.), İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Angelov, P., Xydeas, C., and Filev, D.** (2004). *On-line identification of MIMO evolving Takagi-Sugeno fuzzy models*. Paper presented at the Fuzzy Systems, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on.
- Angelov, P. P., and Filev, D. P.** (2004). An approach to online identification of Takagi-Sugeno fuzzy models. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, 34(1), 484-498.
- Avşar, H.** (2006). Control, optimization and monitoring of Portland cement (Pc 42.5) quality at the ball mill.
- Babuska, R.** (1999). An overview of fuzzy modeling and model-based fuzzy control. *volume Fuzzy Logic Control Advances in Applications, Part I: Tutorials of World Scientific Series in Robotics and Intelligent Systems*.
- Boulvin, M., Vande Wouwer, A., Renotte, C., Remy, M., and Lepore, R.** (1998, 21-26 Jun 1998). *Some observations on modeling and control of cement grinding circuits*. Paper presented at the American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998.
- Boulvin, M., Wouwer, A. V., Lepore, R., Renotte, C., and Remy, M.** (2003). Modeling and control of cement grinding processes. *Ieee Transactions on Control Systems Technology*, 11(5), 715-725. doi: 10.1109/tcst.2003.816406
- Dagci, O. H., Efe, M. O., and Kaynak, O.** (2001). *A nonlinear learning control approach for a cement milling process*. Paper presented at the Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications CCA '01, September 5, 2001 - September 7, 2001, Mexico City, Mexico.
- de Haas, B., Werbrouck, V., Bastin, G., and Wertz, V.** (1995, 28-29 Sep 1995). *Cement mill optimization: design parameters selection of the LQG controller*. Paper presented at the Control Applications, 1995., Proceedings of the 4th IEEE Conference on.
- Delice, İ. İ.** (2015). *Taşıtın yanal ve doğrusal kontrolü için sürücünün modellenmesi*. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Eberhart, R., and Kennedy, J.** (1995, 4-6 Oct 1995). *A new optimizer using particle swarm theory*. Paper presented at the Micro Machine and Human Science, 1995. MHS '95., Proceedings of the Sixth International Symposium on.
- Fu, L.-M.** (2003). *Neural networks in computer intelligence*: Tata McGraw-Hill Education.
- Grognard, F., Jadot, F., Magni, L., Bastin, G., Sepulchre, R., and Wertz, V.** (2001). Robust stabilization of a nonlinear cement mill model. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 46(4), 618-623. doi: 10.1109/9.917663

- Hagan, M. T., and Menhaj, M. B.** (1994). Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 5(6), 989-993.
- Hotelling, H.** (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 24(6), 417-441. doi: 10.1037/h0071325
- Jadot, F., Bastin, G., Wertz, V., and Magni, L.** (1998, 1998). *Global state feedback stabilisation of cement mills*. Paper presented at the Decision and Control, 1998. Proceedings of the 37th IEEE Conference on.
- Jang, J.-S. R., Sun, C.-T., and Mizutani, E.** (1997). Neuro-fuzzy and soft computing; a computational approach to learning and machine intelligence.
- Jankovic, A., Valery, W., and Davis, E.** (2004). *Cement grinding optimisation*.
- Kennedy, J., and Eberhart, R.** (1995, Nov/Dec 1995). *Particle swarm optimization*. Paper presented at the Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on.
- Lepore, R., Wouwer, A. V., and Remy, M.** (2002). Modeling and predictive control of cement grinding circuits. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1), 43-48.
- Magni, L., Bastin, G., and Wertz, V.** (1999). Multivariable nonlinear predictive control of cement mills. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 7(4), 502-508. doi: 10.1109/87.772166
- Mamdani, E. H., and Assilian, S.** (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
- Nrgaard, M., Ravn, O., Poulsen, N., and Hansen, L.** (2000). *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems: A Practitioner's Handbook*.
- Patterson, D. W.** (1998). *Artificial neural networks: theory and applications*: Prentice Hall PTR.
- Pedrycz, W.** (1985). On generalized fuzzy relational equations and their applications. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 107(2), 520-536.
- Radhakrishnan, V. R.** (2003). SOFT SENSORS FOR THE CEMENT INDUSTRY– NEURAL NETWORK MODELS FOR KILN AND GRINDING MILL. *ME THREE NUMBER T*, 29.
- Subbaraj, P., and Anand, P. G.** (2011). Optimal design of a fuzzy logic controller for control of a cement mill process by a genetic algorithm. *Instrumentation Science and Technology*, 39(3), 288-311. doi: 10.1080/10739149.2010.545850
- Subbaraj, P., and Anand, P. S. G.** (2010, 7-9 Oct. 2010). *Modified particle swarm optimized MIMO FLC for complex industrial process*. Paper presented at the Communication Control and Computing Technologies (ICCCCT), 2010 IEEE International Conference on.
- Takagi, T., and Sugeno, M.** (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*(1), 116-132.
- Topalov, A. V., and Kaynak, O.** (2004). Neural network modeling and control of cement mills using a variable structure systems theory based on-line learning mechanism. *Journal of Process Control*, 14(5), 581-589. doi: 10.1016/j.jprocont.2003.10.005
- Topalov, A. V., and Kaynak, O.** (2004). *Neuro-adaptive modeling and control of a cement mill using a sliding mode learning mechanism*. Paper presented

at the 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE-ISIE, May 4, 2004 - May 7, 2004, 445 Hoes Lane / P.O. Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, United States.

- Tsamatsoulis, D.** (2011). *Modeling of cement milling process based on long term industrial data*. Paper presented at the 15th WSEAS International Conference on Systems, Part of the 15th WSEAS CSCC Multiconference, July 14, 2011 - July 16, 2011, Corfu Island, Greece.
- Tsamatsoulis, D., and Lungoci, C.** (2010). *Robust stabilization of cement milling process using efficient simulations*. Paper presented at the 9th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control and Signal Processing, CSECS'10, December 29, 2010 - December 31, 2010, Vouliagmeni, Athens, Greece.
- Tsamatsoulis, D., Lungoci, C., Transilvania Univ Brasov, F. E. E., and Comp, S.** (2010). Effective Optimization of Controllers Stabilizing Closed Circuit Grinding Systems of Cement *Optim 2010: Proceedings of the 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Pts I-Iv* (pp. 768-773).
- Url-1.** <<http://www.cement.org/newsroom/2015/06/03/global-cement-consumption-on-the-rise>>. Retrieved 01.06.2016,
- Url-2.** <<http://www.tcma.org.tr/images/file/WEBKAPASITE2015.xls>>. Retrieved 01.06.2016,
- Url-3.** <<http://www.mathworks.com/help/ident/ref/arx.html>>. Retrieved 01.06.2016,
- Van Breusegem, V., Chen, L., Bastin, G., Wertz, V., Werbrouck, V., and de Pierpont, C.** (1996). An industrial application of multivariable linear quadratic control to a cement mill circuit. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 32(3), 670-677. doi: 10.1109/28.502180
- van Breusegem, V., Chen, L., Werbrouck, V., Bastin, G., and Wertz, V.** (1994). Multivariable linear quadratic control of a cement mill: An industrial application. *Control Engineering Practice*, 2(4), 605-611. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0967-0661\(94\)90004-3](http://dx.doi.org/10.1016/0967-0661(94)90004-3)
- Yi, S. Y., and Chung, M. J.** (1993). Identification of fuzzy relational model and its application to control. *Fuzzy Sets and Systems*, 59(1), 25-33.
- Zadeh, L. A.** (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zadeh, L. A.** (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*(1), 28-44.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Salih Gülşen
Doğum Tarihi ve Yeri : 23.04.1984
E-posta : salgulsen@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2005, Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Bilgisayar ve Kontrol Öğretmenliği
- **Yükseklisans** : 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Müh. A.B.D., Sistem Dinamiği ve Kontrol Programı

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Gulsen, S., Ertugrul, S., *Çimento Öğütme Sistemi Simülatör Uygulaması*, in *Otomasyon Dergisi*. 2015. p. 174-179.

