



Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü  
İşletme Anabilim Dalı  
Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

# **KONTROL TEORİSİ UYGULAMALARI İLE ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Cem Recai ÇIRAK

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2019



KONTROL TEORİSİ UYGULAMALARI İLE ZAMAN  
SERİSİ ÖNGÖRÜLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Cem Recai ÇIRAK

Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü  
İşletme Anabilim Dalı  
Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ankara, 2019

## KABUL VE ONAY

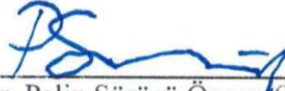
Cem Recai ırak tarafından hazırlanan “Kontrol Teorisi Uygulamaları ile Zaman Serisi Öngörülerinin İyileştirilmesi” başlıklı bu alışma, 11 Haziran 2019 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Kazım Barış Atıcı (Başkan)



Prof. Dr. Aydın Ulucan (Danışman)



Doç. Dr. Pelin Sürücü Özgen (Üye)



Doç. Dr. Mehmet Soysal (Üye)



Dr. Öğr. Üyesi Mustafa imen (Üye)

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa Yaşar Sağlam  
Enstitü Müdürü

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinleri yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / H.Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. <sup>(1)</sup>
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren **5 ay** ertelenmiştir. <sup>(2)</sup>
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. <sup>(3)</sup>

04/07/2019

**Cem Recai ÇIRAK**

<sup>1</sup>“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

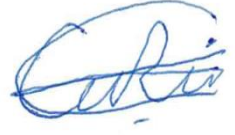
- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez **danışmanın** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu** iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez **danışmanın** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulunun** gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, **tezin yapıldığı kurum** tarafından verilir \*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, **ilgili kurum ve kuruluşun önerisi** ile **enstitü** veya **fakültenin** uygun görüşü üzerine **üniversite yönetim kurulu** tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir. Madde 7.2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

\* Tez **danışmanın** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu** tarafından karar verilir.

## ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu, **Prof. Dr. Aydın ULUCAN** danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığını beyan ederim.

04/07/2019



**Cem Recai ÇIRAK**

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında en büyük manevi destekçim olan sevgili annem Münevver ÇIRAK'a ve kıymetli aileme; tez çalışmam sırasında gösterdiği anlayış ve kilit noktalarda yapmış olduğu önemli yönlendirmeler için tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Aydın ULUCAN'a; uzun süredir gerek gündelik hayatta gerek birlikte gerçekleştirdiğimiz projeler ve akademik çalışmalarda yanımda olan ve bu çalışma süresince de motivasyonumu korumamda yardımları bulunan değerli arkadaşlarım Efe ARIN'a, Mehmet Uğur GÜDELEK'e ve Mustafa Erdem SEZGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Cem Recai ÇIRAK

## ÖZET

ÇIRAK, Cem Recai. *Kontrol Teorisi Uygulamaları ile Zaman Serisi Öngörülerinin İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2019.

İşletme yönetiminin ve fonksiyonlarının başarısı, büyük oranda talep yönetiminde planlama sürecinin doğru şekilde işlemesine ve dolayısıyla talep planlamasındaki belirsizliklerin azaltılmasına bağlıdır. Bu tez çalışmasında; talep planlamasının da fiziksel endüstriyel süreçler gibi ancak soyut bir süreç olduğu, girdilerinin talep öngörülleri ve çıktılarının gerçekleşen satışlar olarak tanımlanıp ölçülebileceği ve bunlara bağlı olarak fiziksel endüstriyel süreçlerinde kullanılmakta olan kontrol sistemlerinin, talep planlamasında hataların azaltılması amacıyla da kullanılabileceği önermeleri yapılmıştır. Buradan hareketle önermeler genellenerek; kontrol teorisi uygulamaları ile zaman serisi öngörülerinin iyileştirilmesi yaklaşımı öne sürülmüştür. Bu yaklaşımla birlikte, zaman serisi öngörü modellerinin soyutlaştırılarak yalnızca girdi ve çıktı ilişkisi üzerinden kara kutu olarak tanımlanabileceği ve bu sayede kontrol sistemlerinin öngörü modelleriyle birleştirilebileceği varsayımında bulunulmuştur. Öne sürülen yaklaşımın doğrulanması amacıyla; önce genel öngörü yöntemleri, zaman serileri ve istatistiksel zaman serisi analizinden bahsedilerek ARIMA modelleri üzerinde durulmuştur. Sonra, kontrol teorisi, kontrol döngüleri ve kontrol sistemlerinin modellenmesine değinilmiş ve PID kontrol detaylandırılarak anlatılmıştır. Daha sonra, kontrol teorisi ile zaman serisi öngörülerinin ilişkisi açıklanmış ve öne sürülen yaklaşım doğrultusunda tasarlanan PID kontrollü öngörü modeli detaylı olarak sunulmuştur. Son olarak, PID kontrollü öngörü modeli yaklaşımı ARIMA modelleri ile birlikte kullanılarak, durağan olmayan farklı tipteki zaman serilerinden oluşan talep ve satış verileri için talep tahmini uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Uygulamalardan elde edilen deneysel bulgular; PID kontrollü öngörü modelleri ile yalnız öngörü modellerinin tahminleme hataları kıyaslandığında, PID kontrollü öngörü modellerinin tüm uygulamalarda hata oranlarını büyük ölçüde düşürdüğünü göstermiştir. Aynı zamanda, daha düşük tahminleme başarısı gösteren öngörü modellerinin kontrol sistemleri ile daha büyük oranda iyileştirildiği sonucuna ulaşılmıştır. Deneysel bulgular ile talep planlamasıyla ilgili yapılan tüm önermeler desteklenmiş, öne sürülen yaklaşımla birlikte öngörü modelleri için bulunan kara kutu varsayımı doğrulanmıştır. Böylece, zaman serisi öngörülerinin kontrol teorisi uygulamaları ile zaman serilerinin tipinden ve öngörü modellerinin içyapısından bağımsız olarak, iyileştirilebildiği çıkarımına varılmıştır. Bu tez çalışmasının sonucunda; kontrol teorisi uygulamaları ile zaman serisi öngörülerinin iyileştirilmesi yaklaşımı yeni bir metodolojik çerçeve olarak öngörü literatürüne kazandırılmış ve aynı zamanda kontrol teorisi ve kontrol sistemleri için tümüyle yeni bir uygulama alanı sunulmuştur.

### Anahtar Sözcükler

Zaman serisi analizi, öngörü, kontrol teorisi, kontrol sistemi tasarımı, ARIMA, PID kontrol, PID ayarlama



## ABSTRACT

ÇIRAK, Cem Recai. *Improvement of Time Series Forecasts via Control Theory Applications*, Master's Thesis, Ankara, 2019.

The success of business management and functions largely depends on the correct functioning of the planning process in demand management and therefore the reduction of uncertainties in demand planning. In this thesis work; made propositions state that demand planning is a process just like, but an abstract one, physical industrial processes; that inputs and outputs of demand planning can be defined and measured as demand forecasts and actual sales respectively, and that accordingly, control systems used in physical industrial processes can also be used to reduce errors in demand planning. Starting from this point of view, the propositions are generalized, approach for improvement of time series forecasts via control theory applications have been asserted. Along with this approach, it has been hypothesized that time series forecast models can be abstracted and defined as black box just via the input and output relationship, and thus control systems can be integrated with forecast models. In order to verify the asserted approach; first, prediction methods in general, time series and statistical time series analysis have been mentioned and ARIMA models has been emphasized. Then, control theory, control loops and modelling of control systems have been referred and PID control has been discussed in detail. Later on, the relationship between control theory and time series forecasts were explained and PID controlled forecast model which is designed in line with the proposed approach were presented in detail. Finally, demand forecasting applications on demand and sales datasets consisting of nonstationary time series of different types were implemented via the use of PID controlled forecast model approach in conjunction with ARIMA models. Experimental findings obtained from the applications have been shown that PID controlled forecast models substantially reduced error rates on all applications, when PID controlled forecast models have been compared with lean forecast models in terms of forecasting errors. At the same time, it was resulted that lean forecast models with lower forecasting success were improved to a greater extent with control systems. By the experimental findings, all the propositions which were made about demand planning were supported and the black box hypothesis which was stated along with the proposed approach for forecasting models was confirmed. Thus, the inference have been made that time series forecasts can be improved via control theory applications, independently of the type of time series and the internal structure of forecast models. As the conclusion of this thesis; the approach for improvement of time series forecasts via control theory applications has been gained to the literature of forecasting as a novel methodological framework, and therewithal a brand new field of application for control theory and control systems has been introduced.

### Keywords

Time series analysis, forecasting, control theory, control system design, ARIMA, PID control, PID tuning

## İÇİNDEKİLER

<b>KABUL VE ONAY</b> .....	i
<b>YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI</b> .....	ii
<b>ETİK BEYAN</b> .....	iii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iv
<b>ÖZET</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	vii
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	xii
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xiii
<b>ÖNSÖZ</b> .....	xv
<b>GİRİŞ</b> .....	1
<b>1. İŞLETME YÖNETİMİNDE PLANLAMA VE KONTROL</b> .....	2
<b>1.1. PLANLAMA VE KONTROL</b> .....	2
1.1.1. Planlama.....	2
1.1.2. Kontrol.....	3
1.1.3. Uzun ve Kısa Vadede Planlama ve Kontrol Faaliyetleri.....	3
<b>1.2. TALEP YÖNETİMİNİN PLANLAMA VE KONTROLE ETKİSİ</b> .....	4
1.2.1. Talep Planlaması.....	4
1.2.2. Talep Planlamasının Diğer Operasyonlar Üzerindeki Etkisi.....	5
<b>1.3. TALEP PLANLAMASINDA KONTROL SÜRECİ</b> .....	6
1.3.1. Kontrol Sürecinin Talep Planlamasına Dahil Edilmesi.....	7
1.3.2. Kontrol Teorisi Uygulamalarıyla Talep Planlamının İyileştirilmesi.....	7
<b>2. ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜ YÖNTEMLERİ</b> .....	9
<b>2.1. ÖNGÖRÜ YÖNTEMLERİ</b> .....	9
2.1.1. Niteliksel Öngörü Yöntemleri.....	9
2.1.1.1. Panel Yaklaşımı.....	10
2.1.1.2. Delphi Yöntemi.....	10
2.1.1.3. Senaryo Planlama.....	10
2.1.2. Niceliksel Öngörü Yöntemleri.....	10
2.1.2.1. Zaman Serisi Yöntemleri.....	11

2.1.2.2. Nedensel Yöntemler.....	11
2.1.2.3. Benzetim.....	12
<b>2.2. ZAMAN SERİLERİ.....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Düzensizlik İçeren veya Rassal Değişimler.....	13
2.2.2. Trendler.....	13
2.2.3. Mevsimsel veya Dönemsel Değişimler.....	13
2.2.4. Döngüsel Değişimler.....	13
<b>2.3. ZAMAN SERİSİ ANALİZİ.....</b>	<b>14</b>
2.3.1. Otokovaryans ve Otokorelasyon Fonksiyonu.....	15
2.3.2. Durağanlık.....	16
2.3.2.1. Geniş Anlamda Durağanlık.....	16
2.3.2.2. Dar Anlamda Durağanlık.....	16
2.3.2.3. Durağan Olmayan Zaman Serileri.....	17
2.3.3. Temel Rassal Süreçler.....	18
2.3.3.1. IID Gürültü.....	18
2.3.3.2. Beyaz Gürültü.....	19
2.3.3.3. İkili Süreç.....	19
2.3.3.4. Rassal Yürüyüş.....	20
2.3.3.5. Sürüklenen Rassal Yürüyüş.....	20
2.3.3.6. Belirleyici Trend.....	21
2.3.3.7. Belirleyici Trend ile Sürüklenen Rassal Yürüyüş.....	22
2.3.4. Zaman Serisi Bileşenlerinin Ayrıştırılması.....	22
2.3.5. Trend Analizi.....	23
2.3.5.1. Doğrusal Trend Analizi.....	23
2.3.5.2. Doğrusal Olmayan Trend Analizi.....	24
2.3.6. Üstel Düzleştirme Yöntemi.....	24
2.3.7. Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) Modelleri.....	25
2.3.7.1. Otoregresif (AR) Modeller.....	25
2.3.7.2. Hareketli Ortalama (MA) Modelleri.....	26
2.3.7.3. Entegre (I) Modeller.....	27
2.3.7.4. Otoregresif Hareketli Ortalama (ARMA) Modelleri.....	28
2.3.7.5. Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) Modelleri.....	28
2.3.7.6. Mevsimsel Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (SARIMA) Modelleri.....	29

<b>3. KONTROL SİSTEMLERİ.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1. KONTROL TEORİSİ.....</b>	<b>30</b>
3.1.1. Klasik Kontrol Teorisi.....	30
3.1.2. Modern Kontrol Teorisi.....	31
3.1.3. Gürbüz Kontrol Teorisi.....	31
<b>3.2. KONTROL DÖNGÜLERİ.....</b>	<b>32</b>
3.2.1. Geri Besleme Kontrol Sistemleri.....	32
3.2.2. Kapalı Döngü Kontrol Sistemleri.....	32
3.2.3. Açık Döngü Kontrol Sistemleri.....	33
3.2.4. Kapalı ve Açık Döngü Kontrol Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	33
<b>3.3. KONTROL SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ.....</b>	<b>35</b>
3.3.1. Transfer Fonksiyonları.....	35
3.3.2. Durum-Uzay Gösterimi.....	36
3.3.3. Blok Diyagramlar.....	38
<b>3.4. PID KONTROL.....</b>	<b>41</b>
3.4.1. PID Kontrolcü.....	41
3.4.2. PID Kontrolcü Bileşenleri.....	43
3.4.2.1. Orantısal (P) Kontrol.....	43
3.4.2.2. İntegral (I) Kontrol.....	43
3.4.2.3. Türev (PD) Kontrol.....	44
3.4.3. PID Kontrolcünün Kesikli Zamana Uyarlanması.....	45
3.4.4. PID Parametrelerinin Ayarlanması.....	46
3.4.4.1. El ile Ayarlama.....	47
3.4.4.2. Ziegler-Nichols Yöntemi.....	48
3.4.4.3. Kök Yer Eğrisi ve Kutup Yerleştirme.....	49
3.4.4.4. Åström ve Hägglund (Röle) Yöntemi.....	49
3.4.4.5. Optimizasyon Yöntemleri.....	50
<b>4. KONTROL TEORİSİ UYGULAMALARI İLE ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1. KONTROL TEORİSİ VE ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜLERİNİN İLİŞKİSİ.....</b>	<b>51</b>
4.1.1. Kontrol Teorisi Uygulamaları.....	51
4.1.2. Zaman Serisi Öngörülleri.....	51
4.1.3. Kontrol Teorisi ve Zaman Serisi Öngörüllerinin İlişkisi.....	52
<b>4.2. PID KONTROLLÜ ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜ MODELLERİ.....</b>	<b>52</b>

4.2.1. Etkileşimsiz PID Kontrollü Öngörü Modeli Yaklaşımı.....	53
4.2.2. Etkileşimli PID Kontrollü Öngörü Modeli Yaklaşımı.....	54
<b>4.3. PID KONTROLLÜ ÖNGÖRÜ MODELLERİ İLE TALEP TAHMİNİ UYGULAMALARI.....</b>	<b>55</b>
4.3.1. Talep Verileri ve Talep Tahmini.....	55
4.3.2. Talep Tahmini için Kullanılan Öngörü Modelleri ve Model Seçim Kriterleri.....	56
4.3.2.1. ARIMA Modelleri ile Talep Tahmini.....	56
4.3.2.1. Doğru ARIMA Modelinin Tespit Edilmesi.....	56
4.3.3. Talep Tahmini için PID Kontrollü Öngörü Modelinin Oluşturulması.....	58
4.3.3.1. İntegral Kapatıcılı PID Kontrol.....	58
4.3.3.2. Talep Tahmini için Tasarlanan İntegral Kapatıcılı PID Kontrol Algoritması.....	59
4.3.3.3. Talep Tahmini için PID Ayarlama.....	61
4.3.3.4. Talep Tahmini için PID Parametrelerinin Optimizasyonu.....	62
4.3.4. Tahminleme Hatalarının Ölçülmesi ve Modellerin Kıyaslanması....	64
4.3.5. Mevsimsellik ve Doğrusal Olmayan Trend İçeren Talep Verisi için PID Kontrollü Öngörü Yöntemleri ile Bir Periyot Sonrasının Talep Tahmini.....	67
4.3.5.1. Aylık Ürün Satışları Veri Seti.....	67
4.3.5.2. Aylık Ürün Satışlarının Tahmini için Öngörü Modeli Seçimi.....	68
4.3.5.3. PID Kontrollü Öngörü Modeli ile Aylık Ürün Satışlarının Tahmini.....	74
4.3.5.4. Aylık Ürün Satışlarının Talep Tahmini Testleri ile İlgili Bulgular.....	78
4.3.6. Belirleyici Doğrusal Trend İçeren ve Durağan Olmayan Talep Verisi için PID Kontrollü Öngörü Yöntemleri ile Bir Periyot Sonrasının Talep Tahmini.....	80
4.3.6.1. Apple iPhone Satışları Veri Seti.....	80
4.3.6.2. Apple iPhone Satışlarının Tahmini için Öngörü Modeli Seçimi.....	80
4.3.6.3. PID Kontrollü Öngörü Modeli ile Apple iPhone Satışlarının Tahmini.....	83
4.3.6.4. Apple iPhone Satışlarının Talep Tahmini Testleri ile İlgili Bulgular.....	86
4.3.7. Çoklu Mevsimsellik İçeren ve Durağan Olmayan Büyük Talep Verisi Seti için PID Kontrollü Öngörü Yöntemleri ile Bir Periyot Sonrasının Talep Tahmini.....	87

4.3.7.1. Elektrik Gücü (Yük) Talebi Veri Seti.....	87
4.3.7.2. Yük Tahmini için Öngörü Modeli Seçimi.....	88
4.3.7.3. PID Kontrollü Öngörü Modeli ile Yük Tahmini.....	92
4.3.7.4. Yük Tahmini Testleri ile İlgili Bulgular.....	95
<b>SONUÇ.....</b>	<b>97</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>99</b>
<b>EK 1. ORJİNALLİK RAPORU.....</b>	<b>101</b>
<b>EK 2. ETİK KOMİSYON MUAFİYET FORMU.....</b>	<b>103</b>

## TABLÖLAR DİZİNİ

<b>TABLO I:</b> Ziegler-Nichols PID Kontrolcü Parametreleri .....	48
<b>TABLO II:</b> Değerlendirmede Kullanılan Hata Ölçütleri .....	65
<b>TABLO III:</b> Optimize Edilen PID Parametreleri .....	74
<b>TABLO IV:</b> Yalın ve PID Kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0) <sub>5</sub> ve ARIMA(3,1,0)x(1,0,0) <sub>5</sub> Hata Oranları .....	79
<b>TABLO V:</b> Yalın ve PID Kontrollü ARIMA(3,1,0) Hata Oranları .....	86
<b>TABLO VI:</b> Yalın ve PID Kontrollü ARIMA(2,2,0)x(0,1,1) <sub>96</sub> Hata Oranları.....	96

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Blok diyagram elemanı.....	38
Şekil 2. Toplama ve bağlantı noktaları .....	39
Şekil 3. Açık döngü kontrol sistemi blok diyagramı .....	39
Şekil 4. Birim geri beslemeli kapalı döngü kontrol sistemi blok diyagramı.....	39
Şekil 5. Genelleştirilmiş kapalı döngü kontrol sistemi blok diyagramı .....	40
Şekil 6. PID kontrol sistem modeli.....	42
Şekil 7. PID kontrol transfer fonksiyonu .....	42
Şekil 8. Kesikli zaman PID kontrol sistem modeli .....	46
Şekil 9. Etkileşimsiz PID kontrollü öngörü modeli .....	53
Şekil 10. Etkileşimli PID kontrollü öngörü modeli .....	54
Şekil 11. İntegral kapatıcılı etkileşimsiz PID kontrollü öngörü modeli .....	60
Şekil 12. Aylık ürün satışları .....	68
Şekil 13. Aylık ürün satışlarının %5 önem düzeyinde otokorelasyon fonksiyonu .....	68
Şekil 14. Aylık ürün satışlarının %5 önem düzeyinde kısmi otokorelasyon fonksiyonu .....	69
Şekil 15. ARIMA(1,1,1)x(1,1,0) <sub>5</sub> model özeti.....	69
Şekil 16. ARIMA(1,1,1)x(1,1,0) <sub>5</sub> model tanımları.....	70
Şekil 17. ARIMA(3,1,0)x(1,0,0) <sub>5</sub> model özeti.....	70
Şekil 18. ARIMA(3,1,0)x(1,0,0) <sub>5</sub> model tanımları.....	71
Şekil 19. Öngörü modellerinin eğitim verileri.....	72
Şekil 20. Öngörü modellerinin eğitim hataları .....	72
Şekil 21. Öngörü modellerinin test verileri .....	73
Şekil 22. Öngörü modellerinin test hataları .....	73
Şekil 23. PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0) <sub>5</sub> eğitim verisi .....	74
Şekil 24. PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0) <sub>5</sub> eğitim hatası.....	75
Şekil 25. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0) <sub>5</sub> eğitim verisi .....	75
Şekil 26. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0) <sub>5</sub> eğitim hatası.....	76
Şekil 27. PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0) <sub>5</sub> test verisi.....	77
Şekil 28. PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0) <sub>5</sub> test hatası .....	77
Şekil 29. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0) <sub>5</sub> test verisi.....	78
Şekil 30. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0) <sub>5</sub> test verisi.....	78
Şekil 31. Apple iPhone satışları.....	80
Şekil 32. Apple iPhone satışlarının %5 önem düzeyinde otokorelasyon fonksiyonu.....	81
Şekil 33. Apple iPhone satışlarının %5 önem düzeyinde kısmi otokorelasyon fonksiyonu.....	81
Şekil 34. ARIMA(3,1,0) model özeti .....	82



<b>Şekil 35.</b> ARIMA(3,1,0) model tanıları.....	83
<b>Şekil 36.</b> Apple iPhone satış tahmini eğitim verileri .....	84
<b>Şekil 37.</b> Apple iPhone satış tahmini eğitim hataları.....	84
<b>Şekil 38.</b> Apple iPhone satış tahmini test verileri.....	85
<b>Şekil 39.</b> Apple iPhone satış tahmini test hataları .....	85
<b>Şekil 40.</b> Örnek yük verileri.....	88
<b>Şekil 41.</b> Yük verilerinin %5 önem düzeyinde otokorelasyon fonksiyonu.....	89
<b>Şekil 42.</b> Yük verilerinin %5 önem düzeyinde kısmi otokorelasyon fonksiyonu.....	89
<b>Şekil 43.</b> ARIMA(2,2,0)x(0,1,1) <sub>96</sub> model özeti .....	91
<b>Şekil 44.</b> ARIMA(2,2,0)x(0,1,1) <sub>96</sub> model tanıları.....	91
<b>Şekil 45.</b> Yük tahmini örnek eğitim verileri .....	93
<b>Şekil 46.</b> Yük tahmini örnek eğitim hataları.....	93
<b>Şekil 47.</b> Yük tahmini örnek test verileri.....	94
<b>Şekil 48.</b> Yük tahmini örnek test hataları .....	95

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, daha önce herhangi bir benzeri yapılmamış ve düşünülmemiş olan Kontrol Teorisi Uygulamaları ile Zaman Serisi Öngörülerinin İyileştirilmesi yaklaşımı ve bu yaklaşım doğrultusunda çizilen metodolojik çerçeve yer almaktadır. Bu çalışma ile sağlanan akademik katkılar, esasında yenileşimci ve disiplinler arası bir bakış açısıyla uzun süredir yürütmekte olduğum araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin ve akademik çalışmaların kısmi bir yansıması olarak ortaya konulmuştur.

Değişimin ve gelişimin bir numaralı anahtarı yenileşimci düşünce ve yenileşim hareketinin kendisidir. Günümüzde hala devam eden tek boyutlu düşünce ile ilerleme diretişi ise; değişim ve gelişimin önündeki en büyük engeldir. Yenileşim hareketi, ancak ve ancak - maalesef güzel ülkemizde eksikliğini her an hissettiğim - disiplinler arası bakış açısı ve disiplinler arası çalışmalar ile mümkün olabilir. Hem akademik hem de teknolojik ilerleme disiplinler arası bakış açısının serbest bırakılmasını ve disiplinler arası çalışmaların ve yaklaşımların desteklenmesini gerektirir.

Buradan hareketle yazılmış olan bu yüksek lisans tezi; akademik açıdan sağladığı katkılarının da ötesinde, aynı zamanda daha genel ve daha temel bir gerçeklik olan çok boyutlu düşünce ve çalışmaların gerekliliğini vurgulama amacını gütmektedir. Bu bağlamda, disiplinler arası yaklaşımın yenileşimci bir ürünü olan bu çalışma; tek boyutlu kısır düşünce diretişine karşı somut bir duruşun da temsilcisidir.

Cem Recai ÇIRAK

## GİRİŞ

Son yüzyıl içerisinde hızla gelişen ve yaygınlaşan kontrol ve otomasyon teknolojileri sayesinde, sistem ve süreçlerin kontrolünde çığır açan büyüklükte iyileşmeler sağlanmıştır. Fiziksel endüstriyel süreçlerde hataların ortadan kaldırılmasında da kullanılan bu teknolojiler, aynı zamanda Endüstri 2.0 ve Endüstri 3.0 devrimlerine altyapı hazırlayan en önemli etken olmuştur. Bu tez çalışmasının ardındaki temel motivasyon; kontrol sistemlerinin fiziksel endüstriyel süreçlerde sağladığı başarının, soyut endüstriyel süreçlerde de tekrarlanabileceği düşüncesidir. Bu motivasyon doğrultusunda, işletme içerisindeki en önemli soyut süreçlerden biri olan talep planlama süreci için; talep tahminlerinde kontrol sistemleri ile sağlanan iyileşmeler gösterilmiş ve buradan hareketle öngörü yöntemlerinde kontrol teorisi uygulamaları yaklaşımı tüm zaman serileri için genelleştirilmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde; başlangıç motivasyonundan hareketle önerilen yaklaşım anlatılmış ve bu yaklaşımın temel varsayımları ortaya konulmuştur. Bu bölümde, sırasıyla; işletme yönetiminde planlama ve kontrol işlemleri, talep yönetimi ile planlama ve kontrol ilişkisi ve talep planlamasında kontrol süreçleri konularına değinilmiştir. İkinci bölümde; zaman serisi öngörü yöntemleri üzerinde durulmuştur. Bu bölüm; öngörü yöntemleri, zaman serileri ve zaman serisi analizi olmak üzere üç alt bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde; ilk olarak öngörü yöntemlerinden genel olarak bahsedilmiş ve niteliksel ve niceliksel öngörü yöntemleri ve yaklaşımları anlatılmıştır. Sonrasında; zaman serilerinin özelliklerinden ve bileşenlerinden bahsedilmiştir. Daha sonrasında ise; zaman serisi analizde kullanılan genel kavramlar anlatılmış ve istatistiksel zaman serisi öngörü yöntemleri detaylandırılmıştır. Üçüncü bölüm; genel olarak kontrol sistemlerini içermektedir. Bu bölümde; kontrol teorisi yaklaşımları, kontrol döngüsü çeşitleri, kontrol sistemlerinin modellenmesinde kullanılan yöntemlerinden kısaca bahsedilmiş ve sonrasında PID kontrol sistemleri detaylı olarak incelenmiştir. Dördüncü bölümde; çeşitli tiplerdeki zaman serisi verileri ile farklı öngörü yöntemleri uygulanarak yapılan talep öngörülerinin, PID kontrol sistemleriyle iyileştirilmesini içeren üç farklı otomatik kontrol uygulama çalışması yer almaktadır. Sonuç bölümünde ise; uygulama çalışmaları ile elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve bu sonuçlar doğrultusunda sunulan yaklaşımın ve yapılan varsayımlarının doğrulanmasıyla ilgili değerlendirmelere yer verilmiştir.

## **1. İŞLETME YÖNETİMİNDE PLANLAMA VE KONTROL**

İşletme yönetimi, yüksek belirsizlik içeren koşullar altında, temel işletme fonksiyonlarının ve birçok alt sistemin eş zamanlı olarak birbirine uyumlu şekilde çalışmasını sağlamak için gerçekleştirilen operasyonlar bütünüdür. Bu amaçla gerçekleştirilen operasyonlar, birçok planlama ve kontrol işlemini içinde barındırmaktadır. Planlama ve kontrol işlemleri; yönetim, finans, üretim ve pazarlama gibi temel işletme fonksiyonları ve bu fonksiyonlarla birlikte kullanılan tedarik zinciri yönetimi, stok yönetimi, talep yönetimi, satış yönetimi, kalite yönetimi ve lojistik yönetimi gibi çeşitli yönetim süreçleri için kilit bir rol oynamaktadır.

Planlama ve kontrol işlemleri, işletmelerde çevresel belirsizliklerin azaltılması ve operasyon risklerin düşürülmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu bağlamda, işletme yönetiminin merkezinde planlama ve kontrol işlemlerinin yer aldığı söylenebilir.

### **1.1. PLANLAMA VE KONTROL**

Planlama ve kontrol faaliyetleri, pazar talebini karşılama ve kaynakları pazara ulaştırma becerileriyle birlikte düşünülmelidir. Planlama ve kontrol, birçok açıdan arz ve talebi bir araya getiren sistemleri, süreçleri ve kararları sağlar [1, p. 290]. Yalnızca işletmeler değil, farklı amaçlarla gerçekleştirilen tüm organizasyon ve operasyonlarda da planlama ve kontrolün doğru şekilde uygulanması son derece önemlidir. Hem tasarım hem faaliyet süreçleri planlama doğrultusunda şekillenirken, bu süreçlerin devamlı ve doğru şekilde işleyişi ise kontrol sayesinde sağlanabilir.

#### **1.1.1. Planlama**

Planlama ve kontrol terimleri, bu iki kavramın birbirinden bağımsız olarak düşünülmemesi ve aralarında net bir ayrımın mevcut olmaması sebebiyle, çoğunlukla bir arada veya birbirinin yerine kullanılabilir. Planlama, gelecekte gerçekleştirilmesi düşünülen hedeflerin taslak olarak şekillendirilmesidir. Ancak plan, hedeflenen şeyin gerçekten hayata geçirilmesini garanti edemez. Planlar beklentilere dayalı olarak yapılır, ancak uygulamada bu beklentilerden sapmalar olabilir. Örneğin, tedarik zinciri yönetiminde ilgili süreçlerin planlaması yapıldıktan sonra; müşteri

fikirlerinde değişimler olabilir, tedarikçiler gereken teslimatları zamanında yapamayabilir ya da üretimde teknik aksaklıklar yaşanabilir. Bunların sonucunda ise; işletme fonksiyonlarının işleyişinde sapmalar ve bozulmalar meydana gelir.

### **1.1.2. Kontrol**

Kontrol, planlama sonrasında beklentilerin dışında gerçekleşen olaylarla ve değişikliklerle başa çıkma sürecidir [1, p. 290]. Kısa vadede, planların yeniden yapılandırılması gerekebilir ve bu durum kontrol sürecinin varlığını gerektirir. Kontrol, operasyonların ve süreçlerin yeniden hedeflenen noktaya getirilmesi için yapılması gereken müdahaleleri ifade eder. Örneğin, tedarik zinciri örneği düşünülüğünde; tedarikçiyle sorun yaşanması durumunda daha hızlı teslimat yapacak yeni bir tedarikçi bulunması veya müşterilerin tercihlerindeki değişimlere göre talep tahminlerinde güncelleme ve düzeltme yapılması gibi eylemler kontrol süreci kapsamında değerlendirilir. Kontrol faaliyetleri, planlama aşamasındaki varsayımların hatalı olduğu durumlarda dahi, planda belirlenen hedeflere ulaşılabilmesi için gerekli operasyonların gerçekleştirilmesine olanak sağlayacak ayarlamaların yapılmasını sağlar.

### **1.1.3. Uzun ve Kısa Vadede Planlama ve Kontrol Faaliyetleri**

Planlama ve kontrol faaliyetleri doğası gereği zamana bağlı olarak değişiklik gösterir. Uzun vadede, hangi amaçlara ulaşmak istendiği ve hangi kaynaklara ihtiyaç duyulacağı gibi kararlar göz önünde bulundurularak planlama yapılır. Uzun vadede, kontrol edilecek çok az şey olduğu için, kontrolden çok planlama ön plandadır. Örneğin, talep ve satış yönetiminde, gelecek dönemlerde gerçekleşmesi beklenen toplam talep miktarlarının belirlenmesi amacıyla uzun vadeli talep öngörülerini kullanılır. Orta vadede planlama ve kontrol faaliyetleri daha detaylı şekilde yapılabilir. Yine talep ve satış yönetiminde, genel talep ayrıntılı şekilde değerlendirilerek, karşılanması gereken talep miktarı daha detaylı olarak belirlenir. Aynı zamanda, bu dönemde alınan önlemler, plandan küçük sapmaların düzeltilebilmesine olanak sağlar. Bu önlemler, kısa vadede planlama ve kontrol faaliyetlerinin daha kolay gerçekleştirilmesini sağlar.

Kısa vadede planlama ve kontrol faaliyetleri büyük oranda belirlenmiştir ve büyük değişikliklerin yapılması zor olacaktır. Ancak, daha önce planlanmamış durumlarla karşılaşıldığında, kısa vadede müdahale etme olanağı daha yüksektir. Kısa vadede, müdahaleler ve planlarda yapılan değişiklikler ile operasyonların kalitesi, hızı, güvenilirliği, esnekliği ve maliyetleri dinamik olarak dengelenmeye çalışılır [1, p. 291]. Ancak, bunun yapılabilmesi için gerekli olan detaylı hesaplamaların gerçekleştirilmesi için yeterli zaman bulunamayabilir. Dolayısıyla, kısa vadede operasyon zamanı yaklaştıkça, kontrol faaliyetlerinin önemi ve etkinliği daha belirgin hale gelir.

## **1.2. TALEP YÖNETİMİNİN PLANLAMA VE KONTROLE ETKİSİ**

Planlama ve kontrol her türlü arz ve talebin bir araya getirilmesi süreci olarak kabul edilirse; bir operasyonun planlamasında ve kontrolünde verilen kararların yapısı da o operasyondaki talep yapısına ve arz yapısına bağlı olacaktır. Planlama ve kontrol faaliyetlerinde, talepteki ve arzdeki belirsizlikler büyük önem taşır. Çünkü belirsizlikler, planlama ve kontrol faaliyetlerinin sürekli ve doğru şekilde yürütülmesini her açıdan daha zor hale getirir [1, p. 294]. Belirsizliklerin varlığı sebebiyle, işletmelerde talep planlamasının ve yönetiminin doğru şekilde yapılması; işletme fonksiyonları ve bunların alt sistemlerindeki belirsizliklerin azaltılabilmesi ve sistemin bütünüyle ilgili daha doğru şekilde aksiyon alınabilmesi açısından son derece önemli bir faktördür. Talep ve satış planlaması; pazarlama fonksiyonunun merkezinde yer alan en önemli süreçtir ve bununla birlikte üretim, finans ve yönetim fonksiyonlarının da başlıca girdisini oluşturmaktadır. Özellikle; işletmelerin stok kontrolü, üretim planlaması, tedarik planlaması ve lojistik yönetimi gibi sistemlerinde gerçekleştirilen planlama ve kontrol operasyonlarında verilen kararlar, doğrudan talep planlaması ve yönetimi ile ilişkili olarak şekillendirilir. Finans yönetimi ve stratejik yönetim kararları ise; talep planlamasının bu sistemlerle birlikte değerlendirilmesi sonucunda belirlenir.

### **1.2.1. Talep Planlaması**

Talep planlaması, operasyon yönetimi sürecinde, gelecekte gerçekleşecek talebin büyüklüğünün ve zaman içerisinde nasıl şekilleneceğinin öngörülmesiyle ilgili olarak yapılan planlama çalışmalarının bütünüdür. Talep planlamasının odağında

geleceğe dönük kısa, orta ve uzun vadeli talep ve satış öngörülleri yer almaktadır. Talep planlaması kapsamında gerçekleştirilen öngörüller, tüm işletme fonksiyonlarının yönetiminde birçok operasyon için karar verme sürecindeki en önemli ve bağlayıcı dayanaklardan birisidir [2, p. 186].

Talep planlaması öngörülleri genellikle ve büyük oranda geçmiş verilere dayalı olarak yapılan analiz ve tahminleme yöntemleriyle belirlenir. Bunun yanında, müşteri taleplerini etkileyen birçok çevresel faktör de mevcuttur. Fiyat politikası, pazar ve rekabet koşulları, ekonomik faktörler, mevsimsellik veya dönemsellik gibi faktörler, talebin yapısına göre; talep büyüklüğüne farklı oranlarda etki edebilir. Geçmiş verilere ek olarak bu çevresel faktörlerin belirlenip kullanılması öngörüllerin doğruluk oranının yükselmesine katkıda bulunabilir. Ancak, talep üzerinde hangi çevresel faktörlerin etkisinin olduğunu ve bu faktörlerin ne oranda etki gösterdiklerini belirlemek çoğu durumda fazlaca zordur. Özellikle büyük ve çeşitliğin yüksek olduğu pazarlarda faaliyet gösteren işletmeler için talep planlamasındaki belirsizlik miktarı daha yüksek olabilir. Böyle bir durumda, geçmiş verilere dayalı olarak yapılan öngörüller daha önemli hale gelir. Bu noktada ise analitik ve algoritmik öngörü yöntemleri ön plana çıkmaktadır.

### **1.2.2. Talep Planlamasının Diğer Operasyonlar Üzerindeki Etkisi**

Talep planlamasının odağı işletme süreçlerinin nihai çıktısı olan satış aşamasıdır. Bir diğer deyişle, talep planlaması kararları doğrudan satışlara etki eder. Bu sebeple, satış öncesindeki tüm işletme süreçleri dolaylı olarak talep planlaması kararlarına bağlı şekilde gerçekleştirilir. Talep planlaması ne kadar doğru ve başarılı bir şekilde yürütülürse, diğer operasyonlardaki belirsizlikler de buna bağlı olarak azalır. Böylece, tedarik aşamasından satışa aşamasına kadar tüm üretim ve pazarlama süreçlerin daha etkin şekilde planlanması ve kontrolü mümkün olur. Bu sayede, finans ve yönetim kararlarındaki belirsizlikler de büyük oranda azaltılmış olur.

Stok kontrolünde, stok seviyesi müşteri taleplerini karşılayacak şekilde belirlenmelidir. Aynı zamanda, müşteri talebi öngörülerine göre sipariş süresi de göz önünde bulundurularak planlama yapılmalıdır. Bu sürede gerçekleşen talebin öngörülerin üzerinde olması ihtimali düşünülerek fazladan tutulması gereken emniyet stoku

seviyesine karar verilmesi gerekir. Bu seviyenin yüksek tutulması fırsat maliyeti oluşması olasılığını azaltırken stok maliyetlerinin yükselmesine sebep olur. Özellikle gıda ürünleri gibi özel koşullarda saklanması gereken ve kısa sürede bozulabilen bazı ürünlerde, stok maliyetinin daha yüksek olmasıyla birlikte, satılmadan bozulan ürünlerin üretim maliyetleri sebebiyle daha fazla zarar edilmesi gibi olumsuzlukların yaşanması olasıdır. Ters durumda ise; düşük stok seviyesi elde tutma maliyetlerini azaltırken, talebin stok seviyesinin üzerinde olması durumunda, özellikle kar marjı yüksek ürünler için fırsat maliyetleri nedeniyle zarar edilmesine sebep olur. Bu dengenin en düşük maliyetle sağlanması, talep öngörülerinin doğruluk oranının yüksek olmasına bağlıdır.

Üretim planlaması stoka üretilen sistemler haricinde, doğrudan talep öngörülerine bağlı şekilde yapılır. Makine ve işgücü planlaması ve programlaması da bu üretim planlarına bağlı olması sebebiyle dolaylı olarak talep öngörülerine dayanır. Hangi üründen ne kadar üretileceğine karar verildikten sonra, tedarik edilecek malzemelerin miktarının ve zamanının planlanması da buna bağlıdır. Finans fonksiyonu ise, üretim ve pazarlama fonksiyonları ile paralel şekilde işlediği için; talep planlaması bu fonksiyon için de temel girdiler sağlamaktadır.

### **1.3. TALEP PLANLAMASINDA KONTROL SÜRECİ**

Talep yönetimi ve planlaması, insan faktörünün etkisini yüksek derecede barındırdığı için; üretim veya stok yönetiminde olduğu gibi hem planlama hem kontrol süreçleri dengeli bir şekilde uygulanamaz. Talep yönetimi çok büyük bir oranda yalnızca talep planlaması sürecinden oluşur ve sadece kısa vadede satış aşamasında yapılan bazı küçük müdahaleler kontrol süreci olarak kabul edilebilir. Bunun dışında, talep yönetimi ve talep planlaması aynı anlamda kullanılır.

Talep planlaması, çeşitli öngörü yöntemlerini kullanarak satış hedeflerinin belirlenmesini sağlar. Bu öngörü yöntemlerinin başarısı, talep planlamasının sistemdeki önemi sebebiyle; sistem planlamasının başarısını doğrudan etkiler. Bu amaçla, birçok gelişmiş öngörü yöntemi kullanılabilir. Talebin dinamik yapısı ve içerisindeki küçük korelasyona sahip ancak etkisi tespit edilemeyecek ölçüde olan çok sayıda çevresel faktörün varlığı sebebiyle, deterministik öngörülerin yapılma ihtimali yoktur. Öngörü



yöntemi ne kadar başarılı olursa olsun, gerçekleşen talebin ilerleyen zaman içerisinde öngörülerin dışına çıkması kaçınılmazdır. Bu noktada, talep planlamasındaki sapmaların düzeltilmesi için, talep yönetimine kontrol süreçlerinin de dahil edilmesi gerekir.

### **1.3.1. Kontrol Sürecinin Talep Planlamasına Dahil Edilmesi**

Talep yönetimine kontrol süreci eklendiğinde, talep planlamasının da talepteki değişimle birlikte dinamik olarak düzeltilmesi mümkün hale gelecektir. Ancak talebin müdahaleler ile düzeltilmesi mümkün olmadığı için, kontrol süreci diğer sistemlerde olduğu gibi planın uygulama aşamasında kullanılamaz. Dolayısıyla, kontrol bileşeninin talep planlama sürecinin içerisine gömülmesi gereklidir. Özellikle, yapay zeka öğrenme modellerine dayalı yöntemlerle yapılan öngörülerde; dinamik modelleme kullanılarak, tahminci sistemin gerçekleşen her talep verisiyle tahmin modelini güncellemesi ve talepteki değişimle birlikte talebe uyum sağlaması gibi çözümler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemler, talep planlamasında kontrol süreçlerinin uygulanabilirliği açısından bir örnek teşkil edebilir.

### **1.3.2. Kontrol Teorisi Uygulamalarıyla Talep Planlamasının İyileştirilmesi**

Bu tez çalışmasında, talep planlamasına kontrol sürecinin dahil edilmesi ile talep planlaması çıktılarının iyileştirilmesine katkı sağlanacağı varsayımından yola çıkılarak; zaman serisi verileri ile yapılan talep öngörülerini üzerinde kontrol teorisi uygulamalarının gerçekleştirilmesini içeren bir yöntem ile bu öngörülerin iyileştirilmesine dair bir kontrol yaklaşımı önerilmiştir.

Kontrol teorisi, her ne kadar yalnızca kontrol ve otomasyon mühendisliği alanına özel bir yaklaşım gibi düşünülse de gerçekte çok daha geniş bir uygulama alanı mevcuttur. Üretim endüstrisinde 1950'lerden itibaren yaygın şekilde kullanılan PID kontrolcü uygulamaları, halihazırda neredeyse tüm teknolojik üretim sistemlerinde, üretim süreçlerin hatasız şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Özellikle, Endüstri 4.0 kapsamında otomasyon süreçlerinin endüstrinin tüm alanlarında kullanılmaya başlanmasıyla, kontrol mühendisliği uygulamalarından mühendislik dışı alanlarda da faydalanılmasının olumlu

sonuçlar doğuracağı öngörülmektedir. Bu ngrnn temeli, oldukça açık ve doğrudan bir yaklaşım doğrultusunda yapılan önermelere dayanmaktadır:

- Talep planlaması da tıpkı diğer endüstriyel süreçler gibi bir süreçtir. Tek farklılığı fiziksel bir sistem yerine soyut bir sistem içermesidir.
- Talep planlaması sürecinin girdileri bilinmekte ve ıktıları ölçülebilmektedir. Süreç girdisi talep öngörüsü verileri, çıktısı ise gerçekleşen satışlardır.
- Bu iki tespit doğrultusunda; diğer endüstriyel süreçlere uygulan otomatik kontrol sistemlerinin, benzer şekilde girdi ve çıktı ilişkisi üzerinden talep planlama sürecine de uygulanabileceği varsayımında bulunulabilir.

Son 20 yıl içerisinde, kontrol teorisi uygulamalarının planlama süreçlerinde kullanımının mümkün olduğunu ve bu sayede stok yönetimi, kapasite yönetimi ve üretim yönetimi gibi süreçlerin daha başarılı şekilde işletilebileceğini gösteren çeşitli çalışmalar yapılmıştır [3][4][5][6]. Bu alanda yapılan çalışmaların giderek artması da bu tez çalışmasında ne sürülen yaklaşımın doğruluğunu destekler niteliktedir.

## 2. ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜ YÖNTEMLERİ

### 2.1. ÖNGÖRÜ YÖNTEMLERİ

Gelecekteki olayların ve koşulların tahmin edilmesi öngörü olarak adlandırılır [7, p. 3]. Gelecek tahminlerinin, karar yapıcı süreçlerin içerisine dahil edilmesi bir zorunluluk olduğundan, öngörüler birçok organizasyon tipi için büyük önem taşımaktadır. Özellikle ticari işletmelerde öngörülerin gerekliliği çok daha fazladır. Örneğin, pazarlama departmanlarında, satış stratejilerinin belirlenmesi için güvenilir talep öngörülerine ihtiyaç duyulurken; finans ve stratejik yönetim süreçlerinde ise genel ekonomik göstergelerin öngörülerini ve gelecek projeksiyonları kullanılmaktadır.

Gelecekteki olayların öngörülerini, nedensellik ilkesi sebebiyle geçmişte gerçekleşen olaylara dayanmalıdır. Bunun için, öngörüler, geçmiş verilerin analiziyle elde edilen veri örüntüleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Öncelikle, geçmiş veri analiz edilerek, bu veriyi tanımlayan örüntüler tespit edilmelidir. Sonrasında ise, belirlenen örüntü geleceğe doğru uzatılarak öngörü elde edilir. Çoğu öngörü yönteminin dayandığı temel strateji, veriyi karakterize eden örüntünün gelecekte de devam edeceği varsayımdır. Bu varsayımın geçersiz olduğu durumlarda, öngörü yönteminin iyi tahminlerde bulunması beklenemez [7, p. 4]. Dolayısıyla, öngörüler çok hatalı sonuçlar vermeye başlamadan önce, öngörü sisteminde gerekli değişiklikler yapılmalıdır.

Tek bir en iyi öngörü modelinin varlığından söz etmek mümkün değildir. Gelecek tahmini yapmak için, farklı durumlarda kullanılacak çok sayıda farklı öngörü yöntemi vardır. Öngörü yöntemleri; niteliksel yöntemler ve niceliksel yöntemler olarak iki gruba ayrılabilir.

#### 2.1.1. Niteliksel Öngörü Yöntemleri

Niteliksel öngörüler öncelikle öznel ve insan yargılarına dayanır. Yeterli geçmiş verinin bulunmadığı durumlarda, sektör uzmanları tarafından tecrübelerine dayalı olarak yapılır. Yeni sektörlerde de uzun vadeli talep öngörülerini için de bu yöntemlere ihtiyaç duyulabilir. Panel yaklaşımı, Delphi yöntemi ve senaryo planlama yaygın olarak kullanılan niteliksel öngörü yöntemlerinden bazılarıdır.

#### 2.1.1.1. Panel Yaklaşımı

Panel yaklaşımı, herkesin açık ve özgür şekilde konuşabildiği bir odak grup tartışması gibi düşünülebilir. Farklı fikirlerin dile getirilebilmesi, panel yaklaşımının avantajıdır, ancak bir görüş birliğine varılması çoğu zaman zordur. Ayrıca, daha çok ses çıkaran veya daha yüksek statüdeki birinin görüşleri sürü psikolojisine neden olabilir.

#### 2.1.1.2. Delphi Yöntemi

Delphi yöntemi, en çok bilinen niteliksel yöntemlerden biridir. Uzmanlardan oluşan bir panel yaklaşımına dayalı, sistemli ve etkileşimli bir öngörü yöntemidir [8]. Panelin birey veya küçük bir grup tarafından etkilenmesini önlemek amacıyla, Delphi yönteminde uzmanlar fiziksel olarak birbirinden ayrıldıktan sonra, her uzmana seri şekilde sorular yöneltilir. Anonim olarak verilen yanıtlar grup tarafından değerlendirildikten sonra, uzmanlar grubun tepkisine bağlı olarak vermiş oldukları cevapları gözden geçirerek bu doğrultuda yeni birer cevap verirler. Bu süreç birkaç defa tekrarlandıktan sonra, grubun bir sonuca yakınsaması ile uzlaşmaya varılır.

#### 2.1.1.3. Senaryo Planlama

Senaryo planlama, büyük belirsizliklerin olduğu durumlarda dahi kullanılacak yöntemlerden biridir. Senaryo planlama, genellikle uzun vade öngörülerini için, yine panel yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilir. Panel üyelerinden genellikle bir dizi gelecek senaryosu oluşturmaları istenir. Daha sonra her senaryo üzerinde değerlendirme yapılır ve içerdiği riskler ele alınır. Delphi yönteminin aksine, senaryo planlamada bir uzlaşmaya varılması gerekli değildir. Ancak, farklı olası seçenekler gözden geçirilir ve senaryolar istenmeyen sonuçlardan kaçınmak ve istenen sonuçlara ulaşmak için harekete geçmek amacıyla sıralanır.

### 2.1.2. Niceliksel Öngörü Yöntemleri

Niceliksel öngörü yöntemleri, genel anlamda zaman serisi yöntemleri, nedensel yöntemler ve benzetim olarak üç alt gruba ayrılabilir.

### 2.1.2.1. Zaman Serisi Yöntemleri

En yaygın olarak kullanılan öngörü yöntemleridir. Bir verinin zamana bağlı olarak sıralanmış geçmiş verileri kullanılarak yapılır. Zaman serisi yöntemleri; bir veriyi en iyi açıklayan verinin, yine o verinin geçmişteki değerleri olduğu varsayımına dayanılarak öngöründe bulunan yöntemlerdir. Açıklayıcı faktörlerle ilgili yeterince veri bulunmadığı veya açıklayıcı faktörlerin veri ile düşük korelasyon gösterdiği durumlarda kullanılması uygundur. Genel olarak kullanılan matematik ve istatistik temelli ekonometrik yöntemlerin yanı sıra; makine öğrenmesi, derin öğrenme ve yapay sinir ağı gibi bilgisayar bilimi temelli optimizasyon yöntemleri de uygulanmaktadır.

### 2.1.2.2. Nedensel Yöntemler

Nedensel öngörü yöntemleri, bir veriyle yüksek korelasyon içinde bulunan ve bu veriyle ilişkisi nedensel olarak açıklanabilen diğer faktör veya faktörlerin verileri kullanılarak uygulanan öngörü yöntemleridir. Örneğin; istatistiksel açıdan bakıldığında, fiyat ve talep miktarı arasında genellikle ters yönlü ve yüksek korelasyon mevcuttur. Ekonomik yaklaşımda, ideal şartlar altında piyasadaki arz ve talep dengesinin sağlanacağı ve dolayısıyla bir ürünün fiyatı arttığında ekonomik insanın (homo economicus) o ürüne olan talebinin azalacağı varsayılır. Bu durumda istatistiksel ilişkinin nedensel olarak açıklanabilmesinden ötürü, fiyat ve talep miktarı arasında anlamlı bir ilişki olduğu çıkarımı yapılabilir. Böylece, talep öngörüsü yapılırken fiyat verileri kullanılabilir.

Nedensel yöntemler, açıklayıcı değişkenlerle birlikte zaman serisi verilerinin de kullanılmasına olanak sağlar. Örneğin; yağış öngörüsü yapılırken, farklı periyotlara göre düzenli olarak kaydedilmiş olan geçmiş yağış verileri ve daha önce yağış ile ilişkisi kanıtlanmış olan sıcaklık, nem ve rüzgar gibi açıklayıcı faktörlerin öngörü sırasında ölçümlenen verileri birlikte kullanılabilir.

Nedensel yöntemler, bir veya daha fazla açıklayıcı faktör içerebilir. Nedensel öngörü modellerinin oluşturulmasında, çoğunlukla en küçük ortalama karesel hata (LMSE: least mean square error) yaklaşımını içeren ekonometrik regresyon analizi yöntemi kullanılır. Bunun yanı sıra; bilgisayar bilimi temelli optimizasyon yöntemleri de yine yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 2.1.2.3. Benzetim

Benzetim (simülasyon) yöntemi, olası koşullara veya tercihlere bağlı değişkenlerin öngörülmesi yapılırken, bu koşulların veya tercihlerin değişkene etkisini gözlemlemek için kullanılır. Benzetim yöntemi aracılığıyla; nedensel yöntemler ile zaman serisi yöntemlerinin bir araya getirilerek farklı senaryolar altında nasıl öngörülerde bulunacağını görmek mümkündür. Benzetim yöntemi için doğrudan bir uygulama prosedürü bulunmaz. Dolayısıyla, her öngörü için o öngörüye özgü bir benzetim modeli oluşturulur. Benzetim yöntemleri; önceden belirlenmiş sabit senaryolar üzerinden gerçekleştirilebileceği gibi, matematiksel ve olasılıksal algoritmalar kullanılarak ya da yapay zeka ve diğer karar destek sistemleri aracılığı ile oluşturulan senaryolar doğrultusunda da uygulanabilir.

## 2.2. ZAMAN SERİLERİ

Zaman serisi belirli bir değişken üzerinde yapılan kronolojik gözlemler dizisidir [7, p. 4]. Gözlemler farklı uzunluktaki periyotlarla gerçekleştirilebilir. Zaman serileri; aylık, çeyreklik, yıllık periyotlarla yapılan gözlemlerle oluşturulabileceği gibi; bazı durumlarda haftalık, günlük, saatlik kısa periyotlu ölçümlerden veya iki yıllık, beş yıllık, on yıllık uzun periyotlarla elde edilen verilerle de oluşturulabilir [9, pp. 536-539]. Zaman serisi içerisinde yer alan her gözlem belirli bir zamana aittir. Dolayısıyla, her gözlemin dizi içerisindeki yeri belirlidir. Gözlemler zaman-bağımlı olarak kabul edilir ve dışsal etkenler zaman serisi analizine dahil edilmez. Zaman serisi öngörülerinin başlıca işlevi; gözlemler dizisinin, geçmiş değerlere bağlı olarak, gelecek zaman dilimlerine genişletilmesini sağlamaktır.

Zaman serisi verileri birkaç farklı türde değişim gösterebilir. Zaman serisindeki bu değişimler; düzensizlik içeren veya rassal değişimler, doğrusal veya doğrusal olmayan uzun vadeli trendler, mevsimsel veya dönemsel değişimler ve döngüsel değişimler olarak dört farklı temel bileşene ayrılabilir.

### **2.2.1. Düzensizlik İçeren veya Rassal Değişimler**

Düzensizlik içeren veya rassal değişimler, genellikle kısa zaman aralıkları içerisinde zaman serisinde düzensiz olarak meydana gelen hareketlerdir [9, pp. 269-270]. Düzensiz hareketler, bir periyottan diğer periyoda küçük değişimler şeklinde gerçekleşir. Düzensizlik içeren değişimler çoğunlukla herhangi bir açıklayıcı sebeple ilişkili değildir [10, pp. 82-83]. Dolayısıyla, bu değişimler belirli bir modele uymaz ve öngörülebilir değildir. Düzensiz veya rassal değişimler, hemen hemen tüm zaman serisi modellerinde açıklanamayan değişimleri ifade etmek için kullanılan bir bileşen olarak yer almaktadır.

### **2.2.2. Trendler**

Trend, zaman serileri içerisindeki zamana bağlı olarak gerçekleşen belirleyici artış ve azalışları ifade eden temel zaman serisi bileşeninden biridir. Trendler, bir zaman serisinde uzun vadeli olarak meydana genel ve bütünsel olarak artan, azalan veya durağan kalan hareketleri içerir [9, p. 480-483]. Trendler, doğrusal veya doğrusal olmayan tiplerde olabilir. Doğrusal artan veya azalan trendler, zaman içerisinde sabit hızla artış veya azalış gösterir ve doğru denklemleriyle ifade edilir. Doğrusal olmayan trendlerde ise değişimler geometrik şekilde gerçekleşir [10, pp. 83-84]. Doğrusal olmayan trendler; üstel, logaritmik, polinom ve lojistik gibi doğrusal olmayan fonksiyon tiplerinden gözlemlere uygun olan biri veya birkaçı birlikte kullanılarak ifade edilmeye çalışılır.

### **2.2.3. Mevsimsel veya Dönemsel Değişimler**

Mevsimsel veya dönemsel değişimler, düzenli olarak yinelenen sabit periyodik yapıya sahip bir zaman serisi bileşenidir. Ekonomik bağlamda mevsimsel veya dönemsel değişimler; iklim koşulları, toplumca kabul görmüş gelenekler, dini ve ulusal bayramlar, resmi tatiller, düzenli olarak tekrarlanan büyük ve önemli etkinlikler gibi periyodik olarak tekrar eden etkinliklere bağlı olarak gerçekleşebilir [9, p. 479-480].

### **2.2.4. Döngüsel Değişimler**

Döngüsel değişimler, trend çizgisi veya eğrisi üzerinde uzun süreler boyunca ortaya çıkan salınımları ifade eden zaman serisi bileşenidir. Bu salınımlar sabit bir periyoda sahip

değildir ve genel olarak yalnızca uzun dönemde gözlemlenebilir. Döngüsel değişimler, zaman serisi öngörülerinde doğrusal olmayan trend şeklinde modellenebilir.

Döngüsel değişimler ile mevsimsel veya dönemsel değişimler sıklıkla birbiriyle karıştırılmaktadır, ancak ikisi arasında önemli bir fark bulunur. Eğer değişimler sabit bir periyotla gerçekleşmiyorsa döngüsel; sabit bir periyotla ve bazı açılardan takvime uygun olarak tekrarlayan bir şekilde gerçekleşiyorsa mevsimsel veya dönemsel değişimler olarak adlandırılır. Ayrıca, döngüsel değişimlerin ortalama uzunluğu genellikle mevsimsel veya dönemsel değişimlerden daha fazladır ve salınımların genliği mevsimsel veya dönemsel değişimlere kıyasla daha değişken bir yapıdadır [11].

### 2.3. ZAMAN SERİSİ ANALİZİ

Bir zaman serisi analizinin önemli bir kısmı, zaman serisi verileri için uygun bir olasılıksal modelin veya model sınıfının belirlenmesi sürecidir. Zaman serisi içerisinde yer alan her bir  $x_n$  gözleminin, gelecekteki değerleri tahmin edilmeye çalışılan  $X_n$  rassal değişkeninin geçmişte gerçekleşen bir değeri olduğu varsayımında bulunulabilir. Gözlemlenen  $x_n$  verileri için tanımlanan bir zaman serisi modeli ise; geçmişte  $x_n$  gözlemlerini gerçekleştirdiği varsayılan  $X_n$  rassal değişkenleri dizisinin bileşik dağılımını veya yalnızca ortalama ve kovaryanslarını ifade eder [12, p. 6].

$X_n$  rassal değişkenleri dizisi için tanımlanan tam bir olasılıksal zaman serisi modelinin (1)'de gösterildiği şekilde tüm bileşik olasılıkları içermesi gerekir.

$$P(X_1 \leq x_1, \dots, X_{n-1} \leq x_{n-1}, X_n \leq x_n), x_n \in \mathbb{R}, n \in \mathbb{Z}^+ \quad (1)$$

Genellikle tahmin edilmesi gereken çok fazla parametre içereceği için, bu şekilde bir zaman serisi modelinin zaman serisi analizinde kullanılması uygun değildir. Bunun yerine bileşik dağılımın yalnızca birinci ve ikinci momentleri  $E[X_n]$  ve  $E[X_n \cdot X_{n+k}]$  ( $k \in \mathbb{N}$ ) kullanılır. Tüm bileşik dağılımların, çok değişkenli Gauss dağılımına uyduğu özel durumda;  $X_n$ 'in ikinci derece özellikleri, bileşik dağılımları tam olarak ifade eder ve dolayısıyla  $X_n$  rassal değişkenleri dizisinin tüm olasılıksal karakterini verir. Yalnızca ikinci derece özelliklere bakıldığında, genellikle belirli miktarda bilgi kaybedilmiş olur. Ancak hataların en küçük karesel ortalamasının doğrusal tahmini yalnızca ikinci derece



özelliklere bağlıdır ve bu durum ikinci derece özelliklerin kullanım gerekçelerini daha iyi şekilde temellendirmektedir.

Zaman serisi analizinde gözlemlenen verilerle uyumlu bir model bulmak için kullanılabilir bazı temel kavramlar; durağan süreçler ve otokorelasyon fonksiyonu, trend analizi, mevsimsellik ve döngüsellik analizi ile harmonik regresyon olarak sayılabilir.

### 2.3.1. Otokovaryans ve Otokorelasyon Fonksiyonu

Her  $n$  ve  $k$  pozitif tam sayısı için,  $\{X_n\}$  rassal (stokastik) bir süreç ve  $E[X_n^2]$  sınırlı bir sayı olmak üzere,  $\{X_n\}$ 'in ortalama, varyans ve otokovaryans fonksiyonu sırasıyla (2), (3) ve (4) şeklinde tanımlanır.

$$\mu_{X_n} = E[X_n] = \mu_X \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{X_n} &= Var(X_n) = \sigma_X \\ &= E[(X_n - E[X_n])^2] \\ &= E[(X_n - \mu_{X_n})^2] = E[X_n^2] - \mu_X^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{X_n, X_{n+k}}[k] &= Cov(X_n, X_{n+k}) \\ &= E[(X_n - E[X_n]) \cdot (X_{n+k} - E[X_{n+k}])] \\ &= E[(X_n - \mu_X) \cdot (X_{n+k} - \mu_X)] = E[X_n \cdot X_{n+k}] - \mu_X^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$\{X_n\}$  rassal süreci için otokorelasyon fonksiyonu, otokovaryans fonksiyonunun normalize edilmesi amacıyla tanımlanır ve ortalamanın 0'a kaydırıldığı durumda otokovaryans değerine eşittir. Böylece, otokorelasyon fonksiyonunun varyansa oranlanması ile normalize edilmiş korelasyon katsayısı elde edilir. Otokorelasyon fonksiyonu  $R_{X_n, X_{n+k}}[k]$  ve otokorelasyon katsayısı  $\rho_{X_n, X_{n+k}}[k]$  sırasıyla (5) ve (6) ile gösterilmiştir.

$$R_{X_n, X_{n+k}}[k] = E[X_n \cdot X_{n+k}] = \gamma_{X_n, X_{n+k}}[k] + \mu_X^2 \quad (5)$$

$$\rho_{X_n, X_{n+k}}[k] = \frac{R_{X_n, X_{n+k}}[k]}{\sigma_X^2} = \frac{\gamma_{X_n, X_{n+k}}[k]}{\gamma_{X_n, X_{n+k}}[0]} \quad (6)$$

### 2.3.2. Durağanlık

Durağanlık; bir rassal sürecin dağılımını belirleyen istatistiksel parametrelerin, süreç gözlemlerinin başlangıç zamanına bağlı olarak değişim göstermemesi durumunu ifade eden kavramdır. Rassal süreçlerin durağanlığı, geniş anlamda durağanlık ve dar anlamda durağanlık kavramlarıyla ifade edilir.

#### 2.3.2.1. Geniş Anlamda Durağanlık

Geniş anlamda durağanlık (WSS: wide-sense stationarity), zayıf durağanlık veya kovaryans durağanlığı olarak adlandırılan durağanlık ölçütü; bir rassal sürecin 1. momentinin ve otokovaryans fonksiyonunun zamana bağlı olarak değişmemesi ve 2. momentinin tüm gözlemler için sınırlı değerler alması durumunu ifade eder.

Bir  $\{X_n\}$  rassal süreci, her  $n$  ve  $k$  doğal sayısı için (7), (8) ve (9) koşullarını sağlıyor ise geniş anlamda durağandır.

$$\mu_{X_n}[n] = E[X_n] = E[X_{n+k}] = \mu_X \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{X_n, X_{n+k}}[n, n+k] &= \gamma_{X_n, X_{n+k}}[|n - (n+k)|, 0] = \gamma_{X_n, X_{n+k}}[k] \\ &= E[X_n X_{n+k}] - \mu_X^2 = R_{X_n, X_{n+k}}[k] - \mu_X^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\sigma_{X_n}^2[n] = E[(X_n - \mu_{X_n})^2] = \gamma_{X_n, X_n}[0] = \sigma_X^2 < \infty \quad (9)$$

Bu durumda,  $\{X_n\}$  süreci içerisindeki tüm gözlemler için; beklenen değerler zamana bağlı olarak değişmeyen sabit bir değere, varyans değerleri zamana bağlı olarak değişmeyen sınırlı ve sabit bir değere, otokovaryans değerleri ise zamana bağlı olarak değişmeyen ve yalnızca gözlemler arasındaki zaman aralığının büyüklüğüne göre değişim gösteren bir değere sahip olmaktadır.

#### 2.3.2.2. Dar Anlamda Durağanlık

Dar anlamda durağanlık (SSS: strict-sense stationarity), güçlü durağanlık veya tam durağanlık olarak adlandırılan durağanlık ölçütü; bir rassal sürecin 1. momentinin ve otokovaryansının zamana bağlı olarak değişmemesi, tüm kümülatif ve bileşik kümülatif dağılımlarının zamana bağlı olarak değişmemesi durumunu ifade eder.

Dar anlamda durağan bir  $\{X_n\}$  rassal süreci içerisindeki tüm gözlemlerin kümülatif dağılım fonksiyonları, her  $n$  ve  $k$  doğal sayısı için (10) ve (11) koşullarını sağlıyor ise  $\{X_n\}$  rassal süreci dar anlamda durağandır.

$$F(X_n) = F(X_{n+k}) \quad (10)$$

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = F(X_{1+k}, X_{2+k}, \dots, X_{n+k}) \quad (11)$$

Geniş anlamda durağanlık; farklı gözlemler için farklı kümülatif dağılım fonksiyonlarına sahip olabilir. Bu nedenle, geniş anlamda durağanlık her zaman dar anlamda durağanlığı göstermez. Dar anlamda durağanlık ise, 2. momentin sınırlı değerler almasını gerektirmez. Bu nedenle, dar anlamda durağanlık da her zaman geniş anlamda durağanlık koşullarını sağlamaz.

### 2.3.2.3. Durağan Olmayan Zaman Serileri

Durağan zaman serileri, öngörülebilir sınırlar içerisinde değişim göstermesi sebebiyle önemlidir. Bu sebeple öngörü yöntemlerinin çoğu, zaman serisinin durağan dağılım gösterdiği varsayımıyla gerçekleştirilir. Öte yandan, gerçek hayatta gözlemlenen zaman serileri çoğunlukla durağan değildir. Durağanlığın olmadığı durumlarda ise; zaman serileri öngörülemeyen veya olağan dışı değişimler gösterebilir.

Bu sebeple durağan olmayan zaman serileri için öngörü modeli oluşturmak için çeşitli dönüşümlerin uygulanması gerekebilir. Durağan olmayan bazı zaman serileri; serinin fark denklemlerinin yazılması, verilerin logaritma veya karekök değerlerinin alınması, zaman serisi içerisindeki trend bileşeni çıkarıldıktan sonra artan değerlerin kullanılması, mevsimsellik ve döngüsellik içeren zaman serilerinde parçalı veya periyodik modeller kullanılması gibi çeşitli yöntemler uygulanarak durağanlaştırılmış yeni zaman serilerine dönüştürülebilir. Durağanlaştırılan bu zaman serileri üzerinden öngörü yapıldıktan sonra, çıktılar aynı dönüşüm yönteminin ters yönde uygulanmasıyla tekrar orijinal zaman serisi formuna dönüştürülür. Böylece, durağan olmayan zaman serileri için öngörüle bulunma imkanı elde edilmiş olur.

### 2.3.3. Temel Rassal Süreçler

#### 2.3.3.1. IID Gürültü

İçerisinde trend, mevsimsellik veya döngüsellik barındırmayan ve yalnızca bağımsız ve özdeşçe dağılmış (IID: independently and identically distributed) sıfır ortalamalı rassal değişkenlerin oluşturduğu en temel zaman serisi modeli IID gürültü olarak ifade edilir. Her  $n$  ve  $k$  pozitif tam sayısı için  $X_n$  bir rassal değişken,  $x_n$  bir reel sayı ve  $F(x_n)$  rassal değişken  $X_n$ 'in kümülatif dağılım fonksiyonu olmak üzere; IID gürültü için (12) ve (13) geçerlidir.

$$\begin{aligned} P(X_1 \leq x_1, \dots, X_{n-1} \leq x_{n-1}, X_n \leq x_n) \\ = P(X_1 \leq x_1) \cdot \dots \cdot P(X_{n-1} \leq x_{n-1}) \cdot P(X_n \leq x_n) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} = F(x_1) \cdot \dots \cdot F(x_{n-1}) \cdot F(x_n) \\ P(X_{n+k} \leq x_{n+k} | X_1 = x_1, \dots, X_n = x_n) = P(X_{n+k} \leq x_{n+k}) \end{aligned} \quad (13)$$

Dolayısıyla, (13)  $X_n$  rassal değişkeninin geçmiş gözlemlerinin  $X_{n+k}$ 'in öngörülmesinde bir katkı sağlamayacağını göstermektedir. Gözlemlenen  $X_n$  değerleri ve hataların karesel ortalamasını minimize eden  $y(X_n)$  fonksiyonu için  $E[(X_{n+k} - y(X_1, X_{n-1}, X_n))^2]$  değeri sıfıra eşittir. Bu durum IID gürültünün öngörü için ilgisiz bir süreç olduğunu gösterse de IID gürültü daha karmaşık zaman serisi modelleri için bir yapı taşı olarak kullanılmaktadır.

Zaman serisi gözlemleri içerisinde, IID gürültü, öngörü modelleri ile açıklanamayacak en temel (atomik) değişim bileşeni olarak kabul edilir. Öngörü modellerinde, hata teriminin içerdiği açıklayıcı verinin olabildiğince küçültülmesi ve bu verinin açıklayıcı terimler ile ifade edilebilmesi amaçlanır. Bu nedenle, öngörü modelleri oluşturulurken; hata teriminin, yalnızca gözlemlenen veri içerisinde modellenerek öngörülemez olan IID gürültü düzeyine indirgenmesi hedeflenir. Böylece, zaman serisi içerisinde öngörülebilir bulunulabilecek tüm veri, öngörü modeli ile açıklanmış olacaktır.

### 2.3.3.2. Beyaz Gürültü

Beyaz gürültü (WN: white noise); sıfır ortalama ( $\mu=0$ ) ve sıfır otokorelasyon ( $R[k]=0$ ,  $k \neq 0$ ) değerleri ile sınırlı ve sabit bir varyansa ( $\sigma^2 < \infty$ ) sahip olan rassal süreçlere verilen genel addır. Beyaz gürültü, WSS rassal süreçlerin modellenmesinde kullanılan geniş kapsamlı bir zaman serisi modelidir. Bir  $\{X_n\}$  beyaz gürültü sürecinin dağılımı,  $n$  bir pozitif tam sayı olmak üzere;  $X_n \sim \text{WN}(0, \sigma^2)$  şeklinde ifade edilir.

Beyaz gürültü, sıklıkla IID gürültü ile karıştırılmaktadır. Bir rassal sürecin beyaz gürültü olarak nitelendirilebilmesi için; sürecin çıktıları arasında korelasyon bulunmaması gerekir, fakat çıktılarının IID olmasına gerek yoktur. IID gürültü sürecinin çıktılarının ise; tanım gereği, bağımsız ve özdeş dağılıma sahip olması gerekmektedir. Dolayısıyla, her IID gürültü aynı zamanda bir beyaz gürültü iken, beyaz gürültü (beyaz Gauss gürültüsü hariç) bir IID gürültü değildir.

### 2.3.3.3. İkili Süreç

İkili süreç; eşit olasılıkla gerçekleşen, ayrık ve tamamlayıcı iki çıktıya sahip değişkenlerden (Bernoulli değişkeni) oluşan bir Bernoulli rassal sürecini ifade eder ve binom dağılımı gösterir. Bir  $\{X_n\}$  ikili rassal sürecinin dağılımı,  $n$  bir pozitif tam sayı ve  $X_n \in \{-1, 1\}$  olmak üzere;  $X_n \sim B(n, 0.5)$  şeklinde gösterilir.

$$\mu_{X_n}[n] = E[X_n] = 0 \quad (14)$$

$$\sigma_{X_n}^2[n] = E[X_n^2] = \sigma_X^2 < \infty \quad (15)$$

$$\gamma_{X_n, X_{n+k}}[k] = R_{X_n, X_{n+k}}[k] = E[X_n X_{n+k}] = 0, k \in \mathbb{Z}^+ \quad (16)$$

$$F(X_n) = F(X_{n+k}) = B(1, 0.5) \quad (17)$$

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n) = F(X_{1+k}, X_{2+k}, \dots, X_{n+k}) = B(n, 0.5) \quad (18)$$

İkili süreç (14), (15), (16), (17) ve (18) koşullarını sağladığı için, hem WSS hem de SSS bir zaman serisidir. İkili süreç içerisinde gerçekleşen gözlemlerin sayısı arttıkça, süreç kesikli zamanda Gauss dağılımına yakınsar. Bu nedenle, her ikili süreç aynı zamanda bir beyaz Gauss gürültüsü ve dolayısıyla bir IID gürültüdür.

### 2.3.3.4. Rassal Yürüyüş

Bir  $\{X_n\}$  rassal süreci için; her  $n$  pozitif tam sayısı için gerçekleşen süreç çıktılarının,  $X_0$  değerine  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  rassal değişkenlerinin kümülatif olarak eklenmesiyle elde edildiği durumda, bu süreç, yalın rassal yürüyüş veya kısaca rassal yürüyüş olarak adlandırılır. Bir  $\{X_n\}$  rassal yürüyüş süreci,  $n$  bir pozitif tam sayı ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere;  $X_n = X_{n-1} + u_n$  veya  $X_n = X_0 + \sum_{i=1}^n u_i$  şeklinde tanımlanabilir. Eğer  $u_n$  aynı zamanda bir ikili süreç ( $u_n \sim B(n, 0.5)$ ,  $u_n \in \{-1, 1\}$ ) ise;  $\{X_n\}$  rassal yürüyüş süreci, basit simetrik rassal yürüyüş olarak adlandırılır.

Rassal yürüyüş  $\{X_n\}$  için,  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere, ortalama, varyans ve otokorelasyon değerleri (19), (20) ve (21) ile gösterilir.

$$\mu_X = E[X_n] = X_0 \quad (19)$$

$$\sigma_X^2 = Var[X_n] = n\sigma^2 \quad (20)$$

$$R_{X_n, X_{n+k}}[k] = E[X_n \cdot X_{n+k}] = n\sigma^2, \quad k \in \mathbb{Z}^+ \quad (21)$$

Varyans ve otokorelasyon değerleri zamana bağlı olarak değiştiği için rassal yürüyüş süreci durağan bir süreç değildir.  $\{X_n\}$  rassal yürüyüş sürecinin birinci farkları ise, (22) ile tanımlanabilir.

$$\nabla X_n = X_n - X_{n-1} = u_n \Rightarrow \nabla X_n \sim WN(0, \sigma^2) \quad (22)$$

Dolayısıyla; rassal yürüyüş sürecinin birinci farkları WSS, basit simetrik rassal yürüyüş sürecinin birinci farkları ise SSS zaman serisi olur. Bu durumda, rassal yürüyüş süreci fark durağan bir süreç olarak adlandırılır.

### 2.3.3.5. Sürüklenen Rassal Yürüyüş

Bir  $\{X_n\}$  rassal süreci için; her  $n$  pozitif tam sayısı için gerçekleşen süreç çıktılarının,  $X_0$  değerine sabit bir  $\alpha$  sürüklenme teriminin ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  rassal değişkenlerinin kümülatif olarak eklenmesiyle elde edildiği durumda, bu süreç, sürüklenen rassal yürüyüş olarak adlandırılır. Bir  $\{X_n\}$  sürüklenen rassal yürüyüş süreci,  $n$  bir pozitif tam sayı ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere;  $X_n = \alpha + X_{n-1} + u_n$  veya  $X_n = X_0 + n\alpha + \sum_{i=1}^n u_i$  şeklinde tanımlanabilir.

Sürüklenen rassal yürüyüş  $\{X_n\}$  için; ortalama, varyans ve otokorelasyon değerleri sırasıyla (23), (24) ve (25) olarak hesaplanır.

$$\mu_X = E[X_n] = X_0 + n\alpha \quad (23)$$

$$\sigma_X^2 = Var[X_n] = n\sigma^2 \quad (24)$$

$$R_{X_n, X_{n+k}}[k] = E[X_n \cdot X_{n+k}] = k\alpha\mu_X + n\sigma^2, \quad k \in \mathbb{Z}^+ \quad (25)$$

Ortalama, varyans ve otokorelasyon değerlerinin tümü zamana bağlı olarak değiştiği için sürüklenen rassal yürüyüş süreci durağan bir süreç değildir.  $\{X_n\}$  sürüklenen rassal yürüyüş sürecinin birinci farkları, (26)'da gösterilen şekilde tanımlandığında, ortalaması  $\alpha$  ve varyansı  $\sigma^2$  olmak üzere; zamana bağlı olmayan, sabit ve sınırlı değerler alır.

$$\nabla X_n = X_n - X_{n-1} = \alpha + u_n, \quad X^* = \nabla X_n - \alpha \Rightarrow X_n^* \sim WN(0, \sigma^2) \quad (26)$$

Birinci fark süreci içerisindeki değişimler WN dağılımına sahip olduğu için, otokorelasyon fonksiyonu da zamandan bağımsızdır. Dolayısıyla, sürüklenen rassal yürüyüş sürecinin birinci farkları WSS zaman serisi olur.

### 2.3.3.6. Belirleyici Trend

Bir  $\{T_n\}$  süreci için; her n pozitif tam sayısı için gerçekleşen süreç çıktılarının, bir doğru denklemine WN rassal değişkeninin eklenmesiyle elde edildiği durumda, bu süreç belirleyici trend zaman serisi olarak adlandırılır.  $\{T_n\}$  süreci,  $\alpha$  ve  $\beta$  sabit birer reel sayı ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere;  $T_n = \alpha + \beta n + u_n$  ifadesiyle gösterilir.  $\{T_n\}$  belirleyici trend süreci için, ortalama, varyans ve otokorelasyon değerleri sırasıyla (27), (28) ve (29) şeklinde hesaplanır. Ortalama ve otokorelasyon değerleri zamana bağlı olarak değiştiği için, belirleyici trend süreci durağan olmayan bir zaman serisidir.

$$\mu_T = E[T_n] = \alpha + \beta n \quad (27)$$

$$\sigma_T^2 = Var[T_n] = \sigma^2 < \infty \quad (28)$$

$$R_{T_n, T_{n+k}}[k] = E[T_n \cdot T_{n+k}] = \mu_T^2 + k\mu_T\beta \quad (29)$$

$\{T_n\}$  belirleyici trend sürecinden,  $\hat{T} = \alpha + \beta n$  trend doğrusunun çıkartılması ile elde edilen  $\{T_n^*\}$  süreci;  $\{T_n\}$  sürecinin rassal bileşeni  $u_n$ 'e eşit olur. Dolayısıyla,

$T_n^* \sim WN(0, \sigma^2)$  olacağı için,  $\{T_n^*\}$  süreci de WSS bir zaman serisi olur. Bu durumda, belirleyici trend süreci, trend durağan bir süreç olarak adlandırılır.  $\{T_n\}$  sürecinin birinci fark denklemi ise (30) şeklinde yazılabilir.

$$\nabla T_n = T_n - T_{n-1} = \beta + u_n - u_{n-1} \quad (30)$$

Bu durumda; ortalaması  $\beta$ , varyansı  $2\sigma^2$  otokorelasyon fonksiyonu ise 0 değerine sahip olacağı için,  $\{T_n\}$  sürecinin birinci farkları da WSS bir zaman serisidir. Bu sebeple,  $\{T_n\}$  süreci aynı zamanda fark durağan bir süreçtir.

### 2.3.3.7. Belirleyici Trend ile Sürüklenen Rassal Yürüyüş

Bir  $\{X_n\}$  rassal süreci için; her n pozitif tam sayısı için gerçekleşen süreç çıktılarının,  $X_0$  değerine sabit bir  $\alpha$  sürüklenme teriminin,  $\beta n$  belirleyici trend bileşeninin ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  rassal değişkenlerinin kümülatif olarak eklenmesiyle elde edildiği durumda, bu sürece belirleyici trend ile sürüklenen rassal yürüyüş adı verilir.  $\{X_n\}$  süreci;  $X_n = \alpha + \beta n + X_{n-1} + u_n$  veya  $X_n = X_0 + n\alpha + \beta \sum_{j=1}^n j + \sum_{i=1}^n u_i$  şeklinde tanımlanır. Dolayısıyla,  $\{X_n\}$  belirleyici trend ile sürüklenen rassal yürüyüş sürecinin ortalama, varyans ve otokorelasyon değerlerinin tümü zamana bağlı olarak değişir. Bu sebeple, belirleyici trend ile sürüklenen rassal yürüyüş süreci durağan olmayan bir süreçtir.

$\{X_n\}$  süreci içerisindeki belirleyici trend bileşeni, her n pozitif tam sayısı için,  $T_n = \alpha + \beta n$  doğru denklemiyle ifade edildiğinde;  $\{X_n\}$  sürecindeki tüm gözlemlerden trend bileşeni çıkarılarak elde edilen bir  $\{X_n^*\}$  sürecinin  $X_n^* = X_n - T_n = X_0 + \sum_{i=1}^n u_i$  şeklinde tanımlanmasıyla,  $\{X_n^*\}$  süreci bir yalın rassal yürüyüş süreci olacaktır. Dolayısıyla,  $\{X_n^*\}$  sürecinin birinci farkları alındığında;  $WN(0, \sigma^2)$  dağılımına sahip bir WSS zaman serisi elde edilir.

### 2.3.4. Zaman Serisi Bileşenlerinin Ayrıştırılması

Zaman serileri genellikle; trend veya döngüsel değişimler, mevsimsel veya dönemsel değişimler ile düzensiz veya rassal değişimler şeklinde üç farklı bileşene ayrıştırılarak analiz edilebilir. Trend veya döngüsel değişimler  $T_n$ , mevsimsel veya dönemsel değişimler  $S_n$  ve düzensiz veya rassal değişimler  $R_n$  olmak üzere; bu bileşenleri içeren bir



$X_n$  zaman serisi, toplam formunda  $X_n = T_n + S_n + R_n$  şeklinde veya çarpım formunda  $X_n = T_n \cdot S_n \cdot R_n$  şeklinde ayrıştırılabilir. Çarpım formunda ayrıştırılan zaman serisi denklemi, doğal logaritma değerleri alınarak  $\ln(X_n) = \ln(T_n) + \ln(S_n) + \ln(R_n)$  şeklinde toplam formuna getirilebilir.

Toplam formundaki zaman serilerinde; önce trend veya döngüsel değişim bileşenin tahmincisi  $\widehat{T}_n$  belirlenerek  $X_n - \widehat{T}_n = S_n + R_n$  denklemi oluşturulur. Sonrasında, bu denklem üzerinden, mevsimsel veya dönemsel değişim bileşenin tahmincisi  $\widehat{S}_n$  belirlenir. Son olarak, düzensiz veya rassal değişimcilerin tahmincisini belirlemek için  $\widehat{R}_n = X_n - \widehat{T}_n - \widehat{S}_n$  denklemi kullanılır ve bu şekilde zaman serisi için öngörü modeli oluşturulur.

Çarpım formundaki zaman serilerinde; öncelikle zaman serisinin logaritma değerleri alınır. Logaritmik model üzerinden trend veya döngüsel değişim bileşenin tahmincisi  $\widehat{T}_n$  hesaplanarak  $X_n/\widehat{T}_n = S_n \cdot R_n$  denklemi oluşturulur. Sonrasında, bu denklem üzerinden, mevsimsel veya dönemsel değişim bileşenin tahmincisi  $\widehat{S}_n$  belirlenir. Son olarak, düzensiz veya rassal değişimcilerin tahmincisi,  $\widehat{R}_n = X_n/(\widehat{T}_n \cdot \widehat{S}_n)$  denklemi ile belirlenerek zaman serisi için öngörü modeli oluşturulur.

### 2.3.5. Trend Analizi

#### 2.3.5.1. Doğrusal Trend Analizi

Eğer bir zaman serisi, zamana bağlı olarak doğrusal artan veya azalan bir belirleyici trend gösteriyorsa; bu trend için doğrusal bir öngörü modeli kullanılır. Bu durumda, doğrusal trend çizgisinin eğimi ve 0 anında alacağı kesme değerlerinin hesaplanması gerekir. Doğrusal bir belirleyici trend süreci  $T_n$ ,  $\alpha$  kesme değeri,  $\beta$  trend çizgisinin eğimi ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere;  $T_n = \alpha + \beta n + u_n$  şeklinde ifade edilebilir. Doğrusal trend için,  $\widehat{T}_n = \alpha + \hat{\beta}n$  şeklinde bir öngörü modeli oluşturulduktan sonra LMSE yaklaşımı ile  $E[(T_n - \widehat{T}_n)^2]$  değerini minimize eden  $\alpha$  ve  $\hat{\beta}$  değerleri hesaplanır.

### 2.3.5.2. Doğrusal Olmayan Trend Analizi

Doğrusal olmayan trend gösteren zaman serilerinde; trend, zamana bağlı olarak polinom, üstel veya logaritmik şekillerde artış veya azalış gösterir. Bunlara ek olarak, uzun vadeli döngüsel değişimler de doğrusal olmayan trend modelleri ile açıklanmaktadır.

Eğer trend polinom eğrisi şekilde değişiyor ise, en uygun dereceden bir polinom modeli kullanılır. Kullanılacak polinomun derecesi, anlamlı katsayıya sahip olan en yüksek dereceli terime ve belirleme katsayısı değerine göre kıyaslama yapılarak seçilir. Polinom katsayıları ise LS yöntemiyle belirlenir. Polinom eğrisi şeklindeki bir trend süreci  $T_n$ ,  $\alpha$  kesme değeri,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$  polinomun katsayıları ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere;  $T_n = \alpha + \beta_1 n + \beta_2 n^2 + \dots + \beta_p n^p + u_n$  denklemiyle ifade edilir. Bu trend için,  $k \leq p$  olmak üzere;  $\widehat{T}_n = \alpha + \widehat{\beta}_1 n + \widehat{\beta}_2 n^2 + \dots + \widehat{\beta}_k n^k$  şeklinde bir öngörü modeli oluşturulur ve LMSE koşulunu sağlayan polinom katsayı değerleri hesaplanır.

Eğer trend zamana bağlı olarak üstel şekilde değişiyor ise, gözlem değerlerin doğal logaritmaları alınarak doğrusal değişen bir zaman serisi modeli elde edilir. Sonrasında, LMSE yaklaşımıyla doğrusal modelin eğim ve kesme değerleri hesaplanır. Üstel olarak değişen bir trend süreci  $T_n$ , A katsayı, B taban sayısı, k üssün katsayısı ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere;  $T_n = A \cdot B^{kn} + u_n$  denklemiyle ifade edilir. Bu trend için  $\widehat{T}_n = A \cdot \widehat{B}^{kn}$  şeklinde bir öngörü modeli oluşturulur. Modelin doğal logaritması alındığında (31) elde edilir.

$$\ln(\widehat{T}_n) = \ln(A \cdot \widehat{B}^{kn}) = \ln(A) + \ln(\widehat{B}) \cdot k \cdot n \quad (31)$$

$\widehat{T}_n^* = \ln(\widehat{T}_n)$ ,  $\alpha = \ln(A)$ ,  $\widehat{\beta} = \ln(\widehat{B})k$  terimleri (31)'de yerine konulduğunda;  $\widehat{T}_n^* = \alpha + \widehat{\beta}n$  formunda doğrusal bir trend modeli elde edilir. Doğrusal model için  $\alpha$  ve  $\widehat{\beta}$  değerleri hesaplandıktan sonra, bu model ile öngörülen değerler yeniden üstel forma dönüştürülerek kullanılır. Trendin zamana bağlı olarak logaritmik şekilde değişim gösterdiği durumlarda ise bu yöntemin tersi uygulanabilir.

### 2.3.6. Üstel Düzleştirme Yöntemi

Üstel düzleştirme yöntemi, genellikle belirleyici bir trend veya mevsimsellik örüntüsü göstermeyen zaman serisi verileri için kullanılan bir öngörü yöntemidir. Üstel düzleştirme yönteminde öngörü değeri; bir önceki gözlem için yapılan öngörü değerine,

bir önceki öngörüde gerçekleşen hata teriminin bir düzeltme katsayısı ile çarpılarak eklenmesi sonucunda elde edilir. Dolayısıyla bu yöntemle, yalnızca bir sonraki gözlem için tahminde bulunulabilir.

Üstel düzeltme yönteminde  $n$  bir pozitif tam sayı,  $\alpha$  düzeltme katsayısı ( $0 < \alpha < 1$ ),  $X_n$  gerçekleşen gözlem değerleri,  $\widehat{X}_n$  öngörü değerleri ve  $\widehat{X}_0$  terimi  $n=1$  gözleminin öngörüsü için seçilen başlangıç değeri olmak üzere, öngörü modeli (32) ile gösterilebilir.

$$\begin{aligned}\widehat{X}_n &= \widehat{X}_{n-1} + \alpha(X_{n-1} - \widehat{X}_{n-1}) \\ &= \alpha X_{n-1} + (1 - \alpha)\widehat{X}_{n-1} \\ &= \sum_{i=0}^{n-2} [\alpha(1 - \alpha)^i X_{n-i}] + (1 - \alpha)^{n-1} \widehat{X}_0\end{aligned}\quad (32)$$

Üstel düzeltme yönteminde geçmiş gözlemlerin etkisi geriye doğru üstel olarak küçülür. Düzeltme katsayısı  $\alpha$ , 1'e yaklaştıkça yakın geçmişteki gözlemlerin etkisi artarken 0'a yaklaştıkça uzak geçmişteki gözlemlerin etkisi artar.  $\widehat{X}_0$  ve  $\alpha$  değerleri, LMSE koşulunu sağlayacak şekilde seçilir.

### 2.3.7. Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) Modelleri

#### 2.3.7.1. Otoregresif (AR) Modeller

Otoregresif terimi, kendi verileri ile kendini açıklayan zaman serilerini ifade eder. Otoregresif (AR: autoregressive) modeller; bir zaman serisinin geçmişte gerçekleşen değerlerinin doğrusal bileşimlerini kullanarak, bu zaman serisi için öngörüde bulunur.

Bir  $\{X_n\}$  süreci için;  $n$  ve  $p$  birer pozitif tam sayı,  $\alpha$  bir reel sayı,  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$  geçmiş  $X_n$  değerlerinin katsayıları ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere, derecesi  $p$  olan bir AR modeli (33) ile tanımlanır ve  $AR(p)$  ifadesi ile gösterilir.

$$\begin{aligned}X_n &= \alpha + \phi_1 X_{n-1} + \phi_2 X_{n-2} + \dots + \phi_p X_{n-p} + u_n \\ &= \alpha + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{n-i} + u_n\end{aligned}\quad (33)$$

Otoregresif modeller, oldukça geniş bir yelpazede değişen farklı tiplerdeki zaman serilerinin modellenmesine olanak sağlayan esnek bir yapıya sahiptir [13, p. 305].

Örneğin, bir AR(1) modeli;  $\phi_1=0$  için bir WN sürecini,  $\phi_1=1$  ve  $\alpha=0$  için bir rassal yürüyüş sürecini,  $\phi_1=1$  ve  $\alpha \neq 0$  için bir sürüklenen rassal yürüyüş sürecini ve  $\phi_1 < 0$  için bir alternatif zaman serisini ifade eder.  $|\phi_1| < 1$  koşulunu sağlayan  $\phi_1$  değerleri için, AR(1) modeli WSS bir süreci belirtir.

### 2.3.7.2. Hareketli Ortalama (MA) Modelleri

Hareketli ortalama (MA: moving average) modelleri; bir zaman serisinin geçmiş değerleri yerine, geçmiş öngörülerin hata terimlerinin doğrusal bileşimlerini kullanarak, bu zaman serisi için öngörüde bulunur. Açıklayıcı veri olarak kullanılan hata terimleri gözlemlenmediği için, MA modelleri gerçek anlamda açıklayıcı modeller olarak nitelenemez.

Bir  $\{X_n\}$  süreci için;  $n$  ve  $q$  birer pozitif tam sayı,  $\alpha$  bir reel sayı,  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  geçmiş hata terimlerinin katsayıları ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere, derecesi  $q$  olan bir MA modeli (34) ile tanımlanır ve MA( $q$ ) ifadesi ile gösterilir.

$$\begin{aligned} X_n &= \alpha + \theta_1 u_{n-1} + \theta_2 u_{n-2} + \dots + \theta_q u_{n-q} + u_n \\ &= \alpha + \sum_{i=1}^q \theta_i u_{n-i} + u_n \end{aligned} \quad (34)$$

Dolayısıyla, her  $X_n$  değeri, belirli sayıdaki geçmiş hata terimlerinin ağırlıklı ortalaması olarak düşünülebilir. Hata terimleri WN olduğu için, her MA( $q$ ) modeli WSS bir süreci belirtir.

Herhangi bir WSS AR( $p$ ) modeli, geçmiş öngörülerin hata terimlerinin doğrusal bileşimleri kullanılarak, bir MA( $\infty$ ) modeli olarak yazılabilir. Örneğin, WSS bir AR(1) modeli (35) ile gösterilen bir MA( $\infty$ ) modeli olarak ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} X_n &= \phi_1 X_{n-1} + u_n = \phi_1^2 X_{n-2} + \phi_1 u_{n-1} + u_n \\ &= \dots = \sum_{i=0}^{n-1} \phi_1^i u_{n-i} \end{aligned} \quad (35)$$

Herhangi bir MA(q) modeli de benzer şekilde, zaman serisinin geçmişte gerçekleşen değerlerinin doğrusal bileşimleri kullanılarak, bir AR( $\infty$ ) modeline dönüştürülebilir. Örneğin, bir MA(1) modeli (36) ile belirtilen bir AR( $\infty$ ) modeline dönüştürülebilir.

$$\begin{aligned} X_n &= u_n + \theta_1 u_{n-1} = u_n - \theta_1 X_{n-1} + \theta_1^2 u_{n-2} \\ &= \dots = \sum_{i=0}^{n-1} (-\theta_1)^i X_{n-i} \end{aligned} \quad (36)$$

MA(1) modelinde;  $|\theta_1| > 1$  için daha eski hata terimlerinin etkisi daha fazla,  $|\theta_1| = 1$  için tüm geçmiş hata terimlerinin etkisi aynı büyüklükte ve  $|\theta_1| < 1$  için daha yeni hata terimlerinin etkisi daha fazla görülür. Dönüştürülen AR( $\infty$ ) modelinin yakınsak bir süreç olabilmesi için,  $|\theta_1| < 1$  koşulunu sağlanması gerekir. Yakınsaklık koşullarını sağlayan parametrelere sahip MA modelleri, ters çevrilebilir olarak adlandırılır.

### 2.3.7.3. Entegre (I) Modeller

Entegre (I: integrated) modeller, bir zaman serisini fark değerleri cinsinden modelleyerek, bu zaman serisi için öngöründe bulunur. Entegre modeller, herhangi bir dereceden kök içeren ve durağan olmayan zaman serilerini modellemek için kullanılır. Entegre modeller, fark denklemi ile ifade edilir.

Bir  $\{X_n\}$  süreci için; n ve d birer pozitif tam sayı,  $\nabla X_n = X_n - X_{n-1}$ ,  $C_i^d$  kombinasyon terimleri ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere, derecesi d olan bir entegre model (37) ile tanımlanır ve I(d) ifadesi ile gösterilir. Herhangi bir I(d) modeli, p=d olmak üzere (38)'de gösterilen şekilde bir AR(p) modeline dönüştürülebilir.

$$\begin{aligned} \nabla^d X_n &= \nabla^{d-1} X_n - \nabla^{d-1} X_{n-1} \\ &= \sum_{i=0}^d (-1)^i C_i^d X_{n-i} = u_n \end{aligned} \quad (37)$$

$$X_n = (-1)^0 C_1^p X_{n-1} + (-1)^1 C_2^p X_{n-2} + \dots + (-1)^{p-1} C_p^p X_{n-p} + u_n \quad (38)$$

Bir I(d) modelinin AR(p) modeli olarak ifade edildiği durumda, model katsayıları 1 ve daha büyük değerlere sahip olacağı için, model durağan olmayacaktır. Örneğin, AR(1) modelinde katsayı 1 olarak seçildiğinde elde edilen  $X_n = X_{n-1} + u_n$  ifadesi bir rassal yürüyüş

sürecini belirtir ve bu sebeple model durağan değildir. Rassal yürüyüş süreci, aynı zamanda I(1) modeli ile  $X_n - X_{n-1} = u_n$  şeklinde gösterilebilir. Bu durumda, I(1) modeli bir WN sürecini gösterdiği için WSS bir model olur. Bu şekilde, durağan olmayan zaman serileri, I(d) modelleriyle durağan biçimde modellenir. I(d) modeli ile öngörüle bulunan değerler, fark işleminin tersi uygulanarak orijinal zaman serisi değerlerine geri dönüştürülür.

#### 2.3.7.4. Otoregresif Hareketli Ortalama (ARMA) Modelleri

Otoregresif hareketli ortalama (ARMA: autoregressive moving average) modelleri, bir zaman serisinin geçmişte gerçekleşen değerlerinin ve geçmiş öngörülerin hata terimlerinin doğrusal bileşimlerini birlikte kullanarak, bu zaman serisi için öngörüle bulunur.

Bir  $\{X_n\}$  süreci için; n pozitif tam sayı, p ve q doğal sayılar,  $\alpha$  bir reel sayı,  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$  geçmiş  $X_n$  değerlerinin katsayıları,  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  geçmiş hata terimlerinin katsayıları ve  $u_n \sim WN(0, \sigma^2)$  olmak üzere, bir ARMA modeli (39) ile tanımlanabilir ve ARMA(p,q) ifadesi ile gösterilir.

$$\begin{aligned} X_n &= \alpha + \phi_1 X_{n-1} + \dots + \phi_p X_{n-p} + \theta_1 u_{n-1} + \dots + \theta_q u_{n-q} + u_n \\ &= \alpha + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{n-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j u_{n-j} + u_n \end{aligned} \quad (39)$$

#### 2.3.7.5. Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) Modelleri

Otoregresif entegre hareketli ortalama (ARIMA: autoregressive integrated moving average) modelleri, bir zaman serisinin entegre modelinin geçmişte gerçekleşen değerlerinin ve geçmiş öngörülerdeki hata terimlerinin doğrusal bileşimlerini birlikte kullanarak, bu zaman serisinin entegre modeli için öngörüle bulunur. Entegre modeli için öngörülen değerlere fark işleminin tersi uygulanarak zaman serisi orijinal zaman serisi için öngörü değerleri elde edilir.

Bir  $\{X_n\}$  süreci için; n pozitif tam sayı, p, d ve q doğal sayılar,  $\alpha$  reel sayı,  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$  geçmiş  $X_n$  değerlerinin katsayıları,  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  geçmiş hata terimlerinin katsayıları,  $C_i^d$

kombinasyon terimleri,  $\nabla X_n = X_n - X_{n-1}$  ve  $u_n \sim \text{WN}(0, \sigma^2)$  olmak üzere, bir ARIMA modeli (40) ile tanımlanabilir ve ARIMA(p,d,q) ifadesi ile gösterilir.

$$\begin{aligned} \nabla^d X_n &= \alpha + \phi_1 \nabla^d X_{n-1} + \dots + \phi_p \nabla^d X_{n-p} + \theta_1 u_{n-1} + \dots + \theta_q u_{n-q} + u_n \\ &= \alpha + \sum_{i=1}^p \sum_{k=0}^d (-1)^k \phi_i C_k^d X_{n-i-k} + \sum_{j=1}^q \theta_j u_{n-j} + u_n \end{aligned} \quad (40)$$

### 2.3.7.6. Mevsimsel Otoresif Entegre Hareketli Ortalama (SARIMA) Modelleri

Mevsimsel otoresif entegre hareketli ortalama (SARIMA: seasonal autoregressive integrated moving average) modelleri; bir zaman serisi için oluşturulan ARIMA modelinin, aynı zaman serisinin periyodik entegre modelinin geçmiş periyotlarda gerçekleşen değerleri ile Kartezyen çarpımına, geçmiş periyotlarda yapılan öngörülerdeki hata terimlerinin eklenmesiyle elde edilen ve ARIMA modellerinin geliştirilmiş versiyonu olan geniş kapsamlı bir zaman serisi öngörü modelidir. Bu sebeple, SARIMA modelleri, periyodik bir örüntüyü takip eden mevsimsel veya dönemsel bileşene sahip zaman serilerinin modellenmesinde kullanılmak için uygundur.

Bir  $\{X_n\}$  zaman serisi için; n bir pozitif tam sayı, p, d, q, P, D ve Q birer doğal sayı,  $\alpha$  bir reel sayı,  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$  ve  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_P$  sırasıyla geçmiş ve önceki periyotlardaki  $X_n$  değerlerinin katsayıları,  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  ve  $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_Q$  sırasıyla geçmiş ve önceki periyotlardaki hata terimlerinin katsayıları, m periyot uzunluğunu ifade eden bir pozitif tam sayı,  $\nabla X_n = X_n - X_{n-1}$ ,  $\nabla_m X_n = X_n - X_{n-m}$ ,  $\nabla_m \nabla X_n = \nabla X_n - \nabla X_{n-m}$  ve  $u_n \sim \text{WN}(0, \sigma^2)$  olmak üzere; bir SARIMA modeli en genel formda (41)'de gösterildiği gibi yazılabilir ve ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)<sub>m</sub> parametreleri ile ifade edilir.

$$\begin{aligned} \nabla_m^D \nabla^d X_n &= \alpha + \phi_1 \nabla_m^D \nabla^d X_{n-1} + \dots + \phi_p \nabla_m^D \nabla^d X_{n-p} + \Phi_{1m} \nabla_m^D \nabla^d X_{n-1m} \\ &+ \phi_1 \Phi_{1m} \nabla_m^D \nabla^d X_{n-1m-1} + \dots + \phi_p \Phi_{1m} \nabla_m^D \nabla^d X_{n-1m-p} + \dots \\ &+ \Phi_{Pm} \nabla_m^D \nabla^d X_{n-Pm} + \phi_1 \Phi_{Pm} \nabla_m^D \nabla^d X_{n-Pm-1} + \dots + \phi_p \Phi_{Pm} \nabla_m^D \nabla^d X_{n-Pm-p} \\ &+ \theta_1 u_{n-1} + \dots + \theta_q u_{n-q} + \Theta_{1m} u_{n-1m} \\ &+ \theta_1 \Theta_{1m} u_{n-1m-1} + \dots + \theta_q \Theta_{1m} u_{n-1m-q} + \dots \\ &+ \Theta_{Qm} u_{n-Qm} + \theta_1 \Theta_{Qm} u_{n-Qm-1} + \dots + \theta_q \Theta_{Qm} u_{n-Qm-q} + u_n \end{aligned} \quad (41)$$

## **3. KONTROL SİSTEMLERİ**

### **3.1. KONTROL TEORİSİ**

Otomatik kontrol sistemleri herhangi bir mühendislik ve bilim alanında gereklilik halini almıştır. Otomatik kontrol; robotik sistemler, modern üretim sistemleri ve endüstriyel işlemler için önemli ve ayrılmaz bir parçadır.

İlk önemli otomatik kontrol uygulaması, 18. Yüzyılda James Watt'ın buhar motorunda hız kontrolünü sağlamak için kullandığı merkezkaç kuvvetli hız regülatörü olarak kabul edilmektedir [14, p. 11]. 1922'de, Minorsky, gemi dümenleri için otomatik kontrol sistemleri üzerinde çalışmalar yapmış ve sistem kararlılığının belirlenmesinde diferansiyel denklemleri kullanmıştır [15]. Nyquist, 1932 yılında kapalı döngü kontrol sistemlerinin kararlılığının belirlenmesi üzerine temel bir matematiksel yöntem geliştirmiştir [16]. Hazen, 1934'ta pozisyon kontrolü üzerine yaptığı çalışmalarla servo motorların literatüre girmesini sağlamıştır [17].

Günümüzde yaygın olarak kullanılan kontrol teorisi yaklaşımları; klasik kontrol teorisi, modern kontrol teorisi ve gürbüz kontrol teorisi başlıkları altında incelenebilir.

#### **3.1.1. Klasik Kontrol Teorisi**

1940'lardan itibaren lineer kapalı döngü kontrol sistemleri, özellikle Bode diyagramları sayesinde, frekans tepkisi yöntemlerinin kullanılmaya başlanmasıyla performans gerekliliklerini sağlayabilir hale gelmiştir. 1950'lerde PID kontrolcüler, endüstride basınç ve sıcaklık kontrolü gibi amaçlarla yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. 1950'de Evans, durum uzayında kontrolcü frekansının yerlerinin bulunmasında kök yer eğrisi (root locus) yöntemini kullanmıştır [18].

Klasik kontrol teorisinin temelini, frekans tepkisi yöntemleri ve kök yer eğrisi yöntemleri oluşturur. Klasik kontrol teorisi yaklaşımı ile gelişigüzel belirlenen bazı performans gereksinimlerini karşılayabilen ve daha kararlı şekilde çalışan kontrol sistemlerinin önü açılmıştır. Bu tarz kontrol sistemleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde performans



gösterir. Ancak bu sistemlerin herhangi bir açıdan optimal olarak değerlendirilmeleri mümkün değildir [14, p. 12].

### **3.1.2. Modern Kontrol Teorisi**

Çoklu girdi ve çıktı ile çalışan modern üretim süreçlerin modellenmesi giderek daha karmaşık hale gelirken, modern kontrol sistemleri çok sayıda ve büyük denklemler içermeye başlamıştır. Genellikle tek girdi ve tek çıktı içeren sistemlerle uğraşan klasik kontrol teorisi bu sistemler için yetersiz kalmıştır.

1960lı yıllardan itibaren bilgisayarların hesaplamalarda kullanılabilir hale gelmesiyle, karmaşık sistemlerin zaman alanında analizini yapmak mümkün hale gelmiştir. Böylece, modern üretim süreçlerinde artan karmaşıklığın üstesinden gelinmesi ve askeri çalışmaların, uzay çalışmalarının ve endüstriyel uygulamalarının gerektirdiği hassasiyetin karşılanması için, zaman alanı analizinin durum uzayı değişkenleriyle birleştirilerek kullanılmasına dayanan modern kontrol teorisi geliştirilmiştir.

1960-1980 arasında hem deterministik hem stokastik sistemlerin optimal kontrolü ile karmaşık sistemlerin uyarlanabilir kontrolü ve öğrenmeye dayalı kontrolü üzerine odaklanan çalışmalar yapılmıştır. Modern kontrol teorisi, 1990lı yıllara doğru, gürbüz kontrol sistemlerine ve bununla ilişkili konular üzerine odaklanmıştır.

### **3.1.3. Gürbüz Kontrol Teorisi**

Modern kontrol teorisi, gerçek kontrol sisteminin bir modeline dayandığı için kontrol sistemlerinin tasarımını daha kolay hale getirmiştir. Ancak bu şekilde tasarlanan sistemlerin kararlılığı, gerçek sistemle model arasındaki fark sebebiyle oluşan hatalara karşı yüksek duyarlılığa sahiptir. Bu durum, modele göre tasarlanan bir kontrolcü sisteminin gerçek sisteme uygulandığında kararlı çalışmayabileceği anlamına gelmektedir.

Sistemin kararsız hale gelmesinin önlenmesi için gürbüz kontrol teorisi geliştirilmiştir. Buna göre; kontrol sistemi tasarımı yapılırken ilk olarak modelleme kaynaklı olası hatalar için bir aralık belirlenir ve tasarım belirlenen aralığa göre yapılır.

Gerçek sistemdeki hatalar, varsayılan hata aralığı içerisinde kaldığı sürece sistem kararlı bir şekilde çalışacaktır.

Gürbüz kontrol teorisi, frekans tepkisi yaklaşımı ile zaman alanı yaklaşımının birlikte kullanılmasına dayanır ve matematiksel olarak oldukça karmaşıktır [14, p. 12]. Gürbüz kontrol sistemi, tasarımda kullanılan sistem modeline bir belirsizlik modelinin eklenmesiyle gerçek sistem modeline ulaşmayı amaçlar.

### **3.2. KONTROL DÖNGÜLERİ**

Kontrol sistemlerinde, kontrol döngüsünün varlığını ifade eden faktör geri beslemedir. Dolayısıyla, kontrol sistemleri içerisinde geri beslemenin bulunup bulunmamasına göre; kapalı döngü kontrol sistemleri ve açık döngü kontrol sistemleri olmak üzere iki temel grupta incelenebilir.

#### **3.2.1. Geri Besleme Kontrol Sistemleri**

Referans girdi ile sistem çıktısını karşılaştıran ve aralarındaki farkı kullanarak girdi ile çıktı arasındaki ilişkiyi kontrol eden sistemler, geri besleme kontrol sistemleri olarak adlandırılır [14, p. 17]. Oda sıcaklığı kontrol sistemi, geri besleme kontrol sistemlerine bir örnektir. Gerçek oda sıcaklığını ölçerek istenilen sıcaklıkla karşılaştırır ve bu karşılaştırmanın sonucuna göre termostat ısıtma veya soğutma ekipmanını çalıştırarak oda sıcaklığının istenilen seviyeye gelmesini sağlar.

Geri besleme kontrol sistemleri yalnızca mühendislik alanıyla sınırlı değildir, mühendislik harici birçok alanda da bu sistemler mevcuttur. Örneğin, insan bedeni çok gelişmiş bir geri besleme kontrol sistemidir. Aynı şekilde, iş sistemlerinin ve örgütsel süreçlerin kontrolünde ve biyoloji, psikoloji ve ekonomi gibi alanlarda geri besleme kontrol sistemlerinden faydalanılmaktadır.

#### **3.2.2. Kapalı Döngü Kontrol Sistemleri**

Geri besleme kontrol sistemleri, çoğunlukla kapalı döngü kontrol sistemlerini ifade eder. Uygulamada geri besleme kontrol ve kapalı döngü kontrol aynı anlamda

kullanılmaktadır. Kapalı döngü kontrol sistemlerinde; referans girdi ve geri beslenen süreç çıktısı arasındaki fark, süreç hatası olarak kontrolcüye gönderilir ve kontrolcü bu hata terimlerini sönümleyerek sistem çıktısını istenilen seviyeye getirir. Geri besleme doğrudan sistem çıktısının kendisi olabileceği gibi, çıktının bir fonksiyonu ve bunun türev ve integral değerleri olabilir. Kapalı döngü kontrol sistemleri terimi, her zaman için, hatanın düşürülmesinde geri besleme kontrol sisteminin kullanıldığını belirtir.

### 3.2.3. Açık Döngü Kontrol Sistemleri

Sistem çıktısının, kontrol eylemi üzerinde hiçbir etkisinin bulunmadığı sistemler, açık döngü kontrol sistemleri olarak adlandırılır. Diğer bir deyişle, açık döngü kontrol sistemlerinde, çıktı ölçülmez ve girdi ile karşılaştırılmak üzere geri beslenmez. Çamaşır makineleri, açık döngü kontrol sisteminin uygulandığı bir örnektir. Makine, yıkama ve durulama işlemlerini zaman bazlı olarak gerçekleştirir. Ancak, bu işlem sonucunda giysilerin temizlenip temizlenmediğini ölçmez.

Açık döngü kontrol sistemlerinde, sistem çıktısı ve referans girdisi karşılaştırılmaz. Bu nedenle, her referans girdisi bir sabit çalışma şartına karşılık gelir ve bunun sonucunda, sistemin doğru çalışması kalibrasyona bağlıdır. Düzensizliğin olduğu durumlarda, açık döngü kontrol sistemi istenilen performansı gösteremeyecektir.

Açık döngü kontrol sistemleri, uygulamada, yalnızca girdi ve çıktı arasındaki ilişkinin bilindiği ve aynı zamanda içsel veya dışsal düzensizliğin olmadığı durumlarda kullanılır. Bu sistemler, geri besleme kontrol sistemleri değildir. Zaman bazlı çalışan herhangi bir kontrol sistemi açık döngüdür.

### 3.2.4. Kapalı ve Açık Döngü Kontrol Sistemlerinin Karşılaştırılması

Kapalı döngü kontrol sistemlerinin avantajları aşağıdaki gibidir:

- Kapalı döngü kontrol sistemleri, doğrusal olmayan durumların varlığında dahi daha hatasız çalışır.
- Negatif geri besleme sayesinde, artan hata miktarının düzeltilmesinde oldukça başarılıdır.

- Otomasyona olanak sağlar.
- Gürültüden daha az etkilenir.
- Sistem kararlılığının daha yüksek hale getirilmesi için duyarlılık azaltılabilir.
- Daha güvenilirdir.
- Bant genişliği aralığı daha fazladır.

Kapalı döngü kontrol sistemlerinin dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- Daha yüksek maliyetlidir.
- Tasarımı daha karmaşıktır.
- Geri besleme salınımlı tepkiye sebep olur.
- Geri beslemeye bağlı olarak sistemin toplam kazancı düşer.
- Sistem kararlılığı büyük bir sorundur ve daha kararlı bir kapalı döngü sisteminin tasarlanması daha fazla dikkat gerektirir.

Açık döngü kontrol sistemlerinin avantajları aşağıdaki gibidir:

- Tasarımı ve yapısı daha basittir.
- Daha ekonomiktir.
- Bakımı daha kolaydır.
- Genellikle kararsızlık sorunu yoktur.
- Çıktıyı ölçmenin zor olduğu veya ekonomik olarak makul olmadığı durumlarda kullanılmaya uygundur.

Açık döngü kontrol sistemlerinin dezavantajları aşağıdaki gibidir:

- Daha hatalı çalışır.
- Daha az güvenilirdir.
- Düzensizlikler ve kalibrasyondaki değişimler hatalara sebep olur ve çıktı istenilenden farklı olabilir.
- Çıktıdaki kalitenin sürdürülebilmesi için zaman zaman kalibre edilmesi gerekir.

### 3.3. KONTROL SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ

Kontrol sistemleri diferansiyel denklemler ile oluşturulur. Karmaşık kontrol sistemlerinin modellenmesinde matematiksel gösterimlerinde karmaşıklaşması ve sistem bileşenlerinin model içerisinde ayırt edilmesinin zorlaşması nedeniyle, bu karmaşıklığın önüne geçmek amacıyla farklı sistematik modelleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Kontrol sistemlerinin modellenmesinde en yaygın olarak kullanılan yaklaşımlar arasında; transfer fonksiyonları, durum-uzay gösterimi (state-space representation) ve blok diyagramlar sayılabilir.

#### 3.3.1. Transfer Fonksiyonları

Kontrol teorisinde, sistemlerin veya bileşenlerin girdi-çıkı ilişkilerini karakterize edilmesinde yaygın olarak kullanılan ve transfer fonksiyonları olarak adlandırılan fonksiyonlar; doğrusal, zamanla değişmeyen, diferansiyel denklemlerle belirlenir. Doğrusal, zamanla değişmeyen, diferansiyel denklem sisteminin transfer fonksiyonu; tüm başlangıç koşullarının sıfır olduğu varsayımda, çıktının Laplace dönüşümünün girdinin Laplace dönüşümüne oranı şeklinde tanımlanır.

Denklem (42)'deki doğrusal, zamana bağlı değişmeyen, diferansiyel denklem düşünüldüğünde; x girdi, y çıktı olarak tanımlanabilir.

$$\beta_0 x^{(k)} + \dots + \beta_{k-1} x^{(1)} + \beta_k x = \alpha_0 y^{(n)} + \dots + \alpha_{n-1} y^{(1)} + \alpha_n y, n \geq k \quad (42)$$

Bu denklem için transfer fonksiyonu (43) şekilde tanımlanır.

$$H(s) = \frac{\mathcal{L}\{\alpha_0 y^{(n)} + \dots + \alpha_{n-1} y^{(1)} + \alpha_n y\}}{\mathcal{L}\{\beta_0 x^{(k)} + \dots + \beta_{k-1} x^{(1)} + \beta_k x\}} = \frac{\beta_0 s^k + \dots + \beta_{k-1} s + \beta_k}{\alpha_0 s^n + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n} \quad (43)$$

Bir sistemin transfer fonksiyonu, çıktı değişkenini girdi değişkeniyle ilişkilendiren diferansiyel denklemi ifade etmenin işlevsel bir yöntemi olan matematiksel modeldir. Transfer fonksiyonu, girdinin büyüklüğünden ve niteliğinden bağımsız bir sistem

özelliğidir. Transfer fonksiyonu, girdi ve çıktı arasındaki bağıntıyı tanımlamak için gerekli birimleri içerir, ancak sistemin fiziksel yapısıyla ilgili bir bilgi sağlamaz.

Eğer bir sistemin transfer fonksiyonu biliniyorsa; çeşitli formlarda girdiler için elde edilen çıktılara bakılarak sistemin nitelikleri belirlenebilir. Eğer sistemin transfer fonksiyonu bilinmiyorsa; sisteme bilinen girdiler verildiğinde elde edilen çıktıların incelenmesiyle, transfer fonksiyonu deneysel olarak oluşturulabilir. Bir kez oluşturulduğunda, transfer fonksiyonu aracılığıyla sistemin tüm dinamik karakteri belirlenebilir.

### 3.3.2. Durum-Uzay Gösterimi

Durum-uzay gösterimi; kontrol teorisinde, sistemlerin veya bileşenlerin girdi-çıkıtı ilişkilerinin doğrusal, zamanla değişmeyen, diferansiyel denklemlerle karakterize edilmesinde yaygın olarak kullanılan bir başka gösterim türüdür. Durum-uzay denklemleri, diferansiyel denklemlerinin gösteriminde vektörleri ve matrisleri kullanan denklem sistemleridir. Durum-uzay gösteriminin en büyük avantajı, doğrusal olmayan sistemlerin doğrusal bir denklem sistemi ile ifade edilebilmesine olanak sağlamasıdır.

Durum-uzay denklemleri, transfer fonksiyonları ilişkilidir. Transfer fonksiyonları, genellikle tek-girdi ve tek-çıkıtıdan oluşan sistemleri ifade etmek için kullanılırken; durum-uzay denklemleri, vektörler ve matrisler ile tanımlandığı için, çoklu-girdi ve çoklu-çıkıtıdan oluşan sistemlerin modellenmesinde kullanılmaya daha uygundur.

Durum; dinamik bir sistemin herhangi bir andaki davranışını, başlangıç anındaki girdi verisi ile birlikte tümüyle tanımlamaya yetecek en küçük değişkenler kümesidir. Bu değişkenler, durum değişkenleri olarak ifade edilir. Dinamik sistemi tümüyle tanımlamak için  $k$  tane durum değişkeni yeterliyse; bu değişkenler ile oluşturulan  $k$  elemanlı vektöre de durum vektörü adı verilir. Durum değişkenlerinin eksenleri ve durum vektörü ile tanımlanan  $k$  boyutlu uzay, durum uzayı olarak adlandırılır. Durum, çıktı ve girdi vektörleri  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{u}$  ile durum uzayı matrisleri  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$  sırasıyla (44) ve (45) ile tanımlanır.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_k \end{bmatrix}, \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_j \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & \cdots & a_{kk} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k1} & \cdots & b_{ki} \end{bmatrix}, \quad (45)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{j1} & \cdots & c_{jk} \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{j1} & \cdots & d_{ji} \end{bmatrix}$$

Dinamik bir sistemin davranış modelini ifade eden ve durum denklemi ile çıktı denkleminin oluşturduğu durum denklemleri (46) ve (47) ile gösterilir.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^k a_{1n}x_n + \sum_{n=1}^i b_{1n}u_n \\ \vdots \\ \sum_{n=1}^k a_{kn}x_n + \sum_{n=1}^i b_{kn}u_n \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \Rightarrow \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^k c_{1n}x_n + \sum_{n=1}^i d_{1n}u_n \\ \vdots \\ \sum_{n=1}^k c_{jn}x_n + \sum_{n=1}^i d_{jn}u_n \end{bmatrix} \quad (47)$$

Dinamik bir sistemin durum-uzay gösteriminden transfer fonksiyonunu elde etmek mümkündür. Girdinin başlangıç koşulunun sıfır olduğu durumda; durum-uzay denklemlerinin Laplace dönüşümleri (48) ve (49) şeklinde gösterilir.

$$s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (48)$$

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C}\mathbf{X}(s) + \mathbf{D}\mathbf{U}(s) \quad (49)$$

Durum denklemi yeniden yazılarak, durum vektörü girdi cinsinden tanımlanabilir. Denklem (50)'de tanımlanan  $\Phi(s)$  terimi durum geçiş matrisi olarak adlandırılır.

$$\mathbf{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B}\mathbf{U}(s) = \Phi(s)\mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (50)$$

Elde edilen durum vektörü (50)'de yerine konulduğunda, çıktının girdi cinsinden değeri (51) ile gösterilir.

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C}\Phi(s)\mathbf{B}\mathbf{U}(s) + \mathbf{D}\mathbf{U}(s) = (\mathbf{C}\Phi(s)\mathbf{B} + \mathbf{D})\mathbf{U}(s) \quad (51)$$

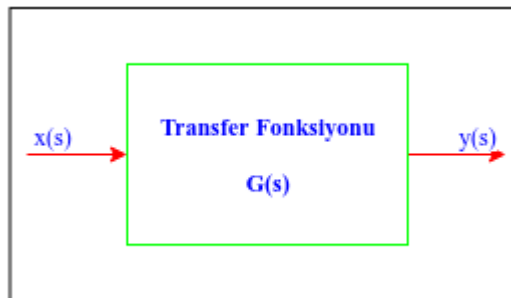
Çıktı vektörü, girdi vektörüne oranlanarak transfer fonksiyonu (52)'deki şekilde elde edilmiş olur.

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \mathbf{C}\Phi(s)\mathbf{B} + \mathbf{D} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (52)$$

### 3.3.3. Blok Diyagramlar

Blok diyagramlar; bir sistemin girdi ve çıktı ilişkilerinin transfer fonksiyonları cinsinden basitleştirilmiş şekilde gösterilebilmesi amacıyla kullanılan ve standart semboller ile ifade edilen akış diyagramlarıdır.

Blok diyagramlar; transfer fonksiyonlarını içeren blok diyagram elemanı, girdilerin toplanarak veya çıkarılarak birleştirilmesinde kullanılan toplama noktaları, girdi ve çıktı akış ilişkilerini temsil eden yönlü çizgiler ile bu çizgilerin kesişimlerini belirten bağlantı noktaları olmak üzere dört temel elemandan oluşur.

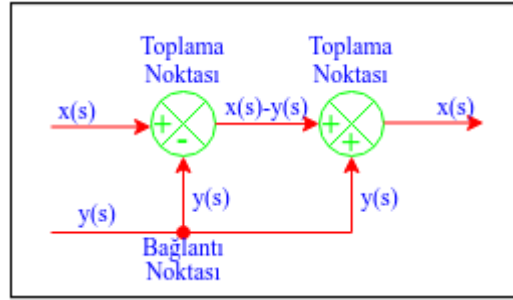


Şekil 1. Blok diyagram elemanı

Şekil 1'de yer alan blok diyagram elemanının girdisi ile çıktısı arasındaki ilişki, sistemin kazancını transfer fonksiyonu olarak ifade eder. Bu sistemin kazancı (53) ile tanımlanmıştır.

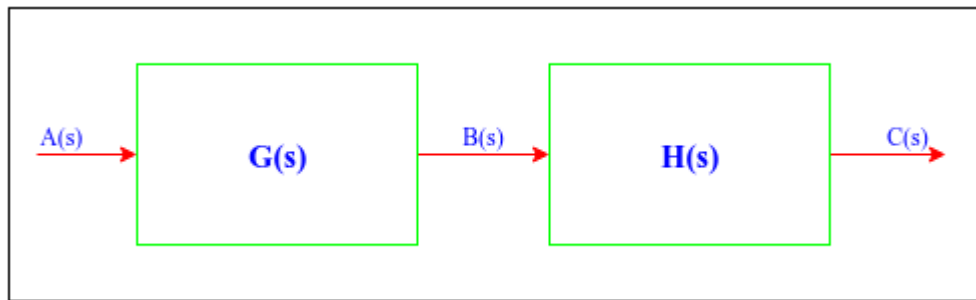
$$T(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = G(s) \quad (53)$$





Şekil 2. Toplama ve bağlantı noktaları

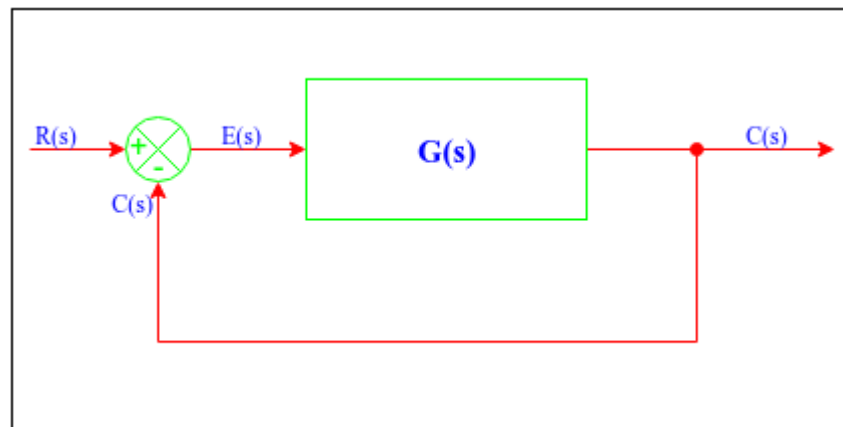
Şekil 2’de yer alan ilk toplama noktasının çıktısı girdilerin farkını, ikinci toplama noktasının çıktısı ise girdilerin toplamını göstermektedir.



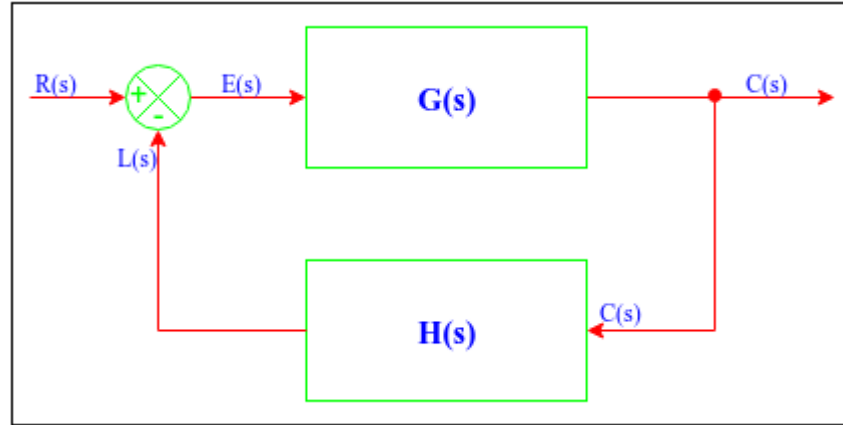
Şekil 3. Açık döngü kontrol sistemi blok diyagramı

Şekil 3 ile bir açık döngü kontrol sisteminin blok diyagramı gösterilmiştir. Bu açık döngü kontrol sistemin girdisi ile çıktısı arasındaki ilişki (54) şeklinde tanımlanmıştır.

$$T(s) = \frac{C(s)}{A(s)} = G(s)H(s) \quad (54)$$



Şekil 4. Birim geri beslemeli kapalı döngü kontrol sistemi blok diyagramı



Şekil 5. Genelleştirilmiş kapalı döngü kontrol sistemi blok diyagramı

Şekil 4’te birim geri beslemeli, Şekil 5’te ise genelleştirilmiş kapalı döngü kontrol sistemlerinin blok diyagramları yer almaktadır. Birim geri beslemeli kapalı döngü kontrol sisteminin açık döngü kazancı  $T(s)$  ve geri besleme döngüsü kazancı  $F(s)$ , transfer fonksiyonu şeklinde sırasıyla (55) ve (56)’de gösterilmiştir.

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = G(s) \quad (55)$$

$$F(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)E(s)}{E(s) + C(s)} = \frac{G(s)E(s)}{E(s) + G(s)E(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (56)$$

Kapalı döngü kontrol sistemleri için açık döngü kazancı  $T(s)$  ve geri besleme döngüsü kazancı  $F(s)$ , transfer fonksiyonu olarak sırasıyla (57) ve (58) ile genelleştirilmiş halde gösterilmektedir. Denklem (58) ile negatif geri besleme sisteminin transfer fonksiyonu ifade edilmiştir. Negatif geri besleme denklemiyle elde edilen  $1+H(s)G(s)$  terimi, geri besleme faktörü olarak adlandırılır. Geri besleme döngüsü kazancı, açık döngü kazancının geri besleme faktörüne bölümüne eşittir.

$$T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = G(s) \quad (57)$$

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)E(s)}{E(s) + L(s)} = \frac{G(s)E(s)}{E(s) + H(s)C(s)} \\ &= \frac{G(s)E(s)}{E(s) + H(s)G(s)E(s)} = \frac{G(s)}{1 + H(s)G(s)} \end{aligned} \quad (58)$$

### 3.4. PID KONTROL

PID kontrol, açık farkla en yaygın olarak kullanılan kontrol algoritmasıdır [19, p. 64]. Geri besleme döngülerinin büyük kısmı doğrudan veya küçük değişikliklerle bu algoritma tarafından kontrol edilir. Endüstriyel süreçlerden, gündelik yaşantıda kullanılan binlerce farklı cihaza kadar birçok sistemde bu tip kontrolcüler mevcuttur. PID kontrol; tek başına bir kontrolcü olarak kullanılabilmesi gibi, dağıtık veya hiyerarşik kontrol sistemlerinin bir parçası olarak da kullanılabilir. PID algoritmaları, genel kabul görmüş bazı kurallar ile veya analitik yaklaşımlar ile çalıştırılabilir.

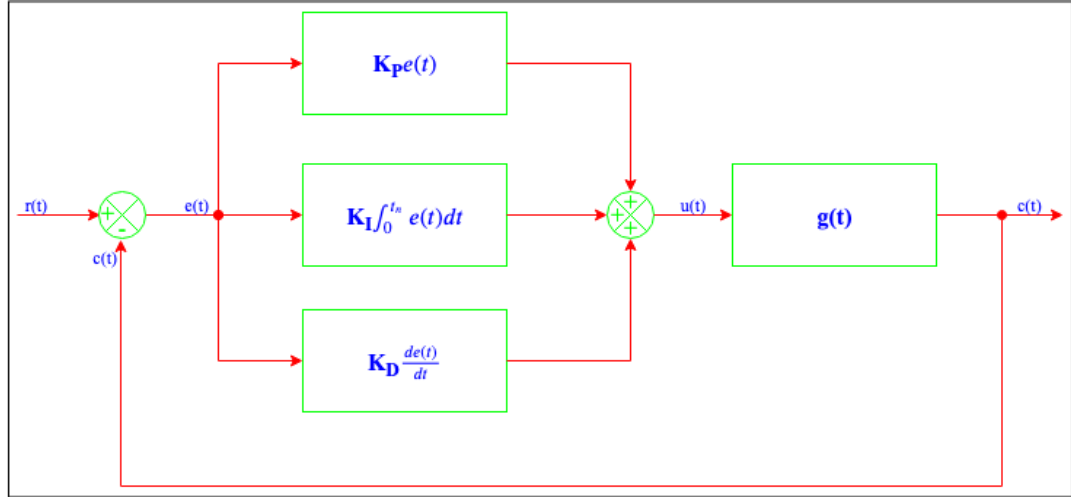
#### 3.4.1. PID Kontrolcü

PID kontrolcü; dinamik süreçlerin kontrolünde, kontrol sisteminin girdisi olan referans değeri ile kontrol sisteminin çıktısı arasında oluşan hatalar ile bu hataların integral ve türev değerlerine orantılı terimleri kullanan bir kontrol algoritmasıdır. PID terimi de orantısal integral türev (proportional integral derivative) sözcüklerinin baş harflerini ifade eder.

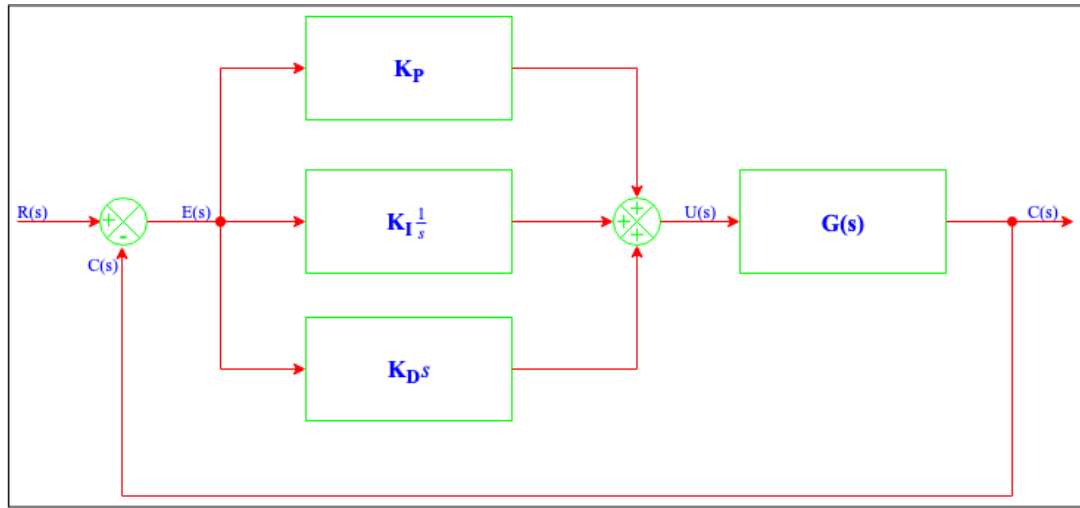
Şekil 6’da PID kontrolcü kullanılan kontrol sistemlerinin genel bir modeli gösterilmiştir.  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  kontrolcü parametreleri,  $r$  kontrol sisteminin girdisi (referans değişkeni),  $y$  kontrol sisteminin çıktısı (süreç değişkeni),  $e$  kontrol hatası ( $e=y-r$ ) ve  $u$  kontrol değişkeni olmak üzere; PID kontrol algoritması (59) ile PID kontrolcünün transfer fonksiyonu ise (60) ile ifade edilebilir. PID kontrol transfer fonksiyonunun blok diyagramı Şekil 7’de gösterilmiştir.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (59)$$

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (60)$$



Şekil 6. PID kontrol sistem modeli



Şekil 7. PID kontrol transfer fonksiyonu

PID kontrolcü döngüsünün bir negatif geri besleme sistemi olması sebebiyle; döngü çıktılarının ıraksamaması için  $K_P$ ,  $K_I$  ve  $K_D$  parametrelerinin hepsi pozitif değerler olarak belirlenir. Bu şekilde bir PID kontrolcü sisteminde;  $K_P$ ,  $K_I$  ve  $K_D$  parametreleri sırasıyla  $K$ ,  $K/T_I$  ve  $KT_D$  şeklinde değiştirilerek transfer fonksiyonu (61) şeklinde ifade edilebilir. Bu gösterimin kullanılma sebebi, fiziksel uygulamalarda, integral ve türev sürelerini ifade eden  $T_I$  ve  $T_D$  terimlerinin hesaplamalarda kolaylık sağlamasıdır.

$$G_C(s) = K + \frac{K}{T_I s} + KT_D s \quad (61)$$

### 3.4.2. PID Kontrolcü Bileşenleri

#### 3.4.2.1. Orantısal (P) Kontrol

Orantısal kontrol, basit şekilde kontrol hatasıyla orantılıdır ve P kontrol şeklinde ifade edilir. Orantısal kazanç sabiti ise  $K_P$  parametresi ile gösterilir. Orantısal kontrolün tek olarak kullanıldığı durumda, P kontrolcü algoritması ve transfer fonksiyonu sırasıyla (62) ve (63) şeklinde ifade edilir.

$$u(t) = K_P e(t) \quad (62)$$

$$G_C(s) = K_P \quad (63)$$

P kontrolde,  $K_P$  değeri büyüdükçe; sistemin referans değişkenine yakınsama süresi (rise time) azalır, dengeye gelme süresi (settling time) küçük değişimler gösterir, aşırı salınım (overshoot) büyüklüğü artar, durağan durumdaki (steady state) kontrol hatası küçülür ve sistem kararlılığı hızlı tepki sebebiyle düşer [20].  $K_P$  değeri çok küçük seçildiğinde ise, kontrol değişkeni dengeye gelemeyen sönümlenir.  $K_P$  değeri çok büyük seçildiğinde ise, sistem ıraksak hale gelebilir.

P kontrolde, hata terimi büyüdükçe kontrol değişkeni de büyür ve hata terimi sıfır olduğunda kontrol değişkeni de sıfır değerini alır. Bu sebeple, P kontrol kullanıldığında durağan durumda küçük de olsa her zaman kalıntı hatalar ortaya çıkar.

#### 3.4.2.2. İntegral (I) Kontrol

İntegral kontrol, kontrol hatalarının kümülatif toplamıyla orantılı değerleri içerir ve I kontrol şeklinde adlandırılır. I kontrol, genellikle P kontrolle birlikte kullanılır ve bu şekilde PI kontrol olarak ifade edilir. İntegral kazanç sabiti ise  $K_I$  parametresi ile gösterilir. PI kontrolcü algoritması ve transfer fonksiyonu sırasıyla (64) ve (65) şeklinde ifade edilir.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (64)$$

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \quad (65)$$

PI kontrolde,  $K_I$  değeri büyüdükçe; sistemin referans değişkenine yakınsama süresi azalır, dengeye gelme süresi ve aşırı salınım büyüklüğü artar, durağan durumdaki kontrol hatası ortadan kalkar ve sistem kararlılığı ise azalır [20].  $K_I$  değeri çok küçük seçildiğinde, kontrolcünün davranışı P kontrolcüye benzer.  $K_I$  değeri çok büyük seçildiğinde ise, sistem ıraksak hale gelebilir.

P kontrolde, durağan durumda normal olarak kontrol hatası bulunur. İntegral terimi ise; durağan durumda hata terimi ne kadar küçük olursa olsun, her zaman pozitif hata terimleri için kontrol değişkeninde artışa ve negatif hata terimleri için kontrol değişkeninde azalışa yol açar. Dolayısıyla, integral terimiyle birlikte, durağan durumdaki hata terimi teorik olarak her zaman sifıra eşit olur.

#### 3.4.2.3. Türev (D) Kontrol

Türev kontrol, kontrol hatalarının birinci türevi (kesikli zamanda birinci farkı) ile orantılı değerleri içerir ve D kontrol şeklinde adlandırılır. Ancak D kontrol tek olarak kullanılmaz ve genellikle P kontrolcüye eklenir. Bu şekilde PD kontrol olarak ifade edilir. Türev kazanç sabiti ise  $K_D$  parametresi ile gösterilir. PD kontrolcü algoritması ve transfer fonksiyonu sırasıyla (66) ve (67) şeklinde ifade edilir.

$$u(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (66)$$

$$G_C(s) = K_P + K_D s \quad (67)$$

PD kontrolde,  $K_D$  değeri büyüdükçe; sistemin referans değişkenine yakınsama süresi küçük değişimler gösterir, dengeye gelme süresi ve aşırı salınım büyüklüğü azalır, durağan durumdaki kontrol hatası teorik olarak değişmez ve sistem kararlılığı artar [20]. Türev teriminin kullanılmasındaki temel amaç, sistem kararlılığını artırmaktır. PD kontrolcü, hata terimlerinin türevlerini de kullandığı için, salınımları düzleştirerek genliğini azaltır. Böylece, sistemin durağan duruma daha yumuşak ve kararlı bir şekilde ulaşması sağlanır.

### 3.4.3. PID Kontrolcünün Kesikli Zamana Uyarlanması

Endüstriyel kontrol süreçlerinde veya süreç değişkeninin aralıklarla ölçümlendiği kontrol sistemlerinde, PID kontrol algoritmasının uygulanabilmesi ve kontrol modelinin sayısal olarak analiz edilebilmesi için, PID kontrolcünün kesikli zamana uyarlanması gerekir. Bu sebeple, PID kontrol modelindeki integral ve türev bileşenleri için kesikli zaman yaklaşımı uygulanır.

İntegral terimi için kesikli zaman yaklaşımı, toplama ve süreç değişkeninin ölçümlenme periyodu kullanılarak uygulanır. Süreç değişkeninin ölçümlenme periyodu  $\Delta t$  olmak üzere, sürekli zamanda tanımlı olan integral terimi için kesikli zaman yaklaşımı (68) ile gösterilebilir.

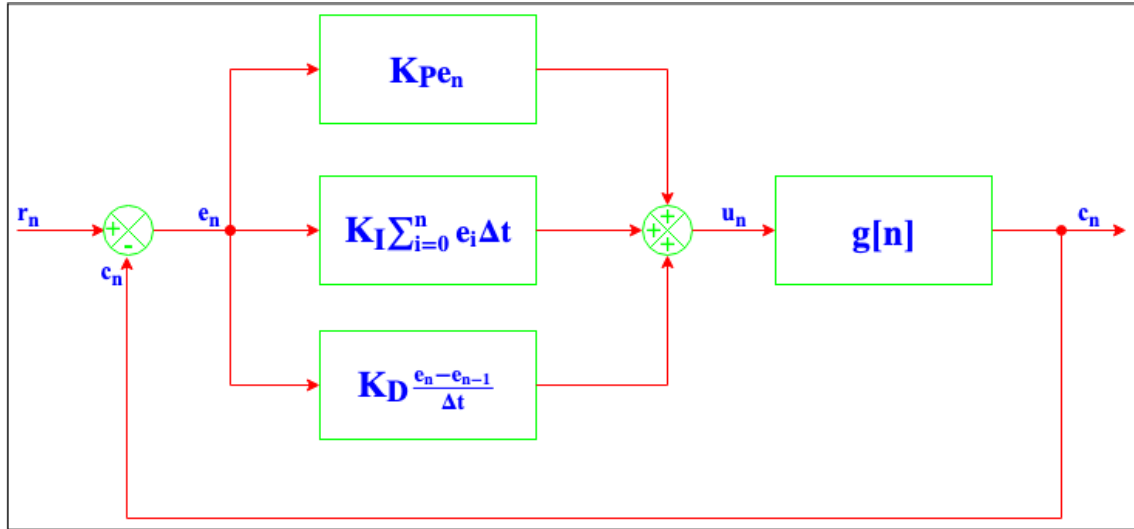
$$K_I \int_0^{t_n} e(\tau) d\tau \approx K_I \sum_{k=0}^n e_k \Delta t, \quad \Delta t = t_n - t_{n-1} \quad (68)$$

Birinci derece türev terimi için kesikli zaman yaklaşımı, geri yönde birinci fark ve süreç değişkeninin ölçümlenme periyodu kullanılarak uygulanır. Süreç değişkeninin ölçümlenme periyodu  $\Delta t$  olmak üzere, sürekli zamanda tanımlı olan türev terimi için kesikli zaman yaklaşımı (69) ile gösterilebilir.

$$K_D \frac{de(t_n)}{dt} \approx K_D \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t}, \quad \Delta t = t_n - t_{n-1} \quad (69)$$

Denklem (59) ile gösterilen PID kontrol algoritması, kesikli zaman yaklaşımı uygulanarak (70) ile ifade edilen kesikli zaman modeline dönüştürülebilir.  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  kontrolcü parametreleri,  $r$  referans değişkeni,  $y$  süreç değişkeni,  $e$  kontrol hatası ve  $u$  kontrol değişkeni olmak üzere; kesikli zaman PID kontrol algoritmasının blok diyagramı Şekil 8'de gösterilmiştir.

$$u_n = K_P e_n + K_I \sum_{k=0}^n e_k \Delta t + K_D \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t} \quad (70)$$



Şekil 8. Kesikli zaman PID kontrol sistem modeli

PID kontrol algoritmasının kesikli zamanda basit bir uygulaması, aşağıda sözde kod olarak verilmiştir:

önceki\_hata = 0

integral = 0

Döngü:

hata = referans - ölçülen\_değer

integral = integral + hata \* dt

türev = (hata - önceki\_hata) / dt

kontrol = kp \* hata + ki \* integral + kd \* türev

önceki\_hata = hata

Bekle (dt)

Göt Döngü

#### 3.4.4. PID Parametrelerinin Ayarlanması

Çoğu endüstriyel süreç, PID kontrolcüler kullanılarak kontrol edilir. PID kontrolcülerin yaygın kullanımının sebeplerinin, kısmen geniş bir yelpazedeki çalışma koşullarında gösterdikleri iyi başarı oranından ve kısmen de mühendislerin basit ve doğru şekilde kullanımına olanak sağlayan işlevsel kolaylıktan kaynaklandığı söylenebilir [21, p. 482]. PID kontrol algoritmasını uygulamaya koyabilmek için;  $K_P$  ile ifade edilen orantısal kazanç,  $K_I$  ile ifade edilen integral kazancı ve  $K_D$  ile ifade edilen türev kazancı olmak üzere, üç adet parametrenin belirlenmesi gereklidir. PID parametreleri, süreç değişkeninin hızlı şekilde referans değerine yakınsayarak sistemi dengeye getirmesini sağlayacak, sistem durağan duruma ulaşana kadar geçen süre içerisinde gerçekleşen



salınımları hızlı şekilde küçülterek durağan durumdaki kontrol hatasını ortadan kaldıracak ve sistemin tüm süreç boyunca kararlı şekilde çalışmasını garanti edecek şekilde ayarlanması gerekir.

PID kontrolcü için uygun kazanç değerlerinin belirlenmesinde kullanılan çok sayıda yöntem mevcuttur. Bu parametrelerin belirlenmesi süreci, genellikle PID ayarlama olarak anılır [21, p. 483]. Yaygın olarak kullanılan başlıca PID ayarlama yaklaşımları arasında; el ile ayarlama yöntemleri, Ziegler-Nichols yöntemleri, kök yer eğrisi ve kutup yerleştirme (pole placement) yöntemleri, Åström ve Hägglund (röle) yöntemleri ile optimizasyon yöntemleri sayılabilir.

#### 3.4.4.1. El ile Ayarlama

El ile ayarlama yöntemlerinde, PID parametreleri; simülasyonlarla elde edilen adım tepkisi kullanılarak yapılan küçük analitik analizler ile deneme yanılma sonucunda veya bazı durumlarda gerçek sistem üzerinde yapılan testler ile gözlem ve tecrübeye dayalı yaklaşımlarla belirlenir. El ile ayarlama yöntemleri, genellikle tecrübeyle sabitlenmiş birtakım kuralların takip edildiği deneysel yaklaşımlar ile uygulanır.

El ile ayarlama kullanılan deneysel yaklaşımlardan biri aşağıdaki adımlar izlenerek uygulanabilir:

- Öncelikle,  $K_I=0$  ve  $K_D=0$  olarak ayarlanır.
- Sonrasında,  $K_P$ , kapalı döngü sisteminin ıraksak hale gelmeden önce salınım yapmaya devam ettiği son noktaya kadar yavaşça artırılır. Bu adım simülasyon üzerinde veya gerçek sistem üzerinde uygulanabilir.
- Sistemi salınımların sınırına getiren  $K_P$  değeri bulunduktan sonra, bu değer çeyrek genlik düşüşü olarak bilinen değere ulaşana kadar düşürülür. Çeyrek genlik düşüşü, kapalı döngü tepkisinin bir salınım periyodu içerisindeki en büyük genliğinin yaklaşık dörtte birine düştüğü noktayı ifade eden büyüklüktür.
- Bir sonraki adımda ise;  $K_I$  ve  $K_D$ , istenilen tepki karakteristiğine ulaşana kadar deneme yanılma yöntemiyle artırılır. Bu aşamada integral ve türev parametrelerinin sistem başarımı ve kararlılığı üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulur.

### 3.4.4.2. Ziegler-Nichols Yöntemi

Ziegler-Nichols ayarlama yöntemleri, el ile ayarlama yöntemlerinden farklı olarak, analitik temellere dayandırılmış birtakım kuralların takip edildiği deneysel yaklaşımlar ile uygulanır. 1942 yılında yayınlanan Ziegler-Nichols yöntemi, PID kontrolcü parametrelerinin ayarlanmasında kullanılan ilk analitik ve sistematik yöntem olarak kabul edilebilir. Ziegler-Nichols yöntemi kullanılmaya başladıktan sonra, endüstriyel süreçlerin kontrolünde büyük iyileşme gerçekleşmiş ve bu yöntem hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. Daha sonrasında, Ziegler-Nichols yöntemine dayanan çok sayıda PID ayarlama varyasyonu ortaya konulmuş ve uygulanmıştır.

Ziegler-Nichols yöntemi, adım girdi için verilen kapalı döngü tepkisinin analizine dayanmaktadır. Bu yöntem, aşırı salınımlara izin vermeden hızlı şekilde kapalı döngü adım tepkisine ulaşmayı hedeflemiştir. Yöntemin uygulanabilmesi için nihai duyarlılık (ultimate sensitivity)  $S_U$  ve nihai periyot (ultimate period)  $P_U$  parametrelerinin hesaplanması gerekir. Ziegler-Nichols yöntemi aşağıdaki genelleştirilmiş kurallar izlenerek uygulanabilir [22]:

- Öncelikle,  $K_I=0$  ve  $K_D=0$  olarak ayarlanır.
- Sonrasında,  $K_P$ , kapalı döngü sisteminin salınım yapmaya başladığı ilk noktaya kadar artırılır. Bu noktadaki kazanç  $S_U$ , bir salınım periyodunun uzunluğu ise  $P_U$  olarak belirlenir. Bu adım simülasyon üzerinde veya gerçek sistem üzerinde uygulanabilir.
- Bir kez  $S_U$  ve  $P_U$  parametreleri hesaplandıktan sonra, PID parametreleri  $K_P$ ,  $K_I$  ve  $K_D$  Tablo I'de gösterilen ilişkilere göre hesaplanabilir.

**TABLO I:** Ziegler-Nichols PID Kontrolcü Parametreleri

<b>Kontrolcü Tipi</b>	<b><math>K_P</math></b>	<b><math>K_I</math></b>	<b><math>K_D</math></b>
P Kontrolcü	$0.5S_U$	-	-
PI Kontrolcü	$0.45S_U$	$\frac{0.54S_U}{P_U}$	-
PID Kontrolcü	$0.6S_U$	$\frac{1.2S_U}{P_U}$	$\frac{0.6S_U P_U}{8}$

Ziegler-Nichols yöntemi her sistemde ve süreç kontrolünde kullanmaya uygun değildir. Ancak farklı PID ayarlama yöntemleri uygulanırken diğer aşamalardan önce, başlangıç parametrelerinin belirlenmesi için bu yöntem kullanılabilir [21, p. 488].

#### 3.4.4.3. Kök Yer Eğrisi ve Kutup Yerleştirme

1940'ların sonunda ve 1950'lerde kök yer eğrisi yöntemleri kullanılmıştır. Analitik bir yaklaşım olan kök yer eğrisi yöntemi genellikle kapalı döngü kontrol sisteminin kararlılık analizinde kullanılır. Bu yöntem ile sistemin kararlı şekilde çalışmasını sağlayan parametrelerin sınırları belirlenebilir. Ancak optimal parametrelerin bulunabilmesi için belirlenen sınırlar arasındaki değerlerin analiz edilmesi gerekir.

Kök yer eğrisi yönteminde, temel olarak kapalı döngü kontrol sistemlerinin transfer fonksiyonları bulunur. Bulunan transfer fonksiyonunun pay ve paydasının kökleri olan sıfırlar (zeros) ve kutuplar (poles) belirlenir. Belirlenen kutup değerleri sistemin kararlılık analizinde kullanılarak, parametrelerin sınırları hesaplanır.

Kutup yerleştirme yöntemi, doğrudan kök yer eğrisi analizlerine dayanır. Bu yöntemde bir sistemin kararlı şekilde çalışmasını sağlayacak kutup değerleri belirlenir ve sistem tasarımı bu kutup değerlerine göre yapılır. Ancak PID parametrelerinin ayarlanması, kutup yerleştirme yöntemi için yeterince karmaşık bir süreçtir. Dolayısıyla, bu yöntemin PID kontrolcünde kullanılabilmesi için karmaşıklığın çeşitli yaklaşım yöntemleriyle kısıtlanması gereklidir [19, p. 174].

#### 3.4.4.4. Åström ve Hägglund (Röle) Yöntemi

1984 yılında yayınlanan Åström ve Hägglund röle yöntemi, bir otomatik PID ayarlama yöntemidir [23]. Röle yöntemi, bang bang kontrol olarak adlandırılan iki farklı eşik değere sahip aç-kapa kontrol yöntemini kullanarak, süreci geçici durumda çalıştırır ve süreç çıktısındaki salınımları ölçümler. Bu eşik değerleri histerezis karakteristiği oluşturacak şekilde belirlenir. Yöntemin çalışma mantığı röleye benzediği için, daha sonra bu adla anılmaya başlamıştır.

Röle yönteminde, PID kontrolcüye paralel şekilde bir bang bang kontrolcü bağlanır. Bu sayede, hata terimlerinin anlık olarak belirlenen bir üst eşik değerinden daha büyük bir değer aldığı durumda; bang bang kontrolcü, PID kontrolcüyü açık devre haline getirerek geçici olarak devre dışı bırakır. Hata terimleri, tekrar belirlenen bir alt eşik değerinin altına düştüğünde; bang bang kontrolcü, PID kontrolcüyü yeniden devreye alır. Böylece, PID kontrolcülerde ortaya çıkabilecek problemlerden biri olan, integral teriminin anlık büyük hata terimlerinin etkisini uzun süre devam ettirmesinden kaynaklanabilecek problemlerin önüne geçilmiş olur.

#### 3.4.4.5. Optimizasyon Yöntemleri

Bilgisayar sistemleri ile artan hesaplama kapasitesinin bir sonucu olarak, artık modern endüstriyel süreçlerin çoğunda, PID ayarlama ve döngü optimizasyon yazılımları kullanılmaya başlamıştır. Optimizasyon yöntemleri çok güçlü yöntemlerdir ve her türlü ölçüt formülleştirilebildiği sürece, optimizasyon algoritmaları ile çözülebilir [19, p. 196]. Günümüzde, sezgisel optimizasyon yöntemleri ve bulanık mantıkla çalışan PID ayarlama algoritmalarının yanı sıra, PID kontrolcünün dinamik ve durağan duruma sahip olmayan senaryolarda parametreleri otomatik olarak ayarlayan PID döngüsü yazılımları da mevcuttur. Bu yazılımlar, dinamik süreçleri bozulma ile birlikte modelleyerek sistem tepkisine göre PID parametrelerini belirler.

## **4. KONTROL TEORİSİ UYGULAMALARI İLE ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

### **4.1. KONTROL TEORİSİ VE ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜLERİNİN İLİŞKİSİ**

#### **4.1.1. Kontrol Teorisi Uygulamaları**

Kontrol teorisi, elektrik mühendisliği alanında orta çıkmış bir kontrol ve otomasyon mühendisliği yaklaşımıdır. Bu yaklaşımla tasarlanan kontrol sistemlerinin yaygınlaştığı ilk uygulama alanı endüstriyel üretim süreçleri olmuştur. Üretimde kullanılan makinelerin yüksek hata oranlarını düşürmeyi amaçlayan kontrol sistemi uygulamaları, temel olarak üretim süreçlerini iyileştirmek için kullanılmıştır.

Üretim süreçlerinde yüksek başarımlarına ulaşılması ile birlikte kontrol teorisi uygulamalarının kullanım alanları endüstriyel üretim süreçlerinin ötesine geçmiştir ve günümüzde hayatın her alanında süreçlerin kontrolünü sağlamak ve iyileştirmek için kullanılmaktadır. Başlangıçta yalnızca sürekli zamanda çalışan sistemler olarak tasarlanan kontrol uygulamaları, bilgisayarlar gibi sayısal teknolojilerin gelişmesiyle birlikte kesikli zamanda da uygulanabilir hale gelmiştir. Böylece, mekanik sistemlerin ötesinde; bilim, finansal yönetim ve hatta insan davranışları alanında dahi kontrol teorisi uygulamaları mevcuttur.

#### **4.1.2. Zaman Serisi Öngörülleri**

Zaman serileri, özetle, zamanda yalnızca ileriye doğru akan bağlantılı veri dizileri olarak tanımlanabilir. Bu bağlamda, tüm zaman serileri, aynı zamanda nedensel veri süreçleri olarak kabul edilebilir. Dolayısıyla, zaman serilerinin nedensel ve sürekli bir yapıya sahip olmasından yola çıkılarak; sistemlerin, süreçlerin ve hatta insanların gelecekteki davranışlarının öngörülebilmesi için zaman serisi öngörülleri kullanılmaktadır.

Ancak çoğu zaman serisi süreci; nedensel ve açıklanabilir, dolayısı ile de modellenilebilir kısmın dışında, farklı dinamiklere bağlı olarak farklı rassal bileşenlerden oluşan ve öngörülemeyen bir kısım da içerirler. Bu stokastik zaman serisi süreçlerinin öngörülemeyen kısımlarıyla baş edilmesi için, öngörü yöntemlerine ek olarak öngörü

modelindeki yanılmaları düzeltecek farklı yaklaşımların ve yöntemlerin de kullanılmasına ihtiyaç duyulabilmektedir.

#### **4.1.3. Kontrol Teorisi ve Zaman Serisi Öngörülerinin İlişkisi**

Kontrol teorisi uygulamaları, sistemlere etki eden gürültüyü sürekli bir şekilde sönümleyerek stokastik süreçlerin kontrolünün sağlanmasında en yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardır. Kontrol sistemleri, genellikle endüstriyel süreçlere uygulanmakla birlikte, süreçlerin fiziksel kısıt ve niteliklerinden bağımsız olarak girdi ve çıktı ilişkileri üzerinden yalnızca uygun parametrelerin belirlenmesi yoluyla tasarlanırlar. Dolayısıyla, kontrol teorisi uygulamalarının yüksek düzeyde soyutlanmış olarak düşünülmesi mümkündür. Bu bağlamda, kontrol uygulamasının yapılacağı herhangi sistemsel süreç için kara kutu yaklaşımı ile yalnızca girdi ve çıktı ilişkisi tanımlanarak, bu süreçlerin kontrolünün sağlanabilir.

Stokastik zaman serileri ve bunların öngörülerini için, kontrol teorisi açısından analogide bulunmak gerekirse; zaman serisini endüstriyel bir üretim süreci, zaman serisinin öngörüsünde kullanılan modeli de bu endüstriyel üretim sürecinde kullanılmakta olan bir makine olarak düşünmek mümkündür. Bu şekilde, modelin girdi ve çıktı ilişkisi üzerinden bir kontrol sistemi tanımlanabilir. Öngörü modelinin çıktısı ve gerçekleşen değer arasındaki oluşan farklar ise bu üretim sistemine etki eden gürültüden kaynaklanan üretim hataları olarak düşünüldüğünde; bu hataların sönümlenmesi için, bir negatif geri besleme kontrol sistemi kullanılması uygun olacaktır. Bu uygulama sonucunda, endüstriyel üretim süreçlerinde hata oranlarının düşürülmesine çok büyük katkı sağlayan kontrol sistemleri, stokastik zaman serisi öngörü süreçlerinde de aynı yaklaşım mantığı ile hata oranlarının düşürülmesine katkı sağlayabilir.

#### **4.2. PID KONTROLLÜ ZAMAN SERİSİ ÖNGÖRÜ MODELLERİ**

Zaman serisi öngörü modellerinin kontrol sistemleriyle birçok farklı şekilde birleştirilmesi mümkündür. Bu yaklaşımlar iki ana grupta toplanabilir. İlk yaklaşım, daha sade ve temel bir yaklaşım olarak, öngörü modeli ile PID kontrolcünün etkileşimsiz olarak birleştirilmesidir. İkinci yaklaşım ise öngörü modeli ile PID kontrolcünün

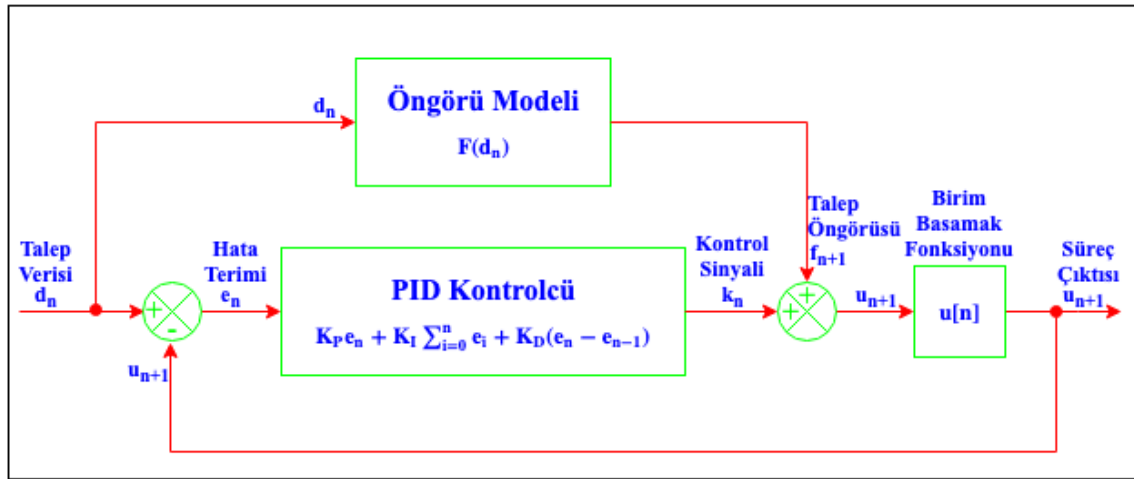
etkileşimli olarak birleştirilmesidir. Bu yaklaşımlar, en yaygın olarak kullanılan nedensel zaman serisi türlerinden biri olan talep verileri üzerinden gösterilmiştir.

#### 4.2.1. Etkileşimsiz PID Kontrollü Öngörü Modeli Yaklaşımı

Etkileşimsiz birleştirme yaklaşımında öngörü modeli kara kutu olarak sisteme dahil edilir. Talep verileri gecikmeli şekilde kontrol sistemine ve öngörü modeline ayrı ayrı girdi olarak verilir. Çıktı tarafında ise; öngörü modelinin tahminleri ile üretilen PID kontrol sinyali birbirine eklenir ve süreç çıktısı belirlenir.

Etkileşimsiz yaklaşımda, öngörü modelinin hata terimleri gürültü olarak modellenmiş ve PID kontrolcü gürültü sönümleyici bir modda çalıştırılmış olur. İlk hata terimi, ilk öngörülen tahmin ile ilk gerçekleşen veri arasındaki hataya eşitlenir. Sonrasında ise gelen hata terimleri gürültü olarak algılanıp sönümlenir. Bu yaklaşımda tesis kazancı kesikli zaman birim basamak (Heaviside) fonksiyonu olarak belirlenir.

Etkileşimsiz birleştirme yaklaşımının blok diyagramı Şekil 9 ile verilmiştir. Bu çalışmada, uygulamada kullanılacak yaklaşım olarak, etkileşimsiz birleştirme yaklaşımı seçilmiştir.



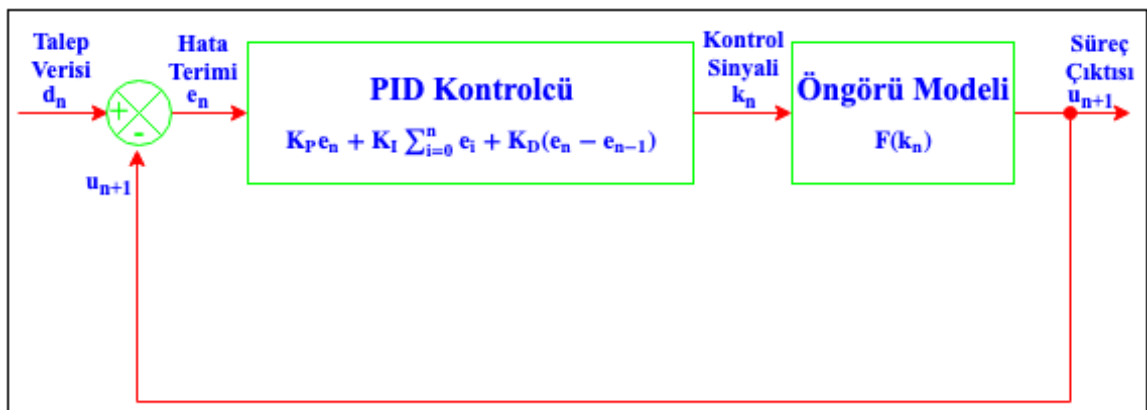
Şekil 9. Etkileşimsiz PID kontrollü öngörü modeli

#### 4.2.2. Etkileşimli PID Kontrollü Öngörü Modeli Yaklaşımı

Etkileşimli birleştirme yaklaşımında öngörü modeli kara kutu olarak sisteme dahil edilemez. Bunun yerine, öngörü modeli gri kutu olarak düşünülerek, modelin tesis fonksiyonu girdi ve çıktılar cinsinden tespit edilip kullanılabilir. Bir diğer seçenek ise, modelin beyaz kutu şeklinde düşünülüp içyapısı analiz edilerek sisteme dahil edilmesidir. Bu yaklaşımda da talep verileri gecikmeli şekilde kontrol sistemine girdi olarak verilir. Kontrolcü çıktısı olarak üretilen PID kontrol sinyali ve geri besleme sonucunda gerçekleşen kontrol hatası terimleri, öngörü modeline birlikte girdi olarak verilir. Öngörü modelinin bu girdiler sonucunda bulunduğu tahminler de süreç çıktısını oluşturur.

Bu yaklaşımda, geçmiş talep verileri PID kontrolcü tarafından filtrelenerek, düzeltilmiş halde öngörü modeline gönderileceği için; öngörü modeli çıktıları da bu doğrultuda daha kararlı hale getirilir. Hata terimleri ise geri besleme döngüsü boyunca hem PID kontrolcü tarafından sönümleneceği hem de öngörü modeli tarafından düzeltileceği için, doğru parametrelerle tasarlanan bu sistem daha hızlı şekilde durağan duruma getirilebilir.

Etkileşimli birleştirme yaklaşımı ile belirlenen aralıklarda sistem kararlılığını garanti etmek mümkün olsa da sistem tasarımı, etkileşimsiz yaklaşıma kıyasla daha karmaşıktır. Tesis fonksiyonunun, her öngörü modeli için, o öngörü modeline özel olarak analitik yöntemlerle veya frekans tepkisi ölçümüyle analiz edilerek belirlenmesi gerekir. Etkileşimli birleştirme yaklaşımının genel blok diyagramı Şekil 10 ile verilmiştir.



Şekil 10. Etkileşimli PID kontrollü öngörü modeli



### 4.3. PID KONTROLLÜ ÖNGÖRÜ MODELLERİ İLE TALEP TAHMİNİ UYGULAMALARI

Bu kısımda, kontrol teorisi uygulamaları ile zaman serisi öngörülerini iyileştirilebileceğini göstermek üzere gerçekleştirilen uygulama çalışmalarına yer verilmiştir. Öncelikle, gerçekleştirilen uygulamalarda kullanılan zaman serisi türlerinin, öngörü modellerinin ve kontrolcü tiplerinin seçilmesindeki temel motivasyonlara değinilmiştir. Sonrasında ise uygulanan yöntemlerin ne şekilde kullanıldığı anlatılmış uygulanan bazı temel değişikliklerden bahsedilmiştir. Sonrasında ise gerçekleştirilen uygulamaların detayları verilmiştir.

#### 4.3.1. Talep Verileri ve Talep Tahmini

Nedensel zaman serisi türleri içerisinde, başlıca türlerden birisi olarak tarihsel talep verileri kabul edilebilir. Talep tahmini ise; üretim yönetimi ve stok yönetimi alanında verilecek kararların ve dolayısıyla talep planlamasının temelini oluşturan önemli adımlardan birisidir. Dahası, üretim yönetimi ve stok yönetimi, talep planlamasına bağlı olarak yapıldığı için; planlamanın ilk adımı olarak genellikle talep tahminine ihtiyaç duyulur.

Doğru talep tahminleri ile üretim miktarını daha doğru belirlemek mümkündür. Bu sayede stok yönetimin daha etkin şekilde yapılması sağlanabilir. Ortalama stok düzeyi daha düşük seviyelerde olacağı için stok maliyetleri de düşürülebilir. Emniyet stoklarının düzeyi de bu tahminlere göre doğru şekilde belirlendiğinde, fırsat maliyetlerinin oluşmasından da kaçınılabılır. Bu bağlamda, talep planlamasının üretim yönetimi için önemi göz önünde bulundurularak, öngörude bulunulacak zaman serisi türü olarak, kronolojik talep verilerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Uygulamalar için talep verileri olarak farklı periyotlarla kaydedilmiş ve farklı sayılarda gözlemler içeren zaman serileri seçilmiştir. Ayrıca, bu talep verilerinin seçiminde, zaman serilerinin; doğrusal ve doğrusal olmayan belirleyici trend, mevsimsellik veya dönemsellik ile rassal değişim bileşenlerinden tümünü veya birkaçını aynı anda içeriyor olmasına dikkat edilmiştir. Böylece, uygulamalardan elde edilecek sonuçlarının zaman serileri düzeyine genelleştirilebilmesi mümkün olacaktır.

### 4.3.2. Talep Tahmini için Kullanılan Öngörü Modelleri ve Model Seçim Kriterleri

Talep verileri yüksek oranda nedensellik içeren zaman serisi süreçleridir. Ancak, talep verileri aynı zamanda insan faktörünün etken olduğu bir zaman serisi türü olduğu için, nedensel olarak doğrudan açıklanamayacak ve sürekli şekilde gerçekleşen mikro düzeyde değişimlerin kümülatif etkisine maruz kalır. Dolayısıyla, talep verilerinde nedensel etkinin yanında rassal olarak nitelenebilecek değişimlerin etkisi de büyüktür.

#### 4.3.2.1. ARIMA Modelleri ile Talep Tahmini

Talep tahmini için kullanılacak öngörü modellerinin nedensel bileşenlerle birlikte rassal değişimlere de tepki verebilmesi gerekir. Bu bağlamda, zaman serisi içerisindeki nedensellik otokorelasyon varlığına işaret ederken, rassal değişimler zaman serisi üzerinde beyaz gürültü oluşturur. Mevsimsellik ve dönemsellik ise periyodik tahmincilerle modellenebilir.

Belirtilen zaman serisi bileşenleri aynı anda modelleyebilecek temel istatistiksel öngörü modeli türlerinden biri, Bölüm 2.3'te detaylı olarak bahsedilen ARIMA modelleridir. Bu çalışmada da talep tahminin gerekliliklerini karşılamak amacıyla; talep tahmini öngörü modelleri olarak, çok sayıda ARIMA ve SARIMA modeli içerisinde her talep verisi için uygun olanları seçilmiştir.

#### 4.3.2.2. Doğru ARIMA Modelinin Tespit Edilmesi

Her talep verisi için uygun ARIMA veya SARIMA modellerinin seçiminde, genel olarak sırasıyla aşağıdaki adımlar uygulanmıştır.

- Öncelikle verilerin grafiği incelenerek mevsimsel veya dönemsel etkiler tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu aşamada varsa mevsimsel ve dönemsel değişimlerin periyodu belirlenmiştir. Bu periyot uzunluğunun küçük değişimler gösterdiği durumda, en düşük periyot uzunluğundan en yüksek periyot uzunluğuna kadar modeller hesaba katılmıştır.
- Çoklu periyodik değişimler gösteren veriler için yüksek frekanslı ve düşük frekanslı periyotların etkileri de hesaba katılmış ve veri ile daha yüksek

korelasyon sağlanan periyodik yapı kullanılmıştır. Anlamsız uzunlukta olabilecek çok uzun periyotlar ise göz ardı edilmiştir. Örneğin, 15 dakikalık gözlemlerden oluşan bir veri için genellikle saatlik, günlük veya haftalık uzunlukta periyotların kullanılması anlamlı olabilecekken, çeyreklik veya yıllık uzunlukta periyotların kullanılması büyük olasılıkla istatistiksel olarak anlamsız olacaktır.

- Varsa mevsimsel veya dönemsel periyotlar belirlendikten sonra, yine grafik üzerinden verinin durağan olup olmadığı ve belirleyici trend gösterip göstermediği incelenmiştir. Durağan olmadığı düşünülen veriler için; Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) testi ve birim kök varlığını (entegrasyon derecesini) tespit etmek için Genişletilmiş Dickey-Fuller (ADF) testleri uygulanabilir.
- Daha sonrasında, %5 önem düzeyinde otokorelasyon fonksiyonları ve kısmi otokorelasyon fonksiyonları incelenerek, belirgin ve istatistiksel olarak anlamlı otoregresif terimler belirlenmiştir.

Son olarak, rassal değişimleri de kısmi olarak modelleyebilmek için hareketli ortalama terimleri sırayla modele dahil edilerek denenebilir. Ancak uygulamada kullanılan talep verilerinin yapısı çok belirgin olmadığı için, ilk iki adımda olası periyot uzunlukları tespit edildikten sonra; en doğru ARIMA veya SARIMA modelinin bulunabilmesi için bazı yazılımlar kullanılmıştır.

Bu aşamada, doğru modeli tespit edebilmek için, büyük oranda Rob J. Hyndman'ın katkılarıyla R betik dilinde geliştirilmiş olan forecasted kütüphanesinin python programlama diline uyarlanmış versiyonu pmdarima aracılığıyla, kütüphanenin istatistiksel öngörü analizlerine büyük kolaylık getirmiş olan ve en yaygın olarak bilinen ve kullanılan auto.arima fonksiyonu uygulanmıştır. Bu fonksiyon ile kısa süre içerisinde yüzlerce olası ARIMA ve SARIMA modelinin arasından belirtilen bilgi kriterine göre en uygunu tespit edilir [24]. En uygun model tespit edilirken; otoregresif ve hareketli ortalama terimlerinin derecesi ile varsa mevsimsel otoregresif ve hareketli ortalama terimlerinin derecesi belirlenir. Aynı zamanda durağanlık ve birim kök testleri de uygulanarak gerekli ise birim entegrasyon ve mevsimsel entegrasyon dereceleri de tespit edilir.

### 4.3.3. Talep Tahmini için PID Kontrollü Öngörü Modelinin Oluşturulması

Kontrol teorisi uygulamaları arasında en yaygın şekilde kullanılan algoritma, PID kontrolcü algoritmasıdır. Dolayısıyla, talep tahmini için kullanılacak olan öngörü modellerinin kontrolünü sağlamak için de PID kontrolcü kullanılmıştır.

PID kontrolcü öngörü modeli ile etkileşimsiz şekilde birleştirilmiştir. Dolayısıyla, PID kontrolcü algoritması uygulamada gürültüyü ve bozulmaları engelleyecek şekilde kullanılmıştır. Aynı zamanda, uygulamada kullanılan talep verileri ve bu verilere göre seçilen öngörü modelleri değişirken; tüm talep verileri ve tüm öngörü modelleri için tek bir kontrolcü sistemi kullanılmıştır. Bu sayede, daha önce bahsedilmiş olan kara kutu yaklaşımının uygulaması da bu kısımda gösterilmiştir. Böylece, kullanılan kontrolcünün model ve veri bağımsız şekilde, soyutlanarak uygulanabilirliğinin de gösterilmesi amaçlanmıştır.

#### 4.3.3.1. İntegral Kapatıcılı PID Kontrol

PID kontrol sistemlerinde, hem kontrol uygulamasında hem de PID parametrelerinin belirlenmesi sürecinde karşılaşılabilecek problemlerden biri integral etkisidir. İntegral terimi hata terimlerini kümülatif olarak barındırdığı için yüksek bir ataletle sahiptir. İntegral etkisi de bu ataletle bağlı şekilde, hata terimlerinin anlık olarak çok büyük değer aldığı durumlarda, integral aksiyonu tarafından bu yüksek hata değerinin etkisinin uzun süre devam ettirilmesi durumudur.

Durağan süreçlerde integral etkisine bağlı bir sorunla karşılaşılması pek olası değildir. Ancak durağan veya kararlı yapıda olmayan veya uç değerler içeren süreçlerde integral etkisi görülebilir. Bu durum, kontrolcünün kararlılığı olumsuz etkileyerek düşmesine sebep olurken, aynı zamanda kontrol değişkeninin geçici bir süre normalde olması gerekenden daha büyük veya daha küçük değerler almasına yol açabilir.

Bu durumdan kaçınmak amacıyla, kontrolcü sistemlerinde uç hata değerlerinde integral kontrolü geçici olarak kapatan ya da integral teriminin kontrolcüye negatif olarak yeniden eklenmesiyle integral etkisini ortadan kaldıran yöntemler uygulanmaktadır.

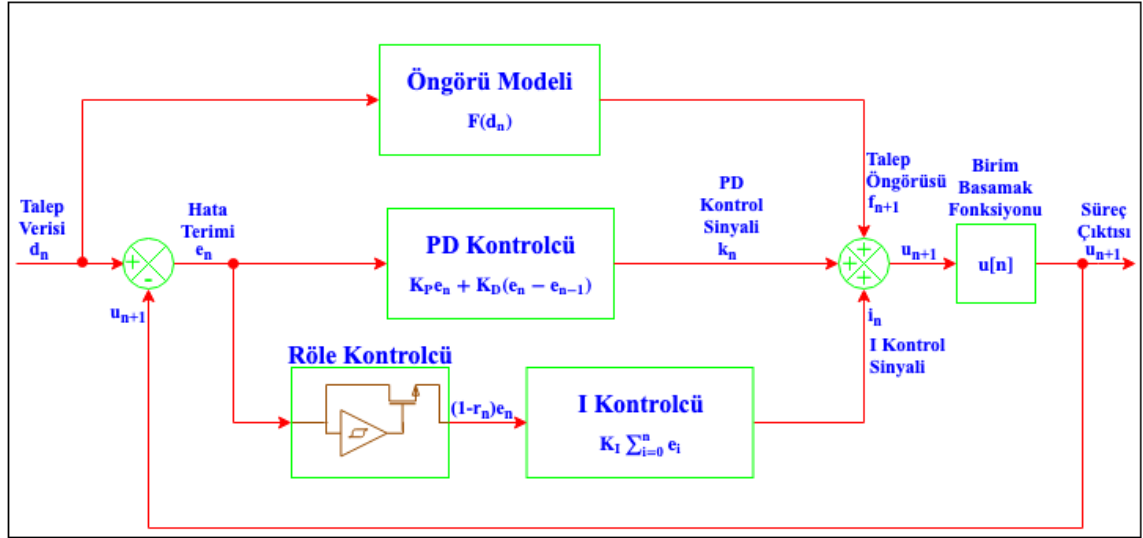
#### 4.3.3.2. Talep Tahmini için Tasarlanan İntegral Kapatıcılı PID Kontrol Algoritması

Talep verilerinde uç değerlerle karşılaşma alma olasılığı sebebiyle, uygulamada kullanılan PID kontrolcü sisteminde integral kontrolü uç değerdeki hatalara geçici olarak kapatacak özgün bir yöntem kullanılmıştır. Bu şekilde, hem parametrelerin belirlenmesi sürecinde hem de talep tahminlerinin testleri gerçekleştirilirken kontrolcünün daha kararlı bir yapıda çalışması sağlanmıştır. Talep tahminleri için tasarlanan integral kapatıcılı PID kontrol algoritması, otomatik PID ayarlanma yöntemi olarak kullanılan Åström ve Hägglund röle yönteminden ilham alınarak oluşturulmuştur.

Önerilen yöntemde, integral kontrolcünün önüne, röle mantığı ile çalışan bir bang bang kontrolcü eklenmiştir. Bu kontrolcü için alt ve üst olmak üzere iki farklı eşik değeri belirlenmiştir. Hata terimleri, üst eşik değerinden daha büyük bir değer aldığı anda, röle hata terimleri ile integral kontrolcü arasındaki bağlantıyı açık devre haline getirir ve integral kontrolcüyü yeni hata terimlerine kapalı hale getirir. Bu aksiyon, rölenin açık olduğu durumda; yeni hata terimlerinin integral kazancı  $K_I$  ile çarpılarak kontrolcü sinyaline negatif şekilde geri beslenmesi ile de elde edilebilmektedir.

Rölenin açık olduğu durumda, sistem görünürde PID kontrol algoritması ile çalışmaya devam eder; ancak integral terimi, yeni hata terimleri ile beslenerek güncellenmez ve röle açılmadan önceki en son değerini bu süreç boyunca korur. Bu sayede, kontrolcü sinyalinin genel düzeyi en son kararlı konumda sabit tutulurken, aktif olarak çalışmaya devam eden PD kontrol algoritması ile hata terimleri hızlı ve dinamik bir şekilde takip edilerek tekrar kabul edilebilir seviyelere getirilir. Hata terimleri, PD kontrolcü tarafından sönmülenerik alt eşik değerinden daha küçük değerler almaya başladığında ise; röle yeniden kapalı konuma gelerek integral kontrolcüyü devreye dahil eder ve böylece integral kontrolcünün tekrar yeni hata terimleri ile beslenerek güncellenebilir hale getirilmesi sağlanır. Bu durumda, sistem yeniden bir bütün olarak PID kontrolcü algoritması ile çalışır hale gelir.

Bir periyot sonrasında talep tahmini için tasarlanan integral kapatıcılı etkileşimsiz PID kontrollü öngörü modeli Şekil 11’de gösterilmiştir. Kontrol sistemi, simülasyon ortamında çalıştırılacağı için 1 periyotluk zaman dilimi 1 birim zaman olarak hesaba katılmıştır. Sistemde, röle kontrolcü; bir adet Schmitt Trigger tetikleyici entegresi ve bir adet n-kanal MOSFET transistör ile modellenmiştir.



Şekil 11. İntegral kapatıcılı etkileşimsiz PID kontrollü öngörü modeli

Bir periyot sonrası için talep tahmini uygulamasında kullanılmak üzere tasarlanan integral kapatıcılı etkileşimsiz PID kontrollü öngörü modeli algoritması aşağıda sözde kod olarak verilmiştir:

```

önceki_hata = 0
integral = 0
kontrol = 0
röle = 0
n = 0
Eğer n < gözlem_sayısı ise:
    hata = talep[n] - öngörü[n] - kontrol
    süreç_çıktısı = öngörü[n] + kontrol
    Eğer röle = 0 ve hata > üst_eşik ise:
        röle = 1
    Eğer röle = 1 ve hata < alt_eşik ise:
        röle = 0
    Eğer röle = 0 ise:
        integral = integral + hata
    türev = hata - önceki_hata
    kontrol = kp * hata + ki * integral + kd * türev
    önceki_hata = hata
    n = n + 1
Başa dön

```

#### 4.3.3.3. Talep Tahmini için PID Ayarlama

PID kontrolcü parametrelerinin ayarlanmasında, her talep verisi için öngörü modelinin eğitiminde kullanılan gözlemler ve bu gözlemler için yapılan öngörüler kullanılmıştır. Bu süreçte biri küçük ve orta büyüklükteki veri setleri için, diğeri ise büyük veri setleri için kullanılmak üzere, hata terimlerine bağlı olarak iki farklı maliyet fonksiyonu oluşturulmuş ve bu fonksiyonlar minimize edilmeye çalışılmıştır.

Küçük ve orta büyüklükteki veri setleri için, maliyet fonksiyonu; sondan başa doğru logaritmik olarak azalan katsayılarla ağırlıklandırılan karesel hataların ortalamasının karekökü olarak belirlenmiştir. Bu maliyet fonksiyonu, normalize edilmiş standart hatayı temsil etmektedir. Son gözlemlerin daha büyük katsayılarla ağırlıklandırılmış olmasının sebebi ise, kontrol sisteminin kısa sürede durağan duruma ulaşmasını garanti edecek PID parametrelerinin seçilmesini sağlamaktır.

Büyük veri setleri için ise, maliyet fonksiyonu; karesel hataların ortalamasının karekökü ile hataların mutlak değerlerinin ortalamasının geometrik ortası olarak belirlenmiştir. Bu maliyet fonksiyonu ile ileride tanımlanacak olan genel iyileştirme oranının maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Büyük veri setleri için, küçük veri setlerinin aksine son gözlemlerin daha büyük katsayılarla ağırlıklandırılmasına gerek duyulmamıştır. Bunun nedeni ise, kontrol sisteminin durağan duruma ulaşmasını garanti etmek için yeterli büyüklükte bir eğitim seti oluşturularak, PID parametrelerinin seçilebilmesinin mümkün olmasıdır.

Bir periyot sonrasında öngörülerinde kullanılmak üzere, parametrelerin ayarlanması için tanımlanan minimizasyon modeli, iki farklı maliyet fonksiyonu ile birlikte aşağıda verilmiştir.

#### Parametreler:

$d_n$ : Talep verileri

$f_n$ : Talep öngörülerini

$N$ : Gözlem sayısı

$r_n$ : Rölenin  $n$  anındaki değeri (harici değişken parametre,  $r_n \in \{0, 1\}$ )

Bağımlı değişkenler:

$k_n$ : Kontrol değişkenleri

$e_n$ : Kontrol hataları

Karar değişkenleri:

$k_p$ : Orantısal kontrol kazancı

$k_i$ : İntegral kontrol kazancı

$k_d$ : Türev kontrol kazancı

Model:

En küçük:

$$M_1 = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \frac{e_i^2}{(N-i) \cdot \ln(N)}\right)} \quad \left(\begin{array}{l} \text{küçük ve orta büyüklükteki} \\ \text{veri setleri için} \end{array}\right)$$

En küçük:

$$M_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} |e_i|\right)} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} e_i^2\right)} \quad (\text{büyük veri setleri için})$$

Kısıtlar:

$$k_n = 0, \quad n = 0$$

$$k_n = k_p \cdot e_n - k_i \cdot \sum_{j=0}^n (1 - r_j) \cdot e_j - k_d \cdot (e_n - e_{n-1}), \quad n = 1, \dots, N - 1$$

$$e_{n+1} = d_{n+1} - f_{n+1} - k_n, \quad n = 0, \dots, N - 1$$

Belirlenen maliyet fonksiyonları, konveks olmayan ve özyinelemeli bir yapıda olduğu için; PID parametrelerinin ayarlanması, bir optimizasyon problemi olarak ele alınmalıdır. Bu optimizasyon probleminin deterministik olarak çözülmesi mümkün olmadığı için, sezgisel yöntemlerin kullanımını gerekli kılmaktadır.

## 4.3.3.4. Talep Tahmini için PID Parametrelerinin Optimizasyonu

PID parametrelerinin ayarlanması için veri setlerinin büyüklüklerine göre tanımlanan iki farklı maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi amacıyla de iki farklı optimizasyon



yaklaşımı belirlenmiştir. Küçük ve orta büyüklükteki veri setleri için tanımlanan modelin minimizasyonunda parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO: particle swarm optimization), büyük veri setleri için tanımlanan modelin minimizasyonunda ise logaritmik arama yaklaşımı ile uygulanan ızgara araması yöntemi kullanılmıştır.

Parçacık sürüsü optimizasyonu; rassal olarak belirlenen aday çözümleri, belirlenen bir başarımlı ölçütüne göre sistematik bir yaklaşımla yinelemeli şekilde iyileştirerek, verilen problemi optimize etmeye çalışan sezgisel bir optimizasyon yöntemidir. PSO, genellikle konveks olmayan optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılır. PSO algoritması, genel hatlarıyla aşağıda sözde kod olarak verilmiştir:

sürü en iyisini 0'a eşitle

Her parçacık için:

parçacık başlangıç konumunu rassal olarak belirle

parçacık en iyisini 0'a eşitle

Başla dön

Maksimum yineleme sayısı veya minimum hata kriterine ulaşana kadar:

Her parçacık için:

parçacığın bulunduğu konumdaki başarımlı değerini hesapla

Eğer başarımlı değeri parçacık en iyisinden daha iyiyse:

parçacık en iyisini başarımlı değerine eşitle

Eğer parçacık en iyisi sürü en iyisinden daha iyiyse:

sürü en iyisini parçacık en iyisine eşitle

Başla dön

Her parçacık için:

sürü en iyisinin konumuna göre parçacık hızını hesapla

parçacık konumuna ve parçacık hızına göre yeni konum hesapla

Başla dön

Başla dön

sürü en iyisini çıktı olarak dön

Son yıllarda, PSO yöntemi, PID kontrol parametrelerinin otomatik ayarlanmasında da kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. PSO algoritması, PID parametrelerinin ayarlanmasında daha önce yaygın olarak kullanılan genetik algoritmalara kıyasla, daha başarılı ve daha güvenilir sonuçlar sağlamıştır [25]. Bu nedenle, talep tahmini uygulamalarında, PID kontrolcü parametrelerin ayarlanması için tanımlanan minimizasyon modelinin çözümünde kullanılacak yöntemlerden biri olarak PSO yöntemi tercih edilmiştir.

PSO algoritması, küçük ve orta ölçekli veri setlerinde, PID kontrolcü parametrelerin ayarlanması için tanımlanan minimizasyon modeli için optimal çözümü son derece hızlı ve başarılı şekilde bulabilmektedir. Ancak büyük veri setlerinde tanımlanan maliyet fonksiyonunun hesaplanması zahmetli olduğu ve uzun süre aldığı için, bu veri setlerinde PSO benzeri yinelemeli yaklaşımların kullanılması çok uzun zamanlar alabilmektedir. Algoritma, küçük sürü nüfusu ve az sayıda yineleme ile ya da parçacık hızı parametreleri büyütülerek çalıştırıldığında çözüm süresi kısaltılabilir, ancak bu durumda da sürünün yerel optimum değerlerde takılı kalması veya algoritmanın minimum hata kriterine ulaşmadan maksimum yineleme değerlerine ulaşması sebebiyle optimal bir değer bulamaması gibi sorunlarla karşılaşılabilir.

Büyük veri setleri için PID parametrelerinin optimizasyonunda karşılaşılabilecek sorunların çözümü farklı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, ızgara arama yönteminin logaritmik arama yaklaşımıyla yinelemeli olarak kullanılmasına dayanmaktadır. Geliştirilen yaklaşım; belirlenen geniş bir aday çözüm alanı içerisinde,  $10 \times 10 \times 10$  boyutlu sabit bir ızgara ile arama gerçekleştirilerek, hata ölçütlerinin ölçülmesiyle başlar. Sonrasında, aday çözüm bölgesinin sınırları hataların minimum değer aldığı bölgenin etrafında  $10'$ da  $1'$ ine indirilerek daraltılır ve ilk adım tekrarlanır. Bu adımlar, hatalardaki değişim belirlenen bir minimum hata kriterinin altına düşene kadar yinelenerek optimuma yakın bir değere ulaşılabilir gibi; aday çözüm bölgesi yeterince daraltıldıktan sonra, bu sınırlar içerisinde küçük sürü nüfusu ve az sayıda yineleme ile PSO algoritması çalıştırılarak da optimuma yakın değerlere ulaşılabilir.

#### **4.3.4. Tahminleme Hatalarının Ölçülmesi ve Modellerin Kıyaslanması**

Oluşturulan öngörü modellerinin ve bu modellere kontrol sistemi eklenmesiyle elde edilen PID kontrollü öngörü modellerinin kullanılmasındaki temel amaç talep verilerini en düşük hata oranlarıyla tahmin etmektir. Dolayısıyla, oluşturulan modellerin başarı oranlarının da bu hata oranlarına bağlı olarak hesaplanması gerekir.

Gerçekleştirilen uygulamalarda, hata oranı hesaplamalarının yapılabilmesi için; talep verisi, öngörü modellerinin ve model katsayılarının belirlenmesinde ve PID parametrelerinin optimizasyonunda kullanılacak olan eğitim seti ve modellerin başarı

oranlarının ölçülmesinde kullanılacak olan test seti olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Talep verilerin yaklaşık ilk %80'i eğitim setine, son %20'si ise test setine dahil edilmiştir.

Öngörü modelinin seçimi ve seçilen model için katsayıların belirlenmesinde eğitim setine dahil edilen veriler kullanılmıştır. Öngörü modeli eğitim setine uydurulduktan sonra, bu model ile yine eğitim seti üzerinde regresyon gerçekleştirilmiş ve bu regresyondan elde edilen veriler kaydedilmiştir. Bir sonraki adımda, kaydedilen regresyon verileri ile eğitim setinde yer alan gerçek talep verileri kullanılarak PID parametrelerinin optimizasyonu için kullanılmış ve optimize edilen parametreler sabitlemiştir. Böylece eğitim seti ile ilgili kısımlar tamamlanmış olur.

Öngörü modeli ve PID kontrollü öngörü modeli ile yapılacak talep tahminlerinin hata oranlarını ölçmek için test setinde yer alan talep verileri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Test verileri için gerçekleştirilen öngörüler ile bir periyot sonrası için tahminde bulunulmuştur. Test verisi için öngörü modeliyle yapılan her tahmin ve her tahminin kontrolcü ile düzeltilmiş değerleri kaydedilmiş ve gerçek test verileriyle bu tahminler arasındaki hata terimleri ölçülmüştür.

Test sonuçlarının değerlendirilmesi kısmında, test sonucunda elde edilen tüm veriler kullanılarak, modellerin hata miktarları ve hata oranları genel kabul görmüş çeşitli hata ölçütlerine göre hesaplanmıştır. Bu hata ölçütleri, açıklamaları ve hesaplanma yöntemleri; test setindeki veriler  $a_n$ , hata terimleri  $e_n$ , test setindeki verilerin sayısı  $N$  ve mevsimsel modeller için bir dönem içerisindeki veri sayısı  $m$  (mevsimsel olmayan modeller için  $m=1$ ) olmak üzere, Tablo II'de verilmiştir.

**TABLO II:** Değerlendirmede Kullanılan Hata Ölçütleri

Hata Ölçütü	Açıklama	Hesaplama Yöntemi
MBE (mean biased error)	Hataların ortalaması	$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i$
MAE (mean absolute error)	Hataların mutlak değerlerinin ortalaması	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  e_i $

RMSE (root mean square error)	Hata karelerinin ortalamasının karekökü	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}$
nRMSE (normalized RMSE)	Hata karelerinin ortalamasının karekökünün test verilerinin ortalamasına oranı	$nRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i}$
RMSPE (root mean square percentage error)	Hataların test verilerine oranlarının karesel ortalamasının karekökünün yüzdelik değeri	$RMSPE = \% \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{e_i}{a_i}\right)^2} \times 100$
MAPE (mean absolute percentage error)	Hataların test verilerine oranlarının mutlak değerlerinin ortalamasının yüzdelik değeri	$MAPE = \% \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{e_i}{a_i}\right  \times 100$
rRMSE (relative RMSE)	Hata karelerinin ortalamasının karekökünün test verilerinin standart sapmasına oranı	$rRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - \sum_{j=1}^N a_j)^2}}$
MASE (mean absolute scaled error)	Hataların mutlak değerlerinin ortalamasının test verilerinin birinci farklarının (mevsimsel model için birinci mevsimsel farklarının) ortalamasına oranı	$MASE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N  e_i }{\frac{1}{N-m} \sum_{i=m+1}^N  a_i - a_{i-m} }$

Tablo II’de verilen hata ölçütlerinden MAE ve RMSE en yaygın olarak kullanılan iki ölçüttür. MAE hata terimlerinin büyüklüğü ile doğrusal orantılı bir ölçüttür ve gerçek veriye oranlanabilir bir değer verir. MAE için hata terimlerinin büyük veya küçük olmasının herhangi bir etkisi yoktur bu nedenle uç değerlerden etkilenmez. RMSE ise standart hata tahmincisi olarak kullanılan bir ölçüttür ve hataların karesine bağlı olarak değişir. Bu nedenle büyük hata terimlerinden daha çok etkilenir ve uç değerlere karşı daha hassastır. Bu bağlamda, uç değerlerin varlığının bilindiği durumlarda MAE ölçütünün, uç değerlerin varlığının tespit edilemediği durumlarda RMSE ölçütü kullanılabilir. MAE ve RMSE farklı modellerin kıyaslanması için kullanılacak ölçütlerdir. MASE ve rRMSE

ölçütleri ise, MAE ve RMSE ölçütlerinin modellerin gerçek veriyle kıyaslanmasında kullanılabilir şekilde ölçeklendirilmesiyle türetilmiştir [26]. Öngörülerin başarımlarını arttırdıkça; Tablo II’de verilen tüm ölçütlerin değerleri sıfıra yaklaşır.

Tüm modellerin hata ölçütleri hesaplandıktan sonra, PID kontrollü öngörü modellerinin başarımlarını ölçülmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda, öngörü modelleri ile yapılan tahmin hatalarının, PID kontrollü öngörü modelleri ile her ölçüt için hangi oranda azaltıldığının ölçüsünü ifade eden ve (71) ile gösterilen hata iyileştirme oranı ve genel olarak hangi oranda azaltıldığının ölçüsünü ifade eden ve (72) ile gösterilen iyileştirme oranı tanımlanmıştır. Genel iyileştirme oranının hesaplanmasında, talep verisinde uç değerlerin varlığına karar vermenin zorluğundan ötürü MAE ve RMSE değerlerinin geometrik ortalaması kullanılmıştır. İyileştirme oranlarının pozitif değerleri hata terimlerindeki azalışı, negatif değerleri ise hata terimlerindeki artışı ifade etmektedir.

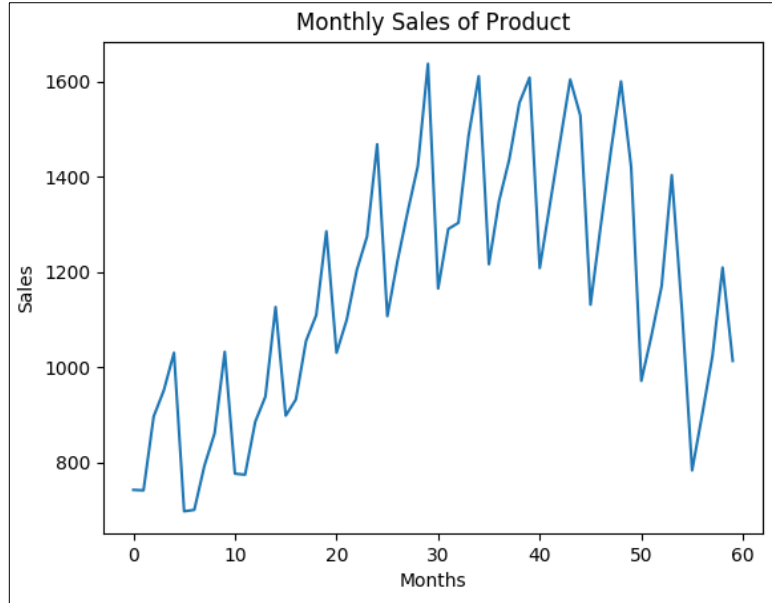
$$\text{Hata iyileştirme oranı} = \% \left( 1 - \frac{|Hata_{PID+\text{Öngörü}}|}{|Hata_{\text{Öngörü}}|} \right) \times 100 \quad (71)$$

$$\text{Genel iyileştirme oranı} = \% \left( 1 - \frac{\sqrt{MAE_{PID+\text{Öngörü}} \times RMSE_{PID+\text{Öngörü}}}}{\sqrt{MAE_{\text{Öngörü}} \times RMSE_{\text{Öngörü}}}} \right) \times 100 \quad (72)$$

#### 4.3.5. Mevsimsellik ve Doğrusal Olmayan Trend İçeren Talep Verisi için PID Kontrollü Öngörü Yöntemleri ile Bir Periyot Sonrasının Talep Tahmini

##### 4.3.5.1. Aylık Ürün Satışları Veri Seti

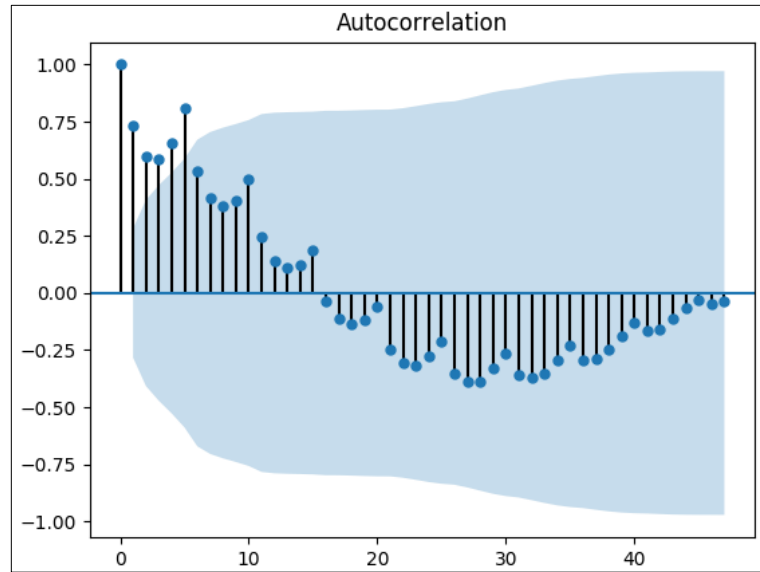
Aylık ürün satışları kaggle.com tarafından paylaşılmış ve daha önce üzerinde çokça çalışılmış genele açık talep tahmini için sağlanan veri setlerinden biridir. Bu veri seti, aylık periyota sahip toplam 60 adet satış verisi içeren 5 yıllık bir zaman serisinden oluşmaktadır. Veri seti, %80 ve %20 oranlarla eğitim ve test setlerine ayrılmıştır. 48 veri eğitim setine, 12 veri test setine dahil edilmiştir. Ürün satışları verilerinin grafiği Şekil 12’de gösterilmiştir.



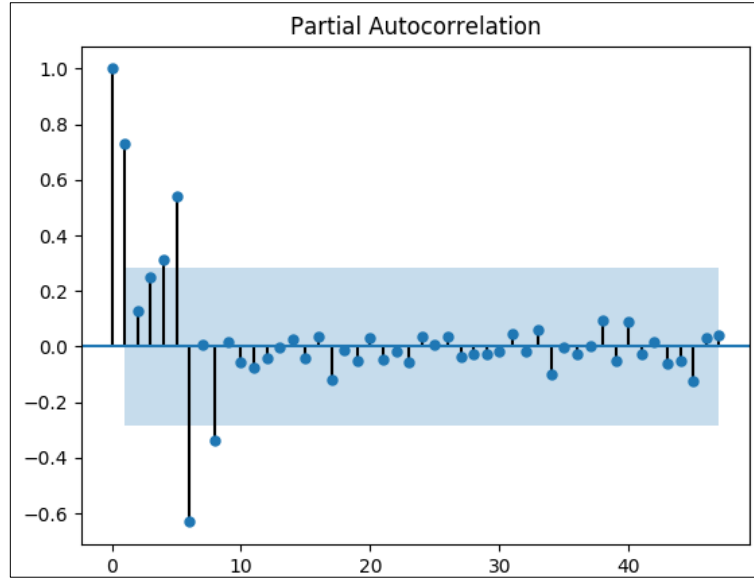
Şekil 12. Aylık ürün satışları

#### 4.3.5.2. Aylık Ürün Satışlarının Tahmini için Öngörü Modeli Seçimi

Şekil 12’de verilen ürün satışları grafiği incelendiğinde, verinin 5 aylık periyotlarla dönemsellik gösterdiği açık şekilde görülmektedir. Aynı zamanda, veri doğrusal olmayan trend veya döngüsellik içermektedir, dolayısıyla durağan değildir. Şekil 13 ve 14 ile aylık ürün satışlarının %5 önem düzeyinde otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarının grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 13. Aylık ürün satışlarının %5 önem düzeyinde otokorelasyon fonksiyonu

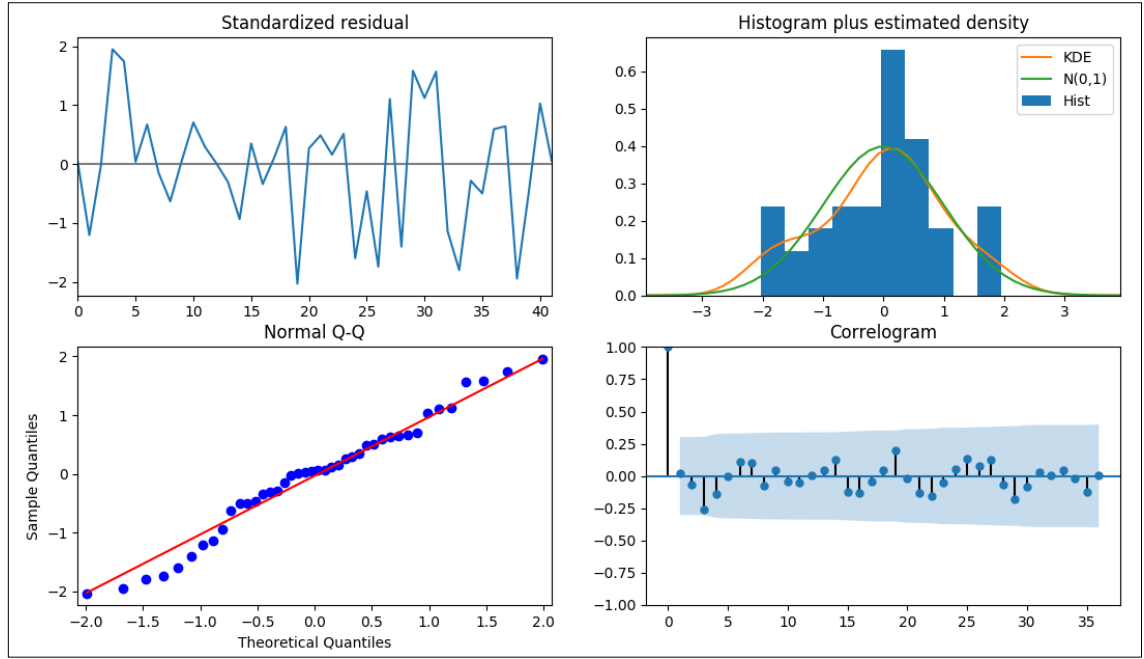


Şekil 14. Aylık ürün satışlarının %5 önem düzeyinde kısmi otokorelasyon fonksiyonu

Şekil 13 ve 14 ile gösterilen otokorelasyon fonksiyonu ve kısmi otokorelasyon fonksiyonları incelendiğinde 1., 5. ve 6. gecikme terimlerinin yüksek korelasyon değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu bilgiler değerlendirildiğinde  $ARIMA(1,1,0) \times (1,1,0)_5$ ,  $ARIMA(1,1,0) \times (1,0,0)_5$ ,  $ARIMA(1,1,1) \times (1,1,0)_5$  ve  $ARIMA(1,1,1) \times (1,0,0)_5$  modellerinden birinin uygun olabileceği tespit edilmiş ve eğitim seti üzerinde, düzeltilmiş Akaike bilgi kriteri (AICc) skoruna göre kıyaslanan bu modeller içerisinde  $ARIMA(1,1,0) \times (1,1,0)_5$  seçilmiştir. Seçilen modelin özeti ve model tanımları Şekil 15 ve 16’da verilmiştir.

Statespace Model Results						
Dep. Variable:	y			Log Likelihood	-222.770	
Model:	SARIMAX(1, 1, 1)x(1, 1, 0, 5)			AICC:	457.588	
Sample:	0			AIC	455.539	
				- 48	BIC	
				48	HQIC	
No. Observations:	48			458.724		
Covariance Method:	opg					
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
intercept	1.7435	12.285	0.142	0.887	-22.334	25.821
ar.L1	-0.8372	0.212	-3.941	0.000	-1.254	-0.421
ma.L1	0.6215	0.324	1.918	0.055	-0.014	1.257
ar.S.L5	0.3676	0.157	2.344	0.019	0.060	0.675
sigma2	2324.6650	620.232	3.748	0.000	1109.032	3540.298
Ljung-Box (Q):			38.43	Jarque-Bera (JB):	0.67	
Prob(Q):			0.54	Prob(JB):	0.72	
Heteroskedasticity (H):			1.92	Skew:	-0.20	
Prob(H) (two-sided):			0.23	Kurtosis:	2.53	

Şekil 15.  $ARIMA(1,1,1) \times (1,1,0)_5$  model özeti



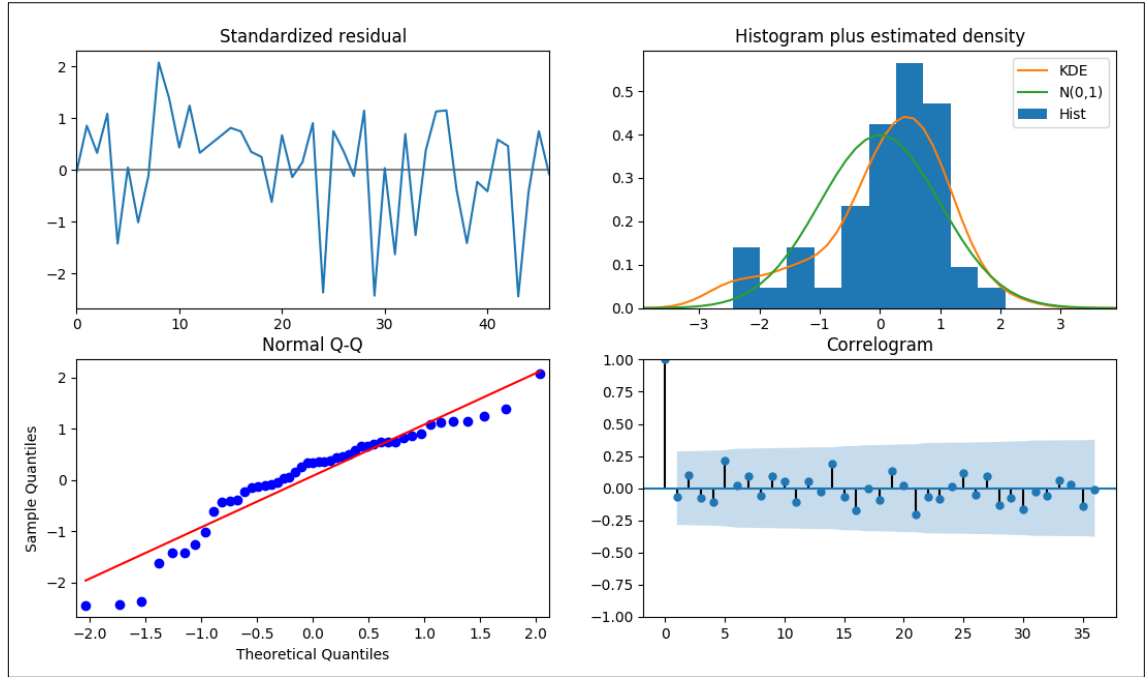
Şekil 16. ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> model tanıları

Bu model seçildikten sonra, yine eğitim seti üzerinde auto.arima fonksiyonu kullanılarak dönem periyodu 5 olan yeni bir model daha seçilmiştir. auto.arima fonksiyonu, toplamda 1503 farklı modeli eğitim verisine uydurarak değerlendirmiş ve AICc skoruna göre ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> modelinin seçilmesine karar vermiştir. Seçilen model özeti ve model tanıları Şekil 17 ve 18’de gösterilmiştir.

Statespace Model Results						
Dep. Variable:	y			Log Likelihood	-255.064	
Model:	SARIMAX(3, 1, 0)x(1, 0, 0, 5)			AICC:	524.928	
Sample:	0			AIC	522.128	
	- 48			BIC	533.229	
No. Observations:	48			HQIC	526.306	
Covariance Method:	opg			No. Models Fitted:	1503	
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
intercept	-2.2252	5.349	-0.416	0.677	-12.709	8.258
ar.L1	-0.2052	0.198	-1.039	0.299	-0.593	0.182
ar.L2	-0.0557	0.149	-0.373	0.709	-0.348	0.237
ar.L3	-0.3427	0.198	-1.731	0.084	-0.731	0.045
ar.S.L5	0.9575	0.034	28.161	0.000	0.891	1.024
sigma2	2269.3357	499.090	4.547	0.000	1291.137	3247.534
Ljung-Box (Q):	35.04			Jarque-Bera (JB):	6.93	
Prob(Q):	0.69			Prob(JB):	0.03	
Heteroskedasticity (H):	1.18			Skew:	-0.90	
Prob(H) (two-sided):	0.75			Kurtosis:	3.52	

Şekil 17. ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> model özeti

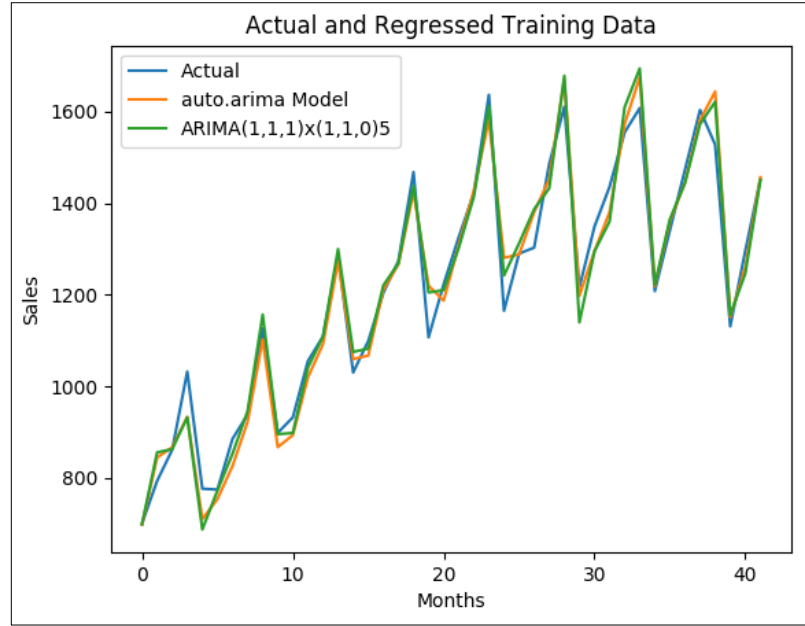




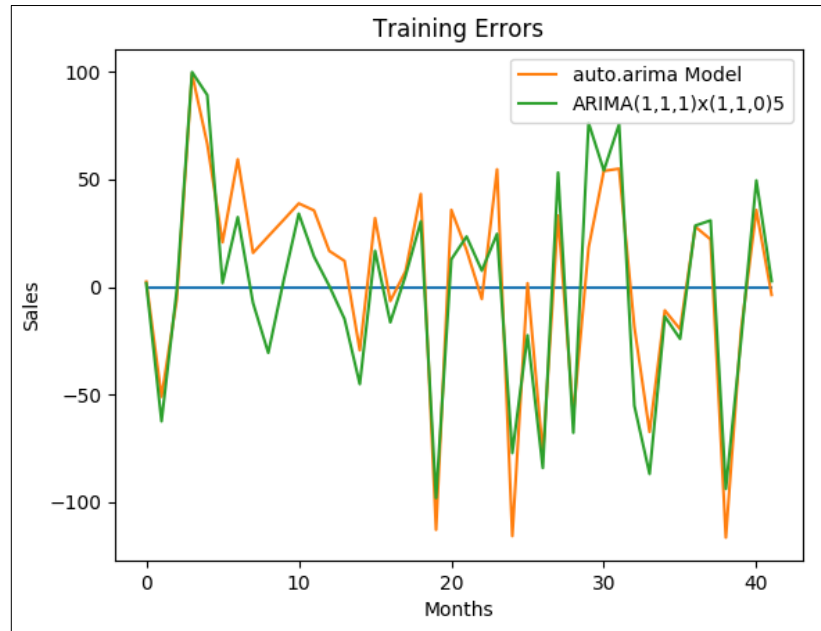
Şekil 18. ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> model tanıları

Modellerin özetleri incelendiğinde, auto.arima fonksiyonu ile eğitim setine uydurulan ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> modeli için yalnızca mevsimsel 1. gecikme terimi katsayısının istatistiksel olarak anlamlı çıktığı görülmektedir. ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> modelinde ise katsayılar istatistiksel olarak anlamlıdır. Dolayısıyla, ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> modelinin daha güvenilir olduğu çıkarımı yapılabilir. Ancak, modellerin performansı test verilerine göre kıyaslanacaktır.

Seçilen iki farklı mevsimsel model ile eğitim verisi içerisinde regresyon gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen regresyon sonuçları ve regresyon hatalarının grafikleri Şekil 19 ve 20’ de gösterilmiştir.

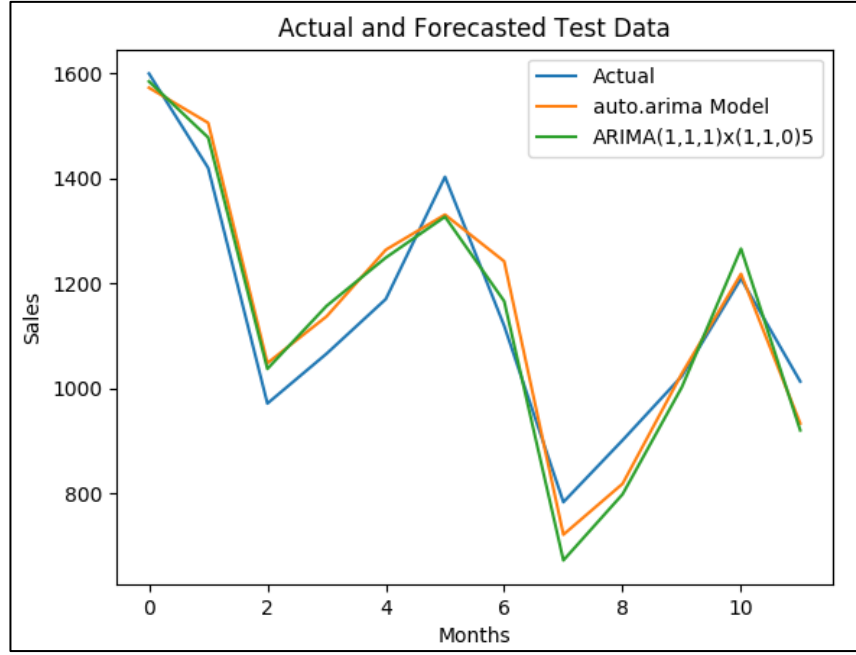


Şekil 19. Öngörü modellerinin eğitim verileri

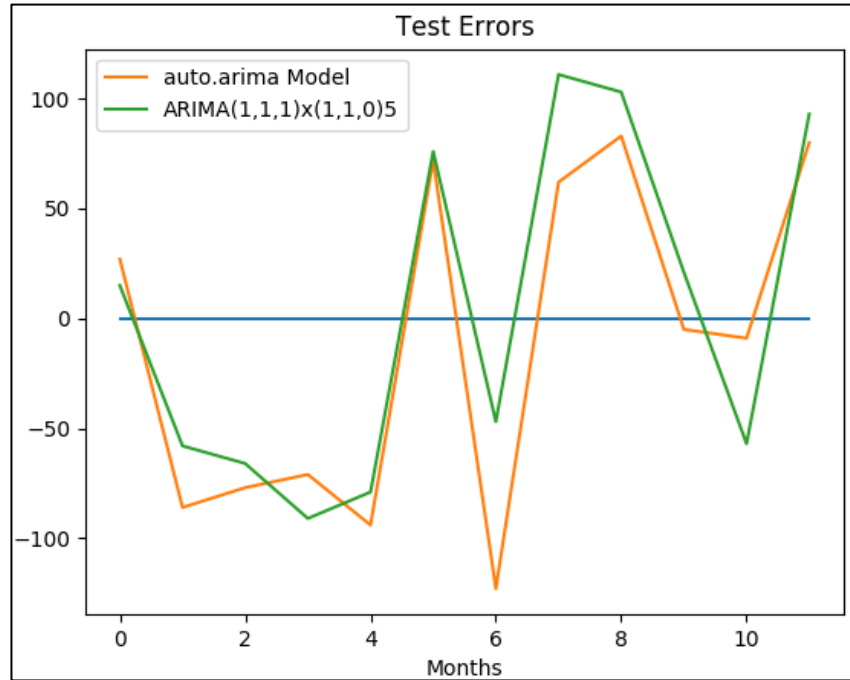


Şekil 20. Öngörü modellerinin eğitim hataları

Eğitim verileriyle gerçekleştirilen regresyonun ardından her iki model ile test verileri için öngöründe bulunulmuştur. Her öngöründen sonra, öngörü modelleri gerçekleşen gözlem değeri ile beslenerek güncellenmiştir. Dolayısıyla, bu uygulamada, öngörü modelleri dinamik modeller olarak kullanılmıştır. Test öngörülerinin ve test hatalarının grafikleri Şekil 21 ve 22’de verilmiştir.



Şekil 21. Öngörü modellerinin test verileri



Şekil 22. Öngörü modellerinin test hataları

#### 4.3.5.3. PID Kontrollü Öngörü Modeli ile Aylık Ürün Satışlarının Tahmini

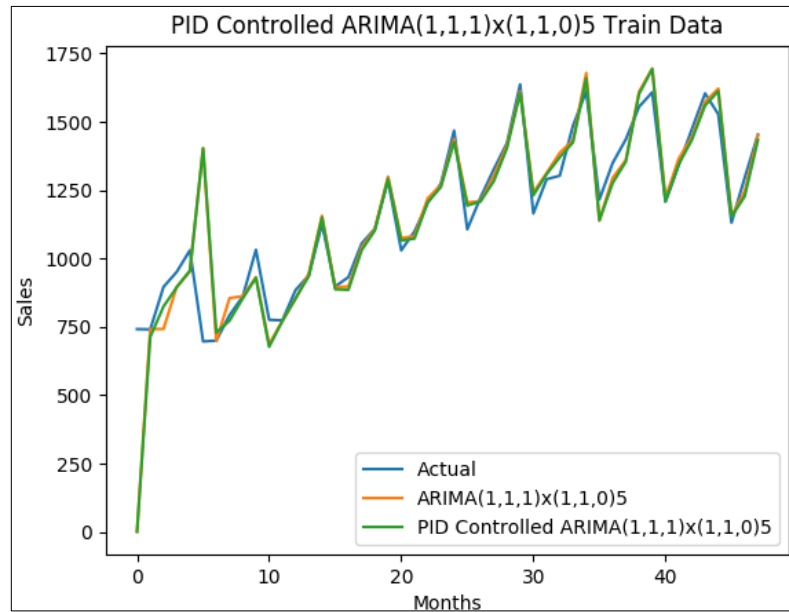
Seçilen öngörü modelleri test yapılarak model başarımları ve hataları ölçülerek kaydedilmiş ve sonrasında her iki modele de Bölüm 4.3.3.2’de önerilen integral kapatıcılı PID kontrolcü sistemi etkileşimsiz olarak eklenmiştir. Daha sonra eğitim verileri üzerinden PID kontrolcü parametreleri optimal şekilde ayarlanmaya çalışılmıştır. Parametrelerin optimizasyonu süresince öngörü modelinin aşırı uyum (overfitting) göstermesini engellemek için, eğitim verisi için gerçekleştirilen regresyonun kaydedilmiş olan sonuçları kullanılmıştır.

PSO algoritması ile yinelenerek gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda ulaşılan en düşük maliyet fonksiyonları için PID parametreleri her iki model için Tablo III’teki gibi bulunmuştur.

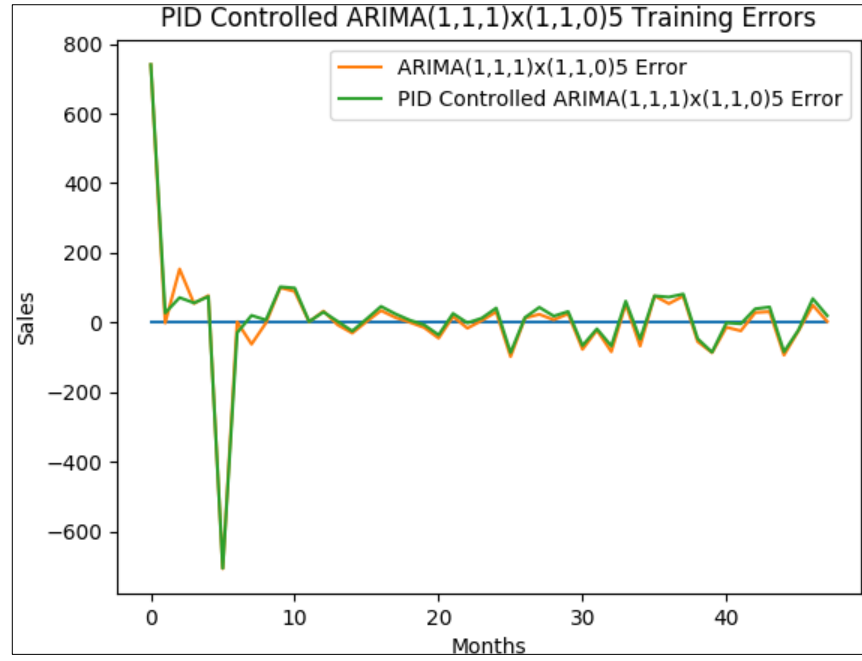
**TABLO III:** Optimize Edilen PID Parametreleri

Model	$K_P$	$K_I$	$K_D$
ARIMA(1,1,1)x(1,1,0) <sub>5</sub>	0.2149	-0.1618	0.7009
ARIMA(3,1,0)x(1,0,0) <sub>5</sub>	0.0590	-0.0505	0.7166

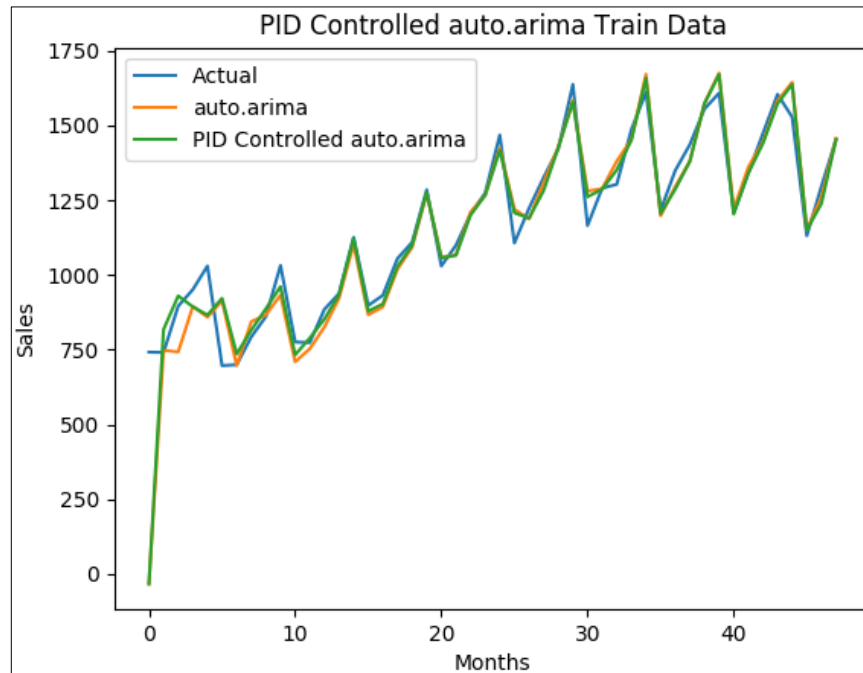
Her iki öngörü modeli için bulunan parametrelerle ulaşılan eğitim verileri ve eğitim hataları Şekil 23-26 ile gösterilmiştir.



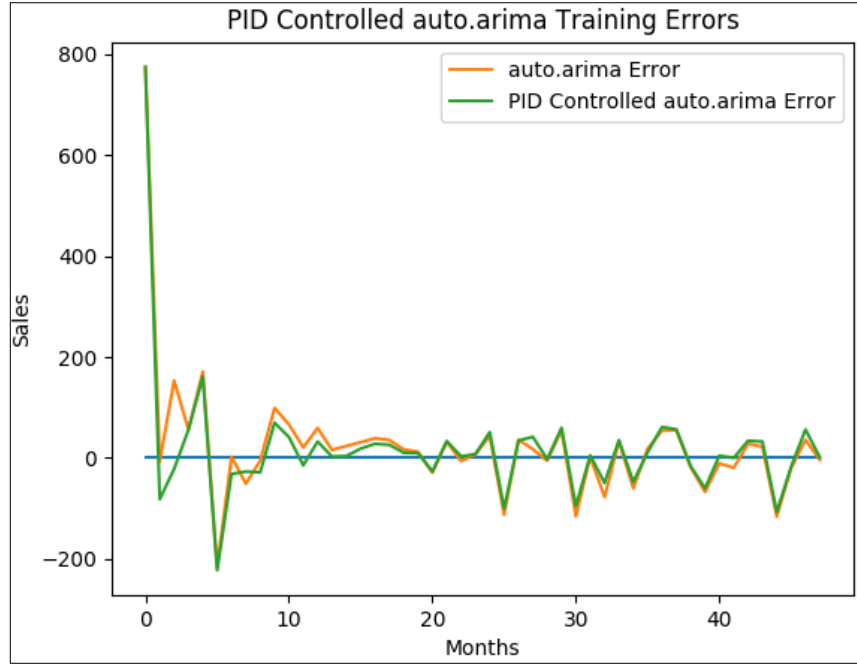
**Şekil 23.** PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> eğitim verisi



Şekil 24. PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> eğitim hatası



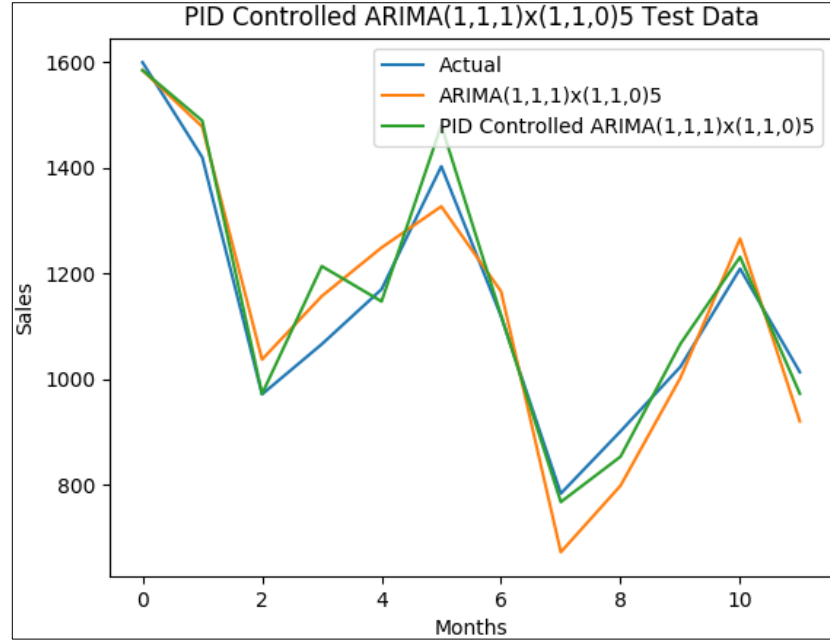
Şekil 25. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> eğitim verisi



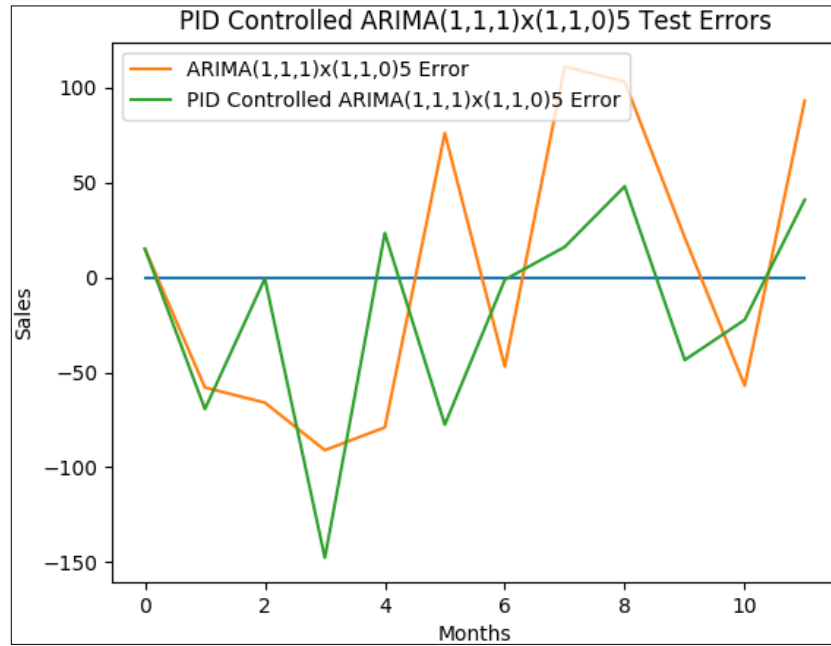
Şekil 26. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> eğitim hatası

PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> öngörü modelinin eğitim hataları incelendiğinde, başlangıçta iki büyük salınım yaparak ikinci salınım sonunda çeyrek büyüklük genliğine düşerek durağan duruma ulaştığı görülmektedir. Bu durum, PID parametrelerinin optimizasyonunda kullanılan maliyet fonksiyonunun etkisi sonucunda, sistemin amaçlanan şekilde durağan duruma ulaştığını gösterir. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> öngörü modelinin hatalarında ise yine benzer bir durum mevcuttur ancak orantısal kontrol parametresinin daha küçük olması sebebiyle aşırı salınımların genliği düşmüş, sistem kararlılığı artmıştır.

PID kontrol algoritması, eğitim seti üzerinde optimize edilen PID parametreleri sabitlenerek test seti üzerinde her iki öngörü modelleri için ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Test seti için PID kontrollü öngörü modelleri ile yapılan öngörüler ve bu öngörülerin hataları, öngörü modellerinin yalın çıktıları ile birlikte Şekil 27-30 ile gösterilmiştir.



Şekil 27. PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> test verisi



Şekil 28. PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> test hatası



Şekil 29. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> test verisi



Şekil 30. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> test verisi

#### 4.3.5.4. Aylık Ürün Satışlarının Talep Tahmini Testleri ile İlgili Bulgular

Öngörü modelleri ile gerçekleştirilen talep tahmini testlerinin ardından, PID kontrollü öngörü modelleri ile tekrarlanan testler sonucunda hesaplanan hata ölçütleri Tablo IV'te verilmiştir.



TABLO IV: Yalın ve PID Kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> ve ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> Hata Oranları

Hata Ölçütü	ARIMA (1,1,1)x(1,1,0) <sub>5</sub>			ARIMA (3,1,0)x(1,0,0) <sub>5</sub>		
	Öngörü	PID Kontrollü Öngörü	Hata İyileştirme Oranı	Öngörü	PID Kontrollü Öngörü	Hata İyileştirme Oranı
MBE	-1.75	-31.814	-1718%	-11.75	-20.3374	-73%
MAE	68.0833	51.2441	25%	65.75	49.891	24%
RMSE	74.0051	62.9257	15%	73.8709	66.7305	10%
nRMSE	0.0649	0.0552	15%	0.0648	0.0585	10%
MAPE	6.5%	4.5%	31%	6.1%	4.3%	29%
rRMSE	0.3272	0.2783	15%	0.3267	0.2951	10%
MASE	0.3672	0.2764	25%	0.3546	0.2691	24%
Genel Ölçütler	İyileştirme Oranı		20.0%	İyileştirme Oranı		17.2%
	Veri Ortalaması				1139.8333	
	Veri Standart Sapması				226.1444	

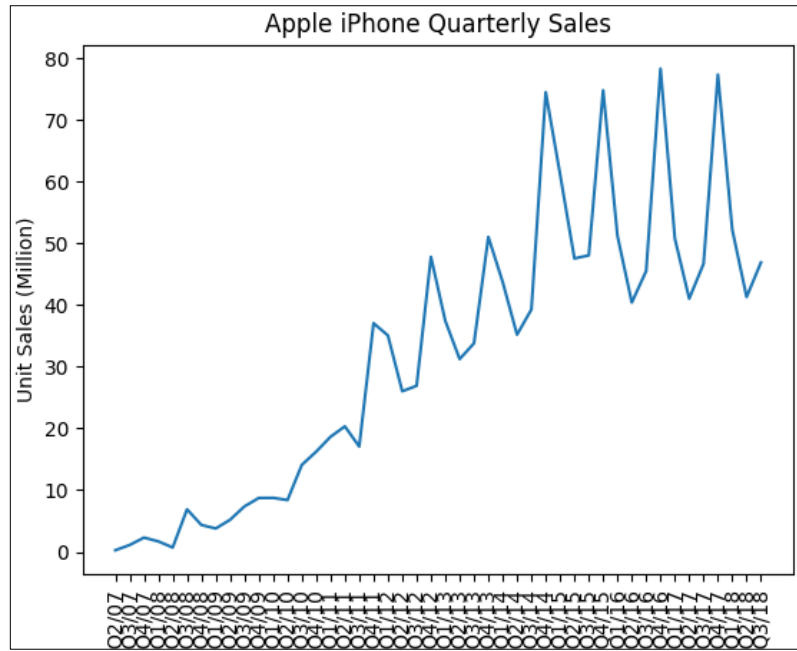
TABLO IV’de verilen sonuçlara göre, ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> ve auto.arima fonksiyonu ile seçilen ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> modelleri karşılaştırıldığında, yaklaşık olarak aynı hata oranlarına sahip oldukları söylenebilir, ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> modeli yaklaşık olarak %1.8 oranında daha düşük hata ile tahminde bulunmuştur.

PID kontrollü öngörü modelleri ile yalın olarak kullanılan öngörü modellerine kıyasla hata ölçütlerinde belirgin bir düşüş sağlanmıştır. MBE ölçütü dışındaki tüm ölçütler, PID kontrollü öngörü modellerinin daha düşük hata oranlarıyla çalıştığını göstermektedir. PID kontrollü ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> modeli, yalın ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> modelinin hata oranlarında %20 oranında iyileştirme sağlamıştır. Ayrıca, ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> modeline kıyasla da %18.5 daha düşük hata oranı ile talep tahmininde bulunmuştur. PID kontrollü ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> modeli ise yalın olarak kullanılan ARIMA(3,1,0)x(1,0,0)<sub>5</sub> modelinin hata oranlarında %17.2 iyileştirme oranına ulaşmıştır. ARIMA(1,1,1)x(1,1,0)<sub>5</sub> modelinin hata oranlarına göre de %18.7 daha az hata ile tahminde bulunmuştur.

### 4.3.6. Belirleyici Doğrusal Trend İçeren ve Durağan Olmayan Talep Verisi için PID Kontrollü Öngörü Yöntemleri ile Bir Periyot Sonrasının Talep Tahmini

#### 4.3.6.1. Apple iPhone Satışları Veri Seti

Apple iPhone satışları verisi, Apple tarafından çeyreklik periyotlarla açıklanan toplam iPhone satış verilerinden derlenmiş bir veri setidir. Bu set, 2007 yılı 2. çeyrekte 2018 yılı 3. çeyreğe kadar olan zaman dilimini kapsayan güncel bir verileri içermektedir. Veri setinde model ayırımı olmaksızın bir çeyrek içerisinde gerçekleşen tüm iPhone satışlarının miktarını gösteren 46 veri içermektedir. Veri seti, yaklaşık olarak %80 ve %20 oranlarla eğitim ve test setlerine ayrılmıştır. İlk 36 çeyrek verisi eğitim setine, son 10 çeyreklik veri ise test setine dahil edilmiştir. Apple iPhone satışlarının grafiği Şekil 31’de gösterilmiştir.

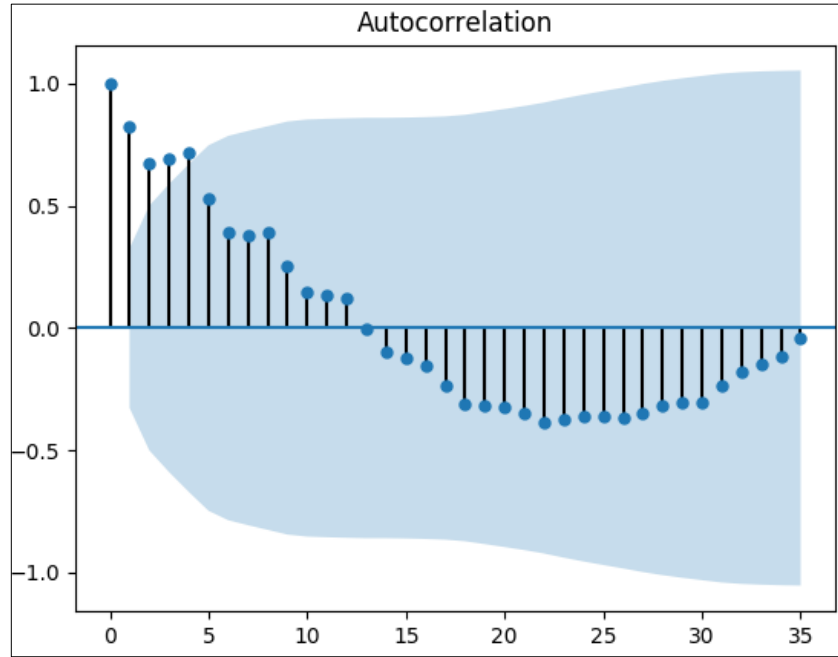


Şekil 31. Apple iPhone satışları

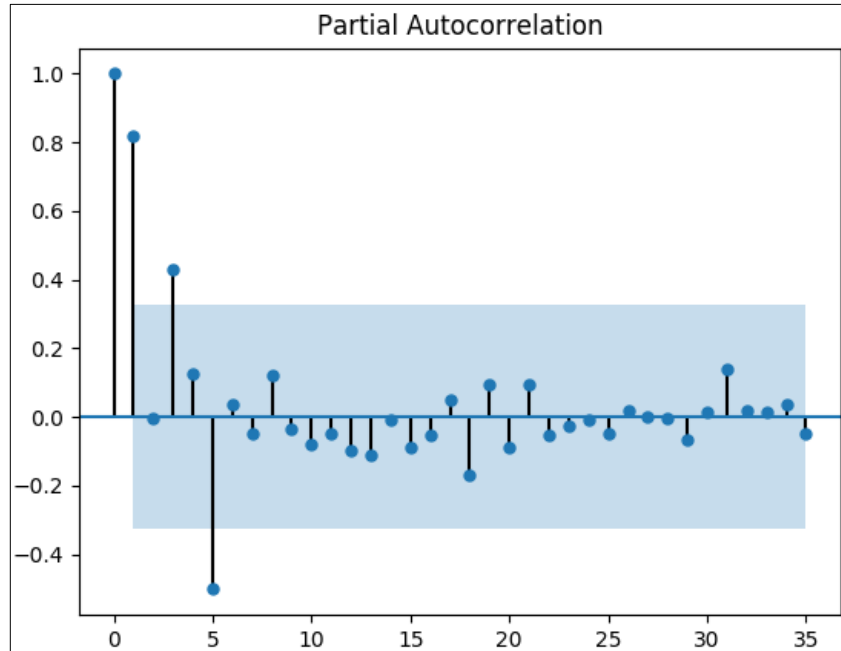
#### 4.3.6.2. Apple iPhone Satışlarının Tahmini için Öngörü Modeli Seçimi

Şekil 31’de verilen Apple iPhone satışları grafiği incelendiğinde, verinin 2007 yılından başlayarak 2015 yılının sonuna kadar belirleyici trend ile artış gösterdiği, 2011 yılından itibaren ise yıllık yani 4 çeyreklik periyotlarla belirgin bir mevsimsel örüntüyü takip ettiği görülmektedir. Satış verilerinin varyansı yıllar içerisinde giderek artmıştır. Dolayısıyla, varyans zamana bağlı olarak değiştiği için, bu zaman serisinin durağan olmadığı

söylenebilir. Şekil 32 ve 33 ile veri setinin %5 önem düzeyinde otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarının grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 32. Apple iPhone satışlarının %5 önem düzeyinde otokorelasyon fonksiyonu



Şekil 33. Apple iPhone satışlarının %5 önem düzeyinde kısmi otokorelasyon fonksiyonu

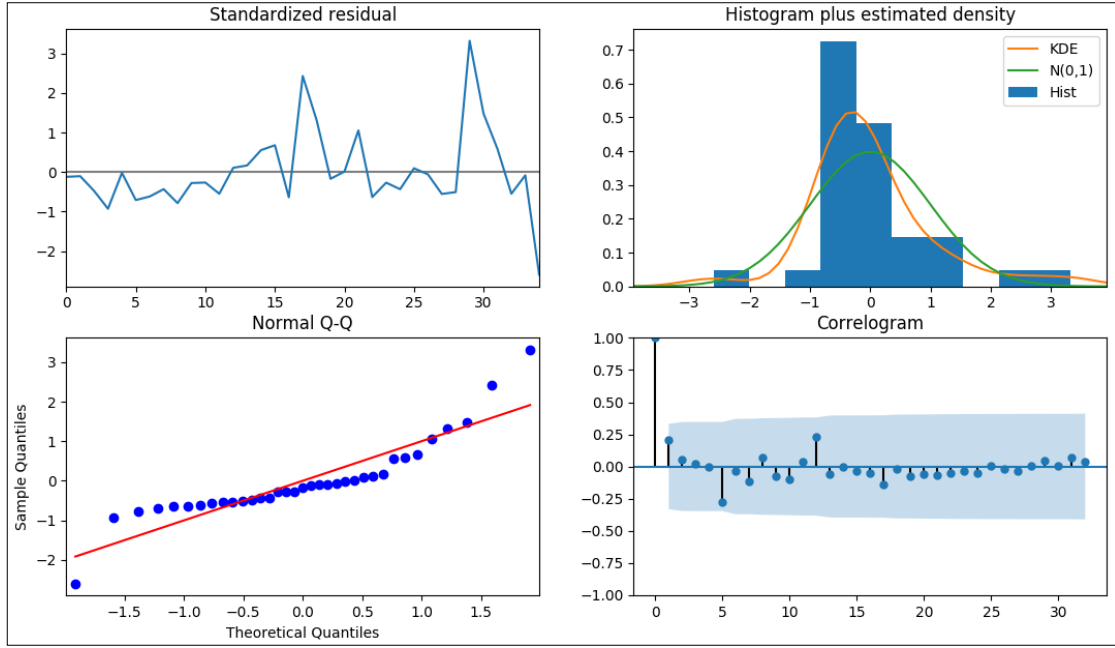
Trend bileşeni için otoregresif terimlerin varlığına, değişen varyans ve durağan olmama durumu entegre model kullanmanın gerekliliğine işaret etmektedir. Aynı zamanda

mevsimsellik durumu da test edilmelidir. Otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonları da incelendiğinde, verinin ilk 5 gecikme terimi ile korelasyon gösterdiği söylenebilir.

Bu bilgiler ışığında, verinin 1 yıllık periyodik yapıda olma ihtimali de hesaba katılarak, ARIMA(3,1,0), ARIMA(4,1,0), ARIMA(1,1,0)x(1,0,0)<sub>4</sub> ve ARIMA(1,1,0)x(0,1,0)<sub>4</sub>, modellerinden birinin uygun olabileceği tespit edilmiş ve modeller eğitim seti kullanılarak AICc skoruna göre kıyaslanmıştır. Aynı zamanda 1, 4 ve 8 çeyreklik periyotlar için; auto.arima fonksiyonu da eğitim seti üzerinde çalıştırılmıştır. Her iki test sonucunda da ARIMA(3,1,0) modeli seçilmiş ve mevsimsel modellere gerek olmadığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, öngörü modeli olarak ARIMA(3,1,0) modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Seçilen modelin özeti ve model tanıları Şekil 34 ve 35 ile verilmiştir.

Statespace Model Results						
Dep. Variable:	y	Log Likelihood	-114.061			
Model:	ARIMA(3, 1, 0)	AICC:	241.018			
Sample:	0	AIC	238.122			
	- 36	BIC	245.898			
No. Observations:	36	HQIC	240.806			
Covariance Method:	opg	No. Models Fitted	220			
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
intercept	5.8684	1.745	3.363	0.001	2.448	9.289
ar.L1	-0.8685	0.132	-6.602	0.000	-1.126	-0.611
ar.L2	-0.8945	0.176	-5.081	0.000	-1.239	-0.549
ar.L3	-0.7301	0.182	-4.004	0.000	-1.087	-0.373
sigma2	36.2593	9.018	4.021	0.000	18.585	53.934
Ljung-Box (Q):		16.45	Jarque-Bera (JB):	20.41		
Prob(Q):		1.00	Prob(JB):	0.00		
Heteroskedasticity (H):		6.48	Skew:	1.06		
Prob(H) (two-sided):		0.00	Kurtosis:	6.09		

Şekil 34. ARIMA(3,1,0) model özeti



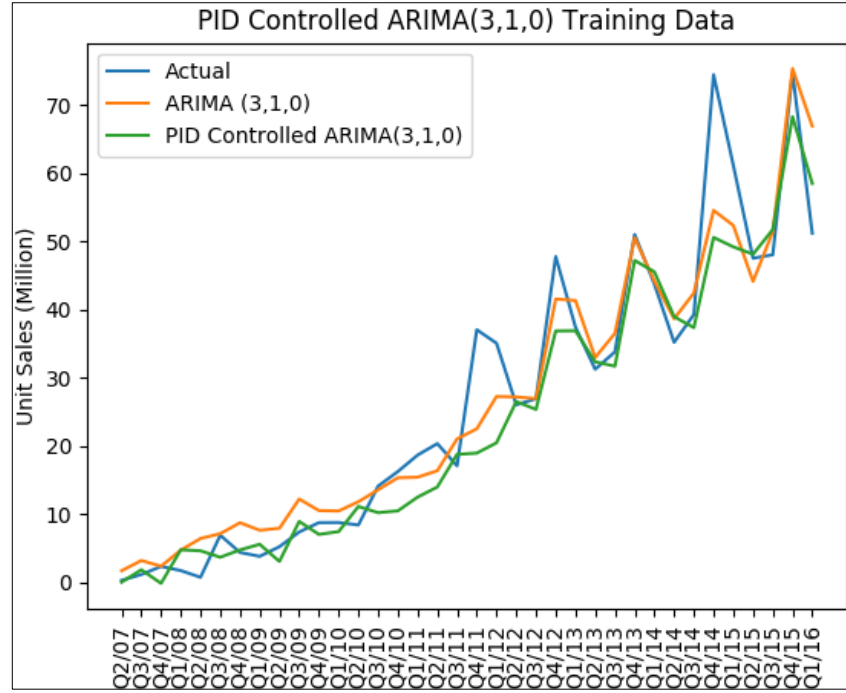
Şekil 35. ARIMA(3,1,0) model tanıları

Hem çıkarımlar sonucunda elde edilen hem de auto.arima fonksiyonu tarafından seçilen ARIMA(3,1,0) modelinin özetinde görüldüğü üzere, eğitim setine uydurulan model katsayılarının tümü istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur.

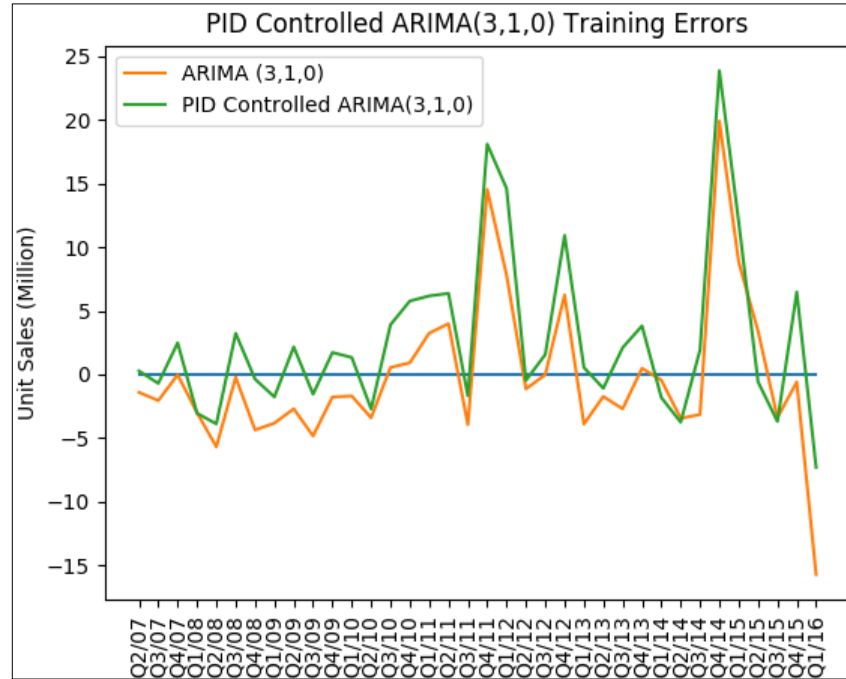
#### 4.3.6.3. PID Kontrollü Öngörü Modeli ile Apple iPhone Satışlarının Tahmini

Seçilen ARIMA(3,1,0) öngörü modeli ile öncelikle eğitim seti içerisinde tahminler yapılmış ve çıktılar ile hatalar ölçülerek kaydedilmiştir. Sonrasında, Bölüm 4.3.3.2’de önerilen integral kapaticılı PID kontrolcü sistemi etkileşimsiz olarak öngörü modeline eklenmiştir. Daha sonra PID kontrolcü parametrelerinin ayarlanması için, PID kontrolcü algoritması kaydedilen verilerle birlikte eğitim seti üzerinde çalıştırılmış ve PSO algoritması ile optimizasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tekrarlanan optimizasyonlar sonucunda optimal parametrelere olabildiğince yaklaşılmaya çalışılmıştır. Maliyet fonksiyonunun ulaştığı en düşük değer için kullanılan PID parametreleri kaydedilerek sabitlenmiştir.

Optimal PID parametreleri;  $K_P = 0.262$ ,  $K_I = 1$  ve  $K_D = -0.3027$  olarak bulunmuştur. Eğitim seti üzerinde çalıştırılan ARIMA(3,1,0) öngörü modeli ve PID kontrollü ARIMA(3,1,0) öngörü modeli ile yapılan tahminler ve hatalar Şekil 36 ve 37’de gösterilmiştir.



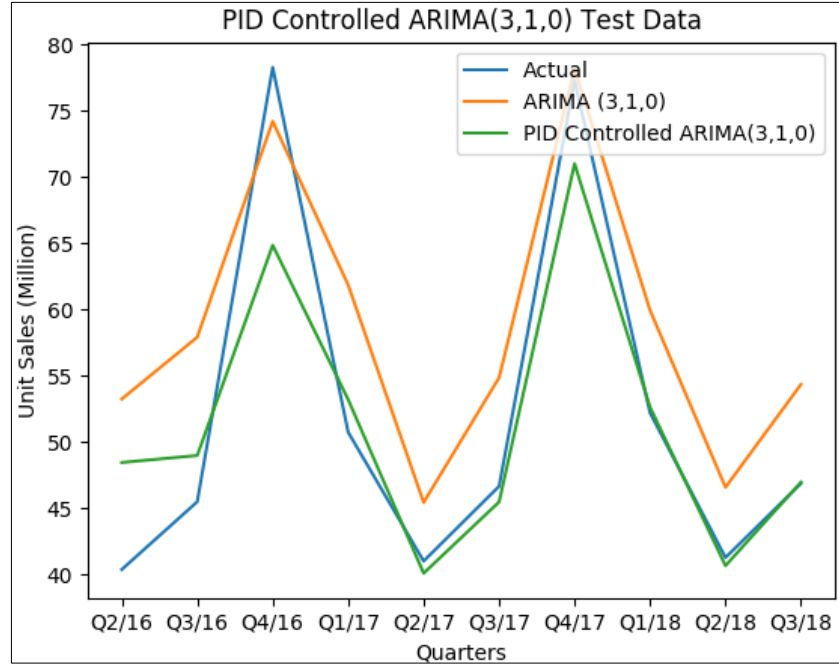
Şekil 36. Apple iPhone satış tahmini eğitim verileri



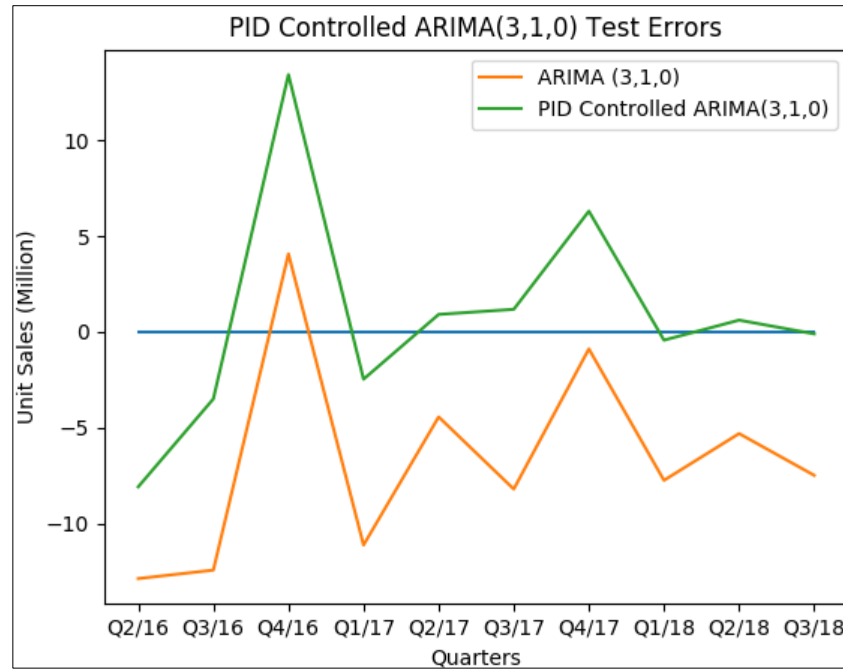
Şekil 37. Apple iPhone satış tahmini eğitim hataları

PID parametreleri ayarlandıktan sonra, test seti üzerinde önce ARIMA(3,1,0) öngörü modeli çalıştırılarak talep tahminleri yapılmış ve bu tahminler ve beraberinde hatalar kaydedilmiştir. Öngörü modeli bu uygulamada da yine dinamik model olarak kullanılmıştır. Daha sonra, kaydedilen bu veriler kullanılarak, PID kontrollü

ARIMA(3,1,0) öngörü modeli test seti üzerinde çalıştırılarak yeni tahminler yapılmıştır. Test seti üzerinde modeller tarafından yapılan tahminler ve tahminleme hataları, Şekil 38 ve 39'da gösterilmiştir.



Şekil 38. Apple iPhone satış tahmini test verileri



Şekil 39. Apple iPhone satış tahmini test hataları

Test sonuçları incelendiğinde PID kontrollü öngörü modelinin hata oranlarının önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmektedir. İntegral kontrol kazancının yüksek olması sebebiyle durağan durumda hata terimleri 0'a yakınsamıştır. PID parametrelerinin seçiminde kullanılan optimizasyon amaç fonksiyonunun doğru belirlenmesi sayesinde, PID kontrollü öngörü modeli için hata oranları test verilerinde eğitime kıyasla yükselmemiştir.

#### 4.3.6.4. Apple iPhone Satışlarının Talep Tahmini Testleri ile İlgili Bulgular

ARIMA(3,1,0) öngörü modeli ile gerçekleştirilen talep tahmini testinin ardından, PID kontrollü ARIMA(3,1,0) öngörü modeli ile tekrarlanan test sonucunda hesaplanan hata ölçütleri Tablo V'te verilmiştir.

**TABLO V:** Yalın ve PID Kontrollü ARIMA(3,1,0) Hata Oranları

Hata Ölçütü	ARIMA (3,1,0)		
	Öngörü	PID Kontrollü Öngörü	Hata İyileştirme Oranı
<b>MBE</b>	-6.6337	0.7875	88%
<b>MAE</b>	7.4484	3.6986	50%
<b>RMSE</b>	8.313	5.5321	33%
<b>nRMSE</b>	0.1824	0.0925	49%
<b>RMSPE</b>	16.0%	10.6%	33%
<b>MAPE</b>	15.9%	6.5%	59%
<b>rRMSE</b>	0.6196	0.4124	33%
<b>MASE</b>	1.0208	0.5069	50%
<b>Genel Ölçütler</b>	<b>Genel İyileştirme Oranı</b>		<b>42.5%</b>
	Veri Ortalaması		31.9161
	Veri Standart Sapması		22.4120

TABLO V'de verilen sonuçlara göre, PID kontrollü ARIMA(3,1,0) modeli ile yalın olarak kullanılan ARIMA(3,1,0) modeline kıyasla hata ölçütlerinde büyük oranda düşüş sağlanmıştır. Tüm hata ölçütleri, PID kontrollü ARIMA(3,1,0) modelinin, yalın olarak kullanılan ARIMA(3,1,0) modelinden daha düşük hata oranlarıyla çalıştığını göstermektedir. PID kontrollü ARIMA(3,1,0) modeli, yalın ARIMA(3,1,0) modelinin hata ölçütlerinde %42.5 gibi oldukça yüksek bir iyileştirme oranı sağlamıştır.



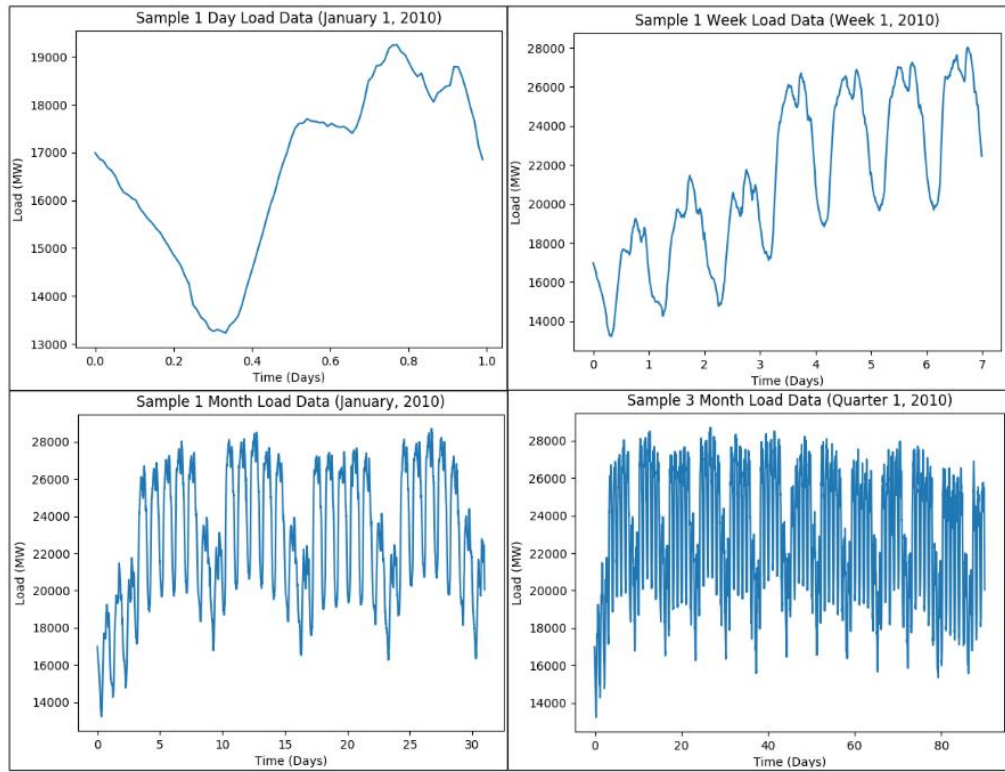
### 4.3.7. Çoklu Mevsimsellik İçeren ve Durağan Olmayan Büyük Talep Verisi Seti için PID Kontrollü Öngörü Yöntemleri ile Bir Periyot Sonrasının Talep Tahmini

#### 4.3.7.1. Elektrik Gücü (Yük) Talebi Veri Seti

Elektrik gücü talebi veri seti ya da kısaca yük veri seti; Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşleticileri Birliğine (ENTSO-E: European Network of Transmission System Operators for Electricity) dahil olan Almanya menşeli Amprion GmbH elektrik dağıtım şirketi tarafından sağlanan bir büyük veri setidir [27]. Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz ve Saarland bölgelerinin elektrik dağıtımını gerçekleştiren bu şirket tarafından sunulan veri seti, 1 Ocak 2010 ve 31 Aralık 2017 tarihleri arasındaki 8 yıllık süreci kapsayan ve günde 96 zaman dilimlik frekansla yani 15 dakikalık periyotlarla megawatt (MW) cinsinden kaydedilmiş 15 dakikalık ortalama elektrik gücü talebi verilerini içermektedir.

Yük veri seti, kullanılmadan önce çeşitli temizleme ve düzeltme işlemlerinden geçirilmiştir. Öncelikle, eksik veya negatif değere sahip olan veriler temizlenmiştir. Sonrasında, temizlenen verilerin tanımsız kalması durumunun ortadan kaldırılabilmesi için; ardışık şekilde eksik olan yük verilerinin her birinin yerine, tam bir hafta sonraki yani 672 periyot sonraki yük verilerinin değerleri kullanılmıştır. Daha sonra, takvimde düzensiz kaymaların oluşmasını engellemek amacıyla, 29 Şubat 2012 ve 29 Şubat 2016 günlerine ait yük verileri veri setinden çıkarılmıştır. Son olarak, sensörler tarafından gerçekleştirilen hatalı ölçümler sebebiyle oluştuğu düşünülen tekil eksik yük verileri için doğrusal iç değerlendirme uygulanmıştır [28].

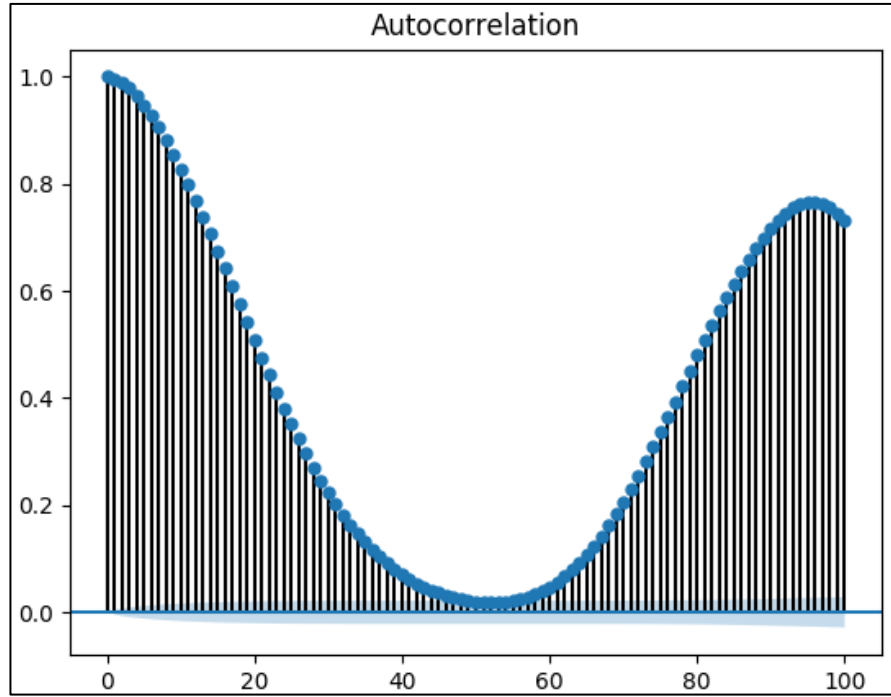
8 yıllık bir zaman aralığını kapsayan yük veri seti, 2920 günlük toplam 280320 adet elektrik gücü talebi verisini içermektedir. Veri seti, %87.5 ve %12.5 oranlarla eğitim ve test setlerine ayrılmıştır. Veri setinin ilk 7 yılını oluşturan 1 Ocak 2010 ve 31 Aralık 2016 tarihleri arasındaki 2555 günlük toplam 245280 adet yük talebi verisi eğitim setine dahil edilmiştir. Veri setinin son bir yılını oluşturan 1 Ocak 2017 ve 31 Aralık 2017 tarihleri arasındaki 365 günlük toplam 35040 adet yük talebi verisi ise test setine dahil edilmiştir. Yük veri setinin ilk 3 aylık kapsayan 1 Ocak 2010 ve 31 Mart 2010 tarihleri arasındaki 90 günlük toplam 8640 veri içerisinden; günlük, haftalık, aylık ve 3 aylık olarak örneklenen yük verileri Şekil 40'ta gösterilmiştir.



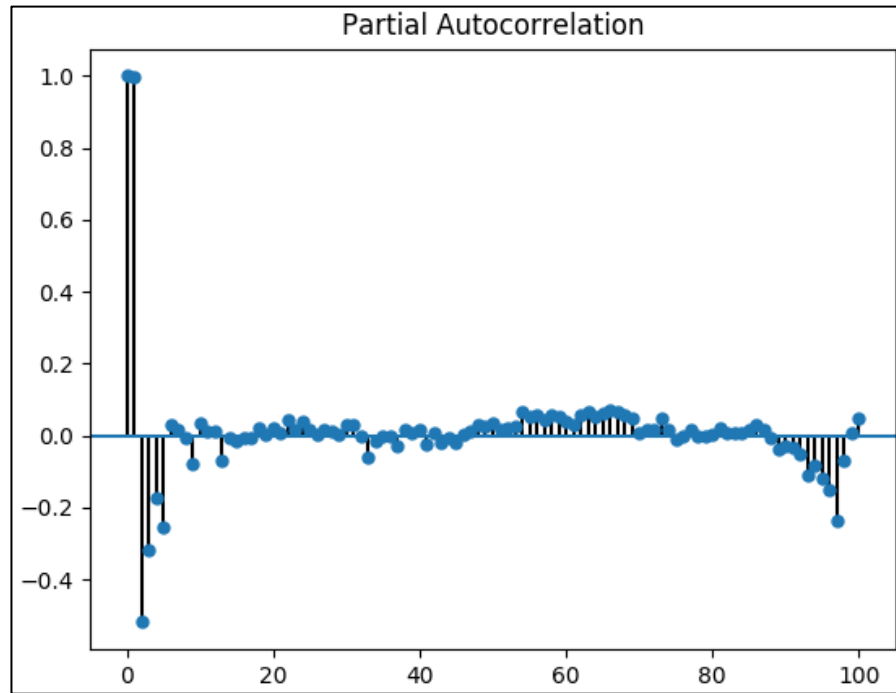
Şekil 40. Örnek yük verileri

#### 4.3.7.2. Yük Tahmini için Öngörü Modeli Seçimi

A Şekil 40'ta verilen örnek yük verileri birlikte incelendiğinde, verinin günlük periyotlara sahip dönemselsel bir yapıda olduğu açık şekilde görülmektedir. A salınımların genliğini,  $\mu$  verilerin ortalamasını ve  $n$  pozitif tam sayısı 15 dakikalık periyotların sırasını ifade etmek üzere; bu dönemselsel yapının yaklaşık olarak  $\mu + A\cos(2\pi n/96 + \pi/2)$  sinyalini takip ettiği söylenebilir. Aylık ve 3 aylık örnek yük verileri dikkate alındığında ise; günlük dönemselsel yapıya ek olarak, haftalık periyotlara sahip daha düşük frekanslı ikinci bir dönemselsel örüntünün varlığından söz edilebilir. Ayrıca hafta içi ve hafta sonu günler arasındaki farklılıklara dikkat edildiğinde, ortalamanın ve varyansın değiştiği görülmektedir. Bu durum, kısmen koşullu değişen varyansa işaret etmekle birlikte, verinin durağan olmadığını kanıtlar. Şekil 41 ve 42 ile yük verilerinin %5 önem düzeyinde otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarının grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 41. Yük verilerinin %5 önem düzeyinde otokorelasyon fonksiyonu



Şekil 42. Yük verilerinin %5 önem düzeyinde kısmi otokorelasyon fonksiyonu

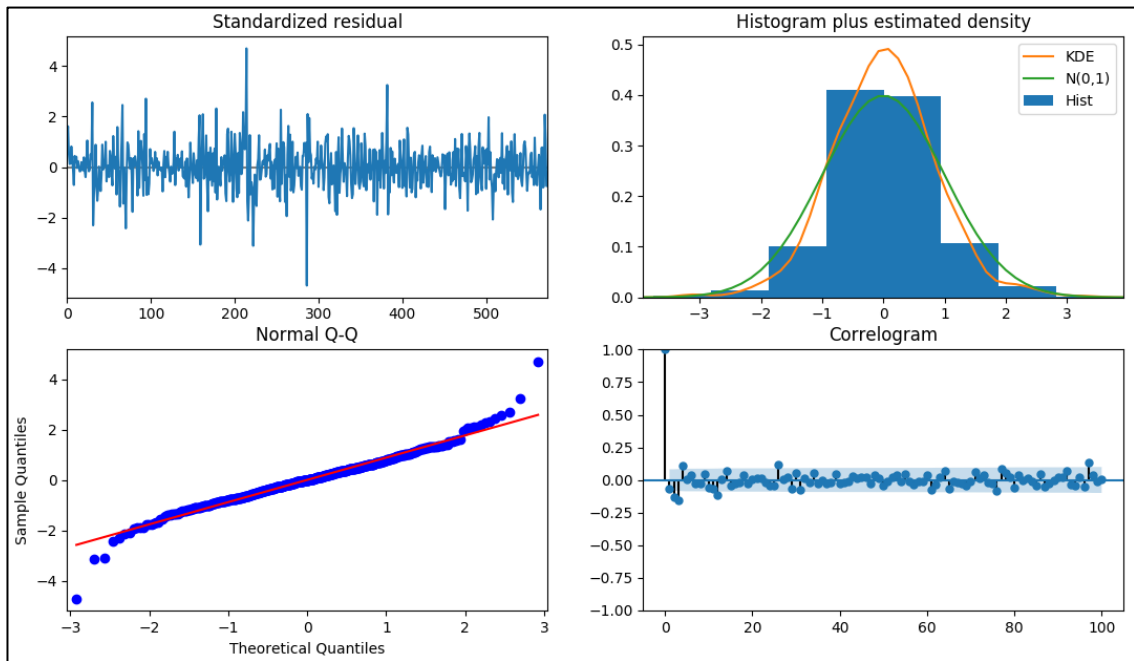
Yük verilerinin otokorelasyon ve kısmi otokorelasyon fonksiyonlarının grafikleri incelendiğinde, ilk 5 ve 96. gecikme terimleriyle otokorelasyon gösterdiği söylenebilir. Yüksek otokorelasyon değerine sahip 1. ve 2. gecikme terimlerinin etkisinin daha yüksek olacağı düşünülebilir. Bununla birlikte, 96. gecikme teriminin de yüksek otokorelasyon

göstermesi, günlük dönemsel yapının varlığını desteklemektedir. Ayrıca, otokorelasyon fonksiyonunun grafiği gün içerisindeki sinüzoidal değişimi açıkça ortaya koymaktadır.

Bu bilgiler ışığında, dönemsel periyot uzunluğunun, yüksek frekanslı olan günlük dönemsel yapıya göre belirlenmesi daha uygun olacaktır. Verinin ortalama ve varyans değerlerinin, hem bir gün içerisindeki sinüzoidal yapı sebebiyle 15 dakikalık periyodik bazda hem de bir hafta içerisindeki hafta sonu tatili etkisiyle günlük periyodik bazda değişim göstermesi, verinin durağan olmadığı anlamına gelir. Bu durumun ortadan kaldırılabilmesi için; entegre ve dönemsel entegre modellerin birlikte kullanılmasının gerekli olabileceği de öngörülmektedir. Bu bağlamda;  $ARIMA(1,1,0) \times (0,1,0)_{96}$ ,  $ARIMA(2,1,0) \times (0,1,0)_{96}$ ,  $ARIMA(1,2,0) \times (0,1,0)_{96}$  ve  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,0)_{96}$ , modellerinden birinin öngörü için uygun olabileceği varsayılmıştır.

Belirlenen modeller, sırayla eğitim setine uydurularak, AIC skoruna göre kıyaslanmış ve  $ARIMA(1,2,0) \times (0,1,0)_{96}$  modelinin daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda, 96 frekanslı dönemsel periyot için; auto.arima fonksiyonu da eğitim seti üzerinde çalıştırılmıştır. Ancak eğitim setinin büyüklüğünden ötürü, auto.arima fonksiyonundan makul süreler içerisinde sonuç alınamamıştır. Bu sebeple farklı bir yaklaşım uygulanmıştır. Bu yaklaşıma göre; eğitim verisi, çok sayıda küçük veri alt kümelerine ayrılmış ve auto.arima fonksiyonu modelleri bu veri alt kümeleri üzerine uydurmuştur. İlk veri alt kümesi için, durağanlığı sağlayarak süreci iraksak hale getirmeyen sonuçlar veren modeller belirlenmiştir. Bu modeller bir sonraki veri alt kümesi üzerinde aynı şekilde test edilmiş ve iraksayan modeller elenmiştir. Bu adım tüm veri alt kümeleri için sırayla yinelenmiştir. Sonuç olarak, eğitim seti tamamlandığında, 52 farklı SARIMA modeli uygulanabilir olarak bulunmuştur. Gözlemlere dayalı olarak belirlenen  $ARIMA(1,2,0) \times (0,1,0)_{96}$  modeli de dahil olmak üzere, toplam 53 model AIC skoruna göre kıyaslanmış ve en düşük AIC skoruna sahip olan  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_{96}$  modeli tercih edilmiştir. Seçilen modelin özeti ve model tanımları Şekil 43 ve 44 ile verilmiştir.

Statespace Model Results						
Dep. Variable:	y			Log Likelihood	-3679.285	
Model:	SARIMAX(2, 2, 0)x(0, 1, 1, 96)			AICC	7368.696	
Sample:	0			AIC	7368.570	
				BIC	7390.333	
No. Observations:	245280			HQIC	7377.059	
Covariance Method:	opg			No. Models Fitted	52	
	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
intercept	0.3938	4.915	0.080	0.936	-9.239	10.026
ar.L1	-0.6213	0.040	-15.394	0.000	-0.700	-0.542
ar.L2	-0.2216	0.044	-5.036	0.000	-0.308	-0.135
ma.S.L96	-0.1225	0.043	-2.848	0.002	-0.207	-0.038
sigma2	2.59e+04	1279.296	20.244	0.000	2.34e+04	2.84e+04
Ljung-Box (Q):	81.09			Jarque-Bera (JB):	220.71	
Prob(Q):	0.00			Prob(JB):	0.00	
Heteroskedasticity (H):	0.79			Skew:	0.05	
Prob(H) (two-sided):	0.10			Kurtosis:	6.04	

Şekil 43. ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> model özetiŞekil 44. ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> model tanıları

Tercih edilen ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> modelinin özeti incelendiğinde görüleceği üzere, veriye uydurulan model için tüm katsayılar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Ancak yük veri seti büyüklüğü ve donanımsal kısıtların varlığı sebebiyle, özellikle karmaşık ARIMA ve SARIMA modellerinin denenerek veriye uydurulması süreci çok uzun süreler aldığı için, yeterli sayıda model denenememiş olmasından ötürü seçilen modelin yeterince iyi bir model olup olmadığına karar vermek zordur.

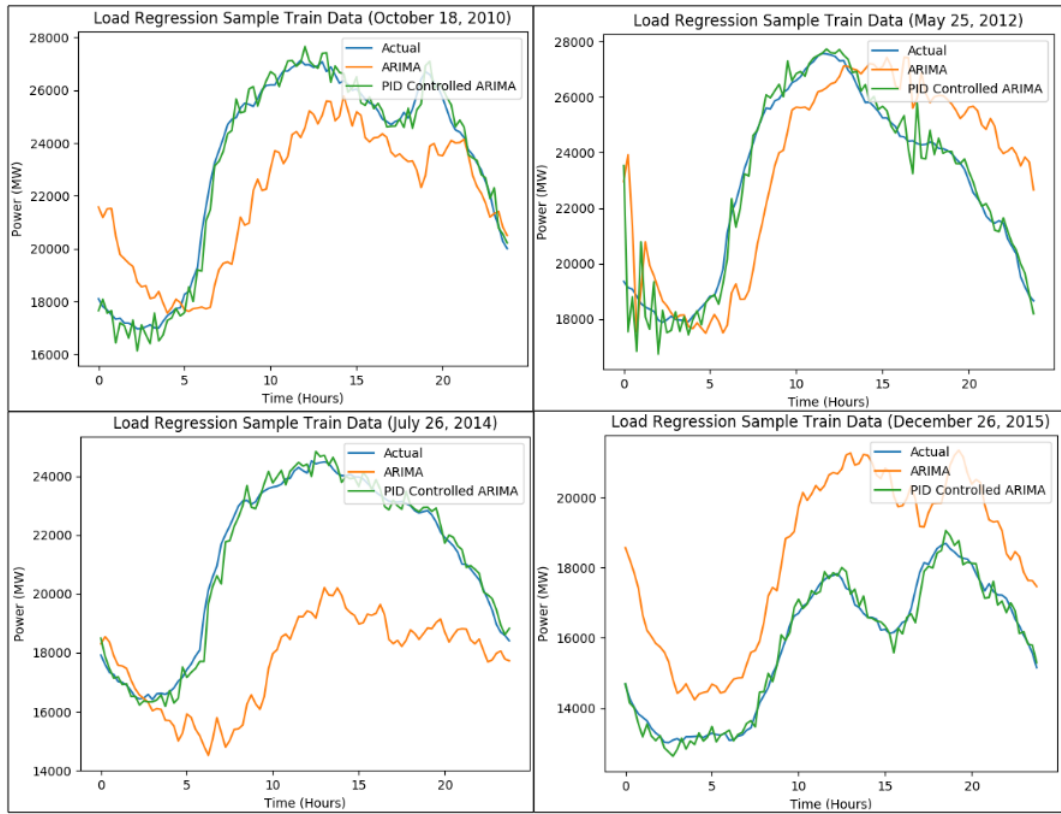
#### 4.3.7.3. PID Kontrollü Öngörü Modeli ile Yük Tahmini

Seçilen  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_{96}$  modeli ile öncelikle eğitim seti içerisinde tahminler yapılmış ve çıktılar ile hatalar ölçülerek kaydedilmiştir. Sonrasında, Bölüm 4.3.3.2’de önerilen integral kapatıcılı PID kontrolcü sistemi etkileşimsiz olarak seçilen öngörü modeline eklenmiştir. Daha sonra PID kontrolcü parametrelerinin ayarlanması için, PID kontrolcü algoritması kaydedilen verilerle birlikte eğitim seti üzerinde çalıştırılmıştır. Ancak, yine veri setinin büyüklüğü nedeniyle, küçük ve orta ölçekli veri setlerinde başarıyla çalışan PSO algoritması ile 245280 veriden oluşan büyük eğitim seti üzerinde; PID parametrelerinin geniş sınırlar içerisinde rassal olarak optimize edilmeye çalışması makul olmayan ölçüde uzun süreler almaktadır. Her bir iterasyonun oldukça uzun sürmesinin yanında, birçok iterasyon da sistemin kararsız hale gelerek sürecin iraksaması ile sonuçlanmıştır.

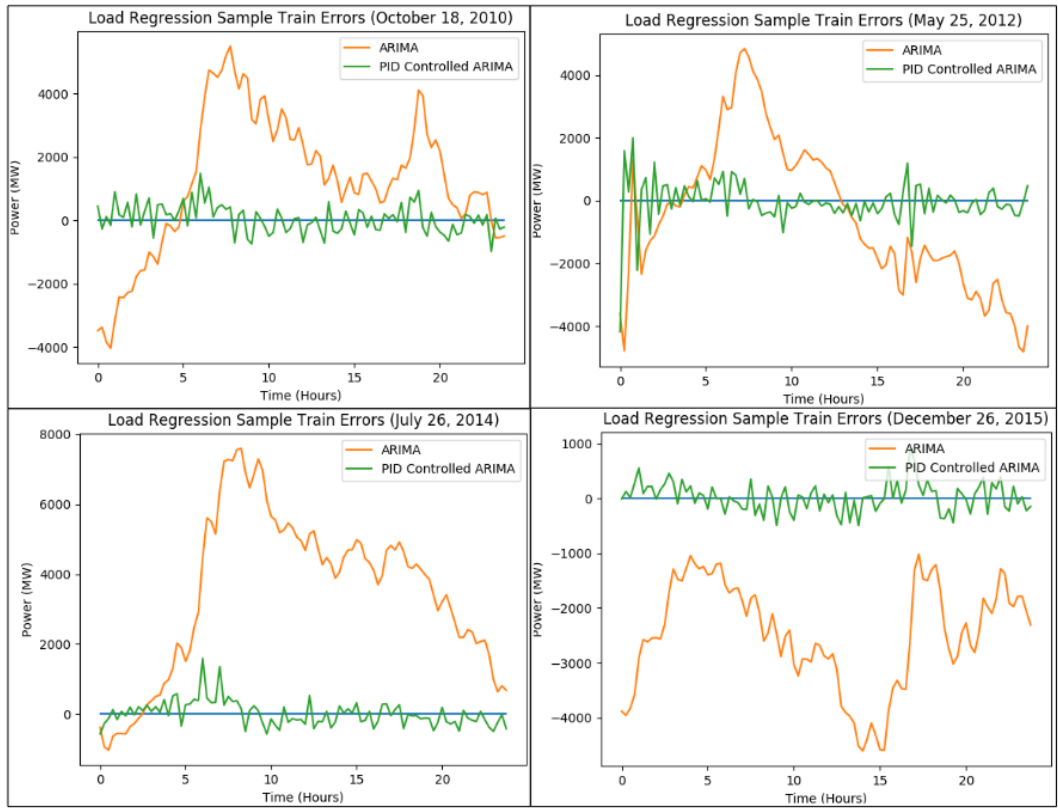
Büyük veri setinde PID parametrelerinin optimizasyonunda karşılaşılabilecek sorunlar için geliştirilen ve Bölüm 4.3.3.4’te verilen yaklaşım kullanılmıştır. Buna göre, PID parametrelerinin optimizasyonu için; logaritmik arama yaklaşımıyla yinelemeli olarak ızgara arama yöntemi kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, PSO algoritmasına kıyasla çok daha kısa sürede, optimale son derece yakın bir aday çözüm bölgesi belirlemiştir. Bu sınırlar içerisinde, küçük sürü nüfusu ve az sayıda yineleme ile PSO algoritması çalıştırılmış ve oldukça kısa süre içerisinde optimal PID parametrelerine ulaşılmıştır. Optimal PID parametreleri;  $K_P = 1.26$ ,  $K_I = 0.83$  ve  $K_D = -0.4625$  olarak bulunmuştur.

Yük tahmini için PID parametrelerinin optimizasyonunda kullanılan modelin amaç fonksiyonu olarak; küçük ve orta büyüklükteki veri setlerinden farklı şekilde, Bölüm 4.3.3.3’te verilen  $M_2$  fonksiyonu tercih edilmiştir.  $M_2$  fonksiyonu,  $M_1$  fonksiyonunun aksine başlangıçtaki aşırı salınımları göze alarak sistemi hızlı şekilde durağan duruma getirecek katsayıları içermez ve bunun yerine (72) ile tanımlanmış genel iyileştirme oranını küçültecek şekilde tanımlanmıştır. Amaç fonksiyonunun  $M_2$  olarak seçilmesinin sebebi; eğitim veri setinin, sistemin durağan duruma gelmesini garanti etmeye yetecek büyüklükte olmasıdır. Böylece, sistemi başlangıçta kararsız hale getirebilecek büyük salınımların da önüne geçilmiştir.

Eğitim seti üzerinde çalıştırılan yalın ve PID kontrollü  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_{96}$  öngörü modellerinin yük tahminleri ve tahminleme hataları Şekil 45 ve 46’da gösterilmiştir.

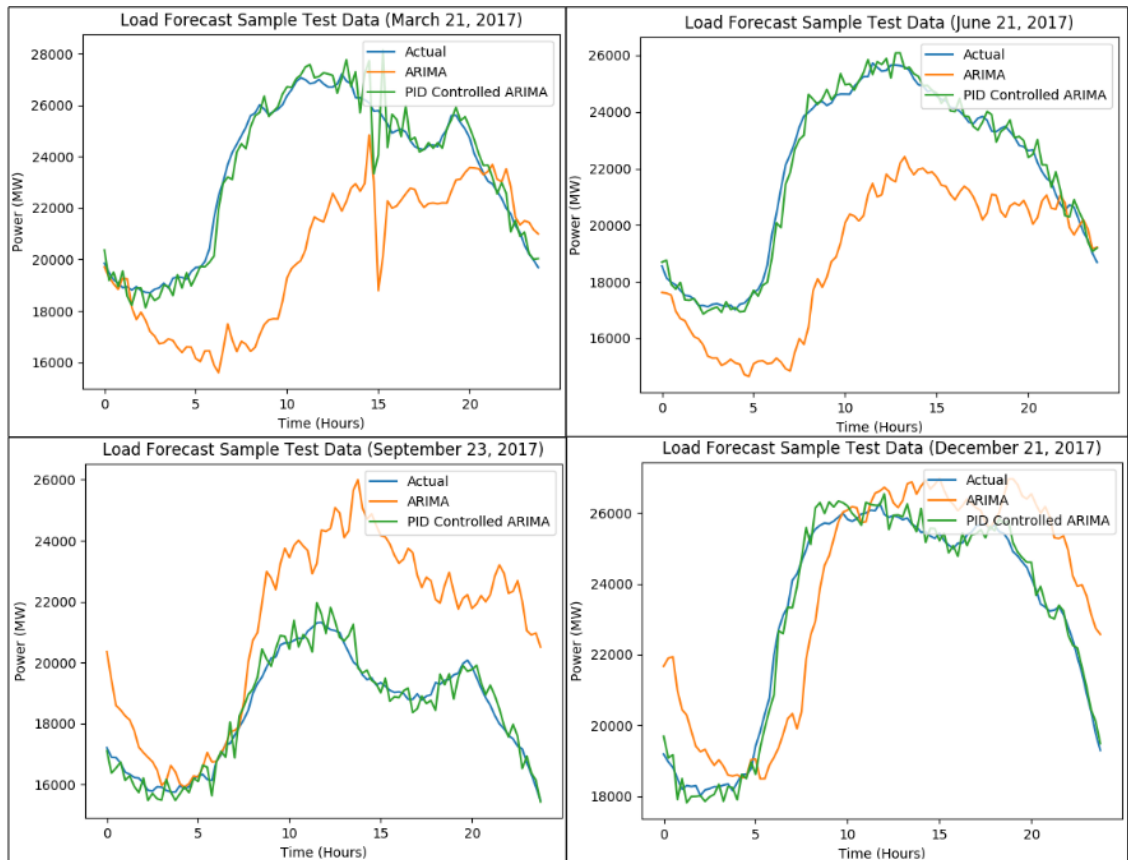


Şekil 45. Yük tahmini örnek eğitim verileri



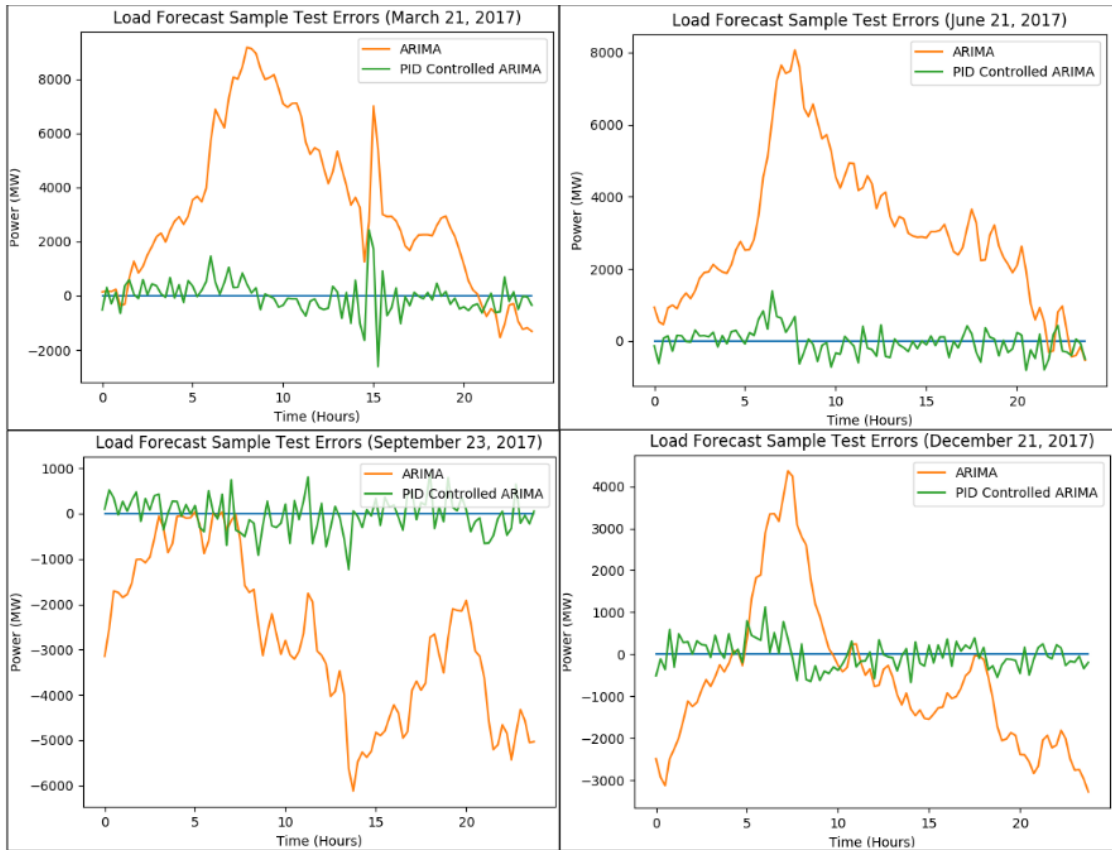
Şekil 46. Yük tahmini örnek eğitim hataları

PID parametreleri ayarlandıktan sonra, test seti üzerinde önce  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_{96}$  öngörü modeli çalıştırılarak talep tahminleri yapılmış ve bu tahminler ile beraberinde tahminleme hataları da kaydedilmiştir. Ancak  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_{96}$  öngörü modeli test verileri ile çalıştırılırken; küçük ve orta ölçekli verilerde olduğu gibi her yeni gelen veri ile birlikte model katsayılarının dinamik olarak güncellenmesi söz konusu olamamıştır. Bunun nedeni, eğitim seti ile yaşanan sıkıntının da sebebi olan veri büyüklüğüdür. Test veri setinin büyüklüğü de göz önünde bulundurulduğunda;  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_{96}$  öngörü modelinin katsayılarının dinamik olarak güncellenmesi, modelin yeni gelen verilerle birlikte büyüyen eğitim veri seti üzerine 35000'den fazla kez uydurulmasını gerektirecektir. Bu nedenle model katsayılarının dinamik olarak güncellenmesi uygulanabilir olarak görülmemiş ve eğitim seti ile belirlenmiş olan katsayılar sabit tutulmuştur. Daha sonra, kaydedilen öngörü modeli tahminleri kullanılarak, PID kontrollü  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_{96}$  öngörü modeli test seti üzerinde çalıştırılmış ve yeni tahminler yapılmıştır. Test seti üzerinde modeller tarafından gerçekleştirilen yük tahminleri ve tahminleme hataları, Şekil 47 ve 48'de gösterilmiştir.



Şekil 47. Yük tahmini örnek test verileri





Şekil 48. Yük tahmini örnek test hataları

Test sonuçları incelendiğinde PID kontrollü  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_6$  öngörü modelinin hata oranlarının çok büyük ölçüde düştüğü ve 0'a yakınsadığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, yük tahmini verileri PID kontrollü öngörü modelinin durağan durumda çalıştığını göstermektedir. İntegral kontrol kazancının da yüksek olması, durağan durumda çalışan sistemin hata terimlerinin ortadan kaldırılmasını sağlamıştır. Sistemin test seti boyunca durağan durumda çalışması, aynı zamanda PID parametrelerinin ayarlanmasında kullanılan optimizasyon modelinde amaç fonksiyonu olarak  $M_2$  fonksiyonunun seçilmesinin ardındaki varsayımın doğruluğunu da teyit etmiştir. Bu sayede, durağan durumda çalışan PID kontrollü öngörü modelinin test hatalarının oranları; eğitim hatalarının oranlarına kıyasla yükselmemiş, aksine düşmüştür.

#### 4.3.7.4. Yük Tahmini Testleri ile İlgili Bulgular

$ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_6$  öngörü modeli ile gerçekleştirilen yük tahmini testinin ardından, PID kontrollü  $ARIMA(2,2,0) \times (0,1,1)_6$  öngörü modeli ile yinelenen test sonuçlarına göre hesaplanan hata ölçütleri Tablo VI ile gösterilmiştir.

TABLO VI: Yalın ve PID Kontrollü ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> Hata Oranları

Hata Ölçütü	ARIMA(2,2,0)x(0,1,1) <sub>96</sub>		
	Öngörü	PID Kontrollü Öngörü	Hata İyileştirme Oranı
MBE	431.6511	-0.1105	%100.0
MAE	2888.0128	312.2517	%89.2
RMSE	3556.4713	418.6099	%88.2
nRMSE	0.1657	0.0195	%88.2
RMSPE	%16.5	%2.3	%86.3
MAPE	%13.5	%1.5	%88.9
rRMSE	0.9854	0.1160	%88.2
MASE	1.3555	0.1466	%89.2
Genel Ölçütler	<b>Genel İyileştirme Oranı</b>		<b>%88.7</b>
	Veri Ortalaması		21418.6180
	Veri Standart Sapması		3861.9406

TABLO VI ile verilen sonuçlara göre, PID kontrollü ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> öngörü modeli ile yalın olarak kullanılan ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> öngörü modeline kıyasla tüm hata ölçütlerinde büyük oranda düşüş sağlanmıştır. Tüm hata ölçütleri, PID kontrollü ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> öngörü modelinin, yalın olarak kullanılan ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> öngörü modelinden çok daha düşük hata oranlarıyla çalıştığını göstermektedir. PID kontrollü ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> öngörü modeli, yalın ARIMA(2,2,0)x(0,1,1)<sub>96</sub> öngörü modelinin hata ölçütlerinde %88.7 gibi son derece yüksek bir genel iyileştirme oranı sağlamıştır.

## SONUÇ

Zaman serisi verileri kullanılarak gerçekleştirilen talep tahmini uygulamaları sonucunda elde edilen bulgular; PID kontrollü öngörü modellerinin, yalın olarak kullanılan öngörü modellerine kıyasla, hata oranlarını belirgin şekilde daha düşük seviyelere çektiğini ortaya koymuştur. Talep tahmini uygulamalarında, istatistiksel öngörü modellerinin PID kontrol algoritması ile birleştirilerek kullanıldığı durumda, bu öngörü modellerinin yalın olarak kullanıldığı duruma göre; yaklaşık olarak %20 ile %90 arasında değişen genel iyileştirme oranları sağlanmıştır. PID kontrol algoritması ile zaman serisi bileşenleri otomatik olarak ayrıştırıldığı için; optimal PID katsayıları, öngörü modelinin hata terimlerindeki değişim bileşenlerinin etkisiyle orantılı değerler almıştır ve bu sayede hata terimleri sönmülmüştür.

Uygulamalarda PID kontrollü öngörü modelleri ile elde edilen genel iyileştirme oranları, durağan olmayan küçük talep verisi setleri üzerinde %17.2 ile %42.5 aralığında değişim gösterirken, sinüzoidal değişen varyanslı büyük talep verisi seti üzerinde %88.7 seviyesine yükselmiştir. Bu durumun, ARIMA ve SARIMA modellerinin küçük veri setlerinde daha yüksek tahminleme başarımlarına ulaşırken, büyük veri setlerinde durağanlığı sağlamakta dahi düşük başarı göstermesi ve buna bağlı olarak düşük tahminleme başarımlarıyla çalışması sebebiyle ortaya çıktığı söylenebilir. Bu da göstermektedir ki, kararlı bölgede çalıştırılan kontrol sistemleri için; PID kontrollü öngörü modellerinin tahminleme başarımları, yalın öngörü modellerinin tahminleme başarımlarındaki farklılıklara karşı düşük duyarlılığa sahiptir.

Uygulamalarda, farklı tiplerdeki talep verileri üzerinde, farklı yapılarıdaki öngörü modelleri ile gerçekleştirilen talep tahminleri ile test edilen PID kontrollü öngörü modeli yaklaşımı ile elde edilen bulgular; kontrol teorisi uygulamalarının yapılacağı herhangi sistemsel süreç için kara kutu yaklaşımı ile yalnızca girdi ve çıktı ilişkisi tanımlanarak, bu süreçlerin kontrolünün sağlanabileceği varsayımını da destekler niteliktedir. Buradan hareketle, kontrol teorisi uygulamalarının kullanıldığı süreçlerin içyapısından tümüyle bağımsız şekilde, soyutlanmış olarak düşünülebileceği gösterilmiştir. Bu bağlamda, bu tez çalışması ile sunulan kontrol teorisi uygulamaları ile zaman serisi öngörülerinin iyileştirilmesi yaklaşımı; kontrol teorisi uygulamalarının ve geri besleme kontrol sistemlerinin stokastik fiziksel ve endüstriyel süreçlerde sıfır hata konsepti doğrultusunda

uzun yıllardır sağlamakta olduğu avantajları, benzer şekilde simülasyon ortamına aktarılan zaman serilerinin öngörülerini için de sağlayabilecek yeni bir metodolojik çerçeve olarak öngörü literatürüne kazandırılmıştır. Aynı zamanda, kontrol teorisi ve kontrol sistemleri için tümüyle yeni bir uygulama alanı sunulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen uygulamalar ile; uyarlanabilir kontrol sistemiyle iyi çalışılmış ve yaygın olarak kullanılan istatistiksel öngörü modellerinin etkileşimsiz olarak birleştirilmesiyle elde edilen kontrollü öngörü modellerinin, farklı tipteki durağan olmayan zaman serileri üzerinde bir periyot sonrasının öngörülerini için kullanım şekilleri gösterilmiştir. Böylece, kontrol teorisi uygulamaları ile zaman serisi öngörülerinin iyileştirilmesi yaklaşımını ortaya koymaya yönelik genel örnekler sunulmuştur. Ancak, çizilen çerçeve yöntemin kapsamı; istatistiksel öngörü modelleri ile kısıtlı olmadığı gibi, bir periyot sonrasının öngörülerini ile de kısıtlı değildir. Gelecek çalışmalarda, bu çerçeve yöntemin; çeşitli makine öğrenmesi algoritmalarını da içeren farklı türdeki öngörü modelleri üzerinde ve birden fazla periyot sonrasının öngörülerinde kullanım şekillerini ve kontrol sisteminin öngörü modelleri ile etkileşimli olarak birleştirilmesini içeren uygulamaları gösterilecektir. Gelecek araştırmalar ise; hata terimleri yüksek frekanslı değişim gösteren öngörü modellerinde I-PD kontrol, I-PID kontrol ve ardışık kontrol algoritmalarının kullanımının etkileri ve aynı çalışmaların gürbüz kontrol yaklaşımı ile yeniden uygulanması gibi konuları içerebilir.

## KAYNAKÇA

- [1] N. Slack, A. Brandon-Jones and R. Johnston, *Operations Management*, 7th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2013.
- [2] S. Chopra and P. Meindl, *Supply chain management*, 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall, 2007.
- [3] M. Ortega and L. Lin, "Control theory applications to the production–inventory problem: a review," *International Journal of Production Research*, vol. 42, no. 11, pp. 2303-2322, 2004.
- [4] A. White and M. Censlive, "Inventory Control Systems Model for Strategic Capacity Acquisition," *Journal of Industrial Engineering*, vol. 2016, pp. 1-16, 2016.
- [5] K. Saeed, "Trend forecasting for stability in supply chains," *Journal of Business Research*, vol. 61, no. 11, pp. 1113-1124, 2008.
- [6] H. Sarimveis, P. Patrinos, C. Tarantilis and C. Kiranoudis, "Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review," *Computers & Operations Research*, vol. 35, no. 11, pp. 3530-3561, 2008.
- [7] B. Bowerman and R. O'Connell, *Forecasting and time series*, 3rd ed. Belmont, California: Duxbury Press, 1993.
- [8] N. Dalkey and O. Helmer, "An Experimental Application of the DELPHI Method to the Use of Experts," *Management Science*, vol. 9, no. 3, pp. 458-467, 1963.
- [9] Y. Dodge, *The concise encyclopedia of statistics*. New York: Springer, 2008.
- [10] S. Gupta and M. Starr, *Production and Operations Management Systems*. Hoboken: CRC Press, 2014.
- [11] R. Hyndman, "Cyclic and seasonal time series," *Hyndsight*, 2011. [Online]. Available: <https://robjhyndman.com>. [Accessed: 31- Oct- 2018].
- [12] P. Brockwell and R. Davis, *Introduction to Time Series and Forecasting*, 3rd ed. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [13] R. Hyndman and G. Athanasopoulos, *Forecasting: Principles and Practice*, 2nd ed. Heathmont, Victoria: OTexts, 2018.
- [14] K. Ogata, *Modern control engineering*, 5th ed. Boston: Pearson, 2010.
- [15] N. Minorsky, "Directional Stability of Automatically Steered Bodies," *Journal of the American Society for Naval Engineers*, vol. 34, no. 2, pp. 280-309, 2009.

- [16] H. Nyquist, "Regeneration Theory," *Bell System Technical Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 126-147, 1932.
- [17] H. Hazen, "Theory of servo-mechanisms", *Journal of the Franklin Institute*, vol. 218, no. 3, pp. 279-331, 1934.
- [18] W. Evans, "Control System Synthesis by Root Locus Method," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 69, no. 1, pp. 66-69, 1950.
- [19] K. Åström and T. Hägglund, *Advanced PID control*. Research Triangle Park, NC: ISA, 2006.
- [20] K. Ang, G. Chong and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559-576, 2005.
- [21] R. Dorf and R. Bishop, *Modern Control Systems*, 12th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2010.
- [22] J. Ziegler and N. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers," *trans. ASME*, vol. 64, no. 11, 1942.
- [23] K. Åström and T. Hägglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins," *Automatica*, vol. 20, no. 5, pp. 645-651, 1984.
- [24] R. Hyndman and Y. Khandakar, "Automatic Time Series Forecasting: TheforecastPackage forR," *Journal of Statistical Software*, vol. 27, no. 3, 2008.
- [25] Zhe-Lee Gaing, "A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 384-391, June 2004.
- [26] R. Hyndman and A. Koehler, "Another look at measures of forecast accuracy," *International Journal of Forecasting*, vol. 22, no. 4, pp. 679-688, 2006.
- [27] "Total Load - Day Ahead / Actual," ENTSO-E Transparency Platform. [Online]. Available: <https://transparency.entsoe.eu>. [Accessed: 24- May- 2019].
- [28] M. U. Gudelek, C. R. Cirak, E. Arin, M. E. Sezgin, A. M. Ozbayoglu and M. Gol, "Load and PV Generation Forecast Based Cost Optimization for Nanogrids with PV and Battery," *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Glasgow, 2018, pp. 1-6.

## EK 1. ORJİNALLİK RAPORU

 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; text-align: center;"> <p><b>HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ</b>  <b>SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ</b>  <b>YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU</b></p> </div>
<p><b>HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ</b>  <b>SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ</b>  <b>İŞLETMEANABİLİM DALI BAŞKANLIĞINA</b></p>
<p>Tarih: 04/07/2019</p>
<p>Tez Başlığı: Kontrol Teorisi Uygulamaları ile Zaman Serisi Öngörülerinin İyileştirilmesi</p> <p>Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 98 sayfalık kısmına ilişkin, 01/07/2019 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda işaretlenmiş filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %3'tür.</p> <p>Uygulanan filtrelemeler:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1- <input checked="" type="checkbox"/> Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç</li> <li>2- <input checked="" type="checkbox"/> Kaynakça hariç</li> <li>3- <input checked="" type="checkbox"/> Alıntılar hariç</li> <li>4- <input type="checkbox"/> Alıntılar dâhil</li> <li>5- <input checked="" type="checkbox"/> 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç</li> </ol> <p>Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azamibenzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunubeyan ederim.</p> <p>Gereğini saygılarımla arz ederim.</p>
<p>04/07/2019</p>
<p><b>Adı Soyadı:</b> Cem Recai Çırak</p> <p><b>Öğrenci No:</b> N14220665</p> <p><b>Anabilim Dalı:</b> İşletme</p> <p><b>Programı:</b> Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler</p>

<p><b><u>DANIŞMAN ONAYI</u></b></p> <p style="text-align: center;">UYGUNDUR.</p> <p style="text-align: center;">   <hr style="width: 20%; margin: auto;"/>                 Prof. Dr. Aydın Ulucan             </p>





**HACETTEPE UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF SOCIAL SCIENCES  
MASTER'S THESIS ORIGINALITY REPORT**

**HACETTEPE UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF SOCIAL SCIENCES  
BUSINESS ADMINISTRATION DEPARTMENT**

Date: 04/07/2019

Thesis Title: Improvement of Time Series Forecasts via Control Theory Applications

According to the originality report obtained by my thesis advisor by using the Turnitin plagiarism detection software and by applying the filtering options checked below on 01/07/2019 for the total of 98 pages including the a) TitlePage, b) Introduction, c) Main Chapters, and d) Conclusion sections of my thesis entitled as above, the similarity index of my thesis is 3%.

Filtering options applied:

1.  Approval and Declaration section excluded
2.  Bibliography/Works Cited excluded
3.  Quotes excluded
4.  Quotes included
5.  Match size upto 5 words excluded

I declare that I have carefully read Hacettepe University Graduate School of Social Sciences Guidelines for Obtaining and Using Thesis Originality Reports; that according to the maximum similarity index values specified in the Guidelines, my thesis does not include any form of plagiarism; that in any future detection of possible infringement of the regulations I accept all legal responsibility; and that all the information I have provided is correct to the best of my knowledge.

I respectfully submit this for approval.

04/07/2019

**Name Surname:** Cem Recai Çırak  
**Student No:** N14220665  
**Department:** Business Administration  
**Program:** Production/Operations Management and Quantitative Methods


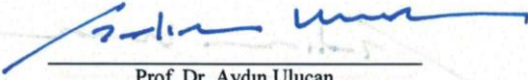
**ADVISOR APPROVAL**

APPROVED.

Prof. Dr. Aydın Ulucan



## EK 2. ETİK KOMİSYON MUAFİYET FORMU

 <p style="text-align: center;"><b>HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ</b> <b>SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ</b> <b>TEZ ÇALIŞMASI ETİK KOMİSYON MUAFİYETİ FORMU</b></p>
<p style="text-align: center;"><b>HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ</b> <b>SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ</b> <b>İŞLETME ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA</b></p> <p style="text-align: right;">Tarih: 04/07/2019</p> <p>Tez Başlığı: Kontrol Teorisi Uygulamaları ile Zaman Serisi Öngörülerinin İyileştirilmesi</p> <p>Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmam:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. İnsan ve hayvan üzerinde deney niteliği taşımamaktadır,</li> <li>2. Biyolojik materyal (kan, idrar vb. biyolojik sıvılar ve numuneler) kullanılmasını gerektirmemektedir.</li> <li>3. Beden bütünlüğüne müdahale içermemektedir.</li> <li>4. Gözlemsel ve betimsel araştırma (anket, mülakat, ölçek/skala çalışmaları, dosya taramaları, veri kaynakları taraması, sistem-model geliştirme çalışmaları) niteliğinde değildir.</li> </ol> <p>Hacettepe Üniversitesi Etik Kurullar ve Komisyonlarının Yönergelerini inceledim ve bunlara göre tez çalışmamın yürütülebilmesi için herhangi bir Etik Kurul/Komisyon'dan izin alınmasına gerek olmadığını; aksi durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.</p> <p>Gereğini saygılarımla arz ederim.</p> <p style="text-align: right;">04/07/2019</p> <p><b>Adı Soyadı:</b> Cem Recai Çırak</p> <p><b>Öğrenci No:</b> N14220665</p> <p><b>Anabilim Dalı:</b> İşletme</p> <p><b>Programı:</b> Üretim Yönetimi ve Sayısal Yöntemler</p> <p><b>Statüsü:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Yüksek Lisans <input type="checkbox"/> Doktora <input type="checkbox"/> Bütünleşik Doktora</p>
<p><b><u>DANIŞMAN GÖRÜŞÜ VE ONAYI</u></b></p> <p style="text-align: center;">UYGUNDUR.</p> <p style="text-align: center;">           Prof. Dr. Aydın Ulucan       </p> <p>Detaylı Bilgi: <a href="http://www.sosyalbilimler.hacettepe.edu.tr">http://www.sosyalbilimler.hacettepe.edu.tr</a>          Telefon: 0-312-2976860 Faks: 0-312-2992147 E-posta: <a href="mailto:sosyalbilimler@hacettepe.edu.tr">sosyalbilimler@hacettepe.edu.tr</a></p>



**HACETTEPE UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF SOCIAL SCIENCES  
ETHICS COMMISSION FORM FOR THESIS**

**HACETTEPE UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF SOCIAL SCIENCES  
BUSINESS ADMINISTRATION DEPARTMENT**

Date: 04/07/2019

Thesis Title: Improvement of Time Series Forecasts via Control Theory Applications

My thesis work related to the title above:

1. Does not perform experimentation on animals or people.
2. Does not necessitate the use of biological material (blood, urine, biological fluids and samples, etc.).
3. Does not involve any interference of the body's integrity.
4. Is not based on observational and descriptive research (survey, interview, measures/scales, data scanning, system-model development).

I declare, I have carefully read Hacettepe University's Ethics Regulations and the Commission's Guidelines, and in order to proceed with my thesis according to these regulations I do not have to get permission from the Ethics Board/Commission for anything; in any infringement of the regulations I accept all legal responsibility and I declare that all the information I have provided is true.

I respectfully submit this for approval.

04/07/2019

**Name Surname:** Cem Recai Çırak  
**Student No:** N14220665  
**Department:** Business Administration  
**Program:** Production/Operations Management and Quantitative Methods  
**Status:**  MA  Ph.D.  Combined MA/ Ph.D.

**ADVISOR COMMENTS AND APPROVAL**

APPROVED.

Prof. Dr. Aydın Ulucan

**Detailed Information:** <http://www.sosyalbilimler.hacettepe.edu.tr>  
**Phone:** 0-312-2976860 **Fax:** 0-312-2992147 **E-mail:** [sosyalbilimler@hacettepe.edu.tr](mailto:sosyalbilimler@hacettepe.edu.tr)

