

T.C.  
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDROELEKTRİK SANTRALLARDA BAKIM ÇİZELGELEME

Tuğba DANIŞAN

TEMMUZ 2019

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Tuğba DANIŞAN tarafından hazırlanan HİDROELEKTRİK SANTRALLARDA BAKIM ÇİZELGELEME adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman ERSÖZ  
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin Yüksek Lisans Tezi olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Tamer EREN  
Ortak Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Evrencan ÖZCAN  
Danışman

#### Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN

Üye (Danışman) : Dr. Öğr. Üyesi Evrencan ÖZCAN

Üye (Ortak Danışman) : Prof. Dr. Tamer EREN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hacı Mehmet ALAKAŞ

..02../03../2019.

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Recep ÇALIN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### HİDROELEKTRİK SANTRALLARDA BAKIM ÇİZELGELEME

DANIŞAN, Tuğba

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Evrencan ÖZCAN

Ortak Danışman: Prof. Dr. Tamer EREN

Temmuz 2019, 82 sayfa

Bir sistemin çalışır durumda kalmasını sağlamak veya arızalı bir sistemi çalışır duruma getirmek için gerçekleştirilen uygulamaların tümü olarak adlandırılabilir bakım, endüstriyel işletmelerde üretim başta olmak üzere personel ve malzeme ile eş zamanlı olarak yönetilmesi gereken önemli bir prosestir. Bu önemli prosesin kritik aşamalarının başında bakım planlaması gelmektedir. Bakım planlaması için gerekli olan iki aşama bulunmaktadır ve bu aşamalardan ilki bakım strateji seçimidir. Bakım proseslerinin malzeme, zaman, iş gücü ve üretim duruşu gereksinimi nedeniyle önemli maliyetleri de beraberinde getirdiği düşünüldüğünde, özellikle büyük alt yapı yatırımları grubunda yer alan elektrik üretim santralleri gibi sürekli üretim tesislerinde üretim tesislerindeki kritik ekipmanlara uygun bakım stratejilerinin atanması, üretim tesisinin gereksiz maliyetlerden kurtarılacak daha etkin ve verimli bir sistem yapısına sahip olması açısından büyük önem arz etmektedir. Bakım planlamasının ilk aşaması olan bakım strateji seçimi gerçekleştirildikten sonraki aşama ise hangi sistem birimi ya da ekipmanın ne zaman bakıma alınması gerektiği sorusunun cevabını oluşturan bakım çizelgelemesidir.

Bu tez çalışmasında, Mayıs 2019 itibariyle Türkiye toplam elektrik üretiminin %48,74'ünü karşılayan hidroelektrik santrallarda bakım çizelgelemesi için beş adımdan oluşan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu adımlardan ilk üçü bakım strateji seçimi için, dördüncü ve beşinci adım ise bakım çizelgeleme için yapılan çalışmaları içermektedir. Bakım stratejisi seçildikten sonra periyodik bakıma tabi olan ekipmanlar için bakım çizelgeleme çalışması yapılmıştır.

Tez çalışmasının ilk iki adımında santral ekipmanlarının kritiklik seviyeleri Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) yöntemleri ile hesaplanmıştır. Bu ilk iki adımdan sonra bakım strateji seçiminin yapıldığı üçüncü adıma geçilmiştir. Bu adımda ilk iki adımdaki işlemler sonucu belirlenmiş olan kritik ana ekipman grupları için önerilen bir Tam Sayılı Programlama (TP) modeli ile bakım strateji seçimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk üç adımını oluşturan bu işlemlerin sonucunda bir zaman çizelgesi doğrultusunda gerçekleştirilebilecek olan, periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu belirlenmiştir.

İlk üç adımın tamamlanması ile periyodik bakıma tabi olan bu kritik 7 ana ekipman grubu için bakım çizelgelemenin gerçekleştirileceği dördüncü ve beşinci adıma geçilmiştir. Dördüncü adımda yapay sinir ağı (YSA) yöntemi ile üretim tahmini yapılmıştır. Tahmin sonucunda elde edilen üretim değerlerinden bakım saatleri hesaplanmıştır. Bu bakım saatleri beşinci adımda önerilen matematiksel modelde bir parametre olarak kullanılmıştır. Dördüncü adımdan sonra beşinci adımda ise bakım çizelgeleme için bir TP modeli önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bakım çizelgeleme, Bakım strateji seçimi, Üretim tahmini, Hidroelektrik santral, Tam sayılı programlama, Analitik hiyerarşi prosesi, TOPSIS, Yapay sinir ağı.

## **ABSTRACT**

### **MAINTENANCE SCHEDULING IN THE HYDROELECTRIC POWER PLANT**

DANIŞAN, Tuğba

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Industrial Engineering, M.Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Evrencan ÖZCAN

Co-Supervisor: Prof. Dr. Tamer EREN

July 2019, 82 pages

Maintenance, which can be termed as all of the applications performed to keep a system in operation or to bring a defective system into operation, is an important process that must be managed simultaneously with personnel and materials, especially in production in industrial enterprises. Maintenance planning is one of the critical stages of this important process. There are two phases required for maintenance planning, the first of which is the maintenance strategy selection. There are two phases required for maintenance planning, the first of which is the maintenance strategy selection. Considering that maintenance processes bring significant costs due to material, time, labor and production downtime requirements, the appointment of appropriate maintenance strategies to critical equipment especially in production facilities requiring large infrastructure such as power generation plants, saves the production facility from unnecessary costs and provides a more efficient and efficient system structure has great importance in terms of having. The first phase of maintenance planning, after the maintenance strategy selection is carried out, is the maintenance schedule that forms the answer to the question of which system unit or equipment should be serviced and when.

In this thesis, a study consists of five steps for maintenance scheduling in hydroelectric plants meeting the 48.74% of Turkey's total electricity production as of May 2019 were carried out. The first three of these steps are for maintenance strategy selection and the fourth and fifth steps are for maintenance scheduling. After the maintenance strategy was selected, maintenance scheduling was performed for the equipment subject to preventive maintenance.

In the first two steps of the thesis, criticality levels of power plant equipment were calculated by Analytical Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference by Similar Solution (TOPSIS). After these first two steps, the third step was started where maintenance strategy selection was made. In this step, the maintenance strategy selection performed with a proposed Integer Programming (TP) model for the critical main equipment groups determined as a result of the operations in the first two steps. As a result of these operations, which constitute the first three steps of the study, 7 main electrical equipment groups which preventive maintenance strategy can be applied according to a time schedule, are determined.

With the completion of the first three steps, the fourth and fifth steps have been started, where maintenance scheduling will be performed for these 7 critical equipment groups that are subject to periodic maintenance. In the fourth step, production estimation was made by artificial neural network (ANN) method. Maintenance hours were calculated from the production values obtained as a result of the estimation. These maintenance hours used as a parameter in the mathematical model proposed in step five. After the fourth step, a TP model for maintenance scheduling was proposed in the fifth step.

**Keywords:** Maintenance scheduling, Maintenance strategy selection, Production forecasting, Hydroelectric power plant, Integer programming, Analytic hierarchy process, TOPSIS, Artificial neural network.

## TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanma sürecinde hiçbir yardımı esirgemeyen, değerli katkı ve eleştirileri ile çalışmalarına yön veren tez danışmanlarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Evrencan ÖZCAN ve Sayın Prof. Dr. Tamer EREN hocalarıma, özellikle vermiş olduğu “Programlama Dilleri” dersinde modelleme bilgisini bizlere sunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hacı Mehmet ALAKAŞ hocama, sektörel bilgi birikimiyle değerli katkılar sağlayan Elektrik-Elektronik Mühendisi Sayın Ferdi YILDIRIM ve Elektrik Mühendisi Sayın Umur KÜÇÜKYARAR’a, daha verimli çalışmamız adına lisansüstü çalışma salonlarını açan Endüstri Mühendisliği Bölüm Başkanlığı’na, katkıları ile desteğini ve sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, dostlarıma ve muhabbetleriyle hayatımda yer edinmiş tüm güzel insanlara teşekkür ederim.

Bu tez Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından 2018/008 numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı BAP Birimine teşekkürlerimizi sunarız.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

|                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET.....                                                          | i    |
| ABSTRACT.....                                                      | iii  |
| TEŞEKKÜR.....                                                      | v    |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....                                           | vi   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                            | viii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                               | ix   |
| KISALTMALAR DİZİNİ.....                                            | x    |
| 1. GİRİŞ .....                                                     | 1    |
| 2. ENERJİ SEKTÖRÜNDE BAKIM .....                                   | 5    |
| 2.1. Hidroelektrik Santrallerin Çalışma ve Bakım Esasları .....    | 6    |
| 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....                                     | 12   |
| 3.1.Bakım Strateji Seçimi ile İlgili Çalışmalar .....              | 12   |
| 3.2.Bakım Çizelgeleme İle İlgili Çalışmalar.....                   | 16   |
| 4. KULLANILAN YÖNTEMLER .....                                      | 24   |
| 4.1.AHP Yöntemi.....                                               | 24   |
| 4.2.TOPSIS Yöntemi .....                                           | 27   |
| 4.3.Yapay Sinir Ağı Yöntemi .....                                  | 29   |
| 4.4.Tam Sayılı Programlama Yöntemi .....                           | 31   |
| 5. UYGULAMA .....                                                  | 32   |
| 5.1.Bakım Strateji Seçimi .....                                    | 34   |
| 5.1.1.Elektriksel Kritik Ana Ekipman Gruplarının Belirlenmesi..... | 34   |
| 5.1.2.Bakım Stratejilerinin Seçimi .....                           | 37   |



|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 5.2.Bakım Çizelgeleme .....                            | 40 |
| 5.2.1.Çalışma-Bakım Saatlerinin Tespit Edilmesi .....  | 41 |
| 5.2.2.Periyodik Bakım Çizelgesinin Oluşturulması ..... | 45 |
| 6. SONUÇ .....                                         | 51 |
| KAYNAKLAR .....                                        | 54 |
| EKLER.....                                             | 76 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

### Sayfa

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Periyodik bakım türlerindeki uygulamalar .....                | 10 |
| 3.1. Amaçlarına göre bakım çizelgeleme çalışmaları .....           | 20 |
| 3.2. Uygulama birimine göre bakım çizelgeleme çalışmaları.....     | 21 |
| 4.1. Saaty önem skalası .....                                      | 25 |
| 4.2. RI değerleri.....                                             | 26 |
| 5.1. Değerlendirme kriterleri.....                                 | 35 |
| 5.2. Kriter ağırlıkları .....                                      | 36 |
| 5.3. En kritik elektriksel ekipmanlar ve kritiklik seviyeleri..... | 37 |
| 5.4. Ekipman bazlı optimum strateji kombinasyonları .....          | 39 |
| 5.5. Test tahmininden örnekler.....                                | 43 |
| 5.6. Tahmin sonucundan örnek .....                                 | 44 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>ŞEKİL</u>                                       | <u>Sayfa</u> |
|----------------------------------------------------|--------------|
| 2.1. Genel bir hidroelektrik santral yapısı .....  | 7            |
| 4.1. Basit bir yapay sinir ağı yapısı .....        | 30           |
| 5.1. Uygulama adımları .....                       | 33           |
| 5.2. Kurulan ağ yapısı .....                       | 41           |
| 5.3. Test sonucunun gerçekte karşılaştırması ..... | 42           |
| 5.4. Elde edilen bakım çizelgesi .....             | 49           |

## KISALTMALAR DİZİNİ

|        |                                                                |
|--------|----------------------------------------------------------------|
| AHP    | Analitik Hiyerarşi Prosesi                                     |
| ÇKKV   | Çok Kriterli Karar Verme                                       |
| GMS    | Generator Maintenance Scheduling                               |
| HP     | Hedef Programlama                                              |
| sMAPE  | Symmetric Mean Absolute Percentage Error                       |
| TMS    | Transportation/ Transmission Line Maintenance Scheduling       |
| TOPSIS | Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution |
| TP     | Tam Sayılı Programlama                                         |
| YSA    | Yapay Sinir Ağı                                                |

## 1. GİRİŞ

Birçok üretim ve hizmet sektöründe önemli karar verme süreçlerinden biri olan ve düzenli olarak yapılan planlama ve çizelgeleme çalışmaları, tesislerin sınırlı kaynaklarının işletme kurallarına uygun olarak yönetilmesi ve işletmede ulaşılmak istenen hedeflerin elde edilebilmesi için hangi kaynağın hangi birime hangi zaman diliminde tahsis edilmesi gerektiğini tespit eden, matematiksel tekniklere ve sezgisel yöntemlere dayanan uygulamalardan oluşmaktadır (Pinedo,2005). Oluşturulan çizelgelerde yapılması gereken işlerin başlama ve tamamlanma zamanları bulunmaktadır ve ulaşılmak istenen amaçlar belirlenip bu amaçlar doğrultusunda çizelgelemenin, işletme kaynaklarının etkin kullanımına bağlı kalınarak yapılması istenmektedir. Bu bağlamda literatürde makine, montaj hattı, proje, personel, rezervasyon ve taşıma çizelgeleme alanlarında birçok çizelgeleme çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmaları kapsamlı bir sınıflandırma ile sunan Pinedo (2005)'ya göre çizelgeleme çalışmaları iş ve servis sistem çizelgelemeleri olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır. Bu iki sınıftan servis sistemi çizelgeleme çalışmalarında servis sistemlerini tanımlamak, genel bir iş çizelgesi problemini tanımlamak kadar kolay olmamaktadır. Çünkü bir servis sistemindeki gereksinimlerin belirlenmesi imalat sistemleri de dahil olmak üzere birçok işlevsel birimin bilgisini gerektirmektedir (Pinedo, 2005).

Bu tez çalışmasına konu olan bakım çizelgeleme çalışması ise bir servis sistem çizelgeleme çalışmasıdır. Çizelgelemede ele alınan bakım, endüstriyel işletmelerde üretim başta olmak üzere personel ve malzeme ile eş zamanlı yönetilmesi gereken ayrıca üretim tesislerinin çevreye duyarlı, ekonomik, verimli, kesintisiz, kalite düzeyi yüksek ve güvenilir üretim yapması olarak tanımlanan sürdürülebilirlik hedefine üst düzeyde katkı sağlayan önemli bir prosestir (Özcan vd.,2019a). Bakımın kritik aşamalarının başında bakım planlaması gelmektedir. Bakım planlaması için gerekli olan önemli iki aşama bulunmaktadır ve bu aşamalardan ilk ve vazgeçilmez olanı

bakım strateji seçiminin yapılması ve sonrasında ikinci aşama olan bakım çizelgelerinin oluşturulmasıdır.

Literatürde gerek bakım strateji optimizasyonu için gerekse bakım çizelgeleme için farklı uygulama alanlarında farklı yöntemler ile çeşitli kriterler baz alınarak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bazı çalışmalarda optimal ve sezgisel yöntemler ayrı ayrı kullanılırken bazı çalışmalarda bu yöntemlerin entegrasyonundan oluşan modeller de önerilmiştir.

Bu tezde ise büyük ölçekli altyapı yatırımları arasında yer alan ve sürdürülebilir enerji arzına uygun elektrik üretimini gerçekleştirmek amacına sahip elektrik üretim santrallerinden (Özcan vd.,2017) olan ve Mayıs 2019 itibariyle Türkiye toplam elektrik üretiminin %48,74'ünü karşılayan (EMO, 2019) hidroelektrik santrallerde bakım planlaması için beş adımdan oluşan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu adımlardan ilk üçü bakım strateji seçimi için, dördüncü ve beşinci adım ise bakım çizelgeleme için yapılan çalışmaları içermektedir. Bakım stratejisi seçildikten sonra periyodik bakıma tabi olan ekipmanlar için bakım çizelgeleme çalışması yapılmıştır.

Tez çalışmasının ilk iki adımında santral ekipmanlarının kritiklik seviyeleri hesaplanmıştır. Türkiye'deki büyük ölçekli bir hidroelektrik santralda yer alan 1.330 elektriksel ekipmanın santral açısından kritiklik seviyesinin belirlenmesi için literatürde bu tip problemlerde etkinlikleri kabul görmüş olan AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Bu adımlar sonucunda santral için kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu belirlenmiştir.

Bu ilk iki adımdan sonra bakım strateji seçiminin yapıldığı üçüncü adıma geçilmiştir. Bu adımda ilk iki adımdaki işlemler sonucu belirlenmiş olan kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu için önerilen bir Tam Sayılı Programlama (TP) modeli ile bakım strateji seçimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk üç adımını oluşturan bu işlemlerin sonucunda bir zaman çizelgesi doğrultusunda gerçekleştirilebilecek olan, periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu belirlenmiştir.

İlk üç adımın tamamlanması ile santraldaki sürdürülebilir enerji arzını direkt olarak etkileyen ve periyodik bakıma tabi olan bu kritik 7 ana ekipman grubu için bakım çizelgelemenin gerçekleştirileceği dördüncü ve beşinci adıma geçilmiştir. Dördüncü adımda bakım çizelgeleme modelinde parametre olarak kullanılacak bakım saatleri için YSA yöntemi ile üretim tahmini yapılmıştır. Tahmin sonucunda elde edilen üretim değerlerinden bakım saatleri hesaplanmıştır.

Dördüncü adımdan sonra beşinci adımda ise bakım çizelgeleme için bir TP modeli önerilmiştir. Bu model ile literatürde ilk defa bir hidroelektrik santralda farklı karakteristik özelliklere sahip 7 kritik ekipman, 52 haftalık periyotta 5 farklı periyodik bakım türü için çizelgelenmiştir.

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm giriş bölümüdür ve çizelgeleme ve bakım kavramından kısaca bahsedilmiştir. Daha sonra bakım planlama ve çizelgeleme problemine dair yüzeysel bir bilgi verilmiş ve bakım çizelgeleme probleminin tanımlaması yapılmıştır.

Tez çalışmasının gerçekleştirildiği sektör olan enerji sektörüne dair genel bilgilere ikinci bölümde yer verilirken Türkiye'deki enerji sektöründe hidroelektrik santralların önemine değinilmiştir. Bu bilgilendirme sonrasında elektrik üretim santrallarında bakım kavramına yönelik detaylı bilgiler aktarılmış, özellikle tez kapsamında çalışılan hidroelektrik santrallarda gerçekleştirilen bakım stratejilerine dair bilgiler sunulmuştur.

Bir sonraki bölüm olan üçüncü bölümde ise tez kapsamında incelenen literatüre yer verilmiştir. Öncelikle tez çalışmasının birinci aşaması olan bakım strateji optimizasyonuna dair ayrıntılı literatür açıklanmış, sonrasında ise tez çalışmasının ikinci aşaması olan enerji sektöründeki bakım çizelgeleme çalışmalarına yer verilmiştir. Ayrıca tez kapsamında gerçekleştirilen bu iki ayrı aşamanın ilgili literatürlerindeki çalışmalardan farkı vurgulanarak literatüre kazandırdığı katkılar da yine bu bölümde açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde tez probleminin çözümünde kullanılan yöntemlere dair teorik bilgiler bu tez çalışmasında kullanılma nedenleri ile sunulmuştur. Bakım strateji optimizasyonunun gerçekleştirildiği ilk aşamasında kullanılan AHP ve TOPSIS yöntemlerinin temel uygulama adımlarına, bakım çizelgeleme aşamasındaki üretim tahmini için kullanılan YSA yöntemi hakkında genel bilgiye ve her iki aşamada da optimal çözüm yöntemi olarak kullanılan TP'ye dair genel yapıya yer verilmiştir. Bununla birlikte bu bölümde tezde kullanılan çözüm yöntemlerinin tercih edilme nedenlerine de yer verilmiştir.

Beşinci bölümde ise tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen bakım çizelgeleme çalışmasının uygulamasına yer verilmiştir. Öncelikle problem tanımı ayrıntılı bir şekilde sunulmuş ve her iki aşamasının uygulama adımları ayrıntıları şemalarla gösterilmiş olup her aşama ayrıntılı bir şekilde bu bölümde açıklanmıştır.

Son olarak altıncı bölümde tez çalışması sonucunda elde edilen sonuç sunulurken, 7 elektriksel kritik ana ekipman grubu için beş periyodik bakım türüne ait çizelgelere de yer verilmiştir. Sonrasında yapılan tez çalışmasının diğer çalışmalardan farklılıkları vurgulanırken literatüre sağlayacağı katkılar açıklanmıştır. Bununla birlikte ilerleyen zamanda yapılabilecek çalışmalara dair öneriler de sunulmuştur.



## 2. ENERJİ SEKTÖRÜNDE BAKIM

Bir ülkenin gelişmişlik düzeyi gerek ekonomik gerekse eğitim, sağlık, sanayi ve teknolojik alanlarda dışa bağımlı ve tüketen bir yapıya sahip olunmasının yerine yerli kaynakların etkin bir şekilde kullanılması ve üretken bir yapıya sahip olunmasına bağlıdır. Tüm bu alanlarda ülkelerin hedeflerine hizmet edecek çıktılarının elde edilmesi için sistemlerin sürekli, güvenilir ve esnek bir yapıda işletilmesi gerekmektedir. Sistemlerin tamamında sürekliliği ve güvenilirliği sağlamak birçok parametreye bağlı olmakla birlikte bunlar arasında en temel parametrelerden biri olarak sayılabilecek bir parametre bulunmaktadır: Enerji. Ülkelerin enerji alanında sağladıkları her gelişme aslında ülke bazında bu parametreye bağlı tüm sistemlerin de iyileştirilmesi demektir. Bu bağlamda özellikle enerji konusunda arz güvenliğinin sağlanması ülkelerin sanayi, sağlık, teknoloji gibi alanlarda sürekliliği ve güvenilirliği sağlama noktasında önemli bir paya sahiptir.

Enerji sektöründe sürdürülebilirliği ve güvenilirliği sağlamada elektrik üretim santralleri kritik bir rol oynamaktadır. Elektrik üretim santralleri sürdürülebilir enerji arzını sağlama hedefi olan büyük ölçekli altyapı yatırımlarıdır. Eş zamanlı olarak kesintisiz, güvenilir, verimli, ekonomik ve çevreye duyarlı elektrik üretimini gerçekleştirmek amacına sahip olan elektrik üretim santrallerinde sürdürülebilirlik perspektifinden ayrılmadan imalatçı firmalar tarafından verilen işletme direktiflerine uygun olarak tesislerin işletilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, elektrik üretim santrallerinde uygun bakım işlemlerinin uygun işletme kuralları ile aynı anda yapılması, sürdürülebilir enerji arzı için büyük önem taşımaktadır. (Özcan vd., 2017, 2019b).

Bir makine veya ekipmanın ekonomik ömründe tamamen işlevsel olmasını sağlamak için bir dizi teknik eylem olarak adlandırılan bakım (Márquez, 2007), endüstriyel işletmelerde üretim başta olmak üzere personel ve malzeme ile eş zamanlı olarak yönetilmesi gereken önemli bir prosestir. Özellikle sürdürülebilir bir üretim için gerekli olan ekipmanlarda, uzun süre çalıştırılmalarından dolayı yıpranma veya arızalanmaya bağlı olarak beklenen verim elde edilememektedir. Ekipmanlardan beklenen verimin elde edilememesi ya da ekipmana bakımın zamanında

uygulanmaması sonucu oluşan arızalar ise üretimin planlanan zamandan daha geç tamamlanması, istenilen ürün kalitesinin elde edilememesi ve dahası üretimin durdurulması gibi problemleri de beraberinde getirebilmektedir. Bu da üretim tesisleri için ek bir maliyet anlamına gelmektedir.

Bunun yanı sıra ülkeler için önemli gelir kaynaklarından olan ve büyük alt yapı yatırımları gerektiren elektrik üretim santralleri gibi büyük tesislerde benzer problemlerin yaşanması maliyetler dışında büyük problemleri de beraberinde getirmektedir. Örneğin ülkenin enerji arz güvenliğinin sağlanamaması, ülkedeki enerji alt yapısından faydalanan diğer işletmelerin de üretimlerinin durmasına, dolayısıyla ülke genelinde daha büyük bir probleme neden olabilmektedir. Özellikle Mayıs 2019 ayı sonu itibariyle elde edilen verilere göre toplamda 89.736,7 MW kurulu güce ulaşan Türkiye'deki elektrik üretim santrallerinden %31,66'lık (28.409,4 MW) oranla hidroelektrik santraller, ülkenin elektrik üretimindeki %48,74'lük üretim payına sahip (EMO, 2019; TEİAŞ, 2019) olması ile enerji arz güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle hidroelektrik santrallerde de diğer üretim tesislerinde olduğu gibi üretimin sürekliliğini sağlamakta önemli rol oynayan bakım prosesinin planlanması büyük önem arz etmektedir.

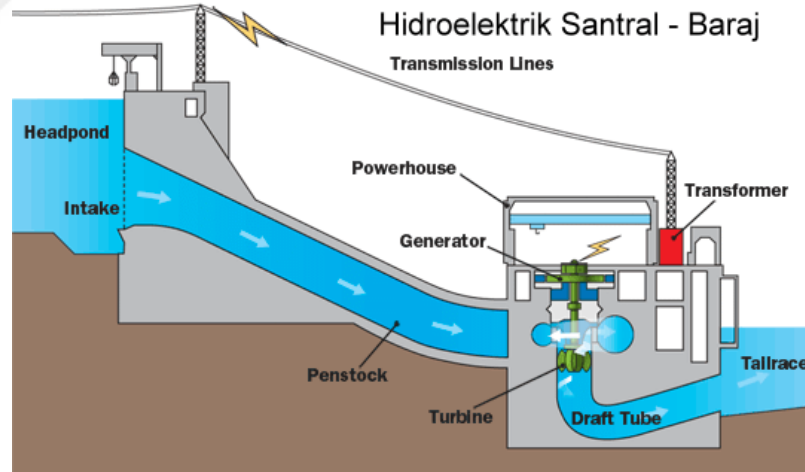
## **2.1. Hidroelektrik Santrallerin Çalışma ve Bakım Esasları**

Bu tez çalışmasında, 2019 Mayıs sonu itibariyle elde edilen verilere göre toplam elektrik üretiminin %48,74'ünü karşılayan ve 2018 Mayıs sonundaki değerlere (toplam üretimin %28,11'i) göre %20,63'lük bir artış oranına sahip olan (EMO, 2019), ülke ekonomisine ve sosyal refahına katkıda bulunacak büyük ölçekli alt yapı yatırımlarından olan elektrik üretim santrallerinden olan hidroelektrik santraller uygulama alanı olarak seçilmiştir.

Tüm enerji santrallerinde olduğu gibi hidroelektrik santrallerin de temel amacı, sürdürülebilir enerji arzı olarak da adlandırılan kesintisiz, güvenilir, verimli, ekonomik ve çevre dostu elektrik üretimini gerçekleştirmektir. Bu amacın gerçekleştirilmesindeki ilk aşama, makine/ekipman/sistem üreticisi kuruluşlar

tarafından belirlenen operasyonel direktiflere uygun olarak santrallerin işletilmesidir. Bu kurallar temel olarak şu şekilde sıralanabilir: santralin kavitasyon limitlerinde işletilmemesi, sık start-stoplardan kaçınılması, su giriş ızgaralarının düzenli olarak temizlenmesi, cebri borularda oluşması muhtemel basınç farklılıklarının izlenmesi ve dengelenmesi, ayar kanat açıklıklarının sabitlenmesi, rotor ve stator sargılarının izolasyon değerlerinin, hız regülatörünün, ikaz generatorunun akım ve gerilim değerlerinin, ikaz trafosunun izolasyonunun, generator rotorundaki vibrasyonun, bilezik hücresindeki kömürlerin boyutlarının ve ana güç trafosundaki yağ ve sargı sıcaklıklarının sürekli olarak takip edilmesidir (Başışme, 2003).

Hidroelektrik santraller, su tutma yapısının (baraj, tünel veya açık kanal, regülatör), su giriş yapısının, iletim kanalının veya cebri borularının, salyangozların, türbinlerin, generatorların, transformatörlerin ve şaltın ana parçaları altındaki binlerce ekipmandan oluşmaktadır. Bu ekipmanlar elektrik, mekanik, ölçüm ve kontrol ekipmanı olmak üzere üç ana başlık altında ele alınabilmektedir (Özcan vd., 2017, 2019b). Örnek bir hidroelektrik santral yapısına Şekil 2.1.'de yer verilmiştir.



Şekil 2.1. Genel bir hidroelektrik santral yapısı

Bahsedilen işletme direktifleri doğrultusunda işletilmesi gerekli olan hidroelektrik santrallarda su enerjisi, nehirler, akıntılı deniz boğazları ve gel-git olayı bulunan denizlerde kinetik enerji, yüksek dağlarda ve yaylalardaki doğal göller ile barajlarda

potansiyel enerjiye sahiptir. Suyun bulunduğu yere göre değişen bu enerjisi (kinetik ya da potansiyel enerji) baraj gövdesi ya da doğal göllerdeki suyun potansiyel enerjisi cebri borular gibi iletim tünellerinde kinetik enerjiye dönüştürülür, hidroelektrik santrallarda türbin çarkına çarpan suyun türbin şaftını döndürmesiyle mekanik enerjiye dönüşür. Türbin şaftı direkt ya da bir dişli sistemi ile generator rotoruna bağlıdır. Generator rotoru üzerinde bulunan sargıların dışarıdan bir doğru akım güç kaynağı ile uyarılması sonucunda rotor çevresinde bir manyetik alan oluşur. Dönen rotorun etrafında oluşan bu manyetik alanın stator sargılarında indüklenmesi ile elektrik enerjisi elde edilir. Elde edilen elektrik enerjisi ise, enerji iletim hatları ile enterkonnekte sisteme bağlanmaktadır (Başesme, 2003; Özcan vd., 2019b).

Yukarıda verilen operasyonel kuralların bir hidroelektrik santralda yerine getirilmesi, sürdürülebilir enerji üretimi için tek başına yeterli değildir. Çünkü, sıcaklık ve basınç değişimleri, ekipmanların yıllarca çalışmasına bağlı oluşan metal yorgunluğu, atmosferik koşullardaki değişim, topografik şartlar gibi etkenler santralin her ekipmanında bakım ve/veya onarım gereksinimini doğurabilmektedir. Bu nedenle, hidroelektrik santrallarda sürdürülebilir güç üretimi amacını gerçekleştirmedeki ikinci aşama, ekipmanların mevcut durumları ve karakteristik özellikleri baz alınarak planlanmış bakım çizelgelerinin uygulanmasıdır. Bu bağlamda, uygun bakım stratejileri belirlenmiş ekipmanların uygun periyotlarla bakımlarının gerekli tüm bakım aşamaları gerçekleştirilerek yapılması hidroelektrik santrallar için kritik öneme sahiptir (Özcan vd., 2017).

Bakım prosesinin kritik aşamalarının başında gelen bakım planlarının, sistem birimleri veya ekipmanlar için uygun olan bakım stratejilerine göre gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda çalışmanın uygulama alanı olan hidroelektrik santrallar için temel olarak dört bakım stratejisi uygulanmaktadır. Bu stratejiler arıza, periyodik, kestirimci ve revizyon bakımlardır (Özcan vd., 2019a).

Arıza bakım, makine/ekipmanların beklenen görevleri yerine getiremediği durumda gerçekleştirilen onarım veya bakım faaliyetlerini; kestirimci bakım, modern ölçüm ve sayısal işaret işleme metotları kullanılarak makine/ekipmanın işletilmesi sürecinde izlenmesi ve ölçüm sonuçlarına göre arıza oluşmadan gerekli tedbirlerin alındığı

bakım faaliyetlerini; revizyon bakım makine/ekipmanların uzun zaman dilimlerinde üniteler bazında kapsamlı incelendiği periyodik bakım faaliyetlerini; periyodik bakım ise, makine/ekipmanların kesintisiz ve beklenen tasarım spesifikasyonlarında çalışması için bir zaman çizelgesi dahilinde gerçekleştirilen bakım faaliyetlerini içermektedir (Özcan, 2016). Bu bakım stratejilerinin yanı sıra bu tez çalışmasında incelenen beş ayrı periyodik bakım türlerindeki uygulamalara ait ayrıntılı bilgi ise Çizelge 2.1.'de yer almaktadır.



Çizelge 2.1. Periyodik bakım türlerindeki uygulamalar

|                 | Haftalık                                                                                                                                                                | Aylık                                                                                                                                    | 3 Aylık                                                                                                                                 | 6 Aylık                                                                                                                                        | 1 Yıllık                                                                                                                                                |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Generator       | Gözle generatorun dış yapısının kontrolü, radyatörlerde kaçak olup olmadığının kontrolü, ısıtıcıların kontrolü ve generator kömürlerinin kontrolü                       | Haftalık bakımlara ek olarak generator bilezik hücresi ve slpring kontrolleri                                                            | Aylık bakımlara ek olarak generator çalışırken çıkış barası, nötr barası, generator dışı ve bilezik hücresinin termal kamera ile ölçümü | 3 aylık bakımlara ek olarak rotor ve stator temizliği ile testleri                                                                             | 6 aylık bakımlara ek olarak rotor ve stator yüzeylerinin ve stator sargılarının kontrolü ve temizliği, elektriksel test                                 |
| Ana Güç Trafosu | Yüksek ve alçak gerilim buşinglerinin, silikajellerin, sıcaklık göstergelerinin, sıcaklık değerlerinin, yağ seviye değerlerinin ve yağ kaçağı olup olmadığının kontrolü | Haftalık bakımlara ek olarak ana güç trafosu devredeyken termal kamera ölçümleri ile buşinglerin ve ana tankın sıcaklık değerleri ölçümü | Aylık bakımlara ek olarak fan kontrol panosunun temizliği ve kontrolü                                                                   | 3 aylık bakımlara ek olarak yüksek ve alçak gerilim buşinglerinin temizliği, tankda kaçak kontrolü, rezerve tankının genel temizliği ve bakımı | 6 aylık bakımlara ek olarak fan kontrol panosunun temizliği ve fanların kontrolü ve bakımı, kademe değiştirici testi, izolasyon ve yağ analizi testleri |
| Kesici          | Genel gözle kontrol ve SF6 gaz gösterge seviyesinin kontrolü                                                                                                            | Haftalık bakımlara ek olarak termal kamera ölçümleri                                                                                     | Aylık bakımlara ek olarak pano içi temizliği ve kontrolü                                                                                | 3 aylık bakımlara ek olarak açma kapama testleri, genel bağlantı noktaları kontrolü ve temizliği                                               | 6 aylık bakımlara ek olarak kontrol panosu içerisindeki elektriksel ekipmanların bakımları, elektriksel test                                            |

Çizelge 2.1. Periyodik bakım türlerindeki uygulamalar (devam)

|                             | Haftalık                                                                                      | Aylık                                                                                                                                                            | 3 Aylık                                                  | 6 Aylık                                                                                               | 1 Yıllık                                                              |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Akım-<br>Gerilim<br>Trafosu | Genel gözle kontrol                                                                           | Haftalık bakımlara ek olarak termal kamera ile akım-gerilim trafolarının bağlantı noktalarında herhangi bir ısınma olup olmadığının kontrolü                     | Aylık bakımlara ek olarak pano içi temizliği ve kontrolü | 3 aylık bakımlara ek olarak genel elektriksel testler-1                                               | 6 aylık bakımlara ek olarak genel elektriksel testler-2               |
| İkaz<br>Trafosu             | Genel gözle kontrol                                                                           | Haftalık bakımlara ek olarak ikaz trafosunun buşinglerinin ve genel yüzeylerinin kontrolü ile ekipman devredeyken termal kamera ile sıcaklık değerlerinin ölçümü | Aylık bakımlara ek olarak pano içi temizliği ve kontrolü | 3 aylık bakımlara ek olarak bağlantı noktalarının kontrolü, buşinglerin ve genel yüzeylerin temizliği | 6 aylık bakımlara ek olarak elektriksel testler                       |
| Ayırıcı                     | Genel yüzeyin, kontaktların, ayırıcı panosunun ve ayırıcı motor mekanizmasının gözle kontrolü | Haftalık bakımlara ek olarak ekipman devredeyken ayırıcının kontaktlarının ve bağlantı noktalarının termal kamera ile sıcaklık ölçümü                            | Aylık bakımlara ek olarak pano içi temizliği ve kontrolü | 3 aylık bakımlara ek olarak ayırıcı motorunun ve ayırıcı kontaktlarının temizliği                     | 6 aylık bakımlara ek olarak ayırıcı ve motorunun elektriksel testleri |

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Elektrik üretim santralleri, sürdürülebilir enerji arzı olarak adlandırılan kesintisiz, güvenilir, verimli, ekonomik ve çevreye duyarlı enerji üretimini gerçekleştirmek temel amacına sahip büyük ölçekli ve sürekli üretim tesisleridir (Özcan vd., 2019b). Bu temel amaç doğrultusunda, santrallerin işletme kurallarına uygun olarak çalıştırılması ile üretim, personel, malzeme ve bakım proseslerinin eş zamanlı ve koordineli bir şekilde yönetilmesi vazgeçilmez bir zorunluluktur. Santrallerin kurulma sürecinden başlayarak işletilmesi noktasında maruz kaldıkları yüksek sıcaklık, yüksek basınç, işletme ve bakım direktiflerine uymama ve operatör hataları ve metal yorgunluğu gibi zorlayıcı koşullar altında çalıştırılması, özellikle uzun yıllar boyunca elektrik üretiminde kullanılmış santrallerde bakım süreçlerini ve etkin bir bakım yönetimini, üretimde sürdürülebilirliğin sağlanması noktasında üretim, personel ve malzemeden oluşan bu üç ana prosesten daha kritik bir noktaya taşımaktadır (Özcan vd.,2019a).

Bakım maliyetlerinin, üretim tesislerin türüne göre değişiklik gösteren üretim maliyetlerinin %15'i ile %70'ine ulaşabilmesi (Bevilacqua ve Braglia, 2000), hidroelektrik santraller gibi sürdürülebilir bir elektrik üretiminde bulunan ve ülkenin gerek ekonomik gerek sosyal yapısını doğrudan etkileyen üretim tesisleri için bakım proseslerinin belirli bir sistem dahilinde planlanmasını ve bakım uygulamalarının bu planlama çıktılarına ve işletme gereksinimleri ve kuralları çerçevesinde etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini daha da önemli kılmaktadır. Bu nedenle bakım planlaması problemi literatürde de üzerinde çokça çalışılan bir konudur. İlerleyen iki bölümde bu bakım planlamasının önemli iki aşaması olan bakım strateji seçimi ve bakım çizelgeleme çalışmalarına dair ilgili literatür sunulmuştur.

#### 3.1.Bakım Strateji Seçimi ile İlgili Çalışmalar

Her bir sistem birimi ya da ekipman için uygun bakım stratejisinin seçim problemi, sistem birimlerinin çok sayıda ve farklı işlevlere sahip olması, çok sayıda nicel ve nitel kriter barındırması, sistemi yansıtan verilerin zor elde edilmesi gibi nedenlerden dolayı çok karmaşık bir problemdir (Özcan vd.,2019a). Bu nedenle, planlamalar yapılırken



arızı, koşul tabanlı, revizyon, durum bazlı, risk tabanlı ve periyodik bakım gibi olası seçenekler arasından sistem birimleri ya da ekipmanlar için uygun bakım stratejilerine karar verilmesi gerekmektedir (Shafiee, 2015). Özellikle gereksiz, ekipman özelliklerine uygun olmayan veya zamanından önce gerçekleştirilen bakım uygulamaları nedeniyle tüm bakım bütçesinin yaklaşık üçte birinin harcanması olasılığı söz konusu olduğundan, sistem birimi ya da ekipman için bakım strateji optimizasyonu ekstra önem kazanmaktadır (Mobley, 2002). Bu nedenle literatürde bakım strateji seçimi ya da optimizasyonu için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmalar arasından Ding ve Kamaruddin (2015) ile Shafiee (2015) tarafından gerçekleştirilen literatür incelemeleriyle bakım strateji seçimi çalışmaları geniş bir perspektifte sunulmuştur. Ding ve Kamaruddin (2015), yaptıkları inceleme ile çalışmalarda kullanılan yöntemlere göre çalışmalarda farklılıkları ortaya koymuş ve inceledikleri tüm çalışmaları üç grup altında sınıflandırmıştır.

Shafiee (2015) ise, bakım strateji seçimi ya da diğer bir isimle bakım strateji optimizasyonunda çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri ile yapılan çalışmaları farklı bir çerçevede sunarak çalışmalarda kullanılan kriterlerden problem çözümünde tercih edilen yöntemlere, veri toplama tekniklerinden uygulama alanlarına kadar birçok kapsamlı sınıflandırmaya yer vermiştir. Bu iki literatür incelemesi çerçevesinde, bakım strateji optimizasyonu için literatürde gerek optimizasyon gerekse ÇKKV yöntemlerinin etkin bir şekilde kullanıldığı kanıtlanmıştır.

Bakım strateji seçimi problemi için uygulama alanı olarak, kağıt endüstrisi (Braglia vd., 2013; Kirubakaran ve Ilankumaran, 2016), petrol rafinerisi (Bertolini ve Bevilacqua, 2006), kimya endüstrisi (Panchal vd. 2017), elektrik üretim santrali (Özcan vd., 2017; Nguyen ve Chou, 2018), sağlık sektörü (Carnero ve Gómez, 2017), ulaşım (Nazeri ve Naderikia, 2017) ve haddehane (Seiti vd., 2017) gibi birçok farklı sektör seçilmişken, bu önemli probleme grafiksel yöntemler (Labib, 2004), simülasyon (Krishnasamy vd., 2005; George-Williams ve Patelli, 2017), kalite fonksiyon dağıtımı (Baidya vd., 2018), yapay zeka teknikleri (Heo vd., 2010; Shagluf vd. 2018), tam sayılı programlama (Braglia vd., 2013), karışık tam sayılı programlama (Dedopoulos ve Shah, 1995; Goel vd., 2003), hedef programlama (Bertolini ve

Bevilacqua, 2006; Özcan vd.,2017), doğrusal olmayan programlama (Löfsten, 1999), VIKOR (Vahdani vd., 2010), AHP (Seiti vd.,2017), ANP (Shahin vd., 2012), ELECTRE (Thor vd., 2013), TOPSIS (Görener, 2013) gibi analitik yöntemler ile çözümler bulunmuştur.

Bu çalışmalar arasında özellikle hibrid yöntemlerin kullanılması, çalışma etkinliğinde önemli katkılar sağlaması nedeniyle dikkat çekici olmuştur. Bertolini ve Bevilacqua (2006), AHP yöntemi ile hedef programlama yöntemlerini AHP puanlarını maksimize etmek, işgücü kullanımını ve maliyetleri en aza indirmek için kullanarak petrol rafinerisindeki santrifüj pompalar için en uygun bakım stratejisini belirlerken, Braglia vd. (2013), bir kağıt endüstrisindeki bakım strateji seçimi için hata modu ve kritik etkileri analizi ve TP yöntemlerini kullanmıştır. Çalışmadaki amaç her bir stratejinin maliyetlerinin azaltılmasını göz önünde bulundurarak, her bir arıza için hangi bakım uygulamasının uygun olduğunu belirleyerek, parasal kaynakların optimal olarak tahsis edilmesine olanak sağlamaktır.

Sankpal vd. (2015) ise TP ile hata modu ve etkileri analizi yöntemlerini kullanmış, güvenilirlik bazlı bakım stratejisi seçimi için her bir arıza çeşidinin risk öncelik numarasını belirlemek ve bu sonuçları TP ile entegre etmek amacıyla çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Emovon vd. (2018) ise Delphi-AHP ve Delphi-AHP-PROMETHEE kombinasyonlarından oluşan iki hibrid model ile gemi makine sistemi için uygun bakım stratejisini seçmiştir.

Bu çalışmada kullanılan yöntemlerden olan AHP ve TOPSIS kombinasyonunu kullanarak Shyjith vd. (2008) ile Ilangkumaran ve Kumanan (2009) bakım stratejisi seçimini tekstil endüstrisinde gerçekleştirmiş, Ioannis ve Nikitas (2013) ise, gemiler için bakım strateji seçimini ele almak amacıyla bu yöntem kombinasyonunu tercih etmiştir. Özcan vd. (2017), AHP-TOPSIS kombinasyonuna hedef programlamayı (HP) da dahil edip bu problemi ilk kez hidroelektrik santrallarda çözmüştür. Bu çalışma literatürde yine ilk defa, optimize edilen bakım stratejileri baz alınarak gerçekleştirilen bakım planlarının santral üzerindeki etkisini çeşitli performans parametreleri ile vererek literatürde uygulama sonuçlarının bakım yapılan sistem

birimi yahut ekipmanı üzerindeki etkisini sunmuş, bu bağlamda literatürde uygulama sonuçlarının verilmemesinden kaynaklı eksikliği tamamlamıştır.

Literatürdeki çalışmalarda dikkat çekici bir başka nokta ise, problemin uygulandığı sistem birimi, makine veya ekipman sayısı ile bunların farklılık ya da benzerlikleri ile ilgilidir. Çoğu çalışmada, problem ya üretim tesisinin küçük bir bölümü, sistemi oluşturan alt bir birim ya da az sayıda ekipman türü ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Örneğin Bertolini ve Bevilacqua (2006), petrol rafinerisindeki çalışmalarında sadece aynı karakteristik özelliklere sahip olan santrifüj pompalar için bu problemi ele alırken, Braglia vd. (2013) ile Sankpal vd. (2015), çalışmalarını gerçekleştirdikleri kağıt işletmesindeki iki ekipman için oluşan arıza türlerini, Kirubakaran ve Ilangkumaran (2016) ise yine aynı alanda imalat gerçekleştiren bir tesiste pompalar için uygulama yapmışlardır. Bunun yanı sıra, Seiti vd. (2017), bir haddehanedeki tek ekipman için, Panchal vd. (2017) ise gübre üretim tesisinin bir birimi için bu problemi ele almış ve çözmüştür.

Bu tez çalışmasının ilk üç adımında ise hidroelektrik santralda bulunan 1.330 elektriksel ekipman içerisinde kritik olan ekipman grupları AHP-TOPSIS yöntemleri ile bulunmuş ve belirlenen 7 kritik ana ekipman grubu için bir TP modeli ile bakım strateji seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, bakım strateji seçimi problemi için incelenen literatürden elde edilen bilgiler ışığında gerek kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin etkinlikleri gerek dikkate alınan ekipman sayıları gerek problemin uygulama sahası ve gerekse uygulama sonuçları temel alındığında bu çalışma literatüre önemli ölçüde katkı sağlar niteliktedir. Bu çalışmada;

- Bakım strateji seçimi probleminin çözümü için literatürde AHP-TOPSIS-TP yöntemlerinden oluşan kombinasyon ilk kez kullanılmıştır.
- Problem kapsamı, literatürdeki mevcut çalışmalarda yer aldığı gibi bir sistemin alt bir birimi, üretim tesisinin küçük bir bölümü ya da az sayıda ekipman türü ile gerçekleştirilmesi yerine, binlerce ekipmandan oluşan ve tamamı için bakım yapılması yüksek seviyeli maliyetler oluşturması açısından mümkün olmayan bir üretim tesisinde (Özcan vd.,2017), santraldaki en problemli ekipman grubu olan

elektriksel ekipmanlardan ünite duruşuna neden olan, ayrıca kritiklik seviyesi en yüksek olan 7 ekipman grubu (ayırıcı, ikaz trafosu, kesici, gerilim trafosu, ana güç trafosu, akım trafosu ve generator) için genişletilerek sistemsal bir yaklaşım izlenmiştir.

- Ayrıca literatürdeki çalışmaların uygulama alanlarından farklı olarak çalışılan yöntem kombinasyonu ile bir hidroelektrik santral için ilk kez gerçekleştirilmiş ve tezin beşinci bölümü olan uygulama bölümünde de açıklandığı üzere çalışma neticesinde elde edilen sonuçların santrale katkısı gerek santral işletme kuralları çerçevesinde gerekse gerçek hayatla tutarlı olması yönüyle etkinliğini kanıtlar niteliktedir.

### **3.2.Bakım Çizelgeleme İle İlgili Çalışmalar**

Bu tez çalışmasının dördüncü ve beşinci adımlarında, YSA ve TP yöntem kombinasyonu ile periyodik bakım çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Bu adımlardan dördüncü adımda santralin bir yıllık üretim tahmini YSA yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

YSA yöntemi literatürde sınıflandırma (Liao ve Wen, 2007), teşhis etme (Al-Shayea, 2011), çizelgeleme (Yuce vd., 2016) ve tahminleme (Voyant vd., 2017; Notton vd., 2019) gibi problem türlerinde ulaşım (Dougherty,1995), sağlık (Shankaracharya vd., 2010) ve finans (Wong ve Selvi,1998) gibi çeşitli uygulama sahalarında kullanılmıştır. YSA yönteminin literatürde doğrusal olmayan problemlerde üstünlüğünü kanıtlaması ve problem parametreleri arasında işlevsel bir ilişki kurabilmesi (White, 1989; Ripley, 1993; Cheng ve Titterington, 1994) bu çalışmada olduğu gibi kompleks problem yapısına sahip enerji sektöründeki çoğu çalışmada da (Kalogirou, 2001; Amasyali ve El-Gohary, 2018; Muralitharan ve Sakthivel, 2018) kullanılma nedeni olmuştur. Özellikle elektrik talep tahminine (Suganthi ve Samuel, 2012), elektrik fiyatına (Weron, 2014) ve enerji kullanımına (Wang ve Srinivasan, 2017) dair gerçekleştirilen literatür incelemeleri de YSA' nın enerji alanındaki tahmin çalışmalarında sıklıkla yer aldığını kanıtlar niteliktedir. Enerji sektöründe santral üretim tahmini için de kullanılan

YSA yöntemi Gandelli vd. (2014), Li vd. (2016) ve Dolara vd. (2015)' nin gerçekleştirmiş olduğu çalışmalarda da etkinliğini kanıtlamıştır. Bu çalışmalarda PV santralleri için hibrid yöntemler önerilirken çalışma sonuçları çeşitli hata formülleri kullanılarak analiz edilmiş, saatlik ya da birkaç günlük, kısa süreli üretim tahmini yapılmıştır.

Yapılan bu tez çalışmasının dördüncü adımında ise bir hidroelektrik santral için 52 haftalık üretim tahmini gerçekleştirilerek gerçek santral işletmeciliğinde kolaylıkla ve etkin bir şekilde uygulanabilecek uzun vadeli bir tahmin modeli önerilmiştir.

Dördüncü adımda üretim tahmini çalışması tamamlandıktan sonra bakım çizelgeleme modelinin kurulduğu beşinci adıma geçilmiştir. Bu adımda özellikle enerji sektöründeki bakım çizelgeleme çalışmalarına dair literatür incelenmiştir. Generator maintenance scheduling (GMS) ve Transportation/Transmission maintenance scheduling (TMS) adıyla literatürde yer alan bu problemlere dair günümüze kadar geniş kapsamlı üç literatür incelemesi bulunmaktadır. Bunlardan ilki Yamayee (1982) tarafından gerçekleştirilmiş olup bu problem için kullanılan yöntemler optimal ve sezgisel, deterministik ve stokastik olarak sınıflandırılmış ayrıca çalışmalarda yer verilen kısıtlar da sunulmuştur. Yamayee (1982) yaptığı bu inceleme sonucunda bakım çizelgeleme probleminin stokastik bir yapıda olduğunu ancak sistemin kolay bir şekilde ele alınması ve çalışmaların uygulanabilirliğinin sağlanması açısından deterministik modellerin literatürde öne çıktığına vurgu yapmıştır. Ayrıca bakım türlerine dair ayrıntılı bilgilere de bu incelemede yer vermiştir.

Literatürde bu çalışmanın yanı sıra bir diğer incelemeyi ise Khalid ve Ioannis (2012) gerçekleştirmiş olup bu problem için kullanılan optimal ve sezgisel yöntemleri kıyaslamalarla sunmuşlardır. Khalid ve Ioannis (2012) yaptıkları bu inceleme sonucunda bakım çizelgeleme probleminde sezgisel yöntemlerin kullanılmasıyla optimal sonuçlar alınmadığına vurgu yapmış ve optimal yöntemlerin daha etkin olduğunu vurgulamış, optimal yöntemlerden özellikle karışık tam sayılı programlama ve Benders ayrıştırması yöntemlerinin öne çıktığı sonucunu paylaşmıştır. Ancak bununla birlikte bakım çizelgeleme probleminin NP-hard yapısından kaynaklı olarak optimal yöntemlerin de bazen yetersiz kaldığını belirtmiştir.

Elektrik endüstrisindeki bakım çizelgeleme problemine dair en güncel inceleme ise Froger vd. (2016) gerçekleştirmişlerdir. İncelemelerinde özellikle elektrik piyasasındaki serbestleşmenin elektrik sektöründeki bakım çizelgeleme çalışmaları üzerinde farklılık oluşturduğunu, bu farklılığın, bakıma dair çalışmalardan üretim ve iletimden sorumlu sistem birimlerine (ISO) ait olması ile oluştuğunu kapsamlı bir sınıflandırma ile belirtmişlerdir. Bu sınıflandırmanın yanı sıra çalışmalarda kullanılan yöntemlere dair bir sınıflandırma ile de çalışmaları ayrıntılı bir şekilde sunmuşlardır.

Literatürde bakım çizelgeleme çalışmaları optimal ve sezgisel bazlı farklı yöntemler içeren, farklı amaçlar ve kısıtlarla çalıştırılan modellerden oluşmaktadır. Matematiksel programlama yöntemlerinden dinamik programlama (Huang, 1997), kısıt programlama (Frost ve Dechter,1998), doğrusal programlama (Chattopadhyay,1998; Aghinolfi vd., 2011; Lindner vd.,2018), tam sayılı programlama (Dopazo ve Merrill,1975; Al-Khamis vd.,1991; Dahal vd.,1999; Dahal ve Chakpitak,2007; Fetanat ve Shafipour, 2011; Jost ve Savourey,2013) ve karışık tam sayılı programlama (Fourcade vd., 1997; Canto,2008; Mollahassani-Pour vd., 2014; Wang ve Wang, 2017; Eygelaar vd., 2018; Mazidi vd., 2018; Behnia ve Akhbari, 2019) modellerinin kullanıldığı bu yöntemlerle birlikte ayrıştırma tekniklerinin de (Lv vd., 2015) kullanıldığı görülmüştür. Sezgisel yöntemlerden öğretme ve öğrenme temelli optimizasyon (Abirami vd., 2014), genetik algoritma (Baskar vd., 2003; Yare ve Venayagamoorthy, 2010; Reihani vd.,2012; Zhu vd., 2017a, 2017b; Zhong vd.,2018), tabu arama (El-Amin vd.,2000), tavlama benzetimi (Lindner vd., 2018), karınca kolonisi optimizasyonu (Foong vd., 2008), parçacık sürü optimizasyonu (Suresh ve Kumarappan, 2013) ve yerel arama (Burke vd., 2000; Gardi ve Nouioua,2011) gibi yöntemler kullanılarak da çalışmalar ele alınmıştır. Ayrıca bu yöntemler haricinde oyun teorisi (Min vd., 2013; Mazidi vd., 2018) ve bulanık mantığın (El-Sharkh vd., 2003) kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur.

Ayrıca çalışmalarda çeşitli santral türleri için farklı zaman aralıklarını kapsayacak modeller önerilmiştir. Bakım çizelgeleme problemi için bazı çalışmalarda termik (Burke vd., 2000; Bisanovic vd. 2011; Kralj ve Petrovic, 1995), rüzgar (Kovacs vd.,2011; Froger vd., 2017; Wang ve Wang, 2017, Mazidi vd., 2017; Zhong vd.,2018;

Lei ve Sandborn, 2018; Bangalore ve Patriksson, 2018), nükleer (Fourcade vd., 1997; Khemmoudj vd., 2006; Gorge vd., 2012; Jost ve Savourey, 2013) ve hidroelektrik (Foong vd., 2008; Helseth vd., 2018; Rodriguez vd., 2018) santrallardan sadece birisi için öneride bulunulurken bazı çalışmalarda da birden fazla türde santral için geçerli olabilecek (Chattopadhyay, 1998; Canto, 2008; Ge vd., 2018; Lindner vd., 2018) modeller önerilmiştir. Önerilen modellerde genellikle maliyet minimizasyonu (Kralj ve Petrovic, 1995; Fourcade vd., 1997; Chattopadhyay, 1998; Burke ve Smith, 2000; Khemmoudj vd., 2006; Canto, 2008; Foong vd., 2008; Kovacs vd., 2011; Gorge vd., 2012; Jost ve Savourey, 2013; Mazidi vd., 2017; Bangalore ve Patriksson, 2018; Lindner vd., 2018; Zhong vd., 2018) başta olmak üzere maksimum güvenilirlik (Kralj ve Petrovic, 1995; Foong vd., 2008; Wang ve Wang, 2017; Zhong vd., 2018) ya da kar (Chattopadhyay, 2004a; Bisanovic vd., 2011) hedeflenmiştir. Önerilen modellerdeki çizelge zaman aralığı ise bir aydan dört yıla kadar (Barot ve Bhattacharya, 2008; Canto, 2008; Bisanovic vd., 2011; Mazidi vd., 2017, 2018; Eygelaar vd., 2018; Naebi Toutounchi vd., 2018; Lindner vd., 2018; Zhong vd., 2018; Behnia ve Akhbari, 2019) haftalık veya aylık periyotlar halinde yapılmıştır. Zaman aralıklarından özellikle 52 hafta için gerçekleştirilen çalışmaların (Dahal ve Chakpitak, 2007; Bisanovic vd., 2011; Eygelaar vd., 2018; Naebi Toutounchi vd., 2018; Mazidi vd., 2018; Lindner vd., 2018; Zhong vd., 2018) çoğunlukta olması da dikkat çekmektedir.

Literatürde bakım çizelgeleme çalışmalarına dair daha ayrıntılı sınıflandırmalar Çizelge 3. 1 ve Çizelge 3. 2' de sunulmuştur. Bu sınıflandırmalar yapılırken Froger vd. (2016)'nin gerçekleştirmiş olduğu incelemedeki başlıklar kullanılmıştır. Enerji sektöründeki bakım çizelgeleme literatüründe yer alan çalışmalar genel olarak üç amaç için gerçekleştirilmiştir. Bunlar güvenilirlik, kar ve maliyet üzerinedir. Çalışmalarda en çok maliyet üzerinde yoğunlaşılırken, güvenilirlik amacı ise maliyetten sonra en çok çalışılan amaçtır. Çalışmaların amaçlarına göre sınıflandırması ise Çizelge 3. 1.' de yer almaktadır.

### Çizelge 3.1. Amaçlarına göre bakım çizelgeleme çalışmaları

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Güvenilirlik | Kralj ve Petrovic, (1995); Huang, (1997); Dahal vd.,(1999); Moro ve Ramos, (1999); El-Amin vd., (2000); Wang ve Handschin, (2000); Billinton ve Abdulwhab, (2003); Mohanta vd.,(2004); Conejo vd.,(2005); Eshraghnia vd., (2006); Dahal ve Chakpitak, (2007); Foong vd., (2008); Fu vd., (2007); Mohanta vd., (2007); Volkanovski ve Mavko, (2008); Feng vd., (2009); Geetha ve Swarup, (2009); Yare ve Venayagamoorthy, (2010); Fetanat ve Shafipour, (2011); Han vd., (2011); Ekpenyong vd., (2012); Reihani vd., (2012); Canto ve Rubio-Romero, (2013); Elyas vd., (2013); Min vd., (2013); Schlünz ve van Vuuren, (2013); Suresh ve Kumarappan, (2013); Zhan vd., (2014); Wang ve Wang, (2017); Eygelaar vd., (2018); Umamaheswari vd., (2018); Zhong vd., (2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Maliyet      | Satoh ve Nara, (1991); Al-Khamis vd., (1992); Yellen vd., (1992); Charest ve Ferland, (1993); Kralj ve Petrovic, (1995); Silva ve Morozowski, (1995); Fourcade vd., (1997); Huang, (1997); Langdon ve Treleaven, (1997); Chattopadhyay, (1998); Frost ve Dechter, (1998); Marwali ve Shahidehpour, (1998,1999a,1999b, ,1999c, 2000); Moro ve Ramos, (1999); Burke ve Smith, (2000); El-Amin vd., (2000); Da Silva vd., (2000); Digalakis ve Margaritis, (2002); Baskar vd., (2003); El-Sharkh vd., (2003); Khemmoudj vd., (2006); Leou, (2006); Fu vd., (2007); Barot ve Bhattacharya, (2008); Canto, (2008); Mytakidis ve Vlachos, (2008); Gardi ve Nouioua, (2011); Kovacs vd., (2011); Saraiva vd., (2011); Anghinolfi vd., (2012); Badri ve Niazi, (2012); Buljubasic ve Gavranovic, (2012); Ekpenyong vd., (2012); Gorge vd., (2012); Lv vd., (2015); Brandt vd., (2013); Godskesen vd., (2013); Jost ve Savourey, (2013); Lusby vd., (2013); Rozenknop vd., (2013); Abirami vd., (2014); El-Sharkh, (2014); Fattahi vd., (2014); Mollahassani-pour vd., (2014); Samuel ve Rajan, (2015); Balaji vd., (2016); Mazidi vd., (2017,2018); Bangalore ve Patriksson, (2018); Ge vd., (2018); Lindner vd., (2018); Umamaheswari vd., (2018); Zhong vd., (2018);Behnia ve Akhbari, (2019). |
| Kar          | Marwali ve Shahidehpour, (1999c); Chattopadhyay, (2004a, 2004b); Conejo vd., (2005); Kim vd., (2005); Eshraghnia vd., (2006); Barot ve Bhattacharya, (2008); Wu vd., (2008); Feng vd., (2009); Geetha ve Swarup, (2009); Bisanovic vd., (2011); Elyas vd., (2013); Min vd., (2013); Zhan vd., (2014); Bozorgi vd., (2016); Froger vd., (2018); Helseth vd., (2018); Mazidi vd., (2018); Naebi Toutounchi vd., (2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

Ayrıca enerji sektöründe gerçekleştirilen bakım çizelgeleme çalışmaları ana olarak GMS ve TMS başlıkları ile yer almış ve bazı çalışmalarda bu iki konu aynı anda incelenirken bazı çalışmalarda ise GMS problemi içerisinde TMS kısıtlarına yer verilmiştir. Çalışmaların ayrıntılı sınıflandırması ise Çizelge 3. 2. 'de yer almaktadır.



### Çizelge 3.2. Uygulama birimine göre bakım çizelgeleme çalışmaları

|                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GMS                        | Satoh ve Nara, (1991); Al-Khamis vd., (1992); Yellen vd., (1992); Charest ve Ferland, (1993); Kralj ve Petrovic, (1995); Fourcade vd., (1997); Huang, (1997); Frost ve Dechter, (1998); Marwali ve Shahidehpour, (1998); Dahal vd., (1999); Marwali ve Shahidehpour, (1999b); Moro ve Ramos, (1999); Burke ve Smith, (2000); El-Amin vd., (2000); Wang ve Handschin, (2000); Digalakis ve Margaritis, (2002); Baskar vd., (2003); Billinton ve Abdulwhab, (2003); Chattopadhyay, (2004a, 2004b); Mohanta vd., (2004); Kim vd., (2005); Eshraghnia vd., (2006); Khemmoudj vd., (2006); Dahal ve Chakpitak, (2007); Fu vd., (2007); Mohanta vd., (2007); Canto, (2008); Foong vd., (2008); Mytakidis ve Vlachos, (2008); Volkanovski ve Mavko, (2008); Feng vd., (2009); Geetha ve Swarup, (2009); Yare ve Venayagamoorthy, (2010); Bisanovic vd., (2011); Fetanat ve Shafipour, (2011,2018); Gardi ve Nouioua, (2011); Han vd., (2011); Kovacs vd., (2011); Saraiva vd., (2011); Anghinolfi vd., (2012); Buljubasic ve Gavranovic, (2012); Ekpenyong vd., (2012); Gorge vd., (2012); Reihani vd., (2012); Brandt vd., (2013); Canto ve Rubio-Romero, (2013); Elyas vd., (2013); Godsken vd., (2013); Jost ve Savourey, (2013); Lusby vd., (2013); Rozenknop vd., (2013); Schlünz ve van Vuuren, (2013); Suresh ve Kumarappan, (2013); Abirami vd., (2014); El-Sharkh, (2014); Fattahi vd., (2014); Mollahassani-pour vd., (2014); Zhan vd., (2014); Samuel ve Rajan, (2015); Balaji vd., (2016); Yildirim vd., (2016); Zhu vd., (2017a,2017b); Eygelaar vd., (2018); Ge vd., (2018); Lindner vd., (2018); Rodriguez vd., (2018); Umamaheswari vd., (2018); Behnia ve Akhbari, (2019); |
| TMS                        | Langdon ve Treleaven, (1997); Marwali ve Shahidehpour, (1998, 2000); Fu vd., (2007); Geetha ve Swarup, (2009); Lv vd., (2015); Min vd., (2013); Abirami vd., (2014); Zhu vd., (2017a, 2017b); Wang ve Wang, (2017); Fetanat ve Shafipour, (2018); Behnia ve Akhbari, (2019).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| GMS<br>(İletim<br>kısıtlı) | Silva ve Morozowski, (1995); Chattopadhyay, (1998); Marwali ve Shahidehpour, (1999a,1999c); Da Silva vd., (2000); El-Sharkh vd., (2003); Leou, (2006); Barot ve Bhattacharya, (2008); Wu vd., (2008); Badri ve Niazi, (2012); Mazidi vd., (2017,2018); Naebi Toutounchi vd., (2018).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

Literatürdeki çalışmalarda dikkat çekici bir başka nokta ise, problemin dahil edildiği santral birimi ve kapsamı ile ilgilidir. Çoğu çalışmada, incelenen sistem alt birimi veya ekipman türü ya santral üniteleri ya da iletim hatlarından oluşmaktadır. Genellikle birçok santralin bulunduğu bir enerji sistemi incelenerek hangi santralin hangi ünitesinin ya da iletim hattının ne zaman bakıma alınması gerektiği cevabı önceden de bahsedilen amaçlar baz alınarak incelenmiştir. Kısacası enerji sektöründeki bakım çizelgeleme problemlerine dair gerçekleştirilen çalışmalarda bakıma tabi birimler

olarak sadece üniteler incelenip hangi santralin hangi ünitesinin ne zaman bakıma alınacağı sorusuna cevap aranmıştır (Yamayee,1982; Khalid ve Ioannis, 2012; Froger vd., 2016).

Bu bağlamda her bir santralin temel yapı taşı olan ekipmanların hangi öncelikle ne zaman bakıma alınmaları gerektiği problemi literatürde incelenen bir konu olmamıştır. Bu nedenle önerilen modellerin, gerçek bir santraldaki bakım çalışmalarının başlatılması noktasında uyumluluğu ve etkinliği düşük olmuştur. Çünkü sürekli üretim tesisi olan santrallarda hangi ünitenin hangi ekipmanının ne zaman bakıma alınması gerektiği sorununun cevabı da aranmaktadır. Bu bağlamda bir hidroelektrik santraldaki kritik ana ekipman grupları için yapılan bu çalışmanın literatüre bu yönden katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Önceki paragraflarda özetlenen çalışmalar ışığında bu çalışmanın literatürden farklılıkları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Elektrik üretim santrallarında birden fazla elektriksel ekipman grubunun değerlendirilmesi ve her ekipman grubunun spesifik bakım özellikleri dikkate alınarak periyodik bakım çizelgelerinin oluşturulması,
- Enerji alanında yapılan bakım çizelgeleme çalışmalarından farklı olarak santral işletme kuralları çerçevesinde haftalık, aylık, üç ayda bir, altı ayda bir ve yılda bir uygulanan beş ayrı periyodik bakım türü ile kritik ana ekipman gruplarının periyodik bakım çizelgelemesi problemi ele alınması,
- Bakım çizelgeleme probleminde 2010-2018 yıllarına ait 9 yıllık gerçek santral verilerinin kullanılarak santral için bir yıllık üretim tahmininin gerçekleştirilmesi ve planlama yılı için santral çalışma ve bakım saatlerinin hesaplanması,
- YSA ile elde edilen sürelerden çalışma ve bakım sürelerinin hesaplanması, bakım yapılabilir sürelerin TP modeline dahil edilerek YSA ve TP yöntemlerinin kombine edilmesi ile literatürde ilk olma özelliği taşımaktadır.

Ayrıca Türkiye’deki bir hidroelektrik santraldan alınan gerçek veriler ile çalışmanın gerçek hayat uygulaması ise literatürdeki çoğu çalışmada gerçekleştirilmeyen bir özellik olarak öne çıkmaktadır.



#### 4. KULLANILAN YÖNTEMLER

Bu tez çalışmasının ilk üç adımında bakım strateji seçimi problemi ele alınmış olup problem çözümünde AHP-TOPSIS-TP, dördüncü ve beşinci adımında ise bakım çizelgeleme için YSA-TP yöntemlerinden oluşan kombinasyonlar kullanılmıştır. Bu bölümde problem çözümünde kullanılan yöntemlerin teorik bilgisine yer verilmiştir.

##### 4.1.AHP Yöntemi

AHP yöntemi, ana olarak hiyerarşik yapının kurulması, öncelik ve tutarlık analizinin yapılması üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle karar vericilerin kompleks ve çok kriterli problem yapısını olası her özelliği baz alarak problem bileşenlerini hiyerarşik seviyelere ayrılması gerekmektedir (Ho, 2008).

Saaty tarafından geliştirilen bu yöntem birçok karar verme probleminde ana ya da destekleyici yöntem olarak kullanılmaktadır. Literatürdeki popülaritesi her geçen gün artış göstermekte ve karar vericilere, problemde kriter ve alternatifler arasındaki öncelikleri kalitatif ve kantitatif değerlendirmeleri birlikte ele alarak belirleme imkânı sunmaktadır (Velasquez ve Hester, 2013).

Bu çalışmada ise AHP yöntemi, açıklanan bu özelliklerinin yanı sıra kişisel değerlendirmelerin azaltılması ve farklı alternatiflerin çeşitli kriterler baz alınarak karşılaştırılmasında yaygın bir şekilde kullanılması ayrıca diğer analitik yöntemlerle entegrasyon esnekliğine sahip olup etkin sonuçlar sağlaması (Vaidya ve Kumar, 2006; Wang vd., 2009; Kubler vd., 2016) ve ağırlıklandırma hesaplamalarındaki uygulama kolaylığı (Kumar vd., 2017) nedeniyle 1.330 ekipman için santral uzmanları ile belirlenen kriter ağırlıklarının hesaplanması amacıyla tercih edilmiştir. Yöntemin genel olarak uygulama adımları ise şu şekildedir (Saaty, 1980; Özcan vd., 2019a):

*Adım 1. Amaç, kriterler, alt kriterler, alternatifler ve hiyerarşik yapının belirlenmesi:*

Bu adımda öncelikle probleme etki eden kriter ve alternatifler belirlenmektedir. Sonrasında başta amaç olmak üzere sırasıyla kriter ve alternatiflerin olduğu hiyerarşik yapının kurulması gerekmektedir.

*Adım 2. Kriterlerin birbirleri arasındaki ve her bir kriter için alternatifler arasındaki ikili karşılaştırmaların yapılması:*

Bu aşamada, Saaty tarafından geliştirilen ve Çizelge 4. 1.' de (Saaty, 1980) verilen 1-9 önem skalası kullanılarak ikili matrislerin oluşturulduğu adımdır.

**Çizelge 4.1.** Saaty önem skalası

| Önem Değerleri | Değer Tanımları          |
|----------------|--------------------------|
| 1              | Eşit derecede önemli     |
| 3              | Kısmen daha önemli       |
| 5              | Çok daha önemli          |
| 7              | Aşırı derece daha önemli |
| 9              | Kesinlikle daha önemli   |
| 2,4,6,8        | Ara değerler             |

*Adım 3. Normalizasyon ve göreceli önem ağırlıklarının hesaplanması:*

Bu adımda Eş. 4.1 ile kullanılan her bir kriterin eşit değerlendirilmesi için normalizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemden sonra Eş. 4.2 kullanılarak her bir kriterin ağırlığı hesaplanmaktadır.

$$b_{ij} = a_{ij} / (\sum_{i=1}^n a_{ij}) \quad (4.1)$$

$$w_i = \sum_{i=1}^n b_{ij} / n \quad (4.2)$$

*Adım 4. Tutarlılık oranının (CR) hesaplanması ve kontrolü:*

CR değerinin hesaplanabilmesi için öncelikle Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 kullanılarak ikili karşılaştırma matrisinin en büyük öz vektör ( $\lambda_{max}$ ) değeri hesaplanmalıdır.

$$[a_{ij}]_{n \times m} * [w_i]_{m \times 1} = [d_i]_{n \times 1} \quad (4.3)$$

$$\lambda_{max} = \left( \sum_{i=1}^n d_i / w_i \right) / n \quad (4.4)$$

CR değeri, Eş. 4.5'teki hesaplama ile bulunan tutarlılık indeksinin (CI) Çizelge 4. 2.'de verilen rassal indekse (RI) oranlanması sonucunda (Eş. 4.6) hesaplanmaktadır.

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (4.5)$$

$$CR = CI / RI \quad (4.6)$$

**Çizelge 4.2.** RI değerleri

| n  | 1 | 2 | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13 |
|----|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| RI | 0 | 0 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,41 | 1,45 | 1,49 | 1,51 | 1,48 | 1,56 | 0  |

Eğer CR değeri 0,1'den küçük ise ikili karşılaştırma matrisi tutarlı demektir. Aksi halde, ikili karşılaştırmaların tekrar gözden geçirilmesi gerekli olurken matrislerin yenilenerek yöntem adımlarındaki hesaplamaların tekrar yapılması gerekmektedir.

*Adım 5. AHP skorlarının analizi:*

En son elde edilen sonuçta yüksek değere sahip alternatif en iyi alternatif olarak seçilmektedir.

#### 4.2.TOPSIS Yöntemi

TOPSIS, Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen bir ÇKKV yöntemi olup, gerçek hayattaki karar verme problemlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu tez çalışmasında hidroelektrik santraldaki 1.330 elektriksel ekipmanın santral açısından kritiklik seviyesini gösteren öncelik sıralamasını belirlemek için kullanılan bu yöntem, literatürde sıklıkla geniş bir uygulama alanında sıralama problemleri için kullanılması (Behzadian vd., 2012) probleme ait niteliksel bilgilerin tam olarak yansıtılabilmesi, alternatif sıralamasının kolay ve etkin bir şekilde gerçekleştirmesi ve problemin karmaşık yapısının gerçeğe uygun bir şekilde yansıtılabilmesi (Hwang ve Yoon, 1981; Zyoud ve Fuchs-Hanusch, 2017) nedeniyle tercih edilmiştir (Özcan vd., 2019a). Yöntemin genel olarak uygulama adımları ise şu şekildedir (Hwang ve Yoon, 1981; Özcan vd., 2019a):

##### *Adım 1. Karar matrisinin ( $A_{ij}$ ) oluşturulması:*

Bu adımda öncelikle başlangıç matrisi olan  $A_{ij}$  matrisi oluşturulmaktadır. Sıralamada yer alacak alternatiflere satırlarda, probleme etki eden kriterler ise sütunlarda yer alacak şekilde oluşturulan  $A_{ij}$  matrisi aşağıdaki gibi gösterilmektedir ve matris yapısında yer alan m alternatifleri, n ise kriterleri ifade etmektedir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

##### *Adım 2. Standart karar matrisinin ( $R_{ij}$ ) oluşturulması:*

Bu adımda ise ilk adımda oluşturulan karar matrisi ( $A_{ij}$ ) Eş. 4.7' deki formülün uygulanması ile standart karar matrisine dönüştürülmektedir.

$$r_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2} \quad (4.7)$$

*Adım 3. Ağırlıklı standart karar matrisinin ( $V_{ij}$ ) oluşturulması:*

Ağırlıklı standart matrisin ( $V_{ij}$ ) oluşturulduğu bu aşamada öncelikle kriterlerin değerlendirilmesinde kullanılan ağırlık değerleri ( $w_i$ ) belirlenmektedir. Ağırlık değerleri belirlendikten sonra standart karar matrisindeki ilgili kriterin değeri ile bu ağırlıklar çarpılarak ağırlıklı standart matrisi olan  $V_{ij}$  oluşturulmaktadır ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

*Adım 4. İdeal ( $A^*$ ) ve negatif ideal ( $A^-$ ) çözümlerin oluşturulması:*

Elde edilen ağırlıklı standart karar matrisinden sonra bu değerlerden Eş. 4.8 ve Eş. 4.9 kullanılarak kriterlerin monoton artan ve azalan eğilim gösterdiği varsayımı ile minimum ve maksimum olanlar belirlenmektedir.

$$A^* = \{((\max V_{ij}) | j \in J), (\min V_{ij} | j \in J')\} \quad (4.8)$$

$$A^- = \{((\min V_{ij}) | j \in J), (\max V_{ij} | j \in J')\} \quad (4.9)$$

*Adım 5. Ayrım ölçütlerinin ( $S^*$ ,  $S^-$ ) hesaplanması:*

Ayrım ölçütlerinin ( $S^*$ ,  $S^-$ ) hesaplandığı bu adımda ise matristeki her bir alternatifteki kriter değerlerinin ideal ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları Eş. 4.10 ve Eş. 4.11 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (4.10)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (4.11)$$



*Adım 6. İdeal çözüme göreli yakınlığın ( $C_i^*$ ) hesaplanması:*

İdeal çözüme göreli yakınlığın ( $C_i^*$ ) hesaplanması için ise Eş. 4.12’ de yer alan formül kullanılarak hesaplama yapılmaktadır.

$$C_i^* = \frac{s_i^-}{s_i^- + s_i^+} \quad (4.12)$$

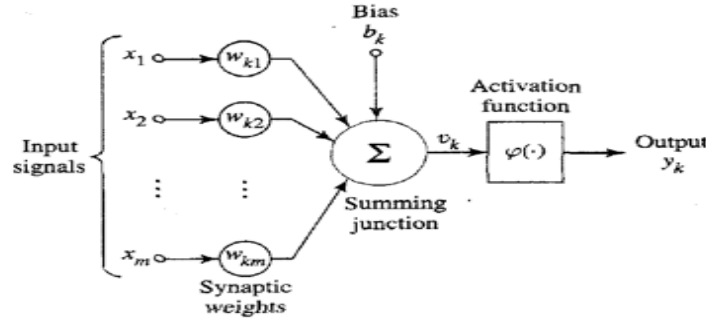
$C_i^*$  değeri 0 ve 1 aralığında değer almaktadır.  $C_i^*$  değerinin 1 olması karar noktasının ideal çözüme, 0 olması ise, negatif ideal çözüme mutlak yakınlığını ifade etmektedir (Arıbaş ve Özcan, 2016; Özcan vd., 2019a).

#### **4.3.Yapay Sinir Ağı Yöntemi**

İnsan beyninin düşünme mekanizmasını taklit eden, probleme ait girdi verilerinden anlamlı çıktılar oluşturmak için kullanılan bir yöntem olan YSA, deneyime dayalı bilgiyi depolamaya ve bu bilgiyi kullanıma sunmaya yönelik doğal bir eğilim içinde olan bir işlemcidir. YSA iki açıdan insan beynine benzemektedir: bilgi ağ tarafından bir öğrenme süreci vasıtasıyla elde edilmektedir ve sinir hücreleri arasında snaptik ağırlık olarak adlandırılan bağlar bilgiyi depolamak için kullanılmaktadır (Haykin, 1994).

Bu yöntemin ortaya çıkışı McCulloch ve Pitts (1943)’in küçük bir elektrik devresiyle ilgili yaptıkları çalışma ile başlamış ve zaman içerisinde önemli dönüm noktaları ile gelişim göstermiştir. 1949 yılında Hebb’in “The Organization of Behavior” isimli kitabında öğrenme ile ilgili temel teori tanıtılmış ve Rosenblatt (1958)’in perceptron algılayıcısına dair çalışması ile YSA için önemli bir gelişme yaşanmıştır. XOR probleminin çözümünde YSA yönteminin bu problem gibi doğrusal problem türlerinin çözümünde kullanılamaması ise YSA yöntemiyle ilgili çalışmaların azalması sonucunu doğurmuştur. Sonraki süreçte Rumelhart vd. (1986)’ın çalışmalarıyla çok katmanlı sinir ağları için temel oluşturmaları ise YSA yöntemine rağbeti artıran yine önemli dönüm noktalarından biri olmuştur (Haykin, 1994,2009).

Basit bir YSA yapısı girdi, ara ve çıktı katmanlarından oluşmaktadır. Girdiler probleme ait etkili parametrelerden oluşurken, ara katmanlar problem yapısına göre sayısı değişen ve içinde farklı sayıda nöron içerebilen yapıdır. Çıktı katmanı ise problem sonucu bulunmak istenen parametrelerden oluşmaktadır. Basit bir YSA ağ yapısına Şekil 4.1’de (Haykin, 1994) yer verilmiştir.



**Şekil 4.1.** Basit bir yapay sinir ağı yapısı

Problem yapısı ve büyüklüğüne bağlı olarak kurulacak YSA mimarisi gerek ağ türü gerek kullanılacak aktivasyon fonksiyonu gerekse katman sayısı gibi birçok parametre ile değişiklik göstermektedir.

Son zamanlarda tahmin çalışmalarının YSA üzerinde yoğunlaşması (Sharda, 1994; Zhang vd., 1998) ve etkin sonuçların elde edilmesi bu yöntemi öne çıkaran unsurlardandır. Bunun yanı sıra geçmiş yıllardaki tahmin çalışmalarında uzun bir zaman doğrusal problemlerin yer alması nedeniyle geleneksel tahmin yöntemleri yeterli olurken (Pankratz, 2009; Box vd., 2015) günümüzde gerçek hayat problemlerinin dinamik ve değişkenlik gösteren yapısından dolayı problemlerin doğrusal olduğunu varsaymak makul olmamış (Granger ve Terasvirta, 1993) ve bu nedenle doğrusal olmayan problemlerde bu yöntemler bazı yönlerden eksik kalmıştır. Geleneksel tahmin modellerinin aksine YSA’ nın probleme dair örneklerden sistemi öğrenmeleri ve problem zor olsa dahi parametreler arasında ince işlevsel bir ilişki yakalamaları ile doğrusal olmayan problemlerde üstünlüğünün kanıtlanmasından

dolayı yeterli verinin veya gözlemin elde edilebildiği özellikle çözüm süreçleri zor olan problemler için uygun olduğu görülmüştür (White, 1989; Ripley, 1993; Cheng ve Titterington, 1994). Bu nedenle bu tez çalışmasında kompleks bir yapıya sahip olan elektrik üretim santrallerinden olan hidroelektrik santrallerdeki çalışma ve bakım sürelerinin belirlenmesi için YSA yöntemi tercih edilmiştir.

#### 4.4. Tam Sayılı Programlama Yöntemi

Çalışmada önerilen matematiksel modeller 0-1 TP modelidir. TP, problem değişkenlerinin bazılarının veya tamamının tam sayılı değerler aldığı programlama türüdür. Günümüzde sıklıkla kullanılan bu optimizasyon yöntemi için Jünger vd. (2009)'nin 1958 ve 2008 yılları arasındaki çalışmaları kapsayan kitabı ile bu yönetime dair gelişmelerin 50 yıllık tarihi özetlenmiştir. Tam sayılı programlama yöntemi için en önemli gelişmelerden biri ise Gomory tarafından, simpleks algoritmasında kesen düzlemler ile küçük değişiklikler yapılarak tam sayılı sonuçların elde edilebileceğinin önerilmesi olmuştur (Jünder vd., 2009). Bu çalışma sonrasında çeşitli çalışmalarla da tam sayılı programlamanın 0-1 ve karışık tam sayılı programlama gibi farklı çeşitleri de öne çıkmıştır. Tam sayılı programlama modelinin genel formu aşağıda verilmiştir (Taha, 2014).

Burada  $j$ 'nin tüm değerlerinin tam sayı olması durumunda model saf tam sayılı programlama adını alırken  $j$ 'lerden bazılarının tam sayı olması durumu ise karışık tam sayılı programlama olarak adlandırılmaktadır. Tam sayılı programlama günümüze kadar ulaşım, ekonomi, sağlık, sanayi ve enerji gibi pek çok alanda farklı türdeki problemler için etkin sonuçlarıyla literatürdeki yerini almıştır.

$$\text{Max (Min)} \quad z = g_0(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

St.

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} b_i, \quad i \in M \equiv \{1, 2, \dots, m\}$$

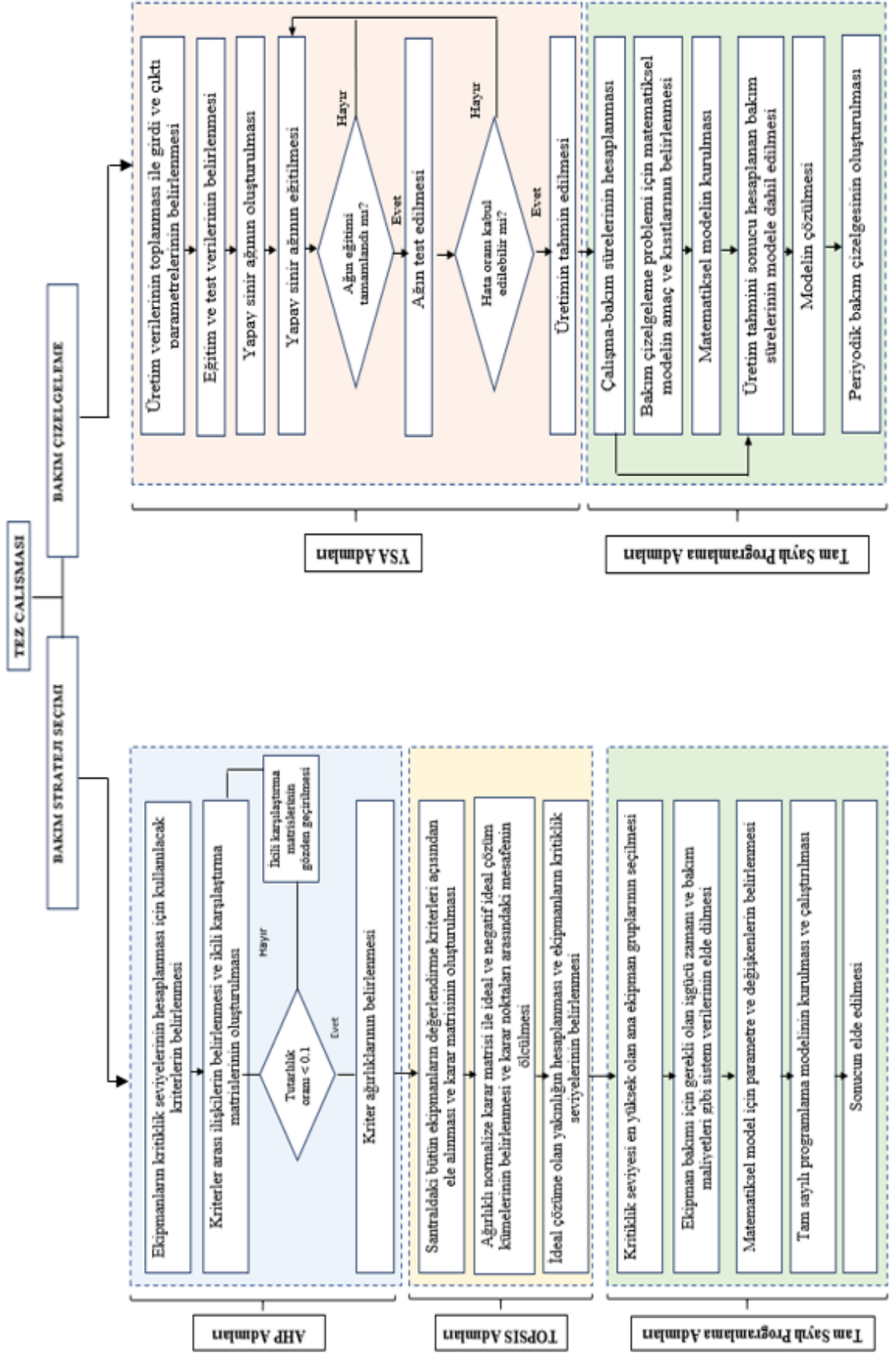
$$x_j \geq 0, \quad j \in N \equiv \{1, 2, \dots, n\}$$

$$x_j = \text{tamsayı} \quad j \in I \subseteq N$$

## 5. UYGULAMA

Bu tez çalışmasında Türkiye'deki büyük ölçekli bir hidroelektrik santralda bakım çizelgelemesi için beş adımdan oluşan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasının ilk iki adımında hidroelektrik santralda yer alan 1.330 elektriksel ekipmanın santral açısından kritiklik seviyesinin belirlenmesi için literatürde bu tip bir problem için etkinlikleri kabul görmüş olan AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Birinci adımda santral uzmanları tarafından belirlenen 9 kriterin ağırlıklarının hesaplanması için AHP yöntemi ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu adımdan sonra ikinci adımda AHP yöntemi ile ağırlıklandırılan kriterler baz alınarak TOPSIS yöntemi ile 1.330 ekipmanın öncelikleri hesaplanmıştır. Bu sayede belirlenen ekipman öncelik seviyelerine göre elde edilen santralin en kritik ana ekipman grupları için bir 0-1 TP modeli ile bakım strateji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk üç adımını oluşturan bu işlemlerin sonucunda bir zaman çizelgesi doğrultusunda gerçekleştirilebilecek olan periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu belirlenmiştir.

İlk üç adımın tamamlanması ile santraldaki sürdürülebilir enerji arzını direkt olarak etkileyen en kritik ekipmanlardan periyodik bakıma esas olanlar için bakım çizelgelemesinin gerçekleştirileceği dördüncü ve beşinci adıma geçilmiştir. Bu adımlarda literatürde ilk defa bir hidroelektrik santralda farklı karakteristik özelliklere sahip 7 kritik ekipman grubu için 52 haftalık 5 farklı içerikteki periyodik bakım çizelgelenmiştir. Dördüncü adımda bir YSA modeli ile santralin üretimi tahmin edilmiştir. Bu tahmin sonucunda santralda bakım yapılabilir süreler hesaplanmış ve bu değerler beşinci adımda bakım çizelgeleme için önerilen TP modelinde parametre olarak kullanılmıştır. Modelin çözümü sonucunda santraldaki kritik 7 ana ekipman grubu için bir yıllık uygulanabilir bir bakım çizelgesi haftalık periyotlar ile her bir periyodik bakım türü için elde edilmiştir. Çalışmadaki uygulama adımları Şekil 5. 1.'de yer almaktadır. Uygulamadaki ayrıntılara ise ilerleyen iki bölümde yer verilmiştir.



Şekil 5.1. Uygulama adımları

### **5.1.Bakım Strateji Seçimi**

Tez çalışmasının ilk üç adımını oluşturan bakım strateji seçimi çalışmasında (Özcan vd., 2019a) 1.330 elektriksel ekipman arasından santraldaki üretimin sürdürülebilirliğine direkt olarak etki eden en kritik ana ekipman gruplarını belirlemek amacıyla AHP-TOPSIS kombinasyonu kullanılmıştır. Bu iki adım sonucu belirlenen gruplar için üçüncü adımda önerilen 0-1 TP modeli ile bakım strateji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Üçüncü adım sonucunda bir zaman çizelgesi doğrultusunda gerçekleştirilebilecek olan periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu belirlenmiştir. Problem çözümü IBM ILOG CPLEX Optimisation Studio programında Intel ® Core ™ i3 CPU 2.40 GHz işlemcili bir bilgisayarda 0,68 saniyede gerçekleştirilmiştir.

#### **5.1.1.Elektriksel Kritik Ana Ekipman Gruplarının Belirlenmesi**

Tez çalışmasının birinci adımında her biri 10 ila 25 yıl hidroelektrik santral işletme ve bakım tecrübesine sahip, meslekleri endüstri, elektrik, elektrik-elektronik ve makine mühendisi olan sekiz santral uzmanı ile hidroelektrik santral işletme kuralları dikkate alınarak Çizelge 5. 1. 'de yer alan değerlendirme kriterleri belirlenmiştir.

**Çizelge 5.1.** Değerlendirme kriterleri (Özcan vd., 2017)

| Kriter                                        | Kriterde Yer Alan Parametreler | Parametrelerin Sayısal Karşılıkları |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Ambar yedeği                                  | Hiç olmaz                      | 3                                   |
|                                               | Bazen olur                     | 2                                   |
|                                               | Her zaman olur                 | 1                                   |
| Bakım öncesi koşullar                         | Ünite duruşu                   | 7                                   |
|                                               | Süreye göre duruş              | 5                                   |
|                                               | Yedeksiz bakım                 | 2                                   |
|                                               | Duruş gerektirmez              | 1                                   |
| Ek iş gerekliliği                             | Gerekir                        | 5                                   |
|                                               | Gerekmez                       | 1                                   |
| Arıza periyodu                                | Ayda 1                         | 8                                   |
|                                               | 3 ayda 1                       | 5                                   |
|                                               | 6 ayda 1                       | 3                                   |
|                                               | Yılda 1                        | 2                                   |
|                                               | Uzun süreli                    | 1                                   |
|                                               | Bilinmiyor                     | 1                                   |
| Arıza tespit edilebilirlik                    | Tespiti zor                    | 3                                   |
|                                               | Tespiti kolay                  | 1                                   |
| Olası sonuçlar                                | Ünite duruşu                   | 10                                  |
|                                               | Yük düşümü                     | 8                                   |
|                                               | Süreye göre duruş              | 8                                   |
|                                               | Yedeksiz çalışma               | 7                                   |
|                                               | Eksik görev                    | 2                                   |
|                                               | Güvenliğe zarar verir          | 2                                   |
|                                               | İlişkili ekipmanda hasar       | 1                                   |
|                                               | Start vermede problem          | 1                                   |
|                                               | Akışkan sarfıyatı artar        | 1                                   |
| Ekipmanın statik-dinamik-elektriksel özelliği | Mekanik-dinamik                | 2                                   |
|                                               | Mekanik-statik                 | 1                                   |
|                                               | Elektriksel                    | 1                                   |
|                                               | Ölçüm elemanı                  | 1                                   |
| Arıza giderme süresi                          | 1 hafta                        | 9                                   |
|                                               | 1 günden fazla                 | 3                                   |
| Ölçüm ekipmanlarının mevcudiyeti              | Var                            | 3                                   |
|                                               | Yok                            | 1                                   |

Santralda yer alan 1.330 elektriksel ekipmanın santral açısından kritiklik seviyesinin belirlenmesi için tespit edilen bu kriterlerin ağırlıkları AHP yöntemi ile belirlenmiştir ve bu yöntemde kullanılan karar matrisine Ek 1.'de yer verilmiştir. Birinci adımda elde edilen sonuçlar ise Çizelge 5. 2'de sunulmuştur.

**Çizelge 5.2.** Kriter ağırlıkları (Özcan vd., 2019a)

|    | Değerlendirme Kriterleri                      | Ağırlık Değerleri |
|----|-----------------------------------------------|-------------------|
| C1 | Ambar yedeği                                  | 0,05              |
| C2 | Bakım öncesi koşullar                         | 0,24              |
| C3 | Ek iş gerekliliği                             | 0,03              |
| C4 | Arıza periyodu                                | 0,07              |
| C5 | Olası sonuçlar                                | 0,40              |
| C6 | Ölçüm ekipmanlarının mevcudiyeti              | 0,06              |
| C7 | Ekipmanın statik-dinamik-elektriksel özelliği | 0,06              |
| C8 | Arıza giderme süresi                          | 0,03              |
| C9 | Arıza tespit edilebilirlik                    | 0,06              |

Tez çalışmasının ikinci adımında AHP yöntemi ile belirlenen kriter ağırlıkları TOPSIS yöntemine dahil edilerek 1.330 ekipmanın santral açısından kritiklik seviyeleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların maksimum değer üzerinden normalizasyon ile 0-1 arasında değişen  $C_i^*$  değerleri “100” değerine ayarlanmıştır. Buna göre, santralin sürdürülebilir enerji arzını sağlama noktasındaki hedefini sekteye uğratan ekipmanlardan 90 puan üzerinde çıkan kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu belirlenmiştir. Bu aşamada kullanılan verilerden örneklere Ek 2.’de ve Ek 3.’te yer verilmiştir. İkinci adımda elde edilen sonuçlar ekipmanların kritiklik seviyeleri Çizelge 5. 3.’te yer almaktadır.



**Çizelge 5.3.** En kritik elektriksel ekipmanlar ve kritiklik seviyeleri (Özcan vd., 2019a)

| Ekipman Adı     | Kritiklik Seviyesi |
|-----------------|--------------------|
| Ayırıcı         | 100                |
| Generator       | 100                |
| İkaz trafosu    | 95,67              |
| Ana güç trafosu | 91,55              |
| Gerilim trafosu | 91,55              |
| Kesici          | 91,55              |
| Akım trafosu    | 91,55              |

### 5.1.2.Bakım Stratejilerinin Seçimi

Çalışmanın üçüncü adımında hidroelektrik santraldaki 1.330 ekipman arasından belirlenen kritik elektriksel 7 ana ekipman grubunun bakım strateji seçimini gerçekleştirmek için TP ile modelleme yapılmıştır. Modelde kullanılan parametrelere Ek 4.'te yer verilmiştir.

#### Notasyonlar

*İndisler:*

$I$ : Ekipman sayısı  $i \in I; I = \{1, \dots, 7\}$

$J$ : Bakım stratejisi sayısı  $j \in J; J = \{1, \dots, 4\}$

$F$ : Arıza sayısı  $f \in F; F = \{1, \dots, 7\}$

$I = \{\text{Ayırıcı, kesici, akım trafosu, gerilim trafosu, ana güç trafosu, ikaz trafosu, generator}\}$

$J = \{\text{Periyodik bakım, kestirimci bakım, revizyon bakım, arızı bakım}\}$

*Parametreler:*

$C_{ij}$ :  $i$ . ekipman için  $j$ . bakım stratejisinin maliyeti

$D_{ij}$ :  $i$ . ekipmanda  $j$ . bakım stratejini gerçekleştirmek için gerekli olan süre

$T_c$  : Bakım için kullanılabilecek bütçe

$T_m$ : Bakım için kullanılabilecek zaman

$Cr_i$ :  $i$ . ekipmanın öncelik puanı

$W_j$ :  $j$ . bakım stratejisinin öncelik puanı

$M_i$ :  $i$ . ekipmana bakım yapıldığında ulaşılmak istenen toplam öncelik puanı

Karar değişkenleri:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & i. ekipmana j. bakım stratejisinin atanması durumu \\ 0, & diğer durum \end{cases} \quad \forall i, j$$

$$Y_{if} = \begin{cases} 1, & i. ekipmanda f. arıza gelmesi durumu \\ 0, & diğer durum \end{cases} \quad \forall i, f$$

Model formülasyonu:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} * X_{ij} \quad (5.1)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J D_{ij} * X_{ij} \leq T_m \quad (5.2)$$

$$X_{i4} - \sum_{f=1}^F Y_{if} = 0 \quad i = 1, \dots, 7 \quad (5.3)$$

$$\sum_{f=1}^F Y_{if} \leq 1 \quad i = 1, \dots, 7 \quad (5.4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} * X_{ij} \leq T_c \quad (5.5)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} \geq 1 \quad i = 1, \dots, 7 \quad (5.6)$$

$$\sum_{j=1}^J Cr_i * W_j * X_{ij} \geq M_i \quad i = 1, \dots, 7 \quad (5.7)$$

Önerilen modelde maliyet minimizasyonu ekseninde bir optimizasyon yapılmış ve Eş. 5.1’de bu fonksiyona yer verilmiştir. Eş. 5.2-Eş. 5.7 aralığında hidroelektrik santral

için mevcut kısıtlar bulunmaktadır. Eş. 5.2’de ifade edilen ilk kısıt, bakım sürelerinin bakım için ayrılabilir toplam süreden az olmasını, Eş. 5.3’teki ve Eş. 5.4’deki diğer iki kısıt, arıza oluşumunda arızı bakımın yapılmasını, Eş. 5.5 uygulanan bakım maliyetlerinin bakım için ayrılan bütçeyi aşmamasını, Eş. 5.6 seçilecek bakım stratejilerinden en az birisinin uygulanması gerektiğini yansıtan kısıtlardır. Eş. 5.7 ise, çalışmada TOPSIS yöntemi ile kritik ana ekipman grupları için hesaplanan öncelik değeri ile referans alınan bakım stratejisi öncelik değerlerinin (Özcan vd., 2017) kullanılarak bir ekipman grubunda seçilen bakım stratejilerinin uygulanması durumunda oluşacak toplam öncelik puanını yansıtmaktadır. Bu kısıttaki amaç, uygun ekipmana uygun bakım stratejisinin uygulanması ile elde edilecek katkıyı hesaplanan öncelik değerleri üzerinden yansıtmaktır. Modelin çözümü neticesinde 7 kritik elektriksel ekipman grubu için optimum bakım stratejisi kombinasyonu Çizelge 5. 4.’te verilmiştir.

**Çizelge 5.4.** Ekipman bazlı optimum strateji kombinasyonları

| Ekipman Adı     | Periyodik Bakım | Kestirimci Bakım | Revizyon Bakım | Arızı Bakım |
|-----------------|-----------------|------------------|----------------|-------------|
| Ayırıcı         | +               | +                | +              |             |
| Kesici          | +               | +                | +              | +           |
| Akım trafosu    | +               | +                | +              | +           |
| Gerilim trafosu | +               | +                | +              | +           |
| Ana güç trafosu | +               | +                | +              | +           |
| İkaz trafosu    | +               | +                | +              |             |
| Generator       | +               | +                | +              |             |

Çizelge 5. 4.’te yer alan sonuçlar incelendiğinde, gerçek hayattaki hidroelektrik santral işletme kuralları ile tutarlılık sağladığı görülmektedir. Burada dikkate alınan ekipmanlar santral açısından en kritik ekipmanlar olması ve bu ekipmanların arızalanması santralin uzun süreli duruşuna neden olması elde edilen sonucun tutarlı olduğunu kanıtlamaktadır. Sadece bu gerekçe dahi, bu ekipmanlara periyodik bakımların yapılmasını ve sensörlerle ekipmanların temel işletme parametrelerinin

izlenerek tolerans dışı çalışmasına, başka bir ifade ile arızalanmasına mahal vermeden müdahale edilmesini gerektirmektedir. Bu şart ise, kestirimci bakımı tanımlamaktadır. Revizyon bakım ise, daha önce de belirtildiği üzere geniş kapsamlı periyodik bakımlardır ve bu ekipmanların tamamında belirli bir periyot (2 yıl gibi) ya da çalışma saati (8000 saat gibi) neticesinde gerekli değişim ve yenilemelerin yapılmasını santralin üreticisi tarafından zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle kestirimci, periyodik ve revizyon bakım stratejilerinde elde edilen sonuçlar bu kritik ekipmanlarda bu bakım kombinasyonunun gerçekleştirilmesi gerektiği sonucunu yansıtmaktadır. Arıza bakım, tüm diğer bakım faaliyetlerinden gerekli olanların yapılarak kaçınılmak istenilen bir durumdur. Ancak bu santralda, kesici, akım, gerilim ve ana güç trafoları diğer tüm stratejilerin uygulanmasına rağmen yüksek gerilim, sıcaklık, aşırı akım ve basınç gibi zorlayıcı şartlar nedeniyle arızalanabilmektedir. Bu durum da bu kritik üç ekipman için yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı arıza bakım stratejisinin de ekipman bakım kombinasyonunda yer almasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu değerlendirmeler ise önerilen modelin tamamıyla tutarlı sonuçlar ürettiğini kanıtlamaktadır.

Elde edilen bu sonuçlar neticesinde 7 kritik ekipman grubu için bakım strateji seçimi gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama olan bu uygulamadan sonra tez çalışmasının ikinci aşaması olan bakım çizelgeleme aşamasına geçilmiştir.

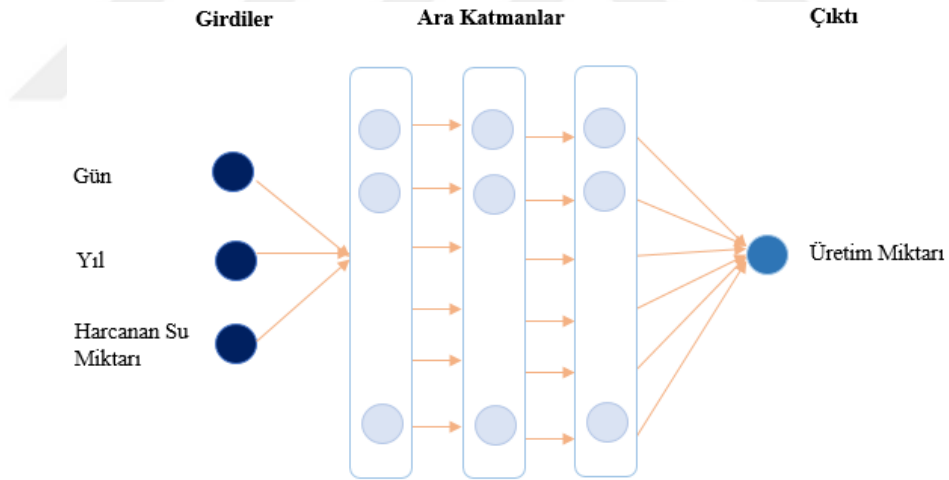
## **5.2.Bakım Çizelgeleme**

Tez çalışmasının ilk üç adımından sonra dördüncü ve beşinci adımında periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği ekipman grupları için bakım çizelgesi oluşturulmuştur. Dördüncü adımda YSA yöntemi ile santralin bir yıllık üretimi tahmin edilmiştir. Elde edilen tahmin sonucundan çeşitli hesaplamalar yapılarak çalışma ve bakım süreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bakım süreleri beşinci adımdaki TP modelinde parametre olarak kullanılmıştır. Model sonucunda hidroelektrik santraldaki kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu için bir yıllık bir bakım çizelgesi haftalık periyotlar ile oluşturulmuştur. Problem çözümü IBM ILOG CPLEX Optimisation

Studio programında Intel ® Core ™ i3 CPU 2.40 GHz işlemcili bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

### 5.2.1.Çalışma-Bakım Saatlerinin Tespit Edilmesi

Tez çalışmasının dördüncü adımında TP modelinin kısıtlarında kullanılacak olan bakım saatleri için hidroelektrik santralin bir yıllık üretim tahmini yapılmıştır. Kurulan ağ ileri beslemeli bir ağıdır. Bu ağ yapısı literatürde kompleks problemler için sıklıkla tercih edilen bir yapı olması ve yapılan çalışmadaki problem yapısına uygun olması nedeniyle tercih edilmiştir. YSA'nın girdi parametreleri olarak gün, yıl ve harcanan su miktarı kullanılmıştır. Ağı öğrenme sürecinde kullanılan örnek girdi verisine Ek 5.'te yer verilmiştir. Çıktısında ise günlük olarak enerji üretim miktarı tahmin edilmiştir. Bunların yanı sıra ağda üç ara katman kullanılmıştır. Kurulan ağ yapısına Şekil 5. 2.'de yer verilmiştir.



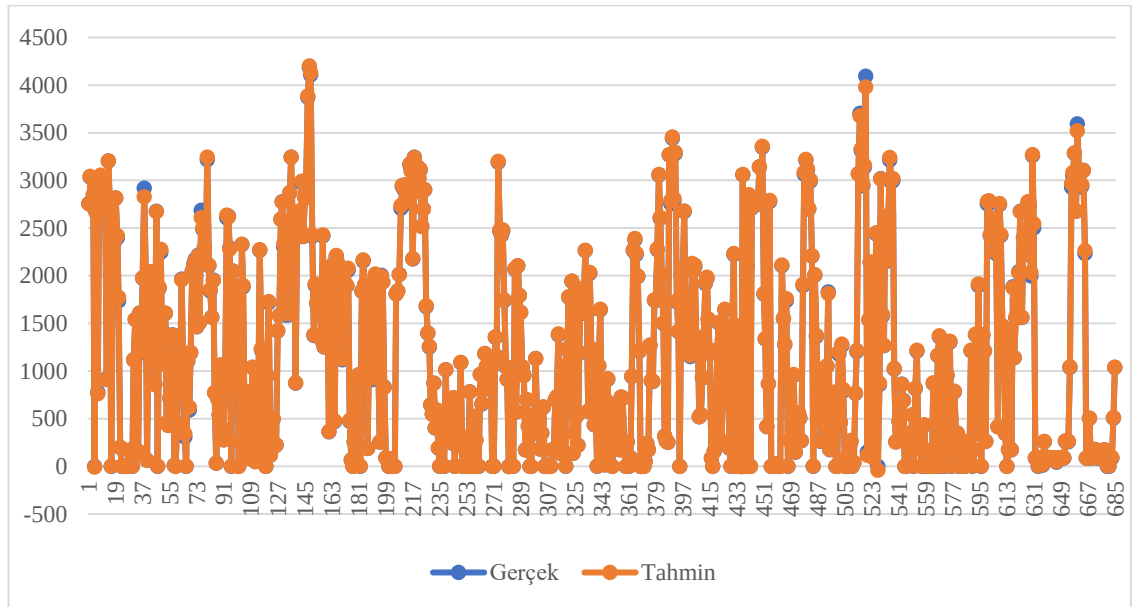
Şekil 5.2. Kurulan ağ yapısı

Her bir katman için sırasıyla “tansig, logsig, logsig” transfer fonksiyonları kullanılmış olup katmanlardaki nöron sayıları ise 30’dur. Öğrenme fonksiyonu olarak ise “learngdm” kullanılmıştır. Ağı eğitim sürecinde 2010-2018 yılları arasındaki 9 yıllık gerçek veri setinden toplamda 2820 veri kullanılmış olup bunlardan 2135’i öğrenme

aşamasında 685'i test aşamasında kullanılmıştır. Öğrenme aşamasında gerçekleştirilen denemeler sonucunda seçilen en iyi ağ yapısında  $R^2$  değeri 0,99 olarak elde edilmiştir.  $R^2$  değerinin 1'e yakın olmasının gerçek veri ve tahmin sonucu arasındaki tutarlılığın kuvvetli olduğunu göstermesi nedeniyle kurulan bu ağ yapısıyla bir sonraki aşama olan test aşamasına geçilmiştir. Test aşamasında elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlarla karşılaştırılmış ve veri setinde sıfırlı değerlerin olması nedeniyle literatürde bu tür veri setinde kullanılan ve Eş. 5.8'de hesaplaması yer alan Symmetric Mean Absolute Percentage Error (sMAPE) hata türü ile test hatası hesaplanmıştır. Burada n örneklem sayısını ifade etmektedir.

$$sMAPE = 2 * \frac{\text{Gerçek değer} - \text{Tahmin değeri}}{\text{Gerçek değer} + \text{Tahmin değeri}} * \frac{100}{n} \quad (5.8)$$

Hata oranı %1,23 olarak bulunmuştur. Elde edilen hata oranı literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında (Gandelli vd., 2014; Dolara vd., 2015; Li vd., 2016) elde edilen sonuçların uygun olduğu gözlemlenmiştir. Test sonucu tahmin edilen veriler ve gerçek veriler arasındaki tutarlılığa dair grafik Şekil 5. 3. 'te yer almaktadır. Ayrıca test sonuçlarına dair bir örnek de Çizelge 5. 5.' te yer almaktadır.



**Şekil 5.3.** Test sonucunun gerçekle karşılaştırması

**Çizelge 5.5.** Test tahmininden örnekler

| Gerçek Üretim Miktarı | Tahmin Edilen Üretim Miktarı |
|-----------------------|------------------------------|
| 1.117                 | 1.118,782                    |
| 1.540                 | 1.540,177                    |
| 129                   | 132,4177                     |
| 158                   | 161,5412                     |
| 1.609                 | 1.607,445                    |
| 1.194                 | 1.203,181                    |
| 1.973                 | 1.978,286                    |
| 2.918                 | 2.825,351                    |
| 1.997                 | 1.999,151                    |
| 62                    | 62,780                       |
| 1.772                 | 1.776,124                    |
| 2.037                 | 2.042,270                    |
| 1.334                 | 1.328,950                    |
| 1.378                 | 1.355,833                    |
| 865                   | 855,252                      |
| 2.674                 | 2.672,339                    |
| 1.869                 | 1.877,100                    |
| 2.247                 | 2.276,040                    |
| 1.077                 | 1.076,468                    |
| 1.403                 | 1.390,838                    |

Bu sonuçlar ışığında bu ağ yapısı ile 2019 yılı için santral üretim tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin sonucu elde edilen verilerin bir örneğine Çizelge 5. 6.'da yer verilmiştir.

**Çizelge 5.6.** Tahmin sonucundan örnek

| Tarih      | Hafta | 2019 Yılı Tahmini Üretim |
|------------|-------|--------------------------|
| 1.01.2019  | 1     | 1.308,836                |
| 2.01.2019  |       | 1.519,309                |
| 3.01.2019  |       | 1.744,307                |
| 4.01.2019  |       | 1.791,570                |
| 5.01.2019  |       | 1.786,123                |
| 6.01.2019  |       | 1.774,062                |
| 7.01.2019  | 2     | 1.737,209                |
| 8.01.2019  |       | 1.787,951                |
| 9.01.2019  |       | 1.374,139                |
| 10.01.2019 |       | 1.446,299                |
| 11.01.2019 |       | 1.610,594                |
| 12.01.2019 |       | 1.275,113                |
| 13.01.2019 |       | 1.630,948                |
| 14.01.2019 |       | 1.763,912                |
| 15.01.2019 | 3     | 1.757,161                |
| 16.01.2019 |       | 1.426,825                |
| 17.01.2019 |       | 1.189,413                |
| 18.01.2019 |       | 1.699,453                |
| 19.01.2019 |       | 1.439,536                |
| 20.01.2019 |       | 1.541,437                |
| 16.12.2019 | 51    | 790,792                  |
| 17.12.2019 |       | 789,528                  |
| 18.12.2019 |       | 789,516                  |
| 19.12.2019 |       | 786,763                  |
| 20.12.2019 |       | 797,430                  |
| 21.12.2019 |       | 788,875                  |
| 22.12.2019 |       | 789,120                  |
| 23.12.2019 |       | 789,233                  |
| 24.12.2019 | 52    | 789,713                  |
| 25.12.2019 |       | 794,480                  |
| 26.12.2019 |       | 806,954                  |
| 27.12.2019 |       | 833,319                  |
| 28.12.2019 |       | 894,385                  |



Elde edilen üretim verileri santraldaki üç üniteden her bir ünitenin eşit çalışacağı varsayımı ile hesaplanarak bir ünitenin günde üreteceği enerji hesaplanmıştır. Hesaplanan çalışma saatlerinden sonra bakım personellerinin hafta sonları çalışmaması ve hafta içi gün içerisinde 16 saatlik periyotta çalışabildikleri şartı göz önünde bulundurularak gün içerisinde bakım personelinin çalışabileceği saatler hesaplanmıştır. Bulunan saatler haftalık olarak toplanmış ve sonuçta haftalık bakım yapılabilir süreler hesap edilmiştir.

Örneğin, 4.01.2019 tarihi için tahmin sonucunda bulunan 1.791,569 MWh' lik üretim miktarı için hesaplama yapılsın. Öncelikle santraldaki bir ünitenin o gün için çalışacağı saati hesaplamak amacıyla tahmin sonucu elde edilen bu değer santralda 90 MW'lık kurulu güce sahip üç ünitenin bulunması nedeniyle  $3 \times 90$ 'a bölünmüştür. Bu bölüm sonucunda santraldaki bir ünitenin 4.01.2019 tarihinde 6,64 saat çalışacağı sonucuna ulaşılmıştır. Bundan sonra santral işletme kuralları gereği bakım personelinin var olan üç vardiyadan sadece ikisinde yani günde en fazla 16 saat çalışabilmesi nedeniyle santralda bakımın gerçekleştirilebileceği saatleri hesaplamak için bulunan 6,64 değeri 16 saatten çıkartılmıştır. Bunun sonucunda 4.01.2019 tarihinde bakım yapılabilir zaman dilimi maksimum 9,36 saat olarak bulunmuştur. Yapılan bu hesaplama diğer günler için de yapıp bu saatlerin haftalık toplamı alınarak haftada maksimum kaç saatin bakıma ayrılabilceği hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler matematiksel modelde kullanılan  $T_{makj}$  değerlerini oluşturmuştur. Yıl içerisinde haftalık olarak bakım yapılabilir süreler hesaplandıktan sonra bakım çizelgeleme için TP modeline geçiş yapılmıştır.

### 5.2.2.Periyodik Bakım Çizelgesinin Oluşturulması

Bu aşamada bakım çizelgeleme problemi için TP yöntemi ile matematiksel bir model kurulmuştur. Modeldeki amaç ise malzeme, işçilik ve üretim duruşundan kaynaklı maliyetlerinden oluşan toplam maliyetin minimize edilmesidir. Modelde kullanılan parametrelere Ek 4.'te yer verilmiştir. Periyodik bakım haftalık, aylık, üç ayda bir, altı ayda bir ve yılda bir uygulanan beş ayrı türde ele alınmıştır. Bakım türlerinde

ekipmanlar için gerçekleştirilen uygulamalar farklılık göstermektedir. Ekipmanlara uygulanan bakımlara dair örnekler ise şu şekildedir:

- Ayırıcılar için yapılan haftalık, aylık ve 3 aylık bakımlarda genel olarak gözle kontrol, termal kamera ölçümleri, pano temizlikleri gerçekleştirilmektedir. Yıllık bakımlarda ise açma kapama denemeleri, ayırıcı motoru bakımları, mekanizmaların bakımı elektriksel ekipmanların bakımları gerçekleştirilmektedir.
- Generatorlar için yapılan haftalık ve aylık bakımlarda gözle kontrol ve termal kamera ölçümleri, diğer bakımlarda generator testleri sonuçlarına göre rotor temizliği, stator sargılarının durumları ve bakımlar gerçekleştirilmektedir. Kapsamlı olarak generator ve yardımcı teçhizatlarının bakımları yapılmaktadır.
- Ana Güç trafosu için yapılan haftalık ve aylık bakımlarda sıcaklık göstergelerinden sıcaklık değerlerine, yağ seviye değerlerine ve yağ kaçağı olup olmadığı gözlemlenmektedir. Ayrıca trafo çalışırken termal kamera ile buşinglerin, bağlantı noktalarının ve panonun ölçümleri, yıllık bakımlarda soğutma fanları, buşingler, genleşme tankı, ana tank, kontrol panolarının bakımları yapılmaktadır.
- İkaz trafosu için yapılan bakımlarında termal kamera ölçümleri ve bağlantı noktalarının kontrolü ve temizliği yapılmaktadır.
- Gerilim trafosu bakımlarında termal kamera ölçümleri ve bağlantı noktalarının kontrolü ve temizliği yapılmaktadır.
- Kesici için yapılan haftalık ve aylık bakımlarında gözle kontrol ve termal kamera ölçümleri yapılmaktadır. Ayrıca pano içi temizlik yapılır. 6 aylık ve yıllık bakımlarda açma kapama işlemleri, genel bağlantı noktaları kontrolü ve temizliği ile kontrol panosu içerisindeki elektriksel ekipmanların bakımları yapılmaktadır.
- Akım Trafosu: Akım trafosu bakımlarında termal kamera ölçümleri ve bağlantı noktalarının kontrolü ve temizliği yapılmaktadır.

## Notasyonlar

### İndisler:

$I$ : Ekipman sayısı  $i \in I; I = \{1, \dots, 7\}$   
 $J$ : Hafta sayısı  $j \in J; J = \{1, \dots, 52\}$   
 $K$ : Periyodik bakım türleri  $k \in K; K = \{1, \dots, 5\}$   
 $I = \{\text{Ayırıcı, generator, ana güç trafosu, ikaz trafosu, gerilim trafosu, kesici, akım trafosu}\}$   
 $K = \{\text{Haftalık bakım, 1 aylık bakım, 3 aylık bakım, 6 aylık bakım, 1 yıllık bakım}\}$

### Parametreler:

$C_{ik}$ :  $i$ . ekipmana  $k$ . periyodik bakım türünün uygulanması durumunda oluşan maliyet  
 $D_{ik}$ :  $i$ . ekipmana  $k$ . periyodik bakım türünün uygulanması için gerekli olan süre  
 $T_{makj}$ :  $j$ . haftada bakıma ayrılacak maksimum süre  
 $M_{ik}$ :  $i$ . ekipmana  $k$ . periyodik bakım türünün yapılması için gerekli olan işgücü  
 $T_p$ : Bakım yapabilecek işgücü kapasitesi  
 $T_c$ : Bakımlar için ayrılan bütçe, fon  
 $T_{ik}$ :  $i$ . ekipmana  $k$ . periyodik bakım türünün bir yılda toplamda kaç kez uygulanacağı

### Karar değişkeni:

$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & i. ekipmana j. haftada k. periyodik bakım türünün uygulanması durumu \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$   
 $\forall i, j, k$

### Model formülasyonu:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} * C_{ik} \quad (5.9)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijk} = T_{ik} \quad i = 1, \dots, 7; k = 1, \dots, 5 \quad (5.10)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ijk} \leq 1 \quad j = 1, \dots, 52; k = 3, 4, 5 \quad (5.11)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} * C_{ik} \leq T_c \quad (5.12)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K M_{ik} * X_{ijk} \leq T_p \quad j = 1, \dots, 52 \quad (5.13)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K D_{ik} * X_{ijk} \leq T_{makj} \quad j = 1, \dots, 52 \quad (5.14)$$

$$\sum_{s=0}^3 X_{i(j+s)2} = 1 \quad i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, 49 \quad (5.15)$$

$$\sum_{s=0}^{11} X_{i(j+s)3} = 1 \quad i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, 41 \quad (5.16)$$

$$\sum_{s=0}^{25} X_{i(j+s)4} = 1 \quad i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, 27 \quad (5.17)$$

Kurulan modelde Eş. 5.9 matematiksel modelin amacını ifade etmektedir. Amaç, malzeme, işçilik ve üretim duruşundan kaynaklı maliyetlerinden oluşan toplam maliyetin minimize edilmesidir. Eş. 5.10 her bir ekipmanın her bir bakım türü için yılda toplamda kaç kez yapılması gerektiğini, Eş. 5.11 ise haftalık ve aylık periyodik bakım türü dışındaki diğer her üç bakım türü için her haftaya en fazla bir ekipmanın bakımının atanması kısıdını yansıtmaktadır. Eş. 5.12 bakım maliyetlerinin bütçeyi aşmamasını, Eş. 5.13 bakıma ayrılan sürenin toplam işgücünden fazla olmamasını ve Eş. 5.14 de yapılan bakımların haftalık olarak ayrılan maksimum süreleri aşmaması gerektiğini ifade etmektedir. Eş. 5.15-Eş.5.17 arasındaki üç kısıt ise ekipman bakımlarının bakım türlerinin periyotlarına uygun olarak atanmasını sağlayan kısıtlardır.

Kurulan matematiksel model sonucunda 7 ekipman için 52 haftalık bir zaman dilimi için 5 periyodik bakım türüne ait bakım çizelgesi elde edilmiştir. Elde edilen sonuç Şekil 5. 4.' te sunulmuştur.



Kurulan model sonucunda elde edilen çizelgede santral için kritik olan elektriksel 7 ana ekipman grubu için haftalık, 1 aylık, 3 aylık, 6 aylık ve 1 yıllık periyotlarla gerçekleştirilen beş ayrı periyodik bakım türü için 52 haftalık bir zamanı kapsayan bakım çizelgesi elde edilmiştir. Çizelge sonucunda haftalara ait bakım yapılabilir sürelerle ve diğer kısıtlara göre uygun atama yapılmıştır, bir haftada birden fazla ekipmana aynı bakım türünün uygulanmaması isteğinin de karşılandığı sonuçlarda gözlemlenmiştir. Özellikle santral işletmeciliğinde feyezan ayları olarak adlandırılan, hidroelektrik santrallarda üretimin yoğun olarak gerçekleştirildiği bu aylarda uzun süreli bakımlar atanmamıştır. Çizelgede 2019 yılı için 18. ve 35. haftalar arasına denk gelen bu aylarda uzun süreli olan 6 aylık ve 1 yıllık bakımlar atanmamış ve bu durum üretim tahmini ile matematiksel model kombinasyonunun kullanılması ile sağlanmıştır. Gözlemlenen bu sonuç da tez çalışmasında gerçek hayattaki santral işletmeciliğine uygun bir bakım çizelgesi elde edildiğini kanıtlar niteliktedir.

## 6. SONUÇ

Yapılan bu tez çalışmasında, hidroelektrik santrallarda bakım çizelgelemesi için beş adımdan oluşan bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk üç adımında bakım strateji seçim problemi ele alınarak Türkiye enerji talebinin son bir yıl içerisinde yaklaşık %20'sini karşılayan (EMO, 2019) hidroelektrik santrallardan bir tanesinde gerçek veriler kullanılarak santral için kritik olan elektriksel ekipman grupları değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk iki adımında, santralda uzun süredir görev yapan uzmanlar ile 9 değerlendirme kriteri belirlenmiş ve AHP-TOPSIS kombinasyonu ile 1.330 ekipman kritiklik seviyelerine göre sıralanarak santral için kritiklik seviyesi en yüksek olan ana ekipman grupları tespit edilmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü adımında belirlenen ana ekipman grupları için arızı, periyodik, kestirimci ve revizyon bakım olmak üzere dört bakım stratejisi arasından en uygun kombinasyon, önerilen TP modeli ile elde edilmiştir. Bakım planlama probleminin ilk aşamasını oluşturan bakım stratejilerinin santral işletme kuralları temelinde optimize edilmesini amaçlayan bu çalışma ile santral bünyesinde bulunan en kritik elektriksel ekipmanlar (7 adet) için süre ve işçilik kısıtları dahilinde maliyet minimizasyonu hedeflenerek en uygun stratejiler her bir ekipmana atanmıştır.

Hem TP'nin kullanıldığı bir yöntem kombinasyonunun olması hem de uygulama sahası olarak enerji alanında ve hidroelektrik santrallarda yapılması yönü ile literatürdeki diğer çalışmalardan farklılık arz eden bakım strateji seçimi adımlarında elde edilen sonuçlara göre planlanan bakım sonuçları 2 yıl süre ile izlenmiş olup, santralda söz konusu ekipmanlardan kaynaklı duruşlarda %80 oranında bir azalma olmuştur. Bu parametre, santral açısından en kritik performans göstergesi olan emre amadelik oranının artırılmasına direkt olarak etki etmekte ve bu oranı mümkün olan en yüksek seviyeye çıkararak, kesintisiz, düşük maliyetli, verimli ve çevreye duyarlı elektrik üretimi amaçlarını sağlamak hususunda başrolü uygun işletme kurallarına göre santralin işletilmesi ile paylaşılmaktadır. Bununla birlikte, bu iyileşme oranının özellikle üretim duruşlarından kaynaklanan yüksek maliyetlerin azaltılmasına olan katkısı da yadsınamaz. Çünkü, milyonlarca kWh enerjinin santraldaki ekipmanların

elektrik üretimini durdurması neticesinde üretilmemesinden kaynaklanan duruş maliyetleri, arızanın giderilmesi için harcanan tutardan çok büyüktür. Gerçekleştirilen çalışmanın dışında bu problemdeki modele çok amaçlı bir yapının kazandırılması ve santral bünyesindeki tüm ekipmanlar için bu seçimin yapıldığı model önerilerinin oluşturulması ile literatüre üst seviyede katkı sağlanabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca tez çalışmasının ilk üç adımında ele alınan bakım strateji seçimi probleminin çözümü için literatürde AHP-TOPSIS-TP yöntemlerinden oluşan kombinasyon ilk kez kullanılmıştır. Problem kapsamı, literatürdeki mevcut çalışmalarda yer aldığı gibi bir sistemin alt bir birimi, üretim tesisinin küçük bir bölümü ya da az sayıda ekipman türü ile gerçekleştirilmesi yerine, binlerce ekipmandan oluşan, santraldaki en problemli ekipman grubu olan elektriksel ekipmanlardan ünite duruşuna neden olan, ayrıca kritiklik seviyesi en yüksek olan 7 ekipman grubu (ayırıcı, ikaz trafosu, kesici, gerilim trafosu, ana güç trafosu, akım trafosu ve generator) için genişletilerek sistemsal bir yaklaşım izlenmiştir. Bununla birlikte literatürdeki çalışmaların uygulama alanlarından farklı olarak çalışılan yöntem kombinasyonu ile bir hidroelektrik santral için ilk kez gerçekleştirilmiştir. İlk üç adımdaki çalışma neticesinde elde edilen sonuçların santrala katkısı gerek santral işletme kuralları çerçevesinde gerekse gerçek hayatla tutarlı olması yönüyle literatürdeki diğer çalışmalardan farklılık oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasının dördüncü ve beşinci adımında, üçüncü adımdaki çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda bakım çizelgeleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği ekipman grupları için haftalık, 1 ay, 3 ay, 6 ay ve 1 yıllık periyotlara sahip beş farklı periyodik bakım türü dikkate alınarak bir yıllık periyodik bakım çizelgesi oluşturulmuştur. Bunun için dördüncü adımda öncelikle YSA yöntemi kullanılarak üretim tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin sonucunda elde edilen üretim miktarları baz alınarak ünite çalışma ve bakım saatleri hesaplanmıştır. Bu adımdan sonra beşinci adıma geçilmiş ve bakım çizelgeleme için TP modelinde önerilmiştir. Bu adımdaki TP modelinde dördüncü adım sonucu hesaplanan bakım yapılabilir süreler parametre olarak kullanılmıştır. Kurulan model sonucunda 7 kritik elektriksel ana ekipman grubunun 5



ayrı periyodik bakım türüne dair 52 haftalık zaman dilimi için bakım çizelgeleri oluşturulmuştur.

Tez çalışmasındaki dördüncü ve beşinci adımda gerçekleştirilen çalışma ise elektrik üretim santrallerinde birden fazla elektriksel ekipman grubunun değerlendirilmesi ve her ekipman grubunun spesifik özellikleri dikkate alınarak periyodik bakım çizelgelerinin oluşturulması, periyodik bakım stratejisinin santral işletme kurallarına uygun olarak belirlenen beş ayrı periyodik bakım türü ile incelenerek her bir ekipman için bu bakım türlerine ait bakım çizelgelerinin oluşturulması, bakım çizelgeleme problemlerinde 2010-2018 yılları arasındaki 9 yıllık gerçek veri setinden toplamda 2820 veri kullanılarak santral için bir yıllık üretim tahmininin gerçekleştirilmesi ve planlama yılı için santral çalışma ve bakım saatlerinin hesaplanması, YSA ile elde edilen sürelerin TP modeline dahil edilerek YSA ve TP yöntemlerinin kombine edilmesi ile literatürde ilk olma özelliği taşımaktadır. Ayrıca Türkiye’deki bir hidroelektrik santraldan alınan gerçek veriler ile çalışmanın gerçek hayat uygulaması ise literatürdeki çoğu çalışmada gerçekleştirilmeyen bir özellik olarak öne çıkmaktadır. Çalışma sonucunda önerilen çizelge santral uzmanlarınca onaylanmıştır. Ekipmanların mevcut durumlarına uygun bakım atamaları yapılmış olup strateji optimizasyonundan elde edilen iyileşme de dikkate alındığında sürdürülebilir enerji arzına katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Önerilen çizelgenin uygulama sahası olan hidroelektrik santraldaki etkinliği ise izleme için bir zamanın olmaması nedeniyle gözlemlenememiştir.

İleri bir çalışma olarak da birden fazla üniteye ekipman gruplarının değerlendirildiği hem ünite hem ekipmanlar için daha ayrıntılı bir bakım çizelgeleme çalışmasının yapılması, bunun yanı sıra problem yapısında personel çizelgelemenin de dahil edildiği bütünlük çalışmaları yapılması literatüre katkı sağlayacak çalışmalardan olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Abirami, M., Ganesan, S., Subramanian, S., Anandhakumar, R., Source and transmission line maintenance outage scheduling in a power system using teaching learning based optimization algorithm. *Applied Soft Computing*. 21: 72-83, 2014.
- Anghinolfi, D., Gambardella, L.M., Montemanni, R., Nattero, C., Paolucci, M., Toklu, N.E., A matheuristic algorithm for a large-scale energy management problem. In International Conference on Large-Scale Scientific Computing, June 2011, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 173-181, 2011.
- Al-Khamis, T. M., Vemuri, S., Lemonidis, L., Yellen, J., Unit maintenance scheduling with fuel constraints. In Power Industry Computer Application Conference, May 1991, Conference Proceedings, IEEE, p. 113-119, 1991.
- Al-Shayea, Q.K., Artificial neural networks in medical diagnosis. *International Journal of Computer Science Issues*. 8(2): 150-154, 2011.
- Amasyali, K., El-Gohary, N.M., A review of data-driven building energy consumption prediction studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81: 1192-1205, 2018.
- Arıbaş, M., Özcan, U., Akademik araştırma projelerinin AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*. 19(2): 163-173, 2016.
- Badri, A., Niazi, A.N., Preventive generation maintenance scheduling considering system reliability and energy purchase in restructured power systems. *International Journal of Basic and Applied Scientific Research*. 12: 12773-12786, 2012.
- Baidya, R., Dey, P.K., Ghosh, S.K., Petridis, K., Strategic maintenance technique selection using combined quality function deployment, the analytic hierarchy

process and the benefit of doubt approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 94(1-4): 31-44, 2018.

Balaji, G., Balamurugan, R., Lakshminarasimman, L., Mathematical approach assisted differential evolution for generator maintenance scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 82: 508-518, 2016.

Bangalore, P., Patriksson, M., Analysis of SCADA data for early fault detection, with application to the maintenance management of wind turbines. *Renewable Energy*. 115: 521-532, 2018.

Barot, H., Bhattacharya, K., Security coordinated maintenance scheduling in deregulation based on genco contribution to unserved energy. *IEEE Transactions on Power Systems*. 23(4): 1871-1882, 2008.

Baskar, S., Subbaraj, P., Rao, M.V.C., Tamilselvi, S., Genetic algorithms solution to generator maintenance scheduling with modified genetic operators. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*. 150(1): 56-60, 2003.

Başıeşme, H., Hidroelektrik santraller ve hidroelektrik santral tesisleri. EÜAŞ Genel Müdürlüğü Hidrolik Santraller Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2003.

Behnia, H., Akhbari, M., Generation and transmission equipment maintenance scheduling by transmission switching and phase shifting transformer. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*. 32(1): 2483, 2019.

Behzadian, M., Otaghsara, S.K., Yazdani, M., Ignatius, J., A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*. 39(17): 13051-13069, 2012.

- Bertolini M, Bevilacqua M., A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering & System Safety*. 91(7): 839-848, 2006.
- Bevilacqua M, Braglia M., The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*. 70(1): 71-83, 2000.
- Billinton, R., Abdulwhab, A., Short-term generating unit maintenance scheduling in a deregulated power system using a probabilistic approach. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*. 150(4): 463-468, 2003.
- Bisanovic, S., Hajro, M., Dlakic, M., A profit-based maintenance scheduling of thermal power units in electricity market. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 5(3): 156-164, 2011.
- Box, G.E., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., Ljung, G.M., Time series analysis: forecasting and control. John Wiley & Sons., 2015.
- Bozorgi, A., Pedram, M.M., Yousefi, G.R., Unit maintenance scheduling: a robust model, based on fuzzy cost factors and peak loads. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 79: 142-149, 2016.
- Braglia, M., Castellano, D., Frosolini, M., An integer linear programming approach to maintenance strategies selection. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 30(9): 991-1016, 2013.
- Brandt, F., Bauer, R., Völker, M., Cardeneo, A., A constraint programming-based approach to a large-scale energy management problem with varied constraints. *Journal of Scheduling*. 16(6): 629-648, 2013.
- Buljubašić, M., Gavranović, H. Orchestrating constrained programming and local search to solve a large scale energy management problem. In 2012 Federated

Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), IEEE, September 2012, p. 371-378, 2012.

Burke, E.K., Smith, A.J., Hybrid evolutionary techniques for the maintenance scheduling problem. *IEEE Transactions on Power Systems*. 15(1): 122-128, 2000.

Canto, S.P., Application of benders' decomposition to power plant preventive maintenance scheduling. *European Journal of Operational Research*. 184(2): 759-777, 2008.

Carnero, M.C., Gómez, A., Maintenance strategy selection in electric power distribution systems. *Energy*. 129: 255-272, 2017.

Charest, M., Ferland, J.A., Preventive maintenance scheduling of power generating units. *Annals of Operations Research*. 41(3): 185-206, 1993.

Chattopadhyay, D., A practical maintenance scheduling program mathematical model and case study. *IEEE Transactions on Power Systems*. 13(4): 1475-1480, 1998.

Chattopadhyay, D., A game theoretic model for strategic maintenance and dispatch decisions. *IEEE Transactions on Power Systems*. 19(4): 2014-2021, 2004a.

Chattopadhyay, D., Life-cycle maintenance management of generating units in a competitive environment. *IEEE Transactions on Power Systems*. 19(2): 1181-1189, 2004b.

Cheng, B., Titterington, D.M., Neural networks: a review from a statistical perspective. *Statistical Science*, 2-30, 1994.

Conejo, A.J., García-Bertrand, R., Díaz-Salazar, M., Generation maintenance scheduling in restructured power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 20(2): 984-992, 2005.

- Dahal, K.P., Aldridge, C.J., McDonald, J.R., Generator maintenance scheduling using a genetic algorithm with a fuzzy evaluation function. *Fuzzy Sets and Systems*. 102(1): 21-29, 1999.
- Dahal, K.P., Chakpitak, N., Generator maintenance scheduling in power systems using metaheuristic-based hybrid approaches. *Electric Power Systems Research*. 77(7): 771-779, 2007.
- Da Silva, E.L., Schilling, M.T., Rafael, M.C., Generation maintenance scheduling considering transmission constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*. 15(2): 838-843, 2000.
- Dedopoulos, I.T., Shah, N., Preventive maintenance policy optimization for multipurpose plant equipment. *Computers & Chemical Engineering*. 19: 693-698, 1995.
- Digalakis, J.G., Margaritis, K.G., A multipopulation cultural algorithm for the electrical generator scheduling problem. *Mathematics and Computers in Simulation*. 60(3-5): 293-301, 2002.
- Ding, S.H., Kamaruddin, S., Maintenance policy optimization—literature review and directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 76(5-8): 1263-1283, 2015.
- Dolara, A., Grimaccia, F., Leva, S., Mussetta, M., Ogliari, E., A physical hybrid artificial neural network for short term forecasting of PV plant power output. *Energies*. 8(2): 1138-1153, 2015.
- Dopazo, J.F., Merrill, H.M., Optimal generator maintenance scheduling using integer programming. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 94(5): 1537-1545, 1975.

- Dougherty, M., A review of neural networks applied to transport. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 3(4): 247-260, 1995.
- Ekpenyong, U.E., Zhang, J., Xia, X., An improved robust model for generator maintenance scheduling. *Electric Power Systems Research*. 92: 29-36, 2012.
- El-Amin, I., Duffuaa, S., Abbas, M., A tabu search algorithm for maintenance scheduling of generating units. *Electric Power Systems Research*. 54(2): 91-99. 2000.
- El-Sharkh, M.Y., Clonal selection algorithm for power generators maintenance scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 57: 73-78, 2014.
- El-Sharkh, M.Y., El-Keib, A.A., Chen, H., A fuzzy evolutionary programming-based solution methodology for security-constrained generation maintenance scheduling. *Electric Power Systems Research*. 67(1): 67-72, 2003.
- Elyas, S.H., Foroud, A.A., Chitsaz, H., A novel method for maintenance scheduling of generating units considering the demand side. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 51: 201-212. 2013.
- EMO, Türkiye elektrik enerjisi istatistikleri. 31 Mayıs 2019 dosyası, [http://www.emo.org.tr/ekler/f5959441c3f5942\\_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0](http://www.emo.org.tr/ekler/f5959441c3f5942_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0) (Erişim tarihi: 17. 05. 2019).
- Emovon, I., Norman, R.A., Murphy, A.J., Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 29(3): 519-531, 2018.
- Eshraghnia, R., Shanechi, M.M., Mashhadi, H.R., A new approach for maintenance scheduling of generating units in power market. In 2006 International

Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, IEEE, June 2006, p. 1-7, 2006.

Eygelaar, J., Lötter, D.P., Van Vuuren, J.H., Generator maintenance scheduling based on the risk of power generating unit failure. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 95: 83-95, 2018.

Fattahi, M., Mahootchi, M., Mosadegh, H., Fallahi, F., A new approach for maintenance scheduling of generating units in electrical power systems based on their operational hours. *Computers & Operations Research*. 50: 61-79, 2014.

Feng, C., Wang, X., Li, F., Optimal maintenance scheduling of power producers considering unexpected unit failure. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 3(5): 460-471, 2009.

Fetanat, A., Shafipour, G., Generation maintenance scheduling in power systems using ant colony optimization for continuous domains based 0–1 integer programming. *Expert Systems with Applications*. 38(8): 9729-9735, 2011.

Fetanat, A., Shafipour, G., Mixed biogeography-based optimization for gencos' maintenance scheduling in restructured power systems. *Applied Artificial Intelligence*. 32(1): 65-84. 2018.

Foong, W.K., Simpson, A.R., Maier, H.R., Stolp, S., Ant colony optimization for power plant maintenance scheduling optimization—a five-station hydropower system. *Annals of Operations Research*. 159(1): 433-450, 2008.

Fourcade, F., Johnson, E., Bara, M., Cortey-Dumont, P., Optimizing nuclear power plant refueling with mixed-integer programming. *European Journal of Operational Research*. 97(2): 269-280, 1997.



- Froger, A., Gendreau, M., Mendoza, J. E., Pinson, É., Rousseau, L. M., Maintenance scheduling in the electricity industry: a reviews. *European Journal of Operational Research*. 251(3): 695-706, 2016.
- Froger, A., Gendreau, M., Mendoza, J. E., Pinson, E., Rousseau, L. M., A branch-and-check approach for a wind turbine maintenance scheduling problem. *Computers & Operations Research*. 88: 117-136, 2017.
- Froger, A., Gendreau, M., Mendoza, J. E., Pinson, E., Rousseau, L. M., Solving a wind turbine maintenance scheduling problem. *Journal of Scheduling*. 21(1): 53-76, 2018.
- Frost, D., Dechter, R., Optimizing with constraints: a case study in scheduling maintenance of electric power units. *Lecture Notes in Computer Science*. 469-469, 1998.
- Fu, Y., Shahidehpour, M., Li, Z., Security-constrained optimal coordination of generation and transmission maintenance outage scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*. 22(3): 1302-1313, 2007.
- Gandelli, A., Grimaccia, F., Leva, S., Mussetta, M., Ogliari, E., Hybrid model analysis and validation for PV energy production forecasting. In 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), IEEE, July 2014, p. 1957-1962, 2014.
- Gardi, F., Nouioua, K., Local search for mixed-integer nonlinear optimization: a methodology and an application. In European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, April 2011, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 167-178, 2011.
- Ge, X., Xia, S., Su, X., Mid-term integrated generation and maintenance scheduling for wind-hydro-thermal systems. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 28(5): 2528, 2018.

- Geetha, T., Swarup, K.S., coordinated preventive maintenance scheduling of genco and transco in restructured power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 31(10): 626-638, 2009.
- George-Williams, H., Patelli, E., Maintenance strategy optimization for complex power systems susceptible to maintenance delays and operational dynamics. *IEEE Transactions on Reliability*. 66(4): 1309-1330, 2017.
- Godskesen, S., Jensen, T.S., Kjeldsen, N., Larsen, R., Solving a real-life, large-scale energy management problem. *Journal of Scheduling*. 16(6): 567-583, 2013.
- Goel, H.D., Grievink, J., Weijnen, M.P., Integrated optimal reliable design, production, and maintenance planning for multipurpose process plants. *Computers & Chemical Engineering*. 27(11): 1543-1555, 2003.
- Gorge, A., Lisser, A., Zorgati, R., Stochastic nuclear outages semidefinite relaxations. *Computational Management Science*. 9(3): 363-379, 2012.
- Görener, A., Maintenance strategy selection by using WSA and TOPSIS methods under fuzzy decision environment. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*. 31(2): 159-177, 2013.
- Granger, C.W., Terasvirta, T., Modelling non-linear economic relationships. OUP Catalogue. 1993.
- Han, S.M., Chung, K.H., Kim, B.H., ISO coordination of generator maintenance scheduling in competitive electricity markets using simulated annealing. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 6(4): 431-438, 2011.
- Haykin, S., Neural networks: a comprehensive foundation. Prentice Hall PTR. 1994.
- Haykin, S., Neural networks and learning machines. Upper Saddle River: Pearson education. 3: 2009.

- Helseth, A., Fodstad, M., Mo, B., Optimal hydropower maintenance scheduling in liberalized markets. *IEEE Transactions on Power Systems*. 33(6): 6989-6998, 2018.
- Heo, J.H., Park, G.P., Yoon, Y.T., Park, J.K., Lee, S.S., Optimal maintenance strategies for transmission systems using the genetic algorithm. *Transmission and Distribution Conference Proceedings*, 2010, New Orleans, USA, p. 1–6, 2010.
- Ho, W., Integrated analytic hierarchy process and its applications—a literature review. *European Journal of Operational Research*. 186(1): 211-228, 2008.
- Huang, S.J., Generator maintenance scheduling: a fuzzy system approach with genetic enhancement. *Electric Power Systems Research*. 41(3): 233-239, 1997.
- Hwang, C.L., Yoon, K., Multiple attribute decision making: methods and applications. Springer-Verlag, 1981.
- Ilangkumaran, M., Kumanan, S., Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi-criteria decision making approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 20(7): 1009-1022, 2009.
- Ioannis, D., Nikitas, N., Application of analytic hierarchy process & topsis methodology on ships' maintenance strategies. In *Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars*. 4(1): 21-28, 2013.
- Jost, V., Savourey, D., A 0–1 integer linear programming approach to schedule outages of nuclear power plants. *Journal of Scheduling*. 16(6): 551-566, 2013.

- Jünger, M., Liebling, T.M., Naddef, D., Nemhauser, G.L., Pulleyblank, W.R., Reinelt, G., Wolsey, L.A. 50 years of integer programming 1958-2008: from the early years to the state-of-the-art. Springer Science & Business Media, 2009.
- Kalogirou, S.A., Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 5(4): 373-401, 2001.
- Khalid, A., Ioannis, K., A survey of generator maintenance scheduling techniques. *Global Journal of Researches in Engineering*. 12(1): 10-17, 2012.
- Khemmoudj, M.O.I., Porcheron, M., Bennaceur, H., When constraint programming and local search solve the scheduling problem of electricité de france nuclear power plant outages. In International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, September 2006, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 271-283, 2006.
- Kim, J.H., Park, J.B., Park, J.K., Chun, Y.H., Generating unit maintenance scheduling under competitive market environments. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 27(3): 189-194, 2005.
- Kirubakaran, B., Ilangkumaran, M., Selection of optimum maintenance strategy based on fahp integrated with gra-topsis. *Annals of Operations Research*. 245(1-2): 285-313, 2016.
- Kovacs, A., Erdős, G., Viharos, Z.J., Monostori, L., A system for the detailed scheduling of wind farm maintenance. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 60(1): 497-501. 2011.
- Kralj, B., Petrovic, R., A multiobjective optimization approach to thermal generating units maintenance scheduling. *European Journal of Operational Research*. 84(2): 481-493, 1995.

- Krishnasamy, L., Khan, F., Haddara, M., Development of a risk-based maintenance (rbm) strategy for a power-generating plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 18(2): 69-81, 2005.
- Kubler, S., Robert, J., Derigent, W., Voisin, A., Le Traon, Y., A state-of-the-art survey & testbed of fuzzy ahp (fahp) applications. *Expert Systems with Applications*. 65: 398-422, 2016.
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A.R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., Bansal, R.C., A review of multi criteria decision making (mcdm) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 69: 596-609. 2017.
- Labib, A.W., A decision analysis model for maintenance policy selection using a cmms. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 10(3): 191-202, 2004.
- Langdon, W.B., Treleaven, P.C., Scheduling maintenance of electrical power transmission networks using genetic programming. *IEE Power Series*. 220-237, 1997.
- Lei, X., Sandborn, P.A., Maintenance scheduling based on remaining useful life predictions for wind farms managed using power purchase agreements. *Renewable Energy*. 116: 188-198, 2018
- Leou, R.C., A new method for unit maintenance scheduling considering reliability and operation expense. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 28(7): 471-481, 2006.
- Li, Z., Rahman, S.M., Vega, R., Dong, B., A hierarchical approach using machine learning methods in solar photovoltaic energy production forecasting. *Energies*. 9(1): 55, 2016.

- Liao, S.H., Wen, C.H. Artificial neural networks classification and clustering of methodologies and applications—literature analysis from 1995 to 2005. *Expert Systems with Applications*. 32(1): 1-11,2007.
- Lindner, B.G., Brits, R., Van Vuuren, J.H., Bekker, J., Tradeoffs between levelling the reserve margin and minimising production cost in generator maintenance scheduling for regulated power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 101: 458-471, 2018.
- Löfsten, H., Management of industrial maintenance—economic evaluation of maintenance policies. *International Journal of Operations & Production Management*. 19(7): 716-737, 1999.
- Lusby, R., Muller, L.F., Petersen, B., A solution approach based on benders decomposition for the preventive maintenance scheduling problem of a stochastic large-scale energy system. *Journal of Scheduling*. 16(6): 605-628. 2013.
- Lv, C., Wang, J., You, S., Zhang, Z., Short-term transmission maintenance scheduling based on the benders decomposition. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 25(4): 697-712, 2015.
- Márquez, A.C., The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance. Springer Science & Business Media., 2007.
- Marwali, M.K.C., Shahidehpour, S.M., A deterministic approach to generation and transmission maintenance scheduling with network constraints. *Electric Power Systems Research*. 47(2): 101-113, 1998.
- Marwali, M.K.C., Shahidehpour, S.M., A probabilistic approach to generation maintenance scheduler with network constraints. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 21(8): 533-545, 1999a.

- Marwali, M.K.C., Shahidehpour, S.M., Long-term transmission and generation maintenance scheduling with network, fuel and emission constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*. 14(3): 1160-1165, 1999b.
- Marwali, M.K.C., Shahidehpour, S.M., Short-term transmission line maintenance scheduling in a deregulated system. In Proceedings of the 21st International Conference on Power Industry Computer Applications. Connecting Utilities, IEEE, July 1999, PICA 99, p. 31-37, 1999c.
- Marwali, M.K.C., Shahidehpour, S.M., Coordination between long-term and short-term generation scheduling with network constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*. 15(3): 1161-1167, 2000.
- Mazidi, P., Tohidi, Y., Sanz-Bobi, M.A., Strategic maintenance scheduling of an offshore wind farm in a deregulated power system. *Energies*. 10(3): 313. 2017.
- Mazidi, P., Tohidi, Y., Ramos, A., Sanz-Bobi, M.A., Profit-maximization generation maintenance scheduling through bi-level programming. *European Journal of Operational Research*. 264(3): 1045-1057, 2018.
- McCulloch, W.S., Pitts, W., A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*. 5(4): 115-133, 1943.
- Min, C.G., Kim, M.K., Park, J.K., Yoon, Y.T., Game-theory-based generation maintenance scheduling in electricity markets. *Energy*. 55: 310-318, 2013.
- Mobley, R.K., An introduction to predictive maintenance. Butterworth-Heinemann, 2002.
- Mohanta, D.K., Sadhu, P.K., Chakrabarti, R., Fuzzy reliability evaluation of captive power plant maintenance scheduling incorporating uncertain forced outage rate and load representation. *Electric Power Systems Research*. 72(1): 73-84, 2004.

- Mohanta, D.K., Sadhu, P.K., Chakrabarti, R., Deterministic and stochastic approach for safety and reliability optimization of captive power plant maintenance scheduling using ga/sa-based hybrid techniques: a comparison of results. *Reliability Engineering & System Safety*. 92(2): 187-199, 2007.
- Mollahassani-Pour, M., Abdollahi, A., Rashidinejad, M., Application of a novel cost reduction index to preventive maintenance scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 56: 235-240, 2014.
- Moro, L.M., Ramos, A., Goal programming approach to maintenance scheduling of generating units in large scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 14(3): 1021-1028, 1999.
- Muralitharan, K., Sakthivel, R., Vishnuvarthan, R., Neural network based optimization approach for energy demand prediction in smart grid. *Neurocomputing*. 273: 199-208, 2018.
- Mytakidis, T., Vlachos, A., Maintenance scheduling by using the bi-criterion algorithm of preferential anti-pheromone. *Leonardo Journal of Sciences*. 12(16): 143-164, 2008.
- Naebi Toutounchi, A., Seyed Shenava, S.J., Taheri, S.S., Shayeghi, H., Mpec approach for solving preventive maintenance scheduling of power units in a market environment. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 40(2): 436-445, 2018.
- Nazeri, A., Naderikia, R., A new fuzzy approach to identify the critical risk factors in maintenance management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 92(9-12): 3749-3783, 2017.
- Nguyen, T.A.T., Chou, S.Y., Maintenance strategy selection for improving cost-effectiveness of offshore wind systems. *Energy Conversion and Management*. 157: 86-95, 2018.



- Notton, G., Voyant, C., Fouilloy, A., Duchaud, J.L., Nivet, M.L., Some applications of ann to solar radiation estimation and forecasting for energy applications. *Applied Sciences*. 9(1): 209, 2019.
- Panchal, D., Chatterjee, P., Shukla, R.K., Choudhury, T., Tamosaitiene, J., Integrated fuzzy ahp-codas framework for maintenance decision in urea fertilizer industry. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*. 51(3): 179-196, 2017.
- Pankratz, A., Forecasting with univariate box-jenkins models: concepts and cases John Wiley & Sons. 224: 2009.
- Perez-Canto, S., Rubio-Romero, J.C., A model for the preventive maintenance scheduling of power plants including wind farms. *Reliability Engineering & System Safety*. 119: 67-75, 2013.
- Pinedo, M.L., Planning and scheduling in manufacturing and services. Springer. 2005.
- Reihani, E., Najjar, M., Davodi, M., Norouzizadeh, R., Reliability based generator maintenance scheduling using hybrid evolutionary approach. In 2010 IEEE International Energy Conference, IEEE, December 2010, p. 847-852, 2010.
- Ripley, B.D., Statistical aspects of neural networks- networks and chaos—statistical and probabilistic aspects. 50: 40-123, 1993.
- Rodriguez, J.A., Anjos, M.F., Côté, P., Desaulniers, G., Milp formulations for generator maintenance scheduling in hydropower systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 33(6): 6171-6180, 2018.
- Rosenblatt, F., The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Reviews*. 65(6): 386, 1958.

- Rozenknop, A., Calvo, R.W., Alfandari, L., Chemla, D., Létocart, L., Solving the electricity production planning problem by a column generation based heuristic. *Journal of Scheduling*. 16(6): 585-604, 2013.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E., Williams, R.J., Learning internal representations by back-propagating errors in parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition. Eds. 1986.
- Özcan, E.C., Danişan, T., Eren, T., Hidroelektrik santralların en kritik elektriksel ekipman gruplarının bakım stratejilerinin optimizasyonu için matematiksel bir model önerisi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*. 2019a (basımda).
- Özcan, E.C., Bakım yönetim sistemi: kurulum ve işletme esasları. Ankara, Türkiye, Elektrik Üretim A.Ş. Yayınları, 2016.
- Özcan, E.C., Yumuşak, R., Eren, T., Risk based maintenance in the hydroelectric Power Plants. *Energies*. 12(8): 1502, 2019b.
- Özcan, E.C., Ünlüsoy, S., Eren, T., A combined goal programming–ahp approach supported with topsis for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 78: 1410-1423, 2017.
- Saaty, T., The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill, USA, 1980.
- Samuel, G.G., Rajan, C.C.A., Hybrid: particle swarm optimization–genetic algorithm and particle swarm optimization–shuffled frog leaping algorithm for long-term generator maintenance scheduling. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 65: 432-442, 2015.

- Sankpal, P., Andrew, A., Kumanan, S., Maintenance strategies selection using fuzzy fmea and integer programming. *In Proceedings of the International Conference on Advances in Production and Industrial Engineering*. 503: 2015.
- Saraiva, J.T., Pereira, M.L., Mendes, V.T., Sousa, J.C., A simulated annealing based approach to solve the generator maintenance scheduling problem. *Electric Power Systems Research*. 81(7): 1283-1291, 2011.
- Satoh, T., Nara, K., Maintenance scheduling by using simulated annealing method (for power plants). *IEEE Transactions on Power Systems*. 6(2): 850-857, 1991.
- Schlünz, E.B., Van Vuuren, J.H., An investigation into the effectiveness of simulated annealing as a solution approach for the generator maintenance scheduling problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 53: 166-174, 2013.
- Seiti, H., Tagipour, R., Hafezalkotob, A., Asgari, F., Maintenance strategy selection with risky evaluations using rahp. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 24(5-6): 257-274, 2017.
- Shafiee, M., Maintenance strategy selection problem: an mcdm overview. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 21(4): 378-402, 2015.
- Shagluf, A., Parkinson, S., Longstaff, A.P., Fletcher, S., Adaptive decision support for suggesting a machine tool maintenance strategy: from reactive to preventative. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 24(3): 376-399, 2018.
- Shahin, A., Pourjavad, E., Shirouyehzad, H., Selecting optimum maintenance strategy by analytic network process with a case study in the mining industry. *International Journal of Productivity and Quality Management*. 10(4): 464-483, 2012.

- Sharda, R., Neural networks for the ms/or analyst: an application bibliography. *Interfaces*. 24(2): 116-130, 1994.
- Shyjith, K., Ilangkumaran, M., Kumanan, S., Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 14(4): 375-386, 2008.
- Shankaracharya, D.O., Samanta, S., Vidyarthi, A.S., Computational intelligence in early diabetes diagnosis: a review. *The Review of Diabetic Studies: RDS*. 7(4): 252, 2010.
- Silva, E.L., Morozowski, M., Fonseca, L.G.S., Oliveira, G.C., Melo, A.C.G., Mello, J. C.O., Transmission constrained maintenance scheduling of generating units: a stochastic programming approach. *IEEE Transactions on Power Systems*. 10(2): 695-701, 1995.
- Suganthi, L., Samuel, A.A., Energy models for demand forecasting—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(2): 1223-1240, 2012.
- Suresh, K., Kumarappan, N., Hybrid improved binary particle swarm optimization approach for generation maintenance scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*. 9: 69-89, 2013.
- Taha, H.A., Integer programming: theory, applications, and computations. Academic Press. 2014.
- TEİAŞ. Aylık Elektrik İstatistikleri. 2018. <https://www.teias.gov.tr/tr/elektrik-istatistikleri>. (Erişim tarihi: 11 Mayıs 2019).
- Thor, J., Ding, S.H., Kamaruddin, S., Comparison of multi criteria decision making methods from the maintenance alternative selection perspective. *The International Journal of Engineering and Science*. 2(6): 27-34, 2013.

- Umamaheswari, E., Ganesan, S., Abirami, M., Subramanian, S., Reliability/risk centered cost effective preventive maintenance planning of generating units. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 35(9): 2052-2079, 2018.
- Wang, J.J., Jing, Y.Y., Zhang, C.F., Zhao, J.H., Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13(9): 2263-2278, 2009.
- Wang, Y., Handschin, E., A new genetic algorithm for preventive unit maintenance scheduling of power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 22(5): 343-348, 2000.
- Wang, Z., Srinivasan, R.S., A review of artificial intelligence based building energy use prediction: contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 75: 796-808, 2017.
- Wang, C., Wang, Z., Short-term transmission line maintenance scheduling with wind energy integration. In Power & Energy Society General Meeting, IEEE, July 2017, p. 1-5, 2017.
- Weron, R., Electricity price forecasting: a review of the state-of-the-art with a look into the future. *International Journal of Forecasting*. 30(4): 1030-1081, 2014.
- White, H., Learning in artificial neural networks: a statistical perspective. *Neural Computation*. 1(4): 425-464, 1989.
- Wong, B.K., Selvi, Y., Neural network applications in finance: a review and analysis of literature (1990–1996). *Information & Management*. 34(3): 129-139, 1998.
- Wu, L., Shahidehpour, M., Li, T., Genco's risk-based maintenance outage scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*. 23(1). 127-136, 2008.

- Vaidya, O.S., Kumar, S., Analytic hierarchy process: an overview of applications. *European Journal of Operational Research*. 169(1): 1-29, 2006.
- Vahdani, B., Hadipour, H., Sadaghiani, J.S., Amiri, M., Extension of vikor method based on interval-valued fuzzy sets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 47(9-12): 1231-1239, 2010.
- Velasquez, M., Hester, P.T., An analysis of multi-criteria decision making methods. *International Journal of Operations Research*. 10(2): 56-66, 2013.
- Volkanovski, A., Mavko, B., Boševski, T., Čauševski, A., Čepin, M., Genetic algorithm optimisation of the maintenance scheduling of generating units in a power system. *Reliability Engineering & System Safety*. 93(6): 779-789, 2008.
- Voyant, C., Notton, G., Kalogirou, S., Nivet, M.L., Paoli, C., Motte, F., Fouilloy, A., Machine learning methods for solar radiation forecasting: a review. *Renewable Energy*. 105: 569-582, 2017.
- Yamayee, Z.A., Maintenance scheduling: description, literature survey, and interface with overall operations scheduling. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 8: 2770-2779, 1982.
- Yare, Y., Venayagamoorthy, G.K., Optimal maintenance scheduling of generators using multiple swarms-mdpso framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 23(6): 895-910, 2010.
- Yellen, J., Al-Khamis, T.M., Vemuri, S., Lemonidis, L., A decomposition approach to unit maintenance scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*. 7(2): 726-733, 1992.
- Yildirim, M., Sun, X.A., Gebraeel, N.Z., Sensor-driven condition-based generator maintenance scheduling—part 1: maintenance problem. *IEEE Transactions on Power Systems*. 31(6): 4253-4262, 2016.

- Yuce, B., Rezgui, Y., Mourshed, M., Ann—ga smart appliance scheduling for optimised energy management in the domestic sector. *Energy and Buildings*. 111: 311-325, 2016.
- Zhan, J.P., Guo, C.X., Wu, Q.H., Zhang, L.L., Fu, H.J., Generation maintenance scheduling based on multiple objectives and their relationship analysis. *Journal of Zhejiang University Science C*. 15(11): 1035-1047, 2014.
- Zhang, G., Patuwo, B.E., Hu, M.Y., Forecasting with artificial neural networks: the state of the art. *International Journal of Forecasting*. 14(1): 35-62, 1998.
- Zhong, S., Pantelous, A.A., Beer, M., Zhou, J., Constrained non-linear multi-objective optimisation of preventive maintenance scheduling for offshore wind farms. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 104: 347-369, 2018.
- Zhu, J., Xuan, P., Xie, P., Hong, C., Yan, W., Generation and transmission equipment maintenance scheduling with load transfer. In Power & Energy Society General Meeting, IEEE, July 2017, p. 1-5, 2017b.
- Zhu, J., Yan, W., Lin, Y., Yu, P., Xiong, X., A new multi-objective immune algorithm for generation and transmission equipment maintenance scheduling. *International Journal of Power and Energy Systems*. 37(3): 2017a.
- Zyoud, S.H., Fuchs-Hanusch, D., A bibliometric-based survey on ahp and topsis techniques. *Expert Systems with Applications*. 78: 158-181, 2017.

## EKLER

EK 1. AHP yönteminde kullanılan ikili karşılaştırma matrisi

|    | C1    | C2    | C3    | C4    | C5    | C6    | C7    | C8    | C9    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C1 | 1,000 | 0,125 | 2,000 | 1,000 | 0,111 | 1,000 | 0,500 | 2,000 | 1,000 |
| C2 | 8,000 | 1,000 | 9,000 | 5,000 | 0,167 | 3,000 | 5,000 | 9,000 | 5,000 |
| C3 | 0,500 | 0,111 | 1,000 | 0,250 | 0,111 | 0,400 | 0,500 | 1,000 | 1,000 |
| C4 | 1,000 | 0,200 | 4,000 | 1,000 | 0,143 | 1,000 | 2,000 | 3,000 | 1,000 |
| C5 | 9,000 | 6,000 | 9,000 | 7,000 | 1,000 | 8,000 | 8,000 | 9,000 | 3,000 |
| C6 | 1,000 | 0,333 | 2,500 | 1,000 | 0,125 | 1,000 | 1,000 | 3,000 | 1,000 |
| C7 | 2,000 | 0,200 | 2,000 | 0,500 | 0,125 | 1,000 | 1,000 | 2,000 | 1,000 |
| C8 | 0,500 | 0,111 | 1,000 | 0,333 | 0,111 | 0,333 | 0,500 | 1,000 | 0,500 |
| C9 | 1,000 | 0,200 | 1,000 | 1,000 | 0,333 | 1,000 | 1,000 | 2,000 | 1,000 |



EK 2. TOPSIS yönteminde kullanılan veri matrisi örneği

| Ekipman adı     | C1             | C2           | C3                   | C4          | C5           | C6  | C7          | C8         | C9          |
|-----------------|----------------|--------------|----------------------|-------------|--------------|-----|-------------|------------|-------------|
| Ayrıcı          | Hiç olmaz      | Ünite durumu | İlave iş gerektirir  | Uzun süreli | Ünite durumu | Var | Elektriksel | Bilinmiyor | Tespiti zor |
| Generator       | Hiç olmaz      | Ünite durumu | İlave iş gerektirir  | Uzun süreli | Ünite durumu | Var | Elektriksel | Bilinmiyor | Tespiti zor |
| İkaz trafosu    | Hiç olmaz      | Ünite durumu | İlave iş gerektirmez | Bilinmiyor  | Ünite durumu | Var | Elektriksel | Bilinmiyor | Tespiti zor |
| Kesici          | Her zaman olur | Ünite durumu | İlave iş gerektirir  | Uzun süreli | Ünite durumu | Var | Elektriksel | Bilinmiyor | Tespiti zor |
| Akım trafosu    | Her zaman olur | Ünite durumu | İlave iş gerektirir  | Uzun süreli | Ünite durumu | Var | Elektriksel | Bilinmiyor | Tespiti zor |
| Gerilim trafosu | Her zaman olur | Ünite durumu | İlave iş gerektirir  | Uzun süreli | Ünite durumu | Var | Elektriksel | Bilinmiyor | Tespiti zor |
| Ana güç trafosu | Her zaman olur | Ünite durumu | İlave iş gerektirir  | Bilinmiyor  | Ünite durumu | Var | Elektriksel | Bilinmiyor | Tespiti zor |

EK 3. TOPSIS yönteminde kullanılan karşılaştırma veri örneği nümerik hali

| Ekipman adı     | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Ayrıcı          | 3  | 7  | 5  | 1  | 10 | 3  | 1  | 3  | 3  |
| Generator       | 3  | 7  | 5  | 1  | 10 | 3  | 1  | 3  | 3  |
| İkaz trafosu    | 3  | 7  | 1  | 1  | 10 | 3  | 1  | 3  | 3  |
| Kesici          | 1  | 7  | 5  | 1  | 10 | 3  | 1  | 3  | 3  |
| Akım trafosu    | 1  | 7  | 5  | 1  | 10 | 3  | 1  | 3  | 3  |
| Gerilim trafosu | 1  | 7  | 5  | 1  | 10 | 3  | 1  | 3  | 3  |
| Ana güç trafosu | 1  | 7  | 5  | 1  | 10 | 3  | 1  | 3  | 3  |

EK 4. Matematiksel modellerde kullanılan veriler

| Parametre | Birim              | Değer                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T_m$     | <i>adam*dakika</i> | <i>1.200.000</i>                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $T_c$     | <i>TL</i>          | <i>3.650.000</i>                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $M_i$     |                    | <i>90</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $C_{ij}$  | <i>TL</i>          | $\begin{bmatrix} 29.840 & 44.685 & 121.260 & 597.800 \\ 14.995 & 44.810 & 119.860 & 7.498 \\ 7.498 & 0 & 29.990 & 120.360 \\ 7.498 & 0 & 29.990 & 120.360 \\ 15.045 & 67.115 & 600.000 & 597.800 \\ 15.045 & 29.840 & 119.410 & 121.360 \\ 175 & 59.680 & 359.180 & 238.720 \end{bmatrix}$ |
| $D_{ij}$  | <i>dakika</i>      | $\begin{bmatrix} 120 & 60 & 480 & 2400 \\ 60 & 120 & 480 & 30 \\ 30 & 500 & 120 & 480 \\ 30 & 500 & 120 & 480 \\ 60 & 240 & 960 & 2400 \\ 60 & 120 & 480 & 480 \\ 60 & 240 & 1440 & 960 \end{bmatrix}$                                                                                     |
| $Cr_i$    |                    | [100, 91.55, 91.55, 91.55, 91.55, 95.67, 100]                                                                                                                                                                                                                                              |
| $W_j$     |                    | [0.25237236, 0.413479883, 0.295101763, 0.039045987]                                                                                                                                                                                                                                        |
| $T_p$     |                    | <i>400</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| $T_c$     | <i>TL</i>          | <i>418.000</i>                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $C_{ik}$  | <i>TL</i>          | $\begin{bmatrix} 50 & 50 & 100 & 100 & 400 \\ 100 & 1.400 & 1.500 & 1.500 & 2.500 \\ 25 & 5.700 & 6.500 & 6.500 & 6.500 \\ 250 & 250 & 630 & 650 & 750 \\ 50 & 100 & 100 & 250 & 250 \\ 30 & 125 & 700 & 700 & 750 \\ 50 & 100 & 100 & 250 & 250 \end{bmatrix}$                            |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             |                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $D_{ik}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $saat$      | $\begin{bmatrix} 0.25 & 0.33 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 2 & 2 & 3 & 40 \\ 0.25 & 1 & 1 & 2 & 40 \\ 0.25 & 0.5 & 0.5 & 1 & 16 \\ 0.25 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.25 & 0.33 & 0.5 & 0.5 & 4 \\ 0.25 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$ |
| $M_{ik}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | $adam*saat$ | $\begin{bmatrix} 0.5 & 0.67 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 8 & 8 & 15 & 320 \\ 0.5 & 3 & 3 & 8 & 240 \\ 0.5 & 1 & 1 & 2 & 64 \\ 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.5 & 0.67 & 1 & 1 & 16 \\ 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$                                   |
| $T_{ik}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |             | $\begin{bmatrix} 52 & 13 & 4 & 2 & 1 \\ 52 & 13 & 4 & 2 & 1 \\ 52 & 13 & 4 & 2 & 1 \\ 52 & 13 & 4 & 2 & 1 \\ 52 & 13 & 4 & 2 & 1 \\ 52 & 13 & 4 & 2 & 1 \\ 52 & 13 & 4 & 2 & 1 \end{bmatrix}$                                              |
| $T_{makj}(saat)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |             |                                                                                                                                                                                                                                            |
| [40.43,50.53,50.97,47.95,47.97,49.05,48.61,48.06,49.37,49.92,47.21,49.65,46.33,47.14,49.74,45.3,51.68,49.16,57.45,64.9,64.64,64.08,65.99,64.38,64.14,65.62,64.14,63.91,64.72,64.48,55.41,62.07,62.17,60.42,60.38,61.19,65.26,65.34,65.41,65.42,65.44,65.42,65.41,65.41,65.39,65.43,65.43,65.41,65.42,65.26,65.36,65.13] |             |                                                                                                                                                                                                                                            |

EK 5. Üretim tahmininde kullanılan girdi verilerinden örnekler

| Gün | Yıl | Harcanan su miktarı<br>(m <sup>3</sup> ) |
|-----|-----|------------------------------------------|
| 1   | 10  | 3.232.500                                |
| 4   | 10  | 8.898.750                                |
| 5   | 10  | 9.356.250                                |
| 6   | 10  | 8.692.500                                |
| 7   | 10  | 4.233.750                                |
| 8   | 10  | 9.348.750                                |
| 10  | 10  | 8.111.250                                |
| 11  | 10  | 5.351.250                                |
| 14  | 10  | 2.270.180                                |
| 15  | 10  | 5.191.120                                |
| 17  | 10  | 10.359.800                               |
| 18  | 10  | 12.656.250                               |
| 19  | 10  | 11.025.000                               |
| 20  | 10  | 9.656.680                                |
| 22  | 10  | 10.404.680                               |
| 23  | 10  | 10.692.660                               |
| 24  | 10  | 9.361.220                                |
| 25  | 10  | 10.432.810                               |
| 26  | 10  | 10.294.800                               |
| 28  | 10  | 2.547.590                                |
| 29  | 10  | 7.154.140                                |
| 30  | 10  | 6.650.590                                |
| 31  | 10  | 8.332.720                                |
| 33  | 10  | 5.108.840                                |
| 34  | 10  | 8.100.840                                |
| 36  | 10  | 6.165.000                                |
| 37  | 10  | 3.888.750                                |
| 38  | 10  | 1.047.200                                |
| 39  | 10  | 1.941.060                                |
| 40  | 10  | 0                                        |
| 41  | 10  | 1.282.820                                |
| 42  | 10  | 650.760                                  |
| 43  | 10  | 706.860                                  |
| 44  | 10  | 0                                        |
| 45  | 10  | 647.020                                  |
| 48  | 10  | 0                                        |
| 49  | 10  | 2.595.000                                |
| 50  | 10  | 4.533.750                                |
| 52  | 10  | 4.860.000                                |

| Gün | Yıl | Harcanan su miktarı<br>(m <sup>3</sup> ) |
|-----|-----|------------------------------------------|
| 53  | 10  | 5.816.250                                |
| 54  | 10  | 2.565.640                                |
| 55  | 10  | 3.882.120                                |
| 57  | 10  | 649.020                                  |
| 58  | 10  | 2.890.750                                |
| 59  | 10  | 962.340                                  |
| 60  | 10  | 5.378.660                                |
| 61  | 10  | 3.905.310                                |
| 63  | 10  | 9.709.040                                |
| 64  | 10  | 2.584.340                                |
| 69  | 10  | 10.244.880                               |
| 70  | 10  | 7.113.110                                |
| 71  | 10  | 645.290                                  |
| 72  | 10  | 0                                        |
| 74  | 10  | 10.988.580                               |
| 75  | 10  | 10.363.540                               |
| 76  | 10  | 10.346.250                               |
| 77  | 10  | 8.025.000                                |
| 78  | 10  | 4.563.750                                |
| 80  | 10  | 8.426.070                                |
| 82  | 10  | 9.936.720                                |
| 83  | 10  | 10.869.220                               |
| 84  | 10  | 5.121.290                                |
| 85  | 10  | 7.094.040                                |
| 87  | 10  | 13.157.640                               |
| 89  | 10  | 7.831.810                                |
| 90  | 10  | 9.921.240                                |
| 91  | 10  | 4.158.960                                |
| 92  | 10  | 9.932.400                                |
| 93  | 10  | 11.241.840                               |
| 94  | 10  | 8.403.480                                |
| 99  | 10  | 10.333.620                               |
| 100 | 10  | 11.489.280                               |
| 102 | 10  | 11.302.280                               |
| 104 | 10  | 0                                        |
| 105 | 10  | 648.750                                  |
| 106 | 10  | 652.500                                  |
| 107 | 10  | 333.750                                  |
| 109 | 10  | 326.250                                  |

| Gün | Yıl | Harcanan su miktarı<br>(m <sup>3</sup> ) |
|-----|-----|------------------------------------------|
| 110 | 10  | 322.500                                  |
| 111 | 10  | 0                                        |
| 112 | 10  | 322.500                                  |
| 114 | 10  | 0                                        |
| 115 | 10  | 326.250                                  |
| 117 | 10  | 0                                        |
| 118 | 10  | 326.250                                  |
| 120 | 10  | 322.500                                  |
| 121 | 10  | 0                                        |
| 122 | 10  | 322.500                                  |
| 124 | 10  | 330.000                                  |
| 125 | 10  | 330.000                                  |
| 126 | 10  | 326.250                                  |
| 127 | 10  | 326.250                                  |
| 128 | 10  | 345.000                                  |
| 129 | 10  | 315.000                                  |
| 130 | 10  | 326.250                                  |
| 131 | 10  | 356.250                                  |
| 132 | 10  | 322.500                                  |
| 133 | 10  | 326.250                                  |
| 135 | 10  | 322.500                                  |
| 136 | 10  | 326.250                                  |
| 138 | 10  | 326.250                                  |
| 139 | 10  | 318.750                                  |
| 140 | 10  | 326.250                                  |
| 142 | 10  | 322.500                                  |
| 143 | 10  | 326.250                                  |

| Gün | Yıl | Harcanan su miktarı<br>(m <sup>3</sup> ) |
|-----|-----|------------------------------------------|
| 146 | 10  | 326.250                                  |
| 148 | 10  | 327.120                                  |
| 149 | 10  | 323.360                                  |
| 150 | 10  | 323.360                                  |
| 151 | 10  | 327.120                                  |
| 153 | 10  | 323.360                                  |
| 154 | 10  | 323.360                                  |
| 155 | 10  | 319.600                                  |
| 156 | 10  | 327.120                                  |
| 157 | 10  | 323.360                                  |
| 158 | 10  | 1.368.640                                |
| 159 | 10  | 327.120                                  |
| 162 | 10  | 243.750                                  |
| 164 | 10  | 3.555.000                                |
| 165 | 10  | 326.250                                  |
| 166 | 10  | 326.250                                  |
| 167 | 10  | 326.250                                  |
| 169 | 10  | 326.250                                  |
| 170 | 10  | 322.500                                  |
| 171 | 10  | 322.500                                  |
| 173 | 10  | 330.000                                  |
| 175 | 10  | 326.250                                  |
| 177 | 10  | 326.250                                  |
| 178 | 10  | 330.000                                  |
| 179 | 10  | 322.500                                  |
| 180 | 10  | 0                                        |
| 181 | 10  | 330.000                                  |