

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDROELEKTRİK SANTRALLARDA BAKIM STRATEJİ SEÇİMİ

RABİA YUMUŞAK

HAZİRAN 2020

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Rabia YUMUŞAK tarafından hazırlanan “Hidroelektrik Santrallarda Bakım Strateji Seçimi” 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

Doç. Dr. Evrencan ÖZCAN

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr., Serkan ALTUNTAŞ _____

Üye (Danışman) : Doç. Dr., Evrencan ÖZCAN _____

Üye : Dr. Öğr. Üyesi, Hacı Mehmet ALAKAŞ _____

18/06/2020

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 STRATEJİ SEÇİMİ

YUMUŞAK, Rabia

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Evrencan ÖZCAN

Ortak Danışman: Prof. Dr. Tamer EREN

Haziran 2020, 92 sayfa

Ülkelerin küresel rekabet güçlerini artırmak için çevreye duyarlılık, güvenilirlik, verimlilik, ekonomiklik ve kesintisizlik ilkelerinden oluşan sürdürülebilir enerji politikalarını geliştirmeleri ve enerji arzını bu perspektifte devam ettirmeleri gerekliliği dünyanın ittifak ettiği bir gerçektir. Sürdürülebilir enerji arzının küresel dünya düzeni üzerindeki bu etkisinin yanı sıra, elektrik üretim santrallerindeki bakım süreçlerinin, zaman, malzeme ve işçilik kullanımı ile üretim kaybından doğan yüksek maliyetleri gerektirmesi göz önüne alındığında, bakımın bir sistem dahilinde yönetilmesi kesin bir sonuç halini almaktadır. Bu durum da elektrik üretim santrallerinde analitik ve uygulanabilir bir bakım planlanmasının yapılmasını bir zorunluluk haline getirmektedir. Bu bağlamda bu çalışmada, Türkiye'nin enerji arz güvenliğine toplam üretim içerisindeki beşte birlik payı ile direkt olarak etki eden hidroelektrik santrallerden büyük ölçekli bir tanesinde bakım planlanmasının en kritik ve ilk aşaması olan bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Zor ve karmaşık bu probleme çözüm getirebilmek adına uygulama süreci üç probleme bölünerek aşamalandırılmıştır. İlk olarak santralin en kritik ekipmanına literatürde sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP-COPRAS

kombinasyonu ile çözüm bulunmuştur. Ardından problem boyutu arttırılarak 571 elektriksel ekipmana uygulanması gereken optimal bakım stratejileri AHP-COPRAS-TP yöntemleri ile belirlenmiştir. Son olarak 988 mekanik ekipmana uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi yapay sinir ağı yöntemi ile ele alınmıştır. Yapılan tez çalışması sonucunda literatürde ilk defa bu problem sistem boyutunda ele alınmış ve toplamda 1558 ekipman için bakım stratejisi belirlenmiştir. Ayrıca 571 elektriksel ekipman sistem dahilinde ele alınarak optimal sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte literatürde ilk defa yıpranma oranı gibi sistemin özel kısıtları modele yansıtılmış ve literatürde ilk defa bu problemin çözümünde yapay sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak bakım strateji seçimi problemi için ele alınan üç farklı problem ile farklı çözüm önerileri sunulmuş ve önerilen modeller karşılaştırılarak literatüre katkı sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bakım yönetimi, bakım strateji optimizasyonu, hidroelektrik santral, tam sayılı programlama, AHP, COPRAS, yapay sinir ağı.

ABSTRACT

MAINTENANCE STRATEGY SELECTION IN HYDROELECTRIC POWER PLANTS

YUMUŞAK, Rabia

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Industrial Engineering, Master Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Evrencan ÖZCAN

Co-Supervisor: Prof. Dr. Tamer EREN

June 2020, 92 pages

In order to increase the global competitiveness of countries, it is a fact that the world has allied with the necessity to develop sustainable energy policies consisting of the principles of environmental awareness, reliability, efficiency, economy and uninterruptedness, and the continuation of energy supply in this perspective. Considering that the maintenance processes in the power plants require high costs due to the use of time, material and workmanship and loss of generation in addition to this impact on the global world order of sustainable energy supply, management of the maintenance within a system becomes a definite conclusion. In this context, this study to determine the most critical phase of the maintenance strategy of Turkey's security of energy supply to total generation in the directly acting hydroelectric large-scale one in the maintenance planning of the plant with the union share of the problems were discussed. In order to find a solution to this difficult and complex problem, the application process was divided into three problems. In each stage, the solution size was expanded and the solution approaches in the literature were evaluated, and the structure of the problem was evaluated, and solutions were produced with different combinations of methods. First of all, the most critical equipment of the power plant

was solved with AHP-COPRAS combination, which is a multi-criteria decision making method frequently used in the literature. Afterwards, optimal maintenance strategies that should be applied to 571 electrical equipment by increasing the problem size were determined by AHP-COPRAS-TP methods. Finally, the problem of determining the maintenance strategies to be applied to 988 mechanical equipment is addressed by the artificial neural network method. As a result of the thesis study, this problem was handled for the first time in the literature, and a maintenance strategy was determined for a total of 1558 equipment. In addition, 571 electrical equipment is handled within the system, and optimal results are obtained. However, for the first time in the literature, the system's special constraints were reflected in the model and for the first time in the literature, artificial neural network method was used to solve this problem. As a result, different solution suggestions were presented with three different problems for the maintenance strategy selection problem, and the proposed models were compared and contributed to the literature.

Keywords: Maintenance management, maintenance strategy optimization, hydroelectric power plant, integer programming, AHP, COPRAS, artificial neural network.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca değerli katkıları ile beni yönlendiren ve karşılaştığım bütün sorunlarda yardımını esirgemeyen tez danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Evrencan ÖZCAN hocama ve Sayın Prof. Dr. Tamer EREN hocama, mesleki tecrübeleri ile bana daima yol gösteren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hacı Mehmet ALAKAŞ hocama, sektörel bilgi birikimiyle değerli katkılar sağlayan Elektrik ve Elektronik Mühendisi Sayın Ferdi YILDIRIM'a, ömrüm boyunca desteğini ve sevgisini her zaman hissettiren aileme, dostlarıma ve hayatımda güzel izler bırakan herkese teşekkür ederim.

Bu tez Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından 2019/087 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.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ SEKTÖRÜ ve BAKIM.....	6
3. HİDROELEKTRİK SANTRALLARDA İŞLETME ve BAKIM ESASLARI .	10
4. YÖNTEMLER	15
4.1. AHP Yöntemi.....	15
4.2.COPRAS Yöntemi	19
4.3. Tam Sayılı Doğrusal Programlama	21
4.4. Yapay Sinir Ağları	22
5. LİTERATÜR TARAMASI.....	25
6. UYGULAMA	38
6.1. Problem-1'in Çözümü.....	40
6.2. Problem-2'nin Çözümü.....	42
6.2.1. Yıpranma Oranlarının Hesabı	44
6.2.2. Bakım Stratejilerinin Katma Değerinin Hesaplanması	48
6.2.3.Ekipman Kritiklik Seviyelerinin Hesaplanması.....	51

6.2.4. 0-1 TP ile Bakım Strateji Optimizasyonu	54
6.3. Problem-3'ün Çözümü	61
7. TARTIŞMA	68
8. SONUÇ	72
KAYNAKLAR	75



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Saaty önem skalası.....	16
Çizelge 4.2. RI değerleri	18
Çizelge 5.1. Çok kriterli karar verme yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar	27
Çizelge 5.2. Klasik ve bulanık mantık temelli çalışmalar	28
Çizelge 5.3. Çok kriterli karar verme yöntemleri ile çözülen çalışmaların uygulama alanları.....	29
Çizelge 5.4. Çok kriterli karar verme yöntem entegrasyonu kullanılan çalışmalar ...	30
Çizelge 5.5. Yapay zeka yöntemleri ile yapılan çalışmalar	33
Çizelge 6.1. İkili karşılaştırma matrisi	41
Çizelge 6.2. Kriter ağırlıkları	41
Çizelge 6.3. Karar matrisi	42
Çizelge 6.4. Performans indeksi	42
Çizelge 6.5. Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi	45
Çizelge 6.6. Kriter ağırlıkları	45
Çizelge 6.7. Devreye alındığı zaman kriteri için ikili karşılaştırma matrisi	46
Çizelge 6.8. Çalışma saati kriteri için ikili karşılaştırma matrisi	47
Çizelge 6.9. Üretim miktarı kriteri için ikili karşılaştırma matrisi	47
Çizelge 6.10. Ünitelerin yıpranma oranları.....	48
Çizelge 6.11. İkili karşılaştırma matrisi	50

Çizelge 6.12. Fayda kriteri için ikili karşılaştırma matrisi	50
Çizelge 6.13. Maliyet kriteri için ikili karşılaştırma matrisi.....	50
Çizelge 6.14. Süre kriteri için ikili karşılaştırma matrisi	50
Çizelge 6.15. Gereksinim kriteri için ikili karşılaştırma matrisi.....	51
Çizelge 6.16. Bakım stratejilerinin katma değeri.....	51
Çizelge 6.17. Kriter ağırlıkları	53
Çizelge 6.18. Karar matrisinden örnekler	53
Çizelge 6.19. Bazı ekipmanların kritiklik seviyeleri	54
Çizelge 6.20. Problem-2'nin sonuçları	59
Çizelge 6.21. Örnek veri seti.....	65
Çizelge 6.22. YSA modelinin sonuçları	67
Çizelge 7.1. Sonuçların karşılaştırılması	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

Şekil 2.1. Türkiye'nin Şubat 2020 lisanslı elektrik kurulu gücü (EPDK Şubat Ayı Sektör Raporu, 2020)	7
Şekil 2.2. Kaynaklara göre üretim oranları (EPDK Şubat Ayı Sektör Raporu, 2020)	7
Şekil 4.1. Basit bir YSA yapısı	23
Şekil 5.1. Ding ve Kamaruddin'in literatür sınıflandırması (Ding ve Kamaruddin, 2015)	26
Şekil 6.1. Uygulama akış şeması	39
Şekil 6.2. Problem-2 uygulama akış şeması	43
Şekil 6.3. Yıpranma oranı hesabında hiyerarşik yapı	45
Şekil 6.4. Katma değer hesabında hiyerarşik yapı	49
Şekil 6.5. Strateji sınıfları	62
Şekil 6.6. Problem-3'ün şematik gösterimi	63
Şekil 6.7. YSA modelinin yapısı	64
Şekil 6.8. YSA modelinin regresyon grafiği.....	66

KISALTMALAR DİZİNİ

AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi
ANP	Analitik Ağ Prosesi
COPRAS	COMplex PROportional ASsessment
ELECTRE	Elemination and Choice Expressing Reality
GA	Genetik Algoritma
SAW	Simple Additive Weighting
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
TP	Tam Sayılı Programlama
VIKOR	VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje
YSA	Yapay Sinir Ağı

1. GİRİŞ

Elektrik üretim santralleri, sürdürülebilir enerji arzını sağlamak gibi kapsamlı bir amaca sahip büyük ölçekli altyapı yatırımlarıdır. Bu amacın geniş kapsamını, kesintisiz, güvenilir, verimli, ekonomik ve çevreye duyarlı elektrik üretiminin eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi oluşturmaktadır. Bu tesislerde, ekonomik ömrün sürdürülebilirlik perspektifinden uzaklaşmadan mümkün olan en üst seviyede kullanılması sürecinde ise, santrallerin imalatçı kuruluşlarca verilen işletme direktiflerine uygun olarak işletilmesi ve bakım felsefesinin rasyonel bir şekilde uygulanması iki temel sacayağıdır. Başka bir ifade ile elektrik üretim santrallerinde uygun işletme kuralları ile eş zamanlı olarak uygun bakım proseslerinin yürütülmesi sürdürülebilir enerji arzı için büyük önem arz etmektedir (Özcan vd., 2017).

Bakım, bir makine veya ekipmanın fonksiyonlarını ekonomik ömrü içerisinde eksiksiz bir şekilde gerçekleştirerek korunması için teknik eylemler bütünü olarak ifade edilmektedir (Marquez, 2007). Bakım faaliyetlerinin temel amacı ise, üretimin verimlilik ve etkinlik düzeyini en üst seviyeye çıkartıp güvenilirliği artırmaktır. Bu amaç, bakımı üretim için yardımcı bir süreç olmaktan çıkartıp, üretimin belirli bir verimlilik ve etkinlik hedefine ulaşması için temel proseslerden biri haline getirmektedir (Özcan, 2016). Bu çalışmanın gerçekleştirildiği elektrik üretim tesisleri gibi sürekli üretim sistemlerinde, arızalardan kaynaklı üretim duruşlarının sonucu olan üretim kaybı maliyetleri ve bakım için gerekli zaman, iş gücü ve malzeme ihtiyaçları göz önüne alındığında bakım, maliyet kalemi yüksek bir prosestir. Bu kapsamda, elektrik üretim santrallerinde sürdürülebilir enerji arz güvenliği hedefini gerçekleştirmek için kritik öneme sahip bakımın bir sistem dahilinde yönetilmesi gerekmektedir.

Toplumsal refah üzerinde de büyük etkisi olan bu tesislerde bakım yönetim sisteminin en kritik fazını bakım planlaması oluşturmaktadır. Bakım planlamasının vazgeçilmez ilk aşaması ise ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesidir. Bakım planlamasının önemli ve maliyetli olması sonucunda makine veya teçhizata uygulanacak optimal bakım stratejilerinin belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Çünkü uygulanan yanlış bakım stratejileri sürdürülebilir üretim amacını gerçekleştirmede

büyük engeller oluşturacaktır. Örneğin, ekipmanın arızalanma ihtimalini artırmakla kalmayıp yüksek bakım maliyetlerine ve ürün kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır (Hashemi vd., 2020). Maliyet, arz güvenliği ve ürün kalitesi gibi birçok faktör göz önünde bulundurulduğunda, ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi, etkin ve uygulanabilir bir bakım planlamasının vazgeçilmez ilk aşaması olduğu sonucuna varılmaktadır. Çünkü bütün bakım ve onarım faaliyetleri seçilen bakım stratejilerine göre yapılmaktadır (Shafiee, 2015). Literatürde güvenilirlik tabanlı bakım (Zhang vd., 2016), durum tabanlı bakım (Alaswad ve Xiang, 2017), risk tabanlı bakım (Rusin ve Wojacek, 2019), önleyici bakım (Kim vd., 2004), kestirimci bakım (Nguyen vd., 2015), düzeltici bakım (Wang vd., 2014) ve revizyon bakım (Özcan vd., 2017) bakım stratejisi yer almaktadır. Bu stratejilerden bu çalışmanın uygulama yeri olan hidroelektrik santrallarda uygulanan dört bakım stratejisi vardır. Bu stratejiler periyodik, revizyon, kestirimci ve arıza bakımıdır. Bu çalışmada büyük ölçekli bir hidroelektrik santraldaki ekipmanlara uygulanması gereken bakım stratejileri araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında hidroelektrik santrallardaki ekipmanlara, literatürdeki mevcut çözümler değerlendirilerek ekipmanlara uygulanacak en uygun bakım stratejilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak generatör ekipmanı için uygun bakım stratejisi AHP-COPRAS yöntemleri ile seçilmiştir. İkinci aşamada santral yüzlerce ekipmandan oluşmasından dolayı çok kriterli karar verme yöntemleri yetersiz kalmıştır. Bu sebepten dolayı literatürde uygulamaları mevcut olan 0-1 tam sayılı programlama (TP) yöntemi kullanılarak hidroelektrik santraldaki 571 elektriksel ekipman için bakım strateji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ardından bu sonuçlar bir YSA modeline öğretilerek 988 mekanik ekipman için bakım stratejileri belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda literatüre sağlanan katkılar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Önerilen TP modeli kapsamında 571 elektriksel ekipmanın optimal bakım stratejileri belirlenmiştir. Literatürde ilk defa bakım strateji optimizasyonu probleminde bu kadar büyük boyutta bir probleme optimal sonuç veren bir model önerilmiştir.

- TP modeli ile literatürde ilk defa yıpranma etkisi çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ile hesaplanıp modele yansıtılmış ve modelin gerçek hayat tutarlılığı sağlanmıştır.
- TP modelinde sistemin üretim duruş süresi minimize edilerek birçok amacı temsil eden tek bir amaç ile, sistemin gerçek hayattaki niteliklerini yansıtacak şekilde bir model önerilmiştir. Başka bir ifade ile üretim duruşlarının minimizasyonu amacı, maliyet minimizasyonu, risk faktörlerinin minimizasyonu ve güvenilirlik maksimizasyonu gibi birçok amacı kapsamaktadır.
- Literatürde bakım strateji optimizasyonu problemi için AHP-COPRAS-TP yöntemlerinin entegrasyonu ilk defa kullanılmıştır. Ayrıca, model için gerekli parametrelerin üçü çok kriterli karar verme yöntemleri ile hesaplanarak problem öznellikten uzaklaştırılmıştır.
- YSA ile çözülen model ile bakım strateji belirleme literatüründe ilk defa 0-1 TP yöntemi ile elde edilen sonuçlar bir YSA modeline öğretilerek çözüm bulunmuştur. Bu çözüm hem yöntem entegrasyonu açısından hem de problem boyutunun büyüklüğü açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca ilk defa bakım strateji belirleme literatüründe YSA yönteminden yararlanılmıştır.
- YSA yönteminin sınıflandırma yeteneği, karmaşık olan bakım strateji belirleme problemini basitleştirmiştir.
- Son olarak bakım strateji belirleme literatüründe ilk defa farklı problem boyutları ile farklı yöntem entegrasyonları karşılaştırılarak yöntem avantaj ve dezavantajları araştırılmıştır.

Bu tez çalışması sekiz bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş bölümüdür ve ele alınan bakım stratejilerinin belirlenmesi probleminden kısaca bahsedilerek yapılan tez çalışmasının farklılıkları vurgulanmıştır. Literatürde yer alan bakım stratejilerine değinilmiş ve uygulama alanı olarak belirlenen hidroelektrik santrallarda yer bulan bakım stratejilerine değinilmiştir. Ayrıca bakım prosesinin ve bakım stratejilerinin belirlenmesinin önemine yer verilmiştir.

Enerji birçok fiziksel imalat ve hizmet sektöründe temel girdi parametreleri arasında yer almaktadır ve bunun sonucu olarak herhangi bir işin gerçekleştirilmesinde gereklilik halini almıştır. Ayrıca fiziksel üretim tesisi yönetiminde dört temel prosesten

biri bakımdır. Çünkü sürdürülebilir üretim için bakım prosesinin rolü büyüktür. Bu sebeplerden dolayı çalışmanın temel konusu olan enerji sektörü ve bakım ikinci bölümde anlatılmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından suyun potansiyel enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üreten hidroelektrik santrallerin kendine özgü yapıları bulunmaktadır. Bu yapılar uygulanan bakım süreçlerini etkilemekte ve santrale özgü stratejiler üretmeye itmektedir. Bu sebepten dolayı hidroelektrik santrallerde işletme ve bakım esasları üçüncü bölümde detaylandırılmıştır.

Literatürde bakım stratejilerinin belirlenmesi problemine farklı yöntemlerle çözüm aranmıştır. Bu tez çalışmasında ise bir hidroelektrik santralin dinamikleri değerlendirilerek santrale özgü çözümler üretilmiştir. Problemin çözüm aşamasında farklı birçok yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler arasında çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve COPRAS, doğrusal programlamanın özel bir formu olan 0-1 TP ve son olarak yapay zeka yöntemlerinden olan YSA yer almaktadır. Problem çözümünde kullanılma nedenleri ve bu yöntemlere ait ayrıntılı bilgi dördüncü bölümde sunulmuştur.

Uygulanması gereken bakım stratejilerinin belirlenmesi sürecinin önemi nedeniyle literatürde bu konu ile ilgili yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar farklı sektörlerde ele alınmış olup yöntemsel gruplama yapıldığında temel üç sınıf oluşmaktadır. Bu sınıflardan ilki çok kriterli karar verme yöntemleri ile çözüm bulunan çalışmalar, ikincisi TP yöntemi ile elde edilen sonuçlar ve son olarak sezgisel yöntemlerle çözüm aranan çalışmalardır. Beşinci bölümde literatürdeki çalışmalar bu sınıflandırma baz alınarak özetlenmiştir.

Bu tez çalışmasında hidroelektrik santrallerdeki ekipmanlara, literatürdeki mevcut çözümler değerlendirilerek uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk aşamada tek ekipman için çözüm aranmıştır. Ardından literatürde uygulamaları mevcut olan 0-1 TP yöntemi kullanılarak hidroelektrik santraldaki elektriksel ekipmanlar için bakım strateji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Son aşamada bu sonuçlar bir YSA modeline öğretilerek mekanik ekipmanlar için bakım

stratejileri belirlenmiştir. Bu uygulama aşamaları altıncı bölümde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

Yedinci bölümde ise bu tez çalışmasında çözülen Problem-1, Problem-2 ve Problem-3'ün sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirme sonucunda hangi durumlarda hangi yöntemin kullanılması gerektiği, avantajları dezavantajları sunulmuştur.

Son olarak sekinci bölümde özet bir şekilde çözülen problemler anlatılmıştır. Ardından literatüre sağlanan katkılar vurgulanmıştır. Gelecekte bakım strateji belirleme literatüründe yapılabilecek çalışmalar hakkında önerilerde bulunulmuştur

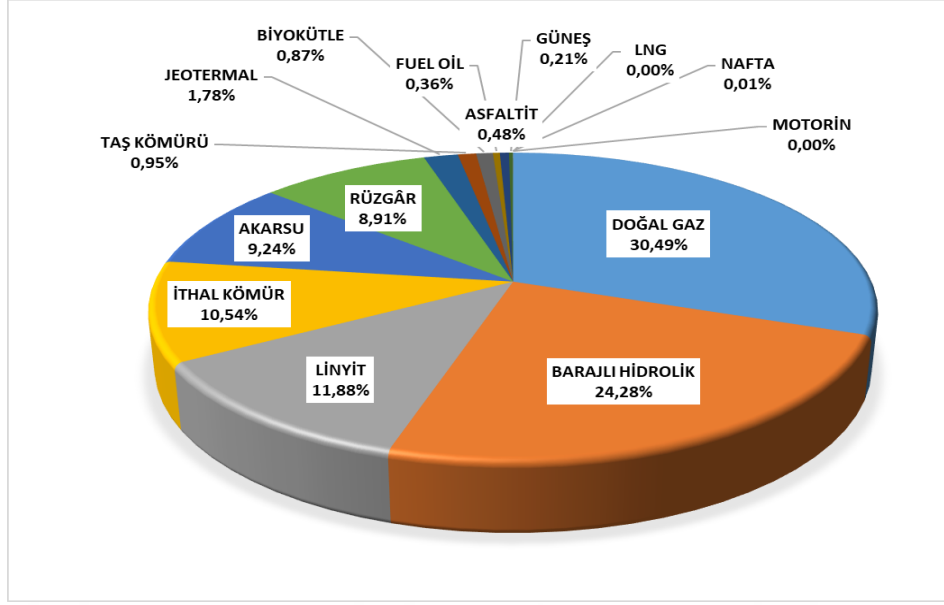


2. ENERJİ SEKTÖRÜ ve BAKIM

Enerji, ülkelerin sosyal ve ekonomik ilerlemesinde insanların yaşam kalitesinin yükselmesinde büyük bir rol oynamaktadır ve küreselleşen dünyada rekabeti en çok etkileyen unsurlardan biridir. Sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışı ile birlikte enerji talebi giderek artmaktadır. Ülkeler, artan bu talebi karşılayabilmek için tedbirler almakta ve bu bağlamda mevcut piyasa yapılarını güçlendirip yeni yatırımlar yapmaktadır. Mevcut sistemler için yaşanan sorun ve tecrübelerden edindikleri kazanımlar ile revizyon çalışmaları yapmaktadırlar. Bununla birlikte politikalarında, kaynak tedarikinde ve teknoloji anlamında dışa bağımlılığı azaltıp çevreye duyarlı, kesintisiz ve düşük maliyetli enerji üretimi yapmayı hedeflemektedirler (Özcan ve Erol, 2013).

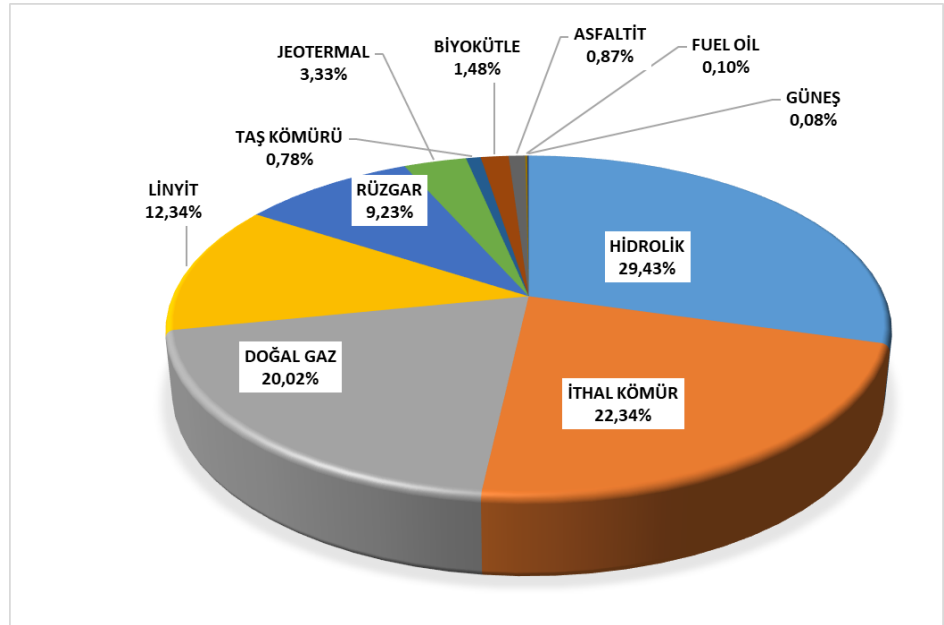
Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Enerji Bilgi İdaresi (EIA) ve Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından hazırlanan projeksiyon çalışmaları, dünya enerji talebinin yıllık ortalama %1,6'lık artışla 2035 yılına kadar devam edeceğini tahmin etmektedir. Enerjiye olan bu talebin sürdürülebilir şartlarda karşılanabilmesi için yaklaşık 37,9 trilyon dolar değerinde 2011-2035 döneminde yatırım yapılması gerekmektedir (EÜAŞ, 2012).

Enerji, ülkelerin sosyo-ekonomik yapıları içerisindeki yerini ve önemini korurken, günlük yaşantının ayrılmaz bir parçasını oluşturan enerjinin önemli bir bileşenini, elektrik enerjisi oluşturmaktadır. Ayrıca Dünya'da ve Türkiye'de enerjinin kullanılan en yaygın formu elektriktir. 2020 yılı Şubat ayı sonu itibariyle, Türkiye toplam lisanslı kurulu gücü 85.036,17 MW'a ulaşmış olup 20.645,69 MW'ı barajlı hidrolik, 7.855,77 MW'ı akarsu kaynaklıdır. Kaynaklara göre kurulu güç Şekil 2.1'de verilmiştir (EPDK Şubat Ayı Sektör Raporu, 2020).



Şekil 2.1. Türkiye'nin Şubat 2020 lisanslı elektrik kurulu gücü (EPDK Şubat Ayı Sektör Raporu, 2020)

Türkiye’de 2020 Şubat ayı kaynaklara göre üretime bakıldığında 7.165.119,41 MWh ile hidrolik birinci sırada yer almaktadır. Şubat 2020’nin kaynaklara göre lisanslı üretim oranları Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kaynaklara göre üretim oranları (EPDK Şubat Ayı Sektör Raporu, 2020)

Çağdaşlığın ve kalkınmanın bir simgesi olan elektrik enerjisinin, sanayi ve tarımın ihtiyaçları için emre amade tutulması ülke genelinde yaygın bir yerleşimi ve şebeke

ağı olan üretim-iletim hizmetlerindeki sürdürülebilirliğe bağlı bulunmaktadır (TEİAŞ, 2019).

Özellikle nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme olgusu ile sürekli gelişen teknoloji, son on yılda Türkiye’de elektrik enerjisine olan talebi yıllık ortalama %5,6 oranında artırmıştır. Aynı zamanda diliminde Türkiye’de kişi başına düşen elektrik tüketimi ise, %64,4’lük artışla 2.052 kWh’den 3.373 kWh’e ulaşmıştır. Hidroelektrik santraller, Türkiye’de gerçekleşen bu önemli talep artışının yaklaşık beşte birini karşılamaktadır. Bu nedenle, kesintisiz güç üretimi Türkiye enerji arz güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Elektrik üretim santrallerinde sürdürülebilir enerji arzının iki sacayağından birisinin bakım yönetimi olduğu gerçeği ele alındığında, hidroelektrik santrallerdeki bakım planlamasının kritik önemi karşımıza çıkmaktadır. Bakım yönetiminin en kritik fazı bakım planlamasıdır. Bakım planlamasının ilk ve vazgeçilmez aşaması ise bakım strateji seçimi aşamasıdır. Bakım strateji seçim problemi, sistem birimlerinin çok sayıda ve farklı işlevlere sahip olması, sistemi yansıtan verilerin zor elde edilmesi, çok sayıda nicel ve nitel kriter barındırması gibi nedenlerden dolayı çok karmaşık bir problemdir (Özcan vd., 2019b). Bu problem zamanla farklı bakım stratejilerinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Hidroelektrik santrallerde uygulaması olan dört bakım stratejisi vardır:

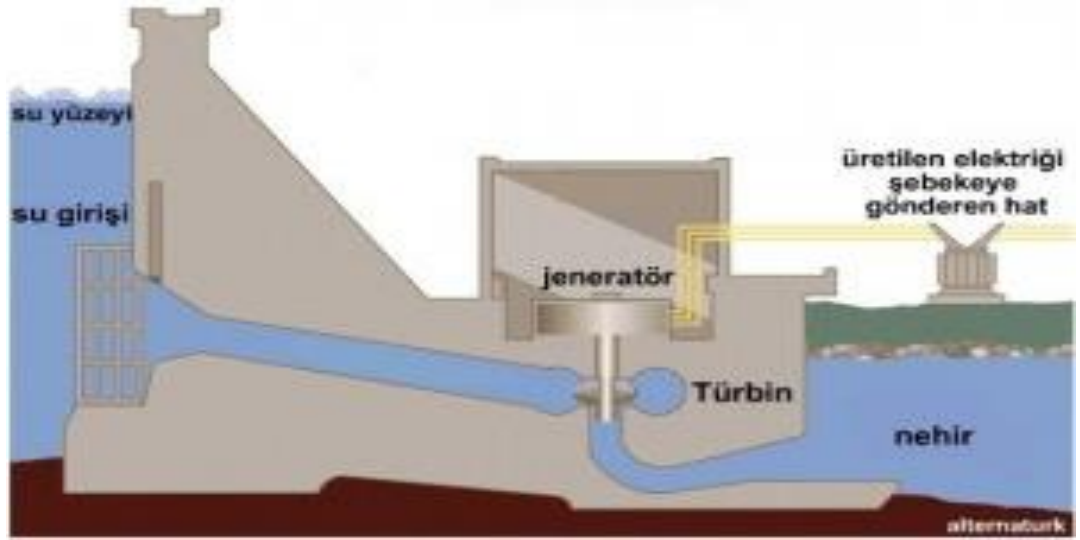
- **Arızı (Düzeltilici) Bakım Stratejisi:** Bu bakım stratejisinde bakım gerçekleştirilmeden önce arızanın ortaya çıkmasına izin verilmektedir. Arızı bakım, arıza sonrası veya bariz bir arıza ihtimali tespit edildiğinde gerçekleştirilen, arızaya dayalı bir bakımdır. Bu bakımın amacı mümkün olan minimum sürede sistemin gerekli işlevini gerçekleştirebileceği durumuna geri döndürmektir. İlkel bir bakım türü olan arızı bakım, arızaların neden olduğu kayıpları dikkate almamaktadır (Wang vd., 2014).
- **Periyodik (Önleyici) Bakım Stratejisi:** Önceden öngörülen kriterlere veya belirlenmiş periyotlara göre gerçekleştirilmektedir. Bir ürünün bozulma olasılığını azaltmak veya işleyişinin bozulmasını engellemek amacıyla yapılmaktadır. Bu bakım türü, arıza sayısını en aza indirerek ve plansız düzeltici bakım gereksinimini ortadan kaldırarak ekipmanın kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini arttırmayı amaçlamaktadır (Kim vd., 2004).

- **Kestirimci Bakım Stratejisi:** Ekipman arızasının ne zaman ortaya çıkabileceğini tahmin edebilmek için ekipmanın çalışma durumunu izleyerek sıfır arıza üretimi, arıza süresini ve bakım maliyetini azaltmayı amaçlamaktadır. Gelecekteki yaşanabilecek arızalar için öngörü yolu ile arıza gerçekleşmeden önce, bakımın planlanmasını sağlamaktadır. Bakım programı bakım maliyetini en aza indirmek ve sıfır hatalı üretime ulaşmak için optimize edilmektedir (Nguyen vd., 2015).
- **Revizyon Bakım Stratejisi:** Makine/ekipmandan beklenen fonksiyonlara en üst seviyede ulaşmak için ilgili makine/ekipmanın tasarım, işletme yöntemi, çalıştırılma koşulları, kurulum, çizelgeleme ve bakım yöntemlerinde gelişim kaydedecek değişikliklerin yerine getirilmesini içeren bakım stratejisidir (Özcan, 2016).

3. HİDROELEKTRİK SANTRALLARDA İŞLETME ve BAKIM ESASLARI

Elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir kaynak kullanımı dünya genelinde sürekli olarak artış göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları açısından zengin sayılabilecek Türkiye’de ise kurulu güç bakımından ilk sırada hidrolik kaynak yer almaktadır. Yeryüzünde elektrik üreten tesisler arasında en eskilerden birisi olması nedeniyle yenilenebilir kaynaklar arasındaki en olgun teknolojileri kullanan hidrolik güç, baz yük elektrik ihtiyacını karşılayabilmesinin yanı sıra, puant ve beklenmeyen güç taleplerini karşılayabilmesi açısından da en tutarlı ve en esnek yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu kapsamda, dünya enerji karışımında olduğu gibi Türkiye elektrik üretim sektörü açısından da hidroelektrik santraller kritik öneme sahiptir ve bu çalışmada, sürdürülebilirliğinin sağlanması kaydıyla ülke ekonomisine ve toplumsal refaha büyük katkılar sağlayacak hidroelektrik santrallerden büyük ölçekli bir tanesi uygulama sahası olarak seçilmiştir (Özcan vd., 2019a).

Su enerjisi, nehirler, akıntılı deniz boğazları ve gel-git olayı bulunan denizlerde kinetik enerji, yüksek dağlarda ve yaylalardaki doğal göller ile barajlarda ise potansiyel enerji olarak karşımıza çıkmaktadır. Suyun bulunduğu yere göre değişen bu enerji (kinetik ya da potansiyel enerji – baraj gövdesi ya da doğal göllerdeki suyun potansiyel enerjisi cebri borular gibi iletim tünellerinde kinetik enerjiye dönüştürülür), hidroelektrik santrallerde 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 nakil hatları ile enterkonnekte sisteme bağlanır (Başışme, 2003). Hidroelektrik santralin genel yapısı Şekil 3.1’de verilmiştir (Özcan vd., 2017).



Şekil 3.1. Rezervuarlı bir hidroelektrik santralin şematik gösterimi

Tüm enerji santrallerinde olduğu gibi hidroelektrik santrallerin de temel amacı, sürdürülebilir enerji arzı olarak da adlandırılan kesintisiz, güvenilir, verimli, ekonomik ve çevreye duyarlı elektrik üretimini gerçekleştirmektir. Bu amacın gerçekleştirilmesindeki ilk aşama, makine/ekipman/sistem üreticisi kuruluşlar tarafından belirlenen operasyonel direktiflere uygun olarak santrallerin işletilmesidir. Bu operasyonel kuralların bir hidroelektrik santralde 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 ile 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 santraller için kritik öneme sahiptir (Özcan vd., 2017; Başeşme, 2003).

Hidroelektrik santrallarda 4 temel bakım stratejisi uygulanabilmektedir. Bunlar aşağıda kısaca verilmiştir (Özcan, 2016):

Arızı (Düzeltici) Bakım Stratejisi: Makine/ekipmanın kendisinden beklenen görevi yerine getiremediği durumda, makine/ekipmanın tasarımındaki özelliklerde çalışması için gerçekleştirilen onarım ve/veya bakım faaliyetleridir.

Periyodik (Önleyici) Bakım Stratejisi: Makine/ekipmanın kesintisiz ve beklenen tasarım spesifikasyonlarında çalışması için bir zaman çizelgesi dahilinde gerçekleştirilen bakım faaliyetleridir.

Kestirimci Bakım Stratejisi: Modern ölçüm ve sayısal işaret işleme (signal-processing) metotları kullanılarak makine/ekipmanın işletilmesi sürecinde izlenmesi ve ölçüm sonuçlarına göre arıza oluşmadan gerekli tedbirlerin alınmasını içeren bakım faaliyetleridir.

Revizyon Bakım Stratejisi: Santral ünitelerindeki tüm kritik ekipmanlara periyodik (8000 saat ya da 5 yıl gibi) olarak yapılan, uzun zaman gereksinimine sahip (2 ay gibi) ve santral ünitesinin duruşunun zorunlu olduğu bakım stratejisidir.

Bir hidroelektrik santral, su tutma yapısı (baraj, tünel ya da açık kanal, regülatör), su alma yapısı, iletim kanalı ya da cebri borular, salyangoz, türbin, generator, trafolar ve şalt ekipmanları ana bölümleri altında binlerce ekipmandan oluşur. Bu ekipmanlar, elektriksel, mekanik, ölçme ve kontrol ekipmanları olarak 3 ana başlık altında ele alınabilir (Özcan vd., 2017).

Hidroelektrik santralda uygulanması gereken optimal bakım stratejilerinin belirlenmesi ve uygulanması sonucunda aşağıdaki amaçlara hizmet etmesi beklenmektedir.

- **Üretim veriminin maksimizasyonu:** Hidroelektrik santrallar, imalatçı firmalar tarafından santralin bulunduğu lokasyon, buranın topografik özellikleri, teknolojik gelişim, suyun debisi, düşü vb. birçok parametre dikkate alınarak tasarlanır ve imal edilir. Santralin söz konusu tasarım değerlerinde yapacağı maksimum verimli üretim miktarını ise, makine/ekipman/sistem üreticisi kuruluşlar tarafından belirlenen operasyonel direktiflere (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 genaratörünün akım ve gerilim değerlerinin, ikaz trafosunun izolasyonunun, genaratör rotorundaki vibrasyonun, bilezik hücreindeki kömürlerin boyutlarının ve ana güç trafosundaki yağ ve sargı sıcaklıklarının sürekli olarak takip edilmesi) uygun olarak işletilmesinin yanı sıra, ekipmanların mevcut durumları ve karakteristik özellikleri baz alınarak optimal bakım stratejisinin uygulanmasıdır. 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 ve bu süreçler işçilik ve malzeme kullanımı ile üretim duruşuna sebebiyet vermesinden dolayı oldukça maliyetlidir. Bununla birlikte bir hidroelektrik santral, su tutma yapısı (baraj, tünel ya da açık kanal, regülatör), su alma yapısı, iletim kanalı ya da cebri borular, salyangoz, türbin, generatör, trafolar ve şalt ekipmanları ana bölümleri altında binlerce ekipmandan oluşmaktadır. Bu ana bölümlerdeki en kritik ekipmanlar, santraldaki maksimum verimli üretim miktarını belirlemektedir (Özcan vd., 2017). Bu nedenle, belirlenecek söz konusu kritik ekipmanlara sadece gerekli olan bakım stratejilerinin uygulanması ile üretim veriminin maksimizasyonu (minimum maliyet, maksimum miktar) amacına ulaşılmaktadır.

- **Santralin ekonomik ömrünün maksimizasyonu:** Yukarıda da bahsedildiği üzere bir hidroelektrik santralin verimi, santralin işletme prosedürlerine uygun olarak çalıştırılması ile sadece gerekli olan bakımların gerekli olan zamanlardan oluşturulacak bir bakım plan dahilinde gerçekleştirilmesi suretiyle mümkün olan en yüksek düzeyde tutulabilmektedir. Bunların yapılması, santralin büyük bir rehabilitasyon görmeksizin yaklaşık olarak 20-25 yıl çalıştırılmasını, başka bir ifade ile santralin ekonomik ömrünün uzatılmasını da mümkün kılmaktadır.
- **Kayıp enerji maliyetlerinin minimizasyonu:** Elektrik üretim santrallerindeki performans parametrelerinden bir tanesi, kayıp enerji miktarının minimizasyonudur. Kayıp enerji kavramı, santrallarda A (santral iç nedenlerinden kaynaklanır) ve B grubu (atmosferik koşullar, talebin olmayışı, yük düşümü talepleri, şebeke arızası vb. santral dışı nedenlerden kaynaklanır) olmak üzere ikiye ayrılır. Bunlardan A grubu kayıplar, işletme prosedürlerine ve bakım direktiflerine

uyulmaması temel nedenlerinden dolayı yaşanan duruşlardan kaynaklanan (arızalar olarak da ifade edilebilir) üretim kayıplarıdır ve bu amaç bu grubu kapsamaktadır (Özcan vd., 2017). Yüksek kurulu güce sahip bir santralda gerçekleştirilmesi ile bu kayıpların en alt düzeye çekilmesi büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, santrallarda yaşanan uzun süreli arızalarla bu kayıplar milyarlarca kWh enerjinin üretilebilecekken üretilmemesi sonucunu doğurmakta ve en basit hali ile bu kayıplar milyonlarca TL’lik bir ekonomik kaybı da beraberinde getirmektedir.

- **Türkiye enerji arz güvenliğinin desteklenmesinin maksimizasyonu:** Hatırlanacağı üzere, 31 Mart 2015 tarihinde Türkiye’de 12 saatlik bir enerji kesintisi yaşanmıştır. Bu uzun süreli kesintinin nedeni, hat oturması olarak açıklanmıştır. Hat oturması, elektrik iletim şebekesinde yaşanan büyük arızalar, üretim ve tüketim noktaları arasındaki frekansın belirlenen tolerans değerlerinin dışına çıkarak kayması gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. Özellikle, büyük kurulu güçlere sahip olan santralların beklenmedik bir şekilde aniden devre dışı kalmaları Türkiye elektrik iletim sisteminde frekans kaymasına ve bu bağlamda hat oturmasına neden olabilmektedir. Son yaşanan hat oturmasının, ülkemizdeki ticari (1 milyar TL’lik bir kayıp) ve sosyal yaşantıya verdiği zarar ile tez çalışmasının gerçekleştirildiği santralin yüksek kurulu güce sahip olması göz önüne alındığında, bu amaç ülkemiz için kritik bir hal almaktadır.

4. YÖNTEMLER

Bu çalışmada bir hidroelektrik santraldaki ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin optimizasyonu problemi ele alınmıştır. Çalışmada ilk olarak Problem-1’de generatör ekipmanına uygulanması gereken bakım strateji seçimi AHP-COPRAS yöntemleri ile belirlenmiştir. AHP yöntemi hiyerarşik yapıdaki ağırlıklandırma problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ele alınan problemler de hiyerarşik yapıda olduğu için AHP yöntemi kullanılmıştır. COPRAS yönteminde ise faydalı ve faydasız kriter ayrımı yaparak çözüme ulaşıldığı için ve bununla birlikte işlem kolaylığı sağladığı için seçilmiştir. Problem-2’de ise santraldaki bütün elektriksel ekipmanlara optimal bakım stratejileri AHP-COPRAS-TP yöntemleri ile bulunmuştur. TP yöntemi atama problemlerinde üstünlüğünü literatürde kanıtladığı için kullanılmıştır. Son olarak Problem-3’te ise hidroelektrik santraldaki tüm mekanik ekipmanlara uygulanacak bakım stratejileri YSA yöntemi ile belirlenmiştir. YSA yönteminin sınıflandırma yeteneğinden faydalanılarak çözüme ulaşılmıştır. Ayrıca YSA yöntemi eksik verilerle çalışabilme ve daha önce öğretilmemiş durumlar ile ilgili yorum yapabilme yeteneğine sahiptir. Bu avantajlarından dolayı YSA yöntemi seçilmiştir. Yöntemlerle ilgili ayrıntılar aşağıda verilmiştir.

4.1. AHP Yöntemi

Saaty tarafından 1977 geliştirilen AHP yöntemi, birçok karar verme probleminde tekil ya da destekleyici yöntem olarak kullanılmakta ve popüleritesi her geçen gün kişisel önyargıları azaltması ve uygulama kolaylığı sağlaması nedeniyle dünya genelinde artış göstermektedir (Saaty, 1980). Uygulama alanları kamu yönetiminden iş dünyasına, sanayi uygulamalarından sağlık sektörüne, ulaştırma problemlerinden eğitim ve otomotive kadar uzanmaktadır. Bu yöntem kişilere, karar verme prosesindeki kriter ve alternatifler arasındaki öncelikleri kalitatif ve kantitatif yargıları birlikte ele alarak belirleme imkanını sunmaktadır (Velasquez ve Hester, 2013).

Bu çalışmada Problem-1 ve Problem-2 çözümünde AHP yöntemi kullanılmıştır. Problem-1’de bakım stratejisini etkileyen kriterlerin ağırlıklandırılmasında kullanılmıştır. Problem-2’de ise yıpranma oranı hesabında, bakım stratejilerinin

santrale sağladığı katma değerin hesabında ve elektriksel ekipmanların sistem açısından kritiklik seviyelerini etkileyen kriterlerin ağırlıklandırılmasında kullanılmıştır. AHP yönteminin kullanım kolaylığı, farklı yöntemlerle birlikte kullanılabilir olması ve problem yapılarına uygunluğu sonucunda bu yöntemin kullanılması kararlaştırılmıştır. AHP'nin uygulama adımları aşağıda verilmiştir (Saaty 1980):

Adım 1. Karar vericinin amacının belirlenmesi, bu amacı etkileyen kriter ve alternatiflerin netleştirilmesi ve aralarındaki ilişkileri belirleyerek hiyerarşik bir yapının oluşturulmasıdır.

Adım 2. Tüm kriterleri ve alternatifleri önem derecelerine göre karşılaştırılmasının uzmanlar tarafından gerçekleştirilmesidir. Bu aşamada, Saaty tarafından geliştirilen ve Çizelge 4.1'de verilen önem skalası kullanılmaktadır.

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

Karar verici Çizelge 4.1'i ikili karşılaştırma matrisini (A_{ij}) oluşturmak için kullanmaktadır. Bu matris simetrik bir matristir. Başka bir ifade ile diyagonal matris üzerindeki ikili karşılaştırmalarının çarpmaya göre tersi, diyagonalin altında bulunan hücrelere eşittir (ör. $a_{21} = 1/a_{12}$). Eş. 4.1'de verilen A_{ij} matrisindeki n kriter sayısını ifade etmektedir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Adım 3. Oluşturulan ikili karşılaştırma matrisine normalizasyon işlemi gerçekleştirilmelidir. İkili karşılaştırma matrisindeki sütun vektörleri kullanılarak n adet ve n-bileşeni B_i sütun vektörü oluşturulur (Eş. 4.2).

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n1} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.2)$$

Bu normalizasyon işlemi, matristeki her bir değerin sütun toplamlarına bölünmesiyle gerçekleştirilir (Eş. 4.3).

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

Adım 4. Normalizasyon işleminin ardından, hiyerarşide karşılaştırılan öğeler için öncelik veya ağırlık vektörleri hesaplanır. n adet B sütunu vektörü matris formatında birleştirilir. Oluşturulan matrisin sıra bileşenlerinin aritmetik ortalamaları Eş. 4.4 ile elde edilir.

$$w_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} / n \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

n adet w_i 'den oluşan W_i vektörü, kriterlerin birbirine göre önemini göstermektedir (Eş. 4.5).

$$W_i = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_n \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.5)$$

Adım 5. Her bir eşleştirilmiş karşılaştırma matrisindeki kararların tutarlılık oranı (CR), karar vericinin hiyerarşideki değerleri hiyerarşideki öğelerle tutarlı bir şekilde karşılaştırıp karşılaştırmadıklarını ölçmek için hesaplanmalıdır. CR değerini hesaplamak için, ikili karşılaştırma matrisinin ilk temel değeri (A_{ij}) ve kriter ağırlıkları (W_i) Eş. 4.6 yardımı ile çarpılır.

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Ardından Eş. 4.7 kullanılarak en büyük öz vektör hesaplanır.

$$\lambda_{\max} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{w_i} \right) / n \quad (4.7)$$

Eş. 4.8'teki hesaplama ile bulunan tutarlılık indeksinin (CI) Çizelge 4. 2.'de verilen rassal indekse (RI) oranlanması sonucunda (Eş. 4.9) CR değeri hesaplanır.

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (4.8)$$

$$CR = CI / RI \quad (4.9)$$

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

CR hesabının sonucunda elde edilen değer eğer 0,1'den küçük ise ikili karşılaştırma matrisi tutarlı demektir. İkili karşılaştırma matrisinin tutarsız olduğu sonucuna varıldığında Adım 2'ye dönülür. Adımlar tekrarlanır.

Adım 6. AHP puanlarının analiz aşamasında en yüksek puan alan alternatif en iyi alternatif olarak seçilir.

4.2.COPRAS Yöntemi

Çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan COPRAS (COmplex PROportional ASsessment) yöntemi 1994 yılında geliştirilmiştir (Zavadskas vd., 1994). COPRAS çok kriterli değerlendirmede maksimum ve minimum kriter değerleri için kullanılabilir. COPRAS yöntemi, çok sayıda alternatif ve karmaşık kriterler içeren problemlere kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde literatürde çok farklı alanlarda uygulamaları yapılmıştır. Tarımdan bilişim sektörüne, yatırım değerlendirmesinden tedarik zinciri yönetimine farklı sektörlerde ve farklı problemlere COPRAS yöntemi ile çözüm bulunmuştur. COPRAS yönteminin en önemli özelliklerinden biri alternatiflerin fayda derecelerini gösteriyor olmasıdır. Değerlendirilen alternatifleri birbiri ile karşılaştırır ve diğer alternatiflerden ne kadar iyi ya da ne kadar kötü olduğunu yüzde şeklinde ifade eder. Ayrıca kriterleri faydalı ve faydasız kriter olarak değerlendirerek zıt yönlü kriterler üzerinde işlem yapma gerekliliğini ortadan kaldırmaktadır (Zavadskas vd., 1994).

COPRAS yöntemi, bu tez çalışmasında, yukarıda belirtilen avantajları, faydalı ve faydasız kriter ayrımı yapabilmesi ve sonucunda yüz üzerinden puanlama yapabilmesinden dolayı kullanılmıştır. COPRAS yönteminin uygulama adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 1. İlk aşama karar matrisinin oluşturulmasıdır. Karar matrisi (X) Eş. 4.10'da gösterildiği gibi oluşturulur. x_{ij} , j. değerlendirme kriteri açısından i. alternatifin aldığı değeri ifade etmektedir. M alternatif sayısını, n ise kriter sayısını ifade etmektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Adım 2. İkinci adımda karar matrisinin normalizasyonu yapılmaktadır. Normalizasyon işlemi Eş. 4.11 yardımı ile gerçekleştirilir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.11)$$

Adım 3. w_j olarak simgelenen her bir değerlendirme kriterinin ağırlık değerleri ile normalize edilmiş karar matrisi kullanılarak ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilmektedir. D ile ifade edilen normalize karar matrisi Eş. 4.12 yardımı ile oluşturulmaktadır. D matrisi d_{ij} elemanlarından oluşmaktadır.

$$D = d_{ij} = w_j * x_{ij}^* \quad i = 1, 2, \dots, m \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.12)$$

Adım 4. Amaca ulaşma noktasında büyük değerlerin iyi olduğu kriterler faydalı, küçük değerlerin iyi olduğu kriterler faydasız kriter olarak tanımlanmaktadır. Bu adımda faydalı kriterler ve faydasız kriterler kendi içlerinde toplama işlemine tabi tutulmaktadır. Ağırlıklı normalize karar matrisindeki faydalı kriterlere ait değerlerin toplamı S_{i+} , faydasız kriterler için toplamı S_{i-} , olarak gösterilmektedir. S_{i+} ve S_{i-} hesaplamaları için sırası ile Eş. 4.13 ve 4.14 kullanılmaktadır.

$$S_{i+} = \sum_{j=1}^k d_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (4.13)$$

$$S_{i-} = \sum_{j=k+1}^n d_{ij} \quad j = k + 1, k + 2, \dots, n \quad (4.14)$$

Adım 5. Her bir alternatif için Eş. 4.15 kullanılarak göreceli önem değeri (Q_i) hesaplanmaktadır. En yüksek Q_i değerine sahip alternatif en iyi alternatifi ifade etmektedir.

$$Q_i = S_{i+} + \frac{\sum_{i=1}^m S_{i-}}{S_{i-} * \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_{i-}}} \quad (4.15)$$

Adım 6. Bu adımda Eş. 4.16 yardımı ile en yüksek göreceli öncelik değeri belirlenmektedir.

$$Q_{max} = \text{en büyük } \{Q_i\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (4.16)$$

Adım 7. Son adımda her alternatif için performans indeksi (P_i) Eş. 4.17 kullanılarak hesaplanmaktadır. Performans indeksi 100 olan alternatif en iyi alternatif olarak nitelendirilmektedir. Alternatiflerin hangi sıra ile tercih edilmesi gerektiği performans indeksinin büyükten küçüğe doğru sıralanması ile elde edilmektedir.

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} * 100\% \quad (4.17)$$

4.3. Tam Sayılı Doğrusal Programlama

Doğrusal programlama çıktıları genellikle tamsayı olmayan pozitif değerlerdir. Fakat gerçek hayat problemleri, insan, hayvan, makine gibi problem yapısı gereği bölünemeyen değişkenler içermektedir, bu sebeple tam sayılı sonuçlara ihtiyaç duyulmasından dolayı TP modelleri geliştirilmiştir (Tulunay, 1980).

Problem değişkenlerinin tamamının veya bazılarının tam sayılı değerlere sahip olduğu programlama türü TP' dir. Literatürde sıklıkla kullanılan bu yöntem problem türlerine göre farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar sonucunda üç tane TP modeli ortaya çıkmıştır (Binay vd., 2001).

- Tüm Tam Sayılı Programlama Modeli: Tüm değişkenlerin tam sayılı değerler alması gerektiği problemlerde kullanılan bir doğrusal programlama modelidir (Ogryczak ve Zorychta, 1996).
- Karma Tam Sayılı Programlama Modeli: Sadece bazı karar değişkenlerinin tam sayılı değerler aldığı ve bütün değişkenlerin tam sayılı değerler alma zorunluluğun olmadığı doğrusal programlama modelidir (Winston, 1994).
- 0-1 Tam Sayılı Programlama Modeli: Bazı problemler evet veya hayır ya da mantıksal ilişkiler içeren değişkenler barındırır. Bu değişkenler ikili değişkenler olarak adlandırılır ve 0 ya da 1 değerini almaktadır. İçinde sadece ikili değişkenler barındıran tam sayılı doğrusal programlama modeli 0-1 TP'dir (Sanjeeb, 2002).

Tam sayılı programlama modelinin genel formu aşağıda verilmiştir (Taha, 2014).

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

St.

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

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

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

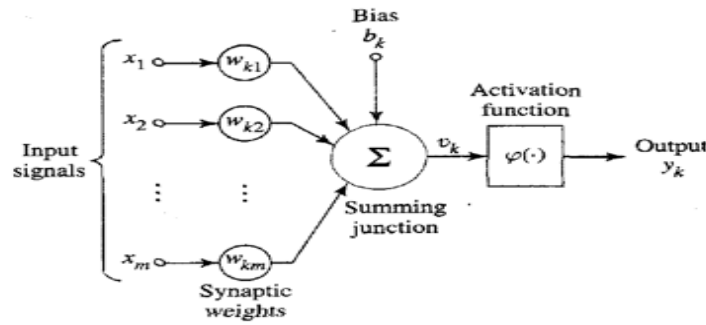
TP, gezgin satıcı problemleri, tesis yerleşim problemleri, makine planlama problemleri gibi problemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca ekonomi, sağlık, ulaşım, sanayi ve enerji sektöründe uygulamaları mevcuttur. Bu çalışmada ise problem yapısına uygunluğundan dolayı 0-1 TP modeli kullanılmıştır.

4.4. Yapay Sinir Ağları

YSA, gerçekleşen vakaların örneklerine bakmakta onlardan bilgiler toplamakta, genellemeler yapmakta ve daha sonra hiç görmediği örnekler ile karşılaşınca öğrendiği bilgileri kullanarak o örnekler hakkında karar verebilmektedir. YSA, insan beyninin öğrenme özelliği ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yeteneklere sahiptir. Bununla birlikte herhangi bir yardım almadan

otomatik olarak gerçekleştirmek amacı ile geliştirilen bilgisayar sistemleri olduklarından hem yeni gelişmelere neden olmaktadır. Ayrıca nasıl çalıştığı bilinmeyen insan beyni hakkında yapılan araştırmalara da önemli katkılar sağlamaktadır (Öztemel, 2003).

Basit bir YSA yapısını girdi, çıktı, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve ağırlık elemanlarından oluşmakta olup yapı Şekil 4.1’de (Haykin, 1994) yer almaktadır.



Şekil 4.1. Basit bir YSA yapısı

Girdiler sistemin dışından veya sinir hücrelerinden gelen nümerik değerlerden oluşmaktadır. Hücreye gelen girdinin ağ üzerindeki etkisi ağırlıkları ifade etmektedir. Toplama fonksiyonu ise hücreye gelen net girdiyi hesaplayarak, sinir hücresinin girdilerinin doğrusal kombinasyonunu gerçekleştirir. Bu iki vektörün sayısal toplamı net girdiyi verir ve çıkan sonucu aktivasyon fonksiyonuna göndermektedir (Haykin ve Lippmann, 1994). Toplama fonksiyonundan alınan sonuç aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek çıkışa verilir. Aktivasyon fonksiyonu ise ağıın doğrusal olmayışını ortaya koyan doğrusal olmayan bir fonksiyondur (Fernandez vd., 2006) Sigmoid, hiperbolik tanjant, logaritmik sigmoid ve purelin gibi birçok aktivasyon fonksiyonu bulunmaktadır.

YSA mimarisi tek katmanlı ve çok katmanlı yapay sinir ağları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Çok katmanlı yapı daha çok kompleks problemlerde, tek katmanlı yapılar ise daha basit problemlerde kullanılmaktadır. Çok katmanlı yapay sinir ağlarından literatürde sıklıkla kullanılan ileri beslemeli YSA modeli yer almaktadır.

Paliwal ve Kumar (2009)'ın YSA'ları ve istatistiksel yöntemlerin uygulama alanlarına dair gerçekleştirdikleri literatür incelemesinde bu konudaki çalışmaların %58 inde çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısı kullanıldığını ve bu çalışmalarda elde edilen sonuçların geleneksel istatistiksel yöntemlere nazaran daha etkin sonuçların elde edilmesini sağladığını kanıtlamışlardır. Bu çalışmada ise problem yapısının bu ağ ile temsil edilmesinin uygun olması ve etkin sonuçların alınmasını sağlaması nedeniyle ileri beslemeli ağ yapısı kullanılmıştır.

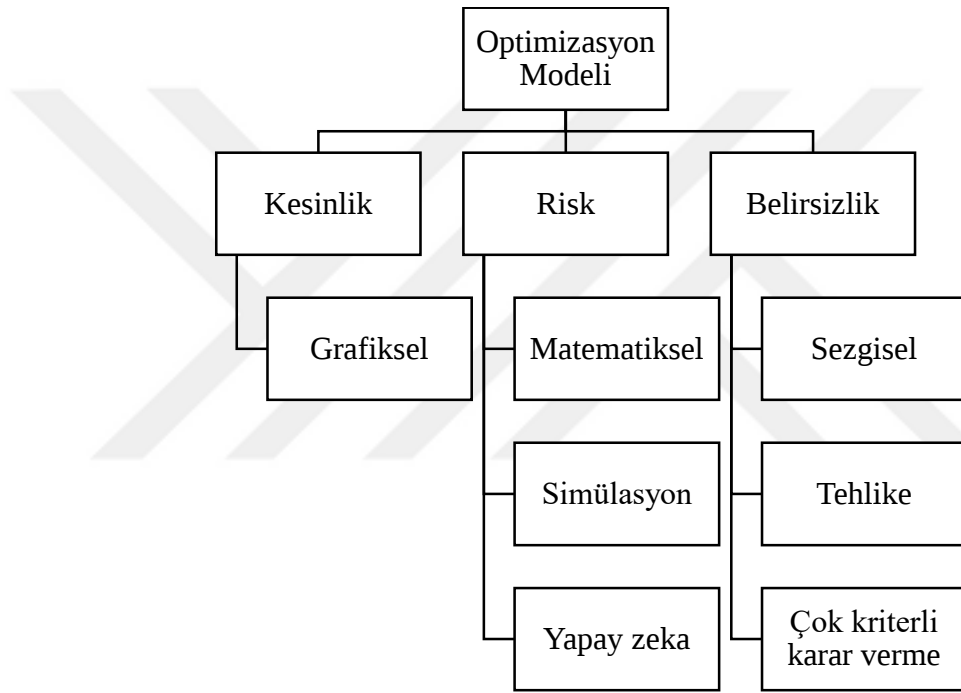


5. LİTERATÜR TARAMASI

Bakım, makine veya teçhizatın yeteneklerini değerlendirmek ve devam ettirmek için yapılan faaliyetler bütünüdür. Bununla birlikte bakımın diğer bir görevi, yeteneğini kaybetmiş makine veya teçhizatın yeteneğini yeniden kazandırmaktır (Martorell vd. 2005). Herhangi bir endüstriyel tesisin sürdürülebilir bir üretim gerçekleştirebilmesi için bakım ve onarım faaliyetleri büyük önem arz etmektedir. Çünkü bakımın doğru planlanmaması sonucu ortaya çıkan arızalar, üretimin durmasıyla birlikte üretim kayıplarına ve maliyeti yüksek bakım ve onarım giderlerine sebep olmaktadır. Bakım giderlerinin yanı sıra üretimin durması, arz güvenliğini tehlikeye atarak rekabetin sıkı olduğu piyasalarda işletmeleri rekabet edemez hale getirebilmektedir. Daha da kötüsü bakım sürecinin iyi yönetilmemesi, işletmelerin piyasadan silinmelerine sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca bakım; zaman, iş gücü gereksinimi ve malzeme açısından maliyetli bir süreçtir (Özcan ve Eren, 2014). Bakım planlamasının önemli ve maliyetli olması sonucunda makine veya teçhizata uygulanacak optimal bakım stratejilerinin belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Çünkü uygulanan yanlış bakım stratejileri sürdürülebilir üretim amacını gerçekleştirmede büyük engeller oluşturacaktır. Örneğin, ekipmanın arızalanma ihtimalini artırmakla kalmayıp yüksek bakım maliyetlerine ve ürün kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır (Hashemi, 2020). Maliyet, arz güvenliği ve ürün kalitesi gibi birçok faktör göz önünde bulundurulduğunda, ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi, etkin ve uygulanabilir bir bakım planlamasının vazgeçilmez ilk aşaması olduğu sonucuna varılmaktadır. Çünkü bütün bakım ve onarım faaliyetleri seçilen bakım stratejilerine göre yapılmaktadır (Shafiee, 2015). Literatürde güvenilirlik tabanlı bakım (Zhang vd., 2016), durum tabanlı bakım (Alaswad ve Xiang, 2017), risk tabanlı bakım (Rusin ve Wojaczek, 2019), önleyici bakım (Kim vd., 2014), kestirimci bakım (Nguyen vd., 2015), düzeltici bakım (Wang vd., 2014) ve son olarak revizyon bakım (Özcan vd., 2017) gibi birçok bakım stratejisi bulunmaktadır.

Bakım strateji seçim problemi, sistem birimlerinin çok sayıda ve farklı işlevlere sahip olması, sistemi yansıtan verilerin zor elde edilmesi, çok sayıda nicel ve nitel kriter barındırması gibi nedenlerden dolayı çok karmaşık bir problemdir (Özcan vd., 2019b). Bu problemi çözmek için araştırmacılar, farklı uygulama alanlarında farklı yöntemler

kullanarak çözümlerini sunmuşlardır. Bakım yönetiminin öneminin fark edilmesiyle birlikte literatürde bakım strateji seçimi problemine ilgi son yıllarda artmıştır. Artan ilgi araştırmacıları yapılan çalışmaları derlemeye itmiş ve sonucunda bu konuyla ilgili 2015 yılında iki literatür incelemesi sunulmuştur. Bu iki çalışmadan biri Ding ve Kamaruddin (2015) tarafından yazılmıştır. Araştırmacılar bu derleme çalışmasında bakım strateji seçimi problemini detaylı bir şekilde anlatmış ve çalışmaları geniş bir perspektifte değerlendirerek üç grup altında sınıflandırmışlardır. Ding ve Kamaruddin (2015) yaptıkları sınıflandırma şeması Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Ding ve Kamaruddin'in literatür sınıflandırması (Ding ve Kamaruddin, 2015)

Diğer derleme çalışmasını ise Shafiee (2015) yapmıştır. Ding ve Kamaruddin'in çalışmasından farklı olarak kullanılan yöntemler bazında çalışmaları kısıtlayarak çalışmaları farklı bir açıdan değerlendirmiştir. Problemin çok kriterli ve çok amaçlı yapısından dolayı çok kriterli karar verme yöntemleri en çok tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Shafiee (2015), bu durumu bakım strateji seçiminde kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerini detaylı inceleyerek değerlendirmiştir.

Bbakım strateji seçimi problemini çok kriterli karar verme yöntemleri ile ele alan çalışmalar incelendiğinde SAW, AHP, ANP, TOPSIS, ELECTRE ve VİKOR yöntemleri ile yapılmış birçok çalışma olduğu gözlemlenmiştir. Bu yöntemler arasında 28 çalışma ile en çok AHP yönteminin kullanıldığı belirlenmiştir. Kullanılan yöntemlere göre literatürde yapılan çalışmaların özeti Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Çok kriterli karar verme yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar

SAW	Al-Najjar ve Alsyouf, (2003); Alsyouf, (2004); Sharma vd., (2005); Jafari vd., (2008); Nagar, (2011); Kushwash, (2012); Sagar vd., (2013); Görener, (2013)
AHP	Triantaphyllou vd., (1997); Labib vd., (1998a); Labib vd., (1998b); Ramadhan vd., (1999); Bevilacqua ve Braglia, (2000); Bertolini vd., (2004); Labib, (2004); Carnero, (2005); Verma vd., (2006); Zaeri vd., (2007); Wang vd., (2007); Gaonkar vd., (2008); Fazlollahtabar ve Yousefpoor, (2008); Ierace ve Cavalieri, (2008); Ahmadi vd., (2009); Gassner, (2010); Ratnayaka ve Markeset, (2010); Dutta vd., (2011); Peng ve Wang, (2011b); Tan vd., (2011); Sarkar ve Behera, (2012); Zaim vd., (2012); Odeyale vd., (2013); Rashidpour, (2013); Xie vd., (2013); Goossens ve Basten, (2015); Seiti vd., (2017); Özcan vd., (2020)
ANP	Cheng ve Tsao, (2010); Shahin vd., (2012a); Shahin vd., (2012b); Zaim vd., (2012); Kumar ve Maiti, (2012); Sadeghi ve Alborzi-Manesh, (2012) ; Kurian vd. (2019)
TOPSIS	Asadian vd., (2008); Mousavi vd., (2009); Momeni vd., (2011); Ding ve Kamaruddin, (2012); Jayaswal vd., (2013); Görener, (2013); Thor vd., (2013a); Ding vd., (2014)
ELECTRE	Li vd., (2007); Vahdani ve Hadipour, (2011); Thor vd., (2013b)
VİKOR	Vahdani ve Hadipour, (2010); Nezami ve Yıldırım, (2011); Nezami ve Yıldırım, (2013)
Diğer	Mechefske ve Wang, (2003); Chan ve Prakash, (2012)

Bakım strateji seçiminde kullanılan çok kriterli karar verme yöntemleri iki gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar problemin yapısına göre belirlenen klasik veya bulanık mantık içermektedir. Klasik mantık, bulanık mantık gibi küme içermeyen ve net sayıları ifade eden çalışmalardır. Literatürde bakım strateji seçiminde, klasik ve

bulanık çok kriterli karar verme yöntemi kullanılan çalışmalar Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Klasik ve bulanık mantık temelli çalışmalar

Klasik	de Almeida ve Bohoris, (1995); Triantaphyllou vd., (1997); Labib vd., (1998a); Azadivar ve Shu, (1999); Ramadhan vd., (1999); Bevilacqua ve Braglia, (2000); Okumura ve Okino, (2003); Bertolini vd., (2004); Carnero, (2005); Bertolini ve Bevilacqua, (2006); Verma vd., (2006); Zaeri vd., (2007); Fazlollahtabar ve Yousefpoor, (2008); Pariazar vd., (2008); Reichelt vd., (2008); Shyith vd., (2008); Ahmadi vd., (2009); Ahmadi vd., (2010); Arunraj ve Maiti, (2010); Cheng ve Tsao, (2010); Gassner, (2010); Ratnayaka ve Markeset, (2010); Sarkar vd., (2011); Aghaee ve Fazli, (2012); Ding vd., (2012); Sarkar ve Behera, (2012); Shahin vd., (2012a); Shahin vd., (2012b); Zaim vd., (2012); Ioannis ve Nikitas, (2013); Odeyale vd., (2013); Pourjavad vd., (2013); Rashidpour, (2013); Thor vd., (2013a); Thor vd., (2013b); Goossens ve Basten, (2015); Seiti vd., (2017); Shafiee vd., (2019); Özcan vd., (2020)
Bulanık	Labib vd., (1998b); Al-Najjar ve Alsyounf, (2003); Mechefske ve Wang, (2003); Labib, (2004); Alsyounf, (2004); Sharma vd., (2005); Verma vd., (2005a); Verma vd., (2005b); Li vd., (2007); Verma vd., (2007); Wang vd., (2007); Gaonkar vd., (2008); Asadian vd., (2008); Dong vd., (2008); Ierace ve Cavalieri, (2008); Jafari vd., (2008); Ilankumaran ve Kumanan, (2009); Mousavi vd., (2009); Bashiri vd., (2010); Ghosh ve Roy, (2010); Vahdani vd., (2010); Akhshabi vd., (2011); Dutta vd., (2011); Jajimoggala vd., (2011); Momeni vd., (2011); Nagar, (2011); Nezami ve Yildirim, (2011); Peng ve Wang, (2011a); Gaonkar vd., (2011); Tajadod vd., (2011); Vahdani ve Hadipour, (2011); Chan ve Prakash, (2012); Ding ve Kamaruddin, (2012); Fouladgar vd., (2012); Ilankumaran ve Kumanan, (2012); Ingwald ve Al-Najjar, (2012); Kumar ve Maiti, (2012); Sadeghi ve Alborzi-Manesh, (2012); Görener, (2013); Jayaswal vd., (2013); Nezami ve Yildirim, (2013); Sagar vd., (2013); Xie vd., (2013); Seiti vd., (2017); Panchal ve Kumar, (2017)

Bakım strateji seçimi problemi bakım yönetiminde kritik bir role sahiptir ve literatürde birçok sektörde bu problem ele alınmaktadır. Çok kriterli karar verme yöntemleri ile çözülen çalışmaların uygulama alanlarına göre gruplandırılması Çizelge 5.3’te verilmiştir. Bu çalışmanın uygulama alanı olan enerji sektöründe de birçok çalışma literatürde yer almıştır.

Çizelge 5.3. Çok kriterli karar verme yöntemleri ile çözülen çalışmaların uygulama alanları

Enerji	Al-Najjar ve Alsyouf, (2003); Mechefske ve Wang, (2003); Wang vd., (2007); Asadian vd., (2008); Dong vd., (2008); Gassner, (2010); Peng ve Wang, (2011a); Peng ve Wang, (2011b); Sarkar ve Behera, (2012); Rashidpour, (2013); Panchal ve Kumar, (2017); Shafiee vd., (2019); Özcan vd., (2020)
Ulaşım	Ramadhan vd., (1999); Cheng ve Tsao, (2010); Dutta vd., (2011); Gaonkar vd., (2011); Kushwash, (2012); Ioannis ve Nikitas, (2013); Jayaswal vd., (2013); Sagar vd., (2013); Goossens ve Basten, (2015)
İmalat	Azadivar ve Shu, (1999); Okumura ve Okino, (2003); Zaeri vd., (2007); Ierace ve Cavalieri, (2008); Pariazar vd., (2008); Chan ve Prakash, (2012); Görener, (2013); Odeyale vd., (2013); Seiti vd., (2017)
Otomotiv	Labib vd., (1998a); Labib vd., (1998b); Labib, (2004); Nezami ve Yildirim, (2011); Nezami ve Yildirim, (2013); Aghaee ve Fazli, (2012)
Petrol, gaz ve Petrokimya	Bevilacqua ve Braglia, (2000); Carnero, (2005); Bertolini ve Bevilacqua, (2006); Arunraj ve Maiti, (2010); Ratnayaka ve Markeset, (2010); Momeni vd., (2011); Tan vd., (2011); Kumar ve Maiti, (2012)
Proses	Sharma vd., (2005); Li vd., (2007); Ghosh ve Roy, (2010); Jajimoggala vd., (2011); Sadeghi ve Alborzi-Manesh, (2012)
Madencilik	Fouladgar vd., (2012); Shahin vd., (2012a); Shahin vd., (2012b); Pourjavad vd., (2013); Xie vd., (2013)
Kağıt endüstrisi	Al-Najjar ve Alsyouf, (2003); Alsyouf, (2004); Zaim vd., (2012)
İnşaat	Bertolini vd., (2004); Reichelt vd., (2008); Akhshabi, (2011)
Tekstil	Shyjith vd., (2008); Ilangkumaran ve Kumanan, (2009); Ilangkumaran ve Kumanan, (2012)
Havacılık	Ahmadi vd., (2009); Ahmadi vd., (2010)
Diğer	Fazlollahtabar ve Yousefpoor, (2008); Tajadod vd., (2011); Nagar, (2011); Thor vd., (2013a)

Bakım strateji seçimi problemine sadece bir tane çok kriterli karar verme yöntemi ile çözüm bulmak yerine, çok kriterli karar verme yöntemlerinin kombinasyonunu kullanarak çözüme ulaşan araştırmacılar bulunmaktadır. Bu araştırmacılar farklı karar yöntemlerini birlikte kullanmaları ile bakım strateji seçimi problemine farklı bir yön kazandırmışlardır. Bu durum araştırmacılar tarafından ilgi görmekle birlikte, ilginin sonucu olarak bakım strateji seçimi problemini AHP-TOPSIS, ANP-TOPSIS, FAHP-VIKOR, AHP-PROMETHEE, FAHP-CODAS, ANP-DEMATEL ve AHP-COPRAS entegrasyonu ile çözülen birçok çalışma literatürde yerini almıştır. Çok kriterli karar verme yöntem entegrasyonu kullanılan çalışmalar Çizelge 5.4'te verilmiştir. 7 çalışma ile en çok kullanılan yöntem entegrasyonu AHP-TOPSIS olmuştur.

Çizelge 5.4. Çok kriterli karar verme yöntem entegrasyonu kullanılan çalışmalar

AHP-TOPSIS	Shyjith vd., (2008); Ilangkumaran ve Kumanan, (2009); Ahmadi vd., (2010); Ioannis ve Nikitas, (2013); Lazakis ve Ölçer, (2016); Kirubakaran ve Ilangkumaran, (2016); Panchal ve Kumar, (2017);
AHP-Hedef Programlama	Bertolini ve Bevilacqua, (2006); Arunraj ve Maiti, (2010); Ghosh ve Roy, (2010); Jajimoggala vd., (2011); Özcan vd., (2017);
ANP-TOPSIS	Pourjavad vd., (2013);
FAHP-VIKOR	Ilangkumaran ve Kumanan, (2012);
AHP-PROMETHEE	Emovon vd., (2018); Özcan vd., (2020)
FAHP-CODAS	Panchal vd., (2017);
ANP-DEMATEL	Aghaie ve Fazli, (2012);
AHP-COPRAS	Fouladgar vd., (2012);
Diğer	Pariazar vd., (2008); Peng ve Wang, (2011a); Tajadod vd., (2011);

Çok kriterli karar verme yöntemlerinin birlikte kullanılması ile çözümün analitik seviyesi yükselmiş fakat, problem boyutunun arttığı sistemlerde bu yöntemler yetersiz kalmıştır. Bu noktada araştırmacılar, birden fazla ekipman için bakım strateji seçimi

problemini çok kriterli karar verme yöntemi olan hedef programlama ile çözmüşlerdir (Bertolini ve Bevilacqua, 2006; Ghosh ve Roy, 2009; Arunraj ve Maiti, 2010; Jajimoggala vd., 2013; Özcan vd., 2017). Bakım strateji seçimi problemi bu aşamada yerini bakım strateji optimizasyonuna bırakmıştır. Hedef programlama yöntemi aynı zamanda çok kriterli karar verme yöntemleri ile entegre edilerek kullanılabilir. Bertolini ve Bevilacqua (2006) petrol rafinerisindeki santrifüj pompalar için optimal bakım stratejisini AHP ve hedef programlama yöntemlerinin entegrasyonu ile belirlemişlerdir. Bu çalışmanın uygulama alanı olan hidroelektrik santralda ise Özcan vd. (2017) AHP-TOPSIS-hedef programlama yöntem entegrasyonu ile 9 ekipmana uygulanacak optimal bakım stratejilerini belirlemişlerdir. Hedef programlama yöntemi, birden fazla ekipman için çok amaçlı bakım strateji optimizasyonu problemine çözüm yöntemi olarak literatürde yerini almıştır. Fakat hedef programlama yönteminde birden fazla amaç, problemin karmaşıklık seviyesi artırmakla birlikte optimal sonucu elde etme konusunda problemler oluşturmaktadır. Ayrıca birden fazla amaç daha çok veri ihtiyacını da ortaya çıkarmaktadır. Literatür, bu dezavantajlarından dolayı hedef programlama yöntemine alternatif olarak TP yöntemine yönelmiştir (Sankpal vd., 2015). Örneğin, Braglia vd. (2013) her bir stratejinin maliyetlerini ve her bir arıza için hangi bakım uygulamasının geçerli olduğunu belirleyebilmek için FMEA ve TP yöntemlerini kullanmışlardır. Bu çalışmada, üretim duruş minimizasyonunu hedefleyen tek amaçlı model kurulduğu için ve ele alınan santralin yüzlerce ekipmandan oluşması sonucunda oldukça karmaşık bir bakım strateji optimizasyonu problemine optimal çözüm arandığı için TP yöntemi kullanılmıştır.

Hidroelektrik santrallarda TP yöntemi ile bakım strateji optimizasyonu çalışmalarına bakıldığında üç çalışma bulunmaktadır. İlk çalışma Yumuşak vd.,'nin 2018 yılında yaptığı generatör ekipmanın ele alındığı çalışmadır. Bu çalışmada Yumuşak vd., öncelikle 1404 ekipman için AHP-TOPSIS yöntemleri ile santral açısından kritik seviyeleri hesaplamışlardır. Bu hesaplamanın sonucunda en yüksek çıkan generatör ekipmana uygulanacak optimal bakım stratejisi TP yöntemi ile elde etmişlerdir. Kurdukları modelin amaç fonksiyonu maliyet minimizasyonudur. İkinci çalışmada ise Özcan vd. (2019b) hidroelektrik santraldaki 7 ekipman grubu için optimal bakım stratejisini belirlemişlerdir. Özcan vd. (2019b) ilk aşamada santral açısından kritik olan ekipman gruplarını belirlemek için AHP yöntemi ile kriterleri ağırlıklandırmış ve

TOPSIS yöntemi ile santraldaki bütün elektriksel ekipmanların kritiklik seviyelerini hesaplamışlardır. Ardından TP yöntemi ile 7 ekipman grubu (generatör, ikaz trafosu, ana güç trafosu, gerilim trafosu, akım trafosu, kesici, ayırıcı) için optimal bakım stratejilerini belirlemişlerdir. Hidroelektrik santralı ele alan son çalışmada ise Yumuşak vd. (2019) türbin ekipman grubuna optimal bakım stratejileri AHP-TP yöntemleri ile belirlemişlerdir. İlk olarak hidroelektrik santraldaki üç ünitenin yıpranma oranını hesaplamışlardır. Ardından bu oran TP modelinde kullanarak optimal sonuçlar elde edilmiştir. Üç çalışmada da amaç maliyeti minimize etmektir.

Literatürde çok kriterli karar verme yöntemleri ve TP yöntemi dışında metasezgisel yöntemlerle çözülen bakım stratejisi belirleme çalışmaları bulunmaktadır. GA, bakım strateji yönetimi konusunda yapay zeka yöntemleri arasında en popüler çözüm yöntemidir. Büyük boyutlu optimizasyon problemlerinin karmaşıklığı karşısında minimum hesaplama yapma yeteneğiyle güçlü bir yapay zeka tekniği olarak literatürde yerini almıştır. Endüstri mühendisliğinin ilgilendiği problemlerde ve özellikle bakım optimizasyonunda sıklıkla kullanılmaktadır (Kobbacy, 2008).

Yapay zeka yöntemleri ile yapılan çalışmalar Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Yapay zeka yöntemleri ile yapılan çalışmalar

Yazarlar ve yayın yılı	Kullanılan yöntem	Uygulama
Marseguerra ve Zio (2000)	Monte Carlo Simülasyonu, Genetik algoritma	Kimyasal proses tesisi
Martorell vd. (2005)	Genetik algoritma	Acil dizel jeneratörü
Morcous and Lounis (2005)	Genetik algoritma	Beton köprü güvertesi
Ilgin and Tunali (2007)	Genetik algoritma	Sayısal örnek
Villanueva vd. (2008)	Monte Carlo Simülasyonu, Genetik algoritma	Yüksek basınçlı enjeksiyon sistemi
Okasha ve Frangopol (2009)	Genetik algoritma	Köprü üst yapısı ve beş çubuk çelik kafes
Chung vd. (2009)	Genetik algoritma	Varsayımsal vaka
Heo vd. (2010)	Genetik algoritma	Güç iletimi
Martorell vd. (2010)	Genetik algoritma	Motorlu pompa
Mahadevan vd. (2010)	Monte Carlo Simülasyonu, Genetik algoritma	Çimento endüstrisinde ham değirmen sistemi
Charongrattanasakul ve Pongpullponsak (2011)	Genetik algoritma	Sayısal örnek
Azadeh vd. (2014)	Bulanık ayırık olay simülasyonu	Seri üretim hattı

Yapay zeka yöntemleri ile yapılan çalışmalar detaylı incelendiğinde Martorell vd. (2005) nükleer santraldaki acil durum dizel generatörünü ele almışlardır. Çalışmada optimal bakım stratejisini bulmak için çok amaçlı GA kullanmışlardır. Araştırmacılar güvenilirlik kriterinin yanı sıra maliyet ve görev etkisi gibi daha fazla kriteri göz önünde bulundurarak problemin çok kriterli yapısını ortaya koymuşlardır. Problem çözümünü etkileyen bu kriterler bazında santralin emniyetini yükseltmeyi hedeflemişlerdir.

Morcous ve Lounis (2005) yaptıkları çalışmada altyapı ağlarını uygulama alanı olarak seçmişlerdir. Bakım alternatiflerini planlamak için Markov zinciri modeli ile birlikte GA kullanarak bir yaklaşım sunmuşlardır. Önerdikleri yaklaşım ile beton köprü

teraslarının bakım stratejileri değerlendirilmiştir. Sistemin verimliliğini artırmayı amaçlamışlardır.

İlgin ve Tunalı (2007) yaptıkları çalışmada otomotiv sektöründe gerçek bir vaka çalışması yaparak yedek parça envanter yönetimi için en uygun politikayı belirlemişleridir. Önerdikleri modelde GA 'ya dayalı simülasyon optimizasyonunun etkinliğini vurgulamışlardır.

Villanueva vd. (2008) yaptıkları çalışmada çok kriterli karar verme problemindeki güvenilirlik ve maliyete dayanan belirsizliklerle başa çıkmak için bira yaklaşım önermişlerdir. Monte Carlo simülasyonu ile GA nerilen yenilikçi yaklaşımlar, dağıtım gerektirmeyen tolerans aralıklarına göre etkin bir şekilde birleştirerek belirsizlik altında test ve bakımın güvenilirliği ve maliyet optimizasyonu için sağlam, hızlı ve güçlü bir araç sağlayabilmektedir. Metodolojinin fizibilitesini göstermek için basınçlı su reaktörünün basitleştirilmiş yüksek basınçlı enjeksiyon sistemi ile ilgili bir örnek çalışma yapmışlardır.

Okasha ve Frangopol (2009) yaptıkları çalışmada, sistem güvenilirliği, atıl kapasite ve yaşam döngüsü maliyetini ölçüt olarak dikkate alarak yapısal bakım stratejilerinin otomatik çok amaçlı optimizasyonu için bir ereve sunmuşlardır. Problem zmnde GA kullanmışlardır. İki farklı strateji önermişlerdir. Her iki strateji de, optimizasyon programının başka bir tasarım değişkeni tarafından belirlenen bir zamanda uygulanacak bakım seçeneklerini belirlediği bakım kodu tasarım değişkenlerini kullanır. Önerilen yaklaşımın en büyük avantajı, bakım müdahalelerinin kritik olmayan, daha fazla ekonomi sağladığı ve verimliliğini kanıtladığı yapısal bileşenlere uygulanmasını engelleyebilmesidir.

Chung vd. (2009) yaptıkları çalışmada çoklu fabrika üretim ağı için çift katmanlı bir genetik algoritma yaklaşımı önermişlerdir. Çalışmanın amacı, sistemin güvenilirliğini önceden tanımlanmış ve kabul edilebilir seviyede tutmak için eşzamanlı olarak kusursuz ve kusurlu bakımı planını yapmaktır.

Heo vd. (2010) yaptıkları çalışmada elektrik iletim sistemindeki en uygun bakım stratejisini bulmak için ekipmanın yaşlanmasını, farklı ekipmanların farklı özelliklere sahip olduğunu, ekipman arızasını ve bakımın sistem üzerindeki etkisini dikkate almışlardır. Çalışmada ekipman durum modelini, yaşlanan ekipmanı temsil eden ve her ekipman için yaşlanma derecelendirme sayısını artıran veya azaltan değiştirilmiş yarı Markov zinciri aracılığıyla sunmuşlardır. Önerilen modelde, yaşlanmakta olan çok farklı ekipmanlardan oluşan iletim sistemlerinde bakım stratejilerinin belirlenmesi için GA kullanmışlardır.

Mahadevan vd. (2010) yaptıkları çalışmada çimento endüstrisinde hammadde sistemi için en uygun maliyetli bakım politikasına karar vermek için Monte Carlo simülasyonu ve GA'nın bir kombinasyonunu ortaya koymuşlardır.

Martorell vd. (2010) nükleer santralda yaptıkları çalışmanın ikinci fazını sunmuşlardır. Bu fazda insan ve malzeme kaynaklarının etkisi bütünleştirilmiştir. Önerilen model stratejilerin türünün bakım aralıklarına, sürelerine, insan kaynaklarına ve malzeme kaynaklarına, temsil eden temel model parametrelerine direkt bağlı olduğunu net bir şekilde ortaya koymuştur. Modelde çok amaçlı GA kullanılmıştır. Model motorlu bir pompa üzerinde uygulama örneği gerçekleştirilmiştir.

Charongrattanasakul ve Pongpullponsak (2011) yaptıkları çalışmada EWMA kontrol çizelgesinin bütünleşik ekonomik tasarımını, çizelgenin altı test değişkeninin değerlerini (örneklem büyüklüğü, örnekleme aralığı, ikisi arasındaki alt girişim sayısı) belirlemişlerdir. Ardışık örnekleme süreleri, uyarı limit katsayısı, planlı bakımdan önce alınan numune sayısı ve ağırlık sabiti parametrelerini optimize etmek için bir GA modeli önermişlerdir. Modelde saat başına toplam maliyeti minimize etmeyi amaçlamışlardır.

Marseguerra ve Zio (2000) yaptıkları çalışmada kimyasal proses tesisi lojistiği için işletme maliyeti ve gelirleri açısından optimal bakım politikasını belirlemek amacıyla Monte Carlo simülasyonu ve GA entegrasyonunu kullanmışlardır.

Bu tez çalışmasında ise hidroelektrik santraldaki bakıma yönelik tüm ekipmanlara uygulanacak en uygun bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Karmaşık ve zor bir problem olduğu için ve bu problemde uygulanan yöntemlerin olumlu ve olumsuz yönlerinin araştırmak için basitten karmaşık probleme doğru ilerleyen bir çalışma süreci gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden ilk olarak santralin en kritik ekipmanlarından biri olan generatör ekipmanına literatürde sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemleri kombinasyonu ile çözüm bulunmuştur. Ardından problem boyutu arttırılarak 571 elektriksel ekipmana uygulanması gereken optimal bakım stratejileri belirlenmiştir. Bu problemde çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve COPRAS yöntemleri ile parametre hesaplamaları yapılmıştır ve 0-1 TP yönteminde bu parametreler kullanılarak optimal sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak problem boyutu 988 ekipman olan mekanik ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Bu problemde sezgisel bir yöntem olan YSA kullanılmıştır.

Yapılan incelemeler doğrultusunda tez çalışmasının literatüre katkıları şunlardır:

- Bakım strateji optimizasyonu problemi ilk defa bir enerji santralında sistem dahilinde çözümlenmiştir. Örneğin, literatürde santralda sadece kritik ekipmanlar belirlenerek bu ekipmanlara çözüm getirilmişken (Özcan vd., 2017 ; 2019b) bu çalışmada, santraldaki bütün elektriksel ekipmanların tamamı için bir çözüm elde edilmiştir. Önerilen model kapsamında 571 ekipmanın optimal bakım stratejileri belirlenmiştir. Literatürde ilk defa bakım strateji optimizasyonu probleminde bu kadar büyük boyutta bir probleme optimal sonuç veren bir model bu çalışma ile önerilmiştir.
- Problem sistem boyutunda ele alındığı ve santral ünitelerden oluştuğu için problemde özdeş ekipmanlar bulunmaktadır. Fakat bu ekipmanlar farklı ünitelerde yer aldıkları için farklı üretim ve bakım süreçlerine tabi tutulmuştur. Bu üretim ve bakım faaliyetleri özdeş ekipmanlar arasında yıpranma farklılıkları oluşturmuştur. Oluşan yıpranma farklılıkları, sebep oldukları arızalar nedeniyle farklı ünitelerde yer alan özdeş ekipmanlara uygulanacak bakım stratejisini direkt etkilemektedir. Bu çalışmada literatürde ilk defa yıpranma oranı AHP ile hesaplanıp modele yansıtılmış ve modelin gerçek hayat tutarlılığı sağlanmıştır.

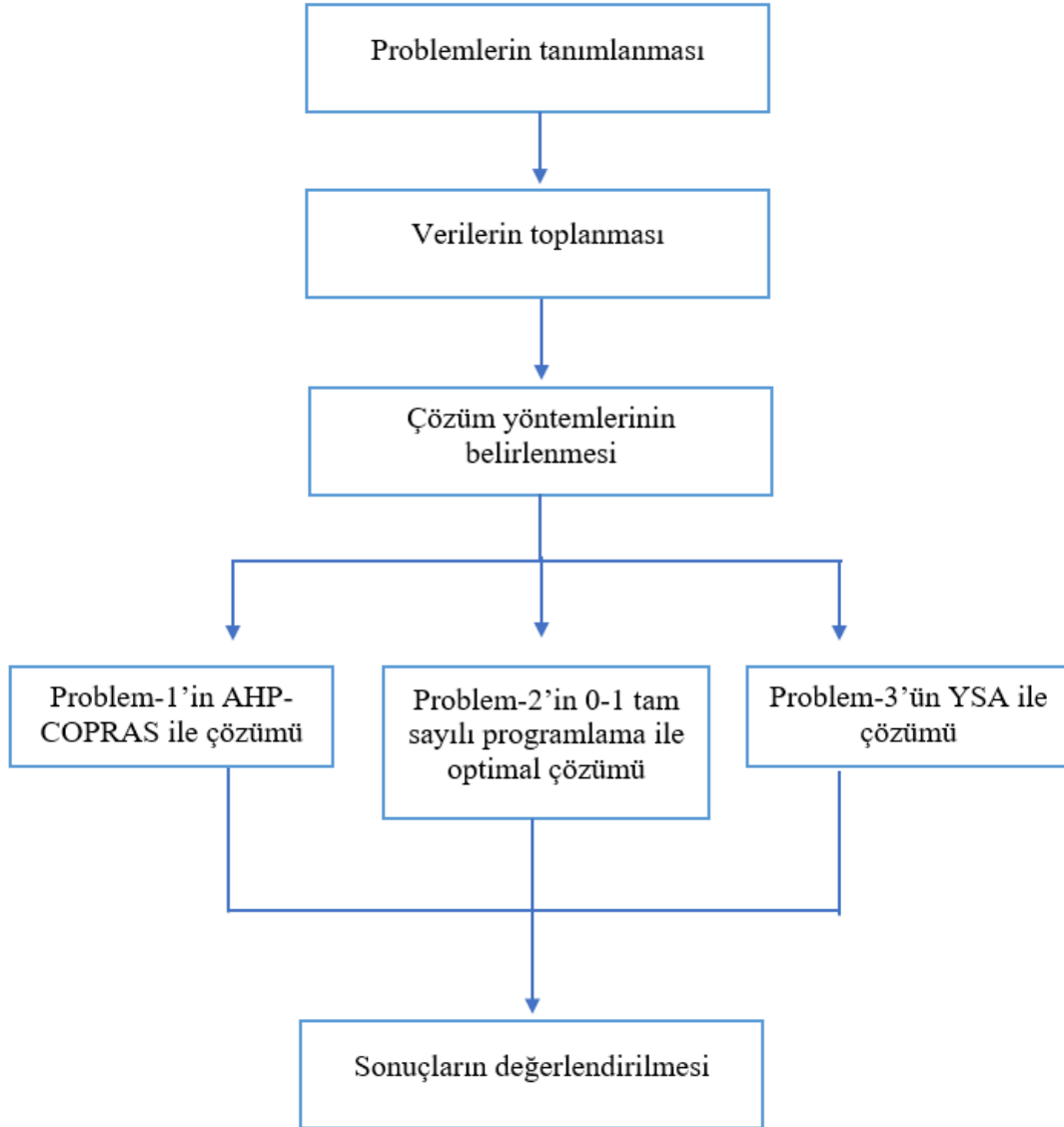
- Literatürde, genellikle maliyet minimizasyonunu içeren tek amaçlı veya bakım sürelerinin, bakım maliyetlerinin, duruş sürelerinin vb. minimizasyonunu içeren çok amaçlı modeller önerilmiştir. Bu çalışmada ise, sistemin üretim duruş süresi minimize edilerek tek bir amaç ile çok amaçlı yapı yansıtılarak, sistemin gerçek hayattaki niteliklerini yansıtacak şekilde bir model önerilmiştir. Başka bir ifade ile üretim duruşlarının minimizasyonu amacı, maliyet minimizasyonu, risk faktörlerinin minimizasyonu ve güvenilirlik maksimizasyonu gibi birçok amacı ihtiva etmektedir.
- Literatürde bakım strateji optimizasyonu problemi için AHP-COPRAS-TP yöntemlerinin entegrasyonu ilk defa kullanılmıştır. Ekipman yıpranma oranlarının belirlenmesi, ekipmanların santral açısından kritiklik düzeylerinin tespiti ve her bir bakım stratejisinin santrale sağladığı katma değerin belirlenmesinden oluşan çalışma kapsamında yer alan karar problemlerinin analitik olarak elde edilen çözüm kombinasyonu ile sistemin gerçek hayattaki dinamikleri dikkate alınarak bakım stratejilerinin ekipmanlara optimal ataması elde edilmiştir.
- YSA ile çözülen model ile bakım strateji belirleme literatüründe ilk defa 0-1 TP yöntemi ile elde edilen sonuçlar bir YSA modeline öğretilerek çözüm bulunmuştur. Bu çözüm hem yöntem entegrasyonu açısından hem de problem boyutunun büyüklüğü açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca bakım strateji belirleme probleminde ilk defa YSA yönteminden yararlanılmıştır. YSA yönteminin sınıflandırma yeteneği, karmaşık olan bakım strateji belirleme problemini basitleştirmiştir.
- Son olarak bakım strateji belirleme literatüründe ilk defa farklı problem boyutları ile farklı yöntem entegrasyonları karşılaştırılarak yöntem avantaj ve dezavantajları araştırılmıştır.

6. UYGULAMA

Özellikle nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme olgusu ile sürekli gelişen teknoloji, son on yılda Türkiye’de elektrik enerjisine olan talebi yıllık ortalama %5,6 oranında artırmıştır. Aynı zaman diliminde Türkiye’de kişi başına düşen elektrik tüketimi ise, %64,4’lük artışla 2.052 kWh’den 3.373 kWh’e ulaşmıştır. Hidroelektrik santrallar, Türkiye’de gerçekleşen bu önemli talep artışının beşte birini karşılamaktadır (Özcan vd., 2020). Bu nedenle, kesintisiz güç üretimi Türkiye enerji arz güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Elektrik üretim santrallarında sürdürülebilir enerji arzının iki sacayağından birisinin bakım yönetimi olduğu gerçeği ele alındığında, hidroelektrik santrallardaki bakım planlamasının kritik önemi karşımıza çıkmaktadır (Özcan vd., 2017). Ele alınan hidroelektrik santral uzun yıllardır aktif bir şekilde üretim süreçlerini devam ettirmektedir. Normal şartlarda hidroelektrik santrallara işletme ve bakım direktifleri doğrultusunda düzenli olarak revizyon bakım stratejisi uygulanması gerekmektedir. Fakat bu bakım stratejisinin uygulanabilmesi için ünite başına ortalama 110 takvim günlük bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum yıl içerisinde üretim ve bakımın entegre bir şekilde planlanmasını zorlaştırmakta ve sonucunda düzenli bir şekilde revizyon bakım stratejisi uygulanamamaktadır. Ancak santralda arıza oluştuğunda üretimin devam edebilmesi için arıza bakım stratejisi uygulanmaktadır. Sadece elektrik iletim sistem operatöründen alınan izinler ile revizyon bakım yapılmaktadır. İncelenen hidroelektrik santral uzun yıllar bu şekilde işletildiği için arıza oranları artmıştır. Bu sebepten dolayı santral uzmanları ile farklı bakım stratejilerinin uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu gereklilik sonucunda bu tez çalışmasında ele alınan hidroelektrik santraldaki ekipmanlara uygulanması gerek bakım stratejileri araştırılmıştır.

Bakım planlamasının en kritik aşamalarından ilki ise ekipmanlara uygulanacak optimal bakım stratejilerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda bu tez çalışmasında Türkiye’deki sürdürülebilir enerji üretimi sürecine büyük katkısı ile önem arz eden büyük ölçekli bir hidroelektrik santralda uygulanacak optimal bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Hidroelektrik santrallar binlerce ekipmandan oluşmaktadır ve bütün ekipmanlara uygulanacak optimal bakım stratejilerin belirlenmesi zor ve karmaşık bir problemdir. Bu probleme çözüm getirebilmek adına

uygulama süreci aşama aşama ilerletilmiştir. Her bir aşamada problem boyutu genişletilerek literatürde yer alan çözüm yaklaşımları ve problemin yapısı değerlendirilerek farklı yöntem kombinasyonları ile çözüm üretilmiştir. Problemlere üretilen çözümlerin uygulama akış şeması Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Uygulama akış şeması

Şekil 6.1’de belirtildiği üzere ilk olarak problemler tanımlanmıştır. Bütün santral ekipmanlarına en uygun bakım stratejilerinin belirlenmesi karmaşık ve zor bir problem olduğu için ve bu problemde uygulanan yöntemlerin olumlu ve olumsuz yönlerinin araştırmak için basitten karmaşık probleme doğru ilerleyen bir çalışma süreci gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden ilk olarak santralin en kritik ekipmanına literatürde

sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemleri kombinasyonu ile çözüm bulunmuştur. Bu problem çalışmada Problem-1 olarak adlandırılmıştır. Ardından problem boyutu artırılarak 571 elektriksel ekipmana uygulanması gereken optimal bakım stratejileri belirlenmiştir. Bu problemde çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve COPRAS yöntemleri ile parametre hesaplamaları yapılmıştır. Üç aşamada kullanılan AHP yöntemi uygulama adımlarında veri toplamak için santral uzmanlarına başvurulmuştur. Uzmanlardan her biri 10 ila 25 yıl hidroelektrik santral işletme ve bakım tecrübesine sahip, meslekleri endüstri, elektrik, elektrik-elektronik ve makine mühendisi olan 8 santral uzmanı ile gerçek hayat hidroelektrik santral işletme kuralları dikkate alınarak veriler elde edilmiştir. Çok kriterli karar verme ile hesaplanan parametreler 0-1 TP yönteminde kullanılarak optimal sonuçlar elde edilmiştir. Santraldaki bütün elektriksel ekipmanları ele alan bu problem Problem-2 olarak tanımlanmıştır. Son olarak problem boyutu binlerce ekipmandan oluşan mekanik ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Bu problem Problem-3 olarak isimlendirilmiş olup toplamda 988 ekipman içermektedir ve sezgisel bir yöntem olan YSA kullanılmıştır. Bu üç problemin sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

6.1. Problem-1'in Çözümü

Problem-1'de hidroelektrik santralların kalbi olarak nitelendirilen generatör ekipmanına uygulanması gereken bakım stratejisi belirlenmiştir. Generatör ekipmanı türbin milindeki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmesi ile hidroelektrik santraldaki en kritik görevi üstlenmektedir. Bu sebepten dolayı bu ekipmana uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Literatürde tek bir ekipmana uygulanacak bakım stratejisinin belirlenmesinde genellikle çok kriterli karar verme yöntemi kullanılmıştır. Problem-1'de ise AHP-COPRAS kombinasyonu kullanılmıştır. Öncelikle AHP yöntemi ile bakım strateji seçimini etkileyen kriterler ağırlıklandırılmıştır. Elde edilen ağırlıklar COPRAS yönteminde kullanılarak generatör ekipmanı için bakım strateji seçimi yapılmıştır. Bakım strateji seçimini etkileyen dört kriter belirlenmiştir. Literatürde yer alan kriterler santral uzmanları ile değerlendirilerek bu kriterler belirlenmiştir. Belirlenen kriterler aşağıda verilmiştir:

Katma değer: Uygulanan bakım stratejisinin ekipman üzerinde oluşturduğu olumlu etkilerin olumsuz etkilerden farkını ifade etmektedir. Yani bakım stratejisi uygulandığında ekipmanın mevcut görevlerini yerine getirme potansiyelidir.

Maliyet: Bakım stratejisi uygulandığında oluşan işgücü, malzeme ve üretim duruş maliyetini kapsamaktadır.

Risk: Bakım stratejilerini uygulanması, beraberinde olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir. Risk olarak adlandırılan bu olumsuzluklara örnek olarak arızadan kaynaklı üretim duruşlarının yaşanması veya hat oturması verilebilir.

Süre: Bakım stratejilerinin uygulanması için gereken zaman dilimidir.

Problem-1'in ilk aşamasında bakım stratejisini etkileyen kriterler AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. İlk olarak Saaty'nin Çizelge 4.1'de verilen önem skalası kullanılarak kriterler arasında ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.1.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. İkili karşılaştırma matrisi

	Katma değer	Maliyet	Risk	Süre
Katma değer	1	2	2	5
Maliyet	0,500	1	2	4
Risk	0,500	0,500	1	5
Süre	0,200	0,250	0,200	1

Bölüm 4.1'de verilen AHP adımları uygulanarak kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Kriter ağırlıkları Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Kriter ağırlıkları

Kriterler	Ağırlıklar
Katma değer	0,426
Maliyet	0,286
Risk	0,222
Süre	0,066

Kriter ağırlıkları hesabının ardından elde edilen sonucun tutarlılığı araştırılmıştır. Tutarlılık oranı 0,077 çıkmıştır. Bu sonuç 0,1 değerinden küçük olduğu için kriter ağırlıklarının tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Kriter ağırlıkları hesaplandıktan sonra COPRAS yöntemi ile bakım stratejileri sıralanmıştır. Hidroelektrik santrallarda uygulanan dört bakım stratejisi arasında değerlendirme yapılmıştır. Generatör ekipmanı için arızı, revizyon, kestirimci ve periyodik bakım stratejileri arasında karşılaştırma yapılmıştır. COPRAS çözümünün ilk adımında karar matrisi oluşturulmuştur. Karar matrisi Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Karar matrisi

	Katma değer	Maliyet	Risk	Süre
Arızı	4,506	46000	10	192
Revizyon	35,830	370	2	64
Kestirimci	32,531	400	4	30
Periyodik	27,133	200	5	40

Karar matrisinin oluşturulmasının ardından Bölüm 4.2'de anlatılan COPRAS uygulama adımları gerçekleştirilmiştir. Bakım stratejilerinin performans indeksi Çizelge 6.4'te verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında revizyon bakım stratejisinin uygulanması gerektiği görülmektedir.

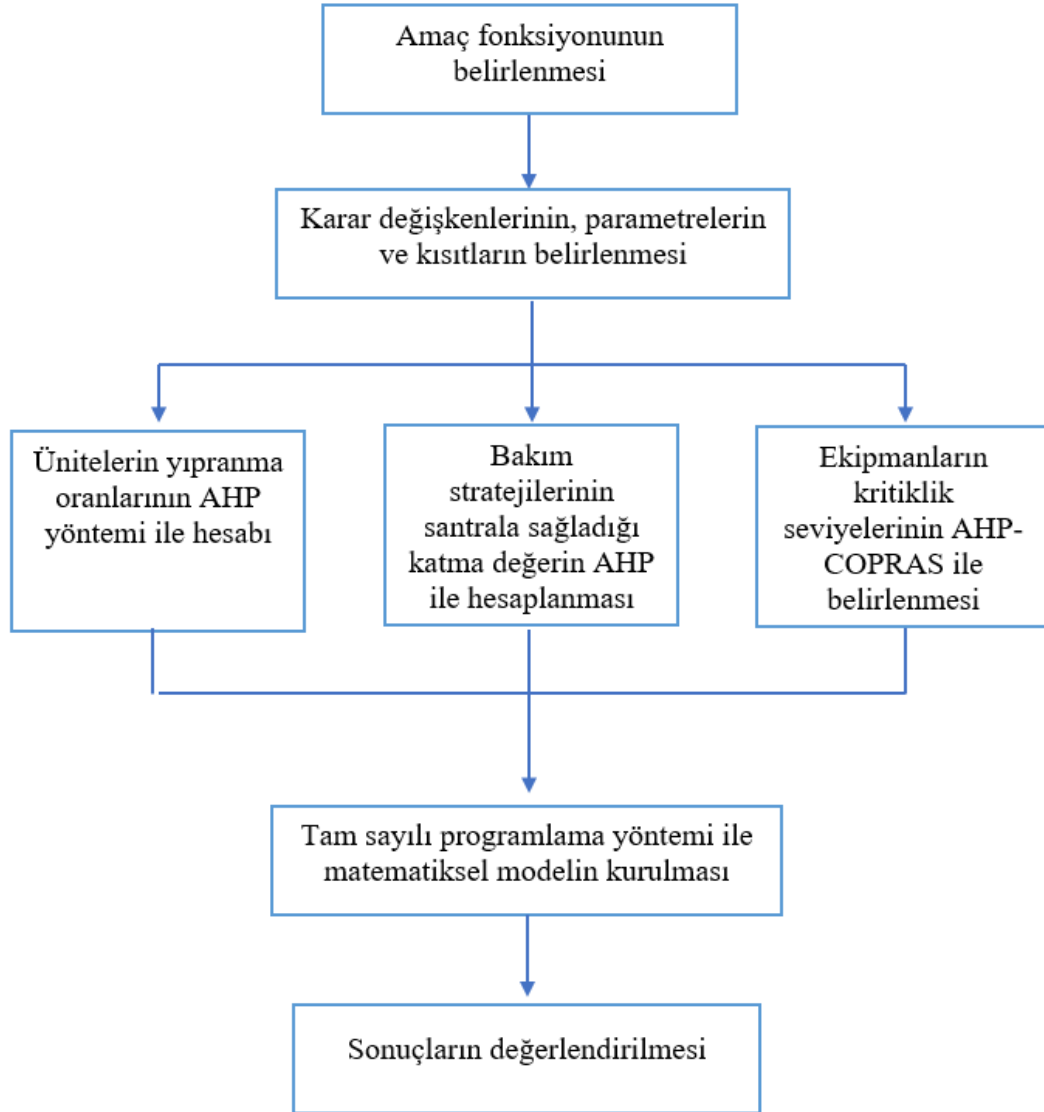
Çizelge 6.4. Performans indeksi

Bakım stratejisi	Performans indeksi
Arızı	8,628
Revizyon	100,000
Kestirimci	71,950
Periyodik	58,823

6.2. Problem-2'nin Çözümü

0-1 TP ile önerilen çözüm yaklaşımı dört aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak özdeş ekipmanların birbirinden farklılıklarını modele yansıtabilmek için dokuz ünitenin yıpranma oranı AHP yöntemi ile hesaplanmıştır. İkinci aşamada her bir bakım

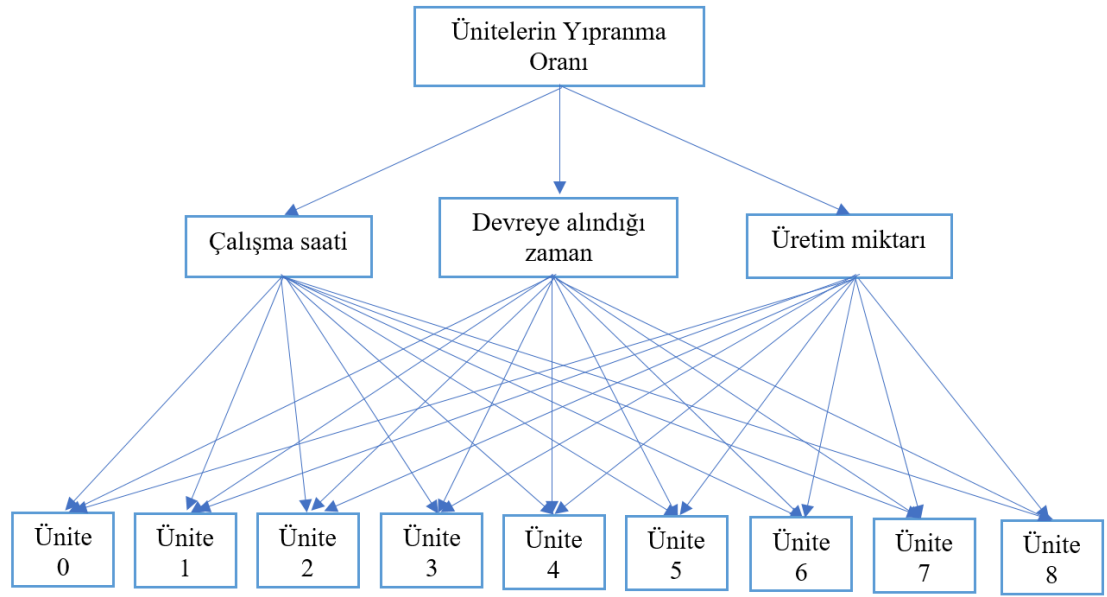
stratejisinin santrale sağladığı katma değer AHP yöntemi ile elde edilmiştir. Üçüncü aşamada ise çalışmada ele alınan ekipmanların santral açısından kritiklik seviyeleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamada çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP-COPRAS entegrasyonu kullanılmıştır. Son olarak bu üç aşamada hesaplanan parametreler 0-1 TP modelinde kullanılarak optimal bakım stratejileri elde edilmiştir. Bu çalışmada önerilen yeni modelin uygulama adımları Şekil 6.2’de özet bir şekilde ifade edilmiştir.



Şekil 6.2. Problem-2 uygulama akış şeması

6.2.1. Yıpranma Oranlarının Hesabı

Hidroelektrik santraller büyük alt yapı yatırımlarıdır. Bu yüzden bütün üniteleri aynı anda üretime almak mümkün olamayabilir. Bu çalışmada ele alınan santral da dokuz üniteden oluşmaktadır. Farklı zamanlarda aktif hale getirilip farklı üretim planları uygulanmıştır. Bu durum üniteler arasında yıpranma farklılığını oluşturmuştur. Aslında modele her bir ekipmanın yıpranma oranı dikkate alınarak çözülmesi gerekmektedir. Fakat santralin binlerce ekipmandan oluşması ve her bir ekipman için ortak parametrelere ait verinin toplanması günümüz şartlarında mümkün olmadığı için ünite bazlı yıpranma oranı hesaplayarak literatürde ilk defa yıpranma oranlarını dikkate alan bir bakım strateji optimizasyonu modeli önerilmiştir. 0-1 TP modelinde, yıpranma oranı yüksek olan ünitelerdeki ekipmanlardan, kritiklik seviyesi yüksek olup arızalandığında ünite duruşuna sebebiyet verecek ekipmanlara periyodik bakım ataması yapılarak arızadan kaynaklı üretim duruşlarının minimizasyonu amaçlanmıştır. Yıpranma oranı hesabında üç kriter dikkate alınmıştır. Bu kriterler ünitenin çalışmaya başladığı zaman, çalışma saati ve üretim miktarıdır. Bu kriterler doğrultusunda dokuz ünite için yıpranma oranları hesaplanmıştır. Problemin çok kriterli yapısı dikkate alındığında, literatürde en çok kullanılan, araştırmacılara karmaşık problemlerde çözüm kolaylığı sağlayan, çok kriterli karar verme yöntemi olan AHP çözüm yöntemi olarak seçilmiştir. Çözüm aşamasında ilk olarak hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. Oluşturulan hiyerarşik yapı Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Yıpranma oranı hesabında hiyerarşik yapı

Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra her bir kriterin ağırlıklarının belirlendiği aşamaya geçilmiştir. İlk olarak ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. Oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi

	Devreye alındığı zaman	Çalışma saati	Üretim Miktarı
Devreye alındığı zaman	1	3	5
Çalışma saati	0,333	1	3
Üretim Miktarı	0,200	0,333	1

Kriter ağırlıklarının hesabı için normalize karar matrisindeki değerlerin satır ortalamaları alınır. Yapılan işlemde sonra oluşan ağırlıklar Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Kriter ağırlıkları

Kriter	Ağırlık
Devreye alındığı zaman	0,633
Çalışma saati	0,261
Üretim Miktarı	0,106

Kriter ağırlıklarının hesabında son adım olarak tutarlılık oranı hesaplanmaktadır. İkili karşılaştırma matrisi ile yapılan hesaplama sonucunda tutarlılık oranı 0,01 çıkmıştır. Bu sonuç yapılan ikili karşılaştırmanın tutarlı olduğunu göstermektedir. Uygulama sonucunda en önemli kriterin 0,63 puanı ile devreye alındığı zaman olduğu görülmektedir. Ardından 0,26 ile çalışma saati yer almaktadır. Son olarak ise 0,11 ile üretim miktarı hesaplanmıştır. Kriter ağırlıkları hesaplandıktan sonra her bir kriter için alternatifler değerlendirilmiştir. İlk olarak devreye alındığı zaman kriteri için ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Devreye alındığı zaman kriteri için ikili karşılaştırma matrisi

	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8
U0	1	0,333	0,333	0,111	0,200	0,111	0,200	0,111	0,200
U1	3	1	1,000	0,125	0,333	0,125	0,333	0,200	0,125
U2	3	1	1	0,125	0,333	0,125	0,333	0,333	0,125
U3	9	8	8	1	7	1	7	7	1
U4	5	3	3	0,14	1	0,143	1	1	0,143
U5	9	8	8	1	7	1	7	7	1
U6	5	3	3	0,14	1	0,14	1	1	0,143
U7	9	5	3	0,14	1	0,14	1	1	0,143
U8	5	8	8	1	7	1	7	7	1

İkili karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra Bölüm 4.1’de anlatılan AHP adımları uygulanmıştır. Devreye alındığı zaman kriterine göre ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı hesaplandığında 0,08 çıkmıştır. Bu sonuç oluşturulan ikili karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğunu göstermektedir. İkinci kriter olan çalışma saati dikkate alınarak ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan matris Çizelge 6.8’da verilmiştir.

Çizelge 6.8. Çalışma saati kriteri için ikili karşılaştırma matrisi

	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8
U0	1	0,333	0,333	0,125	0,200	0,167	0,200	0,167	0,111
U1	3	1	1	0,167	0,200	0,200	0,250	0,200	0,143
U2	3	1	1	0,167	0,333	0,200	0,250	0,200	0,143
U3	8	6	6	1	5	4	5	4	0,333
U4	5	5	3	0,200	1	0,250	0,500	0,250	0,167
U5	6	5	5	0,250	4	1	3	1	0,200
U6	5	4	4	0,200	2	0,333	1	0,333	0,167
U7	6	5	5	0,250	4	1,000	3	1	0,200
U8	9	7	7	3	6	5	6	5	1

İkili karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra Bölüm 4.1’de verilen AHP uygulama adımları gerçekleştirilmiştir. Çalışma saati kriterine göre ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı hesaplandığında 0,07 çıkmıştır. Bu sonuç oluşturulan ikili karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğunu göstermektedir. Üçüncü kriter olan üretim miktarı dikkate alınarak ikili karşılaştırma matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan matris Çizelge 6.9’da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Üretim miktarı kriteri için ikili karşılaştırma matrisi

	U0	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8
U0	1	0,333	0,250	0,111	0,250	0,143	0,200	0,167	0,143
U1	3	1	0,500	0,143	0,500	0,167	0,200	0,167	0,143
U2	4	2	1	0,167	1	0,200	0,500	0,333	0,250
U3	9	7	6	1	6	2	5	4	3
U4	4	2	1	0,17	1	0,200	0,500	0,333	0,250
U5	7	6	5	0,5	5	1	4	3	2
U6	5	5	2	0,20	2	0,25	1	0,5	0,333
U7	6	6	3	0,25	3	0,33	2	1	0,5
U8	7	7	4	0,333	4	0,5	3	2	1

İkili karşılaştırma matrisi oluşturulduktan sonra Bölüm 4.1’de verilen AHP uygulama adımları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak dokuz ünitenin yıpranma oranları hesaplanmıştır. AHP sonucunda elde edilen ağırlıklardan en büyüğü 100’e oranlanarak yıpranma oranları 100 üzerinden güncellenmiştir. Sonuçlar Çizelge 6.10’da verilmiştir.

Çizelge 6.10. Ünitelerin yıpranma oranları

Ünite numarası	AHP sonucu	Yıpranma Oranları
Ünite 0	0.018	7.205
Ünite 1	0.028	11.13
Ünite 2	0.031	12.061
Ünite 3	0.249	97.187
Ünite 4	0.057	22.077
Ünite 5	0.212	82.778
Ünite 6	0.062	24.289
Ünite 7	0.087	33.979
Ünite 8	0.256	100

Sonuçlar incelendiğinde 3. 5. ve 8. ünitenin diğer ünitelere göre daha çok yıprandığı görülmektedir.

6.2.2. Bakım Stratejilerinin Katma Değerinin Hesaplanması

Bakım strateji optimizasyonunda problem çözümünde dikkat edilmesi zorunluluk olan parametre, stratejilerin sistemin bütününe sağladığı katma değerdir. Çünkü bakım stratejileri uygulandığı sisteme yansıyan olumlu ve olumsuz etkileri vardır. Örneğin bakım stratejisinin uygulanması sonucu arızaların azalması ve verimliliğin artması olumlu bir etkiyken stratejinin uygulanması için oluşan maliyet kalemleri olumsuz bir etkidir. Bu sebepten dolayı stratejilerin santrale sağladıkları katma değer hesaplanması ve bu değerlere göre bakım stratejisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada fayda, bakım sürecinin maliyeti, süre ve stratejinin uygulanabilmesi için sağlanması gereken gereksinimler dikkate alınarak dört bakım stratejisi değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan AHP yöntemi ile yapılmıştır. Bölüm 2’de ayrıntılı bir şekilde verilen hidroelektrik santralda uygulanan bakım stratejileri aşağıda özet olarak verilmiştir.

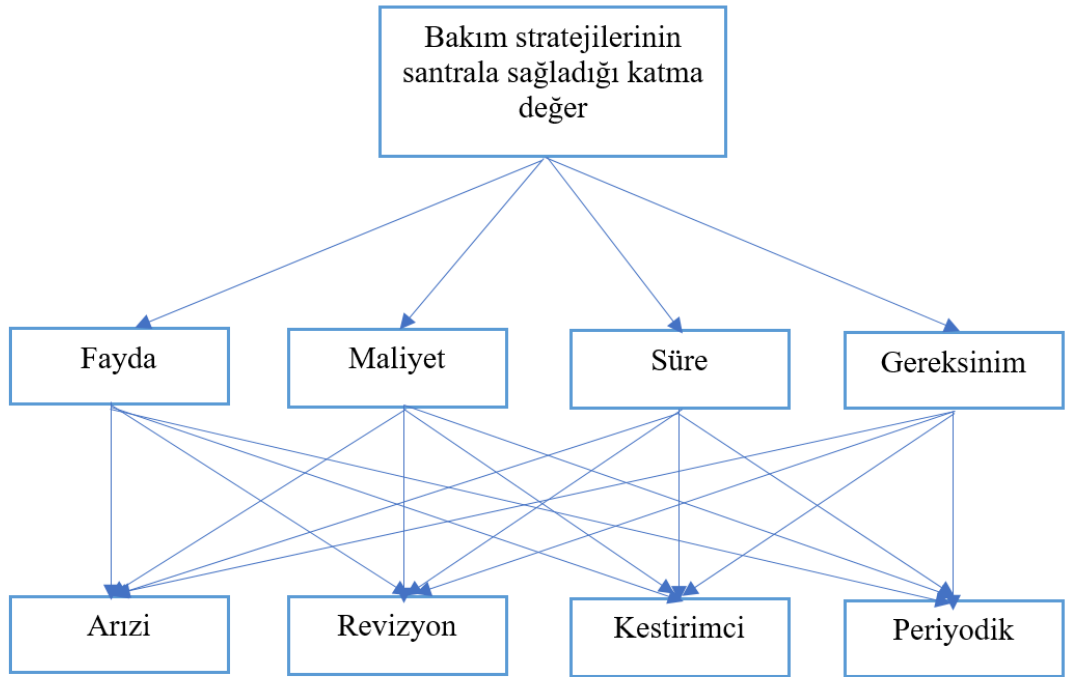
Arızı (Düzeltilici) Bakım Stratejisi: Makine/ekipmanın kendisinden beklenen görevi yerine getiremediği durumda, makine/ekipmanın tasarımındaki özelliklerde çalışması için gerçekleştirilen onarım ve/veya bakım faaliyetleridir.

Periyodik (Önleyici) Bakım Stratejisi: Makine/ekipmanın kesintisiz ve beklenen tasarım spesifikasyonlarında çalışması için bir zaman çizelgesi dahilinde gerçekleştirilen bakım faaliyetleridir.

Kestirimci Bakım Stratejisi: Modern ölçüm ve sayısal işaret işleme (signal-processing) metotları kullanılarak makine/ekipmanın işletilmesi sürecinde izlenmesi ve ölçüm sonuçlarına göre arıza oluşmadan gerekli tedbirlerin alınmasını içeren bakım faaliyetleridir.

Revizyon Bakım Stratejisi: Santral ünitelerindeki tüm kritik ekipmanlara periyodik (8000 saat ya da 5 yıl gibi) olarak yapılan, uzun zaman gereksinimine sahip (2 ay gibi) ve santral ünitesinin duruşunun zorunlu olduğu bakım stratejisidir (Özcan, 2016).

Belirtilen dört bakım stratejisinin santrale sağladığı katma değer fayda, maliyet, süre ve gereksinim kriterleri altında AHP yöntemi ile hesaplanmıştır. İlk olarak hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. Oluşturulan hiyerarşik yapı Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Katma değer hesabında hiyerarşik yapı

İlk olarak hiyerarşide gösterilen 4 bakım stratejisi etkileyen kriterler Saaty (1980) tarafından önerilen önem derecesi skalasına göre karşılaştırılmıştır. Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11. İkili karşılaştırma matrisi

	Fayda	Maliyet	Süre	Gereksinim
Fayda	1	3	7	5
Maliyet	0,333	1	4	2
Süre	0,143	0,250	1	0,5
Gereksinim	0,200	0,500	2,000	1

Fayda kriteri için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.12. Fayda kriteri için ikili karşılaştırma matrisi

	Arızı	Revizyon	Kestirimci	Periyodik
Arızı	1	0,111	0,143	0,200
Revizyon	9	1	3,000	2,000
Kestirimci	7	0,33	1	0,5
Periyodik	5	0,5	2	1

AHP yönteminin gerekli adımları uygulandığında tutarlılık oranı 0,03 çıkmıştır. Maliyet kriteri için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.13’te verilmiştir.

Çizelge 6.13. Maliyet kriteri için ikili karşılaştırma matrisi

	Arızı	Revizyon	Kestirimci	Periyodik
Arızı	1	0,200	0,125	0,143
Revizyon	5	1	0,250	0,333
Kestirimci	8	4,00	1	2
Periyodik	7	3	0,5	1

AHP yönteminin gerekli adımları uygulandığında tutarlılık oranı 0,02 çıkmıştır. Süre kriteri için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.14’te verilmiştir.

Çizelge 6.14. Süre kriteri için ikili karşılaştırma matrisi

	Arızı	Revizyon	Kestirimci	Periyodik
Arızı	1	0,167	0,125	0,143
Revizyon	6	1	0,333	0,333
Kestirimci	8	3,00	1	0,5
Periyodik	7	3	2	1

AHP yönteminin gerekli adımları uygulandığında tutarlılık oranı 0,03 çıkmıştır. Gereksinim kriteri için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 6.15'te verilmiştir.

Çizelge 6.15. Gereksinim kriteri için ikili karşılaştırma matrisi

	Arızı	Revizyon	Kestirimci	Periyodik
Arızı	1	0,167	0,111	0,333
Revizyon	6	1	0,250	4
Kestirimci	9	4	1	7
Periyodik	3	0,25	0,143	1

AHP yönteminin gerekli adımları uygulandığında tutarlılık oranı 0,06 çıkmıştır. Çizelge 6.16'da verilen strateji katma değerleri bulunmuştur. Katma değeri en yüksek olan strateji, revizyon bakım stratejidir.

Çizelge 6.16. Bakım stratejilerinin katma değeri

Bakım Stratejisi	Katma değeri
Arızı	0,045
Revizyon	0,358
Kestirimci	0,325
Periyodik	0,272

6.2.3.Ekipman Kritiklik Seviyelerinin Hesaplanması

Problem-2'de, 571 elektriksel ekipmana hangi bakım stratejilerinin uygulanması gerektiği sorusuna cevap aranmaktadır. Bu problemde bakım stratejisinin ekipmana göre seçilmesi gerekmektedir. Problemi öznel yargılardan uzak analitik seviyesi yüksek optimal bir çözüm elde etmek için matematiksel modeller kullanılmalıdır. Matematiksel modelde ekipmanların birbirinden farklı yönlerini yansıtabilmek için

nitel verileri nicel bilgilere dönüştürülmelidir. Bu sebepten dolayı ele alınan ekipmanların santral açısından kritiklik seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada ilk olarak kritiklik seviyesini etkileyen kriterler literatürde yer alan çalışmalar (Özcan vd., 2017; Özcan vd., 2019b) ve uzmanlar doğrultusunda belirlenmiştir. Belirlenen kriterler: sistem yedeği, bakım öncesi koşullar, arıza periyodu, olası sonuçlar, ölçüm ekipmanlarının mevcudiyeti, işlem süresi ve arıza tespit edilebilirlik. Belirlenen kriterler, ekipmanın santral açısından kritiklik seviyesinin belirlemekte olup her ekipmanın bu kriterler başlığı altında aldığı farklı durumlar bulunmaktadır. Bu durumlar Çizelge 6.17’de verilmiştir.

Çizelge 6.17. Ekipmanın kritiklik seviyesini etkileyen kriterler ve aldığı değerler

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
Arıza periyodu	Ayda 1	8
	3 ayda 1	5
	6 ayda 1	3
	Yılda 1	2
	Uzun Süreli	1
	Bilinmiyor	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 sarfiyatı artar	1
Ölçüm ekipmanlarının mevcudiyeti	Var	3
	Yok	1
İşlem süresi	1 hafta	9
	1 günden fazla	3
	Bilinmiyor	3
	2-8 saat	2
	2 saatten az	1
Arıza tespit edilebilirlik	Tespiti zor	3
	Tespiti kolay	1

Bu kriterlerin etki düzeyleri eşit olmadığı için kriter ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada, çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ile ağırlıklandırma yapılmıştır. Bölüm 4.1’de verilen uygulama adımları santral uzmanlarından alınan veriler ile gerçekleştirilmiştir. Tutarlılık oranı 0,089 çıkmıştır. Kriterler ve ağırlıkları Çizelge 6.18’de verilmiştir.

Çizelge 6.18. Kriter ağırlıkları

Kriterler	Kod	Ağırlık değerleri
Sistem yedeği	C1	0.042
Bakım öncesi koşullar	C2	0.271
Arıza periyodu	C3	0.118
Olası sonuçlar	C4	0.406
Ölçüm ekipmanlarının mevcudiyeti	C5	0.042
İşlem süresi	C6	0.062
Arıza tespit edilebilirlik	C7	0.059

Kriter ağırlıkları belirlendikten sonra ekipmanların kritiklik seviyelerini hesabında gerekli verileri toplama aşamasına geçilmiştir. 571 ekipman için yedi kritere ait veriler toplanılmıştır fakat veri setinin boyutu büyük olduğu için bazı ekipmanların verileri Çizelge 6.19’da verilmiştir. Çizelge 6.19, Çizelge 6.18’e göre oluşturulmuştur.

Çizelge 6.19. Karar matrisinden örnekler

Ekipman Adı	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
220 V DC Akümülatörler	1	1	5	7	1	2	3
380 KV Şalt Sahası Akım Trafosu L1 Fazı	1	7	5	10	3	4	3
380 KV Şalt Sahası Kesicisi L1 Fazı	1	7	5	10	3	4	3
6.3 KV Kesiciler	4	6	3	7	3	4	3
A Bara Ayırıcısı L1 Fazı	1	7	5	10	3	4	3
Ana Güç Trafosu L1 Fazı	1	7	3	10	3	4	3
Ayırıcı Motorları L3 Fazı	1	7	5	10	3	4	3
B Bara Ayırıcısı L2 Fazı	1	7	5	10	3	4	3
BCT 19 (6.3 MVA) Trafosu	4	1	5	7	3	2	3
Elektrojen Grubu Kesicisi	4	1	5	9	1	2	3
Generatör Statoru	1	7	5	10	3	4	3
İç İhtiyaç Trafosu	1	6	3	10	3	4	3

571 ekipmana ait verileri kullanarak Bölüm 4.2’de anlatılan COPRAS adımları uygulanarak ekipmanların kritiklik seviyeleri hesaplanmıştır. Bazı ekipmanların kritiklik seviyeleri Çizelge 6.20’de verilmiştir.

Çizelge 6.20. Bazı ekipmanların kritiklik seviyeleri

Ekipman Adı	Kritiklik seviyesi
220 V DC Akümülatörler	59.900
380 KV Şalt Sahası Akım Trafosu L1 Fazı	100.000
380 KV Şalt Sahası Gerilim Trafosu L1 Fazı	100.000
380 KV Şalt Sahası Kesicisi L1 Fazı	100.000
6,3 KV Kesiciler	85.784
A Bara Ayırıcısı L1 Fazı	100.000
Ana Güç Trafosu L1 Fazı	95.716
Ayırıcı Motorları L3 Fazı	100.000
B Bara Ayırıcısı L2 Fazı	100.000
Basınçsız Yağ Tankı Soğutma Pompası Tahrik Motoru	51.344
BCT 19 (6.3 MVA) Trafosu	70.006
Elektrojen Grubu Kesicisi	75.897
Generatör Rotoru	100.000
Generatör Statoru	100.000
İç İhtiyaç Trafosu	92.254

Problem-2’nin amacı 571 elektriksel ekipmana optimal bakım strateji/stratejilerinin atanmasını sağlamaktır. Bölüm 6.2.1, Bölüm 6.2.2 ve Bölüm 6.2.3’te bu amaç için gerekli parametreler elde edilmiştir. Son olarak problemin 0-1 TP ile optimal sonucunu bulma aşamasına geçilmiştir.

6.2.4. 0-1 TP ile Bakım Strateji Optimizasyonu

Problem 2’nin son aşamasında 571 ekipman için bakım strateji optimizasyonu yapılmıştır. İlk üç aşamada elde edilen değerler ile TP modeli kurulmuştur. Matematiksel modelin amacı, üretim duruşunu minimize etmektir. Başka bir ifade ile önerilen yeni model uygulanacak optimal bakım stratejileri sonucunda santralde, bakım yönetiminden kaynaklı üretim duruşlarını minimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu model, çok amaçlı modellerin aksine sadece bir parametre üzerinde optimizasyon yapsa da bünyesinde birden fazla amaç içermektedir. Çünkü bakım prosesinin en temel

amacına hizmet etmektedir. Bu amaç, sistemdeki bütün ekipmanların sürdürülebilir üretim amacındaki rollerini yerine getirmektir. Üretim duruşlarını azaltmak, maliyeti minimize etme, arz güvenliğini maksimize etme ve risk minimizasyonu gibi birçok amacı içinde barındırmaktadır. Örneğin arz güvenliğinin maksimize edilmesi, üretim duruşlarının minimizasyonuna bağlıdır. Üretim duruşlarına sebebiyet verebilecek durumları ortadan kaldırmak arz güvenliğinin artmasını sağlayacaktır. Veya üretim duruşlarının minimizasyonu arızadan kaynaklı riskleri minimum seviyede tutacaktır. Sonuç olarak, birinci bölümde anlatıldığı gibi en uygun bakım stratejilerinin belirlenmesi sürdürülebilir üretim amacına direkt etki etmektedir. Bu etki göz önünde bulundurulduğunda, modelin amacının üretim duruşlarının minimizasyonu olduğu için diğer amaçları da içinde barındırmaktadır.

Modelde kullanılan notasyonlar ve karar değişkenleri aşağıda tanımlanmıştır.

Notasyonlar:

i : ünite indisi ($i=0, \dots, 8$)

j : ekipman indisi ($i=0$ için $j=27$; $i=1, 2, \dots, 8$ için $j=1, \dots, 68$)

k : bakım stratejisi indisi (1=revizyon, 2=periyodik, 3=kestirimci, 4=arızı)

T_{ijk} : i . ünitedeki j . ekipmana k . bakım strateji uygulandığında üretim duruş süresi

D_{ijk} : i . ünitedeki j . ekipmana k . bakım stratejisi uygulama süresi (adam*saat)

C_{ijk} : i . ünitedeki j . ekipmana k . bakım stratejisinin uygulama maliyeti (işçilik ve malzeme maliyeti toplamı)

T_c : Bakıma ayrılan bütçe (TL)

T_d : Bakıma ayrılan zaman (saat)

Cr_{ij} : i . ünitedeki j . ekipmanın öncelik puanı

Y_i : i . ünitenin yıpranma oranı

W_k : k . bakım stratejisinin katma değeri

Karar değişkenleri:

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{i. ünitadaki j. ekipmana k. bakım stratejisinin atanması durumu} \\ 0, & \text{diğer durum} \end{cases}$$

$$i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, l$$

Model formülasyonu:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l T_{ijk} * X_{ijk} \quad (6.1)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l D_{ijk} * X_{ijk} \leq Td \quad (6.2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l C_{ijk} * X_{ijk} \leq Tc \quad (6.3)$$

$$\sum_{k=1}^l X_{ijk} \geq 1 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (6.4)$$

Eğer $CR_{ij} \geq 85$ ise

$$\sum_{k=1}^l W_k X_{ijk} \geq 0,85 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (6.5)$$

Eğer $CR_{ij} \geq 70$ V $CR_{ij} < 51$ ise

$$\sum_{k=1}^l W_k X_{ijk} \geq 0,70 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (6.6)$$

$$\sum_{k=1}^l W_k X_{ijk} \leq 0,85 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Eğer $CR_{ij} \geq 51 \vee CR_{ij} < 70$ ise

$$\sum_{k=1}^l W_k X_{ijk} \geq 0,51 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (6.7)$$

$$\sum_{k=1}^l W_k X_{ijk} \leq 0,70 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

$$X_{ij1} = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Eğer $CR_{ij} < 51$ ise

$$X_{ij1} = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (6.8)$$

$$X_{ij2} = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

$$X_{ij3} = 0 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

$$X_{ij4} = 1 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n$$

Eğer $Y_i \geq 80 \wedge CR_{ij} \geq 70$

$$X_{ij2} = 1 \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (6.9)$$

Matematiksel modelin formilasyonu yukarıda verilmiştir. Eş. 6.1 modelin amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Üretim duruşunun minimizasyonu anlamına gelmektedir. Eş. 6.2 bakım yapılan sürenin bakıma ayrılan süreden küçük veya eşit olması gerektiğini ifade etmektedir. Eş. 6.3 toplam bakım maliyetinin toplam bakıma ayrılan bütçeden küçük veya eşit olmasını ifade etmektedir. Eş. 6.4 her ekipmana en az bir bakım stratejisinin atanması gerektiği şartını ifade etmektedir. Eş. 6.5- Eş. 6.8 ekipmanların kritiklik seviyelerini dikkate alarak atama yaptıran kısıtlardır. Uygulanacak bakım stratejilerinden elde edilen katma değer toplamı ekipmanın kritiklik seviyesiyle orantılı olması gerekmektedir. Eşik değerleri, Bölüm 3.3'te anlatılan ekipmanların kritiklik seviyelerinin hesaplanması aşamasında en önemli iki

kriter olarak belirlenen bakım öncesi koşullar ve olası sonuçlara göre belirlenmiştir. Eş. 6.9 eğer i. ünitenin yıpranma oranı 80'den büyük veya eşit ise ve ekipmanın kritiklik seviyesi 70'den büyük veya eşit ise periyodik bakımın mutlaka uygulanması gerektiğini ifade etmektedir. Bu kısıt yıpranmanın yüksek olduğu ünitelerde ekipmanın arızalanma ihtimali yüksek olduğu için yazılmıştır. Düzenli olarak periyodik bakım yapıp arızadan kaynaklı üretim duruşlarının minimizasyonu amaçlanmıştır. Kritiklik seviyesine sınır koymasının sebebi ise kritik ekipmanlar için bu bakım maliyetine katlanılması gerektiği ve arızalandığında üretim duruşuna sebebiyet verdikleri içindir.

Problem-2'de ele alınan ekipman sayısı oldukça fazla olduğu için bütün ekipmanların sonuçları verilememiştir. Yıpranma oranları ve kritiklik seviyeleri farklı olan bazı ekipmanlar seçilmiştir. Seçilen bu ekipmanların optimal bakım stratejileri Çizelge 6.21'de verilmiştir.

Çizelge 6.21. Problem-2'nin sonuçları

Ünite no	Ekipman adı	Kritiklik seviyeleri	Revizyon	Periyodik	Kestirimci	Arızı
1	380 KV şalt sahası akım trafosu L1 fazı	100	✓	✓	✓	
5	380 KV şalt sahası gerilim trafosu L1 fazı	100	✓	✓	✓	
3	380 KV şalt sahası kesicisi L2 fazı	100	✓	✓	✓	
4	A bara ayırıcısı L3 fazı	100	✓	✓	✓	
7	Ayırıcı motorları L3 fazı	100	✓	✓	✓	
5	B bara ayırıcısı L2 fazı	100	✓	✓	✓	
1	Generator rotoru	100	✓	✓	✓	
3	Generator statoru	100	✓	✓	✓	
8	Ana güç trafosu L1 fazı	95.716	✓	✓	✓	
2	İkaz trafosu	95.716	✓	✓	✓	
5	Taşıyıcı yatak yağ pompa tahrik motorları	92.62	✓	✓	✓	
1	İç ihtiyaç trafosu	92.254	✓	✓	✓	
7	Trafo aşırı akım rölesi	92.156	✓	✓	✓	
7	Trafo genleşme tankı	91.816	✓	✓	✓	
8	Trafo genleşme tankı	91.816	✓	✓	✓	
2	Slıpring ve karbon fırçalar	91.786	✓	✓	✓	
3	Slıpring ve karbon fırçalar	91.786	✓	✓	✓	
8	Trafo yüksek gerilim buşingleri	90.628	✓	✓	✓	
6	6.3 KV kesiciler	85.784	✓	✓	✓	
7	Servomotor basınçlı yağ pompaları tahrik motorları	82.589	✓		✓	✓
8	Servomotor basınçlı yağ pompaları tahrik motorları	82.589	✓	✓	✓	
1	Hız regülatörü basınçlı yağ pompaları tahrik motorları	78.305	✓		✓	✓
3	Hız regülatörü basınçlı yağ pompaları tahrik motorları	78.305	✓	✓	✓	
7	Hız regülatörü hava kompresörleri tahrik motorları	78.305	✓		✓	✓
8	Hız regülatörü hava kompresörleri tahrik motorları	78.305	✓	✓	✓	
0	Pompa 1-2A tahrik motoru	77.275	✓		✓	✓
0	Elektrojen grubu kesicisi	75.897	✓		✓	✓
0	Derin kuyu pompası-1 tahrik motoru	70.265	✓		✓	✓
0	BCT 19 (6.3 MVA) trafosu	70.006	✓		✓	✓
0	BCT 22 (6.3 MVA) trafosu	70.006	✓		✓	✓
0	Yüksek basınç hava kompresörü tahrik motorları-a1	64.918		✓	✓	
0	220 V DC akümülatörler	59.9		✓	✓	
1	Soğutucu-1 fan-1	52.406		✓	✓	
6	Generator rotoru kaldırma yüksek basınç yağ pompası tahrik motoru	51.923		✓	✓	
8	Generator rotoru kaldırma yüksek basınç yağ pompası tahrik motoru	51.923		✓	✓	
6	Basıncsız yağ tankı soğutma pompası tahrik motoru	51.344		✓	✓	
7	Sızıntı yağ pompası tahrik motoru	35.069				✓
8	Egzost fanı tahrik motoru	31.155				✓

Toplam 571 ekipman için optimal bakım stratejileri elde edilmiştir. Bu sonuçlar için öncelikle üniteler arasındaki yıpranma farkını ortaya koymak için AHP yöntemi ile dokuz ünitenin yıpranma oranı hesaplanmıştır. Ardından bakım stratejilerinin santrale sağladığı fayda AHP yöntemi ile çözülmüştür. Daha sonra ele alınan ekipmanların santral açısından kritiklik seviyeleri AHP-COPRAS entegrasyonu ile çözülmüştür. Hesaplanan üç farklı parametre 0-1 TP modelinde kullanılmıştır. Matematiksel modelin amacı üretim duruşlarının minimizasyonudur. Üretim duruşlarını minimize etme, maliyeti minimize etme, arz güvenliğini maksimize etme ve risk minimizasyonu gibi birçok amacı içinde barındırmaktadır. Bu sayede tek amaçlı bir model ile çok amaçlı yapı yansıtılmış ve uygulanabilir bir model önerisi ortaya çıkmıştır. Kanonik hali yukarıda verilen modelde 2284 karar değişkeni ve 14 kısıt seti bulunmaktadır. Model, ILOG CPLEX Studio IDE sürüm 12.8 kullanılarak 0,68 saniyede optimal sonuç elde edilmiştir.

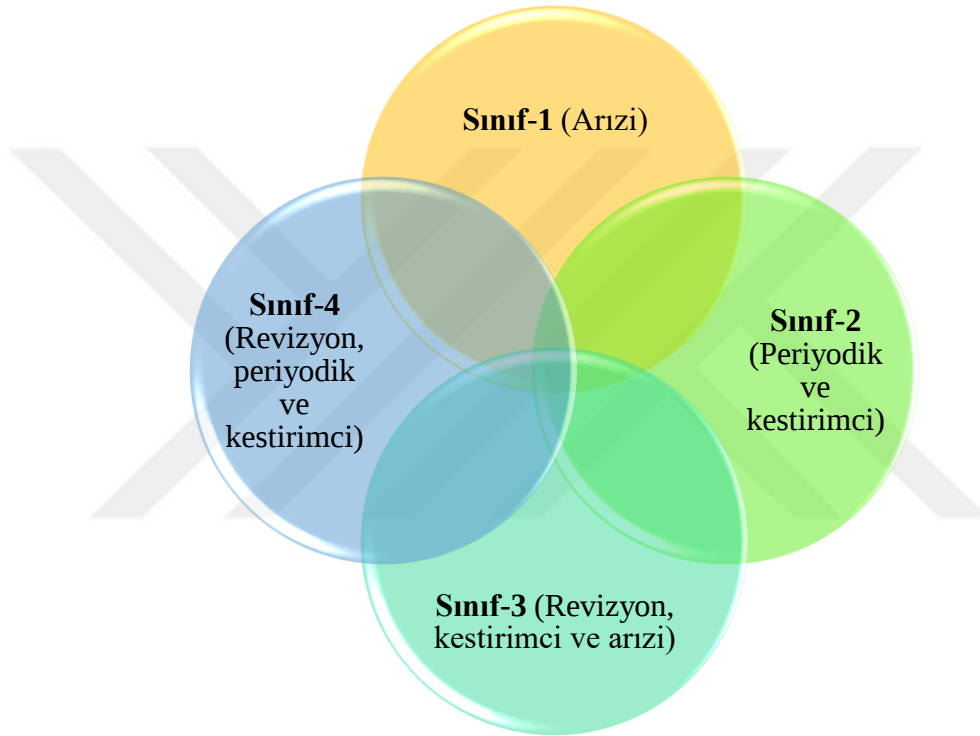
0-1 TP yöntemi ile oluşturulan matematiksel modelin sonuçlarına bakıldığında ekipmanın kritiklik seviyesi 85'ten büyük ise arıza bakım dışındaki bütün bakımların uygulanması gerektiği görülmektedir. Bu sonuç, ekipman sistem için kritik öneme sahipse ekipmanın arızalanmasını beklemeden revizyon, periyodik ve kestirimci bakım uygulanması gerektiği anlamına gelmektedir. Çünkü bu ekipmanlar arızalandığında ünite duruşu sonucunu doğurmakta ve bu sonuç enerji arz güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Kritiklik seviyesi 70 ile 85 arasında olan ekipmanlarda revizyon, kestirimci ve arıza bakım stratejilerinin uygulanması gerekmektedir. Çünkü bu ekipmanlar, arızalandığında santralda üretim duruşuna neden olmaz fakat yedeksiz çalışmak zorunda kalınır. Yedeksiz çalışma ise herhangi bir arıza durumunda üretimin durması riskini oluşturmaktadır. Bu durumda revizyon bakım olan büyük bakımlar mutlaka yapılmalıdır. Ayrıca kestirimci bakım stratejisi ile ekipmanlar sürekli izlenmelidir. Bu izleme, ekipmana arıza yaşanmadan müdahale etme imkanı sunacaktır. Bunların dışında ekipman arızalanırsa arıza bakım stratejisi uygulanmalıdır. Fakat ekipman yıpranma oranı yüksek ünitelerden birinde ise arıza bakım yerine belli periyotlarla bakım uygulanarak arıza oluşma ihtimali minimum seviyede tutulacaktır. Kritiklik seviyesi 51 ile 70 arasında olan ekipmanlar arızalandığında ünite duruşu gerçekleşmez fakat acil durumlarda problem olabilir. Bu sebepten dolayı arızalanmaması için kısa periyotlarla bakım yapıp, kestirimci bakım

ile düzenli bir şekilde ekipmanların izlenmesi yeterli olacaktır. Kritiklik seviyeleri 50'den küçük olan ekipmanların arızalandıklarında sisteme ünite duruşu veya yedeksiz çalışma gibi etkileri olmadığı için sadece arıza bakım uygulanması anlamlı bir sonuçtur.

6.3. Problem-3'ün Çözümü

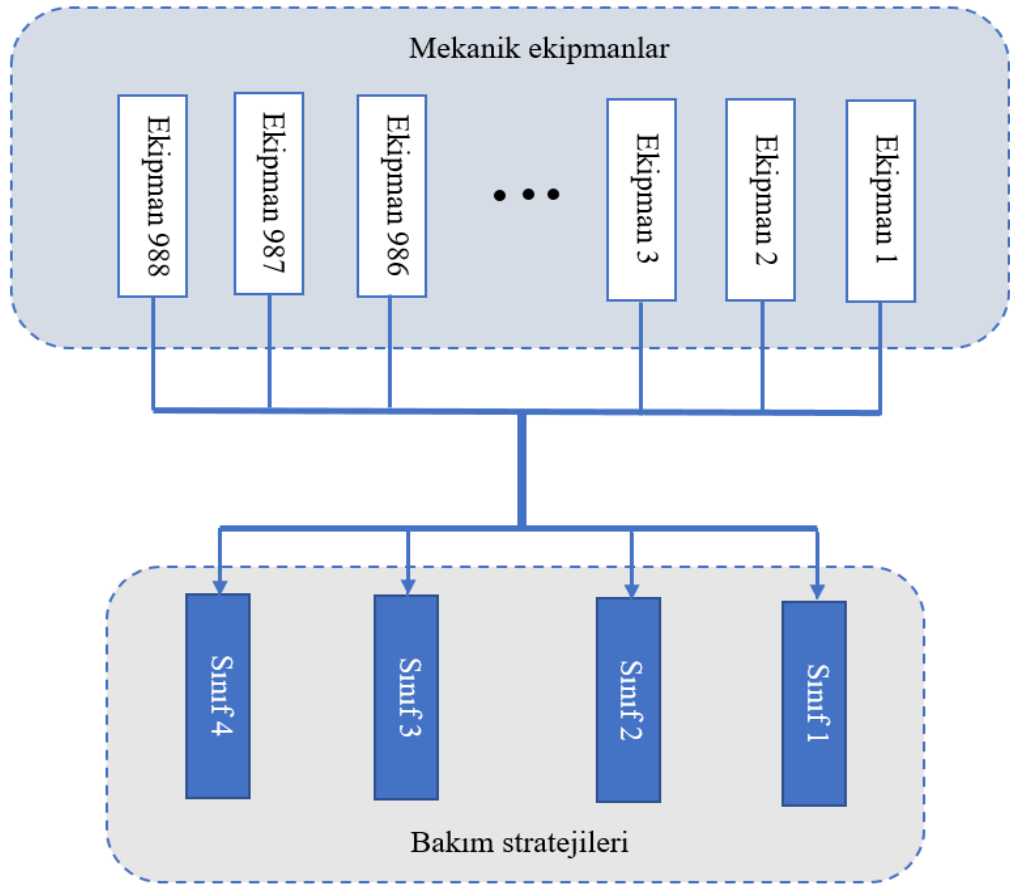
Hidroelektrik santral yüzlerce ekipmandan oluşmaktadır. Ekipman sayısının fazla olması ve ekipmanların çalışma prensiplerinin birbirinden farklı olması santral yöneticilerinin bakım uygulamalarında ekipmanları gruplamaya itmiştir. Bu gruplardan biri de mekanik ekipmanlardır. Mekanik ekipmanların çalışma prensipleri elektriksel ekipmanlardan farklı olup ele alınan santralda bakım uygulamaları da başka bir bakım ekibi tarafından yapılmaktadır. Ele alınan hidroelektrik santralda elektriksel ekipman gruplarında hem arıza oranı hem de bakım oranı yüksektir. Bu durum bu ekipmanlar için sistem analizi sürecini kolaylaştırmış ve problemin optimal çözümünde gerekli parametrelerin elde edilmesini sağlamıştır. Fakat mekanik ekipmanlar için aynı durum mevcut değildir. Çünkü mekanik ekipmanlarda arıza oranının düşük olması farklı bakım stratejilerinin uygulama sonucunda oluşacak maliyet, süre, üretim duruş miktarı ve santrale sağladığı fayda gibi parametrelerin elde edilememesine yol açmıştır. Bu sebepten dolayı mekanik ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi probleminde literatürde güçlü yönleri ile kendini ispatlamış YSA yöntemi kullanılmıştır. YSA yöntemi eksik verilerin olduğu, karmaşık ve büyük boyutlu problemlere birçok problemde hızlı çözümler üretmektedir (Öztemel, 2012). Ayrıca Problem-2'nin sonucunda bakım strateji optimizasyonu probleminde birbirine benzer ekipmanların aynı bakım stratejilerine atandığı görülmüştür. Yani 571 elektriksel ekipmanın optimal bakım stratejilerine bakıldığında sadece dört farklı strateji kombinasyonunun olduğu belirlenmiştir. Bu durum bakım strateji optimizasyonu probleminin sınıflandırma problemi şeklinde ele alınabileceğini ortaya koymaktadır. Bu sebepten dolayı sınıflandırma problemlerinde sıklıkla kullanılan YSA yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak Problem-3'te ele alınan hidroelektrik santraldaki 988 mekanik ekipmana uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi YSA yönteminin sınıflandırma yeteneği kullanılarak çözülmüştür. Mekanik ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenebilmesi

için öncelikle ağın eğitilmesi gerekmektedir. Bu eğitimde elektriksel ekipmanlara hangi bakım stratejilerin uygulanması gerektiği öğretilmiştir. Bu aşamada Problem-2’de elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Yani 0-1 TP yöntemiyle elde edilen optimal bakım stratejileri YSA modelinde eğitim için kullanılmıştır. Problem-2 çözümde elde edilen sonuçlara bakıldığında sadece dört farklı kombinasyonun oluştuğu görülmüştür. Bu sebepten dolayı çıktı olarak dört farklı sınıf tanımlanmıştır. Bu tanımlama sonucunda problem, mekanik ekipmanların hangi sınıfa ait olduğunu belirleme problemine dönüşmüştür. Sınıflar şekil 6.5’te verilmiştir.



şekil 6.5. Strateji sınıfları

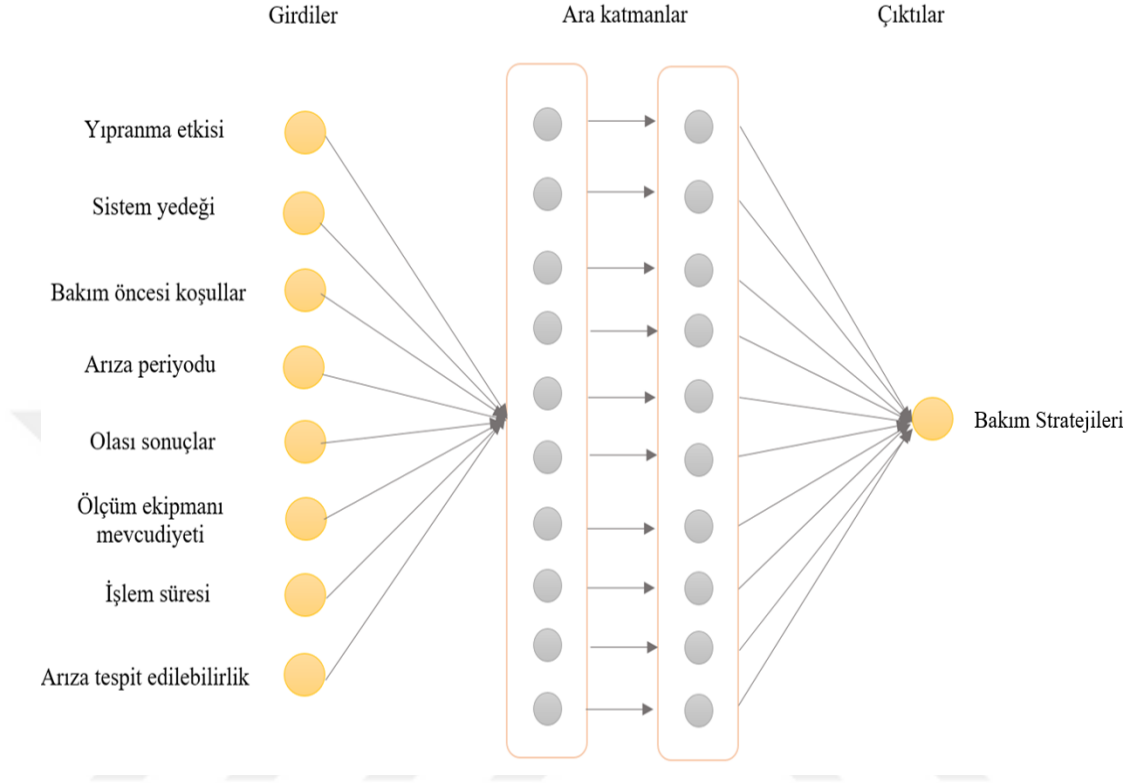
Yapılan tanımlamada sadece arızı bakımın uygulanması Sınıf-1’i, periyodik ve kestirimci bakımın uygulanması Sınıf-2’yi, revizyon, kestirimci ve arızı bakımın uygulanması Sınıf-3’, revizyon, periyodik ve kestirimci bakım uygulanması Sınıf-4’ ifade etmektedir. Bu sınıflar modelde çıktıyı oluşturmaktadır. Problem-3’n şematik gösterimi şekil 6.6’da verilmiştir.



Şekil 6.6. Problem-3'ün şematik gösterimi

988 mekanik ekipmana uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi çözmek için öncelikle bakım strateji seçimi etkileyen parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bakım stratejisinin belirlenmesinde en kritik nokta ekipmanın sistem için ne kadar kritik olduğunun belirlenmesidir. Örneğin ekipman santral için kritiklik seviyesi yüksek ise arz güvenliğine etkisi de büyüktür. Bu sebepten dolayı kritiklik seviyesi yüksek olan ekipman arıza ihtimalini minimum seviyede tutacak şekilde bakım stratejileri uygulanmalıdır veya ekipmanın sistem için kritiklik seviyesi düşük ise ekipmanın arıza ihtimalini minimum seviyede tutmak yerine arıza riski yüksek olsa bile maliyeti düşük bakım stratejilerinin uygulanması gerekmektedir. Ekipmanların sistem içinde oluşturdukları kritiklik seviyelerinin farklılıkları YSA modeline yansıtılmıştır. Burada yansıtılan parametreler Problem-2'de ekipmanların kritiklik seviyelerinin belirlenmesi aşamasında kullanılan kriterlerdir. Buna ek olarak Problem-2'de modele özel bir kısıt olarak eklenen yıpranma oranı, YSA modelinde parametre olarak alınmıştır. YSA modelinde, literatürde yapılan incelemelere göre çok katmanlı

yapay sinir ağı tek katmanlı YSA'ya göre karmaşık problemlerde kendini ispatladığından çok katmanlı ağ modeli kullanılmıştır. YSA modelinin yapısı Şekil 6.7'de verilmiştir.



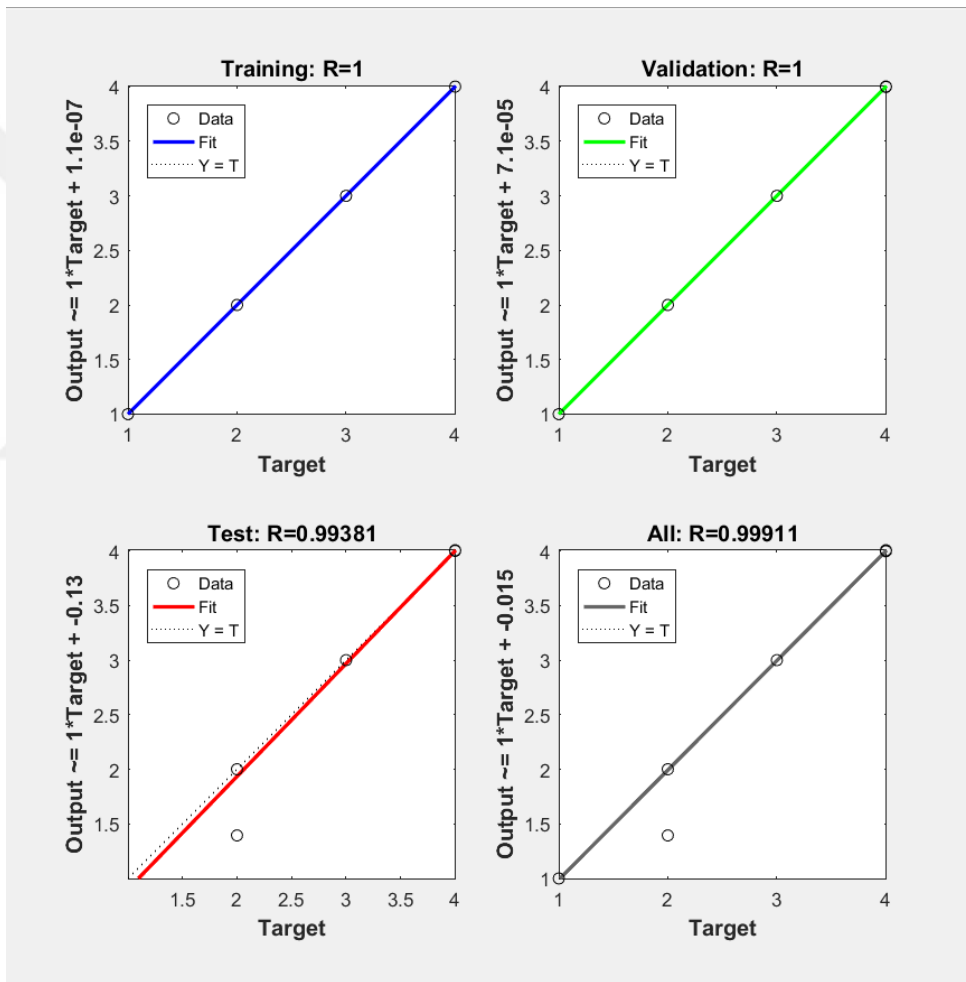
Şekil 6.7. YSA modelinin yapısı

YSA uygulamalarında probleme uygun ağ yapısı belirlendikten sonra eğitim aşamasına geçilmiştir. Problem-2 sonucunda elde edilen 571 ekipmana ait optimal bakım stratejilerinin bir kısmı eğitimde bir kısmı testte kullanılmıştır. Literatürde genellikle oran %70 eğitim, %30 test olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada da 400 ekipman eğitimde 171 ekipman ise test aşamasında kullanılmıştır. Ağın eğitimde kullanılan verilerden örnekler Çizelge 6.22'de verilmiştir. Çizelgenin ilk sekiz sütunu girdileri son sütunu ise çıktıyı ifade etmektedir.

Çizelge 6.22. Örnek veri seti

Yıpranma durumu	Sistem Yedeği	Bakım öncesi koşullar	Arıza periyodu	Olası sonuçlar	Ölçüm ekipmanlarının mevcudiyeti	İşlem süresi	Arıza tespit edilebilirlik	Sınıf No
1	1	6	5	2	1	4	1	2
0	1	7	5	10	3	2	1	4
0	1	7	5	10	3	4	3	4
0	1	6	5	2	1	4	1	2
0	4	7	5	7	1	2	1	3
0	1	7	5	10	1	4	1	4
0	1	7	5	10	3	4	3	4
0	1	6	5	2	1	4	1	2
0	1	7	3	10	3	4	1	4
0	1	7	3	10	3	4	3	4
0	1	7	5	10	3	2	1	4
1	1	7	5	10	3	2	1	4
1	1	6	5	2	1	4	1	2
0	1	7	5	10	3	4	3	4
1	1	6	5	2	1	4	1	2
0	1	7	5	10	3	4	3	4
0	4	7	3	10	1	2	1	4
1	1	7	5	10	1	4	1	4
1	1	6	5	2	1	4	1	2
0	1	1	5	6	3	2	3	2
0	1	6	3	10	3	4	3	4
0	1	7	5	10	3	4	3	4
1	1	7	5	10	3	4	3	4
0	1	6	5	2	1	4	1	2
0	4	1	3	2	1	2	1	1
0	1	7	5	10	3	4	3	4
0	1	6	5	2	1	4	1	2
1	1	6	5	2	1	4	1	2
0	1	6	3	10	3	4	3	4
0	1	6	5	2	1	4	1	2
0	1	7	5	10	3	4	3	4
0	4	7	5	7	1	2	1	3
0	1	6	5	2	1	4	1	2
1	1	7	3	10	3	4	1	4
0	1	6	5	2	1	4	1	2
1	4	1	3	2	1	2	1	1
0	1	7	5	10	3	4	3	4
0	4	7	5	7	1	2	1	3

Her bir ara katman için sırasıyla “purelin, logsig” transfer fonksiyonları kullanılmış olup ara katmanlardaki nöron sayıları ise 10’dur. Eğitim fonksiyonu için “trainlm” öğrenme fonksiyonu olarak ise “learnk” kullanılmıştır. Eğitim aşamasında gerçekleştirilen denemeler sonucunda seçilen en iyi ağ yapısında R^2 değeri 0,99 olarak elde edilmiştir. Regresyon grafiği Şekil 6.8’de verilmiştir. 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.



Şekil 6.8. YSA modelinin regresyon grafiği

Test aşamasında elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Eş. 6.10’da hesaplaması yer alan Ortalama Kare Hata (MSE) hata türü ile hata oranı hesaplanmıştır. e değeri tahmin ile gerçek değer arasındaki farkı ifade etmektedir. Bu

çalışmada MSE değeri % 0,02 çıkmıştır. MSE değeri sıfıra ne kadar yakınsa ağın performansı o kadar iyi olduğu anlamına gelmektedir.

$$MSE = \frac{1}{n} * \sum_{t=1}^n e_t^2 \quad (6.10)$$

Test aşaması tamamlandıktan sonra 988 ekipman için tahmin yapılmıştır. Tahmin sonucunda ekipmanlara uygulanması gereken bakım stratejileri belirlenmiştir. Tahmin sonuçlarından örnekler Çizelge 6.23’de verilmiştir.

Çizelge 6.23. YSA modelinin sonuçları

Ekipman Adı	Revizyon	Periyodik	Kestirimci	Arızı
Ayar kanat servomotoru	✓	✓	✓	
Ayar kanatları biyel kolu	✓	✓	✓	
Ayar kanadı	✓	✓	✓	
Ayar kanadı çemberi	✓	✓	✓	
Basınçlı yağ tankı	✓	✓	✓	
Basınçsız yağ tankı yağ soğutucusu(eşanjör)	✓	✓	✓	
Basınçsız yağ tankı	✓	✓	✓	
Yağ tankları		✓	✓	
By-pass hidrolik vanası	✓	✓	✓	
Drenaj vanası	✓	✓	✓	
Elle çalışan yüksek basınç pompası				✓
Emme borusu menhol kapağı	✓	✓	✓	
Yardımcı ünite emme borusu	✓	✓	✓	
Fren sistemi	✓	✓	✓	
Generator alt kılavuz yatak haznesi	✓	✓	✓	
Hız regülatörü soğutucusu	✓	✓	✓	
Hız regülatörü	✓	✓	✓	
Türbin taşıyıcı-kılavuz yatak ve soğutucuları	✓	✓	✓	
Türbin çarkı-kepi	✓	✓	✓	
Türbin salmastra kutusu	✓	✓	✓	
Kelebek vana	✓	✓	✓	
Salyangoz ve sabit kanadı	✓	✓	✓	
Salyangoz menhol kapağı	✓	✓	✓	
Soğutma suyu filtresi ve motorlu vanası	✓	✓	✓	
Soğutma suyu ters yıkama filtresi	✓		✓	✓

7. TARTIŞMA

Bakım, proses esnasında üretimin sekteye uğramasından dolayı üretim kaybı, zaman, iş gücü ve malzeme gereksinimi açısından maliyetli ve bu bileşenlerin kendine özgü kısıtlarından dolayı yönetilmesi zor bir süreçtir. Bu kapsamda bu çalışmada, bakım planlamasının vazgeçilmez ilk aşaması olan bakım strateji optimizasyonu problemi ele alınmıştır. Çalışmada dokuz üniteli bir hidroelektrik santral ele alınmıştır. Bütün santral ekipmanlarına en uygun bakım stratejilerinin belirlenmesi karmaşık ve zor bir problem olduğu için ve bu problemde uygulanan yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını araştırmak için basitten karmaşık probleme doğru ilerleyen bir çalışma süreci gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden ilk olarak santralin en kritik ekipmanına literatürde sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemleri kombinasyonu ile çözüm bulunmuştur. Ardından problem boyutu artırılarak 571 elektriksel ekipmana uygulanması gereken optimal bakım stratejileri belirlenmiştir. Bu problemde çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve COPRAS yöntemleri ile parametre hesaplamaları yapılmıştır ve 0-1 TP yönteminde bu parametreler kullanılarak optimal sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak mekanik ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Bu problemde toplamda 988 ekipman için uygulanması gereken bakım stratejileri aranmıştır ve sezgisel bir yöntem olan YSA kullanılmıştır. Bu üç problemin çözümünde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmede problem tanımlarına göre kullanılan yöntemlerin avantaj ve dezavantajı Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Sonuçların karşılaştırılması

Problem kodu	Problem tanımı	Kullanılan yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Problem-1	Generatör ekipmanına uygulanacak bakım stratejisinin seçilmesi	AHP, COPRAS	-Çözüm kolaylığı sağlamıştır. -Değerlendirilen kriterler ve alternatifler kapsamında en uygun çözüm bulunmuştur. -Uzman görüşleri çözüme yansıtılmıştır.	-Sadece bir ekipman için çözüm bulunmuştur. -Sadece bir strateji seçmek zorunda kalınmıştır. Model birden fazla stratejinin uygulanmasına izin vermemektedir.
Problem-2	571 elektriksek ekipmana uygulanacak optimal bakım strateji/ stratejilerinin belirlenmesi	AHP, COPRAS, TP	-Optimal sonuçlar elde edilmiştir. -Problem sistem boyutunda ele alınmıştır.	- Modelin uygulanabilmesi için kapsamlı sistem analizine ihtiyaç duyulmaktadır. - Modelin sonuç verebilmesi için gerekli verilerin eksiksiz olması gerekmektedir.
Problem-3	988 mekanik ekipmana uygulanacak bakım strateji/ stratejilerinin belirlenmesi	YSA	-Karmaşık problem, sınıflandırma tekniği ile basitleştirilmiştir. -Eksik veri ile çözüm verebilmektedir. - Minimum veri ile sonuca ulaşılmıştır.	-Çözümün optimal olup olmadığı bilinmemektedir. -Maliyet, süre ve personel gibi kısıtlı kaynaklar modele yansıtılmamıştır.

Değerlendirme sonucunda literatürde çoğunlukla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinin sadece bir ekipman için çözüm üretebildiği görülmüştür. Bu tez

çalışmasında da santralin en kritik ekipmanı olan generatör için AHP-COPRAS yöntemleri ile çözüm aranmıştır. Çözüm sonucunda uygulanması gerek bakım stratejisi revizyon bakım olarak belirlenmiştir. Fakat Problem-2'nin çözümünde 571 ekipman için matematiksel model kurulduğunda generatör ekipmanı için revizyon, periyodik ve kestirimci bakımın uygulanmasının optimal olduğu görülmüştür. Bu durum çok kriterli karar verme yöntemlerinin bir ekipman için sadece bir strateji uygulanması gerektiği durumlarda kullanılması gerektiği sonucunu doğurmuştur. Ayrıca ele alınan hidroelektrik santralin ve ekipmanların santral açısından kritiklik seviyelerinin arz güvenliğine olan etkisi düşünüldüğünde sadece bir strateji yetersiz kalabileceği sonucuna varılmıştır. Bu sebepten dolayı hidroelektrik santralda bakım strateji optimizasyonu problemi ele alındığında 0-1 TP yönteminin daha avantajlı olduğu görülmüştür. 0-1 TP yöntemi hem optimal sonuç vermesinden dolayı hem de bakım stratejilerin birlikte uygulanabilirliğini yansıtabilmesi ile çok kriterli karar verme yöntemlerine üstünlük sağlamıştır. Problem-2'de 571 ekipman için optimal bakım stratejileri bulunmuştur fakat santraldaki mekanik ekipmanlar için 0-1 TP modelini kurmak mümkün olmamıştır. Mekanik ekipmanların çalışma prensipleri elektriksel ekipmanlardan farklı olup ele alınan santralda bakım uygulamaları da başka bir bakım ekibi tarafından yapılmaktadır. Ele alınan hidroelektrik santralda elektriksel ekipman gruplarında hem arıza oranı hem de bakım oranı yüksektir. Bu durum bu ekipmanlar için sistem analizi sürecini kolaylaştırmış ve problemin optimal çözümünde gerekli parametrelerin elde edilmesini sağlamıştır. Fakat mekanik ekipmanlar için aynı durum mümkün değildir. Çünkü mekanik ekipmanlarda arıza oranının düşük olması farklı bakım stratejilerinin uygulama sonucunda oluşacak maliyet, süre, üretim duruş miktarı ve santrala sağladığı fayda gibi parametrelerin elde edilememesine yol açmıştır. Bu sebepten dolayı mekanik ekipmanlara uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi probleminde literatürde güçlü yönleri ile kendini ispatlamış YSA yöntemi kullanılmıştır. YSA yöntemi eksik verilerin olduğu, karmaşık ve büyük boyutlu problemlere birçok problemde hızlı çözümler üretmektedir (Öztemel, 2012). Sonuç olarak 988 mekanik ekipman için YSA yönteminin sınıflandırma yeteneği kullanılarak bakım stratejileri belirlenmiştir. YSA yöntemi ile elde edilen sonuçların optimal olup olmadığı bilinmemekle birlikte, santral açısından kritik olan türbin, kelebek vana ve sayganyoz gibi ekipmanlara arıza bakım dışındaki bütün bakım stratejilerinin uygulanması gerektiği sonucu, elde edilen sonuçlara uygulanabilir olduğuna işaret

etmektedir. Ayrıca tez süresi boyunca iletişim kurulan santral uzmanları, Problem-2 ve Problem-3'te TP yöntemi ve YSA yöntemi ile elde edilen sonuçların uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir.



8. SONUÇ

Hidroelektrik santraller binlerce ekipmandan oluşmaktadır ve bütün ekipmanlara uygulanacak optimal bakım stratejilerin belirlenmesi zor ve karmaşık bir problemidir. Bu probleme çözüm getirebilmek adına uygulama süreci üç probleme bölünerek aşamalandırılmıştır. Her bir aşamada problem boyutu genişletilerek literatürde yer alan çözüm yaklaşımları ve problemin yapısı değerlendirilerek farklı yöntem kombinasyonları ile çözüm üretilmiştir.

İlk olarak santralin en kritik ekipmanına literatürde sıklıkla kullanılan çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP - COPRAS kombinasyonu ile çözüm bulunmuştur. Ardından problem boyutu artırılarak 571 elektriksel ekipmana uygulanması gereken optimal bakım stratejileri belirlenmiştir. Bu problemde çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ve COPRAS yöntemleri ile parametre hesaplamaları yapılmıştır ve 0-1 tam sayılı programlama yönteminde bu parametreler kullanılarak optimal sonuç elde edilmiştir. Son olarak 988 mekanik ekipmana uygulanacak bakım stratejilerinin belirlenmesi problemi ele alınmıştır. Bu problem sezgisel bir yöntem olan YSA kullanılmıştır.

Herhangi bir sistemde önerilen modellerden birini uygulamak isteyen karar vericiler, kendi sistemlerine uygun modeli seçmeleri gerekmektedir. Çok kriterli karar verme yöntemleri ile elde edilen Problem-1'de sunulan model, tek ekipman için bakım stratejisi araştırılıyorsa uygun olabilir. Bununla birlikte uygulanacak bakım stratejisinin de tek olması gerekmektedir. Model, belirlenen kriterler ve alternatifler kapsamında en uygun bakım stratejisini uzman görüşleri yardımı ile sunmaktadır. Hem çok kriterli karar verme yöntemleri hem de TP yöntemi içeren, Problem-2 için sunulan modelde ise ekipman sayısının büyük olması ile ilgili problem yaşanmamaktadır. Önerilen model 571 ekipmana kadar optimal çözüm elde edilmiştir. Daha fazla ekipman için çözüm verip vermeyeceği araştırılmalıdır. Karar vericiler, ele aldıkları sistemle ilgili kapsamla bir analiz yapabiliyorlarsa ve modelde belirtilen parametreleri elde etme imkanları varsa ikinci modeli kullanabilirler. Model üretim duruşlarının minimizasyonunu amaçlamakla birlikte optimal sonuçlar vermektedir. Modelin tek dezavantajı parametrelerin eksiksiz bir şekilde tamamlanması gerekmektedir. Bu

durum için modelde çok kriterli karar verme yöntemlerinden yararlanılmıştır. Modelin en büyük avantajlarından biri ise farklı stratejilerin aynı ekipmana uygulanmasına izin vermesidir. Karar vericiler ele aldıkları sistemde ekipman sayısı büyük fakat detaylı bir şekilde sistem analizi yapma imkanı bulamıyorlarsa Problem-3 için önerilen modeli inceleyebilirler. Çünkü model minimum parametre ile çözüm bulmakta ve eksik veri ile çalışabilmektedir. Ayrıca ikinci modelde olduğu gibi bakım stratejilerinin kombinasyonuna izin verilmektedir. Modelin dezavantajlarına bakacak olursak optimal sonuç verip vermediği bilinmemektedir ve maliyet, süre ve personel gibi kısıtlı kaynaklar modelde yansıtılmamıştır. Üçüncü modelde Problem-2'nin optimal sonuçları YSA'ya öğretilerek sınıflandırma mantığı ile 988 ekipman için uygulanması gereken bakım stratejileri belirlenmiştir. Problem bu yaklaşım ile basitleştirilmiştir. Çok bileşenli ve karar sürecini etkileyen birçok parametrenin olduğu problemlere, literatürde endüstri 4.0 çözüm yaklaşımları sunulmaktadır. Problem-3'te önerilen yapay zeka modeli, hidroelektrik santrallarda bakım süreçlerinin endüstri 4.0 felsefesine göre yönetilmesinde basamak görevini üstlenmektedir. Sistemlerinde endüstri 4.0 yaklaşımını benimseyen karar vericiler üçüncü modelden yararlanabilirler.

Bu tez çalışmasında literatüre sağlanan katkılar düşünüldüğünde, ilk defa yıpranma etkisi çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP ile hesaplanıp modele yansıtılmış ve modelin gerçek hayat tutarlılığı sağlanmıştır. Bununla birlikte, sistemin üretim duruş süresi minimize edilerek tek bir amaç ile birçok amacı ifade ederek, sistemin gerçek hayattaki niteliklerini yansıtacak şekilde bir model önerilmiştir. Başka bir ifade ile üretim duruşlarının minimizasyonu amacı, maliyet minimizasyonu, risk faktörlerinin minimizasyonu ve güvenilirlik maksimizasyonu gibi birçok amacı kapsamaktadır. YSA ile çözülen model ile bakım strateji belirleme literatüründe ilk defa 0-1 TP yöntemi ile elde edilen sonuçlar bir YSA modeline öğretilerek çözüm bulunmuştur. Bu çözüm hem yöntem entegrasyonu açısından hem de problem boyutunun büyüklüğü açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca ilk defa bakım strateji belirleme literatüründe YSA yönteminden yararlanılmıştır. Son olarak bakım strateji belirleme literatüründe ilk defa farklı problem boyutları ile farklı yöntem entegrasyonları karşılaştırılarak yöntem avantaj ve dezavantajları araştırılmıştır.

Bakım strateji belirleme literatürüne katkı sağlamak için ileriki çalışmalarda 0-1 TP modeli çok amaçlı bir modele çevrilebilir. Farklı santral tipleri için önerilen modeller revize edilebilir. Son olarak YSA model sonucu uygulamaya alınarak elde edilen sonuçlar ile yeni bir matematiksel model üzerinde çalışılabilir.



KAYNAKLAR

- Aghaie, M., Fazli, S. An improved MCDM method for maintenance approach selection: a case study of auto industry. *Management Science Letters*, 2 (1), 137-146. 2012.
- Ahmadi, A., ArastehKhouy, I., Kumar, U. and Schunnesson, H. Selection of maintenance strategy, using analytical hierarchy process, *Communications in Dependability and Quality Management*, 12(1), 121-132, 2009.
- Ahmadi, A., Gupta, S., Karim, R. and Kumar, U. Selection of maintenance strategy for aircraft systems using multi-criteria decision making methodologies, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 17(3), 223-243, 2010.
- Alaswad, S., & Xiang, Y. A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. *Reliability Engineering & System Safety*, 157, 54-63, 2017.
- Al-Najjar, B. and Alsyouf, I. Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. *International Journal of Production Economics*, 84 (1), 85-100, 2003.
- Alsyouf, I. Cost effective maintenance for competitive advantages. PhD thesis, *School of Industrial Engineering*, Växjö University, 2004.
- Arunraj, N.S. and Maiti, J. Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming. *Safety Science*, 48(2), 238-247, 2010.

Asadian, N., Khavarpour, M. and Hoseinpour, S. Selection of optimum maintenance policy based on fuzzy TOPSIS. *Proceedings of the 38th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, Beijing, October 31-November 2, 616-624, 2008.

Başıme H. “Hidroelektrik Santrallar ve Hidroelektrik Santral Tesisleri”, Ankara/Türkiye, Elektrik Üretim A.Ş. Yayınları, 2003.

Bertolini, M., Bevilacqua, M., Braglia, M. and Frosolini, M. An analytical method for maintenance outsourcing service selection. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 21(7), 772-788, 2004.

Bertolini, M. and Bevilacqua, M. A combined goal programming – AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(7), 839-848, 2006.

Bevilacqua, M. and Braglia, M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1), 71-83, 2000.

Binay S., Aygünes H., Çetin A., Oral H., Güneri A. F., Dalgıç N., Yöneylem
Arastırması, *Kâra Harp Okulu Basımevi*, Ankara, 2001.

Braglia, M., Castellano, D., & Frosolini, M. An integer linear programming approach to maintenance strategies selection. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 30, 991–1016, 2013.

Carnero, M.C. Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program. A case study. *Decision Support Systems*, 38(4), 539-555, 2005.

- Chan, F.T.S. and Prakash, A. Maintenance policy selection in manufacturing firms using the fuzzy MCDM approach. *International Journal of Production Research*, 50(23), 7044-7056, 2012.
- Charongrattanasakul, P., Pongpullponsak, A. Minimizing the cost of integrated systems approach to process control and maintenance model by EWMA control chart using genetic algorithm. *Expert Syst Appl* 38, 5178–5186, 2011.
- Cheng, Y.-H. and Tsao, H.-L. Rolling stock maintenance strategy selection, spares parts' estimation, and replacements' interval calculation. *International Journal of Production Economics*, 128(1), 404-412, 2010.
- Chung SH, Lau HCW, Ho GTS, Ip WH. Optimization of system reliability in multi-factory production networks by maintenance approach. *Expert Syst Appl* 36(6), 10188–10196, 2009.
- Ding SH, Kamaruddin S., Maintenance policy optimization—literature review and directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 76(5-8), 1263-1283, 2015.
- Ding, S.-H. and Kamaruddin, S. Selection of optimal maintenance policy by using fuzzy multi criteria decision making method. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Istanbul, July 3-6, 435-443, 2012.
- Ding, S. H., Kamaruddin, S., & Azid, I. A. Development of a model for optimal maintenance policy selection. *European Journal of Industrial Engineering*, 8(1), 50-68, 2014.

Dutta, S., Kumar, D. and Kumar, P. Maintenance strategy selection for defence vehicles transmission system using fuzzy approach. *Industrial Engineering Journal*, 2(27), 25-29, 2011.

Elektrik Üretim Sektör Raporu 2011, *Elektrik Üretim A.Ş.*, 1-12, 2012.

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.

Fazlollahtabar, H. and Yousefpoor, N. Selection of optimum maintenance strategies in a virtual learning environment based on analytic hierarchy process. *Proceedings of the 3rd International Conference on Virtual Learning*, Constanta, October 31-November 2, 143-152, 2008.

Fernández, C., Soria, E., Martin, J. D. ve Serrano, A. J. Neural networks for animal science applications: Two case studies, *Expert Systems with Applications*, 31(2), 444-450, 2006.

Fouladgar, M.M., Yazdani-Chamzini, A., Lashgari, A., Zavadskas, E.K. and Turskis, Z. Maintenance strategy selection using AHP and COPRAS under fuzzy environment. *International Journal of Strategic Property Management*, 16(1), 85-104, 2012.

Gassner, S. Deriving maintenance strategies for cooperative alliances-a value chain approach. Proceedings of the 17th International Annual Conference of the European Operations Management Association (EurOMA), *Managing Operations in Service Economies*, Porto, June 6-9, 2010.

- Gaonkar, R.S.P., Verma, A.K. and Srividya, A. (2008), Exploring fuzzy set concept in priority theory for maintenance strategy selection problem. *International Journal of Applied Management and Technology*, 6(3) 131-142, 2008.
- Ghosh, D. and Roy, S. A decision-making framework for process plant maintenance. *European Journal of Industrial Engineering*, 4(1), 78-98, 2010.
- Goossens, A. J. M., & Basten, R. J. I. Exploring maintenance policy selection using the analytic hierarchy process: An application for naval ships. *Reliability Engineering and System Safety*, 142, 31–41, 2015.
- 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.
- Hashemi, M., Asadi, M., & Zarezadeh, S. Optimal maintenance policies for coherent systems with multi-type components. *Reliability Engineering & System Safety*, 195, 106674, 2020.
- Haykin, S. and Lippmann, R. Neural networks, a comprehensive foundation, *International journal of neural systems*, 5(4), 363-364, 1994.
- 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. In *IEEE PES T&D 2010*, 1-6, April, IEEE, 2010.
- Ierace, S. and Cavalieri, S. Maintenance strategy selection: a comparison between fuzzy logic and analytic hierarchy process, *Proceedings of 9th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Szczecin, October 9-10, 327-332, 2008.

Ilangkumaran, M. and 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.

Ilangkumaran, M. and Kumanan, S. Application of hybrid VIKOR model in selection of maintenance strategy. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 5(2), 59-81, 2012.

Ilgin, MA, Tunali, S. Joint optimization of spare parts inventory and maintenance policies using genetic algorithms. *Int J Adv Manuf Technol*, 34, 594–604, 2007.

Ioannis, D. and Nikitas, N. Application of analytic hierarchy process & TOPSIS methodology on ships' maintenance strategies. *Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars*, 4(1), 21-28, 2013.

Jafari, A., Jafarian, M., Zarei, A. and Zarepour, F. Using fuzzy Delphi method in maintenance strategy selection problem. *Journal of Uncertain Systems*, 2(4). 289-298, 2008.

Jajimoggala, S., Rao, V.V.S.K. and Satyanarayana, B. Maintenance strategy evaluation using ANP and goal programming. *International Journal of Strategic Decision Sciences*, 2(2), 56-77, 2011.

Jayaswal, P., Sagar, M.K. and Kushwah, K. Maintenance strategy selection by fuzzy TOPSIS method of material handling equipment. *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, 2(3), 126-135, 2013.

- Kim, C. S., Djamaludin, I., & Murthy, D. N. P. Warranty and discrete preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 84(3), 301-309, 2004.
- 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.
- Kobbacy, K. A. Artificial intelligence in maintenance. In *Complex system maintenance handbook*, 209-231, Springer, London, 2008.
- Kumar, G. and Maiti, J. , Modeling risk based maintenance using fuzzy analytic network process. *Expert Systems with Applications*, 39 (11), 9946-9954, 2012.
- Kushwash, K. Selection of maintenance strategy for material handling equipment (mechanical crane) by fuzzy multi-criteria decision-making method. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2 No. 11, pp. 32-43, 2012.
- Kurian, M. C., Shalij, P. R., & Pramod, V. R. Maintenance strategy selection in a cement industry using analytic network process. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2019.
- Labib, A.W., O'Connor, R.F. and Williams, G.B. An effective maintenance system using the analytic hierarchy process. *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 9 No. 2, pp. 87-98, 1998a.
- Labib, A.W., Williams, G.B. and O'Connor, R.F. An intelligent maintenance model (system): an application of the analytic hierarchy process and a fuzzy logic rule-

based controller. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 49 No. 7, pp. 745-757, 1998b.

Labib, A.W. A decision analysis model for maintenance policy selection using a CMMS. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 10 No. 3, pp. 191-202, 2004.

Lazakis, I., & Ölçer, A. Selection of the best maintenance approach in the maritime industry under fuzzy multiple attributive group decision-making environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 230(2), 297-309, 2016.

Li, C., Xu, M. and Guo, S. ELECTRE III based on ranking fuzzy numbers for deterministic and fuzzy maintenance strategy decision problems. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Jinan, August 18-21, pp. 309-312, 2007.

Mahadevan ML, Paul Robert T, Sridhar V. Optimizing maintenance activities using HGA and Monte Carlo simulation. *Int J Comput Appl* 1(21):106–110, 2010.

Morcous G, Lounis Z. Maintenance optimization on infrastructure networks using genetic algorithms. *Autom Constr* 14(1): 129–142, 2005.

Martorell, S., Villanueva, J. F., Carlos, S., Nebot, Y., Sánchez, A., Pitarch, J. L., & Serradell, V. RAMS+ C informed decision-making with application to multi-objective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms. *Reliability Engineering & System Safety*, 87(1), 65-75, 2005.

Martorell, S., Villamizar, M., Carlos, S., & Sánchez, A. Maintenance modeling and optimization integrating human and material resources. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(12), 1293-1299, 2010.

Marseguerra M, Zio E. Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation. *Reliab Eng Syst Saf* 68(1):69–83, 2000.

Mechefske, C.K. and Wang, Z. Using fuzzy linguistics to select optimum maintenance and condition monitoring strategies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17 No. 2, pp. 305-316, 2003.

Momeni, M., Fathi, M.R., Zarchi, M.K. and Azizollahi, S. A fuzzy TOPSIS-based approach to maintenance strategy selection: a case study. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 8(3), 699-706, 2011.

Mousavi, S.S., Nezami, F.G., Heydar, M. and Aryanejad, M.B. A hybrid fuzzy group decision making and factor analysis for selecting maintenance strategy. *Proceedings of the 39th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, Troyes, July 6-8, pp. 1204-1209, 2009.

Nagar, A. Development of fuzzy multi criteria decision making method for selection of optimum maintenance alternative. *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering*, Vol. 1 No. 2, pp. 87-92, 2011.

Nezami, F.G. and Yildirim, M.B. A framework for a fuzzy sustainable maintenance strategy selection problem. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*, Chicago, IL, May 16-18, 2011.

Nezami, F.G. and Yildirim, M.B. A sustainability approach for selecting maintenance strategy. *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 6 No. 4, pp. 332-343, 2013.

Nguyen, K. A., Do, P., & Grall, A. Multi-level predictive maintenance for multi-component systems. *Reliability engineering & system safety*, 144, 83-94, 2015.

Okasha NM, Frangopol DM. Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA. *Struct Saf* 31(6): 460–474, 2009.

Odeyale, S.O., Alamu, O.J. and Odeyale, E.O. The analytical hierarchy process concept for maintenance strategy selection in manufacturing industries. *The Pacific Journal of Science and Technology*, Vol. 14 No. 1, pp. 223-233, 2013.

Ogryczak, W., Zorychta, K., Modular Optimizer for Mixed Integer Programming MOMIP Version 2.3, *Laxenburg*, 1996.

Özbek, A. Türkiye Diyanet Vakfı'nın SAW, COPRAS ve TOPSIS Yöntemi İle Performans Değerlendirmesi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 15(1), 66-84, 2017.

Özcan, E.C., ve Eren, T. Application of TOPSIS method for maintenance planning: natural gas combined cycle power plant case study. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 6(2), 26-38, 2014.

Özcan E.C. *Bakım Yönetim Sistemi: Kurulum ve İşletme Esasları*. Ankara/Türkiye, Elektrik Üretim A.Ş. Yayınları, 2016.

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.

Özcan, E., Yumuşak, R., Eren, T. Risk Based Maintenance in the Hydroelectric Power Plants. *Energies*. 12(8), 1502, 2019a.

Özcan, E. C., Danişan, T., & Eren, T. Hidroelektrik Santrallerin En Kritik Elektriksel Ekipman Gruplarının Bakım Stratejilerinin Optimizasyonu için Matematiksel Bir Model Önerisi. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*. 25 (4), 498-506, 2019b.

Özcan, E. C., Erol, S., Türkiye’de Elektrik Üretim Planlaması İçin Çok Amaçlı Bir Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama Modeli. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 41-54, 2013.

Öztemel, Ercan. *Yapay sinir ağları*. Papatya, 2012.

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), 2017.

Panchal, D., & Kumar, D. Maintenance decision-making for power generating unit in thermal power plant using combined fuzzy AHP-TOPSIS approach. *International Journal of Operational Research*, 29(2), 248-272, 2017.

- Pariazar, M., Shahrabi, J., Zaeri, M.S. and Parhizi, S. A combined approach for maintenance strategy selection. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 8 No. 23, pp. 4321-4329, 2008.
- Peng, A. and Wang, Z. Selecting optimum maintenance approach based on relative membership grade under fuzzy environment. *Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference*, Mianyang, May 23-25, pp. 1748-1752, 2011a.
- Peng, A. and Wang, Z. Group decision making for maintenance strategies based on fuzzy analytic hierarchy process. *Journal of Mechanical Strength*, Vol. 34 No. 3, pp. 403-409, 2011b.
- Pourjavad, E., Shirouyehzad, H. and Shahin, A. Selecting maintenance strategy in mining industry by analytic network process and TOPSIS. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 15 No. 2, pp. 171-192, 2013.
- Ramadhan, R.H., Al-Abdul Wahhab, H.I. and Duffuaa, S.O. The use of an analytical hierarchy process in pavement maintenance priority ranking. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 5 No. 1, pp. 25-39, 1999.
- Rashidpour, K. Using improved AHP method in maintenance approach selection. Master thesis, School of Innovation, *Design and Engineering*, Mälardalen University, 2013.
- Ratnayaka, R.M.C. and Markeset, T. Technical integrity management: measures HSE awareness using AHP in selecting a maintenance strategy. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 16 No. 1, pp. 44-63, 2010.

Rusin, A., & Wojaczek, A. Improving the availability and lengthening the life of power unit elements through the use of risk-based maintenance planning. *Energy*, 180, 28-35, 2019.

Sadeghi, A. and Alborzi-Manesh, R. The application of fuzzy group analytic network process to selection of best maintenance strategy – a case study in mobarakeh steel company, Iran. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 62, pp. 1378-1383, 2012.

Sagar, M.K., Jayaswal, P. and Kushwah, K., Exploring fuzzy SAW method for maintenance strategy selection problem of material handling equipment. *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol. 3 No. 2, pp. 600-605, 2013.

Sanjeeb, D., IBM Research Report, Exponential Lower Bounds on the Lengths of Some Classes of Branch-and- Cut Proofs, Newyork, 2002

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* (pp. 503-509), 2015.

Sarkar, A., and D. K. Behera. Design of optimal maintenance strategy. *Emerging Trends in Science, Engineering and Technology*. Springer, India, 383-389, 2012.

Saaty, T. L., The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation. *New York: McGraw*, 281, 1980.

- 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.
- Shahin, A., Pourjavad, E. and 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*, Vol. 10 No. 4, pp. 464-483, 2012a.
- Shahin, A., Shirouyehzad, H. and Pourjavad, E. Optimum maintenance strategy: a case study in the mining industry. *International Journal of Services and Operations Management*, Vol. 12 No. 3, pp. 368-386, 2012b.
- Sharma, R.K., Kumar, D. and Kumar, P. FLM to select suitable maintenance strategy in process industries using MISO model. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 11 No. 4, pp. 359-374, 2005.
- Shafiee, M., Maintenance strategy selection problem: an MCDM overview. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2015.
- Shafiee, M., Labib, A., Maiti, J., & Starr, A. Maintenance strategy selection for multi-component systems using a combined analytic network process and cost-risk criticality model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 233(2), 89-104, 2019.
- Shyjith, K., Ilangkumaran, M. and Kumanan, S. Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 14 No. 4, pp. 375-386, 2008.

- Tajadod, M., Ghasemi, E. and Bazargan, H. A combined method based on fuzzy analytical network process and fuzzy data envelopment analysis for maintenance strategy selection. *Proceedings of the International Conference on Advances in Electrical and Electronics Engineering*, Pattaya, October 7-8, pp. 179-183, 2011.
- Taha, H. A., Integer programming: theory, applications, and computations. Academic Press., 2014.
- Tan, Z., Li, J., Wu, Z., Zheng, J. and He, W. An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection. *Safety Science*, Vol. 49 No. 6, pp. 852-860, 2011.
- 2018 Yılı Türkiye Elektrik İletimi Sektör Raporu, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)*, 1-18, 2019.
- Thor, J., Ding, S.-H. and Kamaruddin, S. Development of maintenance policy evaluation model: a case study of the semiconductor industry for achieving production demand. *International Journal of Logistics Systems and Management*, Vol. 15 No. 4, pp. 405-423, 2013a.
- Thor, J., Ding, S.-H. and Kamaruddin, S. Comparison of multi criteria decision making methods from the maintenance alternative selection perspective. *The International Journal of Engineering and Science*, Vol. 2 No. 6, pp. 27-34, 2013b.
- Tulunay, Y., Matematiksel Programlama ve İşletme Uygulamaları, *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Yayınları*, No:108, İstanbul, 1980.

- Triantaphyllou, E., Kovalerchuk, B., Mann, L. and Knapp, G.M. Determining the most important criteria in maintenance decision making. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 3 No. 1, pp. 16-28, 1997.
- Vahdani, B., Hadipour, H., Extension of the ELECTRE method based on interval-valued fuzzy sets. *Soft Computing*, Vol. 15 No. 3, pp. 569-579, 2011.
- Vahdani, B., Hadipour, H., Sadaghiani, J.S. and Amiri, M. Extension of VIKOR method based on interval-valued fuzzy sets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 47 Nos 9-12, pp. 1231-1239, 2010.
- Vaidya, O. S., Kumar, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*, 169(1), 1-29, 2006.
- Velasquez, M., Hester, P. T. An analysis of multi-criteria decision making methods. *International journal of operations research*, 10(2), 56-66, 2013.
- Verma, A.K., Srividya, A. and Gaonkar, R.S.P. Selecting optimal maintenance strategy using priority theory. *Proceedings of the International Conference on Quality and Reliability in Aerospace Systems*, Hyderabad, January 15-17, pp. 285-296, 2006.
- Villanueva JF, Sanchez AI, Carlos S, Martorell S. Genetic algorithm-based optimization of testing and maintenance under uncertain unavailability and cost estimation: a survey of strategies for harmonizing evolution and accuracy. *Reliab Eng Syst Saf* 93(12):1830–1841, 2008.
- Yumuşak, R., Özcan, E.C., Danişan, T., Eren, T., “AHP-TOPSIS-tam sayılı programlama entegrasyonu ile hidroelektrik santrallarda bakım strateji

optimizasyonu”, *Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi*, 80-84, Şanlıurfa, 10-12 Mayıs 2018.

Yumuşak, R., Özcan E. C., Eren, T., “Maintenance Strategy Optimization with Analytical Hierarchy Process and Integer Programming Combination”, *International Conference on Data Science, Machine Learning and Statistics – 2019*, 26-28 June, 2019, Van.

Wang, L., Chu, J. and Wu, J. Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, Vol. 107 No. 1, pp. 151-163, 2007.

Wang, Y., Deng, C., Wu, J., Wang, Y., & Xiong, Y. A corrective maintenance scheme for engineering equipment. *Engineering Failure Analysis*, 36, 269-283, 2014.

Winston, W. L. Operations Research, Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, 1994.

Zaeri, M.S., Shahrabi, J., Pariazar, M. and Morabbi, A. A combined multivariate technique and multi criteria decision making to maintenance strategy selection. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Singapore, December 2-5, pp. 621-625. 2007.

Zaim, S., Turkyilmaz, A., Acar, M.F., Al-Turki, U. and Demirel, O.F. Maintenance strategy selection using AHP and ANP algorithms: a case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 18 No. 1, pp. 16-29, 2012.

Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A., & Sarka, V. The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. *Technological and economic development of economy*, 1(3), 131-139, 1994.

Zhang, C., Gao, W., Guo, S., Li, Y., & Yang, T. Opportunistic maintenance for wind turbines considering imperfect, reliability-based maintenance. *Renewable Energy*, 103, 606-612, 2017.

Xie, H., Shi, L. and Xu, H. Transformer maintenance policies selection based on an improved fuzzy analytic hierarchy process. *Journal of Computers*, Vol. 8 No. 5, pp. 1343-1350, 2013.

2020 Yılı Elektrik Piyasası Ocak Ayı Sektör Raporu, *Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu*, 1-50, 2020.