



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Hidroelektrik santrallarda bakım strateji seçimi için hiyerarşik karar modeli önerisi

A hierarchical decision model proposal for maintenance strategy selection in the hydroelectric power plants

Yazar(lar) (Author(s)): Emre YAZICI¹, Evrencan ÖZCAN², Hacı Mehmet ALAKAŞ³, Tamer EREN⁴

*ORCID*¹: 0000-0002-3661-2119

*ORCID*²: 0000-0002-3662-6190

*ORCID*³: 0000-0002-9874-7588

*ORCID*⁴: 0000-0001-5282-3138

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Yazıcı E., Özcan E., Alakaş H.M. ve Eren T., “Hidroelektrik santrallarda bakım strateji seçimi için hiyerarşik karar modeli önerisi”, *Politeknik Dergisi*, 25(3): 933-945, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.862024

Hidroelektrik Santrallarda Bakım Strateji Seçimi için Hiyerarşik Karar Modeli Önerisi

A Hierarchical Decision Proposal for Maintenance Strategy Selection in the Hydroelectric Power Plants

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bu çalışmada bakım strateji seçimi probleminin çözümü için hiyerarşik bir yapı kurularak iki aşamada problem çözülmüştür. / In this study, a hierarchical structure was established for the solution of the maintenance strategy selection problem and the problem was solved in two stages.
- ❖ Bakım strateji seçiminde kriter ağırlıkları pisagor bulanık analitik hiyerarşi yöntemi ile elde edilmiştir. / Criteria weights in maintenance strategy selection were obtained by using pythagorean fuzzy analytical hierarchy method.
- ❖ Ekipmanların sıralanmasında TOPSIS yöntemi kullanılmış ve kritik ekipman için bakım stratejileri belirlenmiştir. / TOPSIS method was used for ranking the equipment and maintenance strategies were determined for the most critical equipment.

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. Bakım stratejisi seçimi adımları / Figure. Maintenance strategy selection steps

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, hidroelektrik santrallarda en kritik elektriksel ekipman için en uygun bakım stratejisinin seçimi amaçlanmıştır. / Selection of the most appropriate maintenance strategy for the most critical electrical equipment in the hydroelectric power plants was aimed.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kriterlerin ağırlıkları Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (PBAHP) ile hesaplanmıştır. Alternatiflerin sıralanmasında problemin yapısına uygunluğundan dolayı TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. / The weights of the criteria were calculated by the Pythagorean Fuzzy Analytical Hierarchy Process (PFAHP). TOPSIS was used for ranking the alternatives due to its suitability to the structure of the problem.

Özgünlük (Originality)

Bakım strateji seçim problemi için PBAHP - TOPSIS entegrasyonu literatürde ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. / The integration of PFAHP - TOPSIS for maintenance strategy selection problem was used for the first time in the literature in this study.

Bulgular (Findings)

Çalışma sonucuna göre en kritik elektriksel ekipman için revizyon bakım stratejisi en uygun bakım stratejisi olarak seçilmiştir. / According to the results of the study, the revision maintenance strategy for the most critical electrical equipment was chosen as the most appropriate maintenance strategy.

Sonuç (Conclusion)

Santral bakım ve işletme kuralları açısından tutarlı bir sonuç elde edilmiştir. / A consistent result has been achieved in terms of power plant maintenance and operation rules.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Hidroelektrik Santrallarda Bakım Strateji Seçimi için Hiyerarşik Karar Modeli Önerisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Emre YAZICI, Evrencan ÖZCAN*, Hacı Mehmet ALAKAŞ, Tamer EREN

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.01.2021 ; Kabul/Accepted : 20.02.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 07.03.2021)

ÖZ

Günümüzde enerji talebi her geçen gün artmaktadır. Enerji arzını sağlayan tesisler artan bu talebe kesintisiz bir şekilde cevap verecek politikalar ve uygulamalar geliştirmektedirler. Enerjide sürekliliği sağlamakta etkili olan unsurlardan biri de enerjinin üretildiği santrallerin bakım stratejilerini arzi kesintiye uğratmayacak şekilde belirlemektir. Bu çalışmada, bir hidroelektrik santralde en kritik elektriksel ekipmanın bulunması ve bu ekipman için bakım stratejisinin seçimi amaçlanmıştır. Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak en kritik elektriksel ekipman belirlenmiştir. Ekipmanların sıralanmasında kullanılan kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinde Pisagor Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (PBAHP) kullanılmıştır. Alternatiflerin sıralanmasında ise, PBAHP yöntemi ile TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi entegre edilmiştir. En kritik elektriksel ekipman olarak belirlenen generatör ekipmanı için en uygun bakım stratejisi revizyon bakım olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bakım strateji seçimi, pisagor bulanık AHP, TOPSIS, hidroelektrik santral.

A Hierarchical Decision Model Proposal for Maintenance Strategy Selection in the Hydroelectric Power Plants

ABSTRACT

Today, the energy demand is increasing day by day. Facilities that provide energy supply develop policies and practices that will continuously respond to this increasing demand. One of the factors that are effective in ensuring continuity in energy is to determine the maintenance strategies of the power plants where energy is produced in a way that does not interrupt the supply. In this study, it is aimed to find the most critical electrical equipment in a hydroelectric power plant and to choose the maintenance strategy for this equipment. This study consists of two stages. First, the most critical electrical equipment was identified. The Pythagorean Fuzzy Analytical Hierarchy Process (PFAHP) was used to determine the weights of the criteria used for ranking the equipment. For ranking the alternatives, the PBAHP method and the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) method were integrated. The most appropriate maintenance strategy for generator equipment, which is determined as the most critical electrical equipment, has been determined as revision maintenance.

Keywords: Maintenance strategy selection, pythagorean fuzzy AHP, TOPSIS, hydroelectric power plant.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerjide bağımsızlık ülkeler arasında ekonomik ve rekabetçi gücün bir unsurudur. Enerji bağımsızlığı elde etmekte ve enerji açısından rekabetçi bir güce sahip olmakta yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi oldukça büyüktür [1,2]. Yenilenebilir enerji rüzgar, güneş, jeotermal ve biokütle gibi doğal kaynaklardan elde edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir paya sahip olan bir diğer kaynak ise hidrolik enerji kaynağıdır. Hidrolik enerji, akan suyun gücünden faydalanarak ortaya çıkan enerjidir. Bu enerji fiziksel yapılar sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve bu dönüşümü sağlayan yapılar ise hidroelektrik santral olarak adlandırılmaktadır. Hidroelektrik santraller elektrik enerjisi üretimi açısından önemli bir paya sahiptir. Türkiye’de hidroelektrik santrallerin toplam kurulu gücü 30.534 MW’dır. Hidroelektrik santraller

kullanılarak 2019 yılında 88.850.170.000 kWh elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir [3]. Kasım 2020 itibarıyla hidroelektrik santrallerden elde edilen elektrik, elektrik kurulu gücünün %32,2’sini oluşturmaktadır [4]. Türkiye’de geçtiğimiz yıllar içerisinde enerji talebinde artış ise yaklaşık olarak %6’dır. Artan bu talebin önemli bir kısmı mevcut kurulu gücü ile hidroelektrik santraller aracılığıyla karşılanmaktadır [5]. Hidroelektrik santraller sahip olduğu elektrik üretim kapasitesi nedeniyle enerjide arz güvenliğini sağlamak ve talebin kesintisiz bir şekilde karşılanması için enerji üretiminin sürdürülebilirliğinde önem arz etmektedirler.

Enerjide sürdürülebilirlik, minimum maliyet ile ve çevresel ve toplumsal etkileri dikkate alarak talep edilen enerjinin sürekli olarak arzına imkan tanıyan politika, teknoloji ve uygulamalar olarak tanımlanabilir [1]. Bu bağlamda enerji üretiminde büyük bir paya sahip olan hidroelektrik santrallerde sürdürülebilirliği sağlamak için santrallerin kesintisiz çalışması sağlanmalıdır. Santrallerin çalışmasında etkili olan faktörlerden birisi olan bakım

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta: evrencan.ozcan@kku.edu.tr

faaliyetleri santralin çalışma amacına, bakım ve santral işletme kurallarına uygun olarak gerçekleştirilmelidir. Bakım faaliyetlerinin santralin amacına uygun olarak gerçekleştirilmesi için ise bakım faaliyetlerinin ilk aşaması olan bakım stratejisinin doğru seçilmesi önem arz etmektedir. Ekipmanlar için uygun bakım stratejisinin seçimi, hidroelektrik santrallarda bakıma ayrılan zaman ve arıza halinde muhtemel duruş sürelerinin azaltacaktır. Buna ek olarak bakım ve arıza için ihtiyaç duyulan finansal ve işgücü kaynakları azaltılarak sistemin işletiminde karlılıklar sağlanacaktır [6].

Bu bağlamda elektrik enerjisi üretimi açısından önemli bir paya sahip bir hidroelektrik santrallarda kritik elektriksel ekipmanın belirlenmesi ve bakım stratejisinin seçim problemi ele alınmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde hidroelektrik santrallar ve bu santrallarda bakım stratejisi seçiminin önemine ilişkin bilgilerin sunulmasının ardından çalışmanın ikinci bölümünde literatürde bakım strateji seçimine yönelik gerçekleştirilmiş olan çalışmalar özetlenerek bu çalışmanın farkı ve literatüre katkıları ifade edilmiştir. Üçüncü bölümde çalışmada ele alınan problemin çözümü için kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise yapılan uygulama ve sonuçları yer almaktadır. Beşinci bölümde ise çalışmanın sonuçları ve değerlendirmeler verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE RESEARCH)

Bakım strateji seçimine ilişkin literatürde yer alan çalışmaların enerji, imalat ve ulaşım gibi sektörlerde çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri ve matematiksel modeller kullanılarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Bakım strateji seçimine ilişkin enerji sektörüne ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bevilacqua ve Braglia [7], İtalyan yağ rafinesinde entegre gaz çevrim santralında hava kompresörü ve iki ayrı santrifüj pompası olmak üzere 3 farklı makine grubu için analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi ile bakım strateji seçimini gerçekleştirmiştir. Wang vd. [8] pompa, fan, kazan ve diğer ekipmanları kapsayan toplamda 70'den fazla ekipmanın bulunduğu bir termik santralde, güvenlik, maliyet, katma değer ve fizibilite kriterlerini dikkate alarak bulanık AHP yöntemi ile bakım stratejilerini belirlemiştir. Borjalilu ve Ghambari [9], enerji depolama ünitesinde bulanık analitik ağ süreci (BAAS) yöntemi ile bakım stratejilerini seçmişlerdir. Özcan vd. [1] hidroelektrik santrallarda elektriksel ekipman grubu için ÇKKV yöntemlerini hedef programlama yöntemini entegre kullanarak bakım stratejisi seçimini yapmışlardır. Yumuşak vd. [10], hidroelektrik santrallerde elektriksel ekipman grubu için bakım strateji seçim problemini ÇKKV ve tam sayılı programlama yöntemleri ile çözmüşlerdir. Mathews vd. [11], kömür yakıtlı enerji santrali kondansatörü için maliyet tabanlı bakım planlama problemini simülasyon yöntemi ile çözerek maliyetlerde iyileşme sağlamışlardır. Panchal ve

Kumar [12], bulanık AHP-TOPSIS entegrasyonu ile termik santrallarda enerji üretim ünitesi için bakım strateji seçim problemini incelemiştir. Carnero ve Gomez [13], elektrik enerjisi dağıtım sistemleri için bakım strateji seçim problemini inceleyerek markov zinciri ve kategorik temelli değerlendirme yöntemlerini entegre ederek problemin çözmüşlerdir.

Enerji sektörü dışında, Fouladgar vd. [14], bakır madenlerinde çalışan damperli kamyonlar, Sadeghi ve Manesh [15], İran'da bir çelik fabrikasında, Görener [16], aspiratör ve davlumbaz imalatında faaliyet gösteren bir imalat tesisi için, Nezami ve Yıldırım [17] otomotiv sektöründe, Houria vd. [18], medikal ekipmanlar için, Kirubakaran ve Ilangkumaran [19], kağıt imalatı sektöründe, Vishnu ve Regikumar [20], kimyasal ürün üretimi yapan tesiste 10 farklı makine grubu için bakım strateji seçimini incelemiştir.

Shafie [21] ve Ding ve Kamaruddin [22], bakım strateji seçimine ilişkin çalışmaları ele alan araştırmalarını literatüre kazandırmışlardır. Shafie [21], literatürde yer alan 80 çalışmayı inceleyerek çalışmaları altı sınıfa ayırarak sunmuştur. Ding ve Kamaruddin [22], ise bakım strateji seçimini belirlilik, risk ve belirsizlik olmak üzere üç farklı grupta sınıflandırarak vermişlerdir.

Literatürde problemin çözümü için bulanık yöntemler kullananlar da yer almaktadır. Bulanık çalışmalarda genel olarak üçgen ve yamuk bulanık sayılar kullanılmıştır. Asuquo vd. [23] ve Ighravwe ve Oke [24] bakım strateji seçiminde problemin çözümü için yamuk bulanık sayıları kullanarak interaktif bir çözüm geliştirmiştir.

Fouladgar vd.[14] ve Sadeghi ve Manesh [15] üçgensel bulanık sayılar kullanarak bulanık AHP yöntemi ile kriter ağırlıklarını hesaplamıştır. Görener [16] ise üçgen bulanık sayılar ile bulanık TOPSIS yöntemi, Nezami ve Yıldırım [17] bulanık VIKOR yöntemi ile çözüm önerisinde bulunmuştur. Houria [18], üçgen bulanık sayıları dikkate alarak bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yöntemlerini entegre edip probleme çözüm önerisi sunmuştur. Kirubakaran ve Ilangkumaran [19] üçgen bulanık sayılar ile bulanık AHP ve gri ilişkiler analizi (GİA)-TOPSIS entegrasyonu ile üçlü bir yöntem kombinasyon oluşturarak çözüm önerisinde bulunmuştur. Ayrıca literatürde farklı sektörlerde ve amaçlardaki problemlerin çözümü için AHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmaktadır. Şenol vd.[25] PBAHP ile lojistik sektöründe faktör ağırlıklarını hesaplamıştır. Ersoy [26], mermer blokların yapılarına göre sınıflandırılması için AHP ve TOPSIS yöntemi, Alakaş [27] AHP ve TOPSIS yöntemleri ile sağlık sektöründe tedarikçi seçimi, Hamurcu [28], ulaşım sektöründe araç seçimi için, Alagöz vd. [29] TOPSIS yöntemi ile bakım faaliyetlerinin önceliklendirilmesini gerçekleştirmiştir.

Literatürde yer alan ve bakım strateji seçimine ilişkin incelenen çalışmalar Çizelge 1'de yöntem ve sektör bazında verilmiştir.

Çizelge 1. Literatür araştırması (Literature research)

Yazar (Yıl)	Yöntemler									Bulanık Sayılar			Sektör		
	AHP	ANP	TOPSIS	PROMETHEE	VIKOR	COPRAS	TP	HP	Diğer	Üçgen Bulanık Sayı	Yamuk Bulanık Sayı	Petrol, Gaz Rafineri	Enerji	İmalat	Diğer
Bevilacqua ve Braglia [7]	✓											✓			
Wang vd. [8]	✓									✓					
Mousavi vd. [53]			✓						✓	✓					✓
Bashiri vd. [54]									✓		✓				✓
Fouladgar vd. [14]	✓					✓				✓					✓
Sadeghi ve Manesh [15]		✓								✓				✓	
Görener [16]			✓							✓				✓	
Nezami ve Yıldırım [17]					✓					✓				✓	
Houria vd. [18]										✓					
Shafiee [21]															✓
Ding ve Kamaruddin [22]															✓
Kirubakaran ve Ilangkumaran [19]	✓		✓						✓	✓				✓	
Vishnu ve Regikumar [20]	✓											✓			
Özcan vd. [1]	✓		✓										✓		
Borjalilu ve Ghambari [9]		✓								✓			✓		
Yumuşak vd. [10]	✓		✓						✓				✓		
Asuquo vd. [23]			✓								✓				✓
Ighravwe ve Oke [24]	✓								✓		✓			✓	
Mathew vd. [55]	✓		✓						✓	✓					
Özcan vd. [5]	✓		✓	✓									✓		
Özcan vd. [6]								✓					✓		
Mathews vd. [11]									✓				✓		
Panchal ve Kumar [12]	✓		✓							✓			✓		
Canero ve Gomez [13]									✓				✓		

Çizelge 1’de özetlenen çalışmalarda kullanılan yöntemlerden TOPSIS, COPRAS, PROMETHEE ve VIKOR yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemlerden TOPSIS yönteminin diğer ÇKKV yöntemlerine göre daha fazla kullanıldığı görülmektedir. COPRAS yönteminde kriterlerin fayda ve zarar/maliyet şeklinde sınıflandırmaya tabi tutulması her kriter açısından mümkün olmayabilir. TOPSIS yönteminde ise alternatiflerin seçiminde karar verici açısından en iyi alternatife yaklaşırken en kötü alternatiften uzaklaşması yöntemin en önemli avantajıdır. Öte yandan PROMETHEE yöntemin literatürde az sayıda çalışmada kullanılan bir yöntem olduğunu görülmektedir. PROMETHEE yönteminin kriterleri değerlendirmede kullanmış olduğu tercih fonksiyonu yönteme bir avantaj katarken, bazı tercih fonksiyonlarında kullanılan eşik değerlerinin belirlenmesi karar verici için zor bir süreç olabilir. ÇKKV yöntemleri tek bir ekipmana yönelik olarak en uygun alternatifin seçiminde uygulanmaktadır. Birden fazla ekipman için bakım stratejilerinin seçimini gerçekleştirildiği çalışmalarda kullanılan tam sayılı programlama ve hedef programlama yöntemlerinde hedef programlama ile problemin çözümüne daha esnek bir yapı kazandırıldığı görülmektedir.

Literatürde yer alan çalışmalar değerlendirildiğinde bu çalışmanın literatüre katkıları aşağıda sıralanmaktadır.

- Bakım strateji seçimine yönelik literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada kriter ağırlıklarının hesaplanmasında pisagor bulanık sayılar kullanılmıştır. Hiyerarşik bir yapı oluşturularak, bakım yapılacak ekipmanlar sıralaması pisagor bulanık AHP ve TOPSIS yöntemi entegrasyonu ile elde edilmiştir. Bu yönüyle literatürde ilk defa bakım strateji seçimi için Pisagor Bulanık AHP ve TOPSIS yöntemi entegre kullanılmıştır.
- Çalışmada hidroelektrik santrallardan elde edilen gerçek veriler ile bir uygulama yapılmıştır. Uygulamada hidroelektrik santrallarda yer alan 563 ekipman PBAHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılarak bulunmuştur. Ekipmanların kritiklik seviyeleri hesaplanarak en kritik ekipmanın bakım stratejisinin belirlenmesinde de bu iki yöntemden faydalanılmıştır.
- Elde edilen sonuçlar hidroelektrik santral bakım ve işletme kuralları açısından tutarlı olduğu teyit edilmiştir ve uzman görüşü neticesinde uygulanabilir olduğu görülmüştür.

3. YÖNTEMLER (METHODS)

Karar durumunu etkileyen kriterlerin ve birden fazla alternatifin olması halinde karar verici bireyler için analitik bir değerlendirme imkanı sunan çok kriterli karar verme yöntemleri çalışmada ele alınan problemin çözümünde kullanılmıştır. Hidroelektrik santraller organizasyonel açıdan karmaşık bir yapıya sahiptir. Santralde çok fazla sayıda ekipman bulunmaktadır. Ekipmanların değerlendirilmesinde uzmanların kesin veya sayısal değerlere ilişkin bilgilerin elde edilmesi zordur. Ayrıca operasyonel hedeflerin önceliklendirilmesi, belirsizlikler ve çelişkili kriterler içermektedir. Bu nedenle, bu ve benzer karar problemlerinde nicel verilerle ilişkili olası iyileştirmeler ve nitel verilerle ilişkili belirsizlikler karar verme sürecine dahil edilmelidir. Bu değerlendirmeleri karar sürecine dahil etmeye imkan sağlayan aralık değerli pisagor bulanık dilsel değişkenleri, karar verme algoritmalarında sıklıkla kullanılan AHP yönteminde kriterlerin değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Bu nedenle problemin çözümünde karara etki eden kriterlerin ve bu kriterlerin öznel ifadeler ile değerlendirilmesine imkan tanıyan bulanık yöntemler kullanılarak kriterlerin önem düzeyleri pisagor bulanık AHP yöntemi ile hesaplanmıştır. Bakım strateji seçiminin yapılacağı en kritik elektriksel ekipmanın sıralanmasında ise santralin çalışması sırasında sayısal değerler elde edilebildiği ve Bölüm 3.3'de özetlenen literatürdeki avantajları değerlendirilerek TOPSIS yöntemi kullanılmıştır.

AHP yöntemi karar verme sürecinde etkili olan faktörlerin hiyerarşik yapıda ele alan ve karar verme sürecini matematiksel hesaplamalara dayandıran bir yöntemdir [30]. AHP yönteminde temel olarak amaca yönelik kriterlerin ve alt kriterlerin kendi aralarında karşılaştırmaları yapılır ve ağırlıkları hesaplanır. Eğer varsa alternatifler her bir kriter bazında karşılaştırılır ve kriter ağırlıkları da kullanılarak en uygun alternatif seçilir. Belirsizlik durumunda kriterlerin dilsel ifadelerinin dikkate alınarak çözülmesi gerekmektedir. Bu gibi durumlarda belirsizlikleri dikkate alan bulanık AHP yöntemi kullanılmaktadır. Bulanık AHP'de, klasik AHP yöntemini dilsel değişkenler ile uygulayarak, bulanık hesaplamalar ile problemin çözümü yapılmaktadır. Bulanık AHP yönteminde boyut analizi yöntemi dikkate alınarak problemin çözümü gerçekleştirilir. Boyut analizinde bir hedef (X) ve bir amaç (U) kümesi tanımlanmaktadır. Chang [31] tarafından önerilen boyut analizi metodunda her bir hedef için boyut analizi sırasıyla uygulanmaktadır. Böylelikle her bir hedef için m boyut analizi değeri elde edilmektedir [32]. Bu aşamada boyut analizi parametreleri için üçgen, yamuk veya pisagor gibi bulanık sayılar dikkate alınmaktadır.

1. Pisagor Bulanık Sayılar (Pythagorean Fuzzy Numbers)

Çok kriterli karar verme yöntemlerinde bulanık setlerin literatüre kazanımında Bellman ve Zadeh'in [33]

çalışmaları öncülük etmiştir. Bulanık setler uzman görüşlerinin sayısal olarak net bir şekilde ifade edilemediği durumlarda dikkate alınmaktadır. Aynı zamanda belirsizlik durumunda değişkenlerin dilsel olarak ifade edildiği durumu, sayısal değerlere dönüştürmektedir. Kesin kümeler tam üye olanları veya olmayanları dikkate alırken, bulanık setler kısmi üyeliklere de izin vermesi yönüyle daha gerçekçi sonuçlar ortaya koymaktadır [14]. Kesin veya klasik küme teorisinin temel varsayımında bir elemanın herhangi bir kümeye dahil olması kesin bir sınır ile belirlenmiştir. Bir m sayısının P kümesine dahil olması durumunda üyelik değeri 1, aksi halde üyelik fonksiyonu 0 şeklinde ifade edilir. P kümesinin klasik küme üyelik fonksiyonu Eşitlik 1 ile gösterilir [34].

$$P \Rightarrow \mu = \begin{cases} m \in P \text{ ise } 1 \\ m \notin P \text{ ise } 0 \end{cases} \quad (1)$$

Zadeh [35], tarafından geliştirilen bulanık küme teorisinde ise bir X evrensel tanım kümesinde P bulanık kümesinin elemanı olan m üyelik fonksiyonu 0 ile 1 arasında değerler alabilmektedir. Üyelik fonksiyonu $\mu_p(x)$ şeklinde tanımlanmaktadır. x 'in alabileceği değerler Eşitlik 2 ile gösterilir [36].

$$\mu_p(x): X \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

Atanassov [37] tarafından belirsizliği ifade etmekte daha kolay bir yaklaşım sunmak amacıyla bulanık küme teorisini genişleterek sezgisel bulanık küme teorisini sunmuştur. Bulanık kümelerden farklı olarak X elemanının üyelik derecesini tanımlamakla birlikte üye olmama derecesini de tanımlamıştır. Sezgisel bulanık küme teorisinde üyelik ve üye olmama dereceleri $[0,1]$ aralığında değerler almaktadır. Ayrıca bu iki parametre dışında bir de tereddüt derecesi parametresi tanımlamıştır. P sezgisel bulanık kümesi Eşitlik 3'teki gibi tanımlanmaktadır [38].

$$P = \{ \langle x, \mu_p(x), \nu_p(x) \rangle | x \in X \} \quad (3)$$

x elemanının P sezgisel bulanık kümesine ait olma derecesi $\mu_p(x)$, ait olmama derecesi ise $\nu_p(x)$ ile temsil edilmektedir. Ait olma derecesi ve ait olmama derecesi toplamı 0 ve 1'e eşit veya 1'den küçüktür.

$$0 \leq \mu_p(x) + \nu_p(x) \leq 1 \quad (4)$$

$\mu_p(x) + \nu_p(x)$ işleminin 1 ile farkı alındığında sezgisel bulanık kümelerde tanımlanan tereddüt derecesi π_p parametresinin değerini elde edilir.

$$\pi_p(x) = 1 - (\mu_p(x) + \nu_p(x)) \quad (5)$$

$$0 \leq \pi_p(x) \leq 1 \quad (6)$$

Yager [39], tarafından 2014 yılında geliştirilen Pisagor bulanık sayılar, bazı durumlarda belirsizlikle başa çıkamayan sezgisel bulanık setlere genelleme olarak geliştirilmiştir. Pisagor bulanık setler belirsizlik içeren problemlerin çözümünde daha güçlü ve daha esnek bir araçtır. Pisagor bulanık setler karmaşık karar verme durumlarında karar vericiler için daha uygundur [40]. Pisagor bulanık setlerde üyelik ve üye olmama derecelerinin toplamı 1'den büyük olabilir fakat karelerinin toplamı 1'e eşit veya 1'den küçüktür. Bulanık setler basit kıyaslamalar ve mantıksal ifadelerde

belirsizlikleri daha güçlü ifade eder. Sezgisel bulanık setler üç farklı değerlendirme imkanı sunmaktadır. Üyelik derecesi, tereddüt derecesi ve üyelik dışı derecelendirmeleri ile belirsizlik ve anlaşmazlıklarda çözüm sağlamaktadır. Pisagor bulanık setler, sezgisel bulanık setlere göre üyelik derecelendirmeleri daha geniş bir derecelendirme kapsamına sahiptir [41]. Mevcut bulanık sayılardan farklı olarak Çizelge 3'te görüldüğü gibi dilsel ifadeler on farklı değişken ile temsil edilerek daha geniş bir skala ile değerlendirilmektedir. Buna bağlı olarak karar vericilere daha geniş bir değerlendirme imkanı sunmaktadır. Böylelikle karar verici kişisel değerlendirmelerini gerçeğe en yakın şekilde ifade edebilmektedir. Pisagor bulanık sayılar ile ilgili tanımlamalar aşağıdaki şekildedir[42].

Tanım 1: Pisagor bulanık kümesi P aşağıdaki forma sahiptir.

$$P = \{ \langle x, P(\mu_P(x), v_P(x)) \rangle \mid x \in X \} \quad (7)$$

Eşitlik 8'de $\mu_P(x): X \mapsto [0,1]$ $x \in X$ 'in elemanlarının P kümesine üyelik derecesini ve $v_P(x): X \mapsto [0,1]$ $x \in X$ ise P kümesine üye olmama derecelerini temsil eder. Üye olma ve üye olmama derecelerinin karelerinin toplamı 0 ila 1 arasında bir değer almalıdır.

$$0 < \mu_P(x)^2 + v_P(x)^2 \leq 1; x \in X \quad (8)$$

Üyelik derecesinin 1'den küçük olması durumunda tereddüt parametresinin varlığından söz edilir. Bu durumda P kümesine ait bir elemanın tereddüt dereceleri hesaplanmalıdır. Tereddüt dereceleri ise Eşitlik 9 ile hesaplanır.

$$\pi_P(x) = \sqrt{1 - \mu_P(x)^2 - v_P(x)^2} \quad (9)$$

Pisagor bulanık kümelerde temel işlemler aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

Tanım 2: $\beta_1 = P(\mu_{\beta_1} - v_{\beta_1})$ ve $\beta_2 = P(\mu_{\beta_2} - v_{\beta_2})$ iki pisagor bulanık sayı olmak üzere ve λ sıfırdan büyük bir sayı olmak üzere iki pisagor sayı ile ilgili işlemler aşağıdaki gibidir. İki pisagor bulanık sayının toplamı eşitlik 10, iki Pisagor bulanık sayının çarpımı eşitlik 11, eşitlik 12 pisagor bulanık sayının sabit bir sayı ile çarpımını ve Eşitlik 13 ise kuvvetini alma işlemlerini temsil etmektedir.

Bulanık sayılarda aritmetik işlemlerin tanımlanmasında \oplus ifadesi toplama, \otimes ifadesi çarpma ve λ ifadesi ise sabit bir sayıyı temsil etmektedir [43].

$$\beta_1 \oplus \beta_2 = P \left(\sqrt{\mu_{\beta_1}^2 + \mu_{\beta_2}^2 - \mu_{\beta_1}^2 \mu_{\beta_2}^2}, v_{\beta_1} v_{\beta_2} \right) \quad (10)$$

$$\beta_1 \otimes \beta_2 = P \left(\mu_{\beta_1} \mu_{\beta_2} \sqrt{v_{\beta_1}^2 + v_{\beta_2}^2 - v_{\beta_1}^2 v_{\beta_2}^2} \right) \quad (11)$$

$$\lambda \beta_1 = P \left(\sqrt{1 - (1 - \mu_{\beta_1}^2)^\lambda}, (v_{\beta_1})^2 \right), \lambda > 0 \quad (12)$$

$$\beta_1^\lambda = P \left((\mu_{\beta_1})^\lambda, \sqrt{1 - (1 - v_{\beta_1}^2)^\lambda} \right), \lambda > 0 \quad (13)$$

2. Pisagor Bulanık AHP (Pythagorean Fuzzy AHP)

Pisagor bulanık sayılar ve ilgili tanımlarda verilen notasyonlar temelinde Pisagor Bulanık AHP yönteminin adımları aşağıdaki şekildedir [44].

Adım 1: Dilsel değerlendirme tablosu kullanılarak uzman değerlendirmelerini içeren ikili karşılaştırma matrisinin $R = (r_{ij})_{m \times m}$ oluşturulması

Adım 2: Üyelik ve üye olmama derecelerinin düşük ve yükseklik değerlerine ilişkin fark matrisinin $D = (d_{ij})_{m \times m}$ bulunması. Burada μ_{ijL} , i. sütun, j. satırdaki en düşük üyelik derecesine sahip eleman; μ_{ijU} , i. sütun, j. satırdaki en yüksek üyelik derecesine sahip eleman; v_{ijL} , i. sütun, j. satırdaki en düşük üye olmama derecesine sahip elemanı, v_{ijU} , i. sütun, j. satırdaki en yüksek üye olmama derecesine sahip elemanı temsil etmektedir.

$$d_{ijL} = \mu_{ijL}^2 - v_{ijU}^2 \quad (14)$$

$$d_{ijU} = \mu_{ijU}^2 - v_{ijL}^2 \quad (15)$$

Adım 3: Aralık çarpım matrisinin $S = (s_{ij})_{m \times m}$ bulunması.

$$S_{ijL} = \sqrt{1000^{d_{ijL}}} \quad (16)$$

$$S_{ijU} = \sqrt{1000^{d_{ijU}}} \quad (17)$$

Adım 4: Belirlilik değerinin hesaplanması. $\tau = (\tau_{ij})_{m \times m}$

$$\tau_{ij} = 1 - (\mu_{ijU}^2 - \mu_{ijL}^2) - (v_{ijU}^2 - v_{ijL}^2) \quad (18)$$

Adım 5: Normalize edilmemiş ağırlık matrisinin $T = (t_{ij})_{m \times m}$ hesaplanması.

$$t_{ij} = \left(\frac{S_{ijL} + S_{ijU}}{2} \right) \tau_{ij} \quad (19)$$

Adım 6: Kriter ağırlıklarının w_i hesaplanması

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^m t_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m t_{ij}} \quad (20)$$

3. TOPSIS Yöntemi (TOPSIS Method)

TOPSIS yöntemi Hwang ve Yoon [45] tarafından çok kriterli karar verme yöntemi olarak literatüre kazandırılmıştır. TOPSIS yöntemi karar vericiden sınırlı düzeyde subjektif bilgiye ihtiyaç duyduğu için tercih edilen bir yöntemdir [46]. TOPSIS yönteminin çözüm algoritmasında pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüm en uzak alternatifin belirlenmesi yer almaktadır. Yöntemin varsayımı her kriterin monoton bir biçimde artan veya azalan, tek yönlü bir faydasının olduğudur [47]. TOPSIS yöntemi ulaşım araç seçimi [48], sağlık ekipmanı seçimi [49], sağlık sistemlerinin değerlendirilmesi [50] ve yatırım alternatiflerinin değerlendirilmesi [2] gibi çeşitli sektörlerde karar verme sürecinde kullanılan yöntemlerdendir. Yöntemin adımları şu şekildedir:

Adım 1: Karar matrisi (D) oluşturulur. Eşitlik 21'de gösterilmektedir. x_{ij} , inci alternatifin j nci kritere ilişkin değeri

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Adım 2: Standart karar matrisi (R) oluşturulur. Eşitlik 22'de D matrisinin elemanlarından yararlanılarak vektör normalizasyonu hesaplanır. r_{ij} , inci alternatifin j nci kritere ilişkin normalize edilmiş değeri

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}} \quad i = 1,2, \dots, n; \quad j = 1,2, \dots, n \quad (22)$$

Elde edilen R matrisi Eşitlik 23'te verilmiştir.

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Adım 3: Ağırlıklı standart karar matrisi (V) oluşturulur. Ağırlıklı karar matrisinin elde edilmesi için değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları (w_i) kullanılır.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & \cdots & w_n r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_m r_{m1} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Adım 4: Pozitif ideal (A^+) ve negatif ideal (A^-) çözümler oluşturulur.

$$A^+ = \{(max_i V_{ij} | j \in J), (min_i V_{ij} | j \in J)\} \quad (25)$$

$$A^- = \{(min_i V_{ij} | j \in J), (max_i V_{ij} | j \in J)\} \quad (26)$$

Adım 5: Ayrım/uzaklık ölçümlerinin hesaplanması.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (27)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (28)$$

Adım 6: İdeal çözüme görelî yakınlığın hesap edilmesi.

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad (29)$$

4. UYGULAMA (CASE STUDY)

Hidroelektrik santrallarda santralin enerji üretimine katkı sağlayan yüzlerce ekipman vardır. Bu ekipmanlar temel olarak elektriksel mekanik ve kontrol ekipmanları olarak üç ana grupta yer almaktadır. Ekipmanların bakım ve işletme kurallarına uymak tek başına yeterli olmamaktadır. Bakım ve işletme kurallarına uygun yönetilse dahi ekipmanlarda zamanla aşınma vb. kaynaklı arızalar meydana gelebilmektedir. Ancak santralda elektriksel ekipmanların yüksek basınç, gerilim ve sıcaklık nedeniyle arıza periyotları daha sık ve arızalanma potansiyelleri daha yüksektir. Bu nedenle çalışmada hidroelektrik santrallarda elektriksel ekipmanlara yönelik, bakım faaliyetlerinin ilk aşaması olan bakım strateji seçim problemi ele alınmıştır. Çalışmada Türkiye'de faaliyetini sürdüren hidroelektrik enerji üretim santralleri arasında, elektrik üretimi açısından büyük ölçekli bir hidroelektrik santraldan elde edilen veriler ile bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Elektriksel ekipmanlar arasında yer alan 563 ekipmanın santraldaki kritiklik seviyeleri belirlenmiştir, ardından ise en kritik ekipman için arızı, revizyon, kestirimci ve

periyodik bakım alternatifleri arasında en uygun alternatifin seçimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk olarak ekipmanların kritiklik seviyelerini belirlenmesinde etkili olan kriterlerin ağırlıkları ve bakım strateji seçimine etki eden kriter ağırlıkları PBAHP yöntemi ile hesaplanmıştır. Ardından PBAHP yöntemi ile elde edilen ağırlıklar kullanılarak, en kritik elektriksel ekipman TOPSIS yöntemi ile belirlenmiştir. Bu ekipman için en uygun bakım stratejisinin seçiminde kullanılan kriterler ve bakım stratejilerinin sıralanmasında benzer şekilde PBAHP ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır.

4.1. Ekipmanların Kritiklik Seviyelerinin Belirlenmesi (Determination of Equipment Criticality Levels)

Ekipmanların kritiklik seviyelerinin belirlenmesinde dikkate alınan kriterler, literatürde hidroelektrik santrallara yönelik gerçekleştirilmiş olan çalışmalar [1], [6] ve hidroelektrik santrallarda uzun yıllar çalışmış, santralların bakım ve işletme kuralları hakkında tecrübeli olan uzmanların önerileri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Bu kriterler Çizelge 2'de yer almaktadır.

Çizelge 2. Ekipmanların kritiklik seviyelerini etkileyen faktörler (Factors affecting equipment criticality levels)

Kriterler	Kriterde Yer Alan Parametreler
Ambar Yedeği (YK)	Hiç olmaz
	Bazen olur
	Her zaman olur
Bakım Öncesi Koşullar (BK)	Ünite duruşu
	Süreye göre duruş
	Yedeksiz bakım
Arıza Periyodu (AP)	Duruş gerektirmez
	Ayda bir defa
	Üç ayda bir defa
	Altı ayda bir defa
	Yılda bir defa
	Uzun süreli
Olası Sonuçlar (OS)	Bilinmiyor
	Ünite duruşu
	Yük düşümü
	Süreye göre duruş
	Yedeksiz çalışma
	Eksik görev
	Güvenliğe zarar verir
İlişkili ekipmanda hasar	
Start vermede problem	
Akışkan sarfiyatı artar	
Ölçüm Ekipmanlarının Mevcudiyeti (EM)	Var
	Yok
İşlem süresi (İS)	Bir hafta
	Bir günden fazla
	Bilinmiyor
Arıza Tespit Edilebilirlik (TE)	İki-sekiz saat
	İki saatten az
	Tespiti zor
	Tespiti kolay

Ekipmanların kritiklik seviyelerini etkileyen kriterlerin dilsel ifadeler ile karşılaştırılması Çizelge 3'te yer alan ve literatürde PBAHP yöntemini kullanan çalışmalarda [41], [42], [44], [51] önerilen pisagor bulanık sayılar ile yapılmıştır.

Çizelge 4. Pisagor bulanık sayılar (Pythagorean fuzzy numbers)

Dilsel Değişken	Aralıklı Pisagor Bulanık Sayılar			
	μ_l	μ_u	ν_l	ν_u
Kesin Düşük Önemli (KD)	0.0	0.0	0.9	1.0
Çok Düşük Önemli (ÇD)	0.1	0.2	0.8	0.9
Düşük Önemli (D)	0.2	0.35	0.65	0.80
Ortalamanın Altında Önemli (OA)	0.35	0.45	0.55	0.65
Eşit (E)	0.1965	0.1965	0.1965	0.1965
Ortalama Önemli (O)	0.45	0.55	0.45	0.55
Ortalamanın Üstünde Önemli (OÜ)	0.55	0.65	0.35	0.45
Yüksek Önemli (Y)	0.65	0.80	0.2	0.35
Çok Yüksek Önemli (ÇY)	0.8	0.9	0.1	0.2
Kesinlikle Yüksek Önemli (KY)	0.9	1.0	0.0	0.0

Dilsel değerlendirmeler ile oluşturulan karşılaştırma matrisi Çizelge 4'te sunulmaktadır.

Çizelge 5. Pisagor bulanık sayılar ikili karşılaştırma matrisi (Pythagorean fuzzy numbers pairwise comparison matrix)

A= İkili Karşılaştırma matrisi	YK				BK			
	μ_l	μ_u	ν_l	ν_u	μ_l	μ_u	ν_l	ν_u
YK	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965	0,2000	0,3500	0,6500	0,8000
BK	0,6500	0,8000	0,2000	0,3500	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965
AP	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500
OS	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,5500	0,6500	0,3500	0,4500
EM	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500	0,0000	0,0000	0,9000	0,1000
İS	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,2000	0,3500	0,6500	0,8000
TE	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,1000	0,2000	0,8000	0,9000
	AP				OS			
	μ_l	μ_u	ν_l	ν_u	μ_l	μ_u	ν_l	ν_u
YK	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500
BK	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500
AP	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965	0,2000	0,3500	0,6500	0,8000
OS	0,6500	0,8000	0,2000	0,3500	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965
EM	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500	0,0000	0,0000	0,9000	0,1000
İS	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500	0,2000	0,3500	0,6500	0,8000
TE	0,5500	0,6500	0,3500	0,4500	0,1000	0,2000	0,8000	0,9000
	EM				İS			
	μ_l	μ_u	ν_l	ν_u	μ_l	μ_u	ν_l	ν_u
YK	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500
BK	0,9000	1,0000	0,0000	0,0000	0,6500	0,8000	0,2000	0,3500
AP	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,5500	0,6500	0,3500	0,4500
OS	0,9000	1,0000	0,0000	0,0000	0,6500	0,8000	0,2000	0,3500
EM	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965	0,5500	0,6500	0,3500	0,4500
İS	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965
TE	0,5500	0,6500	0,3500	0,4500	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500
	TE							
	μ_l	μ_u	ν_l	ν_u				
YK	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500				
BK	0,8000	0,9000	0,1000	0,2000				
AP	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500				
OS	0,8000	0,9000	0,1000	0,2000				
EM	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500				
İS	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500				
TE	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965				

Çizelge 3. Ekipmanların kritiklik seviyelerini etkileyen kriterlerin dilsel ifadeler ile karşılaştırılması (Comparison of criteria affecting equipment criticality levels with linguistic expressions)

Kriterler	YK	BK	AP	OS	EM	İS	TE
YK	E	D	OA	OA	O	OA	OA
BK	Y	E	O	OA	KY	Y	ÇY
AP	O	OA	E	D	O	OÜ	O
OS	O	OÜ	Y	E	KY	Y	ÇY
EM	OA	KD	OA	KD	E	OÜ	OA
İS	O	D	OA	D	O	E	O
TE	O	ÇD	OÜ	ÇD	ÖÜ	OA	E

Karşılaştırma matrisi Çizelge 3'te verilen değerlere göre sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Dilsel ifadelerin sayısal karşılıklarının yer aldığı karşılaştırma matrisi Çizelge 5'te sunulmaktadır.

İkili karşılaştırma matrisinin elde edilmesinin ardından Bölüm 3.1’de özetlenen PBAHP yönteminin adımları sırasıyla uygulanmış ve ekipmanların kritiklik seviyelerini etkileyen kriterlerin ağırlıkları elde edilmiştir. Elde edilen kriter ağırlıkları Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. Ekipmanların kritiklik seviyelerini etkileyen kriterlerin ağırlıkları (Weights of criteria affecting equipment criticality levels)

Kriterler	Kriter Ağırlıkları (w_i)
Ambar Yedeği (YK)	0,0356
Bakım Öncesi Koşullar (BK)	0,3718
Arıza Periyodu (AP)	0,0559
Olası Sonuçlar (OS)	0,3839
Ölçüm Ekipmanlarının Mevcudiyeti (EM)	0,0558
İşlem Süresi (İS)	0,0413
Arıza Tespit Edilebilirlik (TE)	0,0557
Toplam	1

Çizelge 6’da yer alan sonuçlara göre ekipmanların kritiklik seviyelerini etkileyen kriterler arasında bakım öncesi koşullar ve olası sonuçlar kriterlerinin toplam kriter ağırlığının yaklaşık olarak %75’ine karşılık geldiği görülmektedir. Elde edilen sonuçlar uzmanlar ile değerlendirildiğinde sonucun gerçek hayat ile uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Bakım öncesi koşulların hidroelektrik santralin duruşuna neden olabilecek durumların değerlendirildiği bir kriterdir. Bu nedenle bakım öncesi koşullar kriteri %37,18 kriter ağırlığı ile yüksek düzeyde önem derecesine sahip kriterdir. Kriter ağırlığı en yüksek kriter ise %38,39 ile olası sonuçlar kriteridir. Olası sonuçlar kriteri açısından değerlendirildiğinde ise kriterde yer alan parametreler, hidroelektrik santrallarda güvenlik zafiyetinin ortaya çıkması, santralin yeniden devreye girmesinde gecikme ve akışkan olarak ifade edilen suyun kullanımının artması gibi durumların değerlendirildiği bir kriterdir. Bakım öncesi koşullar ve olası sonuçlar dışında kalan kriterlerin önem düzeyleri düşük ve birbirine yakın çıkmıştır. Arıza tespit edilebilirlik, arıza periyodu ve ölçüm ekipmanlarının mevcudiyeti kriterleri yaklaşık olarak %5 önem derecesine sahiptir. Ambar yedeği kriteri %3,56 kriter ağırlığı ile önem düzeyi en düşük kriterdir. Bu kriterler santralin uyguladığı bakım stratejisine bağlı olarak daha az belirsizlik içeren ve öngörülebilir kriterlerdir. Bir ekipmanın yedeğinin veya ölçüm ekipmanının mevcudiyetinin var olması veya olmaması durumu kontrol edilebilir niteliktedir. Bu nedenle bu kriterlerin önem düzeylerinin düşük çıkması anlamlıdır.

Kriter ağırlıklarının hesaplanmasının ardından bakım strateji seçiminin yapılacağı en kritik ekipman belirlenmiştir. En kritik ekipmanın seçiminde TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Karar matrisi uygulamaya konu hidroelektrik santraldan elde edilen sayısal veriler ile oluşturulmuştur.

Veri matrisini boyutunun büyük olması nedeniyle Çizelge 7’de bazı alternatiflere ilişkin matristen örnekler verilmiştir.

Çizelge 7. En Kritik ekipman seçimi veri matrisinden kesit (Section from the most critical equipment selection data matrix)

Alternatifler/Kriterler	YK	BK	AP	OS	EM	İS	TE
220 V DC							
AKÜMÜLATÖRLER	1	1	5	7	1	2	3
24 V DC							
AKÜMÜLATÖRLER	1	1	5	7	1	2	3
ANA GÜÇ TRAFOSU	1	7	3	10	3	4	3
GENERATÖR							
STATORU	1	7	5	10	3	4	3
İKAZ TRAFOSU	1	7	3	10	3	4	3
TRAFÖ AŞIRI AKIM							
RÖLESİ	1	7	5	10	3	2	1
TRAFÖ GENLEŞME							
TANKI	1	7	5	10	1	4	1
...
TRAFÖ YÜKSEK							
GERİLİM							
BUŞINGLERİ	1	7	3	10	3	4	1

Bölüm 3.2’de özetlenen TOPSIS yöntemi adımlarının sırasıyla uygulanmasının ardından 563 elektriksel ekipmanın kritiklik seviyeleri elde edilmiştir. Ekipmanların kritiklik seviyelerine ilişkin elde edilen sonuçlar arasından kritiklik seviyesi yüksek çıkan ekipmanların bir kısmına ilişkin sonuçlar Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8. Ekipmanların kritiklik seviyeleri (Criticality levels of equipment)

Alternatifler	İdeal Çözüme Yakınlık Değeri (C^*)	Kritiklik Seviyeleri
220 V DC		
AKÜMÜLATÖRLER	0,44427	49,2019
24 V DC		
AKÜMÜLATÖRLER	0,44427	49,2019
ANA GÜÇ TRAFOSU L3		
FAZİ	0,89657	99,2931
GENERATÖR STATORU	0,90295	100
İKAZ TRAFOSU	0,89657	99,2931
TRAFÖ AŞIRI AKIM		
RÖLESİ	0,87262	96,6408
TRAFÖ GENLEŞME		
TANKI	0,86025	95,2713
...
TRAFÖ YÜKSEK		
GERİLİM BUŞINGLERİ	0,87189	96,5595

TOPSIS yöntemine ile elde edilen sonuçlara göre en yüksek ideal çözüm değerine sahip ekipman kritiklik seviyesi 100 kabul edilerek değerler normalize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ideal çözüme yakınlık derecesi en yüksek diğer bir ifade ile en kritik elektriksel ekipman generatör ekipmanı olarak belirlenmiştir. Generatör ekipmanı hidroelektrik santrallarda mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan ana ekipmandır. Dolayısıyla bir santralda böylesi bir ekipmanın arızaya düşmesi halinde elektrik üretimi

yapılamayacak ve santral görevini yerine getiremeyecektir. Bakım sürecinde duruşlar da dikkate alındığında hidroelektrik santralda en kritik ekipman olarak generatör ekipmanının belirlenmesi gerçek hayat ile tutarlılık göstermektedir.

4.2. Generator Ekipmanı İçin Bakım Stratejisi Seçimi (Selection a Maintenance Strategy for Generator Equipment)

Generatör ekipmanı için bakım stratejisinin seçiminde öncelikle bakım strateji seçimini etkileyen kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Bakım strateji seçimini etkileyen kriterler Çizelge 2’de yer alan literatür çalışmalarından faydalanarak belirlenmiştir. Bu kriterler katma değer, maliyet, risk ve süre olarak belirlenmiştir. Kriterlerin ağırlıklarının hesaplanmasında Bölüm 3.3’te uygulama adımları yer alan PBAHP yönteminden kullanılmıştır. Bakım strateji seçimini etkileyen kriterlerin dilsel karşılaştırma matrisi Çizelge 9’da yer almaktadır.

Çizelge 10. Bakım strateji seçimini etkileyen kriterlerin dilsel karşılaştırılma matrisi (Linguistic comparison matrix of criteria affecting maintenance strategy selection)

Kriterler	Katma Değer	Maliyet	Risk	Süre
Katma Değer	E	O	O	Y
Maliyet	OA	E	O	O
Risk	OA	OA	E	Y
Süre	D	OA	D	E

Karşılaştırma matrisinde yer alan dilsel ifadeler Çizelge 3’ten yararlanarak Pisagor bulanık sayılara dönüştürülmüştür.

Pisagor bulanık sayılar ile elde edilen ikili karşılaştırma matrisi Çizelge 10’daki gibidir.

Çizelge 11. Bakım strateji seçimini etkileyen dilsel değerlendirmelere göre oluşturulan karşılaştırma matrisi (Comparison matrix created based on linguistic evaluations affecting maintenance strategy selection)

A= İkili Karşılaştırma matrisi	Katma Değer				Maliyet			
	μ_1	μ_u	ν_1	ν_u	μ_1	μ_u	ν_1	ν_u
Katma Değer	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500
Maliyet	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965
Risk	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500
Süre	0,2000	0,3500	0,6500	0,8000	0,3500	0,4500	0,5500	0,6500
	Risk				Süre			
	μ_1	μ_u	ν_1	ν_u	μ_1	μ_u	ν_1	ν_u
Katma Değer	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,6500	0,8000	0,2000	0,3500
Maliyet	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500	0,4500	0,5500
Risk	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965	0,6500	0,8000	0,2000	0,3500
Süre	0,2000	0,3500	0,6500	0,8000	0,1965	0,1965	0,1965	0,1965

Bakım strateji seçimini etkileyen kriterlerin önem derecelerinin hesaplanması için PBAHP yöntemi adımlarının sırasıyla uygulanması neticesinde Çizelge 11’de yer alan sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 9. Bakım strateji seçimini etkileyen kriterlerin ağırlıkları (Weights of criteria affecting maintenance strategy selection)

Kriterler	Ağırlıklar
Katma Değer	0,3770
Maliyet	0,1858
Risk	0,3314
Süre	0,1058
Toplam	1

Çizelge 11’de yer alan sonuçlara göre bakım strateji seçimini etkileyen en önemli kriterin katma değer, daha sonra sırasıyla risk, maliyet ve süre kriterlerinin olduğunu görmekteyiz.

Katma değer kriterinin bakım strateji seçimini etkilemede %37 önem derecesi ile en yüksek önem düzeyine, risk kriterinin % 33,13’lük önem derecesi ile ikinci en yüksek önem düzeyine, maliyet kriterinin %18,58’lik ve süre kriterinin ise %10,5’lik bir önem düzeyine sahip olduğu görülmektedir. Bir bakım stratejisinin uygulanması neticesinde ortaya çıkacak sonuçlar olumlu veya olumsuz olarak gruplandırılabilir. Burada katma değer kriteri bir bakım stratejisinin uygulanması neticesinde ortaya çıkabilecek olumlu sonuçları temsil etmektedir. Santralda katma değer elektrik üretimi açısından verimliliğin artışı ile birlikte sağlanacak finansal katkıyı, arızalardaki azalmayı ve duruş sürelerindeki azalmaları temsil etmektedir. Bu yönüyle kriterin ağırlığının %37 gibi yüksek bir önem düzeyinde çıkmıştır. Öte yandan risk ise stratejinin uygulanması neticesinde olumsuz sonuçların ortaya çıkabileceği durumların dikkate alındığı bir kriterdir. Katma değer aksine uygulanacak stratejinin başarısızlığı santralda duruşların artışı, üretimde kayıplar ve finansal açıdan olumsuz sonuçlar doğuracağından risk kriteri %33,1 kriter ağırlığı ile önem düzeyi yüksek bir

diğer kriterdir. Öte yandan maliyet kriteri önem düzeyi açısından değerlendirildiğinde bakım stratejisinin uygulanması ve bakım esnasından duruş nedeniyle oluşabilecek gelir kaybı açısından değerlendirilmekte ve önem düzeyi açısından katma değer ve risk kriterine göre orta düzeyde bir önem seviyesine sahiptir. Süre kriteri ise

diğer kriterlere kıyasla düşük seviyede bir önem düzeyine sahiptir.

Kriter ağırlıklarının elde edilmesinin ardından bakım stratejisi alternatiflerinin seçimi gerçekleştirilmiştir. TOPSIS yöntemi ile alternatiflerin sıralanmasında bakım stratejilerini etkileyen kriterler her bir alternatif için değerlendirilerek Çizelge 12’de yer alan veri matrisi oluşturulmuştur. Veri matrisinin her bir elemanı aynı birim üzerinden ifade edilmesi amacıyla 1000 baz puanına göre verilmiştir.

Çizelge 12. Bakım strateji seçimi veri matrisi
(Maintenance strategy selection data matrix)

Alternatifler/ Kriterler	Katma Değer	Maliyet	Risk	Süre
Arızı	125,8	1000	1000	1000
Revizyon	1000	8	200	695,7
Kestirimci	907,9	8,7	400	156,3
Periyodik	757,3	4,3	500	208,3

Çizelge 12’de yer alan veri matrisi TOPSIS yöntemi adımları sırasıyla uygulanarak en uygun bakım stratejisi seçilmiştir. Çizelge 13’te alternatiflerin ideal çözüme yakınlık düzeyleri arasında en yüksek değere sahip alternatif en uygun bakım stratejisini ifade etmektedir.

Çizelge 13. Bakım strateji seçimi sonuçları (Maintenance strategy selection results)

Alternatifler	İdeal Çözüme Yakınlık Değeri (C ⁺)
Arızı	0,014
Revizyon	0,987
Kestirimci	0,894
Periyodik	0,722

Elde edilen sonuçlara göre hidroelektrik santrallarda Generatör ekipmanı için en uygun bakım stratejisi revizyon bakım olarak belirlenmiştir. Generatör ekipmanı santralda mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü ana ekipmandır. Bu nedenle de santral ekipmanları arasında en kritik grupta olması bir tutarlılık göstermektedir. Bununla birlikte, generatör ekipmanında yaşanacak herhangi bir arıza santralin uzun süreli duruşuna sebebiyet verebilmektedir. Bu nedenle, ekipman arıza durumuna düşmeden bakım faaliyetlerinin belli dönemlerde geniş kapsamlı olarak yapılması gerekmektedir. Revizyon bakım stratejisi tüm ekipman grupları için santralda yapılması gerekli ve katkısı göz ardı edilemeyecek en kapsamlı stratejidir. Aynı zamanda revizyon bakım stratejisi ekipmanlar için uzun çalışma saatleri sonrasında yapılması zorunlu tutulan bir bakım stratejisidir. Bu durumda elde edilen sonuçlar, gerçek hayat santral bakım ve işletme kuralları ile tutarlıdır yorumu yapılabilir. Özcan [52] revizyon bakımı, periyodik bakımların daha geniş kapsamlı olarak gerçekleştirildiği bakımlar olarak tanımlamaktadır. Bu yönüyle de revizyon bakımının periyodik bakımdan daha

öncelikli tercih edilmesi anlamlıdır. Öte yandan alternatifler arasında son sırada yer alan bakım stratejisi ise arızı bakımdır. Santralin temel amacı olan kesintisiz enerji arzı açısından değerlendirildiğinde ekipmanın arıza durumuna düşmesi ve santralda duruşun oluşması istenmeyen bir durumdur. Ancak, her ne kadar bakım faaliyetleri zamanında yapılsa da ekipmanın arızaya düşme potansiyeli olması nedeniyle arızı bakım stratejisi sonucu alternatif olarak yer almaktadır. Yapılan değerlendirmeler önerilen yaklaşımın tutarlılığını destekler niteliktedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada Türkiye’de enerji talebinin karşılamada önemli bir paya sahip olan hidroelektrik santrallarda bakım strateji seçim problemi ele alınmıştır. Büyük ölçekli elektrik üretim kapasitesine sahip bir hidroelektrik santrala ait gerçek veriler ışığında kritik ekipman ve bu ekipmanın bakım stratejisi belirlenmiştir. Uygulamada öncelikle bakım stratejisinin seçileceği ekipman grubu belirlenmiştir. Bu bağlamda yüksek gerilim, basınç ve ısı kaynaklı nedenlerle arızalanma potansiyeli ve duruşa sebebiyet verme potansiyeli yüksek olduğu için elektriksel ekipman grubuna odaklanılmıştır.

Çalışmada iki farklı yöntem kombine edilerek probleme çözüm önerisi getirilmiştir. Kriterlerin önem düzeylerinin belirlenmesinde karar vericilere dilsel ifadelerle değerlendirme imkanı sunan bulanık yöntemler kullanılmıştır. Bu bağlamda ekipmanların kritiklik seviyelerini etkileyen kriterlerin ve bakım strateji seçimini etkileyen kriterlerin önem düzeyleri bakım strateji seçiminde ilk defa uygulanan PBAHP yöntemi ile bulunmuştur. En kritik ekipmanın ve bu ekipman için bakım stratejisi seçimi için ise PBAHP yöntemi ile TOPSIS yöntemi kombine edilerek çözüm elde edilmiştir.

Pisagor bulanık AHP ile elde edilen ekipmanların kritiklik seviyelerini etkileyen kriterlerin önem düzeyleri hesaplanmıştır. En kritik ekipman seçimini etkileyen en önemli kriterin %38,39’luk önem derecesi ile olası sonuçlar kriteri olduğu görülmüştür. Ayrıca bakım öncesi koşulları kriteri %37,18 ile en yüksek öneme sahip ikinci kriter olmuştur. Diğer kriterlerin ise yaklaşık olarak %4-5 düzeylerinde kriter ağırlığına sahip olduğu görülmektedir. Bakım strateji seçimini etkileyen kriterler arasında ise katma değer kriteri %37 önem derecesi ile en yüksek kriter ağırlığına sahip kriterdir. Bu kritere en yakın kriter ise %33,13 ile risk kriteridir. Daha sonra sırasıyla %18,5 ile maliyet kriteri ve %10,5 ile süre kriteri gelmektedir. PBAHP ile elde edilen kriter ağırlıkları TOPSIS yönteminde dikkate alınarak 563 elektriksel ekipman arasından en kritik ekipman generatör ekipmanı seçilmiştir. Elde edilen sonuç hidroelektrik santrallar açısından anlamlıdır. Hidroelektrik santrallarda elektrik üretimine katkı sağlayan temel ekipman generatör ekipmanıdır. Bu yönüyle temel amacı elektrik üretmek olan santralde

generatör ekipmanının arızaya düşmemesi arz güvenliği açısından önemlidir. Ekipman seçiminin ardından bu ekipman için arızı, revizyon, kestirimci ve periyodik bakım alternatifleri arasından en uygun bakım strateji alternatifini olarak ise revizyon bakım alternatifini seçilmiştir. Revizyon bakımın özelliği gereği santralde ekipman için geniş kapsamlı belli periyotlarda bakımların yapılması ile hidroelektrik santrallarda arıza nedeniyle duruşlar azalmaktadır. Duruşların azalması hem bakım maliyetleri hem de elektrik üretiminde duruşlardan kaynaklı kayıplar azalmaktadır. Bu yönüyle çalışmanın sonuçları hidroelektrik santraller için elektrik üretiminde ve maliyetlerde iyileşmeye katkı sağlar niteliktedir. Ayrıca bakım stratejilerinin doğru seçimi enerji üretiminde artış sağlamaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları benzer nitelikte üretim tesislerine uyarlanabilir bir nitelik taşımaktadır. Ayrıca sonraki çalışmalarda ekipman gruplarını elektriksel ve mekanik olarak iki ayrı grupta önceliklendirerek, öncelik düzeylerini dikkate alacak şekilde matematiksel model yardımıyla bakım stratejilerinin seçimine yönelik çalışmalar yapılabilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Emre YAZICI: Makalede ele alınan probleme ilişkin verilerin toplanması, verilere uygun çözüm yöntemlerinin belirlenmesi ve çözüm yöntemlerinin uygulanması ile makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Evrencan ÖZCAN: Enerji alanındaki deneyimi ve çalışmaları ile problemin tespiti, çözümü ve sonuçların analizinde katkılar sunmuştur

Hacı Mehmet ALAKAŞ: Çalışmada kullanılan yöntemlerin uygulanması ve sonuçların yorumlanması noktasında katkılar sunmuştur.

Tamer EREN: Çalışmada kullanılan yöntemlerin uygulanması ve sonuçların yorumlanması noktasında katkılar sunmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Özcan E., Ünlüsoy S. and Eren T., "A combined goal programming – AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants", *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 78: 1410–1423, (2017).
- [2] Özcan E., Ünlüsoy S. ve Eren T., "ANP ve TOPSIS Yöntemleriyle Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Yatırım Alternatiflerinin Değerlendirilmesi", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, 5(2): 204–219, (2017).
- [3] www.enerjiatlas.com.tr, "Hidroelektrik Santralleri", (2020).
- [4] TSKB, "TSKB Ekonomik Araştırmalar Aylık Enerji Bülteni", (2020).
- [5] Özcan E., Gür Ş. and Eren T., "A Hybrid Model to Optimize the Maintenance Policies in the Hydroelectric Power Plants", *Journal of Polytechnic*, 24(1): 75–86, (2021).
- [6] Özcan E., Danişan T. ve Eren T., "Hidroelektrik Santrallerin En Kritik Elektriksel Ekipman Gruplarının Bakım Stratejilerinin Optimizasyonu İçin Matematiksel Bir Model Önerisi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4): 498–506, (2019).
- [7] Bevilacqua M. and Braglia M., "The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection", *Reliability Engineering and System Safety*, 70(1): 71–83, (2000).
- [8] Wang L, Chu J. and Wu J., "Selection optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process", *International Journal of Production Economics*, 107(1): 151–163, (2007).
- [9] Borjalilu N. and Ghambari M., "Optimal maintenance strategy selection based on a fuzzy analytical network process: A case study on a 5-MW powerhouse", *International Journal of Engineering Business Management*, 10: 1–10, (2018).
- [10] Yumuşak R., Özcan E., Danişan T., ve Eren T., "AHP-TOPSIS-Tam Sayılı Programlama Entegrasyonu ile Hidroelektrik Santrallarda Bakım Strateji Optimizasyonu", *Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi*, Şanlıurfa, 81-84, (2018).
- [11] Mathews I, Mathews E. H., van Laar J. H., Hamer W. and Kleingeld M., "A simulation-based prediction model for coal-fired power plant condenser maintenance", *Applied Thermal Engineering*, 174: 115294, (2020).
- [12] Panchal D. and Kumar D., "Maintenance decision-making for power generating unit in thermal power plant using combined fuzzy AHP-TOPSIS approach", *International Journal of Operation Research*, 29(2), (2017).
- [13] Carnero M.C. and Gómez A., "Maintenance strategy selection in electric power distribution systems", *Energy*, 129: 255–272, (2017).
- [14] Fouladgar M. M., Yazdani-Chamzini A., Lashgari A., Zavadskas E. K., and Turskis Z., "Maintenance Strategy Selection Using AHP and COPRAS under Fuzzy Environment", *International Journal of Strategic Property Management*, 16(1): 85–104, (2012).
- [15] Sadeghi A. and Manesh R. A., "The Application of Fuzzy Group Analytic Network Process to Selection of Best Maintenance Strategy- A Case Study in Mobarakeh Steel Company, Iran", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 62:1378–1383, (2012).
- [16] Görener A., "Bakım stratejilerinin bulanık karar ortamında seçimi için WSA ve TOPSIS yöntemlerinin uygulanması", *Sournal of Engineering and Natural Sciences*, 31(2): 159–177, (2013).
- [17] Nezami F. G. and Yildirim M. B., "A sustainability approach for selecting maintenance strategy",

- International Journal of Sustainable Engineering*, 6(4): 332–343, (2013).
- [18] Ben Houria Z., Besbes M., Elaoud B., Masmoudi M., and Masmoudi F., “Maintenance Strategy Selection for Medical Equipments Using Fuzzy Multiple”, *CIE45 Proceedings*, 28–30, (2015).
- [19] Kirubakaran B. and Ilankumaran M., “Selection of optimum maintenance strategy based on FAHP integrated with GRA-TOPSIS”, *Annals of Operation Research*, 245(1–2): 285–313, (2016).
- [20] Vishnu C.R. and Regikumar V., “Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: A Case Study”, *Procedia Technology*, 25: 1080–1087, (2016).
- [21] Shafiee M., “Maintenance strategy selection problem: An MCDM overview”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 21(4): 378–402, (2015).
- [22] Ding S. H. and Kamaruddin S., “Maintenance policy optimization literature review and directions”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5–8): 1263–1283, (2015).
- [23] Asuquo M.P., Wang J., Zhang L., and Phylip-Jones G., “Application of a multiple attribute group decision making (MAGDM) model for selecting appropriate maintenance strategy for marine and offshore machinery operations”, *Ocean Engineering*, 179: 246–260, (2019).
- [24] Ighravwe D. E. and Oke S. A., “A two-stage fuzzy multi-criteria approach proactive maintenance strategy selection for manufacturing systems”, *SN Applied Sciences*, 2(10): 1–19, (2020).
- [25] Şenol M.B., Adem A., and Dağdeviren M., “A Fuzzy MCDM Approach to Determine the Most Influential Logistic Factors”, *Journal of Polytechnic*, 22(3): 793–800, (2019).
- [26] Ersoy M., “Mermer Blokların AHP Destekli TOPSIS ve GİA Yöntemleri ile Sınıflandırılması”, *Journal of Polytechnic*, 22(2): 303–317, (2019).
- [27] Alakaş H.M., Bucak M.Y. ve Kızıldaş Ş., “AHP-TOPSIS ve AHP-VIKOR Yöntemleri ile Ambulans Tedarikçisi Seçimi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(1): 93–101, (2019).
- [28] Hamurcu M. and Eren T., “Selection of Monorail Technology by Using Multicriteria Decision Making”, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 8(4): 303–314, (2017).
- [29] Alagöz İ., Özcan N.A., Küçükayrar U. and Özcan E., “Etkin Portföy Yönetimi Açısından Doğalgaz Kombine Çevrim Santrallerinin Bakım Önceliklendirmesi”, *Journal of Polytechnic*, Basım Aşamasında (2021).
- [30] Saaty T.L., “How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process”, *Eur. J. Oper. Res.*, 48: 9–26, (1990).
- [31] Chang D.Y., “Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP”, *Eur. J. Oper. Res.*, 95(3): 649–655, (1996).
- [32] Dinç S., Hamurcu M., and Eren T., “Kentsel Ulaşım İçin Alternatif Tramvay Araçlarının Çok Kriterli Seçimi”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2): 124–135, (2018).
- [33] Bellman R.E. and Zadeh L.A., “Decision-Making in a Fuzzy Environment”, *Management Science*, 17(4): 141–164, (1970).
- [34] Alkan N., “Yalın Tedarik Zinciri Kapsamında Sanayi 4.0 İçin Sektörel Önceliklendirmenin Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımıyla Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2019).
- [35] Zadeh L.A., “Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility”, *Fuzzy Sets Syst.*, 1(1): 3–28, (1978).
- [36] Gürsoy Z., “Türkiye’de Yaşayan Bireylerin Yaşam Memnuniyeti Düzeylerini Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Belirlenmesi”, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, (2016).
- [37] Atanassov K.T., “Intuitionistic fuzzy sets”, *Fuzzy Sets Systems*, 20(1): 87–96, (1986).
- [38] Yıldırım B.F., “Kredi Kartı Platformlarının Sezgisel Bulanık TOPSIS Yöntemi Kullanılarak Değerlendirilmesi”, *BDDK Bankacılık ve Finansal Piyasalar*, 13(1): 37–58, (2019).
- [39] Yager R. R., “Pythagorean membership grades in multicriteria decision making”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22(4): 958–965, (2014).
- [40] Mohd and Abdullah L., “Pythagorean fuzzy analytic hierarchy process to multi-criteria decision making”, *AIP Conference Proceeding 1905*, (2017).
- [41] Ak M. F. and Gul M., “AHP-TOPSIS integration extended with Pythagorean fuzzy sets for information security risk analysis”, *Complex & Intelligent Systems*, 5(2): 113–126, (2019).
- [42] Yucesan M. and Kahraman G., “Risk evaluation and prevention in hydropower plant operations: A model based on Pythagorean fuzzy AHP”, *Energy Policy*, 126: 343–351, (2019).
- [43] Gökdalay M. H. ve Evren G., “Havalanlarının Performans Analizinde Bulanık Çok Ölçütlü Karar Verme Yaklaşımı”, *İtü Dergisi*, 8(6): 157–168, (2009).
- [44] İlbarhar E., Karaşan A., Cebi S. and Kahraman C., “A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system”, *Safety Science*, 103: 124–136, (2018).
- [45] Hwang and Yoon K., “Multiple attribute decision making: methods and applications”, *New York Springer-Verlag*, (1981).
- [46] Olson D.L., “Comparison of Weights in TOPSIS Modesl”, *Mathematical Computer Modelling*, 40: 721–727, (2004).
- [47] Abalı Y.A., Kutlu B.S., ve Eren T., “Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri İle Bursiyet Seçimi: Bir Öğretim Kurumunda Uygulama”, *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 26(3–4): 259–272, (2012).
- [48] Alakaş H. M., Yazıcı E., Cebeci S., Yılmaz E. E., ve Eren T., “Toplu Ulaşım Sistemlerinde Araç Tipi Seçimi: Kırıkkale Kampüs Hattı Örneği”, *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(1): 269–287, (2021).
- [49] Cihan Ş., Ayan E., Eren T., Topal T., ve Yıldırım E. K., “Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile Ekokardiyografi Cihazı Seçiminin Yapılması”, *Sağlık Bilimleri ve Meslekleri Dergisi*, 4(1), (2017).
- [50] Taş C., Bedir N., Eren T., Alakaş, H.M., ve Çetin S., “AHP-TOPSIS Yöntemleri Entegrasyonu İle Poliklinikleri Değerlendirilmesi: Ankara’da Bir Uygulama”, *Sağlık Yönetimi Dergisi*, 2(1): 1–17, (2018).

- [51] Yıldız A., Ayyıldız E., Gümüş A. T., ve Özkan C., “Ülkelerin Yaşam Kalitelerine Göre Değerlendirilmesi İçin Hibrit Pisagor Bulanık Ahp-Topsis Metodolojisi: Avrupa Birliği Örneği”, *European Journal of Science Technology*, (17): 1383–1391, (2019).
- [52] Özcan E., “Bakım Yönetim Sistemi: İşletme ve Kurulum Esasları”, *Elektrik Üretim A.Ş.-Araştırma Planlama ve Koordinasyon Başkanlığı*, (2016).
- [53] Mousavi S. S., Nezami F. G., Heydar M., and Aryanejad M. B., “A hybrid fuzzy group decision making and factor analysis for selecting maintenance strategy”, *2009 Int. Conf. Comput. Ind. Eng. CIE 2009*, 1204–1209, (2009).
- [54] Bashiri M., Badri H., and Hejazi T. H., “Selecting optimum maintenance strategy by fuzzy interactive linear assignment method”, *Applied Mathematical Modelling*, 35: 152–164, (2011).
- [55] Mathew M., Chakraborty R. K., and Ryan M. J., “Selection of an Optimal Maintenance Strategy Under Uncertain Conditions: An Interval Type-2 Fuzzy AHP-TOPSIS Method”, *IEEE Transaction on Engineering Management*, 1–14, (2020).