



## Hidroelektrik santralların en kritik elektriksel ekipman gruplarının bakım stratejilerinin optimizasyonu için matematiksel bir model önerisi

### A mathematical model proposal for maintenance strategies optimization of the most critical electrical equipment groups of hydroelectric power plants

Evrencan ÖZCAN<sup>1\*</sup>, Tuğba DANIŞAN<sup>2</sup>, Tamer EREN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye.  
evrencan.ozcan@kku.edu.tr, tugba.danisan@gmail.com, teren@kku.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 12.07.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 02.12.2018

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.38455  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bakım, üretim tesislerinin kesintisiz, kalite düzeyi yüksek, ekonomik, verimli, güvenilir ve çevreye duyarlı üretim yapması olarak tanımlanan sürdürülebilirlik hedefine üst düzeyde katkı sağlayan bir süreçtir. Bu önemli prosesin en önemli aşamalarının başında bakım planlaması gelmektedir ve bu fazın ilk ve vazgeçilmez aşaması ise bakım strateji seçimidir. Bakım proseslerinin üretim durumu, malzeme, zaman ve iş gücü gereksinimi nedeniyle önemli maliyetler doğurması düşünüldüğünde, özellikle kritik ekipmanlara uygun bakım stratejilerinin atanması, üretim tesisinin gereksiz maliyetlerden kaçınması açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, ekipmanın arızasız çalışma süresinin artırılması ile güvenilir ve kalite düzeyi yüksek üretimin gerçekleştirilmesine sağladığı katkı ile de bakım strateji optimizasyonu, üretim tesislerinde sürdürülebilir üretim hedefine direkt olarak etki etmektedir. Bunların yanı sıra, sürekli üretim tesisleri grubunda yer alan elektrik üretim santrallerinde, enerjinin toplum üzerindeki etkileri de düşünüldüğünde bu problem çok daha önemli bir hal almaktadır. Bu bağlamda bu çalışmada, Türkiye enerji üretiminin %20'sini gerçekleştiren hidroelektrik santrallerden büyük ölçekli bir tanesinde, en problemleri ekipman grubu olan elektriksel ekipmanlar arasından santral açısından en kritik olanlar AHP-TOPSIS kombinasyonu ile belirlenmiştir. Ardından, bu ekipman grupları için tamir, periyodik, kestirimci ve revizyon bakım stratejilerinden en uygun kombinasyon önerilen tam sayılı programlama modeli ile elde edilmiştir. Bu kombinasyonun kullanımı ile üretim duruşları ve bunların beraberinde getirdiği maliyetlerde %80 oranında bir iyileşme sağlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Bakım strateji optimizasyonu, Hidroelektrik santraller, Tam sayılı programlama, AHP, TOPSIS

#### 1 Giriş

Elektrik üretim santralleri, sürdürülebilir enerji arzı olarak adlandırılan kesintisiz, güvenilir, verimli, ekonomik ve çevreye duyarlı enerji üretimini gerçekleştirmek temel amacına sahip büyük ölçekli ve sürekli üretim tesisleridir. Bu beş ayaklı kapsamlı hedef doğrultusunda, santrallerin işletme kurallarına uygun olarak çalıştırılması ile üretim, personel, malzeme ve bakım proseslerinin bir sistem dahilinde yönetilmesi vazgeçilmez bir zorunluluktur. Santrallerin yıllar içindeki işletme sürecinde maruz kaldıkları yüksek basınç, yüksek sıcaklık, metal yorgunluğu, işletme ve bakım direktiflerine uymama ve operatör hataları gibi zorlayıcı koşullar altında çalıştırılması, özellikle yaşlı denilebilecek santrallerde bakım süreçlerini üretimde sürdürülebilirliğin sağlanması temelinde bahsedilen diğer üç ana prosesten daha kritik bir noktaya taşımaktadır.

#### Abstract

Maintenance is a process that makes a high-level contribution to the sustainability goal of the manufacturing facilities defined as uninterrupted, high-quality level, economic, efficient, reliable and environmentally friendly production. The foremost stage of this important process is the maintenance planning and the first and indispensable phase of this stage is the maintenance strategy selection. When considering the maintenance processes which cause the significant costs due to production downtime, material, time and labor requirements, assignment of the suitable maintenance strategies especially for the critical equipment has great importance in terms of avoiding the unnecessary costs for the generation facility. Furthermore, maintenance strategy optimization directly effects the goal of sustainable production in the manufacturing facilities by providing to increase the faultless operating time of equipment and contribute to realize the reliable and high-quality manufacturing. In addition to these, this problem becomes more and more important in the electricity generation plants which are in the group of continuous production facilities, when the effects of energy on the society are considered. In this context in this study, among the electrical equipment which are the most problematic group, the most critical ones in terms of the power plant are determined by the AHP-TOPSIS combination in one of the big-scale hydroelectric power plants realize the 20% of Turkey's electricity generation. Then, the most appropriate strategy combination from corrective, periodic, predictive and revision maintenance strategies is obtained by using the proposed integer programming model for these equipment groups. The use of this combination has resulted in an 80% improvement in generation downtimes and associated costs.

**Keywords:** Maintenance strategy optimization, Hydroelectric power plants, Integer programming, AHP, TOPSIS

Bakım maliyetlerinin, işletme türüne göre değişen farklı üretim maliyetlerinin %15 ilâ %70'ine ulaşabilmesi [1], hidroelektrik santraller gibi kompleks, kritik ve sürekli üretim tesisleri için bakım proseslerinin sistematik bir şekilde planlanmasını ve bakım uygulamalarının bu planlama çıktılarına göre etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini daha da önemli kılmaktadır. Bakım planlamasının ilk ve en kritik aşamalarından birisi ise, her bir ekipmana uygun bakım stratejisinin belirlenmesidir. Bu sayede, sadece gerekli ve yeterli bakımlar gerçekleştirilebilecek ve buna göre yapılacak planlama çalışmaları ile hidroelektrik santraller gibi sürdürülebilir üretimin vazgeçilmez ve en önemli amaç olduğu üretim tesislerinde bakım için gerekli olan ve arıza neticesinde oluşması muhtemel duruşların sayısı ve süresi azaltılabilecek ayrıca, malzeme, zaman ve işgücü gereksiniminden kaynaklanan maliyetler minimize edilerek sistemin ana amacına uygun bir şekilde işletimi kararlılıkla sürdürülebilecektir.

Her bir sistem ya da ekipman için uygun bakım stratejisinin seçim problemi, sistem bileşenlerinin çeşitli ve işlevlerinin farklı olması, sistemin dikkate alınması gereken çok sayıda nitel ve nicel kriteri barındırması, sisteme dair verilerin zor elde edilmesi gibi nedenlerden dolayı çok karmaşık bir problemdir. Bu nedenle, planlamalar yapılırken tamir, durum bazlı, risk tabanlı, koşul tabanlı, periyodik ve revizyon bakım gibi olası seçenekler arasından ekipmanlar için uygun bakım stratejilerine karar verilmesi gerekmektedir [2]. Özellikle gereksiz veya uygun olmayan bakım uygulamaları nedeniyle tüm bakım bütçesinin yaklaşık üçte birinin harcanması olasılığı söz konusu olduğundan, sistem ya da ekipman bazlı bakım strateji optimizasyonu ekstra önem kazanmaktadır [3].

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı; temiz, diğer enerji kaynaklarına göre çok daha düşük çevresel etkiye sahip olmaları ve en önemlisi ülkelerin destekleyici politikaları sayesinde hızlı bir artış göstermiştir [4],[5]. 2018 yılı ilk yarısı itibarıyla Türkiye enerji kurulu gücü 87.139 MW'a ulaşmış ve kaynaklar arasında yaklaşık 28.000 MW ile % 32'lik paya sahip olan hidroelektrik santraller [6] son bir yıldaki verilere göre ülkedeki elektrik üretiminin yaklaşık %20'sini karşılamakta kullanılmıştır [7].

Bu çalışmanın uygulama alanı olan hidroelektrik santrallerde uygulanan ve uygulanması muhtemel bakım stratejileri arasında tamir, periyodik, kestirimci ve revizyon bakım yer almaktadır. Tamir bakım, makine/ekipmanların beklenen görevleri yerine getiremediği durumda gerçekleştirilen onarım veya bakım faaliyetlerini; periyodik bakım, makine/ekipmanların kesintisiz ve beklenen tasarım spesifikasyonlarında çalışması için bir zaman çizelgesi dahilinde gerçekleştirilen bakım faaliyetlerini; kestirimci bakım, modern ölçüm ve sayısal işaret işleme metodları kullanılarak makine/ekipmanın işletilmesi sürecinde izlenmesi ve ölçüm sonuçlarına göre arıza oluşmadan gerekli tedbirlerin alındığı bakım faaliyetlerini; revizyon bakım ise, makine/ekipmanların uzun zaman dilimlerinde üniteler bazında kapsamlı incelendiği periyodik bakım faaliyetlerini içermektedir [8].

Literatürde bakım strateji seçimi için birçok çalışma gerçekleştirilmiş olmakla birlikte, Ding ve Kamaruddin [9] ile Shafiee [2] gerçekleştirdikleri literatür incelemeleriyle bu çalışmalarını geniş bir perspektifte sunmuşlardır. Ding ve Kamaruddin [9], yaptıkları inceleme ile bakım strateji optimizasyonuna dair çalışmalarını üç grup altında sınıflandırarak kullanılan yöntemlere göre çalışmalarını farklılıklarını sundukları bir literatür araştırmasını literatüre kazandırmışlardır. Shafiee [2] ise, bakım strateji optimizasyonunda çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri ile yapılan çalışmaları farklı bir çerçevede sunarak veri toplama tekniklerinden kullanılan yöntemlere, seçilen kriterlerden uygulama alanlarına dair birçok sınıflandırmaya yer vermiştir. Bu çalışmalar çerçevesinde, bakım strateji optimizasyonu için gerek optimizasyon gerekse ÇKKV yöntemlerinin etkin bir şekilde literatürde kullanıldığı kanıtlanmıştır. Uygulama alanı olarak, petrol rafinerisi [10], elektrik üretim santrali [11],[12], kağıt endüstrisi [13],[14], haddehane [15], sağlık sektörü [16], kimya endüstrisi [17], ulaşım [18] gibi birçok farklı sektör seçilmişken, bu önemli probleme simülasyon [19],[20], yapay zeka teknikleri [21],[22], grafiksel yöntemler [23], kalite fonksiyon dağıtımı [24], tam sayılı programlama [13], karışık tam sayılı programlama [25],[26], hedef programlama [10],[11], doğrusal olmayan programlama [27], AHP [15], ANP

[28], TOPSIS [29], VIKOR [30], ELECTRE [31] gibi analitik yöntemler ile çözümler bulunmuştur.

Bu çalışmalar arasında özellikle hibrid yöntemlerin kullanılması dikkat çekici olmakla birlikte, çalışma etkinliğinde önemli katkılar sağlamıştır. Bertolini ve Bevilacqua [10], AHP ve hedef programlama yönteminden faydalanarak petrol rafinerisindeki santrifüj pompalar için en uygun bakım stratejisini belirlerken, Sankpal ve diğ. [32], tam sayılı programlama ile FMEA yöntemlerini kullanmış, Braglia ve diğ. [9] ise, bir kağıt endüstrisindeki bakım strateji seçimi için FMECA ve tam sayılı programlama yöntemlerinden faydalanmıştır. Emovon ve diğ. [33], Delphi-AHP ve Delphi-AHP-PROMETHEE kombinasyonları ile gemi makine sistemi için bakım stratejisini seçmiştir. Bu çalışmada kullanılan yöntemlerden olan AHP ve TOPSIS kombinasyonu ile Shyith ve diğ. [34] ile Ilangkumaran ve Kumanan [35] tekstil endüstrisinde bakım stratejisini belirlemiş, Ioannis ve Nikitas [36] ise, gemilerdeki bakım stratejisi seçim problemi için bu yöntem kombinasyonunu tercih etmiştir. Özcan ve diğ. [11], bu kombinasyona hedef programlamayı da dahil edip bu problemi ilk kez hidroelektrik santrallerde çözmüş ve literatürde yine ilk defa, optimize edilen stratejiler ile geliştirilen bakım planlarının santral üzerindeki etkisini performans parametreleri üzerinden vererek, literatürde uygulama sonuçlarının verilmemesinden doğan eksikliği tamamlamışlar ve literatürde bu konudaki açığı kapatmışlardır.

Literatürdeki çalışmalarda dikkat çekici bir başka nokta ise, problemin dahil edildiği makine/ekipman sayısı ve bunların farklılık ya da benzerlikleri ile ilgilidir. Çoğu araştırmacı, problemi ya üretim tesisinin küçük bir bölümü ya da az sayıda ekipman türünü ele alarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Örneğin Bertolini ve Bevilacqua [10], petrol rafinerisinde sadece aynı karakteristik özelliklere sahip olan santrifüj pompalar için bir çalışma gerçekleştiren, Kirubakaran ve Ilangkumaran [14], bir kağıt işletmesindeki pompalar için uygulama yapmışlardır. Bunun yanı sıra, Braglia ve diğ. [13] ile Sankpal ve diğ. [32], uygulamayı gerçekleştirdikleri işletmedeki iki ekipman için oluşan arıza türlerini, Panchal ve diğ. [17], gübre üretim tesisinin bir birimi için problemi ele almış, Seiti ve diğ. [15], bir haddehanedeki tek ekipman için bu problemi çözmüştür. Bu kapsamda, bakım strateji seçimi problemi için hem kullanılan yöntemler ve bunların etkinlikleri hem dikkate alınan ekipman sayıları hem problemin uygulama sahası hem de uygulama sonuçları temel alındığında bu çalışma da literatüre katkı sağlar niteliktedir. Çünkü, bu problemin çözümü için her birinin etkinliği literatürde kanıtlanmış AHP-TOPSIS-tam sayılı programlama yöntemlerinden oluşan kombinasyon literatürde ilk kez kullanılmış, problem kapsamı, literatürdeki mevcut çalışmalarda yer aldığı gibi üretim tesisinin küçük bir bölümü ya da az sayıda ekipman türü ile sınırlandırılmak yerine, binlerce ekipmandan oluşan ve tamamı için bakım yapılması oluşacak yüksek seviyeli maliyetler açısından mümkün olmayan bir üretim tesisinde [11], santralin en problemleri ekipman grubu olan elektriksel ekipmanlardan kritiklik seviyesi en yüksek olan 7 ekipman grubu (ayırıcı, kesici, akım trafosu, gerilim trafosu, ana güç trafosu, ikaz trafosu ve generator) için genişletilerek sistemsel bir yaklaşımla izlenmiştir. Ayrıca, literatürdeki çalışmaların uygulama sahaslarından farklı olarak bu çalışma, seçilen yöntem kombinasyonu ile bir hidroelektrik santral için ilk kez gerçekleştirilmiş ve önerilen modelin çözümü neticesinde sonraki bölümlerde açıklandığı üzere elde edilen sonuçların santrale katkısı gerçek hayatta tutarlı bir şekilde kanıtlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan yöntemler, yöntemlerin avantajları temelinde kullanım nedenleri ile sunulmuş, üçüncü bölümde çalışmanın uygulama detaylarına yer verilmiş ve dördüncü bölümde sonuç ve öneriler vurgulanarak çalışma tamamlanmıştır.

## 2 Yöntemler

### 2.1 AHP

Bu çalışmada, kişisel önyargıların azaltılması ve farklı alternatiflerin karşılaştırılmasında yaygın bir şekilde kullanılması ayrıca, doğrusal programlama, kalite fonksiyonu dağıtımı, bulanık mantık vb. diğer analitik yöntemlerle entegrasyon esnekliğine sahip olup etkin sonuçlar sağlaması [37]-[39] ve ağırlıklandırma hesaplamalarındaki uygulama kolaylığı [40] nedeniyle 1330 ekipman için belirlenen kriter ağırlıklarının hesaplanması için AHP yöntemi tercih edilmiştir. Saaty tarafından geliştirilen AHP yöntemi, birçok karar verme probleminde tekil ya da destekleyici yöntem olarak kullanılmakta, popülaritesi her geçen gün dünya genelinde artış göstermekte ve kişilere, karar verme prosesindeki kriter ve alternatifler arasındaki öncelikleri kalitatif ve kantitatif yargıları birlikte ele alarak belirleme imkânı sunmaktadır [41]. Yöntemin uygulama adımları ise şöyledir [42]:

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

Probleme etki eden kriter ve alternatiflerin belirlenerek yukarıdan aşağıya amaç, kriter ve alternatiflerin olduğu hiyerarşik yapının kurulması adımdır.

Adım 2: Kriterler ve her bir kriter için alternatifler arasındaki ikili karşılaştırmaların yapılması

Bu aşamada, Saaty tarafından geliştirilen ve Tablo 1'de verilen 1-9 önem skalası kullanılarak her bir kritere göre alternatiflerin ve kriterlerin kendi içinde karşılaştırıldığı matrislerin oluşturulduğu adımdır.

Tablo 1: Saaty önem skalası.

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

Adım 3: Normalizasyon ve göreceli önem ağırlıklarının hesaplanması

Kullanılan her bir kriterin eşit değerlendirilmesi için normalizasyon işlemi Eş. 1 kullanılarak yapılmakta ve bundan sonra her bir kriterin ağırlığı Eş. 2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

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

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

Adım 4: Tutarlılık oranının (CR) hesaplanması ve kontrolü

(CR) değerinin hesaplanabilmesi için öncelikle ikili karşılaştırma matrisinin en büyük özvektör ( $\lambda_{max}$ ) değeri Eş. 3 ve Eş. 4 kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$[a_{ij}]_{n \times m} * [w_i]_{m \times 1} = [d_i]_{n \times 1} \quad (3)$$

$$\lambda_{max} = \left( \sum_{i=1}^n d_i / w_i \right) / n \quad (4)$$

(CR), tutarlılık indeksinin (CI) rassal indekse (RI –Tablo 2) oranlanması sonucunda (Eş. 6) hesaplanmakta ve tutarlılık indeksinin hesaplanması için Eş. 5 kullanılmaktadır.

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (5)$$

$$CR = CI / RI \quad (6)$$

Tablo 2: RI değerleri.

n	RI
1	0
2	0
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.41
8	1.45
9	1.49
10	1.51
11	1.48
12	1.56
13	0

Eğer  $CR < 0.1$  ise ikili karşılaştırma matrisi tutarlı demektir. Aksi halde, ikili karşılaştırmalar tekrar gözden geçirilmeli ve matris yenilenerek yukarıdaki hesaplamaların tekrar yapılması gerekmektedir.

Adım 5. AHP skorlarının analizi

En yüksek değere sahip alternatif en iyi alternatif olarak seçilmektedir.

### 2.2 TOPSIS

Çalışmada 1330 hidroelektrik santral elektriksel ekipmanın santral açısından kritiklik seviyesini gösteren öncelik sıralamasını gerçekleştirmek için, probleme ait niteliksel bilgileri de tam olarak kullanması, alternatif sıralamasını kolay ve etkin bir şekilde gerçekleştirmesi, literatürde sıklıkla geniş kapsamlı sıralama problemleri için kullanılması [43] ve problemin kompleks yapısının gerçeğe uygun bir şekilde yansıtılabilmesi [44],[45] nedeniyle TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir. TOPSIS, Hwang ve Yoon tarafından geliştirilmiş olup, gerçek hayattaki çok kriterli karar problemlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Yöntem 6 adımdan oluşmaktadır [44].

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

Satırlarda, sıralama yapılacak alternatifler, sütunlarda ise probleme etki eden kriterler yer alacak şekilde oluşturulan  $A_{ij}$  karar verici tarafından oluşturulan başlangıç matrisidir. Karar matrisi aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

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

$A_{ij}$  matrisinde  $m$  alternatif sayısını,  $n$  kriter sayısını göstermektedir.

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

Eş. 7 yardımıyla karar matrisi standart karar matrisine dönüştürülmektedir.

$$r_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2} \quad (7)$$

Adım 3: Ağırlıklı standart karar matrisinin ( $V_{ij}$ ) oluşturulması Kriterlerin değerlendirilebilmesi için öncelikle bu kriterlere ait ağırlık değerleri ( $w_i$ ) belirlenmektedir. Daha sonra her ağırlık değeri standart karar matrisindeki ilgili kriterin değeri ile çarpılarak ağırlıklı standart karar matrisi olan  $V_{ij}$  elde edilmekte ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

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

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

Kriterlerin monoton artan ve monoton azalan eğilim gösterdiği varsayımına göre ağırlıklı standart karar matrisindeki değerlerden Eş. 8 ve Eş. 9 kullanılarak maksimum ve minimum olanları tespit edilmektedir.

$$A^* = \left\{ \left( \max V_{ij} \mid j \in J \right), \left( \min V_{ij} \mid j \in J' \right) \right\} \quad (8)$$

$$A^- = \left\{ \left( \min V_{ij} \mid j \in J \right), \left( \max V_{ij} \mid j \in J' \right) \right\} \quad (9)$$

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

Eş. 10 ve Eş. 11 kullanılarak matristeki her bir karar noktasının kriter değerlerinin ideal ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları hesaplanmaktadır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (10)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (11)$$

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

Eş. 12 yardımıyla ayrım ölçütleri kullanılarak ideal çözüme görelî yakınlık hesaplanmaktadır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (12)$$

$C_i^*$  değeri 0-1 aralığında değer almaktadır. Bu değer 1 değerini alması karar noktasının ideal çözüme, 0 değerini alması ise, negatif ideal çözüme mutlak yakınlığını ifade etmektedir [46].

### 2.3 Tam sayılı programlama

Çalışmada önerilen matematiksel model bir tam sayılı programlama modelidir. Tam sayılı programlama, problem değişkenlerinin bazılarının veya tamamının tam sayılı değerler aldığı programlama türüdür. Gomory tarafından, simpleks algoritmasında kesen düzlemler ile küçük değişiklikler yapılarak tam sayılı sonuçların elde edilebileceği önerilmiş ve

tam sayılı programlama için önemli bir gelişme elde edilmiştir [47]. Bu çalışma sonrasında çeşitli çalışmalarla da tam sayılı programlamanın 0-1 ve karışık tam sayılı programlama gibi farklı çeşitleri de öne çıkmıştır. Tam sayılı programlama modelinin genel formu aşağıda verilmiştir [48]:

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

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

St.

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

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

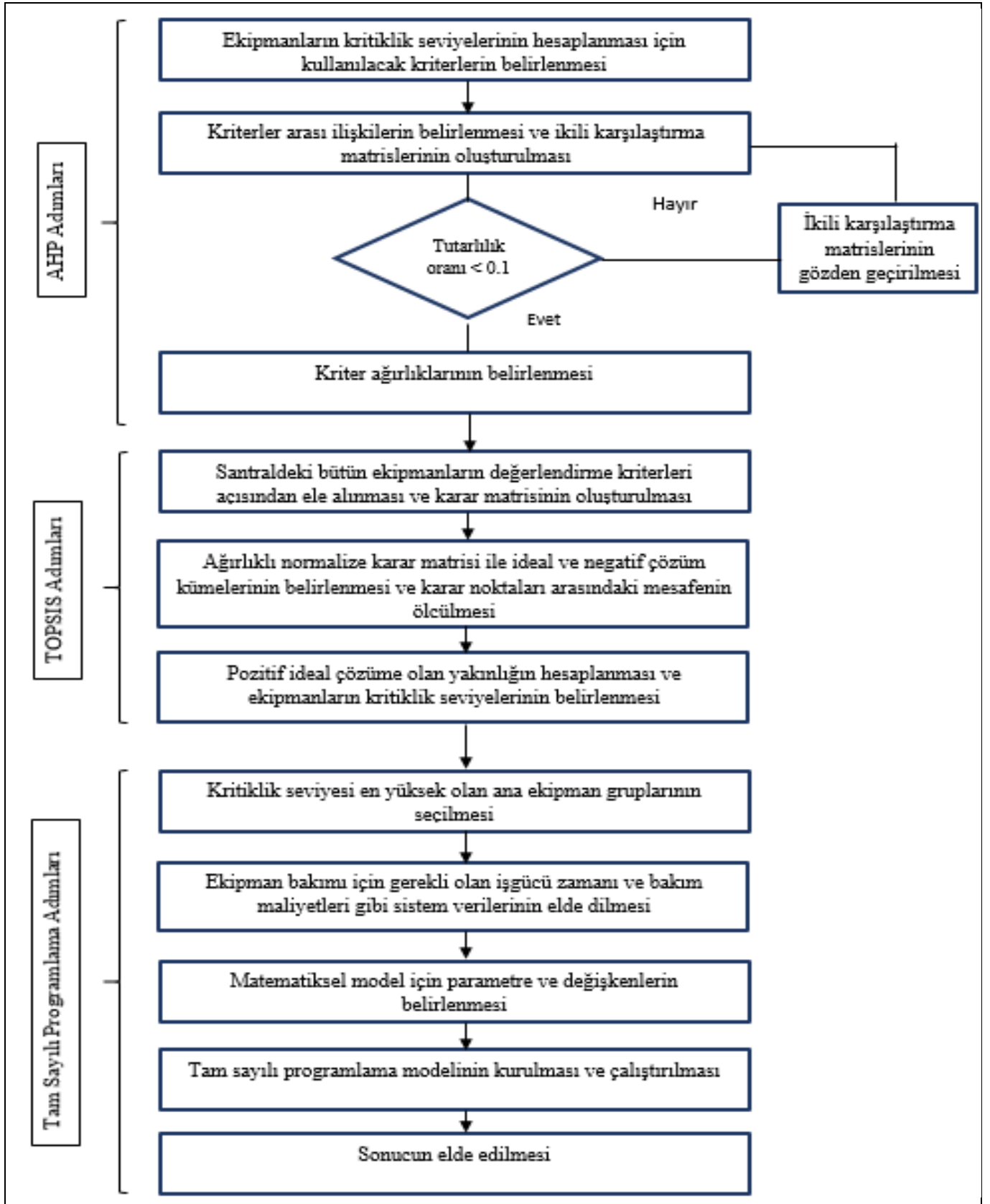
$$x_j = \text{tamsayı} \quad j \in I \subseteq N$$

## 3 Uygulama

Bu çalışmada, Türkiye'de büyük ölçekli bir hidroelektrik santraldaki 1330 elektriksel ekipman arasından santraldaki üretimin sürdürülebilirliğine direkt olarak etki eden en kritik ana ekipman gruplarını belirlemek amacıyla AHP-TOPSIS kombinasyonu kullanılmış ve belirlenen gruplar için önerilen tam sayılı programlama modeli ile bakım strateji optimizasyonu uygulama alanı ve problemin büyüklüğü açısından literatürde ilk kez adı geçen yöntemlerin kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Problem çözümü IBM ILOG CPLEX Optimisation Studio programında Intel® Core™ i3 CPU 2.40 GHz işlemcili bir bilgisayarda 0.68 saniyede gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın uygulama adımları Şekil 1'de verilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, 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 Tablo 3'te yer alan değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Santralda yer alan 1330 elektriksel ekipmanın santral açısından kritiklik seviyesinin belirlenmesi için tespit edilen bu kriterlerin ağırlıkları AHP yöntemi ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur.

Kriter ağırlıkları TOPSIS algoritmasına Şekil 1'deki gibi dahil edilerek 1330 ekipmanın santral açısından kritiklik seviyeleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçların maksimum değer üzerinden normalizasyonu ile 0-1 arasında değişen  $C_i^*$  değerleri "100" değerine ayarlanmıştır. Buna göre, santralda gerçekleştirilmesi edinilmiş temel amaç olan sürdürülebilir enerji arzını sektöre uğratan ekipmanlar 90 puan üzerinde çıkan 7 ekipman olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 5'te yer almaktadır. Kriter ağırlıkları TOPSIS algoritmasına Şekil 1'deki gibi dahil edilerek 1330 ekipmanın santral açısından kritiklik seviyeleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçların maksimum değer üzerinden normalizasyonu ile 0-1 arasında değişen  $C_i^*$  değerleri "100" değerine ayarlanmıştır. Buna göre, santralda gerçekleştirilmesi edinilmiş temel amaç olan sürdürülebilir enerji arzını sektöre uğratan ekipmanlar 90 puan üzerinde çıkan 7 ekipman olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Tablo 5'te yer almaktadır.





Şekil 1: Uygulama adımları.

Tablo 3: Değerlendirme kriterleri.

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

Tablo 4: Kriter ağırlıkları.

Değerlendirme Kriterleri	Ağırlık Değerleri	
C1	Ambar yedeği	0.05
C2	Bakım öncesi koşullar	0.24
C3	Ek iş gerekliliği	0.03
C4	Arıza periyodu	0.07
C5	Olası sonuçlar	0.40
C6	Ölçüm ekipmanlarının mevcudiyeti	0.06
C7	Ekipmanın statik-dinamik-elektriksel özelliği	0.06
C8	Arıza giderme süresi	0.03
C9	Arıza tespit edilebilirlik	0.06

Tablo 5: En kritik elektriksel ekipmanlar ve kritiklik seviyeleri.

Ekipman Adı	Kritiklik Seviyesi
Ayırıcı	100
Generator	100
Ana güç trafosu	91.55
İlkaz trafosu	95.67
Gerilim trafosu	91.55
Kesici	91.55
Akım trafosu	91.55

Çalışmanın son aşamasında 1330 ekipman arasından belirlenen 7 en kritik hidroelektrik santral elektriksel ana ekipman grubunun bakım strateji seçimini gerçekleştirmek için tam sayılı programlama ile modelleme yapılmıştır.

Notasyonlar:

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

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

$T_c$ : Bakım için kullanılabilir bütçe

$T_m$ : Bakım için kullanılabilir zaman

$Cr_i$ :  $i$ . ekipmanın öncelik puanı

$W_j$ :  $j$ . bakım stratejisinin öncelik puanı (Özcan ve diğ. [11] tarafından hesaplanan bakım stratejileri öncelik puanı referans alınmıştır)

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

Karar değişkenleri:

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

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

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

Model formülasyonu:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} * X_{ij} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n D_{ij} * X_{ij} \leq T_m \quad (14)$$

$$X_{i4} - \sum_{f=1}^k Y_{if} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (15)$$

$$\sum_{f=1}^k Y_{if} \leq 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} * X_{ij} \leq T_c \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \geq 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^n Cr_i * W_j * X_{ij} \geq M_i \quad i = 1, \dots, m \quad (19)$$

Önerilen modelde maliyet minimizasyonu ekseninde bir optimizasyon yapılmış ve Eş. 13'te bu fonksiyona yer verilmiştir. Eş. 14-Eş.19 aralığında hidroelektrik santral için mevcut kısıtlar bulunmaktadır. Eş. 14'te ifade edilen ilk kısıt, bakım sürelerinin toplam bakım süresinden az olmasını, Eş. 15 ve Eş. 16'daki diğer iki kısıt, arıza oluşumunda tamir bakımın yapılmasını, Eş. 17 uygulanan bakım maliyetlerinin bakım için ayrılan bütçeyi aşmamasını, Eş. 18 seçilecek bakım

stratejilerinden en az birisinin uygulanması gerektiğini yansıtan kısıtlardır. Eş. 19 ise, çalışmada TOPSIS yöntemi ile kritik ana ekipman grupları için hesaplanan öncelik değeri ile referans alınan bakım stratejisi öncelik değerlerinin [11] kullanılarak bir ekipman grubuna seçilen bakım stratejilerinin uygulanması durumunda oluşacak toplam öncelik puanını yansıtmaktadır. Bu kısıttaki amaç, uygun ekipmana uygun bakım stratejisinin uygulanması ile elde edilecek katkıyı hesaplanan öncelik değerleri üzerinden yansıtmaktır. Modelin çözümü neticesinde 7 kritik elektriksel ekipman grubu için optimum bakım stratejisi kombinasyonu Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6: Ekipman bazlı optimum strateji kombinasyonları.

Ekipman Adı	Periyodik Bakım	Kestirimci Bakım	Revizyon Bakım	Tamir Bakım
Ayırıcı	+	+	+	
Kesici	+	+	+	+
Akım	+	+	+	+
Trafosu				
Gerilim	+	+	+	+
Trafosu				
Ana güç	+	+	+	+
Trafosu				
İkaz	+	+	+	
Trafosu				
Generator	+	+	+	

Tablo 6'da yer alan sonuçlar incelendiğinde, gerçek hayattaki hidroelektrik santral işletme kuralları ile tutarlılık gözle çarpılmaktadır. Çünkü, burada dikkate alınan ekipmanlar santral açısından en kritik ekipmanlardır ve bu ekipmanların arızalanması santralin uzun süreli duruşuna neden olmaktadır. Sadece bu gerekçe dahi, bu ekipmanlara periyodik bakımların yapılmasını ve sensörlerle ekipmanların temel işletme parametrelerinin izlenerek tolerans dışı çalışmasına, başka bir ifade ile arızalanmasına mahal vermeden müdahale edilmesini gerektirmektedir. Bu şart ise, kestirimci bakımı tanımlamaktadır. Revizyon bakım ise, daha önce de belirtildiği üzere geniş kapsamlı periyodik bakımlardır ve bu ekipmanların tamamında belirli bir periyot (2 yıl gibi) ya da çalışma saati (8000 saat gibi) neticesinde gerekli değişim ve yenilemelerin yapılmasını santralin üreticisi tarafından zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle kestirimci, periyodik ve revizyon bakım stratejilerinde elde edilen sonuçlar bu kritik ekipmanlarda bu bakım kombinasyonunun gerçekleştirilmesi gerektiği sonucunu yansıtmaktadır. Tamir bakım, tüm diğer bakım faaliyetlerinden gerekli olanların yapılarak kaçınılmak istenilen bir durumdur. Ancak bu santralda, kesici, akım ve gerilim trafoları diğer tüm stratejilerin uygulanmasına rağmen yüksek gerilim, sıcaklık, aşırı akım ve basınç gibi zorlayıcı şartlar nedeniyle arızalanabilmektedir. Bu durum da, bu kritik üç ekipman için yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı tamir bakım stratejisinin de ekipman bakım kombinasyonunda yer almasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu değerlendirmeler ise önerilen modelin tamamıyla tutarlı sonuçlar ürettiğini kanıtlamaktadır.

#### 4 Sonuç

Yapılan çalışmada, Türkiye enerji talebinin son bir yıl içerisinde yaklaşık %20'sini karşılayan hidroelektrik santrallardan büyük ölçekli bir tanesinde gerçek veriler kullanılarak elektriksel kritik ekipman grupları için bakım strateji seçim problemi ele alınmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, santralda uzun süredir görev yapan uzmanlar ile 9 değerlendirme kriteri belirlenmiş ve AHP-TOPSIS kombinasyonu ile 1330 ekipman kritiklik

seviyelerine göre sıralanarak santral için kritiklik seviyesi en yüksek olan ana ekipman grupları tespit edilmiştir. Belirlenen ana ekipman grupları için tamir, periyodik, kestirimci ve revizyon bakım olmak üzere dört bakım stratejisi arasından en uygun kombinasyon, önerilen tam sayılı programlama modeli ile elde edilmiştir. Bakım planlama probleminin ilk aşamasını oluşturan bakım stratejilerinin santral işletme kuralları temelinde optimize edilmesini amaçlayan bu çalışma ile santral bünyesinde bulunan en kritik elektriksel ekipmanlar (7 adet) için süre ve işçilik kısıtları dahilinde maliyet minimizasyonu sağlanarak en uygun stratejiler her bir ekipmana atanmıştır. Hem tam sayılı programlamanın kullanıldığı bir yöntem kombinasyonunun olması hem de uygulama sahası olarak enerji alanında ve hidroelektrik santrallarda yapılması yönü ile literatürdeki diğer çalışmalardan farklılık arz eden bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre planlanan bakım sonuçları 2 yıl süre ile izlenmiş olup, santralda söz konusu ekipmanlardan kaynaklı duruşlarda %80 oranında bir azalma olmuştur. Bu parametre, santral açısından en kritik performans göstergesi olan emre amadelik oranının artırılmasına direkt olarak etki etmekte ve bu oranı mümkün olan en yüksek seviyeye çıkararak, kesintisiz, düşük maliyetli, verimli ve çevreye duyarlı elektrik üretimi amaçlarını sağlamak hususunda başrolü uygun işletme kurallarına göre santralin işletilmesi ile paylaşmaktadır. Bununla birlikte, bu iyileşme oranının özellikle üretim duruşlarından kaynaklanan yüksek maliyetlerin azaltılmasına olan katkısı da yadsınamaz. Çünkü, milyonlarca kWh enerjinin santraldaki ekipmanların elektrik üretimini durdurması neticesinde üretilmemesinden kaynaklanan duruş maliyetleri, arızanın giderilmesi için harcanan tutardan çok büyüktür. Bu çalışmanın gerçekleştirdiği santralin kurulu gücü yaklaşık 270 MW olup, 2018 Türkiye Ortalama Elektrik Toptan Fiyatı 17.1 krş/kWh'dir [49]. Buna göre duruşlardaki %80'lik iyileşmenin bu ölçekteki bir santralda üretim duruş maliyetine katkısı, duruşun engellendiği her saat için yaklaşık olarak 4.1 milyon TL gibi büyük bir değerdir.

Gerçekleştirilen çalışmanın dışında bu problemdeki modele çok amaçlı bir yapının kazandırılması ve santral bünyesindeki tüm ekipmanlar için bu seçimin yapıldığı model önerilerinin oluşturulması ile literatüre üst seviyede katkı sağlanabileceği düşünülmektedir.

#### 5 Teşekkür

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2018/008 No.lu bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

#### 6 Kaynaklar

- [1] Bevilacqua M, Braglia M. "The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection". *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1), 71-83, 2000.
- [2] Shafiee, M. "Maintenance strategy selection problem: an MCDM overview". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21(4), 378-402, 2015.
- [3] Mobley RK. *An Introduction to Predictive Maintenance*. Butterworth-Heinemann, 2002.
- [4] Yıldız C, Şekkel M. "Türkiye gün öncesi elektrik piyasasında rüzgar enerjisi ve pompaj depolamalı hidroelektrik santral için optimum teklif oluşturulması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(5), 361-366, 2016.

- [5] Uyan M. "Güneş enerjisi santrali kurulabilecek alanların AHP yöntemi kullanılarak CBS destekli haritalanması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 343-351, 2017.
- [6] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik> (13.11.2018).
- [7] Enerji Atlası. <http://www.enerjiatlası.com/elektrik-uretimi/> (13.11.2018).
- [8] Özcan EC. *Bakım Yönetim Sistemi: Kurulum ve İşletme Esasları*. Ankara, Türkiye, Elektrik Üretim AŞ. Yayınları, 2016.
- [9] Ding SH, Kamaruddin S. "Maintenance policy optimization-literature review and directions". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5-8), 1263-1283, 2015.
- [10] Bertolini M, Bevilacqua M. "A combined goal programming-AHP approach to maintenance selection problem". *Reliability Engineering & System Safety*, 91(7), 839-848, 2006.
- [11] Özcan EC, 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.
- [12] Nguyen TAT, Chou SY. "Maintenance strategy selection for improving cost-effectiveness of offshore wind systems". *Energy Conversion and Management*, 157, 86-95, 2018.
- [13] Braglia M, Castellano D, Frosolini M. "An integer linear programming approach to maintenance strategies selection". *International Journal of Quality & Reliability Management*, 30(9), 991-1016, 2013.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Carnero MC, Gómez A. "Maintenance strategy selection in electric power distribution systems". *Energy*, 129, 255-272, 2017.
- [17] Panchal D, Chatterjee P, Shukla RK, Choudhury T, Tamosaitiene J. "Integrated fuzzy AHP-CODAS framework for maintenance decision in urea fertilizer industry". *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 51(3), 179-196, 2017.
- [18] Nazeri A, Naderikia R. "A new fuzzy approach to identify the critical risk factors in maintenance management." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9-12), 3749-3783, 2017.
- [19] George-Williams H, Patelli E. "Maintenance strategy optimization for complex power systems susceptible to maintenance delays and operational dynamics". *IEEE Transactions on Reliability*, 66(4), 1309-1330, 2017.
- [20] Krishnasamy L, Khan F, Haddara M. "Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18(2), 69-81, 2005.
- [21] Shagluf A, Parkinson S, Longstaff AP, Fletcher S. "Adaptive decision support for suggesting a machine tool maintenance strategy: from reactive to preventative". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 24(3), 376-399, 2018.
- [22] Heo JH, Park GP, Yoon YT, Park JK, Lee SS. "Optimal maintenance strategies for transmission systems using the genetic algorithm". *Transmission and Distribution Conference Proceedings*, New Orleans, USA, 19-22 April 2010.
- [23] Labib AW. "A decision analysis model for maintenance policy selection using a CMMS". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 10(3), 191-202, 2004.
- [24] Baidya R, Dey PK, Ghosh SK, Petridis K. "Strategic maintenance technique selection using combined quality function deployment, the analytic hierarchy process and the benefit of doubt approach". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1-4), 31-44, 2018.
- [25] Dedopoulos IT, Shah N. "Preventive maintenance policy optimization for multipurpose plant equipment". *Computers & Chemical Engineering*, 19, 693-698, 1995.
- [26] Goel HD, Grievink J, Weijnen MP. "Integrated optimal reliable design, production, and maintenance planning for multipurpose process plants". *Computers & Chemical Engineering*, 27(11), 1543-1555, 2003.
- [27] Löfsten H. "Management of industrial maintenance-economic evaluation of maintenance policies". *International Journal of Operations & Production Management*, 19(7), 716-737, 1999.
- [28] Shahin A, Pourjavad E, Shirouyehzad H. "Selecting optimum maintenance strategy by analytic network process with a case study in the mining industry". *International Journal of Productivity and Quality Management*, 10(4), 464-483, 2012.
- [29] 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.
- [30] Vahdani B, Hadipour H, Sadaghiani JS, Amiri M. "Extension of VIKOR method based on interval-valued fuzzy sets". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(9-12), 1231-1239, 2010.
- [31] Thor J, Ding SH, Kamaruddin S. "Comparison of multi criteria decision making methods from the maintenance alternative selection perspective". *The International Journal of Engineering and Science*, 2(6), 27-34, 2013.
- [32] Sankpal P, Andrew A, Kumanan S. "Maintenance strategies selection using fuzzy FMEA and integer programming". *In Proceedings of the International Conference on Advances in Production and Industrial Engineering*, 503-509, 23-24 January 2015.
- [33] Emovon I, Norman RA, Murphy AJ. "Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 519-531, 2018.
- [34] Shyji K, Ilangkumaran M, Kumanan S. "Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry". *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(4), 375-386, 2008.



- [35] Ilangkumaran M, Kumanan S. "Selection of maintenance policy for textile industry using hybrid multi-criteria decision making approach". *Journal of Manufacturing Technology Management*, 20(7), 1009-1022, 2009.
- [36] Ioannis D, Nikitas N. "Application of Analytic Hierarchy Process & TOPSIS methodology on ships' maintenance strategies". In *Journal of Polish Safety and Reliability Association, Summer Safety and Reliability Seminars*, 4(1), 21-28, 2013.
- [37] Wang JJ, Jing YY, Zhang CF, Zhao JH. "Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2263-2278, 2009.
- [38] Kubler S, Robert J, Derigent W, Voisin A, Le Traon Y. "A state-of-the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications". *Expert Systems with Applications*, 65, 398-422, 2016.
- [39] Vaidya OS, Kumar S. "Analytic hierarchy process: An overview of applications". *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1-29, 2006.
- [40] Kumar A, Sah B, Singh AR, Deng Y, He X, Kumar P, Bansal RC. "A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596-609, 2017.
- [41] Velasquez M, Hester PT. "An analysis of multi-criteria decision making methods". *International Journal of Operation Research*, 10(2), 56-66, 2013.
- [42] Saaty T. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. USA, McGraw-Hill, 1980.
- [43] Behzadian M, Otaghsara SK, Yazdani M, Ignatius J. "A state-of-the-art survey of TOPSIS applications". *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051-13069, 2012.
- [44] Hwang CL, Yoon K. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlin, Springer-Verlag, 1981.
- [45] Zyoud SH, Fuchs-Hanusch D. "A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques". *Expert Systems with Applications*, 78, 158-181, 2017.
- [46] Arıbaş M, Özcan U. "Akademik araştırma projelerinin AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak değerlendirilmesi". *Politeknik Dergisi*, 19(2), 163-173, 2016.
- [47] Jünger M, Liebling TM, Naddef D, Nemhauser GL, Pulleyblank WR, Reinelt G, Wolsey LA. *50 Years of Integer Programming 1958-2008: From the Early Years to the State-of-the-Art*. Berlin, Springer Science & Business Media, 2009.
- [48] Taha HA. *Integer Programming: Theory, Applications and Computations*. USA, Academic Press, 2014.
- [49] Yatırımlar Dergisi. [http://www.yatirimlar.com/haber-2018\\_Yilinda\\_Turkiye\\_Ortalama\\_Elektrik\\_Toptan\\_Satis\\_Fiyati\\_171\\_KrskWh\\_olarak\\_belirlendi-241241.htm](http://www.yatirimlar.com/haber-2018_Yilinda_Turkiye_Ortalama_Elektrik_Toptan_Satis_Fiyati_171_KrskWh_olarak_belirlendi-241241.htm) (13.11.2018).