



A hybrid model proposal for maintenance scheduling in hydropower plants

Evrencan Özcan* , Tuğba Danışan , Tamer Eren 

Department of Industrial Engineering, Kırıkkale University, Kırıkkale, 71450, Turkey

Highlights:

- Maintenance scheduling for different types of equipment for the first time in the literature
- Integrated maintenance scheduling and generation estimation
- Maintenance scheduling for five different types of preventive maintenance for the first time in the literature

Keywords:

- Maintenance scheduling
- Generation estimation
- Hydroelectric power plant
- Integer programming
- Artificial Neural Network

Article Info:

Research Article
Received: 06.08.2019
Accepted: 06.04.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.602774

Acknowledgement:

This study is supported by Kırıkkale University Scientific Research Projects Coordination Unit (BAP) with project number 2018/008. We would like to thank the BAP Unit for their support.

Correspondence:

Author: Evrencan Özcan
e-mail: evrencan.ozcan@kku.edu.tr
phone: +90 318 357 4242

Graphical/Tabular Abstract

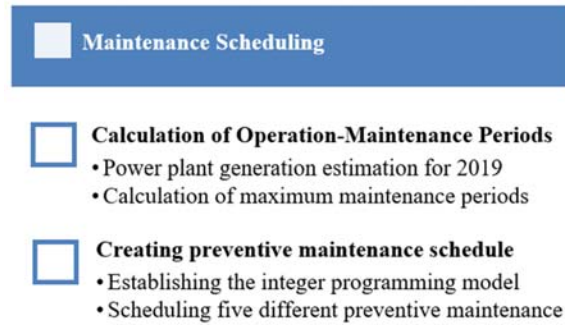


Figure A. Application steps

Purpose:

In this study, by using this data a 1-year maintenance schedule is obtained for the critical equipment groups that should be implemented the periodic maintenance strategies with 5 different contents and frequency via the proposed hybrid methodology. In the first step of this study, which uses the combination of Artificial Neural Network (ANN) and Integer Programming (IP), 1-year generation estimation of the power plant is realized by ANN method and operation and maintenance hours of the power plant are calculated from this forecasted data. These calculated periods are included in the proposed maintenance scheduling model which reflects all the requirements and realities of the hydroelectric power plant where the application is carried out and a feasible maintenance schedule is obtained. This study is the first in the literature in terms of handling multiple equipment groups in power plants, integrating the annual operating hours of the power plant into the maintenance scheduling problem in a consistent manner with real life, and providing an effective and applicable annual maintenance schedule that is compatible with the operation of the power plant.

Theory and Methods:

Artificial Neural Network and Integer Programming methods were used in this study.

Results:

As a result of the study, five different preventive maintenance of the critical equipment of the plant have been scheduled. The contributions of this study to the literature can be summarized in below: While there are often studies creating the maintenance schedules for a single equipment in the literature, in this study, more than one electrical equipment group is evaluated in a power plant and a mathematical model is presented considering the specific maintenance characteristics of each equipment group. In this study, considering the operating conditions of the power plant an applicable maintenance schedule is obtained by taking into account the 5 different periods as weekly, monthly, quarterly, 6 months and yearly. 1-year generation forecast for the power plant by using the 9-years real data of 2010-2018 in proposed ANN model, and calculating the operating and maintenance capacities (hours) for the planning period in the maintenance scheduling problem are two stages of a unique application in the literature. In addition, the integration of generation and maintenance capacities of the power plant obtained by proposed ANN model into the proposed maintenance scheduling model which is generated by using IP has enabled the combination of ANN and IP methods for the first time in the literature. It is designed as a real-life application of working with real data taken from a hydroelectric power plant in Turkey stands out as a feature which is not considered in most studies in the literature.

Conclusion:

As a result of the study, five different preventive maintenance of the critical equipment of the plant have been scheduled.



Hidroelektrik santrallarda bakım çizelgeleme için hibrid bir model önerisi

Evrencan Özcan*^{ID}, Tuğba Danişan^{ID}, Tamer Eren^{ID}

Kırıkkale Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, 71450, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Literatürde ilk kez farklı türde ekipmanlar için bakım çizelgeleme
- Bakım çizelgeleme ve üretim tahmini entegrasyonu
- Literatürde ilk kez periyodik bakım için beş farklı bakım türünü inceleme

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 06.08.2019
Kabul: 06.04.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.602774

Anahtar Kelimeler:

Bakım çizelgeleme
üretim tahmini
hidroelektrik santral
tam sayılı programlama
yapay sinir ağıları

ÖZET

Bakım, endüstriyel işletmelerde üretim, personel ve malzeme ile eş zamanlı yönetilmesi gereken önemli bir prosestir. Bu önemli prosesin kritik aşamalarının başında bakım planlaması gelmektedir. Bakım planlaması için gerekli olan iki aşama bulunmaktadır. İlk aşama bakım stratejilerinin belirlenmesi ve ikinci aşama ise bakım çizelgelerinin oluşturulmasıdır. Bu çalışma, bakım planlamasının ilk adımını oluşturan bakım strateji seçiminin gerçekleştirildiği bir çalışmanın devamı olarak bakım çizelgeleme için yapılmıştır. Bakım strateji seçimi için gerçekleştirilen ilk adımdaki çalışmada [5], Türkiye'deki büyük ölçekli bir hidroelektrik santralda yer alan 1330 elektriksel ekipman incelenmiş ve santral açısından kritiklik seviyesi belirlenmiştir. Çalışma sonucunda bir zaman çizelgesi doğrultusunda gerçekleştirilebilecek olan, periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar bakım planlamasındaki bakım çizelgeleme aşamasını oluşturan bu çalışmada kullanılmıştır ve periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği bu kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu için bakım çizelgesi oluşturulmuştur. Bakım çizelgeleme için yapılan bu çalışmanın ilk aşamasında santralin bir yıllık üretim tahmini Yapay Sinir Ağı (YSA) yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve bu tahmin sonucunda elde edilen verilerden çalışma-bakım süreleri hesaplanmıştır. Tutarlı tahmin değerlerinin santralin bakım planlama gerçek ve gerekliliklerini yansıtan 0-1 Tam sayılı Programlama (TP) modelinde kullanılmasıyla, beş farklı periyodik bakım türü çizelgelenmiş ve santral işletme ve bakım gerçekleri ile tutarlı optimal bir bakım planı elde edilmiştir.

A hybrid model proposal for maintenance scheduling in hydropower plants

H I G H L I G H T S

- Maintenance scheduling for five different types of preventive maintenance for the first time in the literature
- Integrated maintenance scheduling and production estimation
- Maintenance scheduling for different types of equipment for the first time in the literature

Article Info

Research Article
Received: 06.08.2019
Accepted: 06.04.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.602774

Keywords:

Maintenance scheduling
generation estimation
hydroelectric power plant
integer programming
artificial neural network

ABSTRACT

Maintenance is an important process that must be managed simultaneously with personnel and materials, production in industrial enterprises. Maintenance planning comes at the beginning of the critical stages of this important process. There are two stages required for maintenance planning. The first stage is the determination of maintenance strategies and the second stage is the generation of maintenance schedules. This study is carried out for maintenance scheduling as a continuation of the maintenance strategy selection which is the first step of maintenance planning. In the first step study realized for maintenance strategy selection, 1330 electrical equipment located in a large-scale hydroelectric power plant in Turkey is examined and the criticality level is determined for the plant. As a result of the study can be realized in accordance with a timeline, 7 critical electrical equipment groups in which preventive maintenance strategy can be applied. As a result of the study can be realized in accordance with a timeline, critical electrical 7 equipment groups determined which preventive maintenance strategy can be applied. These results are used in this study which constitutes the maintenance scheduling stage in maintenance planning and the maintenance schedule has been established for these critical electrical 7 equipment groups to which preventive maintenance strategy can be applied. In the first stage of this study for maintenance scheduling, one-year generation estimation of the plant is realized by using the Artificial Neural Network (ANN) method and operating-maintenance periods are calculated from the data obtained from this estimation. By using consistent estimation values in the 0-1 Integer Programming (IP) model, which reflects the power plant's maintenance planning realities and requirements, five different types of periodic maintenance are scheduled and an optimal maintenance plan consistent with the power plant operation and maintenance facts is achieved

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bakım, endüstriyel işletmelerde üretim başta olmak üzere personel ve malzeme ile eş zamanlı olarak yönetilmesi gereken önemli bir prosestir. Özellikle sürdürülebilir üretim için gerekli olan ekipmanlarda, uzun süre çalıştırılmalarından dolayı yıpranma veya arızalanmaya bağlı olarak beklenen verim elde edilememektedir. Ekipmanlardan beklenen verimin elde edilememesi ise üretimin planlanan zamandan daha geç tamamlanması, istenilen ürün kalitesinin elde edilememesi ve dahası üretimin durdurulması gibi problemleri de beraberinde getirmektedir. Bu da üretim tesisleri için ek bir maliyet anlamına gelmektedir. Bunun yanı sıra ülkeler için önemli gelir kaynaklarından olan ve büyük alt yapı yatırımları gerektiren enerji santralleri gibi büyük tesislerde benzer problemlerin yaşanması maliyetler dışında büyük problemleri de beraberinde getirmektedir. Örneğin ülkenin enerji arz güvenliğinin sağlanamaması, ülkedeki enerji alt yapısından faydalanan diğer işletmelerin de üretimlerinin durmasına, dolayısıyla ülke genelinde daha büyük bir probleme neden olabilmektedir. Özellikle Haziran 2019 ayı sonu itibarıyla toplamda 90.420,9 MW kurulu güce ulaşan Türkiye'deki enerji santrallerinden %31,42'lik (28.414 MW) paya sahip hidroelektrik santraller [1] ülkedeki enerji arz güvenliğini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle hidroelektrik santrallerde de diğer üretim tesislerinde olduğu gibi üretimin sürekliliğini sağlamakta önemli rol oynayan bakım prosesinin planlanması büyük önem arz etmektedir.

Bakım prosesinin kritik aşamalarının başında gelen bakım planlarının, sistem birimleri veya ekipmanlar için uygun olan bakım stratejilerine göre gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Çalışmanın uygulanan alanı olan hidroelektrik santraller için temel olarak dört bakım stratejisi uygulanmaktadır. Bu stratejiler arıza, periyodik, kestirimci ve revizyon bakımlardır. Arıza bakım, makine/ekipmanların beklenen görevleri yerine getiremediği durumda gerçekleştirilen onarım veya bakım faaliyetlerini; kestirimci bakım, modern ölçüm ve sayısal işaret işleme metotları kullanılarak makine/ekipmanın işletilmesi sürecinde izlenmesi ve ölçüm sonuçlarına göre arıza oluşmadan gerekli tedbirlerin alındığı bakım faaliyetlerini; revizyon bakım makine/ekipmanların uzun zaman dilimlerinde üniteler bazında kapsamlı incelendiği periyodik bakım faaliyetlerini; periyodik bakım ise, makine/ekipmanların kesintisiz ve beklenen tasarım özelliklerinde çalışması için bir zaman çizelgesi dahilinde gerçekleştirilen bakım faaliyetlerini içermektedir [2,3].

Bu çalışmada büyük ölçekli altyapı yatırımları arasında yer alan ve sürdürülebilir enerji arzına uygun elektrik üretimini gerçekleştirmek amacıyla sahip elektrik üretim santrallerinden olan hidroelektrik santrallerde [4] bakım planlaması için gerçekleştirilen, bakım strateji seçiminden ve bakım çizelgelemeden oluşan iki aşamalı bir çalışmanın bakım çizelgeleme aşaması ele alınmıştır. Bakım strateji seçimi için yapılan ilk aşamadaki çalışmada [5], Türkiye'deki büyük ölçekli bir hidroelektrik santralda yer

alan 1330 elektriksel ekipmanın santral açısından kritiklik seviyesinin belirlenmesi için AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Belirlenen kritik ana ekipman grupları için TP modeli ile bakım strateji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda bir zaman çizelgesi doğrultusunda gerçekleştirilebilecek olan periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu belirlenmiştir. Bakım strateji seçimi için yapılan ilk aşamadaki çalışmadan sonra bakım planlaması için ikinci aşama olan bu çalışmada ise bakım strateji seçimi çalışmasından elde edilen sonuç kullanılmış ve periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği elektriksel 7 ana ekipman grubu için bakım çizelgesi oluşturulmuştur. Problem çözümü için öncelikle literatürde doğrusal olmayan problemlerde üstünlüğünü kanıtlanması, problem parametreleri arasında işlevsel bir ilişki kurulabilmesi ve literatürdeki tahmin problemlerinin çözümünde etkin sonuçların alınmasını sağlaması nedeniyle [6-8] yapay sinir ağı (YSA) yöntemi tercih edilmiş ve santralin bir yıllık üretimi tahmin edilmiştir. YSA yöntemi literatürde sınıflandırma [9], teşhis etme [10], çizelgeleme [11] ve tahminleme [12, 13] gibi problem türlerinde ulaşım [14], sağlık [15] ve finans [16] gibi çeşitli uygulama sahalarında kullanılmıştır.

YSA yönteminin literatürdeki çeşitli problemlerde üstünlüğünü kanıtlanması bu çalışmada olduğu gibi kompleks problem yapısına sahip enerji sektöründeki çoğu çalışmada da [17-19] kullanılma nedeni olmuştur. Özellikle elektrik talep tahminine [20, 87, 88], elektrik fiyatına [21] ve enerji kullanımına [22] dair gerçekleştirilen literatür incelemeleri de YSA'nın enerji alanındaki tahmin çalışmalarında sıklıkla yer aldığı kanıtlar niteliktedir. Enerji sektöründe santral üretim tahmini için de kullanılan YSA yöntemi Gandelli vd. [23], Li vd. [24] ve Dolara vd. [25]'nin gerçekleştirmiş olduğu çalışmalarda da etkinliğini kanıtlamıştır. Bu çalışmalarda PV santralleri için hibrid yöntemler önerilirken çalışma sonuçları çeşitli hata formülleri kullanılarak analiz edilmiş, saatlik ya da birkaç günlük, kısa süreli üretim tahmini yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada ise bir hidroelektrik santral için bir yıllık üretim tahmini gerçekleştirilerek gerçek santral işletmeciliğinde kolaylıkla ve etkin bir şekilde uygulanabilecek uzun vadeli bir tahmin modeli önerilmiştir.

Üretim tahmini tamamlandıktan sonra bakım çizelgeleme için matematiksel bir model önerilmiştir. Modelleme aşamasında özellikle enerji sektöründeki bakım çizelgeleme çalışmalarına dair literatür incelenmiştir. Generator Maintenance Scheduling (GMS) adıyla literatürde yer alan bu problemlere dair günümüze kadar geniş kapsamlı üç literatür incelemesi bulunmaktadır. Bunlardan ilki Yamayee [26] tarafından gerçekleştirilmiş olup bu problem için kullanılan yöntemler optimal ve sezgisel, deterministik ve stokastik olarak sınıflandırılmış ayrıca çalışmalarda yer verilen kısıtlar da sunulmuştur. Literatürde bu çalışmanın yanı sıra bir diğer incelemeyi ise Khalid ve Ioannis [27] gerçekleştirmiş olup bu problem için kullanılan optimal ve

sezgisel yöntemleri kıyaslamalarla sunmuşlardır. Elektrik endüstrisindeki bakım çizelgeleme problemine dair en güncel inceleme ise Froger vd. [28] gerçekleştirmişlerdir. İncelemelerinde özellikle elektrik piyasasındaki serbestleşmenin elektrik sektöründeki bakım çizelgeleme çalışmaları üzerinde farklılık oluşturduğunu, bu farklılığın, bakıma dair çalışmalardan üretim ve iletimden sorumlu sistem birimlerine (ISO) ait olması ile oluştuğunu kapsamlı bir sınıflandırma ile belirtmişlerdir.

Literatürde bakım çizelgeleme çalışmaları optimal ve sezgisel bazlı farklı yöntemler içeren, farklı amaçlar ve kısıtlarla çalıştırılan modellerden oluşmaktadır. Matematiksel programlama yöntemlerinden dinamik programlama [29], kısıt programlama [30], doğrusal programlama [31-33] modellerinin kullanıldığı bu yöntemlerle birlikte ayrıştırma tekniklerinin de [47] kullanıldığı görülmüştür. Sezgisel yöntemlerden öğretim ve öğrenme temelli optimizasyon [48], genetik algoritma [49-54], tabu arama [55], tavlama benzetimi [33], karınca kolonisi optimizasyonu [56], parçacık sürü optimizasyonu [57], yerel arama [58,59], oyun teorisi [45,60] ve bulanık mantık [61] gibi yöntemler kullanılarak da çalışmalar ele alınmıştır. Ayrıca bu yöntemler haricinde tam sayılı programlama [34-36] ve karışık tam sayılı programlama [40-42] kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Örneğin Dahal vd. [37,38] ve Fetanat ve Shafipour [39] çalışmalarında tam sayılı programlamayı kullanırken Wang ve Wang [43], Eygelaar vd. [44], Mazidi vd. [45], Behnia ve Akhbari [46] ise karışık tam sayılı programlama yöntemini kullanarak problemlerine çözüm getirmişlerdir.

Çalışmalarda çeşitli santral türleri için farklı zaman aralıklarını kapsayacak modeller önerilmiştir. Bakım çizelgeleme problemi için bazı çalışmalarda termik [58,62,63], rüzgar [64-66], nükleer [40,68,69] ve hidroelektrik [56,70,71] santraller için modeller önerilmiştir. Önerilen modellerde genellikle maliyet minimizasyonu [67-69] başta olmak üzere maksimum güvenilirlik [52,56,63] ya da kar [62,72] hedeflenmiştir. Önerilen modellerdeki çizelge zaman aralığı ise bir aydan dört yıla kadar [70,73,74] haftalık veya aylık periyotlar halinde yapılmıştır. Zaman aralıklarından özellikle 52 hafta için gerçekleştirilen çalışmaların [45,62,75] çoğunlukta olması da dikkat çekmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda dikkat çekici bir başka nokta ise, problemin dahil edildiği santral birimi ve kapsamı ile ilgilidir. Çoğu araştırmacı, problemi ya sadece üniteler için ya da iletim hatları için ele almışlardır. Bakıma tabi birimler olarak sadece üniteler incelenip hangi santralin hangi ünitesinin ne zaman bakıma alınacağı sorusuna cevap aranmıştır [26-28]. Böylelikle santraller için genel bir planlama yapılmıştır. Fakat bu planlamalar sonrasında her bir santralin, ünitelerin temel yapısını oluşturan ekipmanlarının hangi öncelikle ne zaman bakıma alınmaları gerektiği problemi literatürde incelenen bir konu olmamıştır. Bu nedenle önerilen modellerin, gerçek bir santraldaki bakım çalışmalarının başlatılması noktasında uyumluluğu ve

etkinliği düşük olmuştur. Çünkü sürekli üretim tesisi olan santrallarda hangi ünitenin hangi ekipmanının ne zaman bakıma alınması gerektiği sorununun cevabı da aranmaktadır. Bu bağlamda bir hidroelektrik santraldaki kritik ana ekipman grupları için yapılan bu çalışmanın literatüre bu yönden katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bunun yanı sıra bu çalışma,

- Enerji santrallerinde birden fazla elektriksel ekipman grubunun değerlendirilmesi ve her ekipman grubunun spesifik bakım özellikleri dikkate alınarak periyodik bakım çizelgelerinin oluşturulması,
- Periyodik bakım stratejisinin santral işletme kurallarına uygun olarak belirlenen haftalık, aylık, üç ayda bir, altı ayda bir ve yılda bir uygulanan beş ayrı periyodik bakım türü ile incelenerek her bir ekipman için bu bakım türlerine ait bakım çizelgelerinin oluşturulması,
- Bakım çizelgeleme probleminde 2010-2018 yıllarına ait 9 yıllık gerçek santral verilerinin kullanılarak santral için bir yıllık üretim tahmininin gerçekleştirilmesi ve planlama yılı için santral çalışma ve bakım saatlerinin hesaplanması,
- YSA ile elde edilen sürelerin TP modeline dahil edilerek YSA ve TP yöntemlerinin kombine edilmesi ile literatürde ilk olma özelliği taşımaktadır.
- Türkiye'deki bir hidroelektrik santraldan alınan gerçek veriler ile çalışmanın gerçek hayat uygulaması ise literatürdeki çoğu çalışmada gerçekleştirilmeyen bir özellik olarak öne çıkmaktadır.

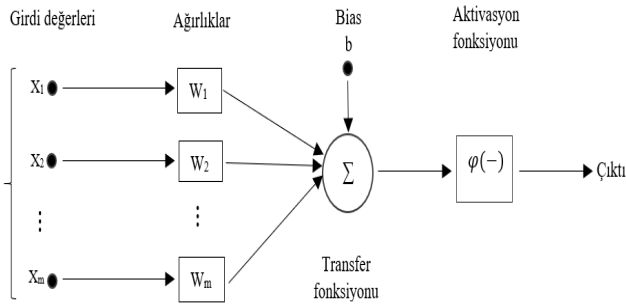
Çalışmanın ikinci bölümünde bakım çizelgeleme için yapılan bu çalışmada kullanılan yöntemlere, üçüncü bölümünde çalışmanın uygulama detaylarına yer verilmiş ve dördüncü bölümünde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. YÖNTEMLER (METHODS)

2.1. Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)

YSA, insan beyninin düşünme mekanizmasını taklit eden, probleme ait girdi verilerinden anlamlı çıktılar oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemin ortaya çıkışı McCulloch ve Pitts [76]'in küçük bir elektrik devresiyle ilgili yaptıkları çalışma ile başlamış ve zaman içerisinde önemli dönüm noktaları ile gelişim göstermiştir. 1949 yılında Hebb [77]'in "The Organization of Behavior" isimli kitabında öğrenme ile ilgili temel teori tanıtılmış ve Rosenblatt [78] 'in 1958 yılında perceptron algılayıcısına dair çalışması ile YSA için önemli bir gelişme yaşanmıştır. XOR probleminin çözümünde YSA yönteminin bu problem gibi doğrusal problem türlerinin çözümünde kullanılmaması ise YSA yöntemiyle ilgili çalışmaların azalması sonucunu doğurmuştur. Sonraki süreçte Rumelhart vd. [79]'in 1986 yılındaki çalışmalarıyla çok katmanlı sinir ağları için temel oluşturmaları ise YSA yöntemine rağbeti artıran yine önemli dönüm noktalarından biri olmuştur [80,81]. Basit bir YSA yapısı girdi, ara ve çıktı katmanlarından oluşmaktadır. Girdiler probleme ait etkili parametrelerden oluşurken, ara katmanlar problem yapısına göre sayısı değişen ve içinde farklı sayıda nöron içerebilen

yapıdır. Çıktı katmanı ise problem sonucu bulunmak istenen parametrelerden oluşmaktadır. Basit bir YSA ağ yapısına Şekil 1.'de yer verilmiştir.



Şekil 1. Basit bir YSA yapısı (A simple ANN structure)

Problem yapısı ve büyüklüğüne bağlı olarak kurulacak YSA mimarisi gerek ağ türü gerek kullanılacak aktivasyon fonksiyonu gerekse katman sayısı gibi birçok parametre ile değişiklik göstermektedir. Yukarıdaki özellikleri ile tahmin problemlerinin çözümünde etkinliği literatürde kanıtlanmış olan YSA yöntemi [6-8], santralin bir yıllık üretim değerlerinin tahmini için tercih edilmiştir. Bu sayede elde edilen bilimsel temelli tutarlı tahminlerin, uygulama bölümünde detaylandırıldığı üzere, bakım çizelgesine üretimin olmadığı haftalara bakım atanması ve santralin çalışması muhtemel dönemlerinde bakım atanmaması gereksinimini desteklemesi sağlanarak etkin ve gerçekçi bir planlama yapılmıştır.

2.2. Tam Sayılı Programlama (Integer Programming)

Çalışmada önerilen matematiksel model bir 0-1 tam sayılı programlama modelidir. Tam sayılı programlama, problem değişkenlerinin bazılarının veya tamamının tam sayılı değerler aldığı programlama türüdür. Günümüzde sıklıkla kullanılan bu optimizasyon yöntemi için Jünger vd. [82]'nin 1958 ve 2008 yılları arasındaki çalışmaları kapsayan çalışması ile bu yönteme dair gelişmelerin 50 yıllık tarihi özetlenmiştir.

Tam sayılı programlama yöntemi için en önemli gelişmelerden biri ise Gomory tarafından, simpleks algoritmasında kesen düzlemler ile küçük değişiklikler yapılarak tam sayılı sonuçların elde edilebileceğinin önerilmesi olmuştur [82]. Bu çalışma sonrasında çeşitli çalışmalarla da tam sayılı programlamanın 0-1 ve karışık tam sayılı programlama gibi farklı çeşitleri de öne çıkmıştır. Tam sayılı programlama modelinin genel formu Eş. 1-4 aralığında verilmiştir [83]:

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

$$\begin{aligned} \text{Max (Min)} \quad & z = g_0(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{St.} \end{aligned} \quad (1)$$

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

$$x_j \geq 0, \quad j \in N \equiv \{1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

$$x_j = \text{tamsayı} \quad j \in I \subseteq N \quad (4)$$

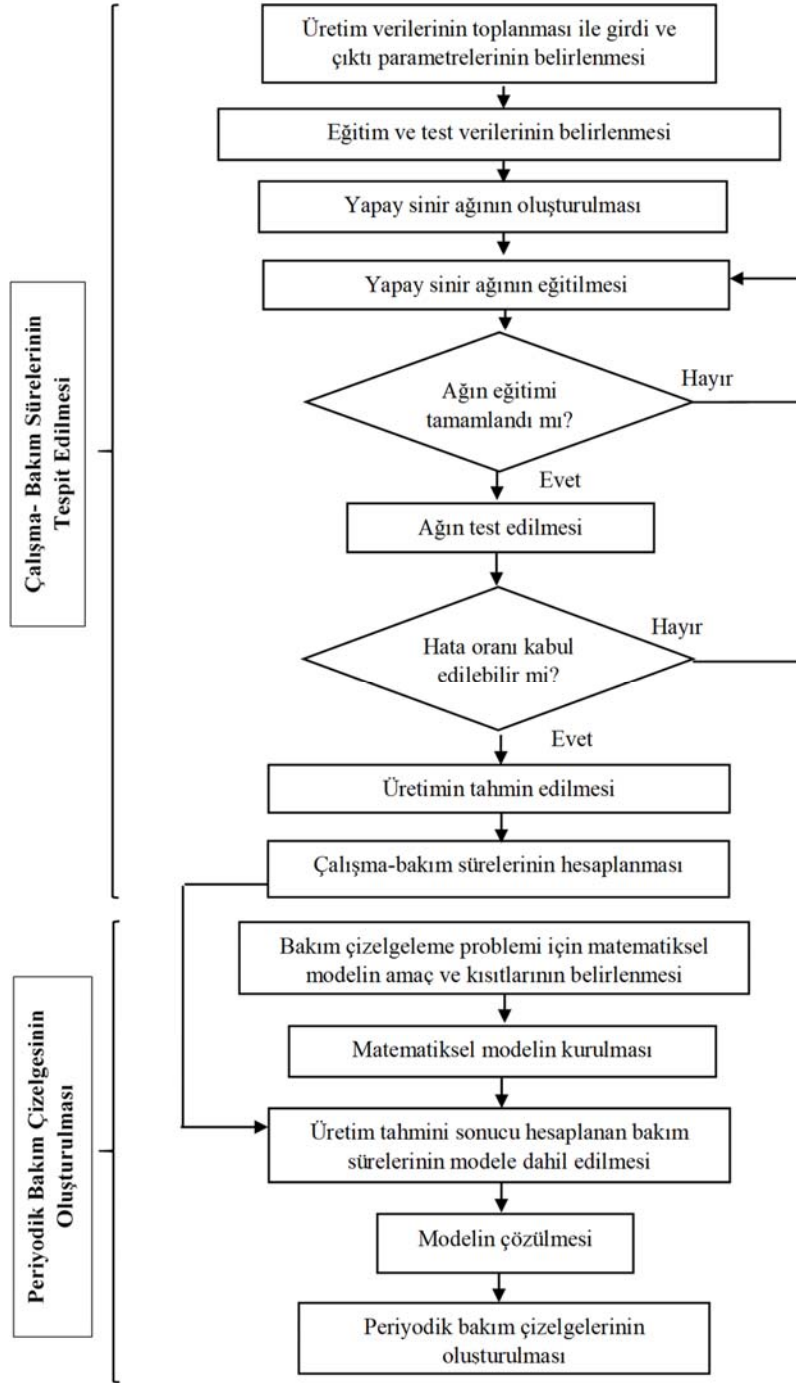
3. UYGULAMA (APPLICATION)

Bu çalışmada büyük ölçekli bir hidroelektrik santralde bakım planlaması için çalışılan iki aşamalı bir çalışmanın bakım çizelgeleme aşaması ele alınmıştır. Özetle Giriş Bölümünde verilen bakım strateji seçimi için yapılan ilk aşamadaki çalışmadan sonra bakım planlaması için ikinci aşama olan bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bakım strateji seçimi için yapılan çalışmanın [5] sonuçları kullanılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda ulaşılan periyodik bakım stratejisinin uygulanabileceği elektriksel 7 ana ekipman grubu için bakım çizelgenmiştir. Bakım çizelgeleme problemi için gerçekleştirilen bu çalışmada öncelikle santralin çalışma ve bakım sürelerinin tespiti için YSA yöntemi kullanılarak bir yıllık üretim tahmini yapılmıştır. Bu tahmin sonucu elde edilen bu süreler çizelgeleme için oluşturulan TP modeline dahil edilmiştir. Problem çözümü IBM ILOG CPLEX Optimisation Studio programında Intel® Core™ i3 CPU 2.40 GHz işlemcili bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Problem 0,63 saniyede çözülmüştür. Bakım çizelgeleme için gerçekleştirilen bu çalışmanın uygulama adımları Şekil 2.'de yer almaktadır.

3.1. Periyodik Bakıma Tabi Ekipmanların Belirlenmesi (Determination of Equipment Subject to Preventive Maintenance)

Bakım strateji seçimi için yapılan ilk aşamadaki çalışmada [5] elde edilen bazı sonuçlara bu bölümde yer verilmiştir. İlk aşama olarak yapılmış bu çalışmada hidroelektrik santraldaki toplam 1330 elektriksel ekipman arasından kritik ana ekipman grupları belirlenmiştir. Kritik ekipmanların belirlenmesi için AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan sıralama sonrasında ekipmanların santral duruşuna sebep olması nedeniyle 90 puan üzerinde olan ekipmanlar seçilmiş ve kritik elektriksel 7 ana ekipman grubu belirlenmiştir. Sonraki aşamada ise belirlenen 7 ekipman grubu için TP yöntemi ile bakım strateji optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bakım strateji seçimi için elde edilen sonuçlar ise Tablo 1. ve Tablo 2.'de yer almaktadır.

Tablo 1. ve Tablo 2.'de elde edilen sonuçlar doğrultusunda bakım planlamasının ikinci aşaması olan bu çalışmaya başlanmıştır. Bu çalışmada belirlenen bu ekipman gruplarında periyodik bakım yapılabilecek olan ekipman grupları için bakım çizelgeleme aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen uygulama adımları ise sonraki iki bölümde sunulmuştur.



Şekil 2. Uygulama Adımları (Application steps)

3.2. Çalışma-Bakım Saatlerinin Tespit Edilmesi (Determination of Operation-Maintenance Hours)

Bakım çizelgeleme için öncelikle 0-1 TP modelinin kısıtlarında T_{makj} değişkeni olarak kullanılacak olan bakım saatleri için YSA yöntemi ile bir yıllık üretim tahmini yapılmıştır. Problem çözümünde MATLAB programı kullanılmıştır. Kurulan ağ ileri beslemeli bir ağdır. YSA'nın girdi parametreleri olarak gün, yıl ve harcanan su miktarı

kullanılmıştır. Çıktı parametresi ise günlük olarak üretilecek enerji miktarıdır. Bu parametrelerin yanı sıra ağda üç ara katman kullanılmıştır. Kurulan ağ yapısına Şekil 3.'te yer verilmiştir.

Kurulan ağ yapısında literatürde de sıklıkla kullanılan fonksiyonlar kullanılmıştır. Ağ mimarisinde her bir katman için sırasıyla "tansig, logsig, logsig" transfer fonksiyonları kullanılmış olup katmanlardaki nöron sayıları ise 30'dur.

Öğrenme fonksiyonu olarak “learn_gdm” kullanılmıştır. Ağın eğitim sürecinde 2010-2018 yılları arasındaki 9 yıllık gerçek veri setinden toplamda 2820 veri kullanılmış olup bunlardan 2135’i öğrenme aşamasında 685’i test aşamasında kullanılmıştır. Öğrenme aşamasında gerçekleştirilen denemeler sonucunda seçilen en iyi ağ yapısında R² değeri 0,99 olarak elde edilmiştir. R² değerinin 1’e yakın olmasının gerçek veri ve tahmin sonucu arasındaki tutarlılığın kuvvetli olduğunu göstermesi nedeniyle kurulan bu ağ yapısıyla bir sonraki aşama olan test aşamasına geçilmiştir. Test aşamasında elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlarla karşılaştırılmış ve veri setinde sıfırlı değerlerin olması nedeniyle literatürde bu tür veri setinde kullanılan ve Eş. 5’te hesaplaması yer alan Symmetric Mean Absolute Percentage Error (sMAPE) hata türü ile test hatası hesaplanmıştır.

Tablo 1. Kritik elektriksel ekipmanlar ve kritiklik seviyeleri

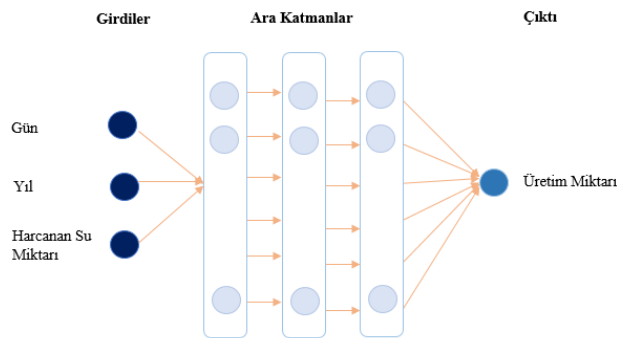
(The critical electrical equipment and criticality levels) [5]

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

Tablo 2. Ekipman bazlı optimum strateji kombinasyonları

(Equipment-based optimum strategy combinations) [5]

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



Şekil 3. Kurulan ağ yapısı (Established network structure)

Burada n örneklem sayısını ifade etmektedir.

$$sMAPE = 2 * \frac{\text{Gerçek değer} - \text{Tahmin değeri}}{\text{Gerçek değer} + \text{Tahmin değeri}} * \frac{100}{n} \quad (5)$$

Hata oranı %1,23 olarak bulunmuştur. Elde edilen hata oranı literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında [23-25] elde edilen sonuçların uygun olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca test sonuçlarına dair bir örnek Tablo 3.’te yer almaktadır. Bu sonuçlar ışığında bu ağ yapısı ile 2019 yılı için santral üretim tahmini gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu tahmin için örneğe Tablo 4.’te yer verilmiştir.

Elde edilen üretim verileri santraldaki üç üniteden her bir ünitenin eşit çalışacağı varsayımı ile hesaplanarak bir ünitenin günde üreteceği enerji miktarı hesaplanmıştır. Hesaplanan çalışma saatlerinden sonra bakım personellerinin hafta sonları çalışmaması ve hafta içi gün içerisinde 16 saatlik periyotta çalışabildikleri şartı göz önünde bulundurularak gün içerisinde bakım personelinin çalışabileceği saatler hesaplanmıştır. Bulunan saatler haftalık olarak toplanmış ve sonuçta haftalık bakım yapılabilir süreler hesap edilmiştir. Örneğin, 4.01.2019 tarihi için tahmin sonucunda bulunan 1791,569 MW’lık üretim miktarı için hesaplama yapılmış. Öncelikle santraldaki bir ünitenin o gün için çalışacağı saati hesaplamak amacıyla tahmin sonucu elde edilen bu değer santralda 90 MW’lık kurulu güce sahip üç ünitenin bulunması nedeniyle 3*90’a bölünmüştür. Bu bölüm sonucunda santraldaki bir ünitenin 4.01.2019 tarihinde 6,64 saat çalışabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bundan sonra santral işletme kuralları gereği bakım personelinin var olan üç vardiyaadan sadece ikisinde yani günde 16 saat çalışabilmesi zorunluluğu nedeniyle santralda bakımın gerçekleştirilebileceği saatleri hesaplamak için bulunan 6,64 değeri 16 saatten çıkartılmıştır.

Tablo 3. Test tahmini sonucundan örnek

(Example of test estimate results)

Tarih	Gerçek Üretim Miktarı	Tahmin Edilen Üretim Miktarı	Hata Oranı
12.06.2010	1117	1118,782	0,002
14.04.2011	1540	1540,177	0,000
8.06.2014	129	132,418	0,026
8.09.2013	158	161,541	0,022
21.08.2015	1609	1607,445	0,001
13.01.2011	1194	1203,181	0,008
2.10.2015	1973	1978,286	0,003
14.07.2010	2918	2825,351	0,032
8.04.2018	1997	1999,151	0,001
29.09.2012	62	62,781	0,013
3.07.2014	1772	1776,124	0,002
10.08.2010	2037	2042,270	0,003
7.04.2016	1334	1328,950	0,004
27.09.2010	1378	1355,833	0,016
14.04.2016	865	855,252	0,011
12.08.2018	2674	2672,339	0,001
14.09.2011	1869	1877,100	0,004
12.01.2018	2247	2276,040	0,013
11.01.2013	1077	1076,468	0,000
12.07.2015	1403	1390,838	0,009

Bunun sonucunda 4.01.2019 tarihinde bakım yapılabilir zaman dilimi maksimum 9,36 saat olarak bulunmuştur. Yapılan bu hesaplama diğer günler için de yapıp bu saatlerin haftalık toplamı alınarak haftada maksimum kaç saatin bakıma ayrılabilceği hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler matematiksel modelde kullanılan T_{makj} değerlerini oluşturmuştur. Yıl içerisinde haftalık olarak maksimum bakım yapılabilir süreler hesaplandıktan sonra bakım çizelgeleme için 0-1 TP modeline geçiş yapılmıştır.

Tablo 4. Tahmin sonucundan örnek (Example of estimated results)

Tarih	Tahmin Edilen Üretim Miktarı
18.02.2019	1458,758
30.03.2019	1873,831
22.04.2019	1906,613
2.05.2019	1215,382
26.07.2019	1940,298
5.08.2019	1093,185
1.12.2019	787,266
30.12.2019	818,740

3.3. Periyodik Bakım Çizelgesinin Oluşturulması (Generating Preventive Maintenance Schedule)

Bu aşamada bakım çizelgeleme problemi için 0-1 TP yöntemi ile matematiksel bir model kurulmuştur. Modeldeki amaç ise malzeme, işçilik ve üretim duruşundan kaynaklı maliyetlerinden oluşan toplam maliyetin minimize edilmesidir. Periyodik bakım haftalık, aylık, üç ayda bir, altı ayda bir ve yılda bir uygulanan beş ayrı türde ele alınmıştır. Bakım türlerinde ekipmanlar için gerçekleştirilen uygulamalar birbirlerinden farklılık göstermektedir.

Notasyonlar

İndisler:

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

Parametreler:

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

Karar değişkeni:

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

Model formülasyonu:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} * C_{ik} \quad (6)$$

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

$$\sum_{i=1}^I X_{ijk} \leq 1 \quad j = 1, \dots, 52; k = 3, 4, 5 \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} * C_{ik} \leq T_c \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K M_{ik} * X_{ijk} \leq T_p \quad j = 1, \dots, 52 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K D_{ik} * X_{ijk} \leq T_{makj} \quad j = 1, \dots, 52 \quad (11)$$

$$\sum_{s=0}^3 X_{i(j+s)2} = 1 \quad i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, 49 \quad (12)$$

$$\sum_{s=0}^{11} X_{i(j+s)3} = 1 \quad i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, 41 \quad (13)$$

$$\sum_{s=0}^{25} X_{i(j+s)4} = 1 \quad i = 1, \dots, 7; j = 1, \dots, 27 \quad (14)$$

$$X_{ijk} \geq 0 \quad \forall i, j, k \quad (15)$$

Kurulan modelde Eş. 6 matematiksel modelin amacını ifade etmektedir. Amaç, malzeme, işçilik ve üretim duruşundan kaynaklı maliyetlerinden oluşan toplam maliyetin minimize edilmesidir. Eş.7 her bir ekipmanın her bir bakım türü için yılda toplamda kaç kez yapılması gerektiğini, Eş.8 ise haftalık ve aylık periyodik bakım türü dışındaki diğer her üç bakım türü için her haftaya en fazla bir ekipmanın bakımının atanması kısıdını yansıtmaktadır. Bu kısıtta haftalık ve aylık bakım türleri, her hafta içinde birden fazla bakım yapılmasını gerektirebileceği için dahil edilmemiştir. Eş. 9 bakım maliyetlerinin bütçeyi aşmamasını, Eş. 10 bakıma ayrılan sürenin toplam işgücünden fazla olmamasını ve Eş. 11 de yapılan bakımların haftalık olarak ayrılan maksimum süreleri aşmaması gerektiğini ifade etmektedir. Eş.12-Eş.14 arasındaki üç kısıt ise ekipman bakımlarının bakım türlerinin periyotlarına uygun olarak atanmasını sağlayan kısıtlardır. Eş. 15 ise işaret kısıtlarıdır. Kurulan matematiksel model sonucunda 7 ekipman için 52 haftalık bir zaman dilimi için 5 periyodik bakım türüne ait optimal bir bakım çizelgesi elde edilmiştir. Elde edilen sonuç Şekil 4.'te sunulmuştur. Kurulan model sonucunda elde edilen çizelgede santral için kritik olan elektriksel 7 ana ekipman grubu için haftalık, 1 aylık, 3 aylık, 6 aylık ve 1 yıllık periyotlarla gerçekleştirilen beş ayrı periyodik bakım türü için 52 haftalık bir zamanı kapsayan bakım çizelgesi elde edilmiştir.

Çizelge sonucunda haftalara ait bakım yapılabilir süreler ve diğer kısıtlara göre uygun atama yapılmıştır, bir haftada birden fazla ekipmana aynı bakım türünün uygulanmaması

üretim tahmini gerçekleştirilmiştir. Tahmin sonucunda elde edilen miktarlar baz alınarak ünite çalışma ve bakım saatleri hesaplanmıştır. Bu hesaplanan süreler, uygulamanın yapıldığı ve uygulanabilir bir bakım çizelgesinin elde edildiği hidroelektrik santralın tüm gereksinimlerini ve gerçeklerini yansıtan önerilen bakım çizelgeleme modeline dahil edilmiştir. Kurulan model sonucunda 7 kritik elektriksel ana ekipman grubunun beş ayrı periyodik bakım türüne dair 52 haftalık zaman dilimi için bakım çizelgeleri oluşturulmuştur. Bu çalışma, enerji tesislerinde birden fazla ekipman grubunun ele alınması, enerji santralının yıllık çalışma saatlerinin bakım çizelgeleme problemine gerçek yaşam ile tutarlı bir şekilde entegre edilmesi ve etkin ve uygulanabilir bir yıllık bakım takvimi sağlanması açısından literatürdeki ilk çalışmadır. Santralın işletimi ile uyumludur.

Ayrıca bu çalışma literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak enerji santrallerinde birden fazla elektriksel ekipman grubunun değerlendirilmesi ve her ekipman grubunun spesifik özellikleri dikkate alınarak periyodik bakım çizelgelerinin oluşturulması, periyodik bakım stratejisinin santral işletme kurallarına uygun olarak belirlenen beş ayrı periyodik bakım türü ile incelenerek her bir ekipman için bu bakım türlerine ait bakım çizelgelerinin oluşturulması, bakım çizelgeleme problemlerinde 2010-2018 yıllarına ait 9 yıllık gerçek santral verilerinin kullanılarak santral için bir yıllık üretim tahmininin gerçekleştirilmesi ve planlama yılı için santral çalışma ve bakım saatlerinin hesaplanması, YSA ile elde edilen sürelerin 0-1 TP modeline dahil edilerek YSA ve TP yöntemlerinin kombine edilmesi ile literatürde ilk olma özelliği taşımaktadır. Ayrıca Türkiye'deki bir hidroelektrik santraldan alınan gerçek veriler ile çalışmanın gerçek hayat uygulaması ise literatürdeki çoğu çalışmada gerçekleştirilmeyen bir özellik olarak öne çıkmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

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

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. TEİAŞ. Kurulu Güç Raporları Haziran 2019. https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2019-07/KURULU%20G%C3%9C%C3%87%20%C4%B0NTERNET%20HAZ%20AYI_0.pdf Erişim tarihi Ağustos 3, 2019.
2. Özcan E.C., Bakım Yönetim Sistemi: Kurulum ve İşletme Esasları, Elektrik Üretim A.Ş. Yayınları, Ankara, Türkiye, 2016.
3. Özcan E.C., Yumuşak R., Eren T., Risk based maintenance in the hydroelectric power plants, *Energies*, 12 (8), 1502, 2019.
4. 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 Sustainable Energy Rev.*, 78, 1410-1423, 2017.
5. Özcan E.C., Danişan T., Eren T., Hidroelektrik santrallerin en kritik elektriksel ekipman gruplarının bakım stratejilerinin optimizasyonu için matematiksel bir model önerisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25 (4), 498-506, 2019.
6. White H., Learning in artificial neural networks: A statistical perspective, *Neural Comput.*, 1 (4), 425-464, 1989.
7. Ripley B.D., Statistical aspects of neural networks, *Networks and chaos statistical and probabilistic aspects*, 50, 40-123, 1993.
8. Cheng B., Titterton D.M., Neural networks: A review from a statistical perspective, *Statistical Science*, 2-30, 1994.
9. Liao S.H., Wen C.H., Artificial neural networks classification and clustering of methodologies and applications—literature analysis from 1995 to 2005, *Expert Syst. Appl.*, 32 (1), 1-11, 2007.
10. Al-Shayea Q.K., Artificial neural networks in medical diagnosis, *International Journal of Computer Science Issues*, 8 (2), 150-154, 2011.
11. Yuce B., Rezgui Y., Mourshed M., ANN–GA smart appliance scheduling for optimised energy management in the domestic sector, *Energy Build.*, 111, 311-325, 2016.
12. Voyant C., Notton G., Kalogirou S., Nivet M.L., Paoli C., Motte F., Fouilloy A., Machine learning methods for solar radiation forecasting: A reviews, *Renewable Energy*, 105, 569-582, 2017.
13. Notton G., Voyant C., Fouilloy A., Duchaud J.L., Nivet M.L., Some applications of ANN to solar radiation estimation and forecasting for energy applications, *Applied Sciences*, 9 (1), 209, 2019.
14. Dougherty M., A review of neural networks applied to transport, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3 (4), 247-260, 1995.
15. Shankaracharya D.O., Samanta S., Vidyarthi A.S., Computational intelligence in early diabetes diagnosis: a reviews, *The review of diabetic studies: RDS*, 7 (4), 252, 2010.
16. Wong B.K., Selvi Y., Neural network applications in finance: A review and analysis of literature (1990–1996), *Information & Management*, 34 (3), 129-139, 1998.
17. Kalogirou S.A., Artificial neural networks in renewable energy systems applications: A reviews, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 5 (4), 373-401, 2001.
18. Amasyali K., El-Gohary N.M., A review of data-driven building energy consumption prediction studies, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 81, 1192-1205, 2018.
19. Muralitharan K., Sakthivel R., Vishnuvarthan R., Neural network based optimization approach for energy demand prediction in smart grid. *Neurocomputing*, 273, 199-208, 2018.
20. Suganthi L., Samuel A.A., Energy models for demand forecasting—A reviews, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 16 (2), 1223-1240, 2012.

21. Weron R., Electricity price forecasting: A review of the state-of-the-art with a look into the future, *International Journal of Forecasting*, 30 (4), 1030-1081, 2014.
22. Wang Z., Srinivasan R.S., A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 75, 796-808, 2017.
23. Gandelli A., Grimaccia F., Leva S., Mussetta M., Ogliari, E., Hybrid model analysis and validation for PV energy production forecasting, In 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), IEEE, 1957-1962, July, 2014.
24. Li Z., Rahman S.M., Vega R., Dong B., A hierarchical approach using machine learning methods in solar photovoltaic energy production forecasting, *Energies*, 9 (1), 55, 2016.
25. Dolara A., Grimaccia F., Leva S., Mussetta M., Ogliari E., A physical hybrid artificial neural network for short term forecasting of PV plant power output, *Energies*, 8 (2), 1138-1153, 2015.
26. Yamayee Z.A., Maintenance scheduling: description, literature survey, and interface with overall operations scheduling, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (8), 2770-2779, 1982.
27. Khalid A., Ioannis K., A survey of generator maintenance scheduling techniques, *Global Journal of Researches in Engineering*, 12 (1), 10-17, 2012.
28. Froger A., Gendreau M., Mendoza J.E., Pinson É., Rousseau L.M., Maintenance scheduling in the electricity industry: A reviews. *Eur. J. Oper. Res.*, 251 (3), 695-706, 2016.
29. Huang S.J., Generator maintenance scheduling: a fuzzy system approach with genetic enhancement, *Electr. Power Syst. Res.*, 41 (3), 233-239, 1997.
30. Frost D., Dechter R., Optimizing with constraints: a case study in scheduling maintenance of electric power units, *Lect. Notes Comput. Sci.*, 469-469, 1998.
31. Chattopadhyay D., A practical maintenance scheduling program mathematical model and case study, *IEEE Trans. Power Syst.*, 13 (4), 1475-1480, 1998.
32. Anghinolfi D., Gambardella L.M., Montemanni R., Nattero C., Paolucci M., Toklu N.E., A matheuristic algorithm for a large-scale energy management problem, In *International Conference on Large-Scale Scientific Computing*, Springer, Berlin, Heidelberg, 173-181, June, 2011.
33. Lindner B.G., Brits R., Van Vuuren J.H., Bekker J., Tradeoffs between levelling the reserve margin and minimising production cost in generator maintenance scheduling for regulated power systems, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 101, 458-471, 2018.
34. Dopazo J.F., Merrill H.M., Optimal generator maintenance scheduling using integer programming, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 94 (5), 1537-1545, 1975.
35. Jost V., Savourey D., A 0–1 integer linear programming approach to schedule outages of nuclear power plants, *Journal of Scheduling*, 16 (6), 551-566, 2013.
36. Al-Khamis T.M., Vemuri S., Lemonidis L., Yellen J., Unit maintenance scheduling with fuel constraints, In *Power Industry Computer Application Conference*, IEEE, Conference Proceedings 113-119, May, 1991.
37. Dahal K.P., Aldridge C.J., McDonald J.R., Generator maintenance scheduling using a genetic algorithm with a fuzzy evaluation function, *Fuzzy Sets Syst.*, 102 (1), 21-29, 1999.
38. Dahal K.P., Chakpitak N., Generator maintenance scheduling in power systems using metaheuristic-based hybrid approaches, *Electr. Power Syst. Res.*, 77 (7), 771-779, 2007.
39. Fetanat A., Shafipour G., Generation maintenance scheduling in power systems using ant colony optimization for continuous domains based 0–1 integer programming, *Expert Syst. Appl.*, 38 (8), 9729-9735, 2011.
40. Fourcade F., Johnson E., Bara M., Cortey-Dumont P., Optimizing nuclear power plant refueling with mixed-integer programming, *Eur. J. Oper. Res.*, 97 (2), 269-280, 1997.
41. Canto S.P., Application of Benders' decomposition to power plant preventive maintenance scheduling, *Eur. J. Oper. Res.*, 184 (2), 759-777, 2008.
42. Mollahassani-Pour M., Abdollahi A., Rashidinejad M., Application of a novel cost reduction index to preventive maintenance scheduling, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 56, 235-240, 2014.
43. Wang C., Wang Z., Short-term transmission line maintenance scheduling with wind energy integration, In *Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, 1-5, July, 2017.
44. Eygelaar J., Lötter D.P., van Vuuren J.H., Generator maintenance scheduling based on the risk of power generating unit failure, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 95, 83-95, 2018.
45. Mazidi P., Tohidi Y., Ramos A., Sanz-Bobi M.A., Profit-maximization generation maintenance scheduling through bi-level programming, *Eur. J. Oper. Res.*, 264 (3), 1045-1057, 2018.
46. Behnia H., Akhbari M., Generation and transmission equipment maintenance scheduling by transmission switching and phase shifting transformer, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 32 (1), 2483, 2019.
47. Lv C., Wang J., You S., Zhang Z., Short-term transmission maintenance scheduling based on the Benders decomposition, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, 25 (4), 697-712, 2015.
48. Abirami M., Ganesan S., Subramanian S., Anandhakumar R., Source and transmission line maintenance outage scheduling in a power system using teaching learning based optimization algorithm, *Appl. Soft Comput.*, 21, 72-83, 2014.
49. Baskar S., Subbaraj P., Rao M.V.C., Tamilselvi S., Genetic algorithms solution to generator maintenance scheduling with modified genetic operators, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 150 (1), 56-60, 2003.

50. Yare Y., Venayagamoorthy G.K., Optimal maintenance scheduling of generators using multiple swarms-MDPSO framework, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, 23 (6), 895-910, 2010.
51. Reihani E., Sarikhani A., Davodi M., Davodi M., Reliability based generator maintenance scheduling using hybrid evolutionary approach, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 42 (1), 434-439, 2012.
52. Zhong S., Pantelous A.A., Beer M., Zhou J., Constrained non-linear multi-objective optimisation of preventive maintenance scheduling for offshore wind farms, *Mech. Syst. Sig. Process.*, 104, 347-369, 2018.
53. Zhu J., Yan W., Lin Y., Yu P., Xiong X., A new multi-objective immune algorithm for generation and transmission equipment maintenance scheduling. *Int. J. Power Energy Syst.*, 37 (3), 2017.
54. Zhu J., Xuan P., Xie P., Hong C., Yan W., Generation and transmission equipment maintenance scheduling with load transfer, In *Power & Energy Society General Meeting, IEEE*, 1-5, July, 2017.
55. El-Amin I., Duffuaa S., Abbas M., A tabu search algorithm for maintenance scheduling of generating units, *Electr. Power Syst. Res.*, 54 (2), 91-99, 2000.
56. Foong W.K., Simpson A.R., Maier H.R., Stolp S., Ant colony optimization for power plant maintenance scheduling optimization—a five-station hydropower system, *Annals of Operations Research*, 159 (1), 433-450, 2008.
57. Suresh K., Kumarappan N., Hybrid improved binary particle swarm optimization approach for generation maintenance scheduling problem, *Swarm Evol. Comput.*, 9, 69-89, 2013.
58. Burke E.K., Smith, A.J., Hybrid evolutionary techniques for the maintenance scheduling problem, *IEEE Trans. Power Syst.*, 15 (1), 122-128, 2000.
59. Gardi F., Nouioua K., Local search for mixed-integer nonlinear optimization: a methodology and an application, In *European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, Springer, Berlin, Heidelberg, 167-178, April, 2011.
60. Min C.G., Kim M.K., Park J.K., Yoon Y.T., Game-theory-based generation maintenance scheduling in electricity markets, *Energy*, 55, 310-318, 2013.
61. El-Sharkh M.Y., El-Keib A.A., Chen H., A fuzzy evolutionary programming-based solution methodology for security-constrained generation maintenance scheduling, *Electr. Power Syst. Res.*, 67 (1), 67-72, 2003.
62. Bisanovic S., Hajro M., Dlakic M., A profit-based maintenance scheduling of thermal power units in electricity market, *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5 (3), 156-164, 2011.
63. Kralj B., Petrovic R., A multiobjective optimization approach to thermal generating units maintenance scheduling, *Eur. J. Oper. Res.*, 84 (2), 481-493, 1995.
64. Mazidi P., Tohidi Y., Sanz-Bobi M.A., Strategic maintenance scheduling of an offshore wind farm in a deregulated power system, *Energies*, 10 (3), 313, 2017.
65. Lei X., Sandborn P.A., Maintenance scheduling based on remaining useful life predictions for wind farms managed using power purchase agreements, *Renewable Energy*, 116, 188-198, 2018.
66. Bangalore P., Patriksson M., Analysis of SCADA data for early fault detection, with application to the maintenance management of wind turbines, *Renewable Energy*, 115, 521-532, 2018.
67. Kovacs A., Erdős G., Viharos Z.J., Monostori L., A system for the detailed scheduling of wind farm maintenance, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60 (1), 497-501, 2011.
68. Khemmoudj M.O.I., Porcheron M., Bennaceur H., When constraint programming and local search solve the scheduling problem of electricité de france nuclear power plant outages, In *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, Springer, Berlin, Heidelberg, 271-283, September, 2006.
69. Gorge A., Lisser A., Zorgati R., Stochastic nuclear outages semidefinite relaxations, *Computational Management Science*, 9 (3), 363-379, 2012.
70. Helseth A., Fodstad M., Mo B., Optimal hydropower maintenance scheduling in liberalized markets, *IEEE Trans. Power Syst.*, 33 (6), 6989-6998, 2018.
71. Rodriguez J.A., Anjos M.F., Côté P., Desaulniers G., Milp formulations for generator maintenance scheduling in hydropower systems, *IEEE Trans. Power Syst.*, 33 (6), 6171-6180, 2018.
72. Chattopadhyay D., A game theoretic model for strategic maintenance and dispatch decisions, *IEEE Trans. Power Syst.*, 19 (4), 2014-2021, 2004.
73. Barot H., Bhattacharya K., Security coordinated maintenance scheduling in deregulation based on genco contribution to unserved energy, *IEEE Trans. Power Syst.*, 23 (4), 1871-1882, 2008.
74. Lindner B.G., Brits R., van Vuuren J.H., Bekker J., Tradeoffs between levelling the reserve margin and minimising production cost in generator maintenance scheduling for regulated power systems, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 101, 458-471, 2018.
75. Naebi Toutouchi A., Seyed Shenava S.J., Taheri S.S., Shayeghi H., MPEC approach for solving preventive maintenance scheduling of power units in a market environment, *Trans. Inst. Meas. Control*, 40 (2), 436-445, 2018.
76. McCulloch W.S., Pitts W., A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5 (4), 115-133, 1943.
77. Hebb D.O., *The organization of behavior*, 1949.
78. Rosenblatt F., *The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain*, *Psychological Review*, 65 (6), 386, 1958.
79. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J., Learning internal representation by backpropagating errors, *DE Rumelhart, & JL McClelland Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, 1, 1986.

80. Haykin S., Neural networks and learning machines, Upper Saddle River: Pearson education, 3, 2009.
81. Haykin S., Neural networks: a comprehensive foundation, Prentice Hall PTR, 1994.
82. Jünger M., Liebling T.M., Naddef D., Nemhauser G.L., Pulleyblank W.R., Reinelt G., Wolsey L.A., 50 years of integer programming 1958-2008: from the early years to the state-of-the-art, Springer Science & Business Media, 2009.
83. Taha H.A., Integer programming: theory, applications and computations, Academic Press, 2014.
84. Karaođlan İ., Altıparmak F., Dengiz B., Analysis of maintenance policies in just in time production system, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22 (1), 181-189, 2007.
85. Ertogral K., Erkoc M., Ülker D., A production scheduling model and analysis for the maintenance repair and overhaul service providers, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (3), 513-522, 2015.
86. Orhan İ., Kapanođlu M., Karakoç T.H., Concurrent aircraft routing and maintenance scheduling using goal programming, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (1),11-26, 2012.
87. Bulut M., Bařođlu B., Development of a hybrid system based on neural networks and expert systems for shortterm electricity demand forecasting, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2), 575-583, 2017.
88. Akpınar M., Yumuşak N., Daily basis mid-term demand forecast of city natural gas using univariate statistical techniques, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 725-741, 2020.
89. Özcan E.C., Danişan T., Yumuşak R., Eren T., An artificial neural network model supported with multi criteria decision making approaches for maintenance planning in hydroelectric power plants, Maintenance and Reliability, In Press, 22 (3), 400-418, 2020.

