

**ÇİMENTO ENDÜSTRİSİNDE HARMANLAMA PROSESİNİN
SİSTEM TANILAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Ali Suat GENCER

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27.10.1995

Tezin Savunulduğu Tarih : 22.09.1995

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Can ÖZSOY

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Temel BELEK

Doç.Dr. Aydın HIZAL

ÖNSÖZ

Bir yüksek lisans tezi olan bu çalışma, günümüz yüksek teknolojisinde önemli bir yere sahip olan SİSTEM TANILAMA konusunun ne olduğu, temel prensipleri, farklı uygulama yöntemleri ve bunların nasıl uygulandığı hakkında bilgiler vermektedir. Otomatik kontrol sistemleri, ve özellikleri bilgisayar ile kontrol edilen adaptif kontrol sistemleri, uygulandıkları proseslerde önemli ölçüde enerji tasarrufu ve bununla birlikte yüksek ürün kalitesi sağlamaktadırlar. SİSTEM TANILAMA, çeşitli uygulama yöntemleri ile, uygulandıkları proseslerin matematik modellerini tespit ederek, bu adaptif kontrol sistemlerinin oluşturulmasında ön ayak olur.

Ülkemizin ihtiyacı olan yüksek teknolojinin temellerinden birini inceleyen bu çalışmanın, ileride ihtiyaç duyup inceleyecek meslektaşlarımıza faydalı olacağını umarken, çalışmanın gerçekleştirilmesinde, başta değerli yardımlarını esirgemeyerek beni yönlendiren tez danışmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Can ÖZSOY' a, değerli arkadaşım Mak.Müh. Sn. Cüneyt YILMAZ' a, İ.T.Ü. Makina Fakültesi Otomatik Kontrol Birimi çalışanlarına, King Fahd Petroleum and Minerals Üniversitesi öğretim görevlilerinden Sn. Dr. A. Kerim KAR'a, Çanakkale Çimento A.Ş. yöneticilerinden Genel Müdür Yrd. Sn.Emir ADIGÜZEL'e ve imalat müdürü Kim.Yük.Müh. Sn. Ali Rıza KARAKAŞ' a, değerli Nuh Çimento A.Ş. yöneticilerine, ihtiyaç duyduğum manevi desteği veren değerli aileme ve her türlü teknik ve manevi yardımı sunan değerli meslektaşım Mak.Müh. Sn. Şermin KABAHASANOĞLU' na sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mak.Müh. Ali Suat GENCER
Eylül 1995, Denizli

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. Matematik Model Oluşturma.....	3
1.2. Sistem Tanılama Nedir ?.....	4
1.2.1. Deneysel Planlama.....	4
1.2.2. Model Yapıları.....	5
1.2.3. Kriter.....	6
BÖLÜM 2. PARAMETRE TAHMİN YÖNTEMLERİ.....	8
2.1. En Küçük Kareler Prensibi.....	9
2.2. Enstrümantel Değişkenler Yöntemi.....	14
2.2.1. Temel Enstrümantel Değişkenler Yöntemi.....	16
2.2.2. Genişletilmiş Enstrümantel Değişkenler Yöntemi.....	16
2.2.3. Enstrümanların Seçimi.....	18
BÖLÜM 3. ARDIŞIK TANILAMA YÖNTEMLERİ.....	20
3.1. Ardışık En Küçük Kareler Yöntemi.....	23
3.2. Ardışık Enstrümantel Değişkenler Yöntemi.....	29
3.2.1. Ardışık Temel Enstrümantel Değişkenler Yöntemi.....	29
3.2.2. Ardışık Genişletilmiş Enstrümantel Değişkenler Yöntemi.....	30
BÖLÜM 4. MODEL GEÇERLİLEŞTİRME VE MODEL YAPISININ TAYİNİ... 34	
4.1. Verilen Model Yeterince Esnek mi ?.....	35
4.1.1. Otokorelasyon Testi.....	36
4.1.1.1. Test Nasıl Uygulanır ?.....	39
4.1.2. Portmanteau Testi.....	42
4.2. Verilen Model Çok Karmaşık mı ?.....	43
4.3. İki Veya Daha Fazla Model Adayından Hangisi Seçilmeli ?.....	45
4.3.1. F-Testi.....	45
4.3.2. Karmaşıklık Terimleri İle İlgili Kriter (FPE-Kriteri).....	46
BÖLÜM 5. ÇİMENTO PROSESİNDE SİSTEM TANILAMA.....	50

5.1. Prosesin Tanıtımı.....	50
5.1.1. Üretim Safhaları.....	50
5.1.2. Hammaddelerin Oranlanması.....	53
5.2. Analiz Yöntemleri.....	56
5.2.1. X Işını Floresan Analizi.....	56
5.2.1.1. Çimento Endüstrisinde X Işını Analizleri.....	56
5.2.2. Yaş Analiz.....	58
5.2.2.1. Çimento Endüstrisinde Yaş Analiz.....	58
5.2.3. Hızlı Gama Nötron Aktivasyon Yöntemi.....	58
5.2.3.1. Çimento Endüstrisinde Hızlı Gama Nötron Aktivasyon Analizi.....	59
5.2.4. Hızlı Gama Nötron Aktivasyon Analizi ile X Işını Floresan Analizini Yönteminin Karşılaştırılması.....	60
5.3. Çimento Prosesinin Bir Sistem Olarak Tanınması.....	61
 BÖLÜM 6. BİLGİSAYAR PROGRAMLARI VE SONUÇLAR.....	63
 SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	77
 EK1.....	80
 KAYNAKLAR.....	81
 ÖZGEÇMİŞ.....	83

ÖZET

Bu çalışmada, bugünün teknolojisinde önemini enerji tasarrufu açısından rakamlarla ortaya koyan adaptif kontrol stratejilerine önyak olan sistem tanılama konusu ele alınmıştır. Sistem tanılama konusu tek başına oldukça geniş bir kavramdır. Konu kendi içerisinde değişik yöntemleri barındırmaktadır.

Sistem tanılama konusunun farklı iki yöntemi olan en küçük kareler yöntemi ve enstrümantel değişkenler yöntemi, bu çalışmanın ana amacını teşkil etmişlerdir. Çalışma içerisinde bu iki yöntemin neler oldukları, formülasyonlarının nasıl elde edildikleri, karşılaştırmaları ve değişik özellikleri incelenmiştir. Bu incelemeler ve yorumlamalar Çanakkale Çimento A.Ş. den ve Nuh Çimento A.Ş. den elde edilen verilere uygulanarak ilgili çimento proseslerinin modellenmesinde kullanılmıştır. Bunlara ait bilgisayar programları ve sonuç grafikleri yine bu çalışmada sunulmaktadır.

Bu iki yöntem tek başlarına eldeki datalardan model oluşturma yanısıra ardışık algoritmaları kullanıldığında sürekli kontrol uygulanması gereken proseslerde, öz uyarlamalı kontrol, kendinden uyarlamalı kontrol gibi muhtelif adaptif kontrol stratejilerinin uygulanmalarına da imkan verirler.

Yine bu çalışmada yukarıda adları geçen çimento endüstrisi ve bu alanda bilgisayar çalışmaları yardımı ile elde edilen kimyasal analizler ve bu analizlerin nasıl uygulandıkları hakkında da ayrıntılı bilgiler verilmektedir.

Bütün bunların yanısıra yine bu çalışma kapsamında sistem tanılamada önemli bir yere sahip olan model geçerleştirme konusu da incelenmektedir. Bu alanda yardımcı olan kriter ve testler hakkında formülasyonlar ve açıklamalar ilerideki bölümlerde yer almaktadır.

SUMMARY

SYSTEM IDENTIFICATION OF RAW MATERIAL BLENDING IN CEMENT INDUSTRY

System identification is the field of modeling dynamic systems from experimental data. A dynamic system can be conceptually described as in the following figure.

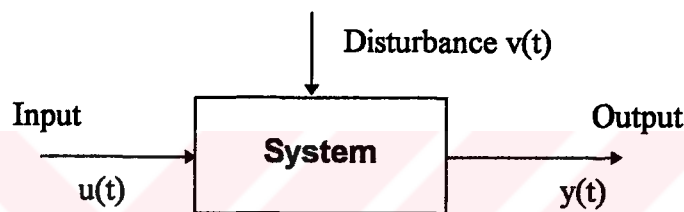


Figure vi.1. A dynamic system with input $u(t)$, output $y(t)$ and disturbance $v(t)$, where t denotes time.

The system is driven by input variables $u(t)$ and disturbance $v(t)$. The user can control only the input but not the disturbance. In some signal processing applications the inputs may be missing. The output signals are variables which provide useful information about the system.

Many industrial processes, for example for production of chemical compounds like cement, must be controlled in order to run safely and efficiently. To design regulators, some type of model of the process is needed. The models can be various types and degrees of sophistication. Sometimes it is sufficient to know the crossover frequency and phase margin in either a Bode plot or a Nyquist plot. In other cases, such as the design of an optimal controller, the designer need a much more detailed model which also describes the properties of the disturbances acting on the system. In many cases the primary aim of modeling is to aid in design.

In general, an identification experiment is performed by exciting the system. It is followed by using some sort of input signal. Then it is necessary to observe its input and output over a time interval. These signals are normally recorded in a computer as the system data. It is then tried to found the system parameters. The first step is to determine an appropriate form of the model. It is typically a linear difference equation of a certain order. As a second step some statistically based method is used to estimate the unknown parameters of the model. These are such as the coefficients of

the difference equation. In practice, the estimation of structure and parameters are often done iteratively. This means that a kind of model is chosen and its corresponding parameters are estimated. The model obtained is then tested to see whether it is an appropriate representation of the system. If this is not allright, a more complex model structure is considered and its parameters are estimated and the new model validated etc. The scheme of the procedure is shown in the following figure.

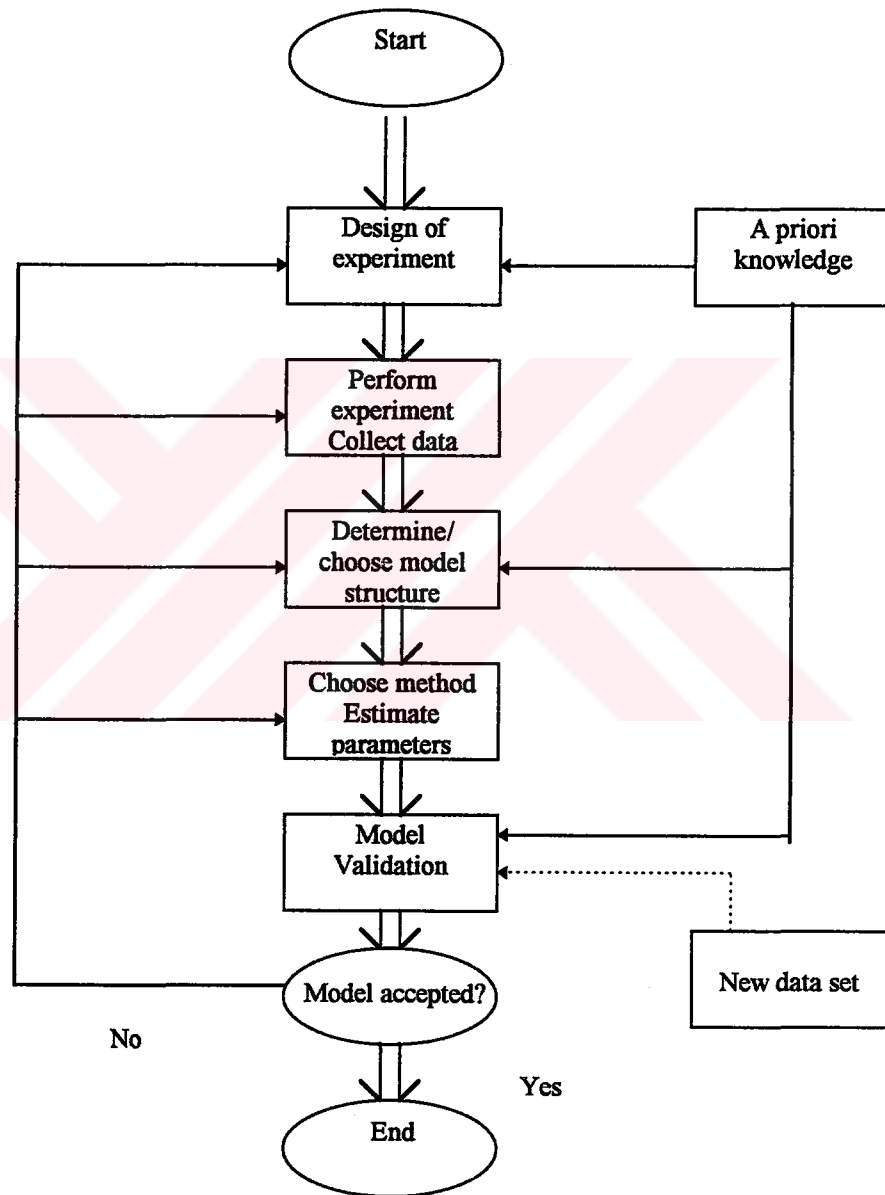


Figure vii.1. Schematic flowchart of system identification

In this thesis, it is explained that does system identification mean and how to apply system identification to an industrial process. In chapter 1, there is an

introduction to system identification. It follows in chapter 2, the Least Squares Method (LSM) and the so called Instrumental Variable Method (IVM). In this chapter the both identification methods are explained in details with obtaining their formulations. The IV method is not a well known method as the least squares algorithms. It is also a new alternative to the least squares estimation. The least squares method is a very easy applied method. But it has a substantial drawback : the parameter estimates are consistent only under restrictive conditions. The LS method could be modified in different ways to overcome this drawback. One modification is developed by REIERSOEL in 1941 and it has been popular in the statistical field for quite a long period. It has been applied to and adapted for dynamic systems both in econometrics and in control engineering. In the latter field pioneering work has been carried out by WONG and POLAK (1967), YOUNG (1965,1970), MAYNE (1967), ROWE (1970) and FINIGAN and ROWE (1974). A well written historical background to the use of IV methods in econometrics and control can be found in YOUNG (1976), who also discussed some refinements of the basic IV method.

For a more recent and detailed appraisal of IV methods is given by SOEDERSTROEM and STOICA (1983) and in their papers.

The least squares approach is first as known given by GAUSS who wanted to identify the orbital of the asteroid Ceres.

In chapter 3, the recursive identification methods are introduced and formulated in details. The given methods are the Recursive Least Squares (RLS) method and the Recursive Instrumental Variables method (RIV). The use of recursive identifications methods is necessary to identify the systems which operate on-line. The need of the recursive methods is often seen by application of the adaptive control systems. Recursive identification methods have the following general features :

- * They are a central part of adaptive systems where the action is based on the most recent model
- * Their requirement on primary memory is quite modest, since not all data are stored.
- * They can be easily modified into real-time algorithms, aimed at tracking time varying parameters.
- * They can be the first step in a fault detection algorithm, which is used to find out whether the system has changed significantly.

Most adaptive control systems are based on recursive identification methods. Then a current estimated model of the process is available at all times. This time varying model is used to determine the parameters of the regulator. In this way the regulator will be dependent on the previous behavior of the process. If an appropriate

principle is used to design the regulator then the regulator should adapt to changing characteristics of the process.

The chapter 4 contains the explanations about the model validation and formulations about some criterion for the model validation. In system identification both the model structure determination and model validation are important aspects. An overparametrized model structure can lead to unnecessarily complicated computations for finding the parameter estimates and for using the estimated model. An underparametrized model may be inaccurate. The purpose of chapter 4 is to present some basic methods that can be used to find an appropriate model structure.

When searching the for the correct model order one can raise different equations, which should be discussed as in chapter 4 :

- * Is a given model flexible enough ?
- * Is a given model too complex ?
- * Which model structure of two or more candidates should be chosen ?

All the answers of these three questions are explained in chapter 4.

In chapter 5 there is an example from an application in the cement industry. The cement production plant of Çanakkale Çimento A.Ş. in Çanakkale is taken as an application process. The process is explained with details and the data of input and output are used. In cement industry they used four main raw materials. These are the clay, chalkstone, iron and kaolin. The four raw materials are mixed in a predetermined proportion and so it is obtained a clinker of a known quality. These raw materials are taken as the system inputs. For a good quality the proportionality of these raw materials should be in a standard interval. To make an analysis for quality one take samples of the blended material in some points of the process. The samples are analyzed in two ways. One is to make a chemical analysis. Another approach is the X-ray spectral analysis. The rawmaterials are brought into a crusher to crush in small pieces. After then they are conveyed to a stockhall where a reclaimer make a prehomogenization. In the stockhall the samples of the rawmaterial is taken and analyzed. The chemical analysis is made every eight hours. For a confirmation of this the x-ray analysis is made once a day. There are bins at the end of the stockhall. When a misproportion occure the less kind of rawmaterial is given to the mixture. There is also an analysis in the silo after the mill. There are looked for four main oxides. These oxides are calciumoxide (CaO), siliciumoxide (SiO_2), aluminiumoxide (Al_2O_3) and ironoxide (Fe_2O_3). The sizes of their percentile proportion are criteria for the quality. The chemical analysis is made every hour and the x- ray analysis is made once a day. The four main oxides are thought as the system outputs.

These input and output data are used to identify the system. They build the vector of known quantities and the vector of unknown quantities (system parameters) is calculated in two different computer programs. One program is written for computing the system parameters using the least squares method estimation and other

program is written for the computation of the system parameters using the instrumental variables method estimation. These both computations are made for an ARX (autoregressive with exogenous variables) model.

The two computer programs are presented in the last chapter which contains the the explanations of experimental results with plotouts. The results are evaluated and discussed in the same chapter.



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çimento prosesi, özellikleri bakımından oldukça pahalı bir prosestir. Firmaların, günümüz ekonomik şartlarında pazar paylarını yüksek tutabilmeleri için yapmaları gereken, yüksek kaliteli nihai ürünlerini ucuza mal etmektir. Proseslerde uygulanacak otomatik kontrol sistemleri, enerji tasarrufu açısından ve yüksek kaliteli ürünün elde edilebilmesi bakımından firmaların üzerindeki yükleri ortadan kaldıracaktır. Bu alanda özellikle adaptif kontrol stratejileri kullanmak, bu konuda ispatlanmış olan önemli avantajlar sağlayacaktır.

Adaptif kontrol stratejileri, ileride daha da detaylı görüleceği gibi önceden sistemin tanılanmış olmasını, yani sisteme ait bir matematik modelin var olmasını ve bununla birlikte değişen çalışma şartlarına göre değişen matematik modelin sürekli yeniden elde edilmesini gerektirirler. Bu halde adaptif kontrol stratejilerinin uygulanabilmesi için sistemin tanılanması gerekmektedir. Sistem tanılama çalışmalarının amaç ve önemi bu noktada yatmaktadır.

Bu amaç çerçevesinde bu çalışmada da çimento endüstrisinde hammadde harmanlama prosesinde sistem tanılama konusu ele alınmış ve konu detaylı olarak bünyesindeki çeşitli yöntemler ile birlikte incelenmiştir.

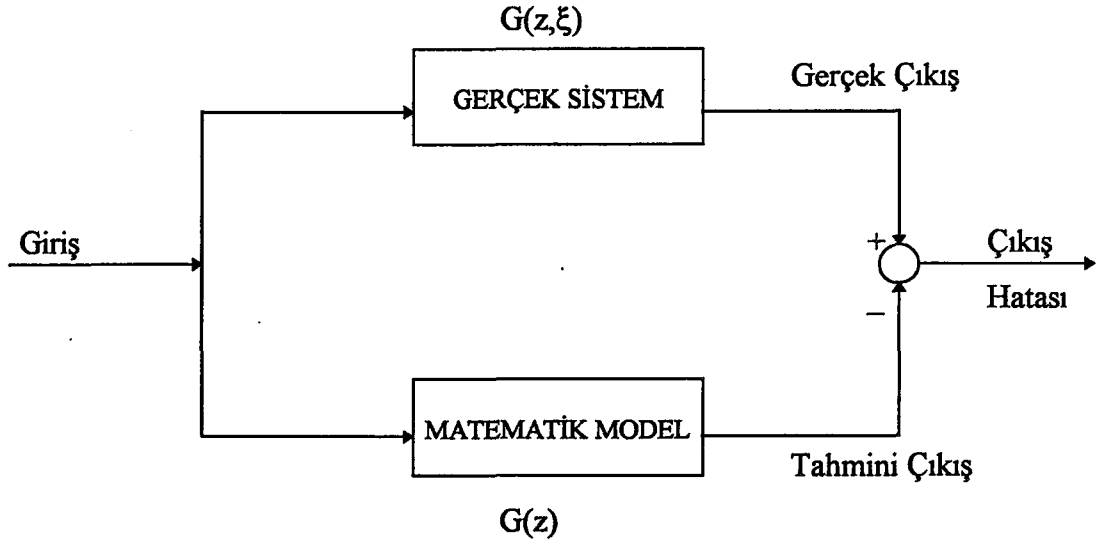
Bir matematik modelin izahı bilim ve mühendisliğin temelinde yatmaktadır. Bir modeli incelemek, bir proses hakkındaki bilginin toplanması için en kullanışlı ve düzenli yoldur. Matematik model aynı zamanda eğitim ve iletişim için oldukça etkin bir araçtır.

Proseslere ait matematik modeller bazen fiziğin temel prensiplerinden elde edilebilir. Eşdeğer derecede önemli rol oynayan bozucuların etkilerini elde edip yerine koymak ve incelemek çok zordur. Bu modeller yoğunlukla deneylerden elde edilir. Tasarım metodu için ihtiyaç duyulan modeller ya **durum uzay** (dahili model) modeli veya **giriş - çıkış** (harici model) modeli tipindedir. Bozucuların modelleri, dahili modeller için dinamik sistemlerde **beyaz gürültü** olarak verilir. Harici modellerde bozucular **yoğunluk terimleri** veya **kovaryans fonksiyonlar** olarak ifade edilirler. Deneyler bozucuların modellerinin tespiti için uygulanması gereken tek sağlıklı metottur.

Bir proses tek bir matematik model ile ifade edilemez. Bir proses kolaylıkla analitik yoldan elde edilen basit modellere indirgenmiş detaylı ve karmaşık simülasyon modellerinin bir hiyerarşisi ile temsil edilmelidir. Bu basit modeller sistem davranışlarının baskın özelliklerini elde etmek için kullanılırlar. Karmaşık modeller ise kontrol sisteminin performansını ayrıntılı olarak denetlemek için kullanılırlar. Karmaşık modellerin gelişimi uzun bir zaman almıştır. İki uç arasında bir çok farklı model yer alabilir. İyi bir mühendisliğin hedefi, her özel amaç için, doğru olan modeli seçebilmek olmalıdır.

Prensipte modelleri elde etmek için iki farklı yol vardır. Birincisi fiziksel kurallar çerçevesinde modeli araştırmaktır. İkincisi ise, deneysel verilere dayanarak modeli elde etmektir. Özgün bir modeli elde etmek için her iki yaklaşımı kombine olarak kullanmak yoğunlukla yararlı sonuçlar verir.

Birçok durumda komple bir modeli elde etmek, yalnız fiziksel bilgileri değerlendirerek mümkün olmaz. Model ile ilgili bazı parametreleri deneylerden elde etmek gerekir. Bu yaklaşıma **sistem tanılama** adı verilir. Deneylerden elde edilen verilerin analiz edilmesi için birçok yöntem vardır. Bu konudaki temel bir yaklaşım **en küçük kareler** yöntemi ile bunun bir modifikasyonu olan **enstrümantel değişkenler** yöntemidir.



Şekil 1.1. : Sistem tanılamada giriş-çıkış ilişkisi

1.1. Matematik Model Oluşturma

Bütün bir modeli elde etmek için sürekli olarak kullanılan bir yöntem yoktur. Her proses probleminin kendine özgü karakteristikleri vardır. Bilinen bazı kurallar çerçevesinde çözüm aransa bile (frekans cevabı v.b.), bunlar deneysel çalışmanın yerini alamazlar. Fiziksel kanunları kullanarak model oluşturma bilgi ve prosesi tanıma gerektirir.

Bir matematik modeli oluştururken ana problem sistemin davranış durumlarını bulmaktır. Durum değişkenleri sistemdeki kütleyi ve enerji birikimini ifade ederler. Durum olarak tipik değişkenler konum ve hız (mekanik sistemlerde); gerilim ve akım (elektriksel sistemlerde); seviye ve debi (hidrolik sistemlerde); ve sıcaklık, basınç ve yoğunluktur (ısı sistemlerinde). Durumlar arasındaki ilişkiler kuvvet-moment, kütle-enerji gibi büyüklüklerin denge denklemlerinden elde edilir.

Fiziksel yöntem ile model oluşturma avantajı farklı parametrelerin ve değişkenlerin fiziksel anlamlar taşımasıdır. Bunun dezavantajı ise zor olabilmeleri ve

fiziğin temel prensiplerden modeli oluşturma zaman alıcı olmasıdır. Matematik modeli oluşturma çalışması çoğu zaman deneyler ile birlikte ele alınmalıdır.

1.2. Sistem Tanılama Nedir ?

Sistem tanılama, bir prosesin matematik modelinin oluşturulması çalışmasına deneysel bir yaklaşımdır. Sistem tanılama çalışması bünyesinde şu aşamaları içeren bir çalışmadır :

- DENEYSEL PLANLAMA
- MODEL YAPISININ SEÇİMİ
- PARAMETRE TAHMİNİ
- GEÇERLİLEŞTİRME

Pratikte sistem tanılama prosedürü iteratiftir. Bir prosesi incelerken elde edilmesi gereken ön bilgilerin yetersiz olduğu durumlarda, sistemin dinamiğini ve bozucuları yaklaşık olarak tahmin edebilmek için geçici rejim veya frekans cevabı analizi ile çözüme başlamak tercih edilmelidir. Sonuçlar, yapılacak olan diğer deneyleri planlamak için kullanılabilir. Elde edilen veriler, sonradan modeldeki bilinmeyen parametreleri tahmin etmekte kullanılır. Çıkan sonuçlara dayanarak model yapısı geliştirilebilir ve yeni deneylerin yapılması gerekli kılınır.

1.2.1. Deneysel Planlama

Endüstriyel prosesler üzerinde doğrudan deneyler yapmak, çoğu zaman zor ve pahalıdır. Bu zorluk ve maliyet, prosesin üretimi üzerinde yapılan veya yapılması gereken değişikliklerden ve denemelerin getirilerinden kaynaklanmaktadır. Bu halde özel giriş sinyalleri gerektirmeyen tanılama metodlarını düşünmek daha uygun olacaktır. Bir çok klasik yöntem, genellikle sinus veya impuls formdaki giriş sinyalinin uygulanmasına bağlıdır. Diğer teknikler, artan hesapların genişlemesiyle giriş sinyalini zahiri olarak da ele alabilirler. Giriş sinyali, prosesin bütün modlarını ve birimlerini

yeterince öyle uyarmalıdır ki bu uyarılar karşısında bu birimlerden gerekli davranış değişiklikleri elde edilebilmelidir. İyi bir tanılama metodu, giriş sinyalinin karakteristiklerine karşı duyarsız olmalıdır.

Bazen sistem tanılamayı, prosesin kapalı çevriminden elde edilen veriler üzerine oturtmak mümkündür. Bu genelde uygulama açısından kullanışlıdır. Adaptif kontrol ekipmanları çoğunlukla kapalı çevrimli tanılamaya dayanır. Geri besleme altındaki bir procesten elde edilen verilerdeki başlıca güçlük, arzu edilen modeldeki bütün parametreleri belirleyebilmenin mümkün olmayışıdır. Bu demektir ki parametreler açık çevrimden elde edilebiliyorlarsa sistem tanılması yapılamaz. Tanılanabilirlik ancak ve ancak yeterince karmaşık bir geribesleme ile mümkündür. Bu, geribeslemeyi nonlineer ve zamanla değişken yapmaya ve ayar noktalarını değiştirmeye yardımcı olur.

1.2.2. Model Yapıları

Model yapıları, proses ve bozucular hakkındaki ön bilgilerden türetilir. Bazı durumlarda bir ön bilgi, prosesin bir lineer sistem olarak partiküler çalışma bölgesinde tanılanabilmesidir. Bu halde lineer sistemlerin genel özelliklerini kullanmak doğaldır. Böyle özelliklerin doğurduğu tanılamaya kara kutu (black box) - modeller adı verilir. Buna tipik bir örnek olarak şu fark denklemi modeli ile verilebilir :

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)e(k) \quad (1.1)$$

Burada u giriş, y çıkış, ve e ise bir beyaz gürültü bozucusudur. Modelin mertebesini tayin eden parametreler bilinmeyen parametreler olarak düşünülür.

Bazen, bir miktar bilinmeyen parametreleri içeren proseslere ait matematik modelleri türetmek için fiziksel birikimleri uygulamak mümkündür. Model şu şekilde olabilir :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u, v, \Theta) \\ y &= g(x, u, e, \Theta)\end{aligned}\tag{1.2}$$

Burada Θ bilinmeyen parametrelerin vektörü, x sistemin durumu, ve v ile e bozucuları temsil etmektedir.

1.2.3. Kriter

Bir tanılama problemini formüle ederken, bir modelin deneysel verileri ne derece sağladığını ölçebilmek için bir kriter verilir. Kriter ispatsız olarak ifade edilebilir. İstatistiksel kabuller yapılarak kriteri olasılık argümanlarından türetmek mümkündür. Ayırık zamanlı sistemlere ait kriter genellikle şu şekilde ifade edilir :

$$J(\Theta) = \sum_{k=1}^N g(\varepsilon(k))$$

Burada ε giriş hatası, çıkış hatası veya genelleştirilmiş bir hatadır. Öngörme hatası, genelleştirilmiş hatalara tipik bir örnektir. g fonksiyonu çoğunlukla karesel (kuadratik) seçilir fakat diğer formlarda da olması mümkündür.

Bir tanılama problemine ait ilk formülasyon, çözüm ve uygulaması **Gauss** tarafından Ceres asteroidinin orbitalinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Gauss tanılama problemini bir optimizasyon problemi olarak ifade etmiştir ve en küçük kareler prensibini, hataların karelerinin toplamının minimize edilmesine dayanan bir metod olarak kullanmıştır. Bu zamandan beri en küçük kareler kriteri yaygın olarak kullanılmıştır.

En küçük kareler yöntemi çok basittir ve anlaşılması çok kolaydır. Bazı durumlarda yanlış ortalamalı tahminler (bias) verirler. Bu durumun üstesinden değişik çalışmalar yapılarak gelinebilir. En küçük kareler yöntemi, bilinmeyen parametreleri lineer olan model yapılarında kullanılır.

Prosesle ait bozucular, stokastik prosesler olarak tanılanırsa, tanılama problemi, istatıksel parametre tahmini problemi olarak formüle edilebilir. Bu durumda maksimum olasılık metodu kullanılabilir. Örneğın bu metodun birçok baskın, ancak istatıksel özellikleri vardır. Bu ancak minimize edilecek seviye öngörme hatasının toplamı olarak alınırsa en küçük kareler metodundan bahsedilebilir. Maksimum olasılık metodu geniş bir yelpazede yer alan model yapılarına uygulanabilen çok genel bir tekniktir.



BÖLÜM 2

PARAMETRE TAHMİN YÖNTEMLERİ

Parametre tahmini probleminin çözümü için şu bilgilerin elde edilmesi gerekir:

- * Prosese ait giriş ve çıkış verileri
- * Modellerin bir sınıfı
- * Bir kriter

Parametre tahmini problemi, en iyi modelin, eldeki veriler ile verilen kritere göre en iyi sonuç verdiği bir optimizasyon problemi olarak formüle edilebilir.

Tahmin probleminin sonucu formüle edilen problemin özelliklerine bağlıdır. Elde edilen model, giriş sinyalinin genliğine ve frekansına bağlıdır. Deneysel şartları, model sınıflarını ve verilen kriteri kombine bir şekilde kullanmak için ve bunları hesaplamak için birçok olasılık ve farklı yollar vardır.

Bunlarla birlikte pek çok miktarda uygun ve farklı tanılama metodları bulunmaktadır. Genel bir ayrım olarak bunlar on-line metodlar ve off-line metodlar olarak nitelenebilirler. On-line metodlar, tahminleri ölçümler elde edilirken ardışık (recursive) olarak verirler. Proses sistemi zamanla değişen türden ise veya bir adaptif kontrolör ile kullanılırsa on-line metodlar tek alternatiftirler. Off-line metodlar birçok durumda daha yüksek hassasiyetli ve güvenilir tahminler verirler.

Bir model oluşturmaya yönelik problemlerle ilgilenen bir endüstriyel mühendis için var olan metodların çokluğu zorluk çıkarır. Farklı tanılama metodlarını karşılaştırmak için bazı girişimler olmuştur. Yapılan karşılaştırma sonuçları kesin

değildir ve evrensel anlamda en iyi olan yoktur. Buna göre kullanılan metodlar sistemden sisteme farklı performanslar göstermektedir.

2.1. En Küçük Kareler Prensibi

Gauss'a göre en küçük kareler prensibi, modele ait bilinmeyen parametrelerin bulunmasında şu şekilde kullanılır :

Öçlülen ve hesaplanan değerlerin farklarının karelerinin toplamının, hassasiyetin derecesini ölçen katsayılarla çarpımı minimum olmalıdır.

Analitik bir çözüm verebilmek için, hesaplanan değerlerin, bilinmeyen parametrelerin lineer fonksiyonları olmaları gerekir. Önceden verilen tanılama probleminin genel formülasyonu çalışmasında, model sınıfında model çıkışının lineer parametrelili ve kriterin karesel bir fonksiyon olması gereklidir.

Genel en küçük kareler probleminde, hesaplanan değişken $\hat{y}$ kabul edilerek, Gauss terminolojisi şu model ile verilir :

$$\hat{y} = \Theta_1 \varphi_1(x) + \Theta_2 \varphi_2(x) + \dots + \Theta_n \varphi_n(x) \quad (2.1)$$

burada $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ bilinen fonksiyonlar ve $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$ bilinmeyen parametrelerdir. Gözlemlenen çiftler $\{(x_i, y_i) ; i = 1, 2, \dots, N\}$ adet deneyden elde edilmişlerdir. Problem $\hat{y}$ değişkenleri belirlemek, x_i deneysel değerleri, ölçülen değerler y_i lere mümkün olduğu kadar yaklaştırmaktır. Bütün ölçümlerin aynı hassasiyete sahip olduğu düşünülürse, en küçük kareler kayıp fonksiyonu, yani kriterimiz

$$J(\Theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

nin minimum olmasını söyler. Burada

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - \Theta_1 \varphi_1(x_i) - \Theta_2 \varphi_2(x_i) - \dots - \Theta_n \varphi_n(x_i)$$

($i = 1, 2, \dots, N$) dir.

Hesapları basitleştirmek için şu vektör notasyonları kullanılmıştır :

$$\varphi = [\varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_n]^T$$

$$\Theta = [\Theta_1 \Theta_2 \dots \Theta_n]^T$$

$$y = [y_1 y_2 \dots y_n]^T$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_1 \varepsilon_2 \dots \varepsilon_n]^T$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi^T(x_1) \\ \vdots \\ \varphi^T(x_N) \end{bmatrix}$$

En küçük kareler problemi şu aşamada kompakt bir formda formüle edilebilir. Kayıp fonksiyonu J şu şekilde elde edilebilir :

$$J(\Theta) = \frac{1}{2} \varepsilon^T \varepsilon = \frac{1}{2} \|\varepsilon\|^2$$

$$\varepsilon = y - \hat{y} \quad \text{ve} \quad (2.2)$$

$$\hat{y} = \Phi \Theta \quad (2.3)$$

dır.

Θ parametresinin belirlenmesi, $\|\varepsilon\|^2$ nin minimum yapılması ile mümkün olur. En küçük kareler probleminin çözümü şu teorem ile verilir.

Teorem

Kayıp fonksiyonu J, ancak $\hat{\Theta}$ parametrelerinin şu durumda olmasıyla minimumdur.

$$\Phi^T \Phi \hat{\Theta} = \Phi^T y \quad (2.4)$$

$\Phi^T \Phi$ matrisi nonsingüler ise minimum tektir ve

$$\hat{\Theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y = \Phi^\perp y \text{ dir.}^* \quad (2.5)$$

*) $\Phi^\perp = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T$ matrisine, eğer $\Phi^T \Phi$ matrisi nonsingüler ise, Φ nin sanki ters matrisi (pseudo inverse) denir.

İspat

Kayıp fonksiyonu J şu şekilde yazılabilir :

$$\begin{aligned} 2J(\Theta) &= \varepsilon^T \varepsilon = [y - \Phi \Theta]^T [y - \Phi \Theta] \\ &= y^T y - y^T \Phi \Theta - \Theta^T \Phi^T y + \Theta^T \Phi^T \Phi \Theta \end{aligned}$$

$\Phi^T \Phi$ matrisi her zaman için nonnegatif tanımlı olduğundan, J fonksiyonunun bir minimumu vardır. Bu minimum aşağıdaki terim için elde edilir

$$\Theta = \hat{\Theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y$$

ve böylece teorem ispatlanmış olur.

En küçük kareler yöntemi, dinamik sistemlerin parametrelerinin tanımlanmasında şu şekilde kullanılabilir. Modelimiz şöyle olsun :

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)e(k)$$

$C(q) = q^h$ olsun. A ve B nin n ve n-1 inci mertebelerden olduğunu kabul edelim. Sisteme $\{u(1), u(2), \dots, u(N)\}$ girişleri uygulansın ve $\{y(1), y(2), \dots, y(N)\}$ çıkışları gözlemlensin. Bu halde bilinmeyen parametreler

$$\Theta = [a_1 \dots a_n, b_1 \dots b_n]^T$$

$$\varphi^T(k+1) = [-y(k) \quad \dots \quad -y(k-n+1) \quad u(k) \quad \dots \quad u(k-n+1)] \quad (2.6)$$

ve

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_1^T(n+1) \\ \vdots \\ \varphi_N^T(n+1) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

olsun. En küçük kareler tahmini, eğer $\Phi^T \Phi$ matrisi nonsingüler ise vardır.

En küçük kareler yönteminin özelliklerinin analiz etmek için bazı kabulleri yapmakta fayda vardır. Prosesten gelen data

$$y = \Phi \Theta_0 + \varepsilon \quad (2.8)$$

şeklinde olsun. Burada Θ_0 gerçek parametrelerin vektörü olsun ve ε sıfır ortalamalı ve standart sapması σ^2 olan beyaz gürültü vektörü olsun. n, $\hat{\Theta}$ ve Θ_0 parametrelerinin sayısı ve N dataların sayısı ise aşağıdaki şartlar geçerlidir :

$$1. E\hat{\Theta} = \Theta_0$$

$$2. \text{Var}\hat{\Theta} = \sigma^2 (\Phi^T \Phi)^{-1}$$

$$3. s^2 = 2J(\Theta) / (N - n)$$

σ^2 nin bias sız bir tahmini olsun. Bu teorem bize, verilen modeldeki parametrelerin, eğer $C(q) = q^n$ ise bias olmadan tahmin edilebileceğini gösterir. Eğer $C(q) \neq q^n$ ise tahminler biaslandırılır. Bu $C^*(q^{-1})e(k)$ gürültüsü ve $\phi(k)$ daki datanın arasındaki korelasyon sebebiyle olur.

En küçük kareler yöntemi bize, (1.1) deki parametreler için ancak ve ancak eğer $C(q) = q^n$ ise biaslanmamış sonuçlar verir. Bununla birlikte ‘en fazla olasılık yöntemi’ (maximum likelihood) de genel durum için kullanılabilir. Olasılık fonksiyonunu maksimize etmenin, kayıp fonksiyonunu minimize etmeye eşdeğer olduğu gösterilebilir. Burada farkların, ε ların,

$$C(q) \varepsilon(k) = A(q) y(k) - B(q) u(k) \quad (2.9)$$

daki girişler ve çıkışlarla ilişkili olduğu görülebilir. Farklar (residuals) bir adım sonrasının öngörme hatası olarak tanımlanabilirler. Bununla birlikte kayıp fonksiyonu parametrelerde lineer değildir ve nümerik olarak minimize edilmesi gerekmektedir. Bu, içerisinde J nin parametrelere ilişkin gradyanının hesabını ikinci kısmi türevin matrisi olarak içeren bir Newton-Raphson gradyan algoritması kullanılarak yapılabilir. En fazla olasılık yöntemi, bu halde bir off-line yöntemdir. (1.1) deki modele uygun olarak en fazla olasılık yönteminin on-line olarak çalıştırılabileceği yaklaşımlar yapılabilir. Bazı yaygın metodlar genişletilmiş ‘en küçük kareler yöntemi’ (ELS), ‘genelleştirilmiş en küçük kareler yöntemi’ (GLS), ve ‘ardışık en fazla olasılık yöntemi’ (RML) .

2.2. Enstrümantel Değişkenler Yöntemi

En küçük kareler yöntemi statik ve dinamik modeller için kullanılabilir. Uygulanması çok kolay olmakla birlikte gerçekleştirme aşamasında meydana çıkan bir dezavantajı vardır. Bu dezavantaj, parametre tahminlerinin ancak kısıtlayıcı şartlarda tutarlı olmalarıdır. En küçük kareler yöntemi, bazı yollarla modifiye edilerek bu dezavantajın önüne geçilebilir. İşte bu modifikasyonlardan birisi bu bölümde anlatacağımız enstrümantel değişkenler yöntemidir (instrumental variables method veya iv method). Bu yöntemin ortaya çıkartılmasındaki ana gaye normal denklemlerin modifikasyonudur .

İlk önce model yapısını ele alalım.

Model Yapısı

Enstrümantel değişkenler yöntemi sistem dinamiğini tahmin etmek için kullanılır ($u(t)$ girişi için elde edilen $y(t)$ çıkışı için transfer fonksiyonu bulunur). Model yapısını şu şekilde düşünelim:

$$y(t) = \Phi^T(t)\Theta + \varepsilon(t) \quad (2.10)$$

$y(t)$, n_y boyutlu, t anındaki çıkış, $\Phi^T(t)$ elemanları gecikmeli giriş ve çıkış bilgilerini barındıran n_y/n_Θ boyutlu matris, Θ , n_Θ boyutlu parametre vektörü, ve $\varepsilon(t)$ denklem hatasıdır.

Çok girişli - çok çıkışlı bir sistemin (MIMO) modeli şu şekilde verilsin:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + \varepsilon(t) \quad (2.11)$$

Burada $A(q^{-1})$ ve $B(q^{-1})$ sistem parametre matrisleridir ve

$$A(q^{-1}) = I + A_1 q^{-1} + \dots + A_{na} q^{-na} \quad (2.12)$$

$$B(q^{-1}) = B_1 q^{-1} + \dots + B_{nb} q^{-nb}$$

şeklinde yazılabilir.

Eğer $\{A_i, B_j\}$ matrislerinin elemanlarının hiçbiri bilinmiyorsa aşağıdaki polinom form elde edilir ve bu durumda (2.13a) ve (2.13b) denklemleri şu şekilde elde edilir :

(2.13a&b)

$$\Phi^T(t) = \begin{bmatrix} \varphi^T(t) & 0 \\ & \ddots \\ 0 & \varphi^T(t) \end{bmatrix}$$

$$\varphi^T(t) = [-y^T(t-1) \dots -y^T(t-na), u^T(t-1) \dots u^T(t-nb)]$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Theta^1 \\ \vdots \\ \Theta^{ny} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} (\Theta^1)^T \\ \vdots \\ (\Theta^{ny})^T \end{bmatrix} = [A_1 \dots A_{na}, B_1 \dots B_{nb}] \quad (2.14)$$

Bunu takip eden bütün analizlerde gerçek sistem

$$y(t) = \Phi^T(t)\Theta_0 + v(t) \quad (2.15)$$

denklemini ile verilir. Burada $v(t)$ stokastik bozucu terimi ve Θ_0 ise gerçek parametreler vektörüdür.

2.2.1. Temel Enstrümantel Değişkenler Yöntemleri

Θ_0 parametre vektörünün enstrümantel değişkenler yöntemi tahminleri farklı yollarla açıklanabilir. Bunların basit bir görünümü şu şekildedir :

$Z(t)$ (n_z/n_y) boyutunda, elemanları $v(t)$ bozucusu ile bire bir ilişkisi olmayan sinyallerden oluşsun. Bu durumda (2.1) denklemini düzenleyip yeniden yazarsak:

$$\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z(t)\varepsilon(t) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z(t)[y(t) - \Phi^T(t)\Theta] = 0 \quad (2.16)$$

bulunur.

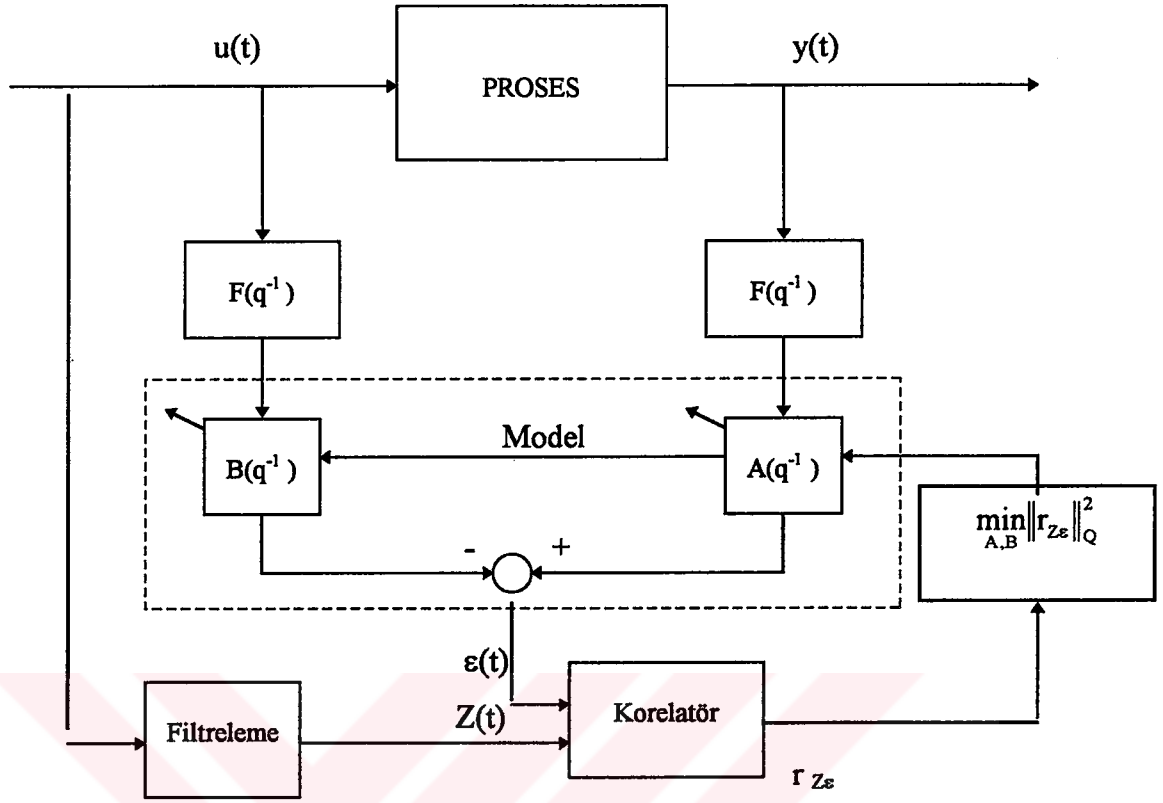
Eğer $n_z = n_\Theta$ ise, Θ nın temel IV tahminini elde etmiş oluruz.

$$\hat{\Theta} = \left[\sum_{t=1}^N Z(t)\Phi^T(t) \right]^{-1} \left[\sum_{t=1}^N Z(t)y(t) \right] \quad (2.17)$$

Denklem (2.17) deki ilk matris teriminin tersi alınabilir olduğu kabul edilmiştir. $Z(t)$ matrisinin elemanlarına enstrümanlar (instruments) denir. Bu enstrümanlar farklı yollarla seçilebilir. Bunların seçimi ileride, 2.2.3. başlığı altında incelenecektir .

2.2.2. Genişletilmiş Enstrümantel Değişkenler Yöntemleri

Θ nın genişletilmiş enstrümantel değişkenler tahminleri (2.8) denkleminin iki operasyonla geliştirilmesi sonucunda elde edilir. Bu gibi enstrümantel değişkenler tahmin yöntemleri, büyütülmüş bir $Z(t)$ matrisi ($n_z \geq n_\Theta$ gibi) için verinin ön filtre edilmesi ile oluşurlar. Genişletilmiş enstrümantel değişkenler tahminleri şu şekilde hesaplanır :



Şekil 2.1. : Genişletilmiş enstrümantel değişkenler yönteminin blok diyagramı

$$\hat{\Theta} = \arg \min_{\Theta} \left\| \sum_{t=1}^N Z(t) F(q^{-1}) \Phi^T(t) \right\|_{\Theta} - \left\| \sum_{t=1}^N Z(t) F(q^{-1}) y(t) \right\|_Q^2 \quad (2.18)$$

Burada $Z(t)$ matrisi (n_z/ny) boyutunda ($n_z \geq n_{\Theta}$), $F(q^{-1})$ (ny/ny) boyutunda asimtotik kararlı bir ön filtre ve $\|x\|_Q^2 = x^T Q x$ tir. Burada Q pozitif tanımlı bir ağırlık matrisidir. Eğer $F(q^{-1}) \equiv I$ ve $n_z = n_{\Theta}$, ($Q=I$) ise temel enstrümantel değişkenler tahmini elde edilmiş olur. (2.18) denklemi ile elde edilen tahmin, bir lineer denklem sisteminin ağırlıklı en küçük kareler yöntemi ile çözümüne özdeştir (n_z denklemlilik ve n_{Θ} bilinmeyenli). Çözüm şöyle bulunur :

$$\hat{\Theta} = (R_N^T Q R_N)^{-1} R_N^T Q r_N$$

burada

$$R_N = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z(t) F(q^{-1}) \Phi^T(t) \quad (2.19a,b,c)$$

$$r_N = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z(t) F(q^{-1}) y(t)$$

dir.

Çözümün bu şekli teorik ağırlık taşır. Uygulamak için pek uygun bir nitelik taşımaz.

Genişletilmiş enstrümantel değişkenler metodunun temel prensibinin gösterimi Şekil 2.1 de görülmektedir.

2.2.3. Enstrümanların Seçimi

Enstrümantel değişkenler matrisi $Z(t)$ nin uygun seçilişini, hem tek girişli tek çıkışlı hem de çok girişli çok çıkışlı sistemlerde gösteren örneklerde görmek faydalı olacaktır. Birinci örnek olarak önce bir tek girişli tek çıkışlı sistemi ele alalım :

$$Z(t) = [-h(t-1) \dots -h(t-na) \ u(t-1) \dots u(t-nb)]^T \quad (2.20)$$

burada $\eta(t)$ sinyali girişin aşağıdaki şekilde filtre edilmesinden elde edilmiş olsun :

$$C(q^{-1})\eta(t) = D(q^{-1})u(t) \quad (2.21)$$

C ve D polinomlarının katsayıları farklı yollarla bulunabilir. Özel bir çözüm olarak C ve D , A ve B nin önceki tahminleri şeklinde bulunabilir. Diğer bir özel durum $C(q^{-1}) = 1$ ve $D(q^{-1}) = -q^{-nb}$ olmasıdır. Böylece $Z(t)$ elemanların düzenlenmesinden sonra

$$Z(t) = [u(t-1) \dots u(t-na-nb)]^T \quad (2.22)$$

şeklini alır .

Dikkat edilmelidir ki bir düzenlemenin ya da genel olarak $Z(t)$ enstrümanlarının tekil olmayan lineer transformasyonlarının ilgili temel enstrümantel değişkenler tahminine etkisi yoktur .

Şimdi de çok girişli çok çıkışlı sistemler için bir örneği inceleyelim :

$Z(t)$ matrisi aşağıdaki gibi seçilmiş olsun

$$Z(t) = \begin{bmatrix} z(t) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & z(t) \end{bmatrix} \quad (2.23a)$$

$$z^T(t) = K(q^{-1})[u^T(t-1) \dots u^T(t-m)] \text{ dir .} \quad (2.23b)$$

Burada $K(q^{-1})$ bir skaler filtre ve m , $m \times n_u \geq n_a \times n_y + n_b \times n_u$ yu gerçekleyen bir tamsayıdır .

BÖLÜM 3

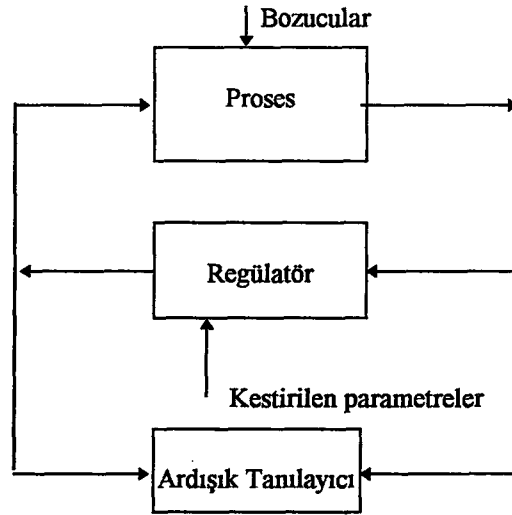
ARDIŞIK (RECURSIVE) TANILAMA YÖNTEMLERİ

Ardışık (on-line) tanılama yöntemlerinde parametre tahminleri zamana bağlı olarak ardışık olarak hesaplanır. Bu şu anlama gelir : Eğer $\hat{\Theta}(t-1)$ tahmini t-1 anına ilişkili ise $\hat{\Theta}(t)$, $\hat{\Theta}(t-1)$ tahminine bazı modifikasyonlar uygulanarak bulunabilir. Ardışık tanılama metodlarının şu genel özellikleri mevcuttur :

- Ardışık metodlar, adaptif sistemlerin kalbidir. Kontrol stratejisi kurmak için veya sinyal işlemi yapmak için kullanılırlar .
- Bütün verilerin yüklenmesi gerekmediğinden birincil hafızaya gereksinim çok fazla değildir .
- Gerçek zamanlı algoritmalara rahatça modifiye edilebilirler .

Sistem parametreleri sürekli değiştiğinde, ortaya çıkabilecek hataları bulmada birinci basamak gibi davranırlar .

Adaptif sistemlerin birçoğu, özellikle adaptif kontrol sistemleri (bkz. Şekil 3.1) ardışık tanılama yöntemlerine dayanırlar. Prosesin güncel olarak tahmin edilen modeli bütün anlarda kullanılabilir. Bu, zamanla değişen model, yine zamanla değişen regülatörün parametrelerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu halde regülatör, prosesin daha önce göstermiş olduğu davranışlara bağlı olacaktır. Böylece bilgi akışı:



Şekil 3.1. : Adaptif Kontrol Sistemleri için Genel Şema

proses → model → regülatör şeklindedir .

Regülatör tasarımında yaklaşık bir prensip kullanılmamışsa, regülatör kendisini prosesin değişen karakteristiklerine göre adapte eder .

Önceden belirtildiği gibi, az bir veri depolandığından birincil hafızaya gereksinim çok azdır. Bu veri miktarı sabittir, zamanla artım göstermez .

Zamanla değişen parametreleri olan sistemler için tasarlanan ardışık tanımlama yöntemlerinin bazı değişkenleri vardır. Böyle algoritmalar için tahmin edilen $\hat{\Theta}(t)$, t sonsuza giderken, zamanla değişim göstermeyen sistemlerde olduğu gibi bir yakınsama göstermez .

Hata tespit gösterimleri değişik yollarla devreye alınır. Uygulamanın bir şekli hata diyagnozudur. Bunlar hataları, on-line sistemler yanlış çalıştıklarında ortaya çıkartırlar. Hata tespiti çalışmaları, aynı zamanda sistemdeki ani değişimleri incelemek için tasarlanan gerçek zamanlı tanımlama yöntemlerinde kullanılırlar. Böylesi bir değişim görüldüğü takdirde, bu hata tespit algoritması tarafından takip edilir. O halde

tanılama algoritması öyle modifiye edilmelidir ki önceki verilerin güncel durumda bulunan parametre tahminlerine etkileri minimum olmalıdır .

Birçok ardışık tanılama yöntemi off-line yöntemlere bir yaklaşım olarak türetilirler.



3.1. Ardışık En Küçük Kareler Yöntemi

Birçok durumda gözlemler sıralı olarak elde edilir. Böyle hallerde N in farklı değerleri için en küçük kareler tahminini elde etmek istenebilir. Eğer en küçük kareler problemi N gözlem sayısı için çözümlenmişse yeni bir gözlem elde edildiğinde, bunun hesaplama açısından külfet getireceği düşünülebilir. Böyle bir durumda önceden elde edilen N gözlem sonucundan, olabilecek $N+1$ inci gözlemin değerini hesaplamak mümkündür.

Ardışık denklemler, ancak gözlemlerin sıralı elde edildiği durumlarda türetilir. Bu prosedüre, en küçük kareler yöntemi için ardışık en küçük kareler yöntemi ile tanımlama (recursive least squares estimation RLS) adı verilir. En küçük kareler problemi için (2.5) denklemi ardışık denklemleri bulmak için yeniden yazılabilir. $\hat{\Theta}(N)$, N ölçüm için elde edilen en küçük kareler tahmini olsun. Denklemleri türetmek için N şu fonksiyonlar için bir formal parametre olsun :

$$\Phi(N) = \begin{bmatrix} \phi^T(x_1) \\ \vdots \\ \phi^T(x_N) \end{bmatrix}, y(N) = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$\Phi^T \Phi$ matrisi bütün N ölçüm sayısı için regüler olsun. En küçük kareler tahmini $\hat{\Theta}(N)$, (2.5) denklemi ile şöyle verilmiştir

$$\hat{\Theta}(N) = [\Phi^T(N)\Phi(N)]^{-1} \Phi^T(N)y(N) \quad (3.2)$$

Bunlara bir gözlem daha eklenirse Φ matrisine bir satır daha ve y vektörüne bir eleman daha eklenir. Bu halde

$$\Phi(N+1) = \begin{bmatrix} \Phi(N) \\ \phi^T(N+1) \end{bmatrix}, y(N+1) = \begin{bmatrix} y(N) \\ y_{N+1} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

olur.

Böylece (2.5) denklemi $N+1$ inci elemanın tahmini için yeniden yazılırsa

$$\begin{aligned}\hat{\Theta}(N+1) &= [\Phi^T(N+1)\Phi(N+1)]^{-1} \Phi^T(N+1)y(N+1) \\ &= [\Phi^T(N)\Phi(N) + \varphi(N+1)\varphi^T(N+1)]^{-1} \\ &\quad \times [\Phi^T(N)y(N) + \varphi(N+1)y_{N+1}]\end{aligned}\quad (3.4)$$

Bu denklemin çözümü şu teorem ile verilir :

Teorem

$\Phi^T(N)\Phi(N)$ matrisi pozitif tanımlı olsun. En küçük kareler tahmini $\hat{\Theta}$ aşağıdaki ardışık denklemi gerçektir

$$\begin{aligned}\hat{\Theta}(N+1) &= \hat{\Theta}(N) + K(N)[y_{N+1} - \varphi^T(N+1)\hat{\Theta}(N)] \\ K(N) &= P(N+1)\varphi(N+1) \\ &= P(N)\varphi(N+1)[1 + \varphi^T(N+1)P(N)\varphi(N+1)]^{-1} \\ P(N+1) &= [I - K(N)\varphi^T(N+1)]P(N)\end{aligned}\quad (3.5\&6)$$

(3.7)

İspat

Teoremin ispatını yapmak için ilk önce şu matris ters alma lemmasını vermek gerekir :

$A, C, C^{-1}+DA^{-1}B$ tekil olmayan kare matrisler olsun

$$[A + BCD]^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B[C^{-1} + DA^{-1}B]^{-1}DA^{-1}$$

dir

ispatı

$$\begin{aligned} & [A + BCD] \left\{ A^{-1} - A^{-1}B[C^{-1} + DA^{-1}B]^{-1}DA^{-1} \right\} \\ &= I + BCDA^{-1} - B[C^{-1} + DA^{-1}B]^{-1}DA^{-1} \\ & \quad - BCDA^{-1}B[C^{-1} + DA^{-1}B]^{-1}DA^{-1} \\ &= I + BCDA^{-1} - BC[C^{-1} - DA^{-1}B][C^{-1} + DA^{-1}B]^{-1}DA^{-1} \\ &= I + BCDA^{-1} - BCDA^{-1} \\ &= I \end{aligned}$$

şeklindedir. Teoremin ispatına dönersek (3.4) denklemi buna göre şu şekilde yeniden yazılabilir :

$$\begin{aligned} \hat{\Theta}(N+1) &= [\Phi^T \Phi + \varphi \varphi^T]^{-1} [\Phi^T y + \varphi y_{N+1}] \\ &= (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y + [(\Phi^T \Phi + \varphi \varphi^T)^{-1} - (\Phi^T \Phi)^{-1}] \Phi^T y \\ & \quad + (\Phi^T \Phi + \varphi \varphi^T)^{-1} \varphi y_{N+1} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Burada şunu gözlemek gerekir

$$\hat{\Theta}(N) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y$$

ve

$$\begin{aligned} & [(\Phi^T \Phi + \varphi \varphi^T)^{-1} - (\Phi^T \Phi)^{-1}] \Phi^T y \\ &= (\Phi^T \Phi + \varphi \varphi^T)^{-1} (\Phi^T \Phi - \Phi^T \Phi - \varphi \varphi^T) (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y \\ &= -(\Phi^T \Phi + \varphi \varphi^T)^{-1} \varphi \varphi^T (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y \\ &= -(\Phi^T \Phi + \varphi \varphi^T)^{-1} \varphi \varphi^T \hat{\Theta} \end{aligned}$$

olur.(3.8) denklemini yeniden buna uygun yazarsak

$$\hat{\Theta}(N+1) = \hat{\Theta}(N) + K(N) \left[y_{N+1} - \varphi^T(N+1) \hat{\Theta}(N) \right]^{-1}$$

olur

burada

$$K(N) = \left[\Phi^T(N) \Phi(N) + \varphi(N+1) \varphi^T(N+1) \right]^{-1} \varphi(N+1)$$

$$= \left[\Phi^T(N+1) \Phi(N+1) \right]^{-1} \varphi(N+1)$$

dir.

Ağırlık faktörü $K(N)$ için ardışık denklem elde ettiğimizden P yi şöyle tanımlayalım

$$P(N) = \left[\Phi^T(N) \Phi(N) \right]^{-1} \quad (3.9)$$

P tahminlerin sapmasına orantılıdır. Önceki lemma $P(N+1)$ matrisine uygulanırsa

$$\begin{aligned} P(N+1) &= \left[\Phi^T(N+1) \Phi(N+1) \right]^{-1} = \left[\Phi^T \Phi + \varphi \varphi^T \right]^{-1} \\ &= (\Phi^T \Phi)^{-1} - (\Phi^T \Phi)^{-1} \varphi \left[I + \varphi^T (\Phi^T \Phi)^{-1} \varphi \right]^{-1} \varphi^T (\Phi^T \Phi)^{-1} \end{aligned}$$

sonra

$$\begin{aligned} P(N+1) &= P(N) - P(N) \varphi(N+1) \\ &\quad \times \left[I + \varphi^T(N+1) P(N) \varphi(N+1) \right]^{-1} \varphi^T(N+1) P(N) \end{aligned} \quad (3.10,11)$$

ve

$$\begin{aligned} K(N) &= P(N+1) \varphi(N+1) \\ &= P(N) \varphi(N+1) \left[I + \varphi^T(N+1) P(N) \varphi(N+1) \right]^{-1} \end{aligned} \quad (3.12)$$

P nin hesabı için dikkat edilmelidir ki matris tersi alma gerekmektedir. Bununla birlikte tersi alınacak matrisin boyutu yapılan ölçümlerin sayısı ile aynıdır. Örneğin tek giriş tek çıkış bir sistem için bu bir skalerdir .

(3.3) denkleminin kuvvetli bir özelliği vardır. $\hat{\Theta}(N+1)$ tahmini, önceki $\hat{\Theta}(N)$ tahmini üzerine bir düzeltme yapılarak elde edilir. Bu düzeltme

$y_{N+1} - \varphi^T(N+1)\hat{\Theta}$ ile orantılıdır. Burada son terim Gauss terminolojisiindeki modelin öngördüğü $N+1$ zamanındaki y değeri olarak ifade edilebilir. Düzeltme terimi, böylece y_{N+1} ile önceki tahminlere dayanarak öngörülen y_{N+1} değeri arasındaki fark ile orantılıdır. $K(N)$ vektörünün bileşenleri ağırlık faktörleridir ve bunlar düzeltme ve önceki tahminlerin nasıl kombine edileceğini yönlendirir. Dikkat edilmelidir ki, $K_i(N), \varphi_i^T(N+1)$ ile orantılıdır.

En küçük kareler tahmini, proses için bir Kalman filtresi olarak ifade edilebilir

$$\begin{aligned}\Theta(k+1) &= \Theta(k) \\ y(k) &= \varphi^T(k)\Theta(k) + e(k)\end{aligned}\tag{3.13}$$

Dikkat edilmelidir ki $P(N)$ matrisi ancak ve ancak $\Phi^T(N)\Phi(N)$ matrisinin nonsingüler olması halinde tanımlıdır.

$$\Phi^T(N)\Phi(N) = \sum_{k=1}^N \varphi(k)\varphi^T(k)\tag{3.14}$$

$\Phi^T(N)\Phi(N)$ matrisi, N yeterince küçük ise daima tekildir. P için bir başlangıç şartı elde edileceğine göre, öyle bir $N=N_0$ seçilmelidir ki, $\Phi^T(N_0)\Phi(N_0)$ nonsingüler olsun ve şunlar tanımlansın

$$P(N_0) = [\Phi^T(N_0)\Phi(N_0)]^{-1}\tag{3.15}$$

$$\hat{\Theta}(N_0) = P(N_0)\Phi^T(N_0)y(N_0)\tag{3.16}$$

Ardışık denklemler böylece $N \geq N_0$ kullanılarak uygulanabilir. Bununla birlikte ardışık denklemler her adımda kullanılabilir. Eğer ardışık denklemler şu başlangıç şartı ile başlıyorsa

$$P(0) = P_0\tag{3.17}$$

ve P_0 pozitif tanımlı ise

$$P(N) = [P_0^{-1} + \Phi^T(N)\Phi(N)]^{-1} \quad (3.18)$$

dir.

Bu, P_0 yeterince büyük seçilerek $[\Phi^T(N)\Phi(N)]^{-1}$ e keyfi olarak yaklaştırılabilir.

Unutma Faktörü

Şayet proses parametreleri sabit ise yukarıda bahsi geçen algoritma kabul edilebilirdi. Ancak gerçekte proses parametreleri zamanla yavaşça değişmektedir. Bu nedenle algoritma değişen parametreleri adaptif kontrolörün ayakta kalması için takip etmelidir. Bu, birden biraz farklı olan unutma faktörü β yı algoritma içerisine dahil ederek mümkündür. Bu şekilde geçmiş dataların unutulma eksponansiyeli elde edilir. Ardışık en küçük kareler yönteminde hatalara eşit ağırlık vermek yerine daha yeni datalara ağırlık verilmiş olunur. Aşağıda unutma faktörünün algoritmadaki yeri gösterilmiştir.

$$P(N+1) = \beta^{-1} \left[P(N) - \frac{P(N)\phi^T(N+1)\phi(N+1)P(N)}{1 + \phi(N+1)P(N)\phi^T(N+1)} \right]$$

Genellikle β değeri hızlı değişimler için 0.95, yavaş değişimler için 0.999 olarak alınır.

3.2. Ardışık Enstrümantel Değişkenler Yöntemi

3.2.1. Ardışık Temel Enstrümantel Değişkenler Yöntemi

Önce temel enstrümantel değişkenler yöntemini ele alıp skaler bir sistemin durumunu yazalım. Bu durumda temel enstrümantel değişkenler tahmininin denklemini (dim $y = 1$) için yeniden yazarsak :

$$\hat{\Theta} = \left[\sum_{s=1}^t z(s) \varphi^T(s) \right]^{-1} \left[\sum_{s=1}^t z(y) y(s) \right] \quad (3.19)$$

dir.

Bu ifade, cebirsel bakımdan en küçük kareler tahmini ile benzerlik taşır. Ardışık en küçük kareler yöntemindeki (RLS) işlemleri (3.19) denklemine uygularsak

$$\begin{aligned} \hat{\Theta}(t) &= \hat{\Theta}(t-1) + K(t)\varepsilon(t) \\ \varepsilon(t) &= y(t) - \varphi^T(t)\hat{\Theta}(t-1) \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$K(t) = P(t)z(t) = \frac{P(t-1)z(t)}{[1 + \varphi^T(t)P(t-1)z(t)]}$$

$$P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1)z(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{[1 + \varphi^T(t)P(t-1)z(t)]}$$

elde ederiz. Bu ardışık en küçük kareler yöntemi ile büyük benzerlik gösterir. Tek fark bilinen parametreler $\varphi(t)$ vektörü yerine enstrümanlar vektörü $z(t)$ gelmiştir, ve buna karşılık bilinen parametreler vektörünün transpoze ifadesi $\varphi^T(t)$ aynen kalmıştır. Dikkat edilirse aynı şartlar off-line form için de geçerlidir.

Bunu şimdi de genişletilmiş enstrümantel değişkenler yönteminde görelim.

3.2.2. Ardışık Genişletilmiş Enstrümantel Değişkenler Yöntemi

Genişletilmiş enstrümantel değişkenler yöntemi denkleminde bulduğumuz enstrümantel değişkenler tahminini düşünelim. $\hat{\Theta}(t)$, t data noktasına dayanan tahmindir. İşlemleri basitleştirmek için $F(q^{-1}) \equiv 1$ ve $Q = I$ alalım. Sistem skaler olsun. Bu durumda

(3.21)

$$\hat{\Theta}(t) = P(t)R^T(t)r(t)$$

burada

$$r(t) = \sum_{s=1}^t z(s)y(s)$$

$$R(t) = \sum_{s=1}^t z(s)\varphi^T(s)$$

$$P(t) = [R^T(t)R(t)]^{-1}$$

dir. $\dim z > \dim \varphi = \dim \Theta$ dir. $\hat{\Theta}(t)$ nin hesabı için ardışık algoritma şu şekildedir

$$\hat{\Theta}(t) = \hat{\Theta}(t-1) + P(t)R^T(t)[r(t) - R(t)\hat{\Theta}(t-1)]$$

sonra

$$\begin{aligned} & R^T(t)[r(t) - R(t)\hat{\Theta}(t-1)] \\ &= [R^T(t-1) + \varphi(t)z^T(t)]\{r(t-1) + z(t)y(t) - [R(t-1) + z(t)\varphi^T(t)]\hat{\Theta}(t-1)\} \\ &= R^T(t-1)[r(t-1) - R(t-1)\hat{\Theta}(t-1)] \\ & \quad + R^T(t-1)z(t)[y(t) - \varphi^T(t)\hat{\Theta}(t-1)] \\ & \quad + \varphi(t)z^T(t)[r(t-1) - R(t-1)\hat{\Theta}(t-1) + z(t)\{y(t) - \varphi^T(t)\hat{\Theta}(t-1)\}] \end{aligned}$$

(3.22)

(3.22) denklemindeki ilk terim $\hat{\Theta}(t-1)$ in tanımından sıfıra eşittir. Diğer terimleri topluca yazılırsa

(3.23)

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \varphi(t) & R^T(t-1)z(t) + \varphi(t)z^T(t)z(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z^T(t) \{ r(t-1) - R(t-1)\hat{\Theta}(t-1) \} \\ y(t) - \varphi^T(t)\hat{\Theta}(t-1) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} R^T(t-1)z(t) & \varphi(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & z^T(t)z(t) \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} z^T(t)r(t-1) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} w^T(t) \\ \varphi^T(t) \end{bmatrix} \hat{\Theta}(t-1) \right\} \\ &= \Phi(t)\Lambda^{-1}(t) \left[v(t) - \Phi^T(t)\hat{\Theta}(t-1) \right] \end{aligned}$$

burada

$$w(t) = R^T(t-1)z(t) \dots \dots \dots (n\Theta/1)$$

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} w(t) & \varphi(t) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (n\Theta/2)$$

$$\Lambda^{-1}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & z^T(t)z(t) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2/2)$$

ve

$$v(t) = \begin{bmatrix} z^T(t)r(t-1) \\ y(t) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2/1)$$

Şimdi $P(t)$ nin ardışık hesabına geçelim

$$\begin{aligned}
 P^{-1}(t) &= [R^T(t-1) + \varphi(t)z^T(t)][R(t-1) + z(t)\varphi^T(t)] \\
 &= P^{-1}(t-1) + \varphi(t)w^T(t) + w(t)\varphi^T(t) + \varphi(t)z^T(t)z(t)\varphi^T(t) \\
 &= P^{-1}(t-1) + \begin{bmatrix} w(t) & \varphi(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & z^T(t)z(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^T(t) \\ \varphi^T(t) \end{bmatrix} \\
 &= P^{-1}(t-1) + \Phi(t)\Lambda^{-1}(t)\Phi^T(t)
 \end{aligned}$$

lemmadan

$$P(t) = P(t-1) - P(t-1)\Phi(t)[\Lambda(t) + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t)]^{-1}\Phi^T(t)P(t-1)$$

ve

$$P(t)\Phi(t) = P(t-1)\Phi(t)[\Lambda(t) + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t)]^{-1}\Lambda(t)$$

bulunur.

(3.24)

Genişletilmiş enstrümantel değişkenler tahminini bulmak için yukarıdaki denklemlerin bir ardışık kümesinin oluşturulması gerekir. Genişletilmiş ardışık enstrümantel değişkenler yönteminin algoritması (RIV) aşağıdaki şekildedir :

$$\hat{\Theta}(t) = \hat{\Theta}(t-1) + K(t)[v(t) - \Phi^T(t)\hat{\Theta}(t-1)] \dots\dots\dots (n\Theta / 1)$$

$$K(t) = P(t-1)\Phi(t)[\Lambda(t) + \Phi^T(t)P(t-1)\Phi(t)]^{-1} \dots\dots\dots (n\Theta / 2)$$

$$\Phi(t) = [w(t) \quad \varphi(t)] \dots\dots\dots (n\Theta / 2)$$

$$w(t) = R^T(t-1)z(t) \dots\dots\dots (n\Theta / 1)$$

$$\Lambda(t) = \begin{bmatrix} -z^T(t)z(t) & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2 / 2)$$

$$v(t) = \begin{bmatrix} z^T(t)r(t-1) \\ y(t) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2 / 1)$$

$$R(t) = R(t-1) + z(t)\varphi^T(t) \dots\dots\dots (nz / n\Theta)$$

$$r(t) = r(t-1) + z(t)y(t) \dots\dots\dots (nz / 1)$$

$$P(t) = P(t-1) - K(t)\Phi^T(t)P(t-1) \dots\dots\dots (n\Theta / n\Theta)$$

Herhangi bir ekstra hesap gerektirmeyen, basit bir başlangıç prosedürü aşağıdaki gibidir

$$\hat{\Theta}(0) = 0 \dots\dots\dots P(0) = \rho I$$

$$r(0) = 0 \dots\dots\dots R(0) = 0$$

ρ = büyük bir sayı

Yukarıdaki genişletilmiş ardışık enstrümantel değişkenler yönteminin algoritması, temel ardışık enstrümantel değişkenler yönteminin algoritmasına göre daha karmaşık nümerik nitelik taşır. Bununla birlikte, bazı uygulamalarda, özellikle sinyal işleme alanında, $\hat{\Theta}(t)$ nin doğruluğu $\dim z = nz$ nin artışı ile birlikte artar. Böyle uygulamalarda genişletilmiş ardışık enstrümantel değişkenler yönteminin kullanımı, deneysel sonuçlardan da görüleceği gibi, ardışık en küçük kareler yöntemi (RLS) ye göre daha net, doğru ve hızlı cevaplar verdiği için enerji tasarrufu açısından çok kıymetlidir.

BÖLÜM 4

MODEL GEÇERLİLEŞTİRME VE MODEL YAPISININ TAYİNİ

Sistem tanılamada model yapısının tayini ve model geçerliliştirme önemli bir yere sahiptir. Gereğinden fazla parametrelili bir model yapısı, parametre tahminlerinin bulunmasında ve tahmin edilen modelin kullanımında gereksiz, fazladan karmaşık hesaplamalara sebebiyet verir. Gereğinden az parametrelili bir model yapısı ise sistemi eksik ve kusurlu kılabilir .

Pratikte model yapısının seçimi, çoğunlukla modelin nasıl kullanıldığına bağlıdır. Kararlılaştırma yapan bir regülatör, çoğunlukla ham, düşük mertebeli bir modele dayanabilir. Oysa ki, eğer modelin amacı prosese fiziksel bilgi vermekse, daha ayrıntılı ve karmaşık modeller vermek gerekmektedir .

Çoğunlukla pratikte tanılama, model mertebesinin artım gösteren kümeleri için uygulanır. Model mertebesinin ne zaman ayrılacağı ve ne zaman durdurulacağı bilinmelidir. Gerçek hayattaki bir data kümesi bir lineer, sonlu mertebeli model tarafından tam olarak modellenemez. Buna karşılık, böyle modeller, çoğunlukla gerçek sistem dinamiğine iyi bir yaklaşım sağlarlar. Bununla birlikte model mertebesinin doğru olarak bulunmasına yönelik yöntemler, dataların gerçek bir sistemden geldiğini söyleyen bir takım istatistiksel kabullere dayanır. Doğru bir model mertebesini araştırırken şu soruların cevaplarını bulmak gerekmektedir :

- Verilen model yeterince esnek mi ?
- Verilen model çok karmaşık mı ?
- İki veya daha fazla seçenektan hangi model yapısı seçilmeli ?

Bu soruların cevapları model indirgeme çalışması dahilinde araştırılmalıdır.

4.1. Verilen Model Yeterince Esnek mi ?

Bu başlık sorusu aynı zamanda, ‘model yapısı gerçek sistemi kapsayacak kadar geniş midir ?’ şeklinde de sorulabilirdi. Bu soruya yaklaşım kurmak için iki yol mevcuttur :

- Grafiklerin ve ortak davranışların (duyarlılığın) değerlendirilmesi
- Öngörme hatalarında ($\varepsilon(t, \hat{\Theta}_N)$) istatistiksel testlerin uygulanması

Bu iki yaklaşımla ilgili olarak, çoğunlukla ölçülen data ile model çıkışının grafiğinin incelemesi faydalıdır. Model çıkışı $y_m(t)$, ölçülen girişin tahrik ettiği, bozucuların etkilemediği model çıkışı olarak da tanımlanabilir.

$$y_m(t) = G(q^{-1}; \hat{\Theta}_N)u(t) \quad (4.1)$$

İyi bir model için, $y_m(t)$ ölçülen çıkışa yakınsamalıdır. $y_m(t)$ ile $y(t)$ arasındaki sapmaların sebebi modelleme hataları ve bozuculardır. Bu durumda şayet verilerde gürültü var ise $y_m(t)$ nin, $y(t)$ den farklı olacağını görmek önemlidir.

Öngörme hataları $\varepsilon(t, \hat{\Theta}_N)$ ile ilgili bazı istatistiksel testler bulunmaktadır. $\hat{\Theta}_N$ parametrelerinin tahmininde değerlendirilen öngörme hatalarına kalanlar (residuals) da denir.

Model yapısını belirleme yöntemleri, bozucuların açık olarak modellendiği tanılama yöntemlerinin kullanıldığı model yapılarında uygulanan bazı testlere dayanır.

Aşağıdaki şekillerdeki model kabulleri için bazı testler tasarlanabilir

- K1. $\varepsilon(t)$ sıfır ortalamalı beyaz gürültü
- K2. $\varepsilon(t)$ nin simetrik bir dağılımı var
- K3. $\varepsilon(t)$ geçmişteki girişlerden bağımsız ($E\varepsilon(t)u(s) = 0, t > s$)

K4. $\varepsilon(t)$ bütün girişlerden bağımsız ($E\varepsilon(t)u(s) = 0$, her t ve s için) (proses açık çevrimde çalışıyorsa uygulanabilir)

Tasarlanan testlere örnekler şu şekildedir

4.1.1. Otokorelasyon Testi

Bu test birinci kabule (K1) dayanır. Eğer $\varepsilon(t)$ beyaz gürültü ise, kovaryans fonksiyonu $\tau \neq 0$ da sıfırdır :

$$r_{\varepsilon}(\tau) = 0 \quad \tau \neq 0 \quad (4.2)$$

İlk olarak kovaryans fonksiyonuna ait tahmini yazalım :

$$\hat{r}_{\varepsilon}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-2} \varepsilon(t+\tau)\varepsilon(t) \dots \dots \dots (\tau \geq 0) \quad (4.3)$$

kabulle

$$\begin{aligned} \hat{r}_{\varepsilon}(\tau) &\rightarrow 0 \dots \dots \dots \tau \neq 0 \\ \hat{r}_{\varepsilon}(0) &\rightarrow \lambda^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Bir

$$\chi_{\tau} = \frac{\hat{r}_{\varepsilon}(\tau)}{\hat{r}_{\varepsilon}(0)}$$

alalım.

$$(4.5)$$

(4.4) e göre χ_τ nin $\tau \neq 0$ için çok küçük olacağı düşünülebilir ve büyük bir değer olan N in sağlayacağı $\varepsilon(t)$ beyaz gürültü olabilir. Küçük kavramının ne anlama geldiğini irdelemek için K1 e dayanan bazı analizler yapmak gerekir :

Bir

$$r = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \begin{bmatrix} \varepsilon(t-1) \\ \vdots \\ \varepsilon(t-m) \end{bmatrix} \varepsilon(t) = \begin{bmatrix} \hat{r}_\varepsilon(1) \\ \vdots \\ \hat{r}_\varepsilon(m) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

tanımlayalım. r nin asimtotik Gauss dağılımını yazalım

$\mathfrak{I}$: Gauss dağılımı olmak üzere

$$\sqrt{Nr} \xrightarrow{\text{dağılım}} \mathfrak{I}(0, P) \quad (4.7)$$

burada

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} ENrr^T$$

şeklinde kovaryans matristir. P nin i ve j inci elemanları şu şekilde değerlendirilebilir

$$\begin{aligned}
P_{i,j} &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \sum_{s=1}^N E \varepsilon(t-i) \varepsilon(t) \varepsilon(s) \varepsilon(s-j) \\
&= \lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \sum_{s=1}^{t-1} E \varepsilon(t-i) \varepsilon(t) \varepsilon(s) \varepsilon(s-j) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \sum_{s=t+1}^N E \varepsilon(t-i) \varepsilon(t) \varepsilon(s) \varepsilon(s-j) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N E \varepsilon(t-i) \varepsilon^2(t) \varepsilon(t-j) \right\} \\
&= \lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ 0 + 0 + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \lambda^2 E \varepsilon(t-i) \varepsilon(t-j) \right\} = \lambda^4 \delta_{i,j}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Sonra

$$P = \lambda^4 I$$

dir.

(4.7)den

$$Nr^T P^{-1} r = Nr^T r / r_\varepsilon^2(0) \xrightarrow{\text{dagılım}} \chi^2(m)$$

Sonuç olarak

$$\frac{N}{\hat{r}_\varepsilon^2(0)} \sum_{i=1}^m \hat{r}_\varepsilon^2(i) = Nr^T r / \hat{r}_\varepsilon^2(0) \xrightarrow{\text{dagılım}} \chi^2(m) \tag{4.9}$$

dir.

(4.7) ve (4.8) den $\tau > 0$ için aynı zamanda

$$\sqrt{N\chi_\tau} = \sqrt{N \frac{\hat{r}_\varepsilon(\tau)}{\hat{r}_\varepsilon(0)}} \xrightarrow{\text{dagılım}} \mathfrak{I}(0,1) \tag{4.10}$$

olur.

4.1.1.1. Test Nasıl Uygulanır ?

Öncelikle istatistiklerin dağılımının sıfır hipotezi H_0 altında ($\varepsilon(t)$: beyaz gürültü olarak düşünülmelidir) gerçekleştiğini belirtmek gerekir. Testin düzeyini $Nr^T r / \hat{\Gamma}_\varepsilon^2(0)$ olarak düşünelim. χ , X^2 den dağıtılmış, m serbestlik dereceli rasgele bir değişken olsun

$$\alpha = P(\chi > X_\alpha^2(m)) \quad (4.11)$$

dir. α genellikle 0.01 ile 0.1 arasında yer alır.

Bu durumda eğer

$$N \frac{r^T r}{\hat{\Gamma}_\varepsilon^2(0)} > X_\alpha^2(m) \quad H_0 \text{ ı reddeder (ve böylece model geçersizdir)}$$

$$N \frac{r^T r}{\hat{\Gamma}_\varepsilon^2(0)} \leq X_\alpha^2(m) \quad H_0 \text{ ı kabul eder (ve böylece model geçerlidir)}$$

Buna kanıt olarak H_0 şartları geçerli iken, H_0 ın reddedilmesi riskine birinci tip risk denir. Burada α risk sayısı adını alır. H_0 ın, sistem modelinin H_0 dan ne kadar farklılık gösterdiğine bağlı olmaması halinde, kabul edilmesine ikinci tip risk adı verilir. Bu göz önünde tutularak α nın seçiminde daima birinci tip risk düşünülmelidir. Bu böyle yapılırken, α azalırken birinci tip riskin azalacağı, fakat ikinci tip riskin artacağı da hesaba katılmalıdır. Uygulamalarda genellikle $\alpha = 0.05$ alınır. $X_\alpha^2(m)$ in bazı nümerik değerleri için Tablo 1 kullanılır. Bu test aynı zamanda tek bir τ değeri için χ_τ ya da uygulanabilir.

$$\sqrt{N}\chi_{\tau} \xrightarrow{\text{dağılım}} \mathfrak{I}(0,1)$$

olduğundan

$$\chi_{\tau} \sim \mathfrak{I}(0,1/N)$$

dir

ve

$$P(|\chi_v| \leq \frac{1.96}{\sqrt{N}}) = 0.95$$

(4.12)



TABLO 1 $X^2_{\alpha}(m)$ E AİT NÜMERİK DEĞERLER

α	0.05	0.025	0.01	0.005
m				
1	3.84	5.02	6.63	7.88
2	5.99	7.38	9.21	10.6
3	7.81	9.35	11.3	12.8
4	9.49	11.1	13.3	14.9
5	11.1	12.8	15.1	16.7
6	12.6	14.4	16.8	18.5
7	14.1	16.0	18.5	20.3
8	15.5	17.5	20.1	22.0
9	16.9	19.0	21.7	23.6
10	18.3	20.5	23.2	25.2
11	19.7	21.9	24.7	26.8
12	21.0	23.3	26.2	28.3
13	22.4	24.7	27.7	29.8
14	23.7	26.1	29.1	31.3
15	25.0	27.5	30.6	32.8
16	26.3	28.8	32.0	34.3
17	27.6	30.2	33.4	35.7
18	28.9	31.5	34.8	37.2
19	30.1	32.9	36.2	38.6
20	31.4	34.2	37.6	40.0

Öyleyse sıfır hipotezi ($r_s(\tau) = 0$ olmak üzere) eğer

$$|\chi_\tau| \leq \frac{1.96}{\sqrt{N}} \quad (4.13)$$

ise bilinmeyen bir risk ile kabul edilir. Veya başka bir deyişle 0.05 lik bir risk için reddedilir.

4.1.2. Portmanteau Testi

Diğer bir yaklaşım ise BOX ve JENKINS in 1970 te geliştirmiş oldukları PORTMANTEAU testidir.

Eğer sıfır hipotezi geçerli ise m. mertebeden bir Gauss dağılımı aşağıdaki şekildedir

$$N \sum_{i=1}^m \chi_i^2 \leq \mathfrak{I}(m, 2n) \quad (4.14)$$

Burada risk yaklaşık 0.05 dolayındadır.

Bu denklemin değerlendirmesini yaparken Tablo 1 i incelemek gerekmektedir. STOICA (1977) ya göre aşağıdaki yaklaşım ile 0.05 lik bir risk altında, m yeterince büyük ise uygun değerlendirme yapılır

$$N \sum_{i=1}^m \chi_i^2 \leq (m + 1.65\sqrt{2m}) \quad (4.15)$$

4.2. Verilen Model Çok Karmaşık mı ?

Verilen bir modelin çok karmaşık olup olmaması, onun aşırı parametrelenmesi ile ilgilidir. Gereğinden fazla parametrelendirilmiş bir model karmaşık nitelikler taşır. Bunu anlamak için verilen modelleri test etmek gerekir. Şimdi bunun nasıl yapıldığını enstrümantel değişkenler yöntemi için inceleyelim.

Önce bir ‘çarpım moment matrisi’ tanımlayalım. Buna göre

$$R = EZ(t)F(q^{-1})\Phi^T(t) \quad (4.16)$$

Bu matris, eğer model mertebesi gerçek sistemin mertebesinden büyükse tekildir. Aksi takdirde matris nonsingülerdir. Pratikte R matrisi uygun bir matris değildir ve bunun için tahmini ile çalışmak gerekmektedir. Tahmin şu şekilde tanımlanır :

$$\hat{R} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Z(t)F(q^{-1})\Phi^T(t) \quad (4.17)$$

Birçok durumda bu tahmin matrisinin, tanımlı istatistiksel bir yolla tekil olup olmadığını test etmek hantal bir işlemdir. Bununla birlikte basit durumlarda skaler kendinden geri dönüşlü hareketli ortalama (autoregressive moving average ARMA) modellerde sonuç alınabilir. Buna karşılık artan model mertebeleri için bu tahmin matrisinin determinantı hesaplanabilir. Eğer $\det \hat{R}$ büyük değerden küçük değere düşüyorsa, $\det \hat{R}$ nin büyük değer aldığı model mertebesi seçilmelidir. Buna bir alternatif ise $\text{cond}(\hat{R}) = \|\hat{R}\| \|\hat{R}^{-1}\|$ i kullanmak ve bunun belirgin artışını incelemektir. Eğer model tahmininde fazla bir karmaşıklık var ise $\text{cond}(\hat{R})$ nin şiddetli bir şekilde artması beklenir.

Dikkat edilmelidir ki enstrümantel değişkenler yönteminde ‘enstrümanlar’ $Z(t)$ ve filtre $F(q^{-1})$ farklı şekillerde seçilebilir. Enstrümantel değişkenler yönteminin

parametre tahmini $\hat{\Theta}$ hesabında ve en iyi model mertebesini tayin ederken aynı seçimi yapmak gerekmez. Fakat aynı enstrümanların ve ön filtrenin kullanılması bilgisayar açısından oldukça uygundur. Bir olasılık olarak $F(q^{-1}) \equiv I$ alınır ve $Z(t)$, $\Phi(t)$ nin bir tahmini olarak ve $\Phi(t)$ nin gürültüsüz kısmı alınır. Böylece R , (4.16) denkleminde $\Phi(t)$ nin kovaryans matrisi olur. Bunu değerlendirmek için $\Phi(t)$ nin bir tahmini ve tahmin edilen bir parametre vektörü $\hat{\Theta}$ gerektiğine dikkat edilmelidir.



4.3. İki Veya Daha Fazla Model Adayından Hangisi Seçilmeli ?

(Model Yapılarının Karşılaştırılması)

Bu bölümde iki veya daha fazla model yapısı adayından hangisinin seçilmesi gerektiğine karar vermek için kullanılan yöntemler incelenmiştir. Kriter olarak kayıp fonksiyonu $J(\Theta)$ nın minimize edilirken alacağı belirgin artışlar araştırılır.

4.3.1. F - Testi

M_1 ve M_2 iki ayrı model yapısı olsun. Öyle ki $M_1 \subset M_2$ yani M_1 , M_2 nin alt kümesi olsun. Burada M_1 in model mertebesinin M_2 den daha küçük olduğu anlatılmak istenmektedir. Böyle durumlara ‘hiyerarşik model yapıları’ denir. Ayrıca J^i , M_i lerin ($i=1,2$) olmak üzere minimum kayıp fonksiyonları olsun. Statik durumda

$$\chi = N \frac{J_N^1 - J_N^2}{J_N^2} \quad (4.18)$$

dir.

M_1 ve M_2 model yapısını karşılaştırmak için bir test büyüklüğü olarak tanımlansın. Eğer χ , birden büyük ise, denklemin payı büyür ve buna göre M_2 nin kayıp fonksiyonu M_1 inkinden daha küçüktür. Öyle ise M_2 tercih edilmelidir. Eğer χ çok küçükse model yapıları eşdeğerdir ve bu durumda ‘cimrilik prensibine’ (bkz. EK1) göre herhangi birisi tercih edilmelidir.

Sistem M_1 in elemanı olmasın, yani M_1 gerçek sistemi sağlamak için yeterince büyük olmasın. Buna göre kriterin payındaki azalma 0 olur ve test büyüklüğü χ , N büyüklüğünde olur.

Düşünelim ki M_1 gerçek sistemi sağlayacak kadar büyük olsun. O halde sistem M_1 ve M_2 nin elemanıdır. O zaman aşağıdaki ifade ispatlanabilir

$$\chi = N \frac{J_N^1 - J_N^2}{J_N^2} \xrightarrow{\text{dağılım}} \chi^2(p_2 - p_1) \quad (4.19)$$

burada $p = \dim \Theta$ dır.

Bu sonuç, model yapısı seçimi için basit bir test olarak kullanılabilir. Bir belirginlik düzeyi α da (0.01 ile 0.1 arasında alınabilir) daha küçük olan model yapısı M_1 , M_2 ye göre tercih edilir, eğer

$$\chi \leq X_\alpha^2(p_2 - p_1) \quad (4.20)$$

ise. Aksi takdirde M_2 seçilir.

(4.18) açısından (4.20) eşitsizliğini tekrar yazarsak

$$J_N^1 \leq J_N^2 \left[1 + \left(\frac{1}{N} \right) X_\alpha^2(p_2 - p_1) \right] \quad (4.21)$$

Her ne kadar F - dağılımı statik lineer regresyona hitap etse de, X^2 kullanılarak F - testi dinamik durumlar için de kullanılabilir.

4.3.2. Karmaşıklık Terimleri İle İlgili Kriter (FPE- Kriteri)

Tek çıkışlı bir sistem düşünelim. Değer kriteri W_N in, eğer gelecek datanın öngörülmesi geçmişteki datalarla belirlenen modele dayanıyorsa, öngörme hatası sapmasını göstermesi gerekir. Bu şu anlama gelir

$$W_N = E\varepsilon^2(t, \hat{\Theta}_N) \quad (4.22)$$

burada beklenti geçmiş ve gelecekteki datalara dayanır. (4.22) de W_N doğrudan ölçülemediğinden bazı yaklaşımlar ortaya çıkmıştır. Model yapısının esnekliği ile ilgili kısmı düşünelim :

$$W_N \approx \Lambda(1 + \frac{p}{N}) \quad (4.23)$$

(4.23) de Λ bilinmeyen bir büyüklüktür ve bilinen bir büyüklük ile yer değiştirmesi gerekmektedir. Tahminin kayıp fonksiyonu

$$J_N(\Theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \epsilon^2(t, \Theta) \quad (4.24)$$

şeklinde olsun.

Λ sapması, $J_N(\hat{\Theta}_N)$ ile yer değiştirilebilir. Bununla birlikte $J_N(\hat{\Theta}_N)$, verilen örneğin tahmini olan $\hat{\Theta}$ nın uygunluğuna göre Λ dan sapma gösterir. Daha doğrusu, $M(\hat{\Theta}_N)$ modelinin gerçekleştirmeye uygunluğuna göre, $J_N(\hat{\Theta}_N)$, Λ nın bir biaslanmış tahmini olur. Asimtotik bias $J_N(\hat{\Theta}_N) - \Lambda$ yı üretmek için

$$\begin{aligned} J_N(\hat{\Theta}_N) &= J_\infty(\Theta_0) + [J_N(\Theta_0) - J_\infty(\Theta_0)] + [J_N(\hat{\Theta}_N) - J_N(\Theta_0)] \\ &\approx \Lambda + \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \epsilon^2(t) - \Lambda \right] + \left[-J'_N(\hat{\Theta}_N)(\Theta_0 - \hat{\Theta}_N) - \frac{1}{2}(\Theta_0 - \hat{\Theta}_N)J''_N(\hat{\Theta}_N)(\Theta_0 - \hat{\Theta}_N) \right] \\ &\approx \Lambda + \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \epsilon^2(t) - \Lambda \right] - \frac{1}{2}[(\Theta_0 - \hat{\Theta}_N)^T J''_\infty(\Theta_0)(\Theta_0 - \hat{\Theta}_N)] \end{aligned} \quad (4.25)$$

Burada ilk terim bir sabittir. İkinci terimin beklenen değeri sıfırdı ve üçüncü terimin beklenen değeri bunlardan kolayca bulunabilir. Gauss dağılımını yazarsak

$$\sqrt{N(\hat{\Theta}_N - \Theta_0)} \xrightarrow{\text{dağılım}} \mathfrak{Z}(0, 2\Lambda[J''_{\infty}(\Theta_0)]^{-1})$$

sonra

$$-E \frac{1}{2} (\Theta_0 - \hat{\Theta}_N)^T J''_{\infty}(\Theta_0) (\Theta_0 - \hat{\Theta}_N)$$

$$= -\frac{1}{2} E \text{tr} \{ (\Theta_0 - \hat{\Theta}_N) (\Theta_0 - \hat{\Theta}_N)^T J''_{\infty}(\Theta_0) \}$$

$$= -\frac{1}{2} \text{tr} \{ 2\Lambda[J''_{\infty}(\Theta_0)]^{-1} J''_{\infty}(\Theta_0) / N \}$$

$$= -\Lambda p / N$$

(4.26)

Yukarıdaki hesaplamalara göre Λ nın asimtotik biassız tahmini aşağıdaki şekilde bulunur :

$$\hat{\Lambda} = \frac{J_N(\hat{\Theta}_N)}{(1 - \frac{p}{N})} \quad (4.27)$$

(4.23) ve (4.24) denklemlerini kombine halde yazarsak

$$W_N = J_N(\hat{\Theta}_N) \frac{1 + p/N}{1 - p/N} \equiv \text{FPE} \quad (4.28)$$

Bu, 'son öngörme hatası' (final prediction error, FPE) kriteridir ve DAVIDSON (1965) ve AKAIKE (1969) da geliştirilmiştir. (4.28) , N in büyük değerleri için şu şekilde yazılabilir

$$W_N = J_N(\hat{\Theta}_N) \left[1 + \frac{2p/N}{1 - p/N} \right] \approx J_N(\hat{\Theta}_N) \left[1 + \frac{2p}{N} \right]$$

burada

$$\beta(N, p) = 2p/N$$

dir. Ve

$$W_N = N \log J_N(\hat{\Theta}_N) + 2p$$

(4.29)

olarak Akaike bilgi kriteri de bulunur (Akaike's Information Criterion AIC).

BÖLÜM 5

ÇİMENTO PROSESİNDE SİSTEM TANILAMA

5.1. Prosesin Tanıtımı

5.1.1 Üretim Safhaları

Ticari ve endüstriyel inşaat, genellikle gelişmiş ülkelerde çimento tüketiminin % 20 ile % 30 una karşılık gelmektedir. Yapılan istatistiklere göre, üretilen çimentonun % 15 i yerleşim alanı inşaatlarında, % 18 i otoyol inşaatlarında kullanılmaktadır. Çimentonun diğer kullanıldığı yerler arasında kamuya yönelik çalışmalar ve beton ürünlerin (blok kalıplar ve borular) imalatı gelmektedir.

Çimento imalatında kullanılan hammaddeler, kimyasal bileşimlerine göre seçilmekte ve karışım oranları buna göre hazırlanmaktadır. Karışımın ana bileşeni kalsiyum oksittir(CaO). Bu madde kalkerden (kireç taşı) elde edilmekle birlikte; kireç, kireçli kil, dolomit ve istiridye kabuklarından da faydalanılmaktadır. Hammadde olarak, silisyum oksit (SiO_2) ve alüminyum oksite (Al_2O_3) ihtiyaç vardır. Bu iki madde kilden veya şistten elde edilir. Alüminyum oksit, kaolen ve boksitten de elde edilebilmektedir. Uygun bir karışım oranını elde etmek için kuars (türlü silislerin genel adı), boksit veya diğer mineraller sırasıyla SiO_2 ve Al_2O_3 oranlarını tercihe bağlı olarak arttırmak için kullanılır. Genellikle, demir cevherinden elde edilen demir oksit (Fe_2O_3) dördüncü ana bileşendir. Bu maddeler, özenle kontrol edilerek, belli bir kompozisyona sahip uygun bir hammadde elde etmek için hazırlanırlar.

Üretim prosesindeki ilk adım hammaddelerin satın alınması, nakledilmesi veya çıkarılmasıdır. Büyük boyutlu hammaddeler, önce kırılarak öğütme için uygun olacak bir boyuta getirilir ve daha sonra yaklaşık % 92 si 200 lük bir ağ kafesinden geçebilecek şekilde, ıslak veya kuru yöntemle öğütülür. Öğütme işlemi, bir sonraki adımda bu malzemelerin tabi tutulduğu reaksiyonu hızlandırmak için gereklidir .

Çanakkale Çimento fabrikasında, hammaddeyi oluşturan kil ve kalker fabrika sahasından, çıkarılmakta, demir cevheri ise fabrika dışından temin edilmektedir. Hammadde bileşimini tespit etmek için, ilk malzeme analizi x ışını analiz cihazlarıyla hammadde ocaklarında yapılmaktadır.

Fabrikadaki hammadde ocaklarından alınan kil ve kalker yığınlar halinde kırıcı bölgesinde toplanır. Kil yığına bir miktar demir cevheri ilave edilir. Kil, kalker ve demir cevherinde yapılması gereken değişiklikler tecrübeye dayanarak manuel gerçekleştirilir. Yığınlar halinde toplanan hammaddelere x ışını analizi yapılarak, kırıcıya verilir. Hammadde kırıcıda belirli boyutlara getirildikten sonra konveyörlerle stok sahasına getirilir. Kırıcı çıkışında hammadde bileşiminin yeniden kontrol edilmesi amacıyla, sekiz saatte bir yaş analiz ve günde bir x ışını analizi yapılır. Stok sahasında toplanan hammadde karışımı ön homojenizasyondan sonra konveyörlerle değirmenlere gelir. Çanakkale Çimento fabrikasında 200 ton/saat lik D31 ve D131 isimli iki değirmen mevcuttur. Değirmen çıkışlarında saatlik yaş analiz ve günlük x ışını analizi yapılır. Analizlerin, proses akışını hiçbir şekilde kesmemesi ve mümkün olan en kısa sürede yapılması gerekmektedir. Çünkü proses sürekli bir prosestir.

Değirmen çıkışından alınan hammadde karışımı konveyörle E1 ve E101 isimli 2400 ton/saat lik homojene silolarına gönderilir. Homojene silolarında, hammadde karışımı alttan kompresörler vasıtasıyla sürekli karıştırılarak homojenleştirilir ve F1 ve F301 ön ısıtıcılarına gönderilir. Burada yapılan analiz sonuçları tatminkar ise döner fırına verilir. Proses boyunca yapılan her analiz sonucu tatminkar olmadığı sürece bileşim oranlarını değiştirmek gerekecektir. Bu ise, stok sahası ile değirmenler arasındaki

konveyör hattı üzerine yerleştirilen kil, kaolen ve demir cevheri bunkerleri ile konveyör üzerine hangisinden ne kadar dökmek gerektiğine tecrübeye dayalı karar verilip malzeme boşaltılarak yapılır.

Modern döner fırınlar 91.5 -183 m (300-600 feet) uzunlukta, 3.60-5.5 m (12-18 feet) çapında, % 2 ile % 4 arasında değişen bir eğimle besleme ucundan aşağı doğru eğimlidir ve dakikada yaklaşık bir defa döner. Fırının alt ucunda; kömür tozu, fuel oil veya doğal gaz devreye sokulur. Çanakkale Çimento fabrikasında yakıt olarak kömür tozu kullanılmaktadır. Yakıt önceden ısıtılmış hava ile yakılır. Bunun sonucunda oluşan sıcak yanma gazları fırın boyunca yükselerek yeni giren hammaddeyi ısıtır .

Beslenen malzeme, konveksiyon ile yanma gazları tarafından ısıtıldığında bünyesindeki su buharlaşır ve ortamdan uzaklaşır. Malzeme daha da ısınarak fırının aşağısına doğru hareket eder ve kalsiyum karbonatın ayrışmasına sebep olur. Açığa çıkan karbondioksit gaz akımına karışır ve yukarı doğru yükselerek fırını terk eder. Daha yüksek sıcaklık bölgesine gelindiğinde CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 ; Dikalsiyum silikat (2CaO-SiO_2 ; C_2S), trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$; C_3A) ve trikalsiyum alüminaferrit ($4\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$; C_4AF) oluşturmak üzere birleşirler. Bu reaksiyonlar, 1423 °C ile 1538 °C (2600 °F ile 2800 °F) sıcaklıklarında olmaktadır. Fırında ayrılan madde, normal olarak 2.5 cm çapında (1 parmak) veya daha az olan klinker şeklindedir. Klinker, kapalı bir koridora üflenen hava ile bu koridor boyunca hareket eden bir ızgara üzerinde soğutulur. Kızgın klinkerin ısını alan bu havanın bir kısmı yanma havası olarak döner fırına geri beslenir .

Fırının üst kısmından atılan gazlar, yakıtın yanması sonucu oluşan, kalsiyum karbonattan açığa çıkan karbondioksit ve su buharından ibarettir. Bu gazlar, toz toplama aparatından geçer ve atmosfere atılır. Bu gazlar, bir ısı değiştiricisiyle, içeri giren maddenin, ön ısıtılmasında kullanılır. Fırının egsoz gazlarından toplanan tozlar genellikle ya hammadde ya da yakıt ile fırına geri gönderilir ve bu şekilde geri kazanılmış olurlar.

Üretilen çimentonun kalitesi hem kullanılan hammaddelerin, hem de proses işlemlerinin bir fonksiyonu olur. Klinkerdeki ana bileşenleri oluşturan C_2S , C_3S , C_3A ve C_4AF nin oranları; ürün kalitesi, tutma zamanı, mukavemeti, genleşmesi gibi özellikleri üzerinde büyük rol oynar. Bunlara, fırındaki üründe kalan serbest kireç veya birleşmemiş kalsiyum oksit miktarı, son ufalama operasyonunda oluşan boyut dağılımı ve yüzey alanını etkilediği için çimento kalitesini etkiler.

Hammaddedeki kalsiyum oksit, silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksitin uygun oranlarda temin edilmesi, çeşitli reaksiyon derecelerinin kontrolü ile döner fırında gerçekleştirilen uygun yanma, klinker öğütülmesinde sağlanan uygun fiziksel karakterler iyi kalite bir çimentonun oluşturulması için gereklidir. Bütün bunlar için çimento endüstrisinin kalbini oluşturan oranlama, pişirme ve öğütme gibi üç ana işlemin uygun şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu sahalarda karşılaşılan kontrol problemleri on-line bilgisayar kontrolünü çekici kılmaktadır. Bu gereksinim karşısında da sistem tanımlamaya yeni ufuklar ve kullanım alanları açılmaktadır.

5.1.2 Hammaddelerin Oranlanması

İyi bir klinker kalitesi için hammadde karışım oranları aşağıdaki gibi olmalıdır:

CaO.....	%64.5
SiO ₂	%23.5
Fe ₂ O ₃	%3.5
MgO.....	%2.5
K ₂ O ve Na ₂ O.....	%0.5

Arzulanan hammadde karışımındaki en ufak değişimler bile fırında şekillenen C_2O , C_3S , C_4A ve C_4AF oranlarını değiştirebilir. Her ne kadar oranlardaki bazı sapmalar, klinkeri veya hazırlanmış çimentoyu tekrar hammadde ile karıştırıp, öğütterek

iyileştirilebilse de karışımdaki değişimler fırınlama işleminde proses maliyetini attırmakla kalmayıp, nihai çimento kalitesindeki sapmaları arttıran olumsuzluklara da sebep olabilir.

Hammadde karışım oranlarının ayarlanmasının karmaşık bir problem olmasının sebebi, mevcut ve gerekli hammadde sayısının çokluğundan ve bunların kompozisyonlarının değişiminden kaynaklanmaktadır. Çoğu çimento fabrikası 3 ile 5 ana hammadde kullanırken, bazıları 8 ile 10 arasında farklı malzeme kullanmayı tercih etmektedir. Çanakkale çimento fabrikasında 4 ana madde kullanılmaktadır. Bunlar; kil, kalker, demir cevheri ve kaolendir.

Karışımın kimyasal özelliklerine sahip tek bir hammadde kullanımı söz konusu ise, karışım oranlarının hesaplanmasında ekonomiyi düşünmek gereksizdir. Ekonomi, hammaddelerin seçimi ve taş ocağından çıkarılmasında yönetim düzeyinde göz önünde tutulmalıdır. Bununla beraber, bazı işletmelerde değişik kombinasyonlar ile kullanılabilecek birçok farklı hammadde mevcut olduğundan, istenen karışım oranlarını minimum maliyette belirleyecek hammaddelerin optimal seçimi önem kazanmaktadır.

İlk olarak Riverside Çimento Şirketi ' nin Oro Grande Californiya fabrikasında uygulanan bilgisayar, taş ocağından çıkarılan hammaddelerin, en az maliyetli kombinasyonunu hesaplamak için kullanılmıştır. Kullanılan hammaddelerin herbirinin bağıl değerleri , satın alma fiyatlarına veya taş ocağı ömrünü etkileyen diğer faktörlere ,taş çıkarma techizatının mevcut konumuna vs. dayanarak saptanmıştır. Verilen hedef miktarlar veya karışımı meydana getiren oksitlerin herbirinin maksimum ve minimum değerleri malzemedeki her maddenin bileşimi için Riverside bilgisayarı maddelerin optimal kombinasyonunu lineer programlama tekniğine göre hesaplamış ve günlük olarak ocaktan taş çıkarma işlemlerini yönetmiştir. Diğer bir benzer teknik, Fransa' da Lion yakınlarındaki Ciments La Farge Azergues köyündeki fabrikada kullanılmıştır. Burada bilgisayar, hedeften sapmaların karelerinin toplamını minimum yapmak için bir non lineer optimizasyon algoritması kullanmaktadır.

Japonya Kumogaya' daki Chichibu Çimento fabrikasında kireçtaşı, kil, silisyum oksit ve cüruf , malzemeyi öğütücülere götüren bir bant üzerinde oranlanmaktadır. Öğütülen ürün periyodik olarak analiz edilmekte ve 4x4 lük matris tersi algoritmasını kullanabilen bir bilgisayar, istenen karışım bileşimini elde etmek üzere besleyici miktarlarını ayarlar .

Bilgisayar kontrollu harman oranlama sistemlerinin başlıca amacı, harmanın doğru bileşimini elde etmektir. Harmanın hazırlanması sırasında oluşan, bileşimdeki değişimler, kuru metodla çalışan Çanakkale Çimento fabrikasında, fırına gönderilmeden önce, iyice öğütülmüş malzemenin toplandığı silolar havalı kompresörler ile homojenizasyon yoluyla giderilmeye çalışılır.

Chichibu' daki gibi ıslak metodu çimento fabrikalarında, çimento şerbetini fırına beslemeden önce yine hava tahriğiyle karıştırmak için sulu çimento havuzları kullanılmaktadır. Eğer hammadde bileşimlerindeki değişimler kabul edilebilir ölçüde ve kontrol sisteminin performansı yeterli ise yığın çalışmadan ziyade sürekli çalışacak harman kontrol sistemleri kullanılabilir ve homojenizasyon gereksinmesi ortadan kalkarak, ana donanımda, işletme maliyetlerinde ve stok mevcudunda tasarruf elde edilebilir. Örneğin;Japonya' nın Nanyo şehride Tokuyama Soda fabrikasında, bu şekilde digital kontrol yardımıyla sürekli oranlama ve harmanlama işlemleri gerçekleştirilmekte ve kireçtaşı, kil, ganister ve cüruf besleyicileri, direkt matris tersi algoritmasına dayalı çalışan bilgisayar tarafından ayarlanmaktadır. Yukarıda sözü edilen bilgisayar sistemlerinin çoğu periyodik olarak laboratuvar analizlerini gerektirmektedir. Harmanlanmış ürünün x ışını analiz sonuçlarının on-line bilgisayara geri beslenmesiyle çalışan kapalı çevrimli bir sistem California' nın Colton fabrikasında bulunmaktadır.

Oranlama ve harmanlama kontrol sistemlerinden beklenen, fırın beslemesinin istenen özelliklerde sürekli üretimidir. Malzeme karıştırma alanını terkettikten sonra istenen bileşimden olan sapmaları düzeltmek genellikle zordur. Bir çimento fabrikasında

bilgisayar kontroluna olan talebi, bu fabrikanın mevcut malzemenin düzgün olarak oranlanması maruz kaldığı güçlüklerin derecesi belirler .

5.2 Analiz Yöntemleri

5.2.1 X Işını Fluoresan Analizi

X ışını fluoressan analizi son 15 yıldır çok iyi bilinen bir sistemdir. X ışını sürekli analiz yöntemi 50' li yıllarda General Elektrik tarafından geliştirmiş ve cevher işleme ile çimento endüstrisinde uygulanabileceği düşünülmüştür. 1963 yılında ise ilk defa İsviçre' de bir çimento tesisi için kullanılmıştır. Halen Almanya, İsviçre, Avusturya, Çek Cumhuriyeti, Macaristan, Bağımsız Devletler Topluluğu, Cezayir, İran, Tayvan, Küba, Venezüella ve Arjantin' de x ışını analiz yöntemi çimento endüstrisinde harmanlama otomatik kontrolunda nihai ürün kalitesini belirleyen oksit oranlarındaki sapmaları belirlemek amacıyla kullanılmaktadır.

Çimento prosesindeki x ışını analiz yönteminde, kırıcı ve homojene siloları arasındaki hammadde akımından saatte 20 kg malzeme çekilmesi uygundur. Bu malzeme porsiyonu işlenir ve sürekli xışını analizi yöntemine tabi tutulur. Araştırılan dört önemli oksit proses bilgisayarı tarafından düzenli aralıklarla alınır ve yüzde olarak hesaplanır. Hammadde karışım yığınının ortalama değeri saptanır. Yığın analizi esnasında bulunan sapmalar, yeni karışım oranlarını hesaplamada ve bunlara göre ağırlık federlerinden değirmene giden konveyör üzerine dökülecek hammadde miktarını hesaplamada kullanılır.

5.2.1.1 Çimento Endüstrisinde X Işını Analizleri

Çimento endüstrisindeki prosesler transport,kırma,karıştırma,kurutma ve kimyasal işlemler gibi üniteleri içerirler. Çimentonun miktar ve kalitesini bu birimlerin verimliliği

belirler. Çimento kalite kontrolünü ise bu ünitelerdeki malzemelerin kimyasal analizi belirler. Prosesin sürekliliği nedeniyle kimyasal analizin çabuk yapılması şarttır. X ışını spektrometreleri bu işlemi çabuklaştırmıştır .

Analiz için gerekli olan örnek alma işlemi iki türdür. Yığın ve sürekli analiz. Analiz için gerekli örnekler değirmen girişinden ve çıkışından alınmalıdır. . Yığın analizde değirmene giden malzeme hattı üzerinden ton başına 0.025 kg ile 0.100 kg malzemenin direkt alınması uygundur. Sürekli analiz yönteminde ise malzeme örnek alma istasyonlarından ton başına bu değerin 20 ile 40 katı kadar daha fazla alınır. Elde edilen numune homojene edilir ve 0.025 kg/ton ile 0.100 kg/ton arasında dökülür ve en yaygın olarak kullanılan x ışını spektrometresi dökülen malzemeyi okur. Bu yöntemle genellikle 6 ile 8 kadar elementin analizi yapılır (CaO, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃ vs). X ışını spektrometrelerinin analiz süresi 0.5 ile 5 dakika arasında değişir. Yığın analizi belli zaman aralıklarıyla yapılırken, sürekli analiz sürekli olarak yapılmaktadır. Bu nedenle her iki yöntemin de çimento prosesinde kullanım yerleri farklıdır .

Bir çimento değirmenine giren karışımın değişimi 10 ile 30 dakika sonra çıkış üzerinde etkisini gösterir. Siloya giren malzeme bileşimindeki değişimin etkileri ise 8 ile 10 saat sonra belli olur. Bu nedenle değirmenin sürekli analiz yöntemiyle, silonun ise yığın analiz yöntemiyle analiz edilmesi daha uygundur .

Her iki x ışını analiz yönteminden başka tablet x ışını analizi de kullanılmaktadır. Ancak bu cihazların çok karmaşık bir yapısı vardır ve numuneden numuneye bir bulaşma söz konusu olabileceğinden cihazın güvenliğini azaltmaktadır .

Çanakkale Çimento fabrikasında x ışını analizi yığın metotla değirmende ve silolarda günde bir kez olmak üzere yapılmaktadır .

5.2.2. Yaş Analiz

Yaş analiz, malzemenin kimyasal olarak analiz edildiği bir analiz yöntemidir .

5.2.2.1. Çimento Endüstrisinde Yaş Analiz

Yaş analiz yöntemi değirmen girişinde ve çıkışında, hammadde karışımının içerdiği oksitler hakkında bir ön bilgi edinmek için yapılmaktadır. Bu ön bilgi hammadde karışımındaki CaCO_3 ve MgCO_3 titrasyonu yapılarak elde edilir .

Çanakkale Çimento fabrikasında, yaş analiz 24 saat boyunca her saat yapılmaktadır. Ancak her 8 saatte bir analiz yapılacak yığın değiştirilmektedir .

5.2.3. Hızlı Gama Nötron Aktivasyon Yöntemi

Sürekli hızlı gama nötron aktivasyon sistemi örnek almaksızın 1000 ton/h akış hızına kadar olan toz katıları izler. Bazı üniteler hareketli konveyör bantları üzerindeki kırılmış katıların analizi için özel olarak geliştirilmiştir. Örneğin çimento endüstrisinde, 80-100 cm (3-4 parmak) büyüklüğündeki kırılmış parçaları dahi, karıştırma prosesinin kontrolünü sağlayacak sıhate çabuk analiz eder .

Hızlı gama nötron aktivasyon sistemi (PGNAA) analizörü, katı veya sıvı formdaki malzemeleri nötron bombardımanına tutar. Bazı atomlar nötronları absorbe eder ve enerji yayma yoluyla saptanan ve analiz edilen gama radyasyonu yayımlarlar.

5.2.3.1. Çimento Endüstrisinde Hızlı Gama Nötron Aktivasyon Yöntemi Analizi

Birçok çimento endüstrisinde, hammadde karışım bileşenlerinin kontrolü analiz sistemlerinin yetersizliği nedeniyle zayıftır. Örnekleme ve analizlerdeki gecikme ve hatalar, operatörlerin verimli bir kontrol sağlamalarını engeller .

Hammadde karışım kontrolü çimento üretim prosesinin en vazgeçilmez parçasıdır. Pekçok çimento endüstrisi için, çimento kalitesini belirleyen oksit değerlerinden olan sapmaları istenen sınırlar içerisinde tutmak oldukça zordur ve bu sapmaları bir ölçüde kompanze etmek için yüksek enerjili ön homojenizasyon tesislerine ihtiyaç vardır. Çünkü sık, hızlı ve sıhatli kimyasal analiz sonucu elde edememektedirler .

Bugün birçok çimento tesisinde fırın beslemesi, x ışını yığın analiz yöntemine göre yapılmaktadır. Ancak örnek alma ve hammadde girişinde düzeltme yapma arasındaki zaman gecikmesi saatler mertebesinde. X ışını fluoressan analizi, yüksek mertebede örnekleme gerektirir ve sık hammadde analizi için verimsizdir. Bu problemlerle başa çıkacak analiz yöntemi hızlı gama nötron aktivasyon yöntemidir .

Hammadde karışımının oranlanması kontrolunda sürekli hızlı gama nötron aktivasyon analizinin mümkün olabilecek uygulamaları konusunda ' Construction Technology ' laboratuvarlarında 1986 da pekçok araştırma yapılmıştır. Bu laboratuvarlarda, bilgisayar simülasyonları yaparak, hızlı gama nötron aktivasyon analizi ile kısa örnekleme zamanını optimum kullanan hammadde karışım tesisleri için kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Bu kontrol stratejileri ile ön homojenizasyon tesislerine olan ihtiyaç elimine edilir .

Sürekli hızlı gama nötron aktivasyon analizi geri veya ileri besleme veya öngörmeli kontrol algoritmalarıyla hammadde oranlanmasında verimle uygulanabilir. Bu ilerleme sermaye ve işletim giderlerinde büyük tasarruflar sağlar .

Çimento kalitesini belirleyen kalsiyum, silisyum, demir ve alüminyum elementleri için hızlı gama nötron aktivasyon analizi duyarlılığı, bu elementlerin hızla saptanması için yeterli ölçüdedir. Bu ise kontrolün birkaç dakika gibi kısa bir zaman içerisinde gerçekleşmesini sağlar. Uygun kalibrasyon, düzeltme prosedürleri ve kontrol algoritmaları kullanarak, bir kompüter nümunenin gama spektrumunu analiz etmede, depolamada, elementsel bileşiklerini ve oksit modüllerini hesap etmede ve ayar değerlerinden olan sapmaları minimize etmede kullanılabilir. Ülkemizde de hızlı gama nötron aktivasyon yöntemi Nuh Çimento A.Ş. de kullanılmaktadır. Bu firmadan elde edilen veriler ile yapılan simülasyon çalışmalarında tutarlılık ve denge açısından diğer yöntemler ile elde edilen veriler ile yapılan çalışmalara göre büyük farklar gözlenmektedir.

5.2.4. Hızlı Gama Nötron Aktivasyon Yöntemi İle X Işını Floresan Yönteminin Karşılaştırılması

Aşağıda her iki yöntemin birbirine göre avantaj ve dezavantajları maddeler halinde özetlenmiştir.

1- X ışını floresan analizi pahalı örnekleme kuleleri gerektirir. Hızlı gama nötron aktivasyon analizi için örnekleme kulelerine ihtiyaç yoktur.

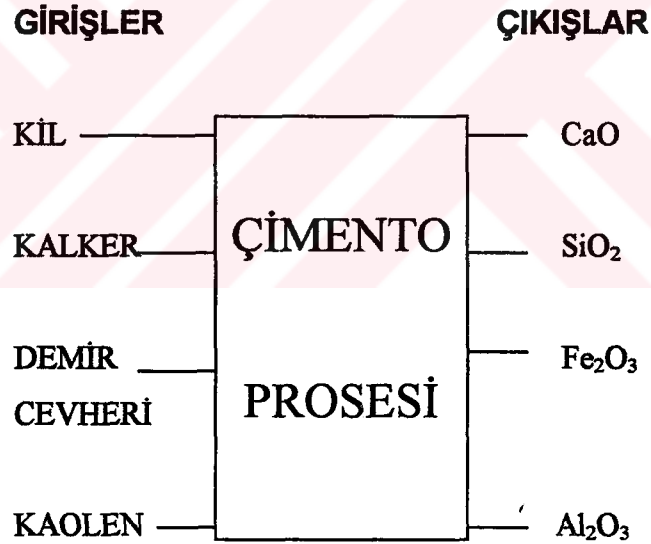
2- Genellikle yığın kontrollu X ışını floresan analizi yapılır. Örnekleme ve kontrol arasında uzun zaman gecikmesi vardır. Kısmen manuel kontrol gerektirir. Hızlı gama nötron aktivasyon analizi sürekli yapılır. Analiz zamanı kısadır. Bu nedenle çok hızlı bir kontrol sağlar, on - line uygulamalarda kullanılabilir.

3- X ışını floresan yönteminin sıhhatliliği laboratuvar şefinin yeteneğine bağlıdır. Çünkü analiz örnek hazırlama tekniğine karşı duyarlıdır. Hızlı gama nötron aktivasyon yönteminde kabul edilebilir sıhhatlilik için sık kalibrasyon gereklidir. Ancak kalibrasyonu kolay olup tam bir operatör bağımlısı değildir.

4- X ışını floresan yığın analiz metodunda zaman gecikmesi proses karakteristiğine göre uzun olduğundan, hammadde hakkında tahminler gerektirir ki bu fırın besleme bileşiminde büyük hatalara yol açar (Çanakkale Çimento fabrikasında hammadde hakkındaki bu ön bilgi saatte bir yaş analiz, diğer bir deyişle CaCO_3 , MgCO_3 titrasyonu ile sağlanmaktadır). Hızlı gama nötron aktivasyon yönteminde ise bilgi sürekli güncelleştirilir, sıhhatlilik sınırlarını karşılayacak şekilde hızlı bir kontrol sağlanır .

5.3. Çimento Prosesinin Bir Sistem Olarak Tanılanması

Yukarıda açıklanan analiz yöntemleri ışığında, çimento prosesinin tanılanması için prosese ait giriş ve çıkış bilgilerinin değerlendirilmesi gerekir. Prosesin giriş ve çıkışlarını şöyle bir blok diyagramı ile gösterelim :



Şekil 5.1. Prosesin Blok Diyagramı

Şekilden de görüleceği gibi sistemin girişleri kil, kalker, demir cevheri ve kaolen, çıkışları ise silisyum oksit (SiO₂), kalsiyum oksit (CaO), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve demir oksittir (Fe₂O₃). Bu maddelere ait karışım oranlarının belirlenmesi için yukarıda

anılan analiz yöntemleri uygulanır. Analiz neticelerinde oranlar yüzde cinsinden elde edilir. Bu, girişteki karışım oranlarının adaptif kontrol algoritmaları ile kontrol edilebilmeleri için sistemin ardışık olarak tanınması gerekir. Sistemin, bilgisayar ile tanımlanmasında, yöntem olarak önceki bölümlerde geçen algoritmalar kullanılır. Bu çalışmada da açıklanan algoritmalar, yani en küçük kareler yöntemi ve enstrümantel değişkenler yöntemi kullanılarak sistem tanınmıştır. Buna ilişkin bilgisayar programları ve sonuçları grafik olarak sonuçlar bölümünde verilmiştir.



BÖLÜM 6

BİLGİSAYAR PROGRAMLARI VE DENEYSEL SONUÇLAR

Sistem tanılama konulu tez çalışmasının bu bölümünde, ele alınan konular ile ilgili bilgisayar programları ve bunların işletilmesi neticesinde elde edilen deneysel sonuçlar açıklanmaktadır.

İlk olarak, Çanakkale Çimento A.Ş. den alınan datalar yardımı ile bu işletmeye ait, hammadde girişinden fırına gönderilmeye hazır farine kadar olan kısım bir sistem olarak tanılanmaya çalışılmıştır. Tanılama çalışması çerçevesinde sisteme giriş olarak hammadde karışım yüzdeleri verilmiş ve buna karşılık çimento kalitesinin doğrudan bir kriteri olan farindeki dört ana oksite ait karışım yüzdeleri çıkış olarak girilmiştir. Hammaddeler kil, kalker, demir cevheri ve kaolen iken farindeki dört ana oksit SiO_2 , CaO , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 tür.

Bilgisayar paket programı olarak, MATLAB (ver. 1993) kullanılmıştır. Programlamada ilk olarak bir ARX model için en küçük kareler yöntemi ile bir tanılama yapılmıştır. Yönteme ait program bölüm 6.1. de, buna ait çıkış eğrileri ise bölüm 6.2. de verilmektedir. Yine aynı program Nuh Çimento A.Ş. den gelen datalar için bölüm 6.3. de kullanılmış ve grafik sonuçları da bölüm 6.4. te verilmiştir.

İkinci olarak yine bir ARX yapısında model için enstrümantel değişkenler (IV) tahmini yapılmıştır. Buna ilişkin program Çanakkale Çimento A.Ş. verileri için bölüm 6.5. te verilmiş ve çıkışları bölüm 6.6. da incelenmiştir. Aynı yönteme ait program Nuh Çimento A.Ş. verileri için bölüm 6.7. de verilmiştir ve ilişkili grafik çıkışları bölüm 6.8. de görülmektedir.

Çanakkale Çimento A.Ş. ye ait verilerin kullanıldığı programlarda sistem, dört giriş ve dört çıkışlı olarak, Nuh Çimento A.Ş. ye ait verilerin kullanıldığı programlar ise üç giriş ve dört çıkışlı olarak tanılanmıştır.



6.1. Çanakkale Çimento A.Ş. ye Ait Sistemin En Küçük Kareler Yöntemi İle Tanılanması

```

clear
%*****
%***ÇANAKKALE ÇİMENTO A.Ş. YE AİT VERİLER DOĞRULTUSUNDA *****
%***TANILANAN ARX MODELE AİT EN KÜÇÜK KARELER TAHMİNİ*****
%***VEREN PROGRAM*****
%*****sistemin giriş ve çıkış verilerinin girilmesi
%
load cchouru.dat
load cchoury.dat
%
%*****giriş sayısı
%
Ninp=4;
%
%*****çıkış sayısı
%
Noutp=4;
%
S=cchoury(:,1);
C=cchoury(:,2);
F=cchoury(:,3);
A=cchoury(:,4);
%
Y=[S C F A];
U=[cchouru(:,1) cchouru(:,2) cchouru(:,3) cchouru(:,4)];
Z=[Y U];
%
%*****sistemin mertebelerinin verilmesi
%
n=3;m=2;d=1;
na=n*ones(4,4);
nb=m*ones(4,4);
nk=d*ones(4,4);
NN=[na' nb' nk'];

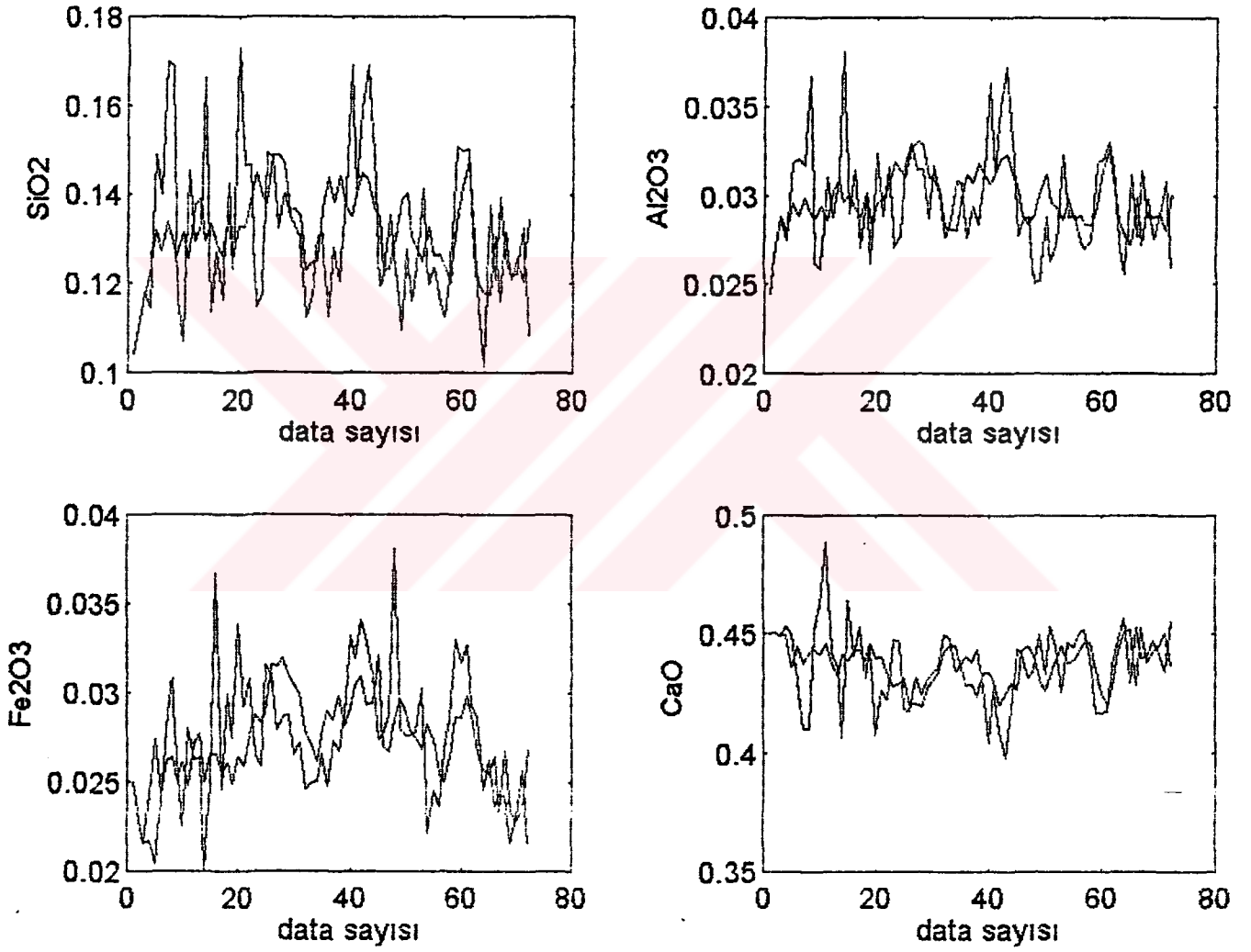
```

```

%
%*****sistemin tanılanması
%
TH=arx(Z,NN);
%
%*****P matrisini oluşturmak için A ve B parametre matrisleri
%
[A,B]=th2arx(TH);
%
P=[A B];
%
%*****sistemin simülasyonu
%
k1=d+m+1;
k2=size(Y);
%
YTH=Y;
for k=k1:k2;
    phi=-YTH(k-1,:);
    for ii=2:n;
        phi=[phi;-YTH(k-ii,:)];
    end
    for jj=0:m;
        phi=[phi;U(k-d-jj,:)];
    end
    t1=Noutp+1;
    t2=(n+1)*Noutp+(m+1)*Ninp;
    YTH(k,:)=(P(:,t1:t2)*phi);
end
%
%*****grafiklerin oluşturulması
%
subplot(2,2,1),plot([Y(:,1) YTH(:,1)])
subplot(2,2,2),plot([Y(:,2) YTH(:,2)])
subplot(2,2,3),plot([Y(:,3) YTH(:,3)])
subplot(2,2,4),plot([Y(:,4) YTH(:,4)])

```

**6.2. Çanakkale Çimento A.Ş. ye Ait Sistemin En Küçük Kareler Yöntemi
İle Tanılanmasına Ait Grafik Çıktıları**



6.3. Nuh Çimento A.Ş. ye Ait Sistemin En Küçük Kareler Yöntemi İle Tanılanması

```

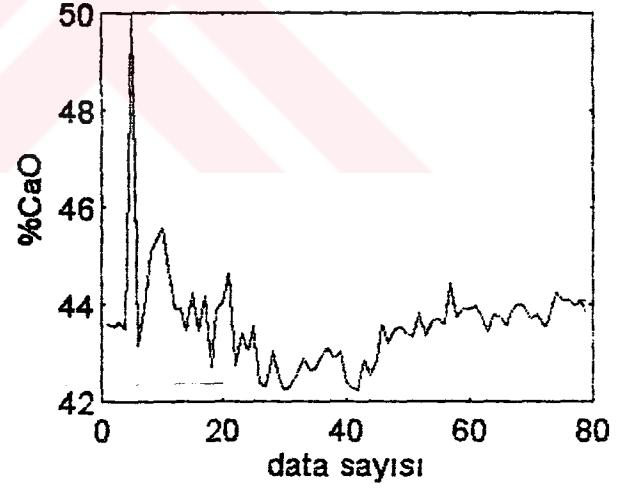
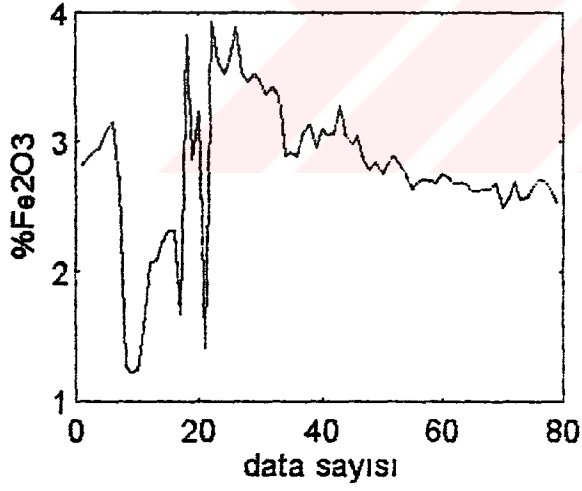
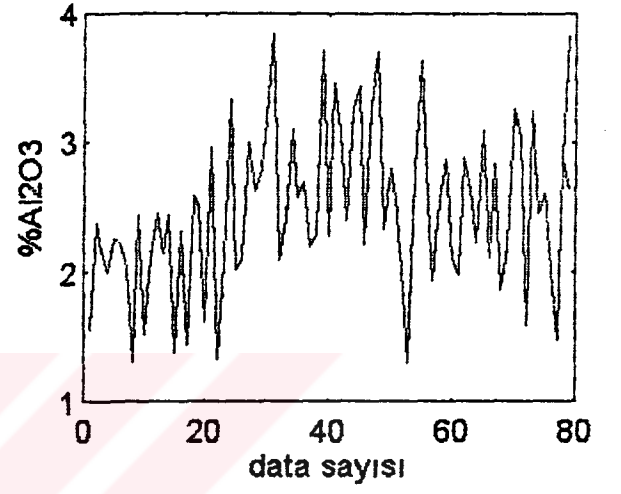
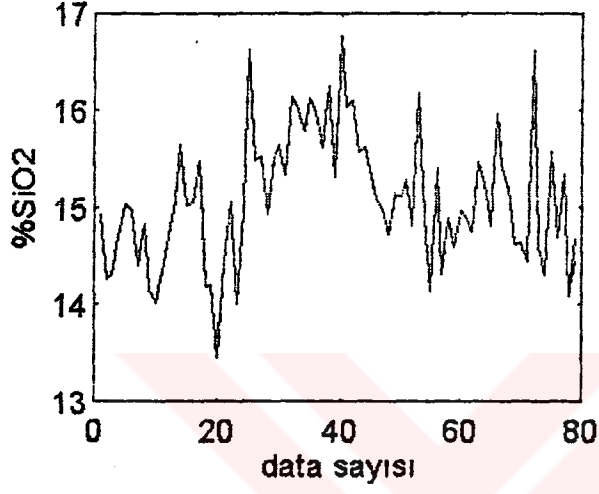
clear
%*****
%***NUH ÇİMENTO A.Ş. YE AİT VERİLER DOĞRULTUSUNDA TANILANAN*****
%***ARX MODELE AİT EN KÜÇÜK KARELER TAHMİNİ VEREN PROGRAM*****
%*****
%
%*****sistemin giriş ve çıkış verilerinin girilmesi
%
load nuh.dat
%
%*****giriş sayısı
%
Ninp=3;
%
%*****çıkış sayısı
%
Noutp=4;
%
S=nuh(:,1);
A=nuh(:,2);
F=nuh(:,3);
C=nuh(:,4);
%
Y=[S A F C];
U=[nuh(:,6) nuh(:,7) nuh(:,8)];
Z=[Y U];
%
%*****sisteme mertebelerin verilmesi
%
n=3;m=2;d=1;
na=n*ones(4,4);
nb=m*ones(3,4);
nk=d*ones(3,4);
NN=[na nb nk];
%
```

```

%*****sistemin tanılanması
TH=arx(Z,NN);
%
%*****P matrisini oluşturmak için A ve B parametre matrisleri
%
[A,B]=th2arx(TH);
%
P=[A B];
%*****sistemin simülasyonu
k1=d+m+1;
k2=size(Y,1);
%
YTH=Y;
for k=k1:k2;
phi=-YTH(k-1,:);
for ii=2:n;
phi=[phi;-YTH(k-ii,:)];
end
for jj=0:m;
phi=[phi;U(k-d-jj,:)];
end
end
t1=Noutp+1;
t2=(n+1)*Noutp+(m+1)*Ninp;
YTH(k,:)=(P(:,t1:t2)*phi);
end
%
%*****kayıp fonksiyonu J nin hesabı
for l=1:k2;
J=0.5*(Y(l,:)-YTH(l,:))*(Y(l,:)-YTH(l,:));
end
%
%*****grafiklerin oluşturulması
subplot(2,2,1),plot([Y(:,1) YTH(:,1)])
subplot(2,2,2),plot([Y(:,2) YTH(:,2)])
subplot(2,2,3),plot([Y(:,3) YTH(:,3)])
subplot(2,2,4),plot([Y(:,4) YTH(:,4)])

```

6.4. Nuh Çimento A.Ş. ye Ait Sistemin En Küçük Kareler Yöntemi İle Tanılanmasına Ait Grafik Çıktıları



6.5. Çanakkale Çimento A.Ş. ye Ait Sistemin Enstrümantel Değişkenler Yöntemi (IV) İle Tanılanması

```

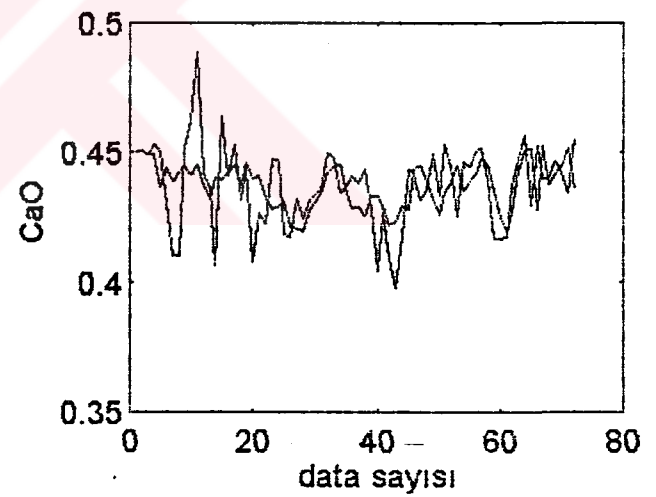
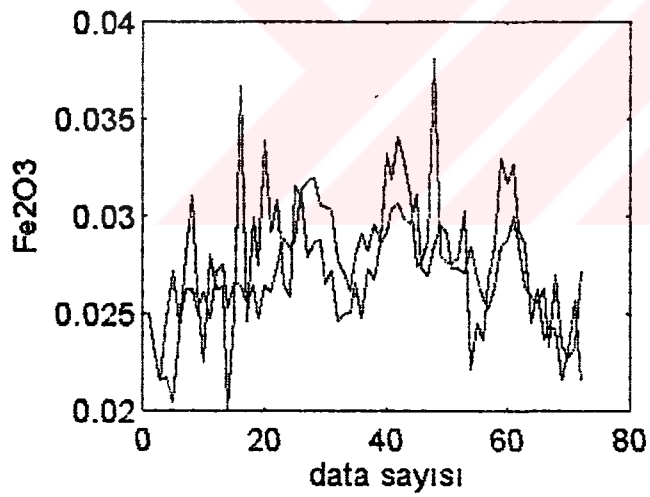
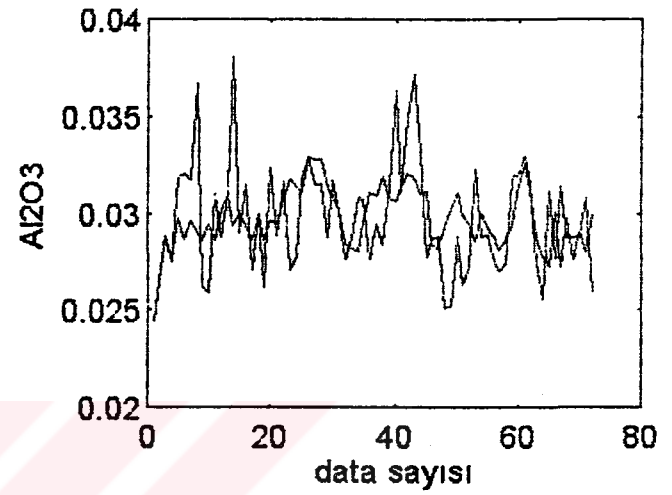
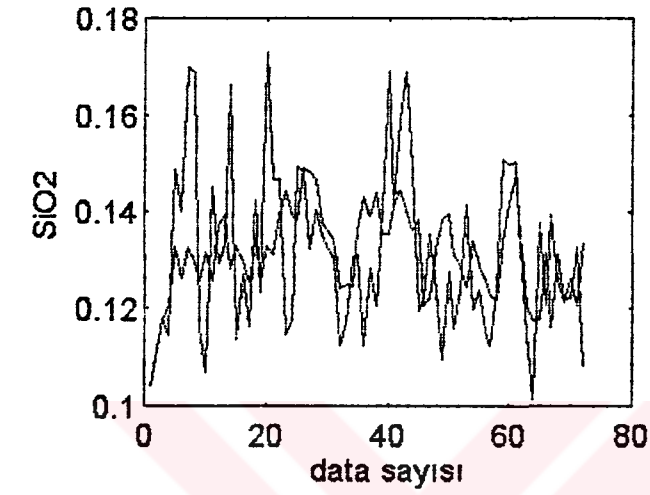
clear
%*****
%***ÇANAKKALE ÇİMENTO A.Ş. YE AİT VERİLER DOĞRULTUSUNDA TANILANAN***
%***ARX MODELE AİT IV YÖNTEMİ TAHMİNİ VEREN PROGRAM*****
%*****
%*****sistemin giriş ve çıkış verilerinin girilmesi
%
load cchouru.dat
load cchoury.dat
%
%*****giriş sayısı
%
Ninp=4;
%
%*****çıkış sayısı
%
Noutp=4;
%
S=cchoury(:,1);
C=cchoury(:,2);
F=cchoury(:,3);
A=cchoury(:,4);
%
Y=[S C F A];
U=[cchouru(:,1) cchouru(:,2) cchouru(:,3) cchouru(:,4)];
Z=[Y U];
%
%*****sistemin mertebelerinin verilmesi
%
n=3;m=2;d=1;
na=n*ones(4,4);
nb=m*ones(4,4);
nk=d*ones(4,4);
NN=[na nb nk];
%
```

```

%*****sistemin tanılanması
%
TH=iv4(Z,NN,X);
%
%*****P matrisini oluşturmak için A ve B parametre matrisleri
%
[A,B]=th2arx(TH);
%
P=[A B];
%
%*****sistemin simülasyonu
%
k1=d+m+1;
k2=size(Y);
%
YTH=Y;
for k=k1:k2;
    phi=-YTH(k-1,:);
    for ii=2:n;
        phi=[phi;-YTH(k-ii,:)];
    end
    for jj=0:m;
        phi=[phi;U(k-d-jj,:)];
    end
    t1=Noutp+1;
    t2=(n+1)*Noutp+(m+1)*Ninp;
    YTH(k,:)=(P(:,t1:t2)*phi)';
end
%
%*****grafiklerin oluşturulması
%
subplot(2,2,1),plot([Y(:,1) YTH(:,1)])
subplot(2,2,2),plot([Y(:,2) YTH(:,2)])
subplot(2,2,3),plot([Y(:,3) YTH(:,3)])
subplot(2,2,4),plot([Y(:,4) YTH(:,4)])

```

**6.6. Çanakkale Çimento A.Ş. ye Ait Sistemin Enstrümantel Değişkenler
Yöntemi İle Tanılanmasına Ait Grafik Çıktıları**



6.7. Nuh Çimento A.Ş. ye Ait Sistemin Enstrümantel Değişkenler Yöntemi İle Tanılanması

```

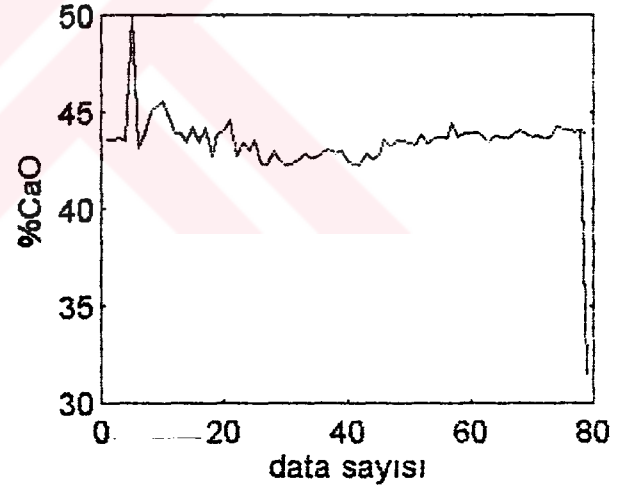
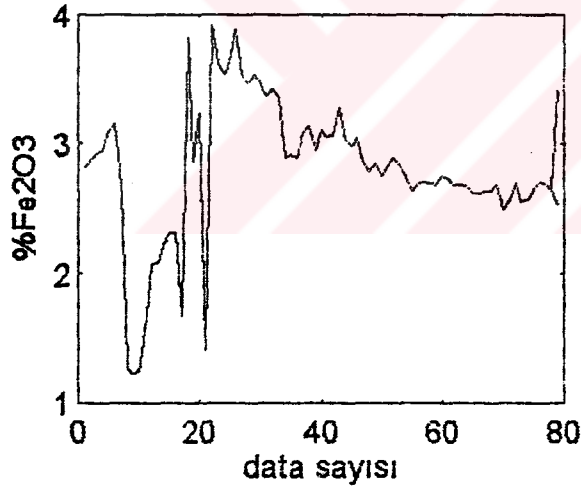
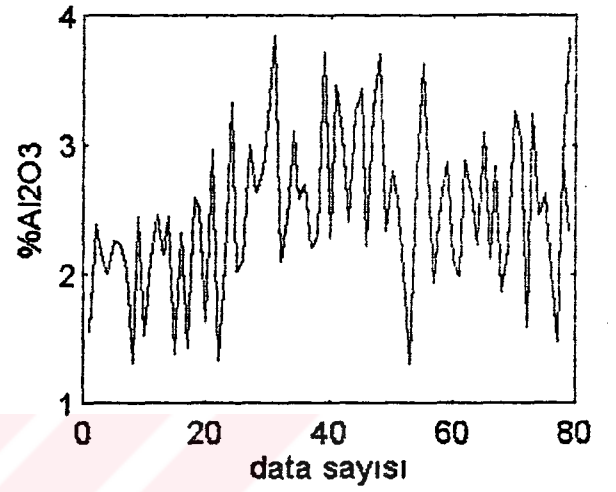
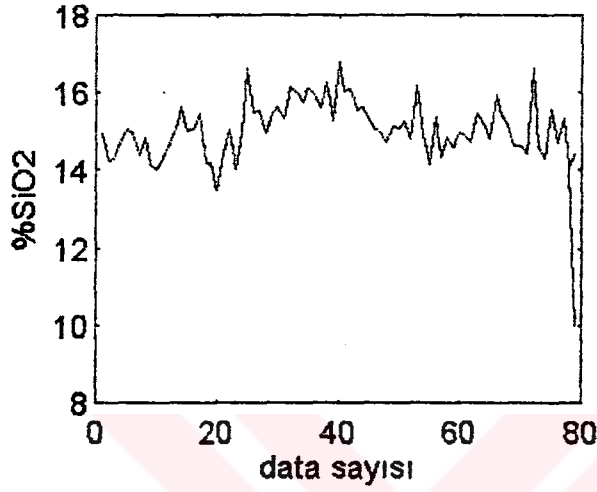
clear
%*****
%***NUH ÇİMENTO A.Ş. YE AİT VERİLER DOĞRULTUSUNDA TANILANAN*****
%***ARX MODELE AİT IV TAHMİNİ VEREN PROGRAM*****
%*****
%*****sistemin giriş ve çıkış verilerinin girilmesi
%
load nuh.dat
%
%*****giriş sayısı
%
Ninp=3;
%
%*****çıkış sayısı
%
Noutp=4;
%
S=nuh(:,1);
A=nuh(:,2);
F=nuh(:,3);
C=nuh(:,4);
%
Y=[S A F C];
U=[nuh(:,6) nuh(:,7) nuh(:,8)];
Z=[Y U];
%
%*****sisteme mertebelerin verilmesi
%
n=3;m=2;d=1;
na=n*ones(4,4);
nb=m*ones(3,4);
nk=d*ones(3,4);
NN=[na nb nk];
%
```

```

%*****sistemin tanılanması
%
TH=iv4(Z,NN,X);
%
%*****P matrisini oluşturmak için A ve B parametre matrisleri
%
[A,B]=th2arx(TH);
%
P=[A B];
%*****sistemin simülasyonu
k1=d+m+1;
k2=size(Y);
%
YTH=Y;
for k=k1:k2;
phi=-YTH(k-1,:);
for ii=2:n;
phi=[phi;-YTH(k-ii,:)];
end
for jj=0:m;
phi=[phi;U(k-d-jj,:)];
end
t1=Noutp+1;
t2=(n+1)*Noutp+(m+1)*Ninp;
YTH(k,:)=(P(:,t1:t2)*phi)';
end
%*****kayıp fonksiyonu J nin hesabı
for l=1:k2;
J=0.5*(Y(l,:)-YTH(l,:))*(Y(l,:)-YTH(l,:))';
end
%*****grafiklerin oluşturulması
%
subplot(2,2,1),plot([Y(:,1) YTH(:,1)])
subplot(2,2,2),plot([Y(:,2) YTH(:,2)])
subplot(2,2,3),plot([Y(:,3) YTH(:,3)])
subplot(2,2,4),plot([Y(:,4) YTH(:,4)])

```

**6.8. Nuh Çimento A.Ş. ye Ait Sistemin Enstrümantel Değişkenler
Yöntemi İle Tanılanmasına Ait Grafik Çıktıları**



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çimento üretim ve tüketim miktarı, bir ülkenin gelişimini karakterize eden en önemli kriterlerden biridir. Kalkınmanın gerçekleşmesi üretim artarken kalitenin artması ve giderlerdeki azalma ile mümkündür. Bu, ancak endüstrimizdeki klasik metodların, modernleştirilmesi ile yapılabilir.

Çimento prosesinin, verimli ve ekonomik çalışması otomasyon ile sağlanabilir. Bunun bir örneği, sistemde adaptif kontrol stratejileri uygulamaktır. Adaptif kontrolün mümkün olabilmesi için, sistemin tanılanmaya ihtiyacı vardır.

Sağlıklı bir sistem tanılama için, tanılama metodunun doğru ve uygun seçilmesi ve kullanılacak algoritmanın uygun olması gerekmektedir. Bunun analizi için de sistemin simüle edilmesi gerekmektedir. Çanakkale Çimento A.Ş. ve Nuh Çimento A.Ş.den alınan verilerin sıhhatliliği çerçevesinde sistem simüle edilmiştir.

Bu tanılama çalışmasının gerçek bir prosese uygulanması için verilerin daha hassas ölçümler ile elde edilmesi gerekmektedir. Bu da ancak çalışmada belirtilen modern analiz yöntemleri ile mümkün kılınır.

Endüstriyel uygulamalarda, çimento prosesinin tanılanması çok önemli bir yer tutmaktadır. Tanılama konusu, enerji tasarrufu ve nihai ürün kalitesini arttırmak için uygulanan ve ıspatlanmış, belirgin sonuçlar veren adaptif kontrol sistemlerinin çalıştırılmasında ilk basamağı oluşturmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, ele alınan iki sistem tanılama metodundan, en küçük kareler yöntemi ve enstrümantel değişkenler yöntemlerinden hangisinin çimento prosesi açısından daha uygun olduğunu bilgisayar sonuçlarından elde etmiş

bulunmaktayız. Görülmektedir ki modifiye edilmiş bir teknik olan enstrümantel değişkenler yöntemi, bu alanda daha konvansiyonel bir yöntem olan en küçük kareler yöntemine göre daha iyi bir performans göstermektedir. Kullanılan verilerin ne derecede tutarlı olmaları gerektiğinin önemi ise ayrıca görülmektedir. Dengeli ve sağlıklı verilerin elde edilmesi açısından hızlı gama nötron aktivasyon yöntemi, kullanılan diğer x ışını fluoressan yöntemine göre belirgin üstünlükler sağlamıştır.

Bu çalışmada araştırılan yöntemlerinin sağlayacağı faydaları gerçek hayatta görebilmek için geçen teorik uygulamalar bir model çimento prosesine uygulanmalıdır. En önemlisi, sistem tanılama metodunun sağlıklı olup olmadığına karar verebilmek için elde edilen kayıp fonksiyonları ve FPE kriterlerinin incelenmesinin yanısıra, metodun bir adaptif kontrol sistemi ile birlikte uygulanması bize bu konuda ışık tutacaktır.

Çimento endüstrisinde hammadde harmanlama prosesinin sistem tanılması konulu bu çalışma, kendi alanında Türkiye’de ilk defa yapılmış olan bir çalışmadır. Bununla birlikte dünyada yayınlanan makalelerde sistem tanılama konusu ele özel olarak alınmamış, ancak bu konuda bazı adaptif kontrol stratejileri sunulmuştur. Sunulan bu çalışmalarda incelenen sistemler iki giriş iki çıkışlı sistemlerdir. Bu çalışmada ise Türkiye’de yer alan iki çimento endüstrisi alanında faaliyet gösteren işletmeden Çanakkale Çimento A.Ş. nin sistemi dört giriş dört çıkış, Nuh Çimento A.Ş. ninki ise üç giriş dört çıkış şeklinde incelenmiştir.

Sonuçlar bize göstermiştir ki bu çalışmada incelenen sistem tanılama stratejileri, her çimento alanında faaliyet gösteren işletmedeki hammadde harmanlama prosesine adaptif kontrol sistemleri uygulamak amacıyla kullanılabilir. Burada esas yazılmış olan bilgisayar programıdır. Programın esnekliği bakımından çalışma evrensel bir nitelik taşımaktadır.

İyi bir lineer model elde etmek için, verilerin belirli bir çalışma alanı içerisinde yer alması gerekmektedir. Bu bakımdan on-line bir sistem ile analizleri yapılan Nuh Çimento A.Ş. ye ait hammadde ve ana oksit verileri bize daha sağlıklı sonuçlar

vermekte, nitekim bilgisayar programı sonuçlarındaki grafiklerde çıkış eğrileri üstüste çakışık görülmektedir.



EK 1

Cimrilik Prensibi

Cimrilik prensibi (the parsimony principle), beklenen bir model mertebesini tayin ederken kullanışlı bir kural olarak göze çarpar. Prensip, verilere dayanılarak elde edilmiş olan iki veya daha fazla aday modelden, en az sayıdaki bağımsız parametreyi barındıran modelin seçilmesi gerektiğini söyler. Böyle bir seçim, en iyi doğruluğu elde etmek için yapılır. Bu kural, şu çizgide yer alır : ‘Eğer ihtiyaç yok ise, bir dinamik oluşumun tarif edilmesinde fazladan parametre kullanma.’ Cimrilik prensibi 1976 yılında BOX ve JENKINS tarafından ortaya atılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] ASTRÖM, K.J.&WITTENMARK B. Computer Controlled Systems
Prentice Hall International
1991
- [2] SÖDERSTRÖM, T.&STOICA P. System Identification
Prentice Hall International
1990
- [3] LJUNG, K. System Identification
Prentice Hall International 1987
- [4] SINHA, N.K. & Modeling And Identification Of
KUSZTA, B. Dynamic Systems
Van Nostrand Reinhold Company
1981
- [5] OGATA, K. Discrete Time Control Systems
Prentice Hall International 1987
- [6] KAISER, V.A. Computer Control in the Cement
Industry
Proceedings of the IEEE
vol.58 no.1
1970

[7] KABAHASANOĞLU, Ş.&
GENCER A.S.

Çimento Prosesi Araştırma Notları
1994



ÖZGEÇMİŞ

A.Suat GENCER 1969 yılında İstanbul’da doğdu. İlköğrenimden sonra orta ve lise eğitimini 1987 yılında mezun olduğu İstanbul Erkek Lisesi’nde tamamladı. 1988 yılında İ.T.Ü. Makina Fakültesine yüksek öğrenime başlayan GENCER, lisans öğrenimini 1992 yılında bitirdi. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Robotik programına başladı. Yüksek lisans öğrenimi boyunca endüstride de meslek hayatını sürdüren GENCER, halen İLKMAK A.Ş. (Denizli) de yönetici olarak görev yapmaktadır.