

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrali Tasarımı

Önder ÇİÇEK^{*a} , Mustafa Bahadır ÖZDEMİR^a 

^{a,*} Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, Türkiye.

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 07.09.2020
Kabul: 19.04.2021

Anahtar Kelimeler:
Enerji depolama, enerji verimliliği, pompaj depolamanın elektrik piyasasına etkisi

ÖZET

Enerji, ekonomik ve sosyal kalkınmanın vazgeçilmez temel taşlarından biri olarak, toplumun refahı için üretim faaliyetlerinin ana kalemlerinden biridir. Bundan dolayı yaşam standartlarının gelişimi için ihtiyaç duyulan enerjinin yeterli, sürekli ve düşük maliyetle sağlanarak sunulması önemli bir gerekliliktir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerinin (PHES) kuruluş amacı pik talebin karşılanması iken, aynı zamanda suyun potansiyel enerjisi şeklinde depolanması maksadıyla da planlanmaktadır. Bu çalışmada dünyada ve ülkemizde mevcut PHES'ler incelenerek, Oymapınar hidroelektrik santrali rezervuarının alt rezervuar olarak kullanıldığı ve 372 m kotunda 1.000.000 m³ - 2.500.000 m³ - 5.000.000 m³'lük 3 farklı üst rezervuar hacmi baz alınarak; 400 m uzunluğunda, 3 m çapında beton kaplamalı 1 adet enerji tüneli, 500 m uzunluğunda ve 5 m çapında 1 adet kuyruk suyu tüneli, -10 m kotunda 1 adet santral binası, Santral binası içinde 3 adet türbin ve alt rezervuar olarak da Oymapınar HES Rezervuarının kullanılması planlanmıştır. Yapılan tasarım çalışması analitik hesaplamalar ile yapılarak, hesaplamalar sonucunda her bir senaryo için 245.120.073 \$ – 321.920.073 \$ – 351.520.073 \$ yatırım bedeli ve 15-9-9 yıllık rantabilite oranı bulunmuştur.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.01.04>

Pumped Storage Hydroelectric Power Plant Design

ARTICLE INFO

Received: 07.09.2020
Accepted: 19.04.2021

Keywords:
Energy storage, energy efficiency, the impact of pumped storage on the electricity market

ABSTRACT

Energy, as one of the indispensable cornerstones of economic and social development, is one of the main items of production activities for the welfare of the society. Therefore, it is an important necessity to provide the energy needed for the development of living standards by providing sufficient, continuous and low cost. While the purpose of establishing Pumped Storage Hydroelectric Power Plants (PHES), one of the renewable energy resources, is to meet the peak demand, it is also planned to store water as potential energy. In this study, by examining the existing PHES in the world and in our country, based on 3 different upper reservoir volumes of 1.000.000 m³ - 2.500.000 m³ - 5.000.000 m³ at 372 m altitude and where Oymapınar hydroelectric power plant reservoir is used as lower reservoir; 1 energy tunnel with 400 m length, 3 m diameter concrete lined, 500 m long and 5 m diameter tail water tunnel, 1 powerhouse at -10 m elevation, 3 turbines in the power plant and the Oymapınar HEPP Reservoir as a sub-reservoir It is planned to be used. The design study was carried out with analytical calculations, and as a result of the calculations, an investment cost of \$ 245.120.073 - \$ 321.920.073 - \$ 351.520.073 and a 15-9-9 year profitability ratio was found for each scenario.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.01.04>

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi, maliyet artışı, küresel ısınma, çevresel kirlilik ve enerji ihtiyacındaki artışlar nedeniyle; yenilenebilir enerji kaynakları tüm zamanlardan daha önemli hale gelmiştir [1] ve [2].

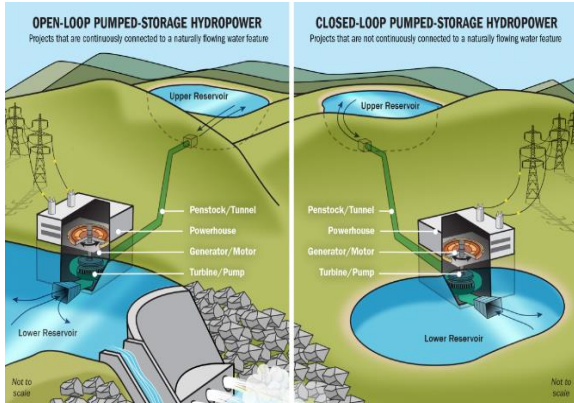
Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç üretim miktarları mevsimler, aylar, günler vb. birçok faktöre bağlı olarak değiştiği için güç üretiminde süreklilikleri yoktur. Pompaj depolamalı hidroelektrik santraller (PHES) enerjinin depolanması sorununda çözüm için bilinen en eski yöntemdir. Pompalanan depolama

*Sorumlu yazar: onder.cicek@euas.gov.tr

To cite this article: Ö. Çiçek and M. B. Özdemir, "Pumped Storage Hydroelectric Power Plant Design", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.1, pp. 26-35, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.01.04

tesisleri, bir baraj kapağı ile farklı yüksekliklerde ve birbirine bağlı durumdaki iki su deposundan oluşur. Yoğun olmayan dönemlerde su üst rezervuara pompalar vasıtasıyla gönderilerek, yoğun dönemlerde düşük rezervuara boşaltmak vasıtasıyla enerji üretilir. Pompaj depolamalı hidroelektrik santrali (PHES), Rüzgar Enerji Santrali (RES) ve Güneş Enerji Santrali (GES) gibi sürekliliği olmayan kaynakları dengelemek için kullanılabilir başlıca yenilenebilir enerji kaynağı olması da diğer bir avantajlı kısmıdır. Çünkü Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrali (PHES) artan güç talebini karşılayabilir ve sera gazı emisyonlarının düşmesini sağlayabilir [3]. Ayrıca, işletme esneklikleri ve talep değişikliklerine veya spot fiyata hızlı cevap verebilmeleri, yakıt maliyetini düşürmeyi mümkün kılar [4].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının depolanması teknolojileri Diaz-Gonzalez vd. tarafından ayrıntılı şekilde incelenmiştir [5]. Bu sistemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen fazla enerji, seviyesi daha yukarıda olan bir rezervuara pompalanan suyun yaratacağı potansiyel enerjisi formunda depolanabilir ve ne zaman istenirse rezervuardan bırakılan su ile tekrar elektrik üretilir. Literatür çalışmalarına ve dünya üzerinde kurulu ve işletmede olan mevcut PHES'ler incelendiğinde, bu sistemlerin saf PHES ya da karışık PHES olmak üzere iki çeşit olabileceği görülmüştür [6,7].



Şekil 1. a) Saf PHES Sistemi (*Open-Loop PSH*),
b) Karışık PHES Sistemi (*Closed-Loop PSH*) [8]

Sue 2018 yılında yaptığı çalışmada, günümüzde artan elektrik talebi ve çevresel sorunlar nedeniyle yenilenebilir enerjilerin en iyi seçenek haline geldiğini ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş kullanımının önündeki en büyük sorunun enerji depolaması olduğunu belirtmiştir [9]. Gabriel V. ve ark., 2019 yılında yaptıkları çalışmalarında mevsimsel değişkenlikler nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili olması, tamamlanmamış veya terk edilmemiş depolamalı hidroelektrik

santrallerinin yeniden kullanım potansiyelleri nedeniyle hibrit enerji sistemlerinde dikkate alınması gereken önemli bir seçenek olduğunu belirtmişlerdir [10]. Harby A. ve ark., 2013 yılındaki çalışmalarında, Rezervuarlı hidroelektrik santralinin, günümüzde yenilenebilir enerji depolamasının tek şekli olduğu belirtilerek, PHES genellikle türbin veya pompalama modunda yalnızca birkaç saat çalışacak şekilde tasarlandığı ve teknik olarak PHES, ayrı bir türbin ve pompa veya tersinir bir pompa türbini ile donatıldığı belirtilmiştir [11]. Shanti S. ve ark., rekabetçi piyasa yapısında, basit hidroelektrik santrallere kıyasla, pompaj depolama tesisinin kârı, piyasa fiyatı yüksek olduğunda jeneratör olarak ve fiyat düşük olduğunda pompa olarak çalıştırılarak en üst düzeye çıkarılabileceğini belirtmiştir [12].

Aytaç, İ. H., (2010), hazırladığı yüksek lisans tez çalışmasında, enerji kaynağı olarak rüzgar ve güneşin kullanıldığı hibrit bir santral modeli oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaca yönelik olarak veri toplama sisteminden alınan verileri incelemiştir. Verilere dayalı olarak da bölgenin rüzgar ve güneş enerji potansiyelini belirlemiş ve bölgesel enerji ihtiyacına dayalı rüzgar ve güneş enerji modelini oluşturmuştur [13].

Can, T. M., (2010), hazırladığı yüksek lisans tez çalışmasında enerjiye duyulan ihtiyacın artması, kullanılan enerji kaynaklarının çevre kirliliğine neden olması ve tükenebilir olmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarından yapılacak üretime ihtiyaç olduğunu belirtmiştir. Yaptığı çalışmada Hatay ili İskenderun bölgesi için güneş ve rüzgâr enerjilerinin kaynak olarak kullanıldığı hibrit bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde, güneş ve rüzgâr kaynakları vasıtasıyla elde edilen enerji akülerde depolanmakta ve ihtiyaç halinde pompaya aktarılmaktadır. Akülerin dolu olduğu zamanlarda üretilen enerji direkt yüke aktarılmaktadır. Akülerin boş olduğu yani sistemin çalışmadığı zamanlarda sistemin enerjisi jeneratörden sağlanmaktadır [14].

Kutlu, C., (2012), hazırladığı yüksek lisans tez çalışmasında, nehir tipi pompajlı hidroelektrik santrali projelerinin risk değerlendirmesi için yeni bir yöntem uygulamıştır. Önerilen yöntem, bulanık kümeler ve uzman yargılarını kullanılan çok ölçütlü bir değerlendirme sistemidir. Gerçekleştirilen teknik geziler, uzman yargıları ve literatür taraması sonucunda toplam 11 adet risk faktörü tespit etmiştir. Çalışmada girdi olarak kullanılan risk faktörleri: arazi jeolojisi, arazi kullanımı, çevresel sorunlar, şebeke bağlantısı, toplumsal kabul, finansal, doğal afet,

kanun ve yönetmelik değişikliği, terör, altyapı erişimi ve nakit akışı. Risk faktörlerinin önem dereceleri uzmanlarla gerçekleştirilen anketler sonucunda belirlenmiştir ve anket sonuçlarına göre çevresel konular ve tesisin inşa edileceği saha jeolojisi en önemli risk faktörleri olarak ortaya çıkmıştır. Belirlenmiş olan risk faktörlerinin puanlanması neticesinde proje risk indeksi çıktı olarak elde edilmiştir. Risk indeks değerine bağlı olarak, proje riski düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olarak sınıflandırılmıştır [15].

Karaçay, P., (2010), yaptığı çalışmasında pompaj depolamalı santraller, yeni devreye girecek doğal akışlı HES, termik, ve rüzgar santralleri için de ideal bir tamamlayıcı ortak olduğunu savunmuştur [16].

Demirhan, A. Y., (2013), hazırladığı doktora tezinde rüzgâr kaynaklı elektrik üretiminin sistem içindeki payının artması, rüzgar enerjisinin dalgalanması nedeniyle elektrik sisteminin dengesi ve enerji kalitesini bozucu etkiye sahip olduğunu belirtmiştir [17].

Farklı kaynak tiplerine sahip santrallerin devreye girme ve tam kapasiteye ulaşma zamanları ile ilgili Japonya’da yapılan bir çalışmanın sonuçları Tablo-1’de verilmiştir. Bu çalışmada ilgili santrallerde üretime 8 saat ara verildikten sonra santraller çalıştırılarak sonuçlar alınmıştır [18]. Tablo-1’den de anlaşılacağı gibi pompaj depolamalı hidroelektrik santraller ile klasik hidroelektrik santraller haricindeki farklı kaynak tipindeki santrallerin puant ihtiyacını (elektrik tüketimini en yüksek olduğu saatler) karşılama yeteneğine sahip değildir.

Tablo 1. Farklı kaynak tipindeki santrallerin devreye girme ve tam kapasiteye ulaşma anları (*Moments of activation and full capacity of power plants of different source types*) [18]

Proje Tipi	Başlama ve Tam Kapasiteye Ulaşma Süresi
Klasik Hidroelektrik Santraller	3-5 dakika
Pompaj Depolamalı Santraller	3-5 dakika
Fuel-Oil Santralleri	3 saat
LNG-DoğalGaz Santralleri	3 saat
LNG-Çevrim Santralleri	1 saat
Kömür Santralleri	4 saat
Nükleer Santraller	5 gün

Bu çalışmada, PHES’in önemi vurgulanarak, şu an hiç pompaj depolamalı hidroelektrik santrali olmayan ve yenilenebilir enerji kaynaklarında sahip olduğu

potansiyele rağmen enerji üretiminin büyük kısmını fosil yakıtlara dayandıran Türkiye için örnek bir tasarım şeklinde sunulmaktadır.

Tablo 2. Enerjinin Depolanma Amaçları (Storage purposes of energy) [20]

Amaç	Zaman Aralığı	Açıklama
Enerji Kalitesini Yükseltme	Saniyeler mertebesinde ya da daha kısa sürer	Enerji kalitesinin sürekliliğinin sağlanması
Güçü Destekleme	Saniyelerden dakikalar mertebesine kadar	Farklı enerji üretim merkezlerini kesme/devreye almalarda enerjinin sürekliliğinin sağlanması
Enerji Yönetimi	Saatlerden günler mertebesine kadar	Enerji üretim fazlası/ekonomik olduğu zamanlarda depolanması ve ihtiyaç halinde kullanılması

Yapılacak PHES tasarım çalışması için Antalya, Isparta ve Burdur illerini kapsayan elektrik dağıtım bölgesi seçilmiş ve 372 m kotunda 3 farklı üst rezervuar hacmi için, 400 m uzunluğunda, 3 m çapında beton kaplamalı 1 adet kuyruk suyu tüneli, -10 m kotunda 1 adet kuyruk suyu tüneli, -10 m kotunda 1 adet santral binası, santral binası içinde 3 adet türbin ve alt rezervuar olarak da Oymapınar HES rezervuarı kullanılarak 3 farklı senaryoda Pompaj Depolamalı HES tasarımı yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarının Türkiye’deki yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmaya yönelik önemli bir tasarım çalışması olması beklenmektedir. Ayrıca enerji planlaması yapan kişi/kuruluşlar ve karar verici merciler için bir araç olarak kullanılması hedeflenmektedir.

2. PHES VE UYGULAMALARI (PUMP STORAGE HEPP AND APPLICATIONS)

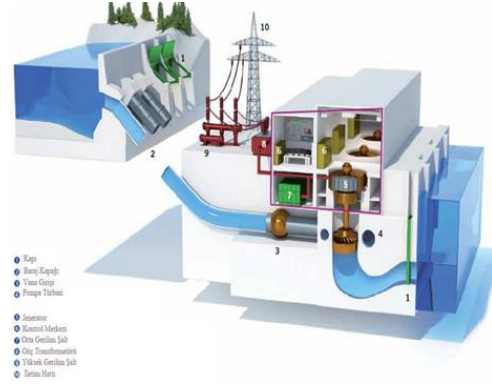
Pompaj depolamalı hidroelektrik santraller (PHES) suyun tekrar tekrar elektrik üretiminde kullanılabilirdiği elektrik enerjisi depolama türlerinden biridir. PHES, elektrik enerjisi fiyatının genellikle yüksek olduğu puant saatlerinde türbin modunda, elektrik enerjisi fiyatının genellikle düşük olduğu gece saatlerinde pompa modunda işlev görmektedir [19].

Süper kapasitörler, konvansiyonel bataryalar ve hava sıkıştırılmalı depolama gibi diğer enerji depolama biçimleriyle kıyaslandığında, PHES’ler, yatırım maliyetinin büyüklüğü ve inşa süresinin uzunluğu

açısından dezavantajlı olsada, depolama kapasitelerinin büyüklüğü, temiz enerji olması ve verimlilikleri açısından diğer depolama türlerinden daha avantajlıdır.

2.1 Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Yapısı (Structure of Hydroelectric Power Plants with Pumped Storage)

Pompaj depolamalı hidroelektrik santrali iki rezervuardan, pompalardan, türbinlerden, motorlardan, jeneratörlerden, cebri borulardan, akış kontrol valflerinden, sistem kontrolöründen ve yardımcı ekipmanlardan oluşur. PHES, 90 saniye içerisinde çevrimiçi olur ve 120 saniye içinde tam güce çıkabilir. Ayrıca pompalama modundan üretime veya üretimden pompalama moduna 180-240 saniye aralığında geçebilir [21]. Pompaj depolamalı sisteminin küresel verimliliği %75 ile %80 arasındadır [22].



Şekil 2. PHES Sistemi ve Elemanları (Pumped storage power plant system and components)

Tablo 3. Gidiş-Dönüş Verimliliği & Çalışma Verimliliği (Round trip efficiency & working efficiency) [22]

	Düşük %	Yüksek %
Üretim Elemanları		
Su İletkenleri	97.40	98.50
Pompa Türbini	91.50	92.00
Generatör Motoru	98.50	99.00
Transformatör	99.50	99.70
Ara Toplam	87.35	89.44
Pompa Elemanları		
Su İletkenleri	97.60	98.50
Pompa Türbini	91.60	92.50
Generatör Motoru	98.70	99.00
Transformatör	99.50	99.80
Ara Toplam	87.80	90.02
İşletme	98.00	99.50

2.2 Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral Çeşitleri (Types of Hydroelectric Power Plants with Pumped Storage)

Pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri (PHES) iki temel tipten oluşur;

a) Saf (veya akımdan arındırılmış) PHES (kapalı döngü sistemler), enerji üretmek için bir üst rezervuar içine pompalanan suya dayanır. Saf PHES, biri dere dışında olan ve diğeri nehir, göl veya deniz olan iki rezervuar arasında suyu taşır (ABD Ordusu Mühendisler Birliği 1985) [23].

b) Geri-Pompa enerji santralleri olarak da bilinen Birleşik PHES (açık döngü sistemler), suyu depolamak / bırakmak ve elektrik üretmek için pompalanmış, doğal akışlı suları kullanır.



Şekil 3. Saf PHES örnekleri (Open Loop PSH) [24]

Değişken Hızlı PHES: Kullanılan PHES'ler genellikle sabit hızlı pompa türbinlerinden oluşmaktadır. Ancak, bunlar boşaltma modunda frekans regülasyonu sağlayabilirlerken pompalama modunda sağlayamazlar. Öncülüğünü Japonya'nın yaptığı Değişken Hızlı PHES teknolojisi, tesislerin pompalama işlemi sırasında frekansı düzenlemesine izin verir.

Deniz Suyu PHES: Japonya'nın Okinawa'da kullanarak öncülük ettiği bu tesis tipinde, açık deniz düşük rezervuar olarak kullanılır. Hollandalı danışmanlık şirketi DNV KEMA, denizin üst rezervuar olarak kullanıldığı ve deniz seviyesinden 50 metre aşağıda bir tesis inşa eden projesi de dâhil olmak üzere, bu teknolojiyle bağlantılı olarak yeni projeler geliştirilmektedir.

Yeraltı PHES: Yeraltı mağaralarının düşük rezervuar olarak kullanılmasına dayalı bu sistemlerin henüz hiçbir örneği yoktur.

2.3 Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Olumlu Ve Olumsuz Yönleri (*Pumped Storage Hydroelectric Power Plant Positive and Negative Aspects*)

PHES'lerin avantajları, uzun kullanım ömürleri, yüksek kapasite imkanı ve pratikte sınırsız çevrim ömürleridir. PHES tesisleri enterkonnekte sistemini depolama sayesinde kesintilerden koruyabilir. Ayrıca harmonik sapmaları azaltabilir, voltaj düşüşlerini ve dalgalanmalarını engelleyebilir. Konvansiyonel tip hidrolik santralleriyle karşılaştırıldığında, PHES'lerin kavistasyon sınırları daha düşük olduğundan daha geniş aralıklarda kullanılabilirler [23].

PHES'ler kısa sürede üretime başlayabilme ve sıfır yükte çalışabilme yeteneklerine sahiptirler. Hâlihazırda, pompaj depolamalı hidroelektrik santrali teknolojileri düşük seviyede elektrik maliyetine sahip santrallerden biridir. Rüzgâr ve güneş santrallerinin üretim miktarlarındaki değişkenlik ve kesinti nedeniyle tahmin sapmalarında elektrik üretiminin stabil olmasını sağlar ve üretim tüketim dengesini korur. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının şebeke entegrasyonunu maksimum kapasitede tutarak, sistemin daha kararlı şekilde işletilebilmesine olanak verir [23].

PHES sisteminin dezavantajları ise, suyun alt rezervuardan üst rezervuara pompalanması nedeniyle ilk yatırım maliyeti standart bir hidroelektrik santraline göre daha yüksektir. İşletme ve bakım

maliyetleri için daha düşük, inşaat harcamaları içinse daha yüksek sermaye yatırımına ihtiyaç vardır. Çevresel etkiler de önemli bir dezavantajdır. PHES rezervuarının yapımı esnasında doğal akışın engellenmesi, suyun ekosisteminde bozulma, manzarada değişiklikler ve vahşi hayatı etkileyen olumsuzluklar görülebilir [23].

Pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerin planlanmasında proje maliyetinin düşük olması, talep bölgesine yakın olması, aktif fay hatlarından uzaklığının 10 km den fazla olması, jeolojik uygunluğu, parklar ve sit alanları gibi korunan alanlar ile bitki ve hayvan yerleşim alanlarından uzak olması gibi temel kriterler aranmaktadır.

2.4 PHES'lerin Dünyada ve Türkiye'deki Durumu (*Pumped Storage Hydroelectric Status in The World and Turkey*)

Pompaj depolamanın ilk kullanımı konusunda net bir bilgi olmamakla birlikte birçok kaynaktan 1890'larda İtalya ve İsviçre'de [25] ve [26] olduğunu göstermektedir. PHES'ler yaklaşık olarak 135.000 MW'ın üzerinde kurulu güç ile 39 ülkede işletilmektedir. Bu ülkeler arasında Japonya toplam kurulu gücünün yaklaşık %10'una karşılık gelen 25000 MW ile ilk sıradadır. Çin'in PHES potansiyeli hızla artmakta olduğundan, gelecekte dünya ülkeleri arasında ilk sırada olması beklenmektedir. Tablo 4'de dünyadaki değişik ülkelerdeki kurulu PHES'lerin ve planlanan PHES'leri güç değerleri yer almaktadır.

Tablo 4. Dünyadaki mevcut ve planlanan PHES'ler (*Existing and planned pumped storage plants in the world*) [27]

	Ülkeler	Mevcut Maksimum Toplam Güç (MW)	Planlanan Maksimum Toplam Güç (MW)
1	Arjantin	987	0
2	Avustralya	2.754	0
3	Avusturya	2.837	1.700
4	Belçika		0
5	Brezilya	191	0
6	Bulgaristan	535	864
7	Kanada	122	0
8	Şili	29	0
9	Çin	855	4.445
10	Rusya	835	12.048
11	Kolombiya	31	0
12	Hırvatistan	280	0
13	Finlandiya	0	525
14	Çek Cumhuriyeti	1.153	0
15	Fransa	5.846	0
16	Almanya	6.621	0
17	Macaristan	0	1.280
18	Hindistan	2.427	1.886

19	İran	0	1.140
20	İrlanda	292	0
21	İsrail	800	800
22	İtalya	7.421	1.611
23	Japonya	24.733	2.987
24	Kore	1.152	670
25	Meksika	0	2.600
26	Fas	0	780
27	Norveç	1.014	0
28	Filipinler	300	1.800
29	Polonya	1.550	92
30	Portekiz	558	149
31	Romanya	237	293
32	Slovakya	0	969
33	Güney Afrika	1.787	0
34	İspanya	5.208	3.218
35	İsveç	426	0
36	İsviçre	2.678	0
37	Tayvan	1.008	1.620
38	Tayland	410	743
39	İngiltere	3.242	0
40	ABD	20.184	1.576

Türkiye’de elektrik enerjisi arz güvenliğine bölgesel olarak bakıldığında üretimin tüketimi karşılamadığı ve üretimin tüketimden çok fazla olduğu bölgelerin olduğu görülmektedir. Bu nedenle PHES’lerin yer seçiminin arz güvenliği açısından, tüketimin fazla ve üretimin düşük olduğu bölgelerde olması önemli olduğundan, yer seçiminde elektrik tüketiminin yoğun olduğu ile üretimin tüketimi karşılama oranının düşük olduğu bölgeler ve Türkiye’nin hidroelektrik potansiyeli de dikkate alınmıştır. [29].

Tablo 5’de belirtildiği üzere, EİE genel müdürlüğü tarafından 2009 yılında yapılan istikşaf/ön fizibilite çalışmaları sonucunda, toplam 13.700 MW kurulu güç olarak planlanan 16 tane saha belirlenmiş ve bu sahalardan yenilenebilir enerji kaynaklı kurulu güç artışı ve nükleer projelerin devreye giriş tarihlerine göre aşağıdaki sırayla devreye alınmasının uygun olacağı belirlenmiştir.

- 1) Gökçekaya PHES: 1.400 MW
- 2) Oymapınar PHES: 500 MW
- 3) Karacaören-2 PHES: 1.000 MW
- 4) Bayramhacılı PHES: 500 MW
- 5) Altinkaya PHES: 1.800 MW
- 6) Yamula PHES: 500 MW

3. TASARIM (DESIGN)

Bu çalışma, örnek bir pompaj depolamalı bir hidroelektrik santralini inşa etme çalışmasıdır. Bir

PHES, yalnızca güç üretiminde bulunmakla kalmaz, elektrik enerjisinin arz ve talep durumuna göre depolama imkanı da sağlar. Dahası, kısa sürede arz ve talep dengesindeki değişiklikleri özümleme ve sistem frekansını sabit tutma işlevlerinde de mükemmel bir yeteneğe sahiptir. Sonuçta, PHES gereğince değerlendirilirse, mevcut şartlarda dahi ekonomik olması ve ileriki dönemlerde daha da ekonomik hale gelmesi beklenmektedir.

PHES uygulamasının yararlarının aşağıdaki şekilde olacağı düşünülmektedir:

(1) Azami Talep ile İlgili Enerji Üretimi

PHES’in yıllık sabit maliyeti öyle düşüktür ki, yıllık yük faktörünün %20’nin altında olması sayesinde azami talep için diğer enerji santrallerinden daha iyi bir durumdadır.

(2) Enerji Depolama İşlevi

Suyu alt rezervuardan üst rezervuara pompalayarak ve yoğun dönemlerde üst rezervuarda depolanmış suyu kullanmak suretiyle elektrik üreterek, enerji depolama kayıpları dikkate alınsa dahi karını korumaktadır.

(3) Yan Hizmet Temini

İşletme esnasında, üretimdeki hızlı ayar, sistem frekansındaki düzensizliği azaltmaktadır. Ayrıca, durdurulsa dahi sonraki 5 dakika içerisinde üretim tekrar geçme yeteneğine sahip olan PHES, ani üretim kayıplarını veya rüzgar enerjisi, güneş enerjisi vb.

üretim çeşitlerinde öngörülme-yen dengesizliklere karşı emniyet kilidi görevini görür.

Aşağıdaki iki nokta, yan hizmet işlevi kullanımından elde edilen faydalar olarak düşünülmektedir.

- İşletme esnasında (üretim modu ve pompalama modu), PHES frekans kontrolü yapar ve söz konusu işlevin temininden kazanç elde eder.

- Durma esnasında, PHES her zaman bir marjinal tedarik kapasitesi olarak hazır bulunur ve kısa bir sürede faaliyete başlayabilir (yaklaşık beş dakika içinde). Elektrik sisteminin arz talep dengesini etkileyen öngörülme-yen bir kazanın (örneğin, büyük ölçekli bir enerji santralinin kesintiye uğraması) gerçekleşmesi durumunda, arz enerjisi emniyete alınır.

Tablo 5. EİE pompaj depolamalı hidroelektrik santral projeleri (EIE pumped storage power plant projects) [27]

Tesis Adı	Kurulu Gücü (MW)	İli	Türü	Proje Debisi (m ³ /s)	Düşü (m)
İznik I PHES	1.500	Bursa	Tamamen Yeni Yatırım	687	255
Gökçekaya PHES	1.400	Eskişehir	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	193	962
Sarıyar PHES	1.000	Ankara	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	270	434
Bayramhacılı PHES	1.000	Kayseri	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	720	161
Hasan Uğurlu PHES	1.000	Samsun	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	204	570
Adıgüzel PHES	1.000	Denizli	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	484	242
Burdur PHES	1.000	Burdur	Tamamen Yeni Yatırım	316	370
Eğridir PHES	1.000	İsparta	Tamamen Yeni Yatırım	175	672
Kargı PHES	1.000	Ankara	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	238	496
Karacaören II PHES	1.000	Burdur	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	190	615
Yalova PHES	500	Yalova	Tamamen Yeni Yatırım	147	400
Yamula PHES	500	Kayseri	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	228	260
Oymapınar PHES	500	Antalya	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	156	372
Aslantaş PHES	500	Osmaniye	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	379	254
İznik II PHES	500	Bursa	Tamamen Yeni Yatırım	221	263
Demirköprü PHES	300	Manisa	Mevcut Baraj Gölüne Entegre	166	213

Ülkemizdeki elektrik enerjisi arz güvenliği bölgesel olarak incelendiğinde; elektrik üretiminin tüketimi karşılamadığı bölgeler ve elektrik üretiminin tüketiminden çok fazla olduğu bölgelerin olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle PHES'lerin yer seçimi yapılırken arz güvenliği açısından tüketimin yüksek ve arz açığının olduğu bölgelerin projelendirilmesi önemlidir. Bu kapsamda PHES'ler elektrik tüketiminin yoğun olduğu ve bölgesel arz güvenliği açısından üretimin tüketimi karşılama oranının düşük olduğu bölgeler ve Türkiye'nin hidroelektrik potansiyeli de dikkate alınarak incelenmiştir [28].

Bu çalışmada; elektrik piyasasının yapısı, gelişimi ve uzun yıllardır dünyada pik saatlerdeki enerji ihtiyacını karşılamak için kullanıldığı halde henüz ülkemizde bir örneği bulunmayan pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerin çalışma prensibini, dünyadaki örnekleriyle birlikte açıklamak, pompaj depolamalı hidroelektrik santraller konusunda uygulanabilir örnek bir tasarım oluşturabilmek amaçlanmıştır.

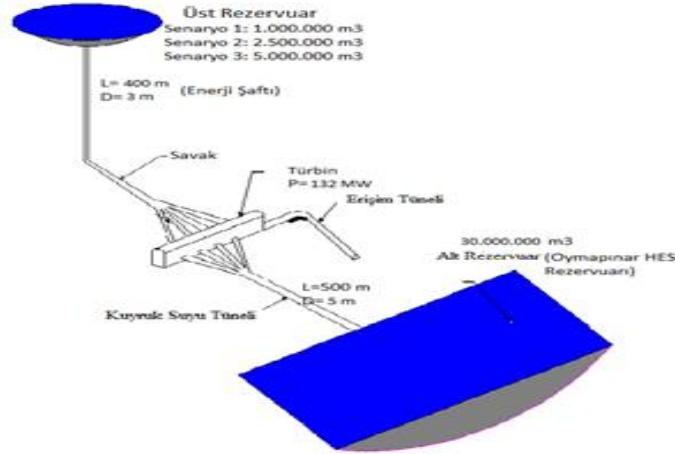
Sistem tek hat olarak tasarlanmış yani sistem ya pompa modunda çalışarak suyu depolar ya da türbin modunda çalışarak suyu aşağı bırakır ve enerji üretir. Dünyada çift hatta sahip olan sistemlerde bulunmaktadır, fakat bu çalışmada kurulum maliyetinin düşüklüğü nedeniyle tüm hesaplar tek hat üzerinden yapılmıştır.

Tablo 6. Tasarlanan PHES'in karakteristik özellikleri (Characteristics of the designed PHES)

	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Rez. Hacmi (m ³)	1.000.000	2.500.000	5.000.000
Enerji Tüneli Boyu (m)	400	400	400
Enerji Tüneli Çapı (m)	3	3	3
Kuyruk Suyu Tüneli Boyu (m)	500	500	500
Kuyruk Suyu Tüneli Çapı (m)	5	5	5
Maksimum Su Kotu	377	377	377
Minimum Su Kotu	365	365	365
Kret Kotu	380	380	380

Bu çalışma kapsamında Tablo 6'da ana karakteristik özellikleri belirtilmiş 372 m kotunda 3 farklı üst rezervuar hacmi baz alınarak; 400 m uzunluğunda, 3 m çapında beton kaplamalı 1 adet enerji tüneli, 500 m uzunluğunda ve 5 m çapında 1 adet kuyruk suyu tüneli, -10 m kotunda 1 adet santral

binası, Santral binası içinde 3 adet türbin ve alt rezervuar olarak da Oymapınar HES Rezervuarının kullanılması planlanmıştır. Oymapınar Pompaj Depolamalı HES 7 saat çalışacak şekilde planlanmıştır.



Şekil 4. Tasarlanmış Olduğumuz Pompaj Depolamalı HES'in Çalışma Şeması (Operation Scheme of the Pump Storage HEPP We Designed)

Tablo 6'da verilen değerler doğrultusunda her bir senaryo için yapılan hesaplamalarda kurulacak PHES'in gücü ve kaç ünite olacağı tablo 7'de belirtilmiştir.

Tablo 7. Tasarlanan PHES Gücü (Designed Pump Storage HEPP Power)

	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Debi (m ³ /s)	39,682	99,206	198,412
Net Düşü Yüksekliği	195,723	173,221	92,897
$P = \gamma \times Q \times H_n \times \eta$ P: Türbin Gücü (kW) γ : 9,81 (Yerçekimi ivmesi) Q: Debi (m ³ /s) H _n : Net düşü (m) η : verim =0,9	68.572,02	151.722,50	162.735,06
P: Türbin Gücü (MW)	69 MW (3 Ünite x 33 MW)	150 MW (3 Ünite x 50 MW)	162 MW (3 Ünite x 54 MW)

Kurulacak olan örnek tesisin maliyet hesaplarında Bayındırlık Bakanlığı, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü 2010-6 sayılı Gökçekaya Pompajlı HES İlk Etüt Raporu (29) ve Devlet Su İşleri Birim

fiyatlarından (30) yararlanılarak hesaplanan her bir senaryonun proje bedeli Tablo 8 'de belirtilmiştir.

Tablo 8. Tasarlanan PHES maliyetleri (Designed Pump Storage HEPP Costs)

Açıklama		Yatırım Tutarı (\$)
Proje Bedeli	Senaryo 1	245.120.073
	Senaryo 2	321.920.073
	Senaryo 3	351.520.073

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Depolama sistemleri, güvenilir enerji ihtiyacının karşılanmasında bir çözüm niteliği taşımasından dolayı önemli bir konudur. Pompaj depolamalı sistemler, enerji talebindeki dalgalanmaları dengeleyebilmesi nedeni ile kısa dönem arz güvenilirliğini garanti altına almaktadır. Bu santrallerin inşası ile de uzun dönem arz güvenilirliği ve istikrarlı enerji yönetimine de katkı sağlanabilecektir. Ülkemizde 17 adet pompaj depolamalı hidroelektrik santralin ilk incelemesi yapılarak raporu hazırlanmış, ancak henüz işletmede bir PHES yapılamamıştır. Ayrıca ön fizibilitesi yapılarak projelendirilmesi düşünülen yaklaşık 70 adet PHES bulunmaktadır.

Mevcut hidroelektrik potansiyelimizin yaklaşık 47.497 MW (İşletmede, İnşaat Halinde, İnşaatına

Henüz Başlanmayan) civarında olduğu ifade edilmektedir [30]. Bu potansiyelin bir kısmını PHES olarak planlanmalı ve gerekli yasal düzenlemelerde hızlı bir şekilde tamamlanmalıdır. 2019 yılı Temmuz ayı maksimum ani puant gücümüzün 45.180 MW [31], Rüzgar Enerji Santrali (RES) kurulu gücümüz 7.155 MW yani RES, puant gücün % 15,83'ü kadar. Bu gücü PHES olmadan doğrudan şebekeye bağlayarak yönetmek güçtür. Ülkemiz elektrik arz güvenliği için PHES yapımı konusunda daha somut adımların atılmasının gerekli olduğu yadsınamaz bir gerçektir.

TEİAŞ 2019 yıllık bülteninde belirtilen 2019 yılı en düşük PTF miktarları dikkate alınarak yapılan hesaplama doğrultusunda elde edilen üretim ve tüketim bedelleri aşağıdaki tabloda belirtilmektedir. Yapılan tasarım çalışmasında, Enerji Üretimi için Piyasa Takas Fiyatının nispeten yüksek olduğu 17.00 - 23.00 saatleri arasındaki 7 saat seçilmiştir. Pompalama işleminde tüketilecek enerji miktarları ve tüketim bedelleri, Türbin modunda üretilecek enerjinin miktarları ve üretim bedelleri üstteki tabloda verilmiş olup, tasarımın rantabilite oranının 9 ile 15 yıl olduğu görülmüştür. PHES yatırımlarının enerji arz güvenliği için hayati öneme sahip olduğu gerçeği unutulmayarak, yatırımların, devletler tarafından teşvik ve sübvansiyonlar gibi araçlarla desteklenmesi uzun vadede, hem devletin hemde piyasa katılımcılarının menfaatine olacaktır.

Tablo 9. Tasarlanan PHES Verileri (Designed Pump Storage HEPP Datas)

	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Üretilecek Enerji Miktarı (GW/yıl)	176,30	383,25	413,91
Tüketilecek Enerji Miktarı (GW/yıl)	208,57	461,49	494,99
Üretim Bedeli (\$)	52.943.151	115.093.808	124.301.312
Tüketim Bedeli (\$)	36.325.112	80.372.973	86.206.731
Net Fayda	16.618.039	34.720.835	38.094.581
Yatırım Bedeli	245.120.073	321.920.073	351.520.073
Rantabilite Oranı	15	9	9

ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. E. Rhafiki, Y. Zeraoui, "Energy Storage: Applications and Challenges," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 120, pp.59–80, 2014.
- [2] P. D. Brown, J. P. Lopes, M. A. Matos, "Optimization of Pumped Storage Capacity in An Isolated Power System with Large Renewable Penetration," *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp.523-531, 2008.
- [3] E. Ingram, "Pumped Storage Development Activity Snapshots," *Hydro Review, Worldwide*, vol. 17 pp.12–25, 2009.
- [4] P. Kanakasabapathy, "Economic Impact of Pumped Storage Power Plant on Social Welfare of Electricity Market," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 45, pp.187–193, 2013.
- [5] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, R. Villafafila-Robles, "A Review Of Energy Storage Technologies For Wind Power Applications," *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2154-2171, 2012.
- [6] J. P. Deane, B .P. O. Gallachóir, E. J. Mckeogh, "Technoeconomic Review Of Existing And New Pumped Hydro Energy Storage Plant," *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1293-1302, 2010.
- [7] A. A. Sertkaya, M. Saraç, M. A. Omar, "Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Türkiye İçin Önemi," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol.1, pp. 369-382, 2016.
- [8] <https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower>, Erişim Tarihi: 24.12.2020.
- [9] W. Sue, "Application of Pumped Hydroelectric Energy Storage for Photovoltaic Based Rural Electrification," *International Journal for Innovative Research in Multidisciplinary Field*, vol.4, pp.35-39, 2018.

- [10] V. Gabriel, S. S. Jones, A. C. Fausto, B. Alexandre, J. D. Souza and G. Elton, "A Hydro Pv Hybrid System for The Laranjeiras Dam (In Southern Brazil) Operating with Storage Capacity in The Water Reservoir," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol.10, pp.83-97, 2019.
- [11] A. Harby, J. Sauterleute, M. Korpas, A. Killingtveit and E. Solvang, "Pumped Storage Hydropower," *Transition to Renewable Energy Systems*, pp.597-613, 2013, doi:10.1002/9783527673872.ch29.
- [12] P. Kanakasabapathy, K. S. Swarup, "Bidding strategy for pumped-storage plant in pool-based electricity market," *Energy conversion and Management*, vol. 51, no. 3, 572-579. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.001>
- [13] İ. H. Aytaç, Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Kullanan Hibrit Santral İçin Model Oluşturma, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak, 2010.
- [14] T. M. Can, "Rüzgar ve Güneş Enerjisi İle Bir Pompanın İhtiyacı Olan Elektrik Enerjisinin Sağlanması," Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, 2010.
- [15] C. Kutlu, "Nehir Tipi Hidroelektrik Santrallerde Bulanık Mantık Yöntemiyle Risk Değerlendirilmesi," Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2012.
- [16] P. Karaçay, "Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller Ve Türkiye'deki Durum," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010.
- [17] A. Y. Demirhan, "Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyelinin Pompa Depolamalı Hidroelektrik Santraller İle Elektrik Şebekesine Entegrasyonu," Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.
- [18] Ü. Ünver, H. Bilgin, A. Güven, "Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Sistemler," *Mühendis ve Makina*, vol. 56, pp. 57-64, 2015.
- [19] E. Ayder, E., "Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller (PDHES'ler)," Teknik Rapor, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2015.
- [20] M. Mazman, E. Biçer, C. Kaypmaz, T. Tıldız, D. Uzun, M. Tırıs, "Yenilenebilir Enerji İçin Elektrik Enerjisi Depolama Teknolojileri," *Enerji ve Çevre Dünyası*, vol.85, pp. 66-72, 2010.
- [21] A. Botterud, V. Koritarov and T. Levin, *Pumped Storage Hydropower: Benefits For Grid Reliability and Integration Of Variable Renewable Energy*, 2014.
- [22] V. J. Zipparro Ve H. Hasen, Davis, *Handbook Of Applied Hydraulics*, 4 Ed., New York: Mcgraw Hill., 1993.
- [23] M. A. Tilahun, "Feasibility Study Of Pumped Storage System For Application In Amhara Region," Master's Thesis., Etiopia, 2009.
- [24] A. A. Sertkaya, M. Saraç ve M. A. Omar, "Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerinin Türkiye İçin Önemi," *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 1, no. 3, pp. 369-382, 2015.
- [25] International Electrotechnical Commission (IEC), *Electrical Energy Storage*, 2011.
- [26] Electric Power Research Institute, *Quantifying Tovalue Of Hydropower In The Electric Grid: Final Report*. Electric Power Research Institute., 2013.
- [27] Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü Raporları, [Http://www.Eie.Gov.Tr/Yenilenebilir/Hidrolik_Nedir.aspx](http://www.Eie.Gov.Tr/Yenilenebilir/Hidrolik_Nedir.aspx), Erişim Tarihi:25.12.2020.
- [28] M. Vural, "Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerin Gelişimi Ve Türkiye İncelemesi," 2017.
- [29] Gökçekaya Pompajlı Hes İlk Etüt Raporu, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Haziran, 2010.
- [30] [Http://www.Dsi.Gov.Tr/Docs/Hizmetalanlari/Enerji.Pdf](http://www.Dsi.Gov.Tr/Docs/Hizmetalanlari/Enerji.Pdf), 2020. Erişim Tarihi:25.12.2020
- [31] [Https://Www.Enerji.Gov.Tr/Tr-Tr/EigmRaporlari](https://Www.Enerji.Gov.Tr/Tr-Tr/EigmRaporlari), 2019. Erişim Tarihi:25.12.2020