



Araştırma Makalesi / Research Article

Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde çok kriterli karar verme yöntemleri ile yüzer güneş panelleri için optimal yer seçimi

Optimal site selection for floating solar panels in the Southeastern Anatolia Region using multi-criteria decision making methods

Rıdvan Şen¹, Şehmus Fidan^{2*}

¹ Batman Üniversitesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, ridvan.sen@batman.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5249-7245>

² Batman Üniversitesi, TBMYO, Elektronik ve Otomasyon Programı, sehmus.fidan@batman.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3374-2393>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 25 Ağustos 2025
Revizyon 1 Ekim 2025
Kabul 2 Ekim 2025
Online 30 Aralık 2025

Anahtar Kelimeler:

Çok Kriterli Karar Verme,
Yüzer Güneş Santralleri,
Hidroelektrik Baraj Rezervuarı,
Güneydoğu Anadolu Bölgesi

ÖZ

Yüzer solar panelleri; suyun soğutma etkisi ile enerji verimliliğini artırması, buharlaşma kayıplarını azaltması ve arazi kullanım gereksinimini ortadan kaldırması gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu faydalar, hem dünyada hem de ülkemizde yüzer solar panel uygulamalarının sayısının her geçen gün artmasına katkı sağlamaktadır. Ancak, Güneydoğu Anadolu Bölgesi özelinde bu sistemlerin kurulacağı en uygun yerin belirlenmesine yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu araştırma, hidroelektrik santrallerin rezervuar alanlarına yüzer solar panellerinin kurulumu için en uygun lokasyonun belirlenmesine odaklanmaktadır. Bu amaçla, çok kriterli karar verme yöntemleri (AHP, TOPSIS, MABAC, COMET ve SPOTIS) kullanılmıştır. Çok kriterli karar verme yaklaşımları, birden fazla kriterin eşzamanlı olarak dikkate alındığı durumlarda, en uygun seçeneğin tespiti için sistematik ve analitik bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır. Bu yöntemler aracılığıyla farklı kriterlerin önem dereceleri belirlenmekte ve böylece daha objektif ve tutarlı sonuçlar elde edilebilmektedir. Çalışmada, yer seçim sürecinde dikkate alınacak kriterler arasında güneş ışınlamı, yıllık günışığı süresi, rüzgâr hızı, bölgesel kalkınma düzeyi, sosyal kabul, sıcaklık, topografik yükselti, su derinliği ile yerleşim alanlarına ve şebeke bağlantı noktalarına uzaklık yer almaktadır. Bu kriterlerin ağırlıkları uzman görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, güneş ışınlamı ile yıllık günışığı süresinin en kritik kriterler olduğu ortaya çıkmış ve bu değerlendirmeler ışığında Karkamış Barajı en uygun rezervuar alanı olarak belirlenmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 August 2025
Received in revised form 1 October 2025
Accepted 2 Oct 2025
Available online 30 December 2025

Keywords:

Multi-Criteria Decision Making,
Floating Solar Power Plants,
Hydroelectric Dam Reservoir,
Southeastern Anatolia Region

ABSTRACT

Floating solar panels offer several advantages, such as increasing energy efficiency through the cooling effect of water, reducing evaporation losses, and eliminating the need for land use. These benefits contribute to the growing number of floating solar panel applications both worldwide and in our country. However, studies focusing on determining the most suitable locations for the installation of such systems in the Southeastern Anatolia Region are quite limited. This research focuses on identifying the optimal location for the installation of floating solar panels on the reservoir areas of hydroelectric power plants. For this purpose, multi-criteria decision-making methods (AHP, TOPSIS, MABAC, COMET, and SPOTIS) were employed. Multi-criteria decision-making approaches provide a systematic and analytical framework for identifying the best option in situations where multiple criteria are considered simultaneously. Through these methods, the relative importance of different criteria can be determined, leading to more objective and consistent results. In this study, the criteria considered for site selection include solar radiation, annual sunshine duration, wind speed, regional development level, social acceptance, temperature, topographic elevation, water depth, and the distance to residential areas and grid connection points. The weights of these criteria were determined based on expert opinions. The analysis revealed that solar radiation and annual sunshine duration are the most critical criteria, and in light of these findings, the Karkamış Dam was identified as the most suitable reservoir area.

Doi: 10.24012/dumf.1762054

* Sorumlu Yazar

Giriş

Günümüzde enerji, yalnızca günlük ihtiyaçların karşılanmasında değil, aynı zamanda ülkelerin stratejik gücünü belirleyen temel bir kaynaktır. Fosil yakıtların çevresel etkileri ve sınırlı rezervleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji arzında öncelikli rol oynamasını zorunlu kılmaktadır. Bu süreçte, yenilenebilir enerji kaynaklarını devreye almak büyük önem taşırken, aynı zamanda mevcut enerji kaynaklarının verimliliğini artırarak kayıpları önleyecek yeni çözümlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, fotovoltaiik sistemler (FV), temiz enerji üretiminde önemli bir rol oynarken, teknolojiadaki gelişmelerle birlikte verimliliklerinin artırılması ve çeşitli uygulama alanlarında yaygınlaştırılması kritik hale gelmiştir. Bu hususta yüzer solar paneller (YSP) geleneksel FV santrallerinden görece daha verimli olduğu, birçok çalışma sonucunda ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmalarda elde edilen verilere göre, Brezilya'daki yarı kurak Castanhão, Orós ve Banabuiú rezervuarlarında YSP kurulumları analiz edilmiştir. Bu analizlerde, su yüzeyinden sağlanan soğutucu etki sayesinde YSP'lerin dönüşüm verimliliğinin, karasal tip panellere kıyasla %12,5 daha yüksek olduğu belirlenmiştir [1]. Hindistan'da tarımsal sulama için kurulan küçük ölçekli YSP'ler üzerinde yapılan analizler, coğrafi koşullara bağlı olarak karasal FV sistemlere göre %4 daha fazla verim sağladığını ortaya koymuştur [2]. Endonezya'nın Java Eyaleti'nde YSP sistemlerinin verimliliğini tahmin etmek ve enerji verimini ölçmek amacıyla, uzaktan algılama ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak bir ekonomik analiz yapılmıştır. Bu analizde, YSP sistemleri karasal FV sistemlerle karşılaştırılmıştır. Uzaktan algılama yöntemiyle elde edilen bulgular, göl yüzeyinin kara yüzeyine kıyasla daha düşük sıcaklığa sahip olduğunu ve yıllık ortalama sıcaklık farkının yaklaşık 8°C olduğunu göstermiştir. Bu fark, YSP sistemlerinin karasal FV sistemlere göre daha düşük sıcaklık stresi altında çalışmasına ve dolayısıyla verimliliklerinin tahmini olarak %0,61 daha yüksek olmasına katkı sağlamaktadır [3]. Sonuç olarak; YSP'ler, karasal güneş enerjisi sistemlerine alternatif olarak son yıllarda dünya genelinde hızla gelişen ve uygulama alanı genişleyen, yenilikçi bir enerji üretim çözümüdür [4].

YSP'ler hakkında bilinen ilk proje 2007 yılında Japonya'nın Aichi kentinde yapılmıştır. Kurulan tesisin 20 kWp gücünde olup araştırmanın ana amacı su üstünde modül sıcaklıklarının FV sistem performansına etkisini incelemektir. Ancak, küçük su rezervuarlarına YSP kurularak üzüm bağlarına enerji sağlama amacıyla ilk kez 2008 yılında ABD'nin Kaliforniya Eyaleti'nde 175 kWp gücünde bir sistem kurulmuştur [5]. Bu öncü çalışmaları takiben, Fransa, Hindistan, Japonya, Güney Kore, Birleşik Krallık, Singapur, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri'nde YSP'ler hakkında araştırma ve uygulama projeleri hayata geçirilmiştir. Ayrıca, Brezilya, Pakistan, İspanya ve Yeni Zelanda gibi birçok ülkede, hidroelektrik baraj rezervuarları ile su kanallarına YSP santrallerinin kurulma potansiyeli ve elde edilebilecek enerji miktarına yönelik araştırma projeleri

yürütülmektedir [6]. İspanya'da gerçekleştirilen bir çalışmada, mevcut su yüzey alanlarının %10'unun YSP ile kaplanması halinde ülkenin elektrik ihtiyacının yaklaşık %31'inin karşılanabileceği, su yüzey alanlarının tamamının kaplanması durumunda ise fosil kaynaklı elektrik üretiminin %80 oranında azalabileceği ifade edilmiştir [7].

Dünya çapında elektrik enerjisine erişim miktarının %54 ile en az olduğu, ısınım yönünden zengin konumda olan Afrika kıtasında 146 hidroelektrik santrali bulunmaktadır. Bu santrallerin rezervuar alanlarının, %1 den az bir oranda YSP kurulması durumunda, mevcut hidroelektrik santrallerin kurulu güç kapasitesinin iki katına çıkabileceği ve elektrik üretiminin %58 oranında artarak yılda ilave 46,04 TWh enerji üretilebileceğini göstermektedir [8]. Suudi Arabistan'da, proje maliyetini azaltıp maksimum güç elde etmek için AHP yöntemiyle yapılan bir çalışmada, kuzey ve kuzeybatı bölgelerinin FV santral kurulumu için uygun olduğu belirlenmiştir [9]. İran'da FV santralleri için en uygun yerin belirlenmesinde, AHP yöntemiyle güneş radyasyonu, ekonomik, teknik ve coğrafi faktörler gibi birçok kriter değerlendirilmiştir [10]. Etiyopya'da YSP kurulumu için en yüksek potansiyele sahip bölgelerin tespitinde AHP yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, Amhara bölgesinin sistem kurulumu açısından en yüksek potansiyele sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [11].

Ülkemizde ise belirli rezerv alanlarda YSP kurulumu üzerine potansiyel değerlendirmeleri ve teorik çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Uygulama örneklerinden biri, Büyükçekmece Gölü üzerinde kurulan 90 kWp kapasiteli YSP projesidir. 2017 yılında başlatılan bu projenin amacı, YSP'lerin tasarım, üretim, inşaat ve kurulum süreçlerini ortaya koymak ve bu santralden elde edilen enerji miktarını analiz etmektir [12]. Kayseri yakınlarında bulunan Yamula Barajı'na YSP kurulması ve ortaya çıkacak potansiyelin analizi araştırma konusu olmuştur. Simülasyon programı ile yapılan analiz çalışmasında, rezervuar alanının %10 kadar kısmının YSP ile kapatılması durumunda, 576,4 MW kurulu güç potansiyeli taşıdığı hesaplanmıştır [13]. Diğer bir çalışmada YSP'lerin deniz üstüne kurulumu incelemiştir. Çalışmada, Türkiye'nin kıyı bölgeleri ile durgun su yüzeylerinin YSP'ler için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Uygun rezervuarların %10'unda yapılan kurulumla yıllık 125 TWh elektrik üretimi sağlanabileceğini böylelikle enerji bağımlılığını azaltma potansiyeli taşıdığını belirtmiştir. Türkiye'de bulunan Van Gölü, Tuz Gölü ve Beyşehir göllerine YSP kurulması için yer seçiminde AHP yöntemi kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda en önemli kriter olarak küresel yatay ısınım (Global Horizontal Irradiance-GHI) kriterinin belirlenmesi sonucunda, Beyşehir Gölü'nün YSP santrali kurulumu için en ideal seçim olduğu görülmüştür [14]. Farklı bir çalışmada, Türkiye'nin farklı bölgelerinde su rezervuarına sahip sekiz hidroelektrik santralinde, YSP santrali kurulumu potansiyelini belirlemeye yönelik bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, teknik, ekonomik ve sosyal açıdan tesis kurulumu için alternatifler; AHP yöntemi ile OWA (Ordered Weighted Averaging – Sıralı Ağırlıklı Ortalama) yöntemi kullanılarak

değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, Aydın ilinde bulunan Kemer HES, YSP kurulumu açısından en uygun alan olarak tespit edilmiştir [15].

Bu çalışma ile Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesinde bulunan hidroelektrik santrallerinin üzerine YSP kurulumunda optimal yer seçimi konusu ele alınmıştır. Yapılan literatür çalışmasında bölge özelinde bu çalışmanın yapılmadığı belirlenmiştir. Yer seçiminin doğruluğunu belirlemek için AHP, TOPSIS, MABAC, COMET ve SPOTIS gibi ÇKKV yöntemleri kullanılmıştır. Ortaya konan sonuçlar, bölgeye yatırım yapmak isteyen kurum ve kuruluşlar için bir ön çalışma niteliğindedir.

Materyal ve Metot

Yüzer solar paneller (YSP)

YSP'ler, karasal alan gereksinimini ortadan kaldırarak su yüzeyleri üzerinde enerji üretimini mümkün kılan yenilikçi fotovoltaik sistemlerdir. Bu sistemler temel olarak dubalar ya da taşıyıcı platformlar, şamandıralar, bağlama sistemleri, FV modüller, kablo ve konnektör bileşenlerinden oluşur. Dubalar ya da taşıyıcı platformlar panellerin su yüzeyinde dengeli şekilde konumlandırılmasını sağlamaktadır. Bu taşıyıcılar genellikle UV ışınlarına ve çevresel etkilere dayanıklı, hafif ancak sağlam malzemelerden üretilir. Şamandıralar ise yapının yüzebilirliğini artırmanın yanı sıra dalga ve rüzgar gibi dış etkenlere karşı sistemin kararlı kalmasına yardımcı olur [5].

Bağlama sistemleri, platformun su yüzeyinde kaymasını ya da savrulmasını önlemek amacıyla zemine sabitlenmesini sağlar; bu sabitleme çelik halatlar, zincirler ve beton bloklarla gerçekleştirilir. FV modüller ise güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren ana bileşenler olup, bu panellerin eğim ve yönü maksimum enerji verimliliği sağlanacak şekilde konumlandırılır. Enerji iletimini sağlayan kablo ve konnektörler, su geçirmez ve dış koşullara dayanıklı şekilde yalıtılmıştır. Sistemde yer alan evirici ise FV modüllerden gelen doğru akımı (DC), şebekede kullanılabilir alternatif akıma (AC) dönüştürerek enerji altyapısına entegrasyonu sağlar. Sonuç olarak, YSP sadece temiz enerji üretimini değil, aynı zamanda su buharlaşmasının azalmasını ve panel sıcaklıklarının düşük tutulması sayesinde verimliliğin artmasını da sağlar. Bu yönüyle YSP'ler hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilirliğe destek olmaktadır [5].

Çok kriterli karar verme yöntemleri (ÇKKV)

Günümüzde karar verme, birçok alanda giderek daha karmaşık bir süreç hâline gelmektedir. Teknoloji değişimi ve artan bilgi buna bağlı olarak yeni problemler de ortaya çıkarmıştır. Karar verme sırasında; karar vericilerin deneyimleri, kişisel fikirleri, stratejik amaçları dikkate alındığı gibi birçok nicel ve nitel kriterin de sürece dâhil edildiği görülmektedir [17]. Çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemleri, birden fazla kriterin dikkate alındığı durumlarda, olası çözüm setleri arasından en uygun

alternatifin seçilmesini amaçlayan problemlerdir. Bu tür problemlerin çözümünde uygun yöntemin belirlenmesinde, karar vericinin problemin yapısını ve karar sürecinin özelliklerini dikkate alması gerekmektedir [18]. Çoklu karar vermede birçok yöntem bulunmakla beraber bu çalışmada AHP, TOPSIS, MABAC, COMET ve SPOTIS yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerin kullanılması safhasında seçim cetveli hazırlığı yapılmıştır. Seçim cetveli hazırlanırken YSP ve karasal FV alanında tecrübeli uzmanlardan destek alınmıştır. Ayrıca akademik yayınlardan yararlanarak YSP kurulum yerinin seçiminde etkili olacağı düşünülen teknik, ekonomik ve sosyal kısıtların belirlendiği on kriter seçilmiştir. Daha sonra, belirlenen bu kriterlerin ağırlık oranlarını belirlemek amacıyla, çoğunluğu enerji hakkında çalışan akademisyenlerden oluşan toplam on iki uzmana anketin amacı açıklanarak değerlendirme yapmaları istenmiştir. Ardından uzmanların doldurmuş olduğu seçim cetveline göre her bir kriterin ağırlık oranları belirlenmiştir. Ağırlık oranları ise optimal yer seçimine ilişkin karar verme aşamasında kullanılmıştır.

Analitik hiyerarşi süreci (AHP)

Analitik hiyerarşi süreci (AHP), Thomas L. Saaty tarafından 1980 yılında geliştirilmiş olup, birden fazla kriter barındıran problemlerin çözümüne uygun ÇKKV yöntemidir. Son yıllarda, karar vericilerin sezgi ve hissiyat yerine analitik ve nicel yaklaşımlara yönelmesiyle birlikte, AHP kararların sağlam bir temele dayandırılmasında sıkça kullanılan bir yöntem haline gelmiştir [19]. Bu yöntemde; amaç, kriterler, alt kriterler ve alternatiflerden oluşan hiyerarşik yapı titizlikle oluşturulmalı ve problemler kapsamlı bir şekilde analiz edilmelidir [20].

AHP yönteminde ilk adım, karar problemini anlamak ve bunu hiyerarşik bir modelde düzenlemektir. Bu modelin en üst seviyesinde kararın nihai amacı yer alırken, orta seviyede bu amacı etkileyen kriterler ve gerekirse alt kriterler bulunur. Hiyerarşinin en alt seviyesinde ise değerlendirme yapılacak alternatifler sıralanır. Amaç, kriterler ve alternatifler arasındaki ilişkilerin mantıklı bir düzende organize edilerek, karar probleminin sistematik bir yapıda ifade edilmesi sağlanır. Bu adım, problemin analiz edilmesini ve karar sürecinin kolaylaştırılmasını hedeflemektedir. Kriterler ve alt kriterler belirlendikten sonra, kendi aralarındaki önem derecelerini belirlemek için Denklem 1'de gösterilen karşılaştırma matrisi oluşturulur.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ 1/a_{31} & 1/a_{32} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & 1/a_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Uygulayıcıların değerlendirmelerine dayanarak, ikili karşılaştırma yöntemi ile her bir kriterin amaca katkısı açısından göreceli önem dereceleri belirlenir. Ardından her bir seçeneğin kriterler bakımından üstünlükleri de ortaya konur. Bu üstünlüklerin tespitinde ise, Saaty tarafından

geliştirilen [19] ve Tablo 1’de sunulan önem ölçeği kullanılmaktadır.

Tablo 1. AHP önem ölçeği

Sayısal Değer	Tanım
1	Kriterler eşit derecede önemli
3	1. kriter 2.’ye göre biraz daha önemli
5	1. kriter 2.’ye göre fazla önemli
7	1. kriter 2.’ye göre çok fazla önemli
9	1. kriter 2.’ye göre aşırı önemli
2,4,6,8	Ara değerler

İkili karşılaştırma matrisleri oluşturulduktan sonra bir sonraki aşama, ilgili matristeki her bir unsurun diğer unsurlara göre önem derecesini gösteren özvektörün hesaplanmasıdır. Matrisin $n \times 1$ boyutundaki özvektörü aşağıdaki şekilde belirlenir. Özvektör $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ve $j = 1, 2, 3, \dots, n$ olmak üzere normalize edilmiş karar matrisi Denklem 2’de, öncelik vektörünün hesaplanması ise Denklem 3’te sunulmuştur.

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

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad (3)$$

Karar kriterlerinin yüzde bazındaki önem dağılımlarını belirlemek amacıyla sütun vektörlerinin ($w = [w_i]_{n \times 1}$) hesaplanması gerekmektedir. Bu vektör, Denklem 2’de verilen b_{ij} normalize edilmiş karar matrisinin satır elemanlarının aritmetik ortalaması alınarak elde edilir. Her ikili karşılaştırma matrisi için tutarlılık oranı (TO) hesaplanır ve bu oranın 0,10’u aşmaması beklenir. TO değerinin 0,1’in üzerinde olması, karar vericinin değerlendirmelerinde tutarsızlık bulunduğunu gösterir ve bu durumda yargıların yeniden gözden geçirilip düzeltilmesi gerekmektedir. Tutarlılık oranının (TO) hesaplanması için, A matrisinin en büyük özdeğerini (λ_{max}) hesaplamak gerekir. Bunun için öncelikle Denklem 4’te gösterilen matris hesaplanmalıdır. Ardından Denklem 4’ten elde edilen matris kullanılarak Denklem 5 (λ_{max}) hesaplanmalıdır. Denklem 4 ve 5’te $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ve $j = 1, 2, 3, \dots, n$ olmak üzere;

$$D = [a_{ij}] \times [w_i] = [d_i] \quad (4)$$

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{w_i}}{n} \quad (5)$$

Tutarlılık oranının hesaplanmasında ihtiyaç duyulan bir başka değer ise rassallık endeksi (RE)’dir. Sabit sayılardan meydana gelen ve n değerine göre belirlenen RE değerinin yer aldığı veriler Tablo 2’de verilmiş olup bu değerler Saat tarafından belirlenmiştir.

Tablo 2. Rassallık endeksi verileri

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RE	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

RE belirlendikten sonra TO değerinin hesaplanması gerekir. Bunu yapmak için Denklem 6 kullanılmaktadır.

$$TO = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1).RE} \quad (6)$$

Denklem 2-5 arasında sunulan dört aşama, hiyerarşideki tüm kriterler için uygulanır. Tutarlılık oranı hesaplandıktan sonra, hiyerarşideki n adet kriterin her biri için oluşturulan $m \times 1$ vektörler bir araya getirilerek $m \times n$ boyutunda Denklem 7’de gösterilen DW karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi ile kriter ağırlıkları W üstünlük vektörünün çarpımı sonucunda, Denklem 8’de gösterilen R sonuç vektörüne ulaşırlar [21].

$$DW = [W_{ij}]_{m \times n} \quad (7)$$

$$R = DW \times W \quad (8)$$

Denklem 7’de sunulan DW karar matrisi, her alternatife kriterler açısından göreceli üstünlüklerini göstermekte kullanılır. W üstünlük vektörü ise her kriterin ağırlığını, yani karar açısından önemini gösterir. Sonuç olarak R sonuç vektörü, alternatiflerin toplam skorlarını içerir ve hangi alternatife daha uygun olduğunu gösterir.

İdeal çözüm benzerliğine göre tercih sıralama tekniği (TOPSIS)

TOPSIS yöntemi, 1981 yılında Hwang ve Yoon [21] tarafından geliştirilmiş olup, karar vericinin belirlediği kriterler doğrultusunda en uygun sonucu bulmayı hedefler. Bu yöntemde, her bir alternatife en iyi çözüme (ideal çözüm) olan yakınlığı ve en kötü çözüme (negatif ideal çözüm) olan uzaklığı hesaplanır. Alternatifler, X_{ij} ile gösterilen değerlere göre değerlendirilir; burada i alternatifleri, j ise kriterleri temsil eder. İlk olarak, alternatiflerin değerleri normalize edilir. Bu işlem, farklı ölçü birimlerine sahip kriterlerin karşılaştırılabilir hale gelmesini sağlar. Normalizasyon işlemi Denklem 9’da ifade edilmiştir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (9)$$

Burada, r_{ij} normalize edilmiş değer, m ise alternatif sayısıdır. r_{ij} hesaplandıktan sonra her bir kriterin önem derecesine göre ağırlıklandırılmış normalize matris Denklemi (10) oluşturulur.

$$v_{ij} = w_i \cdot r_{ij} \quad (10)$$

Burada r_{ij} normalizasyon matrisi, w_i ise ağırlık matrisi olarak tanımlanır. v_{ij} matrisi, ideal ve negatif ideal çözümün belirlenmesi için önemlidir. İdeal çözüm (A^+) ve negatif ideal çözüm (A^-) Denklem 11 ve 12 ile tanımlanır.

$$A^+ = (\max(v_{ij})(benefit), \min(v_{ij})(cost)) \quad (11)$$

$$A^- = (\max(v_{ij})(benefit), \min(v_{ij})(cost))$$

Her alternatifin ideal ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları Öklidyen mesafe ile hesaplanır. Bu durumda Denklem 12 kullanılır.

$$\begin{aligned} s_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2} \\ s_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2} \end{aligned} \quad (12)$$

Burada S_i^+ , i. alternatifin ideal çözüme olan uzaklığı, S_i^- ise negatif ideal çözüme olan uzaklığıdır. Alternatiflerin göreceli yakınlığı ise Denklem 13'e göre hesaplanır: C_i değeri 0 ile 1 arasında değişir ve en yüksek değere sahip değer en iyi tercih olarak kabul edilir [22].

$$C_i = \frac{s_i^-}{s_i^+ + s_i^-} \quad (13)$$

Çok özellikli sınır yaklaşımı karşılaştırması (MABAC)

2015 yılında Pamučar ve arkadaşları tarafından geliştirilen MABAC yöntemi, diğer ÇKKV yöntemlerine benzer biçimde, alternatiflerin çeşitli kriterler doğrultusunda değerlendirilmesini mümkün kılar. Ancak MABAC'ın ayırt edici özelliği, alternatiflerin sınır yaklaşım alanı (border approximation area) temelinde değerlendirilmesidir [23]. Bu yöntemde, alternatifler $A_1, A_2, \dots, A_m$ olarak kriterler ise $C_1, C_2, \dots, C_n$ olarak tanımlanır ve her alternatif için kriterlerin bir değeri olur.

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_i & \dots & x_{ij} \end{pmatrix} \quad (14)$$

X_{ij} teriminde, i. alternatif, j ise kriteri ifade eder. MABAC yönteminde normalize edilmiş karar matrisi ve ağırlıklı karar matrisi Denklem 14'te gösterildiği gibi bulunur. V_{ij} ağırlıklandırılmış matris hesaplandıktan sonra sınır yaklaşıklık matrisi G_j için Denklem 15 kullanılır.

$$G_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_{ij} \quad (15)$$

Her alternatif için sınır yaklaşıklık alanı ile ilgili performansı hesaplanır. Bu performans göstergesi, alternatiflerin ne kadar iyi olduğunu göstermek için kullanılır.

$$Q_{ij} = v_{ij} - G_j \quad (16)$$

Denklem 16'da Q_{ij} değerleri toplandığında, her alternatif için bir toplam puan elde edilir ve alternatifler sıralanır. En yüksek S_1 puanına sahip olan alternatif, en iyi alternatif olarak seçilir [23]. Bu durum Denklem 17'de gösterilmektedir.

$$S_i = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (17)$$

Karakteristik nesneler yöntemi (COMET)

Bu yöntem, ÇKKV tekniklerinden biri olup, alternatiflerin bağımsız olarak sıralanmasını sağlayan farklı bir yaklaşımdır [24]. COMET yöntemi, karar vericinin önyargılarından bağımsız olarak alternatifleri değerlendirmek için karakteristik nesneleri kullanır. Alternatifler $A_1, A_2, \dots, A_m$ ve kriterler $C_1, C_2, \dots, C_n$ şeklinde tanımlanmakta olup, her alternatifin her kriter için bir değeri bulunmaktadır. Bu değerlere dayanarak karar matrisi oluşturulur ve bu hesaplama, MABAC yönteminde de kullanılan Denklem 18 ile gerçekleştirilir. Her bir alternatif için karakteristik nesnelerin değer fonksiyonu hesaplanır. Örneğin, C_1 kriteri için iki karakteristik nesne, $O_1 = \min(x_{i1})$ ve $O_2 = \max(x_{i1})$ olarak belirlenir. Denklem 19'da ifade edilen bu fonksiyon, alternatifin karakteristik nesneye olan uzaklığını ölçmek amacıyla kullanılır.

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_i & \dots & x_{ij} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$v_{ij}(O_k) = f(O_k) \quad (19)$$

Denklem 18 ve 19'da, $v_{ij}(O_k)$, i. alternatifin j kriterde k karakteristik nesneye göre değerini ifade eder. Alternatifler, karakteristik nesneler ile karşılaştırılarak olasılık değerleri hesaplanır. Her bir alternatifin performansı, karakteristik nesneler temelinde belirlenen olasılık dağılımları doğrultusunda değerlendirilir. Bu olasılık dağılımı Denklem 20'de gösterilmiştir. Olasılık değerleri esas alınarak alternatifler sıralanır ve en yüksek olasılık değerine sahip alternatif en uygun seçenek olarak seçilir.

$$P(A_i) = \frac{\sum_{k=1}^n v_{ij}(O_k)}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n v_{ij}(O_k)} \quad (20)$$

İdeal çözüme yönelik kararlı tercih sıralaması (SPOTIS)

SPOTIS yöntemi, alternatiflerin ideal çözüme göre değerlendirilmesini sağlayarak tutarlı bir sıralama elde edilmesini mümkün kılar. Bu yöntem, diğer ÇKKV tekniklerinden farklı olarak, alternatiflerin hem fayda hem de maliyet kriterleri açısından referans noktaları olan ideal ve anti-ideal çözümlere olan uzaklıklarını dikkate alır [25]. Diğer yöntemlerde olduğu gibi, alternatifler A , kriterler C ve karar matrisi X şeklinde tanımlanır. Bu süreçte, TOPSIS yöntemine benzer şekilde, Denklem 9, 10 ve 13 kullanılır. Daha sonra ideal çözüm (I_j) ve anti-ideal çözüm (A_j) hesaplanır. İdeal çözümde, fayda kriterleri için en yüksek, maliyet kriterleri için ise en düşük değer seçilirken; anti-ideal çözümde fayda kriterleri için en düşük, maliyet kriterleri için en yüksek değer belirlenir. SPOTIS yönteminde normalizasyon işlemi, her alternatifin belirlenen ideal ve anti-ideal çözümlere olan uzaklığı temelinde gerçekleştirilir. Bu durumda, normalizasyon matrisi Denklem 21'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - A_j}{I_j - A_j} \quad (21)$$

Kriterlerin önem derecelerine göre her kriter için bir ağırlık W_j belirlenir. Her kriter için ağırlıklandırılmış normalizasyon matrisi Denklem 22 ile hesaplanır.

$$d_{ij} = w_j \cdot z_{ij} \quad (22)$$

Her bir alternatifin toplam puanı, Denklem 23'te gösterildiği üzere, tüm kriterlerdeki ağırlıklı normalize edilmiş değerlerin toplamı üzerinden hesaplanır. En düşük toplam puana sahip alternatif, ideal çözüme en yakın olan seçenek olarak değerlendirilir ve en iyi alternatif olarak seçilir.

$$S_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (23)$$

Veri kaynağı ve barajların seçimi

Bu çalışmanın temel amacı, araştırma konusu olan hidroelektrik santrallerinde YSP kurulumu için optimal yer seçimini belirlemede ÇKKV yöntemlerini kullanmaktır [27, 28]. Bu amaçla, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde bulunan, 50 MW ve üstü kurulu güce sahip santraller ele alınmıştır. Yapılan araştırmalarda bu kısıtlama altında 11 adet hidroelektrik santralinin olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte ÇKKV analizlerinin yapılabilmesi için barajlar alternatif olarak ele alınmıştır. Belirlenen santraller Tablo 3'te gösterilmiştir.

Fırat ve Dicle havzalarında yer alan barajlar, YSP kurulumu için ilk bakışta uygun bir profil sunmaktadır. Özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin yüksek güneşlenme süresi, bu projelerin verimliliğini daha da artıracak önemli bir faktördür. Mevcut baraj altyapısının enerji iletim hatlarına yakın olması, YSP'lerden üretilen elektriğin sisteme entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve maliyetleri düşürmektedir. Bu hibrit model sayesinde hem yenilenebilir enerji üretimi artırılacak hem de buharlaşma yoluyla oluşan su kaybının azaltılması gibi ekosistem faydaları sağlanabilecektir.

Tablo 3. Güneydoğu anadolu bölgesi barajları

Baraj Adı	Bulunduğu Şehir
1 Atatürk Barajı ve HES	Şanlıurfa
2 Karakaya Barajı ve HES	Diyarbakır
3 Ilısu Barajı ve HES	Şırnak
4 Birecik Barajı ve HES	Şanlıurfa
5 Çetin Barajı ve HES	Siirt
6 Alkumru Barajı ve HES	Siirt
7 Batman Barajı ve HES	Batman
8 Karkamış Barajı ve HES	Gaziantep
9 Dicle Barajı ve HES	Diyarbakır
10 Kralkızı Barajı ve HES	Diyarbakır
11 Garzan Barajı ve HES	Batman

Tablo 3'te verilen barajların sunduğu geniş su yüzeyi alanları, enerji üretim kapasitesini artırmak için değerlendirilebilecek önemli bir kaynak oluşturmaktadır. YSP'lerin su yüzeyini kaplaması, barajlarda buharlaşma kaynaklı su kaybını azaltarak kuraklık yönetimine de katkı

sağlayabilir. Ayrıca, bu projeler bölgenin enerji çeşitliliğine katkıda bulunurken, temiz enerji üretiminde yerel bir model oluşturma potansiyeli taşımaktadır.

Listede yer alan her baraj alanı için kullanılacak veriler, Tablo 4'te gösterilen kaynaklardan temin edilmiştir. Doğrudan normal ışıınım (DNI), küresel yatay ışıınım (GHI) ve dağınık yatay ışıınım (DIF) gibi değerler, global solar atlas web sitesi üzerinden çevrimiçi olarak elde edilmiştir. Diğer tüm veriler ise, bağlı bulunduğumuz kamu kurumları olan meteoroloji genel müdürlüğü ve ilgili kuruluşların güncel internet sayfalarından alınarak hazırlanmıştır.

Tablo 4. Veri Kaynağı Listesi [27, 28]

Veri Listesi	Veri Kaynağı
Koordinatlar	Google Earth [29]
Doğrudan Normal Işıınım - DNI (kWh/m ²)	
Küresel Yatay Işıınım - GHI (kWh/m ²)	
Dağınık Yatay Işıınım - DIF (kWh/m ²)	Global Solar Atlas [30]
FV modüllerinin optimum eğimi	
Ortalama Sıcaklık (°C)	
Topografik Yükselti (m)	Topographic-map [31]
Su Derinliği - İşletmeye uygun su kotu (m)	Enerji Atlası [32]
Yerleşim yerlerine uzaklık (m)	Google Earth [29]
Yerel Ortalama Rüzgar hızı (m/s)	Global Wind Atlas [33]
Barajın Göl Alanı (km ²)	Enerji Atlası [32]
Ortalama Yağış (m ³) - (2009-2019)	
Maksimum Sıcaklık (°C)	Meteoroloji Genel Müdürlüğü [34]
Minimum Sıcaklık (°C)	
Güneşlenme Saati	

Tablo 4'te sunulan veri listesinde sunulan parametreler, YSP'ler için en uygun yer seçiminde kriter olarak değerlendirilmiştir. Her bir parametre, karar sürecinde dikkate alınacak ayrı bir ölçütü temsil etmektedir; örneğin doğrudan normal ışıınım (DNI), küresel yatay ışıınım (GHI), ortalama sıcaklık, vb. Bu kriterler, karar vericilerin farklı alanları karşılaştırarak en uygun alternatifleri belirlemesine olanak sağlamaktadır. Yazılım geliştirme sürecinde bu parametrelerin hepsi kriter olarak belirlenmiştir.

Analiz ve Bulgular

Tablo 5'te, YSP sistemlerinin kurulumu için teknik, ekonomik ve sosyal kriterlerin karşılaştırmalı ağırlıklandırması sunulmaktadır. Alanında uzman 12 katılımcıdan elde edilen verilerle oluşturulan ağırlıklı grup matrisi, kriterlerin birbirine göre önem derecelerini ortaya koymaktadır. Hesaplama sonucunda en yüksek ağırlığa sahip kriter güneş ışıınımı olurken, bunu yıllık gün ışığı saatleri ve ortalama sıcaklık takip etmiştir. Bu sonuç, YSP santrali projelerinde enerji üretim potansiyelini doğrudan etkileyen iklimsel faktörlerin, diğer topoğrafik, altyapısal ve

sosyoekonomik kriterlere kıyasla daha belirleyici olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, YSP'ler için en uygun HES alanı seçiminde güneşlenme süresi ve yoğunluğunun optimizasyonu, teknik verimlilik açısından kritik bir öncelik olarak öne çıkmaktadır. Bu bulgu, uygun iklim koşullarına sahip bölgelerin yatırım geri dönüş süresini kısaltarak projenin ekonomik fizibilitesini de olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir.

Topografik yükselti (rakım) arttıkça, atmosfer incilir ve bu durum iki temel etki yaratır. Birincisi, hava sıcaklığının düşmesidir; bu soğuk ortam, panellerin aşırı ısınmasını engelleyerek verimliliklerini artırır. İkincisi, artan güneş radyasyonu, doğrudan daha fazla enerji üretim potansiyeli sağlar. Ancak, yüksek rakımın olumsuz yanı, daha yoğun UV ışınlarına ve sert hava koşullarına maruz kalmaktır. Bu

durum, panellerin ve yüzer sistem bileşenlerinin daha hızlı yıpranmasına neden olarak sistem ömrünü kısaltabilir. Ayrıca, yüksek rakımlı bölgelerdeki ulaşım ve bakım zorlukları işletme maliyetlerini artırır.

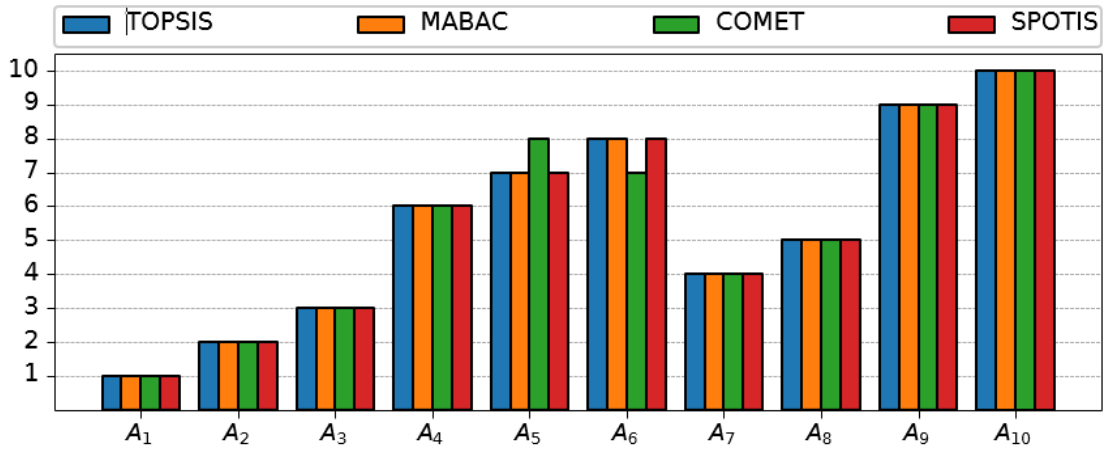
Su derinliği, YSP sistemlerinin maliyetini ve stabilitesini doğrudan etkiler. Çok sığ sular, dip çamurundan kaynaklanan kurulum zorlukları, aşırı su ısınması ve yosunlaşma gibi problemlere yol açarak verimi ve bakımı olumsuz etkiler. Öte yandan, çok derin sular ise çok daha uzun ve güçlü demirleme sistemleri gerektirdiği için kurulum maliyetlerini önemli ölçüde artırır. Ayrıca derin sulardaki bakım işlemleri daha zorlu ve pahalıdır. Bu nedenlerle, genellikle orta derinlikteki sular en uygun maliyet ve performans dengesini sağlar.

Tablo 5. Ağırlıklı Grup Matrisi ve Sıralama [27, 28]

KRİTERLER	Güneş ışıınımı	Yıllık Güneşliği Saatleri	Ortalama Sıcaklık	Topoğrafik Yükselti	Su Derinliği	Yerleşim Birimlerine Uzaklık	Şebeke Bağlantılarına Uzaklık	Yerel Ortalama Rüzgâr Hızı	Bölgesel Etkiler	Kalkınma ve Yerel Ekonomiler	Sıralama
Güneş ışıınımı (A1)	1,00	3,85	4,30	6,42	7,25	7,08	6,00	6,44	7,58	7,92	1
Yıllık Güneşliği Saatleri (A2)	0,92	1,00	5,10	5,92	6,42	7,34	6,34	6,44	7,60	8,17	2
Ortalama Sıcaklık (A3)	1,53	0,63	1,00	5,70	5,34	6,18	3,79	5,34	6,94	7,27	3
Topoğrafik Yükselti (A4)	0,23	0,35	0,88	1,00	3,43	3,96	2,68	2,29	4,80	6,17	4
Su Derinliği (A5)	0,15	0,23	0,86	2,38	1,00	2,32	1,69	1,93	3,54	3,61	7
Yerleşim Birimlerine Uzaklık (A6)	0,21	0,87	0,81	1,80	2,29	1,00	0,48	1,47	2,90	3,32	8
Şebeke Bağlantılarına Uzaklık (A7)	0,29	0,95	1,83	2,83	3,80	4,33	1,00	2,09	3,54	4,98	5
Yerel Ortalama Rüzgâr Hızı (A8)	0,45	0,41	0,84	2,48	3,21	4,89	1,78	1,00	4,59	4,66	6
Bölgesel Etkiler (A9)	0,14	0,70	0,46	1,47	1,34	2,13	1,10	1,52	1,00	1,86	9
Kalkınma ve Yerel Ekonomiler (A10)	0,13	0,12	0,54	0,24	1,66	1,73	0,81	1,27	1,85	1,00	10

Uzmanlar tarafından doldurulan seçim cetvelleri, Python 3.8 programlama dili kullanılarak analiz edilmiş ve pyMCDM 1.3.1 [26] kütüphanesinde yer alan AHP, TOPSIS, MABAC, COMET ve SPOTIS yöntemleri uygulanmıştır. Belirtilen yöntemlerden elde edilen sonuçlar, seçim cetvellerinden elde

edilen bulgular ile karşılaştırılarak aralarındaki tutarlılık ve uyum değerlendirilmiştir. Böylece, saha verileri ile ÇKKV yöntemlerinden elde edilen sonuçların birbirini desteklemesi sağlanmış ve analizlerin güvenilirliği ile geçerliliği güçlendirilmiştir.



Şekil 1. ÇKKV yöntemleri sıralaması

Geliştirilen yazılımlardan elde edilen veriler dikkate alındığında, ilk üç kriterin en yüksek öneme sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu kapsamda, farklı ÇKKV yöntemleri dikkate alındığında karar vericilerin seçtikleri kriterlerde tutarlı tercihler yaptıkları gözlemlenmiştir. Şekil 1’de yer alan sayısal verilere bakıldığında, uygulanan beş yöntemin tamamında ilk üç kriterin aynı kaldığı görülmektedir. Şekil 1’de kriterler sırasıyla A1-A10 olarak isimlendirilmiştir. Bu isimlendirme Tablo 5’te sunulan kriter sütunu ile ilişkilidir. Örneğin: Şekil 1’de gösterilen A1 kriteri Tablo 1’de güneş ışıını kriterine karşılık gelmektedir.

Bu çalışmada kullanılan TOPSIS, MABAC, COMET, SPOTIS ve AHP gibi ÇKKV yöntemlerinin tamamında, Tablo 6’daki ağırlık analizlerine göre en yüksek önem düzeyine sahip kriterlerin aynı olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, farklı ÇKKV yöntemleri arasındaki yakınsamayı ve tutarlılığı açıkça ortaya koymaktadır. Yöntemlerin birbirine benzer sonuçlar üretmesi, elde edilen bulguların güvenilirliğini ve sağlamlığını pekiştirmekte, bu da karar vericilere daha güvenli ve tutarlı bir karar verme süreci sunmaktadır. Bu önemli bulgu, seçilen yöntemlerin veri setine uyumluluğu ve problem yapısını doğru bir şekilde

yansıtmaları açısından da dikkat çekicidir, zira farklı matematiksel prensiplere dayanan bu yöntemlerin aynı kritik faktörleri işaret etmesi, analiz sonuçlarının geçerliliğini artırmaktadır. Ayrıca, bu tutarlılık kriterlerin göreceli önem sıralamasının rastlantısal değil, veriye dayalı sistematik bir analizden kaynaklandığını göstermektedir. Böylece, proje planlamasında önceliklendirme yapılırken farklı yöntemler arasında seçim yapılması gerekliliği ortadan kalkmakta, zaman ve kaynak tasarrufu sağlanmaktadır. Sonuç olarak, farklı ÇKKV yöntemlerinden elde edilen paralel sonuçlar, uygulamada daha hızlı ve güvenilir karar mekanizmalarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Tablo 6’da gösterilen sonuçlar içinde MABAC yöntemi, bazı kriterler ve alternatifler için negatif değerlere sahip olabilir. Bu durum, söz konusu alternatifin ağırlıklı performansının referans değerlerin altında olduğunu ve diğer alternatiflere göre daha düşük uygunluk düzeyi sergilediğini göstermektedir. TOPSIS yönteminde en büyük değer (0,84) en önemli değeri göstermektedir. COMET yönteminde ağırlıklar 0-1 arasına yayılmaktadır. AHP yönteminde ise tüm kriterlerin toplam değeri 1 olacak şekilde bir yayılım ortaya çıkmaktadır. Tüm yöntemlerde en büyük değer kriterin öneminli olduğuna işaret etmektedir.

Tablo 6. ÇKKV yöntemleri ile kriter ağırlığı tablosu [27, 28]

KRİTERLER	TOPSIS	MABAC	COMET	SPOTIS	AHP
Güneş ışıını	0,84	0,60	1,00	0,09	0,20
Yıllık Güneşli Saatleri	0,64	0,48	0,87	0,21	0,19
Ortalama Sıcaklık	0,51	0,29	0,54	0,40	0,15
Topografik Yükselti	0,22	-0,08	0,02	0,77	0,09
Su Derinliği	0,15	-0,16	0,01	0,86	0,06
Yerleşim Birimlerine Uzaklık	0,15	-0,18	0,01	0,87	0,05
Şebeke Bağlantılarına Uzaklık	0,26	-0,03	0,06	0,72	0,09
Yerel Ortalama Rüzgâr Hızı	0,23	-0,07	0,03	0,77	0,08
Bölgesel Etkiler	0,11	-0,22	0,01	0,91	0,04
Kalkınma ve Yerel Ekonomiler	0,04	-0,27	0,00	0,97	0,03

Tablo 8’de verilen sıralama, ÇKKV yöntemlerinden TOPSIS kullanılarak üretilmiştir. Çalışmada karar matrisi 12 farklı ikili karşılaştırma matrisinin aritmetik ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Ardından, kriter ağırlıkları entropi temelli ağırlıklandırma yöntemi (Entropy Weight Method) ile hesaplanmıştır. Bu yöntemde kriter değerleri, sütun bazlı normalizasyon yaklaşımıyla normalize edilmektedir. Böylece farklı ölçeklerdeki kriterler (örneğin °C, kWh/m², metre) birbirine indirgenmiş ortak bir ölçeğe dönüştürülmektedir. Ardından sıralama, pymcdm kütüphanesi aracılığıyla uygulanan ÇKKV yöntemleri (TOPSIS, MABAC vb.) ile elde edilmektedir. Bu yöntemlerin her biri ayrıca kendi içinde normalizasyon prosedürleri (örneğin TOPSIS’te vektör normalizasyonu, MABAC’ta min-max normalizasyonu) kullanmaktadır. PyMCDM kütüphanesi normalizasyon işleminde birçok alternatif metod önermektedir [35].

ÇKKV yöntemlerinin uygulandığı bu çalışmada, alanında uzman katılımcılara sunulan seçim cetveli ve yapılan hesaplamalar sonucunda en önemli kriter olarak birinci sırada “Güneş Işınımı”, ikinci sırada ise “Yıllık Güneşli Saatleri” kriterleri seçilmiştir. Tablo 7’de verilen değerlerden hareketle, YSP santrali kurulumu için en iyi lokasyon seçimi yapılmak istenmesi durumunda Tablo 8’de belirtildiği gibi birinci sıraya Karkamış Barajı yerleşmektedir. Ancak Tablo 7’de gösterildiği üzere doğrudan normal ışıınım (DNI), küresel yatay ışıınım (GHI) ve dağınık yatay ışıınım (DIF) değerleri bakımından Karkamış Barajı’na yakın lokasyonda bulunan Birecik Barajı ve Atatürk Barajı’nın güneş ışıınım değeri Karkamış Barajı bölgesi ışıınım miktarına çok yakın bir değerde bulunmaktadır. Dolayısıyla YSP santrali kurulum potansiyeli açısından yapılacak olan herhangi bir çalışmada, bu barajların göl rezervuar alanının değerlendirilmeye alınması doğru bir adım olacaktır.

Tablo 7. Baraj bilgileri tablosu

VERİLER	Karkamış Barajı	Atatürk Barajı	Birecik Barajı
Koordinatlar	36°52'13.4"N 38°01'45.4"E	37°32'19.0"N 38°22'38.6"E	37°03'11.9"N 37°53'29.4"E
Doğrudan Normal Işıınım -DNI (kWh/m ²)	2185,7	2179,1	2173,7
Küresel Yatay Işıınım - GHI (kWh/m ²)	1898,4	1877,4	1885,5
Dağınık Yatay Işıınım - DIF (kWh/m ²)	561,8	544,7	558,3
FV Modül Eğimi	32/180°	32/180°	31/180°
Ortalama Sıcaklık (°C)	19,0	17,3 °C	18,6
Topografik Yükselti (m)	336	529	353
Su Derinliği - İşletme Su Kotu (m)	336-340	526-542	340-385
Yerleşim Yerlerine Uzaklık (Km)	6,8	24	5
Yerel Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	4,16	4,97	5,51

Baraj Göl Alanı (km ²)	28,4	817	56,25
Ortalama Yağış Miktarı (m ³)	45,05	33,66	45,05
Max. Sıcaklık (°C)	38,2	41,3	38,2
Min. Sıcaklık (°C)	-1,1	1,3	-1,1
Güneşlenme Saati	5,2	6,5	5,2

Bu çalışmada temel amaç, seçilen hidroelektrik santraller üzerinde YSP kurulumu için ÇKKV yöntemleriyle optimal yer belirlenmesidir. Dolayısıyla analiz, yalnızca barajların uygunluk düzeylerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesine odaklanmıştır. Enerji üretim potansiyelinin (örneğin, %10 veya %20 kurulum yapılması durumunda beklenen üretim miktarı) doğrudan hesaplanmaması çalışmanın bir sınırlılığıdır. Bunun nedeni, her bir baraj için ayrıntılı su yüzeyi kullanımı, barajlara ilişkin veriler ve yerel iklim koşullarına bağlı üretim simülasyonlarının bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuş olmasıdır.

Tablo 7, yalnızca ilk üç sırada yer alan barajlara ilişkin temel verileri sunmak amacıyla hazırlanmış olup, seçim cetveli ya da ÇKKV yöntemleriyle yapılan sıralama süreciyle doğrudan ilişkili değildir. Tüm kriterler Tablo 5’te sunulmuş olup karşılaştırmalı olarak araştırmacılara seçim cetveli olarak tercih yapmaları için sunulmuştur. Uzman araştırmacılardan seçim cetveli aracılığıyla toplanan veriler [28] nolu kaynakta el olarak sunulmuştur.

Tablo 8. Kriteria göre baraj sıralaması

Baraj Adı	Sıralama
Karkamış Barajı ve HES	1
Birecik Barajı ve HES	2
Atatürk Barajı ve HES	3
İlisu Barajı ve HES	4
Batman Barajı ve HES	5
Kralkızı Barajı ve HES	6
Karakaya Barajı ve HES	7
Alkumru Barajı ve HES	8
Garzan Barajı ve HES	9
Dicle Barajı ve HES	10
Çetin Barajı ve HES	11

Yapılan analizlere göre Karkamış Barajı, yüksek güneş ışıınımı (DNI ve GHI değerleri), düşük yerleşim yeri uzaklığı ve uygun su derinliği sayesinde ilk sırada yer almıştır. Birecik Barajı, rüzgar hızı açısından avantajlı olup alan büyüklüğü bakımından da orta seviyede olduğundan ikinci sırada yer almıştır. Atatürk Barajı ise çok geniş göl alanına sahip olmasına rağmen yüksek topoğrafik yükselti, düşük GHI değerleri ve yerleşim yerlerine uzaklığının fazla olması sebebiyle üçüncü sırada kalmıştır. Karkamış ve Birecik

Barajları, hem teknik hem de ekonomik olarak daha kısa sürede yatırım geri dönüş potansiyeli sunarken, Atatürk Barajı'nın büyük boyutları uzun vadeli ve yüksek maliyetli bir yatırım gerektirebilir. Bu durum, barajların sıralamasında yalnızca enerji potansiyelinin değil, erişilebilirlik ve kurulum kolaylığı gibi kriterlerin de belirleyici olduğunu göstermektedir. Genel olarak, ilk üç sıradaki barajların hem iklim hem de altyapı açısından diğer barajlara kıyasla YSP sistemleri açısından daha uygun koşullara sahip olduğu görülmektedir.

Tablo 8 oluşturulurken, alternatiflerin değerlendirilmesinde TOPSIS yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin seçilmesinin temel nedeni, karar verme sürecinde 'ideal çözüme yakınlık' prensibini esas alması ve literatürde en yaygın kullanılan ÇKKV tekniklerinden biri olmasıdır. Ayrıca, çalışmada kullanılan diğer ÇKKV yöntemleri (MABAC, COMET ve SPOTIS) ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, ilk üç sırada yer alan barajların aynı olduğu görülmüştür. Bu durum, kullanılan yöntemlerin tutarlılığını desteklemekte ve ulaşılan bulguların güvenilirliğini artırmaktadır. Çalışmanın amacı en uygun kurulum yerinin belirlenmesi olduğundan, yalnızca TOPSIS yöntemi ile elde edilen sonuçların sunulması metodolojik açıdan bir sorun teşkil etmemektedir. Bununla birlikte, farklı yöntemlerle yapılan analizlerin de benzer sonuçlar üretmiş olması, bulguların geçerliliğini güçlendiren önemli bir unsurdur.

Sonuç

Bu çalışmada, bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılan ve güvenilirliği kanıtlanmış çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP, TOPSIS, MABAC, COMET ve SPOTIS yöntemleri kullanılarak YSP sistemlerinin kurulum potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, karar vericinin öznel görüşleri yerine, bilimsel verilere ve belirlenen kriterlerin ağırlık oranlarına dayanmaktadır. YSP kurulumuna etki eden kriterler, çoğunluğu alanında uzman akademisyenler ve saha tecrübesine sahip profesyonellere danışılarak hazırlanan seçim cetveli aracılığıyla belirlenmiştir. Toplanan seçim cetveli verileri, belirtilen ÇKKV yöntemleri ile analiz edilmiştir. YSP kurulması planlanan her bir baraj bölgesi için teknik, coğrafi ve meteorolojik veriler başta olmak üzere kurulumu etkileyen kriterlerin tespiti amacıyla kamu kurum ve kuruluşları ile birçok santralle doğrudan iletişime geçilerek kapsamlı bir veri toplama süreci yürütülmüştür. ÇKKV yöntemleri sonucunda, karar vericiler tarafından en önemli kriter olarak belirlenen “Güneş ışınımı” faktörüne göre, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'ndeki barajlarımızdan Gaziantep ili sınırları içinde yer alan Karkamış Barajı'nın rezervuar alanına YSP santrali kurulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, Karkamış Barajı'na yakın lokasyonlarda bulunan ve benzer güneş ışınım değerlerine sahip Atatürk Barajı ve Birecik Barajı rezervuar alanlarına da YSP kurulmasının, mevcut bulgular ışığında ülkemize ve bölgemize önemli katkılar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

İlerleyen araştırmalarda, baraj yüzeylerinin farklı bölgeleri için mikro-uygunluk analizleri yapılması ve Coğrafi Bilgi Sistemleri ve ÇKKV entegrasyonunun kullanılması önerilmektedir. Enerji üretim potansiyeli tahminlerinin çalışmaya dahil edilmesi, daha kapsamlı ve uygulanabilir sonuçlar sağlayabilir. Ayrıca barajlara ilişkin bulutluluk indeksi hesaplanarak sunulan analizler yeniden değerlendirilebilir.

Kaynaklar

- [1] Sacramento, E.M., Carvalho, P.C.M., Araujo, J.C., Riffel, D.B., Correa, R.M.C. & Neto, J.S.P. (2015), “Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs,” *The Institution of Engineering and Technology*, 9, 1019-1024, Doi: 10.1049/iet-rpg.2015.0120.
- [2] Anbarasu, P. & Kumar, R.S. (2022), “Performance analysis of polycrystalline floating photovoltaic array: The concept and prototype development for irrigation purpose,” *Prog Photovolt Res Appl*. 2023; 31(7), 738 – 749, Doi: 10.1002/pip.3681
- [3] Sukarso, A.P. & Kim, K.N. (2020), “Cooling effect on the floating solar PV: Performance and economic analysis on the case of West Java province in Indonesia”, *Journal of Energy*, 13, 2126, Doi: 10.3390/en13092126.
- [4] Solomin, E., Sirotkin, E., Cuce, E., Selvanathan, S. P. & Kumarasamy, S. (2021), “Hybrid floating solar plant designs: a review,” *Energies*, 14(10), 2751, Doi: 10.3390/en14102751.
- [5] Trapani, K. & Redón Santafé, M. (2015), “A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(4). 524-532, Doi: 10.1002/pip.2466.
- [6] Vodapally, S. N. & Ali, M. H. (2022), “A comprehensive review of solar photovoltaic (PV) technologies, architecture, and its applications to improved efficiency,” *Energies*, 16(1), 319, Doi:10.3390/en16010319.
- [7] López, M., Soto, F. & Hernández, Z. A. (2022), “Assessment of the potential of floating solar photovoltaic panels in bodies of water in mainland Spain,” *Journal of Cleaner Production*, 340, 130752, Doi:10.1016/j.jclepro.2022.130752.
- [8] Sanchez, R. G., Kougias, I., Moner-Girona, M., Fahl, F. & Jäger-Waldau, A. (2021), “Assessment of floating solar photovoltaics potential in existing hydropower reservoirs in Africa,” *Renewable Energy*, 169, 687-699, Doi:10.1016/j.renene.2021.01.041.
- [9] Al Garni, H. Z. & Awasthi, A. (2017), “Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia,” *Applied Energy*, 206, 1225-1240, Doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.024.
- [10] Azizkhani, M., Vakili, A., Noorollahi, Y. & Naseri, F. (2017), “Potential survey of photovoltaic power plants using Analytical Hierarchy Process (AHP) method in Iran,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 1198-1206, Doi:10.1016/j.rser.2016.11.103.
- [11] Nebey, A. H., Taye, B. Z. & Workineh, T. G. (2020), “GIS-Based Irrigation Dams Potential Assessment of

Floating Solar PV System,” *Journal of Energy*, 2020(1), 1268493, Doi:10.1155/2020/1268493.

[12] Kaymak, M. K. ve Şahin, A. D. (2021), “The first design and application of floating photovoltaic (FPV) energy generation systems in Turkey with structural and electrical performance,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-13, Doi:10.1007/s40684-021-00369-w.

[13] Dal, A. R. (2021), “Investigation of the potential of using lakes and dams as solar power plants: the case of yamula dam,” *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(4), 726-738, Doi: 10.29109/gujsc.1002791.

[14] Karipoğlu, F., Koca, K. ve İlbar, E. (2024), “Convenient Site Selection of a Floating PV Power Plant in Türkiye by using GIS-Fuzzy Analytical Hierarchy Process,” *Environmental Science and Pollution Research*, 31(15), 23193-23210, Doi: 10.1007/s11356-024-32470-3.

[15] Göllü, K. (2022), “Site selection for floating photovoltaic (PV) panels on 8 HEPP reservoirs in Turkey by using analytical hierarchical process (AHP), Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2022, <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/99486>.

[16] Sahu, A., Yadav, N. & Sudhakar, K. (2016). “Floating photovoltaic power plant: A review. Renewable and sustainable” *energy reviews*, 66, 815-824. Doi:10.1016/j.rser.2016.08.051.

[17] Arslankaya, D. ve Göraltay, K. (2019), “Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinde Güncel Yaklaşımlar,” İksad Yayınları, 2020, Türkiye,

[18] Dalbudak, E. ve Rençber, Ö. F. (2022), “Çok kriterli karar verme yöntemleri üzerine literatür incelemesi,” *Gaziantep Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4(1), 1-17, Doi:10.55769/gauniibf.1068692.

[19] Aktaş, İ. Ş., (2020), “Akıllı şebekelerde risk analizi,” [Yayınlanmış doktora Tezi], Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2020,

[20] Ekin, E. ve Dolanbay, G. (2024), “AHP Temelli TOPSIS Yöntemi ile Yer Seçim Problemine İlişkin Bir Uygulama,” *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(1), 301-317, Doi:10.17336/igusbd.1209399.

[21] Supçiller, A. ve Çapraz, O. (2011), “AHP-TOPSIS yöntemine dayalı tedarikçi seçimi uygulaması,” *İstanbul University Econometrics and Statistics e-Journal*, (13), 1-22, <https://dergipark.org.tr/en/pub/iuekois/issue/8980/112036>.

[22] Ustasüleyman, T. (2009), “Bankacılık sektöründe hizmet kalitesinin değerlendirilmesi: Ahs-Topsis Yöntemi,” *Bankacılar Dergisi*, 69, 33-43.

[23] Demirtaş, M. C. (2022), “Üniversite rektörlerinin sosyal medya kullanımlarının Mabac yöntemi ile değerlendirilmesi,” *Öneri Dergisi*, 17 (57), 102 – 147. Doi: 10.14783/maruoeneri.941348.

[24] Sałabun, W. (2014), “Reduction in the number of comparisons required to create matrix of expert judgment in the comet method,” *Management and Production Engineering Review*, 5(3), 62-69. Doi: 10.2478/mper-2014-0028.

[25] Dezert, J., Tchamova, A., Han, D. & Tacnet, J. M. (2020, July), “The SPOTIS rank reversal free method for multi-criteria decision-making support,” In *2020 IEEE 23rd International Conference on Information Fusion (FUSION)* (pp. 1-8). Doi: 10.23919/FUSION45008.2020.9190347.

[26] Kizielewicz, B., Shekhovtsov, A., & Sałabun, W. (2023). pymcdm—The universal library for solving multi-criteria decision-making problems. *SoftwareX*, 22, 101368.

[27] Şen, R., ve Fidan, Ş. (2025). Yüzer fotovoltaik sistemler için AHP yöntemi ile optimal yer seçimi: Güneydoğu Anadolu Bölgesi uygulaması. *International Science and Art Research Center (ISARC)*.

[28] Şen, R. (2025). Güneydoğu Anadolu Bölgesi için çok kriterli karar verme yöntemleri ile yüzer fotovoltaik sistemler için yer seçimi (Yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=P3dtmmHrq>

[29] Google Earth. (n.d.). Erişim tarihi: 1 Ağustos 2025, <https://earth.google.com/>

[30] Global Solar Atlas. (n.d.). Erişim tarihi: 10 Ağustos 2025, <https://globalsolaratlas.info/>

[31] Topographic-map. (n.d.). Erişim tarihi: 3 Ağustos 2025, <https://www.topographic-map.com/>

[32] Enerji Atlası. (n.d.). Erişim tarihi: 3 Ağustos 2025, <https://enerjiatlas.com/>

[33] Global Wind Atlas. (n.d.). Erişim tarihi: 7 Ağustos 2025, <https://globalwindatlas.info/>

[34] Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (n.d.). Erişim tarihi: 9 Ağustos 2025, <https://mgm.gov.tr/>

[35] <https://pypi.org/project/pymcdm/>, erişim tarihi 01.10.2025