

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MEVCUT REZERVUARLARIN POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK
SANTRALE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAYDAR SADIK ALTUN

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ YILDIRIM BAYAZIT

BİLECİK, 2023

10519325

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**MEVCUT REZERVUARLARIN POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK
SANTRALE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAYDAR SADIK ALTUN

TEZ DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ YILDIRIM BAYAZIT

BİLECİK, 2023

10519325

BEYAN

“Mevcut Rezervuarların Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrale Dönüştürülmesi Üzerine Bir Çalışma” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Haydar Sadık ALTUN

.../.../2023

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinin her aşamasında değerli bilgilerini benimle paylaşan tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yıldırım BAYAZIT'a katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme emekleri adına teşekkür ederim.

Haydar Sadık ALTUN

2023



ÖZET

MEVCUT REZERVUARLARIN POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SANTRALE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Gelişen teknoloji, sanayi, nüfusun artması gibi etkenler enerjiye olan ihtiyacı arttırmıştır. Tükenmek üzere olan, ekolojiye zarar veren, dışa bağımlılığı arttıran ve ekonomik olmayan petrol, doğalgaz, kömür gibi fosil yakıtların yerini yenilenebilir enerji kaynakları almaya başlamıştır. Bu enerji kaynaklarının ihtiyaç halinde kullanılması için depolanması gereklidir. Bu çalışmada depolama için pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri sistemi seçilmiş ve bu konuda araştırma yapılmıştır. Isparta ilinin Eğirdir Gölü çevresinde tasarlanan santralin üst rezervuar hacmi 4 senaryo ile hesaplanmış ve bu hesaplamalara göre senaryolar kıyaslanmıştır. 1.430 m kotunda 6.000.000 m³, 4.000.000 m³, 2.000.000 m³ ve 1.000.000 m³ hacminde 4 rezervuar senaryosu hesaplanmıştır. Toplam savak uzunluğu 1.150 m, üst rezervuar kotu 1.430 m, toplam kuyruk suyu tüneli uzunluğu 650 m, 910 m kotunda santral binası, 7 m çapında cebri boru ve 4 adet türbin ile tasarım yapılmıştır. PDHES sisteminin hidrolik ve ekonomik hesapları çalışması sonucunda 1. senaryo için yıllık net kazanç 132.623.513 \$, santral kurulu gücü 1.327 MW; 2. senaryo için yıllık net kazanç 89.631.741 \$, santral kurulu gücü 897 MW; 3. senaryo için yıllık net kazanç 45.180.783 \$, santral kurulu gücü 452 MW; 4. senaryo için yıllık net kazanç 22.633.708 \$ ve santral kurulu gücü 226 MW olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Rezervuar, Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller, Enerji Depolama, Eğirdir Gölü.

ABSTRACT

A STUDY ON CONVERSION OF EXISTING RESERVOIRS TO PUMPED STORAGE HYDROELECTRIC POWER PLANT

Factors such as developing technology, industry, and increasing population have increased the need for energy. Renewable energy sources have begun to replace fossil fuels such as oil, natural gas, and coal, which are about to run out, harm ecology, increase foreign dependency, and are uneconomical. These energy sources must be stored in order to be used in case of need. In this study, pumped storage hydropower plant system was selected for storage, and research was carried out on this subject. The upper reservoir volume of the power plant designed around Eğirdir Lake in Isparta province was calculated with 4 scenarios and the scenarios were compared according to these calculations. At 1.430 m elevation, 4 reservoir scenarios with a volume of 6.000.000 m³, 4.000.000 m³, 2.000.000 m³, and 1.000.000 m³ were calculated. The total weir length is 1.150 m, the upper reservoir elevation is 1.430 m, the total tailwater tunnel length is 650 m, the powerhouse at 910 m elevation, a penstock with a diameter of 7 m and 4 turbines. As a result of the hydraulic and economic calculations of the PHS system, the annual net income for the 1st scenario is \$ 132.623.513, the installed power of the plant is 1.327 MW; For scenario 2, annual net income is \$89.631.741, with installed power of 897 MW; For scenario 3, annual net income is \$45.180.783, with installed power of 452 MW; For the 4th scenario, the annual net income was \$22.633.708 and the installed power of the plant was 226 MW.

Keywords: Reservoir, Pumped Storage Hydroelectric Power Plants, Energy Storage, Eğirdir Lake.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
GRAFİKLER LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	3
2.1. Biyokütle Enerjisi.....	4
2.2. Güneş Enerjisi	6
2.3. Rüzgar Enerjisi.....	7
2.4. Jeotermal Enerji.....	8
2.5. Dalga Enerjisi	9
2.6. Hidrojen Enerjisi.....	10
3. HİDROELEKTRİK ENERJİ	12
3.1. Türkiye’de ve Dünyada Hidroelektrik Enerjinin Durumu.....	12
3.2. Hidroelektrik Santral Elemanları	14
3.2.1. Jeneratör	14
3.2.2. Cebri Boru.....	15
3.2.3. Türbin.....	15
3.2.3.1. Pelton Türbin.....	16

3.2.3.2. Kaplan Türbin	16
3.2.3.3. Francis Türbin.....	17
3.2.3.4. Banki Türbin.....	17
3.2.3.5. Turgo Türbin	18
3.2.4. Transformatör	19
3.2.5. Denge Bacası	20
3.2.6. Santral Binası.....	20
3.2.7. İletim Kanalı	20
3.2.8. Enerji Nakil Hattı.....	20
3.2.9. Su Tutma Yapısı	20
3.2.10. Su Alma Yapısı	20
3.3. Hidroelektrik Santrallerin Avantajları.....	21
3.4. Hidroelektrik Santrallerin Dezavantajları	21
3.5. Dünyadan ve Türkiye’den HES Örnekleri.....	22
3.5.1. Üç Boğaz Barajı	22
3.5.2. Atatürk Barajı	23
3.5.3. Karakaya Barajı ve HES	23
3.5.4. Keban Barajı ve HES	24
4. ENERJİ DEPOLAMANIN ÖNEMİ.....	25
4.1. Süperkapasitörler.....	26
4.2. Volanlar.....	27
4.3. Bataryalar	27
4.4. Süper İletken Manyetik Enerji Depolama	28
4.5. Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama.....	28
4.6. Isıl Enerji Depolama	29
5. POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SANTRALLER	30

5.1. PDHES Tipleri ve Yapılandırmaları	31
5.2. PDHES Elemanları ve Depolama Çeşitleri.....	32
5.3. Dünyadaki PDHES Durumu	33
5.3.1. Çin.....	33
5.3.2. Amerika Birleşik Devleti.....	36
5.3.3. Japonya.....	38
5.3.4. Endonezya	40
5.3.5. Türkiye	40
6. EĞİRDİR PDHES SANTRAL TASARIMI	42
6.1.Eğirdir Gölü ve Çevresinin İncelenmesi	42
6.2. Proje Tasarım Bilgileri	46
6.3. Hesaplamalar	48
6.3.1. Yük Kayıpları	50
6.3.2. Santral Gücü	52
6.3.3. Türbin Hesaplamaları.....	53
6.3.4. Maliyet hesabı	55
7. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	58
KAYNAKÇA	59

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. 2021 Yılı BEPA (Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası) Verileri.....	5
Tablo 2.2. Hidrojenin Özellikleri	11
Tablo 3.1. Türkiye 300 MW Kurulu Gücünden Yüksek Olan HES'ler	13
Tablo 3.2. HES Kurulu Gücü İlk 10 Sıralaması	14
Tablo 5.1. Çin'deki 1.000 MW Üstü PDS (Pompaj Depolama Santral)'ler	34
Tablo 5.2. ABD'deki 1.000 MW Üstü PDHES'ler	37
Tablo 5.3. Japonya'daki 300 MW Üstü PDHES'ler	38
Tablo 5.4. Türkiye'de Pompaj Depolamalı HES'ler İçin Etüt Çalışması Yapılan Santraller .	41
Tablo 6.1. Eğirdir Gölü Fiziki Özellikleri	42
Tablo 6.2. Isparta İli 1929-2021 Sıcaklık ve Yağış Ölçüm	43
Tablo 6.3. Fiyatlandırma Tarifesi	48
Tablo 6.4. Üst Rezervuar Hacim Senaryoları.....	49
Tablo 6.5. Debi ve Akış Hızı Senaryoları	49
Tablo 6.6. Yük Kaybı ve Net Düşü Senaryoları.....	51
Tablo 6.7. Santral Gücü Senaryoları	52
Tablo 6.8. Türbin Tipi Özgöl Hız Değer Aralıkları	53
Tablo 6.9. Türbin Devir Sayısı Senaryoları.....	54
Tablo 6.10. Pompaj Sırasında Toplam Güç Senaryoları	54
Tablo 6.11. Günlük Pompalama Maliyet Senaryoları	56
Tablo 6.12. Günlük Üretim Kazancı Senaryoları	56
Tablo 6.13. Yıllık Üretim Net Kazanç Senaryoları	57
Tablo 6.14. Amortisman Süresi Senaryoları	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası	6
Şekil 2.2. Türkiye Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası	7
Şekil 2.3. Dalga Enerjisi İstasyonu	10
Şekil 3.1. Hidroelektrik Santrali	12
Şekil 3.2. Pelton Türbin	16
Şekil 3.3. Kaplan Türbin	17
Şekil 3.4. Francis Türbini ve Çalışma Prensibi.....	17
Şekil 3.5. Dikey ve Yatay Eksenli Banki Türbini Çalışma Prensibi.....	18
Şekil 3.6. Turgo Türbin.....	19
Şekil 3.7. Üç Boğaz Barajı.....	22
Şekil 3.8. Atatürk Barajı	23
Şekil 3.9. Karakaya Barajı ve HES	24
Şekil 3.10. Keban Barajı ve HES.....	24
Şekil 5.1. Huizhou Pompaj Depolama Santrali.....	35
Şekil 5.2. Guangdong Pompaj Depolama Santrali.....	35
Şekil 5.3. Fengning Pompaj Depolama Santrali	36
Şekil 5.4. Bath County Pompaj Depolama İstasyonu	37
Şekil 5.5. Kurokawa Rezervuarı	39
Şekil 5.6. Tataragi Rezervuarı.....	39
Şekil 5.7. Dinorwig Hidroelektrik Santrali	40
Şekil 6.1. Eğirdir Gölü	42
Şekil 6.2. Isparta İlinin Depremsellik Derecesi Haritası.....	45
Şekil 6.3. Türkiye Deprem Risk Derecesi Haritası	45
Şekil 6.4. Proje Üst Rezervuar Yer Tayini.....	46

Şekil 6.5. Proje Tasarım Bilgileri.....	47
Şekil 6.6. Proje Tasarımı.....	47



GRAFİKLER LİSTESİ

	Sayfa
Grafik 2.1. Jeotermal Enerji Kaynaklı Kurulu Gücün Değişimi.....	8
Grafik 2.2. Jeotermal Enerji Kaynağının Toplam Kurulu Güç İçerisindeki Oranı.....	9



KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

γ : suyun özgül ağırlığı

η : verim (%)

η : Verim

η_n : Nakil hattı verimi

η_T : Transformatör verimi

η_i : inşaat verimi

η_c : cebri boru verimi

η_t : türbin verimi

η_j : jeneratör verimi

Υ : Akışkanın birim hacim ağırlığı

ρ : yoğunluk

A : Borunun kesit alanı

ABD: Amerika Birleşik Devleti

A_s : Süpürme alanı

BEPA: Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası

d : mesafe

D : Cebri boru iç çapı

d/d : devir/dakika

E : Enerji

EİE: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü

E.S: Elektrik Santrali

F : Kuvvet

f : frekans

g : yer çekimi ivmesi

GEPA: Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası

GÜK: Günlük Üretim Kazancı

GW: Gigavat

h: Planck sabiti

H: Düşü

H_d: dalga yüksekliği

HES: Hidroelektrik santral

H_g: yük

h_k: Sürekli enerji kaybı

H_{net}: net düşü (m)

IHA: International Hydropower Association (Uluslararası Hidroelektrik Birliği)

I_p: Primer akım

I_s: Sekonder akım

JICA: Japan International Cooperation Agency (Japonya Uluslararası İşbirliği Ajansı)

kWh: kilovatsaat

km²: kilometrekare

L: Savak uzunluğu, Boru boyu

m²: metrekare

m³: metreküp

MW: Megavat

n: Türbin devir sayısı

N_p: Primer sarım sayısı

n_s: özgül hız

N_s: Sekonder sarım sayısı

P: Santral gücü

P_d: dalga enerji akı

PDHES: Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santral

PDS: Pompaj Depolamalı Santral

P_r: Rüzgâr gücü

P_t: Türbin gücü

Q: debi

ster: Uzunluğu ve genişliği 100 cm, yüksekliği 110 cm olan odun istifi

t: minimum cebri boru kalınlığı

T: dalga periyodu

TEİAŞ: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü

TEP: Teorik Enerji Eşdeğeri

TEPCO: Tokyo Electric Power Company (Tokyo Elektrik Enerjisi Şirketi)

V: Akış hızı

V_p: Primer gerilim

V_r: Rüzgâr hızı

V_s: Sekonder gerilim

Z: Yersel yükseklik

1. GİRİŞ

Canlılar hayatlarını sürdürebilmeleri ve daha iyi hale getirebilmeleri için enerjiye ihtiyaç duyarlar. Isınma, aydınlanma, teknolojik gelişmeler gibi birçok alanda enerji kullanılır. İlk çağlardan günümüze kadar önemli olan enerji doğru kullanıldığında toplumların gelişmesinde önemli bir faktördür. Tanım olarak Enerji;

Özel görelilik kuramına göre; Kütle ve ışık hızına bağlı değişen bir nicelik (Eşitlik 1.1),

$$E = m \cdot c^2, \quad (1.1)$$

m: kütle (kg) ,

c: ışık hızı (m/sn),

E: Enerji (joule)

Newton mekaniğine göre; Kuvvetin belirli bir mesafede oluşturduğu değer (Eşitlik 1.2),

$$E = F \cdot d, \quad (1.2)$$

F: kuvvet (N),

d: mesafe (m)

Kuantum mekaniğine göre; Uzayda yayılmış olan fotonlar olarak tanımlanabilir (Eşitlik 1.3).

$$E = h \cdot f, \quad (1.3)$$

h (Planck sabiti): $6,67 \cdot 10^{-34}$ Joule saniye,

f: frekans (1/s)

Enerjinin davranışını ve madde ile ilişkisini inceleyen bilim dalına termodinamik denir. Enerjiden bahsederken termodinamiğin 4 yasasından bahsetmek önemlidir. Termodinamiğin 1. yasasında Enerji Korunumu Yasası ile enerjinin asla kaybolmayacağı sadece başka bir biçime dönüşeceğinden bahsedilir. Enerjinin şekli değişebilir ancak asla enerji yok edilemez. Termodinamiğin ikinci yasasında enerji çevrimlerinde her zaman bir kayıp söz konusudur. Verimin hiçbir zaman % 100 olması mümkün değildir. Termodinamiğin 3. yasasında ise bir maddenin sıcaklığını $-273 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'e düşürmek imkansızdır. Mutlak sıfır sıcaklığına gelmek enerjisizlik anlamına gelir ve bu mümkün değildir. Sonradan eklenen 0. yasa ise sıcaklıkları farklı iki nesne arasında ısı enerjisi alışverişi oluşursa ısı denge olana kadar alışveriş devam eder. Dengeye ulaştıktan sonra sıcaklıkları aynı olur ve artık ısı alışverişi olmaz.

1973 Petrol krizi sonucu oluşan ambargo, 1979 İran devrimi, 2011’de gerçekleşen Arap baharı dünyanın enerji arz güvenliğinin önemini kavraması açısından önemlidir. Enerjinin temin edilmesi, düşük maliyette, istenilen zamanda ve yeterli düzeyde sürekli liği sağlanacak şekilde uygun sistemlerle taşınması enerji arz güvenliğini etkilemektedir (Sevim, 2012: 4384). 1979 petrol krizinden sonra petrol varil fiyatı 30 dolardan 100 dolara yükselmiştir. Petrolün ani yükselmesi ile olumsuz etkilenen ülkeler enerji arz güvenliği için politikalar geliştirmişlerdir. Enerjinin tasarrufu, verimliliği, çeşitliliği, depolanması, yatırımları gibi alanlarda önlemler almışlardır. Ayrıca Uluslararası Enerji idaresi kurularak enerji arz güvenliğini korumak için atılan adımlar resmileştirilmiştir (Çoruh, 2019: 31).

Kullanılacak enerji kaynakları seçilirken önemli olan bu enerjinin ne kadar sürdürülebilir olduğu, çevreye ne derecede etki ettiği, maliyet miktarları, depolanmasının zorluğu, pazarlama olanakları, enerji miktarları ve verimlilikleri gibi faktörlerdir. Bu faktörler dikkate alınarak günümüzde enerji sağlamak için kullanılan petrol, doğalgaz, kömür gibi fosil yakıtların yerini yenilenebilir enerji kaynakları almaya başlamıştır. Kimyasal enerji, elektrik enerjisi, ısı enerjisi, potansiyel enerji, mekanik enerji gibi dönüşümlere uğrayarak yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanılır.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Fosil yakıtlara alternatif, sonsuz olarak kabul edilen çevre dostu enerji kaynaklarıdır. Doğal enerji kaynağı olarak kabul edilir. Fosil yakıtların tükenmeye yakın olması, doğaya zarar vermesi, ülke ekonomilerini dışa bağımlı yapması yenilenebilir enerji kaynaklarını alternatif bir kaynak olarak karşımıza çıkarmaktadır. Enerji piyasasında söz sahibi olmak isteyen ve kendi enerji ihtiyacını karşılamak isteyen ülkeler gelişen teknoloji ve sanayiye uyum sağlayabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Biyokütle enerjisi, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi, hidrojen enerjisi ve hidroelektrik enerjisi yenilenebilir enerji kaynakları çeşitleridir.

Yenilenebilir Enerji kaynaklarının olumlu etkilerinin arasında en önemlisi çevre dostu olmasıdır. Fosil yakıtlar gibi doğaya zarar veren sera gazı salınımına yol açmaz ve dolayısıyla küresel ısınmaya sebep olmaz. Küresel ısınmanın devam etmesi halinde iklim değişikliği dünyamızı tehdit edecektir. Bu sebeple iklim değişikliği ile mücadele etmek için bazı önemli adımlar atılmıştır.

21 Mart 1994 tarihinde yürürlüğe giren Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi uluslararası çevrecilik alanında yapılan ilk sözleşmedir. Ekosisteme zarar veren zehirli gazları kontrol etmeyi amaçlamaktadır. 16 Şubat 2005'te yürürlüğe giren Kyotoko Protokülü sera gazı emisyonunu azaltarak küresel ısınmanın önüne geçmeyi hedefleyen çevreci bir sözleşmedir. 4 kasım 2016'da yürürlüğe giren Paris anlaşmasında küresel ısınmayı 1,5-2 °C'nin altına düşürmek için ortak bir strateji çizilmiştir.

Dünyada 23 ülke kömür tüketimini azaltmayı hedefleyen taahhütlerde bulunmuştur. Birçok uluslararası banka kömürle çalışan termik santrallere kamu finansmanını 2021 yılı bitene kadar kesmeyi taahhüt etmiştir. En az 25 ülke, fosil yakıt kaynaklı enerji piyasasına kamu alanında desteği bitirmeyi hedeflemektedir (COP, 2021).

Enerji verimliliğini arttırmak iklim değişikliği ile mücadele etmenin yollarından bir diğeridir. Ayrıca bu sayede enerji tasarrufu sağlanarak hem ekonomik hem de çevresel olarak olumlu adımlar atılır. Tasarruf politikası izlenirken dikkat edilmesi gereken önemli husus üretim kalitesi ve yaşam standartlarını korumaktır. Ülkemizde bu amaçla 1981 yılında Enerji Tassarrufu Koordinasyon Kurulu kurulmuştur (Çamcı, 2020: 12).

2.1. Biyokütle Enerjisi

Bitkisel ve hayvansal atıklar, çöpler, tarla atıkları, kanalizasyon atıkları, orman ürünleri gibi malzemelerden üretilen içeriğinde hidrojen, azot ve oksijen bulunan yenilebilir enerji kaynaklarıdır. Fotosentez ile bitkilerde enerji depolanır ve bu enerji daha sonra ısı veya elektrik enerjisine dönüşür.

Biyokütle enerjisi geniş yetiştirilme alanına sahip olması, çevre kirliliği oluşturmaması, asit yağmurlarına sebep olmaması, üretim ve çevrim teknolojilerinin biliniyor olması, düşük ışık şiddetinin yeterli olması, 5-35 °C sıcaklık gerektirmesi ve depolanabilir olması önemli avantajlarıdır. Piroliz, gazlaştırma ve yakma işlemleri ile termokimyasal dönüşümlere, presleme, esterifikasyon, ekstraksiyon işlemleri ile fiziksel-kimyasal dönüşümlere, fermentasyon, kompostlaştırma ve anaerobik çürüme işlemleri ile de biyokimyasal dönüşümlere uğrar (TMMOB, 2015: 1172).

Konut, sanayi, ulaştırma, madencilik, askeri, sera, ısınma sistemi, inşaat, uçak yakıtı ve hayvancılık alanlarında kullanılır. Kırsal bölgelerde istihdamı artırarak bölgenin sosyo yapısını etkilemesi ve ekonomiye katkı sağlaması biyokütle enerjisinin önemini arttırmaktadır. Biyogaz, biyoetanol, biyohidrojen, biyobütanol, biyopropanol gibi biyoyakıt çeşitleri mevcuttur.

Tablo 2.1’de BEPA verileri incelendiğinde 2021 yılında ülkemizde yıllık hayvansal atıkların teorik enerji eşdeğeri 4.385.371 TEP (Ton Eşdeğer Petrol), bitkisel atıkların teorik enerji eşdeğeri 25.384.268 TEP, belediye atıkların teorik enerji eşdeğeri 3.373.011 TEP, Orman varlığı artıklarının enerji eşdeğeri 859.899 TEP olmak üzere atıkların toplam 34.002.549 TEP enerji eşdeğeri olduğu görülmektedir (ETKB, 2021).

Tablo 2.1. 2021 Yılı BEPA (Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası) Verileri

Nüfus	82.003.882
Hayvan Sayısı (adet)	422.832.374
Hayvansal Atık Miktarı (ton/yıl)	193.878.079
Hayvansal Atıkların Teorik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	4.385.371
Hayvansal Atıkların Ekonomik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	1.084.506
Bitkisel Üretim Miktarı (ton/yıl)	171.399.002
Bitkisel Atık Miktarı (ton/yıl)	62.206.754
Bitkisel Atıkların Teorik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	25.384.268
Bitkisel Atıkların Ekonomik Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	1.462.159
Belediye Atıkları Miktarı (ton/yıl)	32.170.975
Belediye Atıkların Teorik Enerji Eşdeğerleri (TEP/yıl)	3.373.011
Belediye Atıkların Ekonomik Enerji Eşdeğerleri (TEP/yıl)	485.858
Orman Varlığı Artıkları (ster / yıl)	3.914.904
Orman Varlığı Artıklarının Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	859.899
Biyodizel İşleme Lisansı Sahibi Firmalar	8
Biyoetanol İşleme Lisansı Sahibi Firmalar	5
Biyokütle Kaynaklı Elektrik Üretim Santral Sayısı	199
Atıkların Toplam Enerji Eşdeğeri (TEP/yıl)	34.002.549

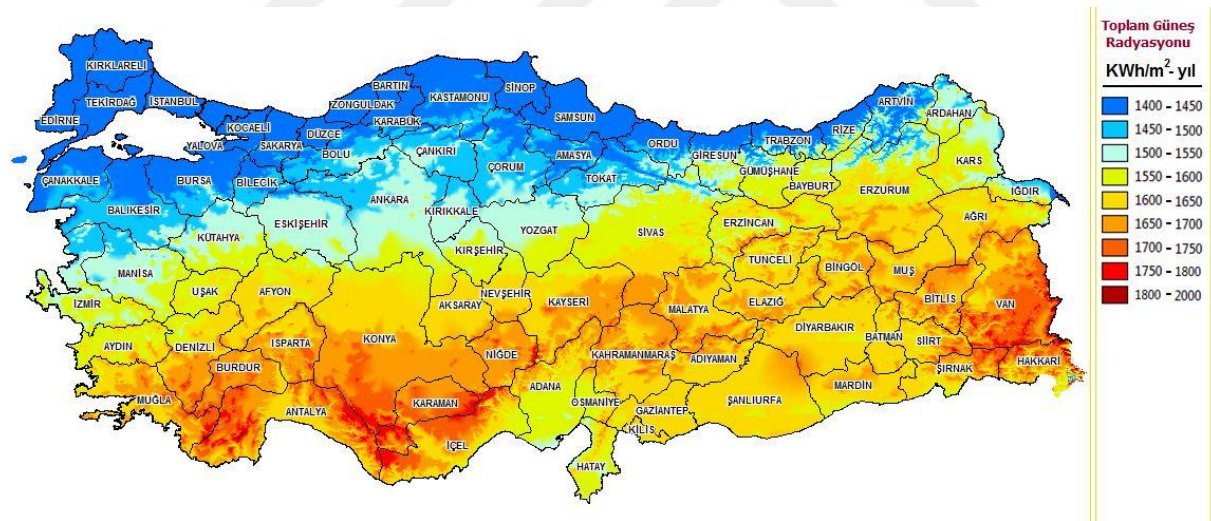
Kaynak: (ETKB, 2021)

2.2. Güneş Enerjisi

Güneşte oluşan füzyon tepkimeleri sonucu hidrojen helyuma dönüşerek enerji açığa çıkarmaktadır. Bu sayede dünyamıza gelen güneş ışınları, yakıt ihtiyacı olmadan teknolojik araçlar ile doğrudan veya yayılmış ışıınım yoluyla elde edilebilen yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisini oluşturur. Canlıların büyümesi ve gelişmesi için gerekli olan güneş enerjisi eski çağlardan günümüze kadar önemini korumuştur.

Güneş ışınları yarı iletken malzemelerden oluşan fotovoltaiik sistemlerde hücreler tarafından toplanır ve doğru akımla çalışarak elektriğe dönüşür. Isıtma veya soğutma, fotovoltaiik sistemler ve yoğunlaştırılmış sistemler aracılığıyla güneş enerjisi kullanıcılara ulaşır. Güneş enerjisi dünyanın günlük enerji ihtiyacının yaklaşık 200.000 katını karşılayabilecek yüksek potansiyele sahiptir.

Güneşlenme süresi, mevsimsel değişiklikler, depolama sorunu ve yüksek maliyet bu enerji kaynağı üzerinde oluşan başlıca sorunlardır. Diğer yenilebilir enerji kaynakları ile entegre sistemler oluşturularak depolama sorunu çözülebilir. Ayrıca gelişen teknoloji ile maliyetlerin de azaldığı görülmektedir.



Şekil 2.1. Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)

Kaynak: (ETKB, 2022)

Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası toplam güneş radyasyonu 1.400-2.000 kWh/m² değerleri arasında farklı renklerde haritalanmıştır (Şekil 2.1). GEPA verileri incelendiğinde genel olarak kuzey kesimlerin yıllık 1.400-1.550 kWh/m², iç ve güney kesimlerin ise 1.550-1.750 kWh/m² güneş radyasyonu aldığı görülmektedir (ETKB, 2022).

2.3. Rüzgar Enerjisi

Dünyada termik ve basınç farkından dolayı oluşan hava akımlarına rüzgâr denir. Dünyanın dönüşü ve atmosferin dengesiz ısınması rüzgar oluşumuna temel sebeplerdir. Eski çağlarda ilk olarak gemilerin hareket ettirilmesinde ve değirmenlerin çalıştırılmasında rüzgâr enerjisinden faydalanılır. Tarihte ilk kez 1891 yılında Paul la Cour öncülüğünde Danimarkanın Askov bölgesinde rüzgar türbini kullanılarak yel değirmeni yapılmıştır. Tarihsel süreç içerisinde gelişerek günümüze kadar gelen rüzgâr türbinleri elektrik üretmek için kullanılmıştır.

Rüzgârdan enerji elde etmenin temel prensibi rüzgârın türbin kanatlarına çarpması ve bağlantılı olan şaftı döndürmesi işlemidir. Şaftın dönmesiyle jeneratörde elektrik enerjisi üretilir. Hava akımlarının kinetik enerjisi önce mekanik enerjiye sonra elektrik enerjisine dönüşür. Karada, denizde ve dağınık bölgelerde konumlandırılarak yüksek rüzgâr akımının hızlı olduğu yerlerden faydalanılmak amaçlanmaktadır. Türkiye rüzgâr hızı dağılımı haritası aşağıda verilmiştir (Şekil 2.2). Rüzgâr hızı, süpürme alanı ve havanın yoğunluğu rüzgâr gücünü etkileyen parametrelerdir (Eşitlik 2.1).

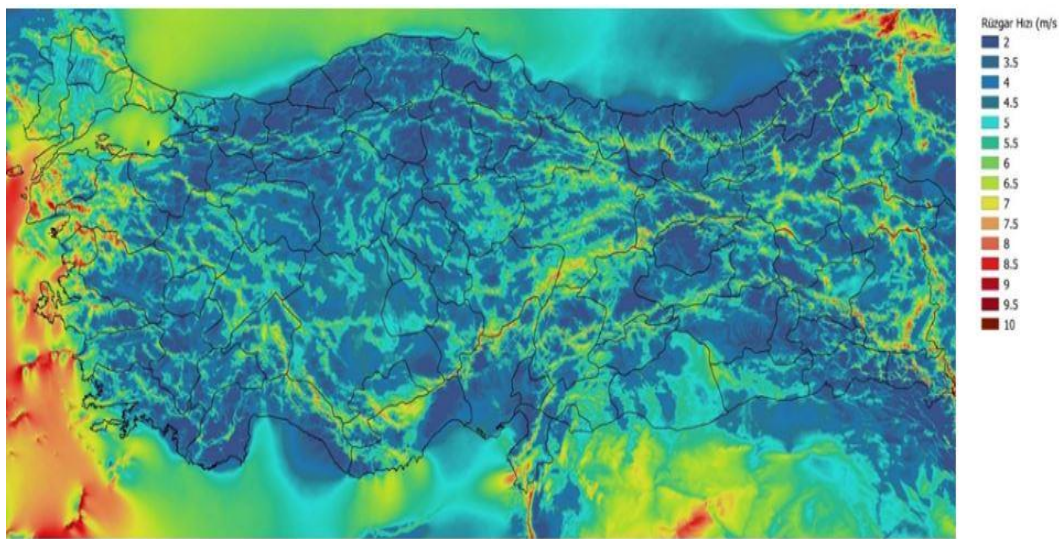
$$P_r = \rho \cdot A_s \cdot V_r^3 / 2 \quad (2.1)$$

P_r : Rüzgâr gücü

ρ : Havanın yoğunluğu

A_s : Süpürme alanı

V_r : Rüzgâr hızı



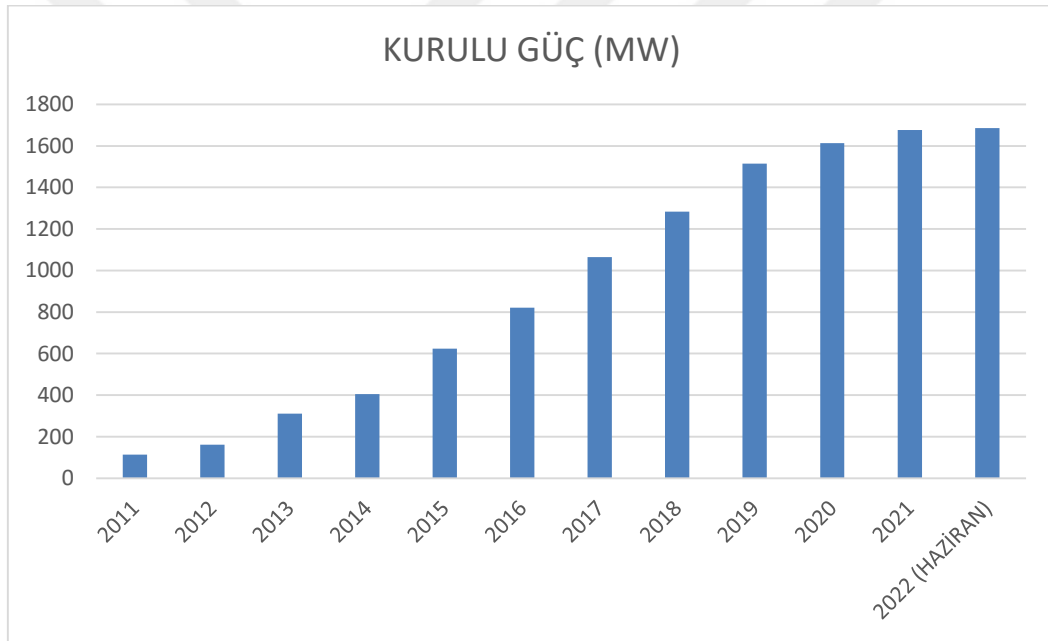
Şekil 2.2. Türkiye Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası

Kaynak: (ETKB, 2022)

2.4. Jeotermal Enerji

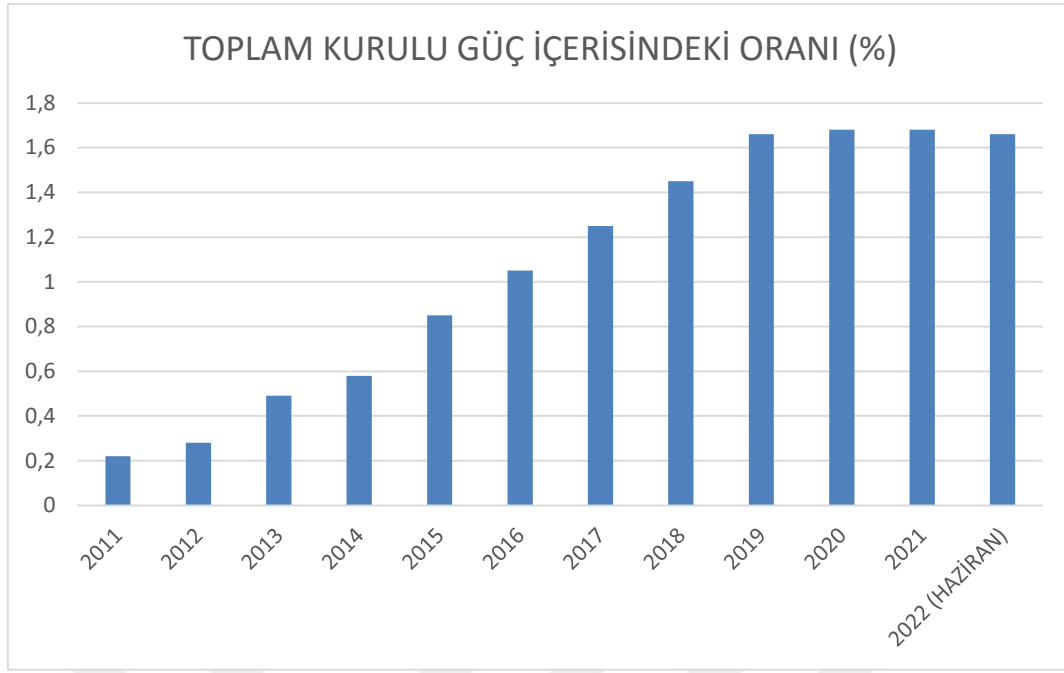
Yer kabuğundan ısınma, sağlık ve elektrik üretme amacıyla çıkarılan sıcak su, çeşitli gazlar ve buhardan elde edilen termal enerjidir. Güneş kadar sıcak dünyanın çekirdeğinde meydana gelen radyoaktif maddelerin bozunması ile üretimi gerçekleşir. Santrallerde ısı pompaları aracılığıyla ve yakıta gerek olmadan doğrudan kullanılarak elektrik üretimi gerçekleşir. Yakıt gerektirmeyen, gürültüsüz çalışan ve yüksek verimli bir enerji kaynağıdır.

M.Ö. cam, çömlek yapımında ve kaplıcalarda bu enerji türünden faydalanılmıştır. İlk jeotermal enerji 1913 yılında İtalya'nın Toskana bölgesinde kurulan Larderello Jeotermal Enerji Santrali'dir. Mevsimsel şartlardan etkilenmeden konutlarda, tarım, turizm gibi birçok sektörde kullanılır. Az miktarda kükürt dioksit miktarı vardır ve fosil yakıtlara göre çok düşük oranda asit yağmuru oluşumuna sebep olur.



Grafik 2.1. Jeotermal Enerji Kaynaklı Kurulu Gücün Değişimi

Kaynak: (ETKB, 2022)



Grafik 2.2. Jeotermal Enerji Kaynağının Toplam Kurulu Güç İçerisindeki Oranı

Kaynak: (ETKB, 2022)

Jeotermal enerji kaynaklı kurulu gücün 2011-2022 yılları değişimi grafiğinde haziran 2022 tarihinde 1.686 MW jeotermal enerji kurulu gücüne sahip ülkemizde son 10 yılda bu değer yaklaşık 10 kat arttığı görülmektedir (Grafik 2.1). Jeotermal enerji kaynağının 2011-2022 yılları toplam kurulu güç içerisindeki oranı grafiğinde jeotermal enerjinin yıllar içerisinde değişimi gösterilmiştir (Grafik 2.2). Bu grafiğe göre Haziran 2022 tarihinde toplam kurulu güç içerisindeki oranı % 1,66'dır (ETKB, 2022).

2.5. Dalga Enerjisi

Okyanus ve denizlerde oluşan dalgalar türbinlere çarparak dönderir. Dalga enerjisi istasyonunda türbinlerin dönmesi ile denizde veya kıyıda bulunan jeneratörler aracılığı ile elektrik üretimi gerçekleşir (Şekil 2.3). Dünya yüzeyinin % 70'i okyanuslardan oluştuğu düşünüldüğünde ve yeni bir enerji kaynağı olduğu göz önüne alındığında, potansiyeli yüksek ve gün geçtikçe gelişen bir enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır.

1973 yılında gerçekleşen petrol krizinden dolayı dünyada yeni enerji üretim yolları aranmıştır. Alternatif olacak düşüncesiyle dalga enerjisi üzerine araştırmalar yapılmış ve 1974 yılında Stephen Salter tasarladığı Salter Ördeği adlı cihaz ile ilk defa dalga enerjisini elektrığe çevirmiştir. Dalga enerjisinin patenti ise Girard ve oğlu tarafından 1799 yılında alınmıştır. Dalga enerjisi hesabı için gerekli formül aşağıda verilmiştir (Eşitlik 2.2).

$$P_d = \rho \cdot g^2 \cdot H_d^2 \cdot T_d / 64\pi \quad (2.2)$$

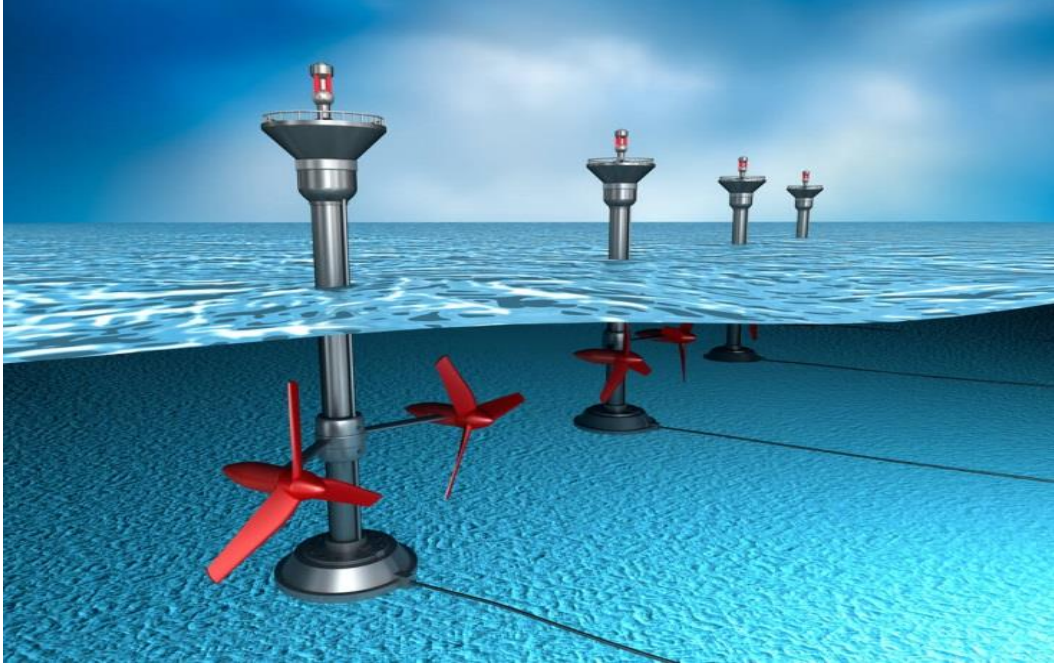
P_d : dalga enerji akı,

ρ : suyun yoğunluğu,

g : yer çekimi ivmesi,

H_d : dalga yüksekliği,

T_d : dalga periyotunu ifade eder.



Şekil 2.3. Dalga Enerjisi İstasyonu

Kaynak: (North Bay, 2021)

Küresel Dalga ve Gelgit Enerjisi Endüstrisi 2020-2027 Pazar yörüngesi ve Analitiği raporuna göre 2020 yılında 542,8 Milyon ABD (Amerika Birleşik Devleti) doları olarak tahmin edilen küresel Dalga ve Gelgit Enerjisi pazarının 2027 yılına kadar 5,1 Milyar ABD Dolarına yükselmesi beklenmektedir (Küresel Dalga ve Gelgit Enerjisi Endüstrisi, 2020).

2.6. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen (H) doğada en yaygın bulunan havadan daha hafif, renksiz, tatsız, kokusuz bir elementtir. Periyodik cetvelde ilk sırada yer alır ve en küçük atomdur. Tablo 2.2’de hidrojenin özellikleri verilmiştir. Fosil yakıtlardan, bakterilerden, alglerden ve sudan hidrojenin ayrışması sonucu gibi birçok yöntemle elde edilir.

T.Von Hohenheim 16. yüzyılda asit ve metallerin tepkimesi sonucu yaptığı deneylerde hidrojen gazı açığa çıkarmıştır. Ancak bunun farkına varamamıştır. 1671’de Robert Boyle demiri asitle tepkimeye sokarak hidrojen elde etmiştir. Henry Cavendish 1766 yılında bunun farklı bir element olduğu görmüş ve bu elementi yanar hava olarak adlandırmıştır. 1783’te Antonie Lavoisier tarafından su getirici anlamına gelen hidrojen ismi verilmiştir. 1874 yılında Jules Verne hidrojen gazının kömüre alternatif güçlü bir ısı ve ışık kaynağı olacağını savunmuştur.

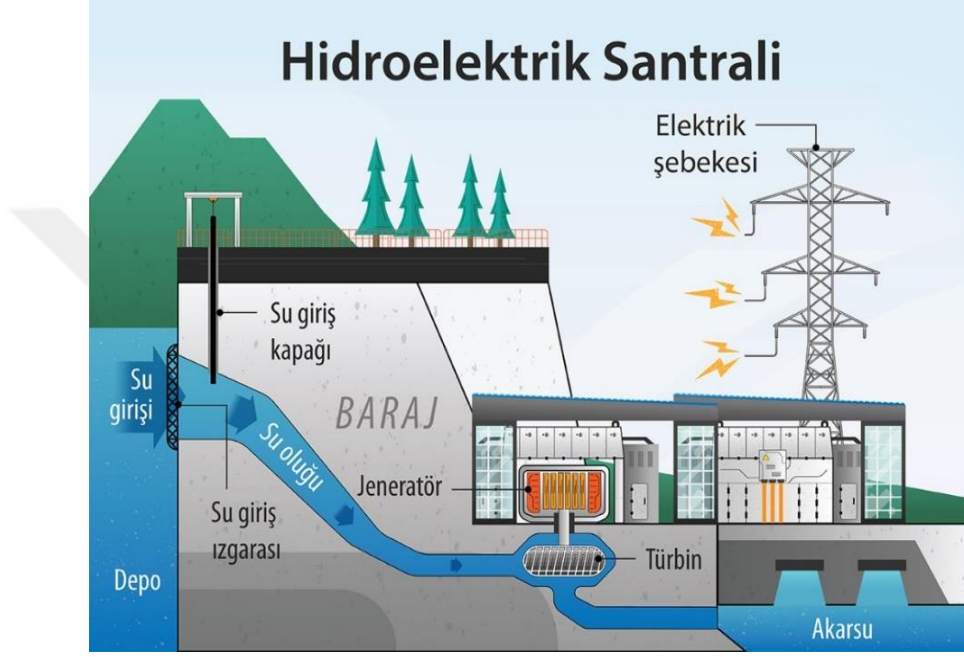
Tablo 2.2. Hidrojenin Özellikleri

Sembolü	H
Moleküler Ağırlığı (Atomic Mass Unit)	2
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı (K)	838
Kritik sıcaklık noktası (K)	32,94
Kaynama sıcaklığı (K)	20,3
Yoğunluk (kg/m ³)	0,0838

Kaynak: (Kademli, 2017: 108)

3. HİDROELEKTRİK ENERJİ

Suyun yükseklik farkından dolayı sahip olduğu potansiyel enerji sırası ile kinetik enerji, mekanik enerji ve elektrik enerjisine dönüşür. Barajlarda depo edilen su cebri borular aracılığıyla türbinlere ulaşır ve türbin çarklarına çarparak şaftı döndürür. Şaft aracılığıyla jeneratörlerde manyetik alandan faydalanılarak elektrik enerjisine dönüşüm gerçekleşir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Hidroelektrik Santrali

Kaynak: (Bilim Genç, 2021)

Depolama yöntemlerine göre; depolamalı ve nehir tipi. Düşülerine göre; alçak düşülü ($H < 10m$), orta düşülü ($10m \leq H \leq 50m$), yüksek düşülü ($50 m < H$). Baraj gövdesinin tipine göre; ağırlıklı beton, kaya dolgulu, toprak dolgulu ve beton kemer gövde olarak sınıflandırılır.

3.1. Türkiye’de ve Dünyada Hidroelektrik Enerjinin Durumu

2022 Ocak ayı Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü (TEİAŞ) Kurulu Güç Raporuna göre Türkiye’de 23.280,4 MW (megavat) toplam kurulu güce sahip 141 adet barajlı santral bulunmaktadır. Küçük ölçekte enerji üretenler dahil 600’den fazla HES (Hidroelektrik santral) vardır (TEİAŞ, 2022).

Tablo 3.1. Türkiye 300 MW Kurulu Gücünden Yüksek Olan HES’ler

SANTRAL ADI	KURULU GÜCÜ (MW)	BULUNDUĞU İL
Atatürk Barajı ve HES	2.405	Şanlıurfa
Karakaya Barajı ve HES	1.800	Diyarbakır
Keban Barajı ve HES	1.330	Elazığ
Ilısu Barajı ve HES	1.209	Mardin
Altinkaya Barajı ve HES	703	Samsun
Birecik Barajı ve HES	672	Şanlıurfa
Deriner Barajı ve HES	670	Artvin
Yukarı Kaleköy Barajı ve	627	Bingöl
Beyhan Barajı ve HES	582	Elazığ
Oymapınar Barajı ve HES	540	Antalya
Boyabat Barajı ve HES	513	Sinop
Berke Barajı ve HES	510	Osmaniye
Aşağı Kaleköy Barajı ve	500	Bingöl
Hasan Uğurlu Barajı ve HES	500	Samsun
Çetin Barajı ve HES	420	Siirt
Artvin Barajı ve HES	332	Artvin
Yedigöze Sanibey Barajı ve	311	Adana
Ermenek Barajı ve HES	302	Karaman
Borçka Barajı ve HES	301	Artvin

Kaynak: (Enerji Atlası, 2021)

Tablo 3.1 verilerine göre Atatürk Barajı (2.405 MW), Karakaya Barajı (1.800 MW), Keban Barajı (1.330 MW) ve Ilısu Barajı (1.209 MW) Türkiye’de 1.000 MW üstü hidroelektrik santrallerdir (Enerji Atlası, 2021). Bu 4 barajın Türkiye’deki mevcut hidroelektrik santrallerin toplam kurulu gücüne oranı yaklaşık % 30’dur.

Tablo 3.2. HES Kurulu Gücü İlk 10 Sıralaması

SANTRAL ADI	KURULU GÜCÜ (GW)	ÜLKE
Üç Boğaz Barajı	22,5	Çin
Itaipu Barajı	14	Paraguay-Brezilya
Xiluodu Barajı	13,86	Çin
Belo Monte Barajı	11,23	Brezilya
Guri Barajı	10,24	Venezuela
Tucurui Barajı	8,37	Brezilya
Grand Coulee Barajı	6,8	ABD
Longtan Barajı	6,42	Çin
Xiangjiaba Barajı	6,4	Çin
Sayano-Shushenskaya	6,4	Rusya

Kaynak: (Statista, 2022).

Uluslararası Hidroelektrik birliği (IHA) 2021 Hidroelektrik Durum Raporuna göre dünyanın toplam hidroelektrik santral kurulu güç toplamı 2020 yılında 1.330 GW (Gigavat)'dır. Çin liderliğinde sırasıyla Brezilya, ABD, Kanada, Hindistan, Japonya ve Rusya yaklaşık toplam üretimin % 60'ını karşılamaktadır. 2020 yılında kapasitelerini en çok arttıran ülke 13,76 GW ile Çin olmuştur. Türkiye ise 2,5 GW ek kapasite arttırımı ile 2. sıradadır. Bu artışta Ilısu Barajı ve Aşağı Kaleköy Barajının payı büyüktür (IHA, 2021). Global düzeyde HES kurulu güç ilk 10 sıralaması Tablo 3.2'de verilmiştir. Ükelere göre HES kurulu güç sıralamasında lider olan Çin, Üç Boğaz Barajı 22,5 GW kurulu gücü ile de ilk sırada yer almaktadır (Statista, 2022).

3.2. Hidroelektrik Santral Elemanları

3.2.1. Jeneratör

1831 yılında Michael Faraday tarafından üretilmiştir. 19. yüzyılın sonlarına doğru Joseph Swann ve Thomas Edison ampülü icat edince jeneratörlere olan ilgi artmıştır. Günümüzde alternatör olarak da adlandırılır. Alternatör ve jeneratör arasındaki temel fark alternatörler mekanik enerjiyi sadece alternatif akıma dönüştürürken, jeneratörler hem alternatif akıma hemde doğru akıma dönüştürebilmektedir.

Rotor, stator, kumanda sistemi, şaft, uyarıcı sistemler ve diğer yardımcı elemanlardan oluşur. Rotor motorun dönerek hareket eden bölümü ve stator ise alternatif gerilimin oluştuğu

bölümdür. Rotorun statorun etrafında hareketlenmesi ile doğru akım sayesinde manyetik alan oluşur. Oluşan manyetik alandan elektrik dönüşümü gerçekleşir. Motor jeneratörler, dikey konumlanmış şaft jeneratörleri ve pit tipi jeneratörler olmak üzere sınıflandırılır.

3.2.2. Cebri Boru

Rezervuardan suyu çarka taşıyan uygun eğimlerle yerleştirilmiş genelde çelikten veya betondan yapılan borulardır. Boru içerisinde yüksek basınçta su aktığı için tasarımında uygun kalınlık seçilmelidir. Aksi takdirde kalınlığın az olması boruda hasar meydana getirecektir. Düzenli aralıklarla boru kalınlığı raporlanarak oluşacak bir hasar varsa önceden farkedilebilir. Ayrıca cebri boru su ile sürekli temasta olduğu için korozyon sıklıkla görülür. Önlemek için korozyona dayanıklı malzemeler ve kaplamalar kullanılmalıdır. Suyun debisi, pürüzlülük katsayısı, cebri boyu uzunluğu ve yük miktarı cebri boru çapını etkileyen parametrelerdir (Eşitlik 3.1).

$$D = 2.69 \times (Q^2 \times n^2 \times L / H_g)^{0.1875} \quad (3.1)$$

D: cebri borunun iç çapı

Q: suyun debisi

n: pürüzlülük katsayısı

L: cebri boru uzunluğu

H_g: yük

$$t = (D + 508) / 400 + 1.2$$

t: minimum cebri boru kalınlığı

3.2.3. Türbin

Belirli bir yükseklikten cebri borulardan hızla akan suyun enerjisi aksenal ve radyal olarak türbin kanatlarına çarpması sonucu mekanik enerjiye dönüşür. Türbinden şaft aracılığıyla jeneratöre enerji transferi olur ve elektrik üretimi gerçekleşir. Suyun yüksekliğine ve debisine göre türbin tipi seçimi yapılır. Banki ve Pelton aksiyon tipi türbinleri, Kaplan ve Francis reaksiyon tipi türbinleri ile Turgo türbinleri en yaygın kullanılan türbin çeşitleridir. Türbin gücü hesabı için aşağıdaki formül kullanılır (Eşitlik 3.2).

$$N = (Q \cdot H_{\text{net}} \cdot \gamma) / 102 \cdot \eta \quad (3.2)$$

N: türbin gücü (kW)

Q: debi (m^3/s)

H_{net} : net düşü (m)

γ : suyun özgül ağırlığı (m^3/dm)

η : verim (%)

3.2.3.1. Pelton Türbin

Suyun kinetik enerjisinden faydalanılarak su jetinden rotor kanatlarına su püskürtülerek mekanik enerji elde edilir. Mekanik enerji jeneratör aracılığıyla elektriğe dönüşür. Pelton türbin büyük yükseklik ve düşük debiler için uygundur (Şekil 3.2). Yatay ve dikey olarak kullanılabilir. Dairesel disk ve şafttan oluşmaktadır. Disk üzerine belirli mesafe aralıklarında kepçeler yerleştirilmiştir.

Pelton türbinlerde akış hesabı yapılması için tasarımının detaylı şekilde incelenmesi gereklidir. Türbin kepçe tasarımı, kova sayısı, kovanın uzunluğu ve konumlandırılması, kepçe ile kızak arasındaki açı, kepçenin jet çember çağındaki derinliği, türbinin dönüş hızı gibi parametreler verimliliği etkileyen önemli etkenlerdir (Solemslie, 2016: 22).



Şekil 3.2. Pelton Türbin

Kaynak: (Ar-Ge ve Tasarım, 2019)

3.2.3.2. Kaplan Türbin

Salyangoz gövdesinden gelen su türbin çarklarını hareket ettirir. Bu sayede elektrik üretimi gerçekleşir. 1912 yılında ilk patenti Viktor Kaplan almıştır ve bu yıldan itibaren üretim başlamıştır (Şekil 3.3). Yüksek debi ve düşük hız değerleri Kaplan türbin seçimi için uygun

kriterlerdir. Suyun hareketine göre ayarlanabilir kanatlara sahip olması Kaplan türbinlerin en önemli avantajlarındanıdır. Ayar kanadı, salyangoz, emme borusu, jeneratör, kanatlar ve rotor kısımlarından oluşur.

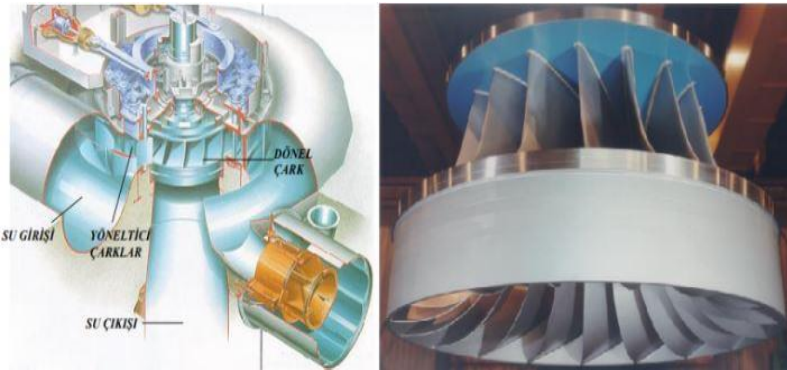


Şekil 3.3. Kaplan Türbin

Kaynak: (Mechtekno, 2022)

3.2.3.3. Francis Türbin

19. yüzyılda James Bichene Francis reaksiyon tipi Francis türbinlerini tasarlamıştır (Şekil 3.4). Basınç değişimi ve suyun hareket enerjisinden faydalanılarak salyangoz kabuğu aracılığı ile çark hareket eder. Su türbinin dönme ekseninden dik bir şekilde geçer. Yüksek basınçla giren su düşük basınçla çıkar ve bu momentum değişimi türbin kanatlarının dönmesini sağlar. Salyangoz, kanatlar, rotar, emme borusu, çark ve diğer yardımcı elemanlardan oluşur.



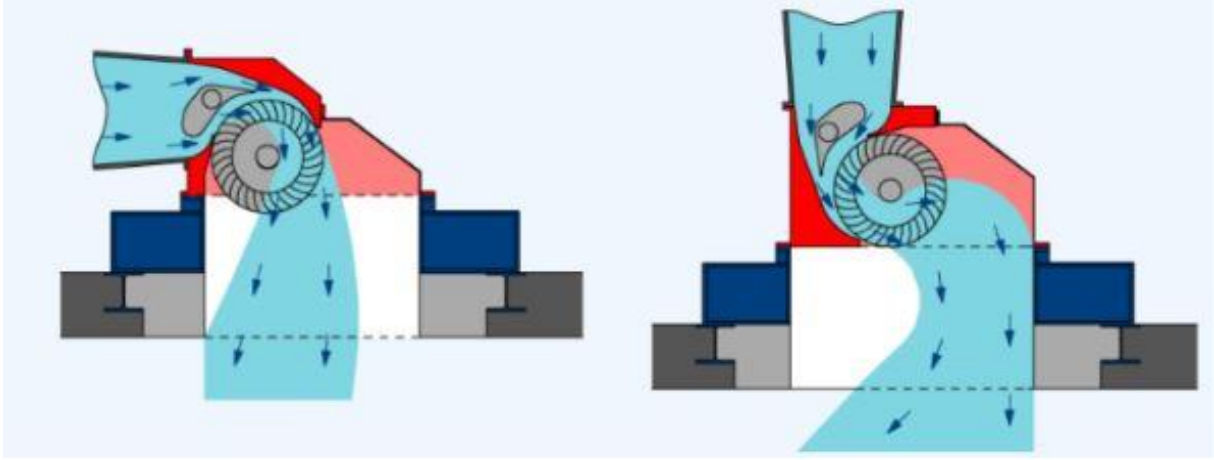
Şekil 3.4. Francis Türbini ve Çalışma Prensibi

Kaynak: (Mechtekno, 2022)

3.2.3.4. Banki Türbin

Banki türbinler Antony Michell, Donát Bánki, Fritz Ossberger tarafından keşfedilmiş ve 1903 yılında tasarım patenti alınmıştır. Kinetik enerjisi sayesinde su türbin bıçakları üzerinden akarak dönme kuvveti oluşturur. Kanatlara ilk çarpmasından sonra türbin boyunca

kanatlara tekrar çarpar (Şekil 3.5). Suyun çarktan iki kez geçmesi verimliliği yükseltse de diğer türbinlere kıyasla verimi daha düşüktür. Şaft, bıçaklar, koşucu, hava giriş vanası, dağıtıcı ve kasalardan oluşur.



Şekil 3.5. Dikey ve Yatay Eksenli Banki Türbini Çalışma Prensibi

Kaynak: (Mechtekno, 2022)

3.2.3.5. Turgo Türbin

1919 yılında Eric Crewdson tarafından ilk patenti alınmıştır. Turgo türbin; Pelton türbinin bir çeşidi olan ancak pelton türbinden daha yüksekte su akış hızını kullanarak enerjiye çeviren aksiyon tipi türbin çeşitidir (Şekil 3.6). Turgo tipi türbinler ile pelton türbinlerin çalışma mantığı aynıdır. Ancak kepçe sayıları pelton türbinlerden farklıdır. Maliyet olarak ise turgo türbinler daha ucuzdur ve aynı boyuttaki pelton türbinlere göre daha fazla su toplayabilmektedir. Turgo türbinlerin çark çapı daha büyük olduğu için pelton türbinlerden daha fazla devir sayısı yapabilmektedir (Yolcubal, 2021: 8).



Şekil 3.6. Turgo Türbin

Kaynak: (Mechtekno, 2022)

3.2.4. Transformatör

Frekans değeri sabit tutularak gerilim veya akım değiştirilerek enerji naklinin gerçekleştiği cihazlardır. Kısa adıyla trafodur. Elektromanyetik indüksiyon ile uzun mesafelerde elektrik taşımak için kullanılır. Jeneratörler tarafından üretilen gerilim trafolar aracılığıyla yüksek gerilime dönüştürülür. Yerleşkeye gelmeden yine trafolar aracılığıyla gerilim düşürülerek kullanıma hazır hale getirilir. Voltaj yükseltilerek akımın düşürülmesinin amacı tellerde oluşabilecek yük kaybını azaltmaktır.

Transformatör içerisindeki bobin ve nüve yardımı ile elektrik akışı için gereken işlemler gerçekleştirilir. Giriş bobini üzerinde manyetik alan oluşturulur ve nüve üzerinde manyetik akıya dönüştürülür. Çıkış bobini üzerinde tekrar manyetik alan oluşturulur. Giriş ve çıkış bobin sargı sayısı değiştirilerek gerilim şiddeti ayarlanır (Eşitlik 3.3).

$$I_s/I_p=N_p/N_s=V_p/V_s \quad (3.3)$$

I_s : sekonder akım (A)

N_p : primer sarım sayısı

V_p : primer gerilim (V)

I_p : primer akım (A)

N_s : sekonder sarım sayısı

V_s : sekonder gerilim (V)

3.2.5. Denge Bacası

Türbinlerin arızaya uğraması veya yavaşlaması halinde ve vanaların hızlı açılıp kapatılması durumunda cebri borudan akan su içerisinde büyük dalgalanmalar oluşur. Bu dalgalanmalar yüksek basınç oluşturarak sistem dışına çıkmak ister. Sisteme zarar vermemesi için basınç dengesini koruyan su depolarına denge bacası denir. Denge bacasının kullanılmasından sonra alınacak önlemler cebri boru et kalınlığını artırmak ve basınç düşürücü vanaların kullanılmasıdır.

3.2.6. Santral Binası

Türbinler, jeneratörler, kontrol-kumanda sistemi ve destekleyici cihazların bulunduğu ve bu cihazları korumak için inşa edilmiş binadır. İnşa edilecek arazinin topografik yapısına göre yer altında, yarı gömülü veya yer üstü inşa edilebilir.

3.2.7. İletim Kanalı

Hidroelektrik santrallerde istenilen debi değerinde suyun iletilmesi için kullanılan yapılardır. Trapez, duvarlı, kapalı duvarlı, tünel veya doğrudan cebri borular ile iletim gerçekleştirilir (Vikipedi, 2021).

3.2.8. Enerji Nakil Hattı

Santralden dağıtım bölgesine yüksek gerilim veya düşük gerilim ile elektrik enerjisinin iletilmesini gerçekleştiren hatlardır. Arazinin topografik durumuna göre güvenli olmak şartıyla yer altından veya havadan enerji nakli gerçekleştirilir. Direkler, iletken malzemeler, izolatör, topraklama teçhizatları ve diğer yardımcı malzemelerden oluşur.

3.2.9. Su Tutma Yapısı

Hidroelektrik santrallerde su seviyesini arttırmak ve suyu tutmak için yer aldığı coğrafyanın iklim yapısına uygun tasarlanan regülatör veya kanallardan faydalanılarak oluşturulan yapılardır.

3.2.10. Su Alma Yapısı

Bu yapının temel görevi akarsu veya baraj gölünde biriken suyu almak ve bu suyu düzenleyip kontrolünü sağlamaktır. Priz olarak adlandırılan giriş bölümünden su alma işlemi gerçekleşir (Tutaşı, 2022).

3.3. Hidroelektrik Santrallerin Avantajları

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en çok kullanılan HES'lerin aşağıda maddeler halinde verilen birçok avantaja sahip olduğu bilinmektedir.

- Küresel ısınmaya sebep olan ekosisteme zarar veren sera gazı salınımına yol açmaz. Fosil yakıtların tersine temiz bir enerji kaynağıdır.

- Yapıldığı bölgenin gelişmesine ve kalkınmasına yardımcı olur.

- Teknolojisi ve tasarımı gün geçtikçe ilerlemekte olan güvenilir bir enerji kaynağıdır.

- Balık yetiştiriciliği, sulama, turistik ve su sporlarında faydalanılabilir. Ekonomik ve kültürel açıdan katkı sağlar.

- Yerli üretimi destekler ve dışa bağımlılığı azaltır. Sürdürülebilir bir enerji kaynağıdır.

- Su kaynağının azalma ve tükenme ihtimali olsa bile elektrik üretiminin pasif hale gelmesi uzun zaman alır.

- Uzun süre faydalanılacak şekilde planlı ve sistematik olarak tasarlanmıştır.

- Atık madde oluşturmaz. Hava kirliliğine sebep olmaz.

- Entegre sistemleri ile rüzgar ve güneş enerjisinin depolanması için bir yoldur. Bunun için inşaatlar ve projeler geliştirilmeye müsaittir.

- Hidroelektrik santrallerin verimlilikleri yüksektir.

- Bakım ve onarım masrafları düşüktür.

- Yakıta ihtiyaç duyulmadan elektrik üretilir.

3.4. Hidroelektrik Santrallerin Dezavantajları

Hidroelektrik Santrallerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajları aşağıda maddeler halinde yer almaktadır.

- Suda yaşayan canlıların göç güzergâhlarına engel olması habitatın dengesine zarar verebilir.

- Buharlaştırmanın etkisiyle su kaybı yaşanır.

- Hidroelektrik santrallerin inşası için gerekli şartları sağlayan yerler kısıtlıdır.

- Santral kurulum maliyeti yüksektir. Tam anlamıyla dezavantaj değildir. Üretilen enerji miktarı düşünüldüğünde uzun sürede kârlı bir yatırımdır.

- Su altında kalan maddelerin bozulması sonucu düşük miktarda karbon salınımı olabilir.

- Sel oluşması durumunda çevreye olumsuz etkisi olur.

- HES yapılacak bölgede yaşayan insanlar varsa tahliyesine neden olur. Ayrıca tarım arazilerinin kaybına neden olur.

3.5. Dünyadan ve Türkiye’den HES Örnekleri

3.5.1. Üç Boğaz Barajı

Çin’deki en büyük nehir olan Yangtze Nehri üzerinde inşa edilen dünyanın en büyük beton yapısı ve hidroelektrik santrali olan mega yapıdır (Şekil 3.7). 32 adet 700 MW jeneratörden ve 2 adet 50 MW güç ünitesinden olmak üzere toplam 22.500 MW’lık kapasiteye sahiptir.

Üç Boğaz Barajı haznesinin maximum su depolama yüksekliği 175 metre ve maximum taşkın kontrol kapasitesi 22,15 milyar m³’tür. Her sene taşkın mevsiminin bitiminde su depolama işlemi gerçekleşir ve kuru geçen mevsimlerde aşamalı olarak su çekimi gerçekleşir. Bu sayede taşkın önleme, su temini ve elektrik ihtiyacı karşılanır (Çin Halk Cumhuriyeti Devlet Konseyi, 2021).

Baraj inşaatı sırasında Yangtze Nehrini yönlendirmek için sandık barajları sistemi kurulmuştur. Barajın bölümleri bu şekilde yerleştirilmiştir. Büyük miktarda beton olduğu için betonun ısınma problemini aşmak için bir çok yol denenmiştir. Agrega ve kumların karışımından önce serin tutulması, buz eklenmesi, güneş ışığının etkisini azaltmak için yapay sis üreten cihazlar kullanılması bu yollardan bazılarıdır. Hızlı gelişen ekonomi ve nüfusun etkisiyle artan talep ve bölgede sık görülen sel suları problemi de bu projenin gerçekleşmesi ile son bulmuştur.



Şekil 3.7. Üç Boğaz Barajı

Kaynak: (Xinhua, 2021)

3.5.2. Atatürk Barajı

Atatürk Barajı 8 adet türbinden oluşan 2.400 MW kurulu gücü ve 8.900 GW/h yıllık üretim elektrik enerjisi ile Türkiye'nin en büyük hidroelektrik santralidir. İnşası ve tasarımı tamamen Türk mühendis ve işçiler ile gerçekleşen baraj gövde hacmi ile dünyanın en büyük barajları arasındadır. Kret uzunluğu 1.644 m, kret genişliği 15 m, maximum su kotu 542 m ve su depolama hacmi 48,7 milyar m³'tür. Gövde yüksekliği 169 m, gövde hacmi 84,5 milyon m³ olan baraj, kaya dolgu baraj sınıfındadır (Güneş, 2020: 60).



Şekil 3.8. Atatürk Barajı

Kaynak: (Enerji Portalı, 2018)

3.5.3. Karakaya Barajı ve HES

Santral yeri Diyarbakır Çüngüş bölgesinde Fırat Nehri üzerine inşa edilmiş Türkiye'nin en büyük 2. hidroelektrik santralidir (Şekil 3.9). 1.800 MW (6x300 MW) kurulu gücüne sahip santral 1987 yılında faaliyete geçmiştir. Kret uzunluğu 462 m ve baraj gövde hacmi 2×10^6 m³ olan beton kemer ağırlık tipinde bir barajdır.



Şekil 3.9. Karakaya Barajı ve HES

Kaynak: (T.C. Çüngüş Kaymakamlığı, 2019)

3.5.4. Keban Barajı ve HES

Elazığ ilinin Keban bölgesinde 1.330 MW kurulu gücüne sahip Fırat Nehri üzerinde kurulu Türkiye'nin 3. büyük hidroelektrik santralidir (Şekil 3.10). Baraj gölü $31 \times 10^9 \text{ m}^3$ hacminde Türkiye'nin en büyük yapay göllerinden bir tanesidir.

Keban Barajı kaya dolgu ve beton ağırlık karma sınıfından oluşan bir yapıdır. Baraj gölü 125 km uzunluğuna, 675 m^2 alanına 30,1 milyar m^3 hacmine ve $635 \text{ m}^3/\text{s}$ ortalama günlük debi değerine sahip bir göldür (T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, 2022).



Şekil 3.10. Keban Barajı ve HES

Kaynak: (Enerji Gazetesi, 2020)

4. ENERJİ DEPOLAMANIN ÖNEMİ

Gün geçtikçe çoğalan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli enerjiyi bulmak ve bu enerjiyi ihtiyaç olduğu zamanlarda kullanmak üzere depolamak gereklidir. Depolanacak enerjinin yenilenebilir enerji kaynağı olması hem ekolojik açıdan hem de sürdürülebilir ekonomi açısından önemlidir. Elektrik ihtiyacı talebinin çok olması durumunda veya arıza olması durumunda devreye kısa sürede girerek elektriğin sürekli akmasını sağlayacak depolama sistemlerine ihtiyaç vardır. Sürekliliğin olması enerji arz güvenliği açısından önemlidir.

Eski çağlarda enerji kaynağı olarak odun kullanılmıştır. Yemeklerin pişirilmesi, ısınma ihtiyacının karşılanması ve suyun ısıtılması gibi birçok alanda faydalanılmıştır. Yazın toplanan fazla odunun depolanarak kışın kullanılmak üzere saklanması enerji depolamaya en eski örnek olarak verilebilir. Daha sonra karbon içeriği yüksek olan kömürün enerjisinin odundan yüksek olduğu farkedilmiştir. Kütle başına düşen enerji değerinin yüksek olması ile depolama açısından kullanımın daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır. 19. yüzyılda dünyadaki enerjinin % 84'ü yaklaşık 1.018 megajoule odun, odun kömürü ve kalıntılardan sağlanmıştır (Huggins, 2010).

Enerji depolama sistemlerinin önemli bir katkısı ise yenilenebilir enerji kaynakları ile depo edildiğinde yerel üretimi destekleyerek dışa bağımlılıktan kurtarır. Fosil yakıtlarının azalması ve tükenmeye doğru gidiyor olması sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Bu artış sonucunda doğal olarak enerji depolama sistemleri artacak ve bu sayede enerji tasarrufu sağlanarak ülke ekonomisine katkı sağlanacaktır.

Depolama verimliliği sistemde enerji kayıplarının minimuma indirilmesi ile orantılı olarak artmaktadır. Türbin verimliliği, cebri borudaki yük kayıpları, sistemdeki kaçaklar, motor-jeneratör verimliliği, buharlaşma miktarı ve suyun depolama dışında başka amaçlarda kullanılması depolama verimliliğini etkileyen önemli etmenlerdir. Tesis verimliliğini arttırmak için ise hibrit sistemlerden faydalanılabilir. Bölgede ihtiyaç fazlası olan rüzgâr ve güneş enerjisi pompaj modunda gerekli enerjiyi karşılamak için kullanılabilir (Tilahun, 2009: 28).

Enerji depolama sistemlerinin temel görevi enerji arz ve talebini dengelemek ve sistemin verimliliğini maximum seviyede tutmaktır. Ayrıca elektrik kalitesini yükseltmek ve süreklilik için önemli sistemlerdir. Enerji, dönüşümleri sayesinde depolanarak istenildiği zaman tekrar elektrik enerjisine çevrilerek kullanılabilir (Açıkgöz, 2019: 1).

- Bir enerji depolama sisteminde aranan özellikler şunlardır;
- Arıza durumunda devreye girmeli
- Ekonomik katkı
- Yüksek depolama kapasitesi
- Hızlı tepki verme
- Kararlılık
- Uzun ömür
- Kaliteli güç
- Şarj/deşarj veriminin yüksek olması
- Frekans kontrolü
- Elektrik kayıplarının az olması
- Düşük maliyet
- Yoğun enerjiye sahip olması
- Depolanacak enerjinin kaynağının çevre dostu olması

4.1. Süperkapasitörler

Birbirinden ayrı olan iki iletken plaka veya daha fazla plakalar ile seramik, sıvı jel gibi dielektrik yalıtkan malzemelerin birleşmesiyle oluşan sistemdir. Sistemin çalışması için iletken plakalar elektrolite batırılır. Şarj işlemi başladığı zaman bir iletken pozitif yük olurken diğer iletken negatif yük olur ve plakalar arasında yer alan yalıtkan malzemenin bir tarafında negatif yükler diğer tarafında pozitif yükler oluşur. Zıt yüklerin oluşması ile plakalarda yüklenme gerçekleşir. Şarj olmadığı zamanlarda ise negatif ve pozitif yükler serbest kalır.

Süperkapasitör plakalarının alanının artırılması ve plakalar arasındaki mesafenin azalması kapasiteyi artırır. Klasik elektrolit kapasitörlere göre daha kısa sürede şarj olur ve daha fazla enerji depolar ve daha uzun ömürlüdür. Yüksek ve düşük sıcaklıklarda çalışabilmesi, verimliliklerinin yüksek olması, toksit madde içermemesi ve uzun ömürlü olması en önemli avantajlarıdır. Televizyonlarda, bilgisayarlarda, elektrikli araçlarda ve cep telefonun bataryalarında olmak üzere birçok alanda süperkapasitörlerden faydalanılmaktadır.

4.2. Volanlar

Geçmişe eskiye dayanan bir enerji depolama sistemidir. Devir sayısı yüksek bir rotor sayesinde enerji depolanır. Volanlara enerji verildiği zaman devir sayısı artmaktadır. Yaklaşık 75.000 devir/dakika devir sayısı vardır. Uzay, telekomünikasyon, ulaşım ve nükleer araştırmalarda bu enerji depolama sisteminden faydalanılır (Kocaman, 2013: 122).

Volanlar genelde çelik malzemelerden yapılır. Büyük miktarda enerji depolamak için büyük miktarda çelik gerektiği için bu pek mümkün değildir. Düşük ölçekte enerji depolamasına rağmen sistem frekansını dengelemesi ve sürekli güç kaynağı oluşturması, güç yoğunluğunun yüksek olması, geçmişinin eski olması ve uzun ömürlü olması en önemli avantajlarındandır.

4.3. Bataryalar

Genel olarak anot, katot ve elektrolitten oluşan depolanmış kimyasal enerjiyi ihtiyaç halinde elektrik enerjisine çeviren enerji depolama yöntemidir. Pozitif yükler anota, negatif yükler katota bağlanır. Başka bir cihaza enerji transferi sırasında negatif yükler anota doğru hareket ederek iki kutup arasında elektrik akımı oluşur. Anot ve katot kutuplarını çevreleyen nikel, kurşun, sodyum gibi yaygın kullanılan kimyasal maddeler elektrolit görevi görür. Batarya çeşitleri kullanılan kimyasal maddelerin isimlerine göre sınıflandırılır. Cep telefonlarında, atmlerde, telekomünasyon sektörü gibi birçok alanda bataryalardan enerji depolamak için faydalanılır.

- Lityum İyon
- Metal Hava
- Çinko Bromin
- Kurşun Asit
- Sodyum Sülfür
- Nikel Kadmiyum
- Polisülfür Bromür
- Vanadyum Redox en yaygın kullanılan batarya çeşitleridir.

4.4. Süper İletken Manyetik Enerji Depolama

Bobin, soğutma sistemi ve enerji dönüşüm sisteminden oluşur. Bobin içerisinde oluşan manyetik alanda enerji doğru akım ile depolanır. Enerji çıkışında ise alternatif akım ile işlem gerçekleşir. Sistemin çalışmasını etkileyen en önemli unsur sıcaklık değeridir. Genel olarak düşük sıcaklıklar için sıvı hale getirilmiş helyum ve nitrojen kullanılır. Nitrojenin maliyeti helyumdan daha düşük olduğu için kullanımı daha yaygındır. Sıcaklık değeri düştükçe elektrik direnci azalan veya kaybolan malzemenin iletkenliği artar. Bu sayede elektriğin transferi sürekli olur. Diğer enerji depolama sistemlerinde olduğu gibi frekans kontrolü, puant gücünün kontrolü ve enerji devamlılığı gibi durumlarda fayda sağlar.

Avantajları;

- Güç kapasitesi yüksektir.
- Verimliliği yüksektir ve uzun ömürlüdür.
- Bakım maliyeti düşüktür.

Dezavantajları;

- Kurulum maliyeti yüksektir.
- Süper iletken malzemeler kırılmandır.

4.5. Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama

Hava uygun ortamda sıkıştırılarak depo edilir. Bu işlem elektrik talebinin düşük olduğu zamanlarda gerçekleşir. Talebin yüksek olduğu zamanlarda basınçlı hava serbest bırakılarak türbinler döndürülür ve jeneratörlerde elektrik üretilir. Ticari olarak ilk kurulan sıkıştırılmış hava enerji depolama tesisi Almanyanın Hundorf şehrinde 1978 yılında kurulmuştur. Depolama sorunu olan diğer enerji kaynaklarının depolanmasına yardımcı olarak ekonomik ve çevresel katkı sağlamaktadır. Sıkıştırılmış hava depolama tesisinin bileşenleri;

- Motor
- Su soğutma ünitesi
- İyileştirici
- Yanma odası
- Basınçlı türbinler
- Jeneratör'dür.

4.6. Isıl Enerji Depolama

Bir maddenin sahip olduğu potansiyel ve kinetik enerjilerinin sıcaklık fark değişimi sonucu ortaya çıkan enerjiye ısı enerjisi denir. Bu sıcaklık değişimi ile maddenin parçaları titreşime geçer ve faz değişimi gerçekleşebilir. Güneş enerjisi, jeotermal enerji ve diğer ısı enerjisi kaynakları mevsimsel veya günlük olarak depolanır. Gündüz depo edilip gece, yazın depo edilip kışın kullanılabilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sürecinde önemlidir. Ulaşım, sanayi, tarım ve birçok sektörde bu depolama biçiminden yararlanılır.



5.POMPAJ DEPOLAMALI HİDROELEKTRİK SANTRALLER

Temelde iki rezervuar arasındaki yükseklik farkından doğan potansiyel enerjiden faydalanılarak inşa edilen enerji depolama yöntemidir. Elektrik talebinin az olduğu zamanlarda su alt rezervuardan su pompası aracılığı ile üst rezervuara taşınır ve depolanır. Elektrik ihtiyacının fazla olduğu zamanlarda ise üst rezervuardan türbinlere su akıtılarak elektrik üretimi gerçekleşir. Suyun akışı ile türbinler dönerek motorları çalıştırır ve elektrik elde edilir. Potansiyel enerji sırasıyla kinetik, mekanik ve elektrik enerjisine dönüşür. Temel olarak alt rezervuar, üst rezervuar, su boruları, türbin/pompa, motor/jeneratör, santral binası, iletim hatları ve diğer yardımcı elemanlardan oluşur.

Enerji kaynaklarını seçerken sürdürülebilir olması enerji arz güvenliği açısından önemlidir. Pompaj depolamalı hidroelektrik santralleri kısa sürede devreye girerek kesintiyi minimum sürede tutarak enerji arz güvenliğini korumaya yardımcı olur. Kullanıcılara kesintisiz, güvenilir ve maliyeti düşük elektrik vermeyi amaçlar. Diğer enerji kaynaklarında arıza veya kesinti olduğu zamanlarda da devreye girerek yedek bir enerji türü olarak çalışabilmektedir.

Tarihte ilk pompaj depolama sistemi 1907 yılında inşa edilen Engeweiher pompaj depolama tesisidir. Teknolojinin gelişmesiyle ve elektrik ihtiyacının artmasıyla günümüzde en çok tercih edilen depolama yöntemi olmuştur. 1960 yılına kadar nükleer santrallerin öneminin artmasıyla kullanımı artmıştır. Nükleer santraller ile PDHES (Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller)'inin birlikte çalışması PDHES'in hızlı gelişmesini sağlamıştır. Ancak bu hızlı gelişme 1990'lı yıllara kadar devam edebilmiştir. Nükleer santrallerin öneminin azalması, doğalgaz fiyatlarının düşmesi gibi etkenler yüzünden önemi azalmıştır.

PDHES tasarımlarında seçilen türbin tipi önemlidir. Genelde Pelton veya Francis tipi türbinler seçilmektedir. Pelton türbinleri Francis türbin tiplerine göre daha yüksek düşülerde ve tek yönde çalışır. Bu yüzden pompalama modunda eksik kalır. Francis tipi türbinler ise su akış hızına göre ayarlanabilmekte ve çift yönde çalışabilmektedir. PDHES tasarımında en çok tercih edilen türbin tipidir.

PDHES'in işletme, bakım ve onarım maliyeti düşüktür. İnşaat süresi uzun ve maliyeti fazladır ancak faaliyete geçtikten sonra diğer depolama yöntemlerine göre daha uygundur. Elektrik fiyatının düşük olduğu zamanlarda pompalama işlemi gerçekleşmesi ve fiyatın yüksek olduğu zamanlarda su akışına izin verilmesi sayesinde maddi katkı sağlanır. Projenin

büyüklüğü, çevresindeki düzenlemeler, alt yapısı, proje yerinin konumu gibi faktörler maliyeti etkileyen diğer önemli etmenlerdir.

PDHES uygun koşullar sağlandığında rüzgâr ve güneş enerjisi gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına entegre edilerek çalışabilmektedir. Üst rezervuara pompaj işlemi için gerekli enerji bu sayede sağlanabilir. Depolama sorunu olan ve dengesiz üretim yapan yenilenebilir enerji kaynaklarına teşvik edici özelliği olması önemli bir avantajdır.

Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrallerde enerji depolamanın diğer bir yolu ise su yüzeyi ile su tabanına inşa edilen kapalı sistemin arasında oluşan kot farkından faydalanılarak düşü elde edilmesidir. Rezervuar ihtiyacı olmadan potansiyel enerji farkı oluşur. Deniz tabanına pompa/türbin bulunan yüksek basınca dayalı kapalı bir kap inşa edilir ve su yolu borusu ile deniz yüzeyine bağlanır. PDHES çalışma prensibindeki gibi elektrik ihtiyacının durumuna göre depolama veya üretim gerçekleşir. Pompaj işlemi için gerekli elektrik enerjisi için rüzgar enerjisi veya güneş enerjisi santrallerinden faydalanılabilir. Oluşturulan sisteme deniz altında pompaj depolama sistemi denilmektedir. Bu sistemin en büyük ihtiyacı entegre sistemlere muhtaç olmasıdır (Breeze, 2018: 19).

5.1. PDHES Tipleri ve Yapılandırmaları

PDHES sistemlerinde üst rezervuar seçiminde 2 tip seçenek vardır;

Açık döngü PDHES; Nehir ve deniz gibi doğal akan suyun oluşturduğu sistemlerdir.

Kapalı döngü PDHES; Doğal akan suyun olmadığı yapay veya doğal oluşumların oluşturduğu sistemlerdir. Su akışı sürekli olmadığı için çevre ile daha uyumludur ve olumsuz etkisi daha azdır.

Klasik tasarımlar veya günümüz teknolojisinin gelişmesiyle ortaya çıkan farklı tasarımlar ile karşımıza çıkmaktadır;

İkili yapılandırma; Jeneratör ve motorun, pompa ve türbin ile birlikte oluşturduğu her iki yönde çalışabilen yapılandırmalardır. Modern teknolojinin kullanıldığı birlikte çalışan ikili yapılandırmanın kullanıldığı sistem en verimli ve en çok tercih edilen tasarımdır.

Üçlü yapılandırma; Jeneratör, pompa ve türbinin ayrı olduğu yapılandırmadır. Pompa ve türbinin dönüş yönü aynıdır.

Dörtlü yapılandırma; İki santrale ihtiyaç olan türbin ve pompanın ayrıldığı yapılandırma. Enerjinin depolanması ve elektriğin üretimi ayrı gerçekleşir.

5.2. PDHES Elemanları ve Depolama Çeşitleri

Bölüm 3.2’de yer alan Hidroelektrik Santral elemanlarına ek olarak aşağıda verilen elemanlar PDHES için gerekli olan bölümlerdir.

Üst Hazne; Düşü yüksekliğine uygun olarak planlanarak deniz, göl, nehir gibi doğal olarak ya da yapay olarak inşa edilen genellikle betonarme veya kaya dolgudan inşa edilen haznedir.

Alt Hazne; Suyun biriktirmeli ya da biriktirmesiz olarak üst hazneye ulaşmasını amaçlayan haznedir. Deniz, göl, nehir, hazır baraj rezervuarı gibi suyun alt kottan üst kota ulaşabilmesine imkan verilen yerler seçilebilir.

Su iletim hatları; Alt rezervuar ve üst rezervuar arasında su akışını sağlayacak cebri borular veya tünellerden faydalanılır. Pompalama ve üretim aşamasına bağlı olarak tek ya da daha fazla hat seçilebilir.

Kuyruk suyu tüneli; Suyun alt rezervuardan iletimi noktasından enerji üretim/pompaj noktasına kadar mesafede tasarlanan tünellerdir. Santral odası ile alt rezervuar arasında suyun akışı gerçekleşir.

PDHES depolama çeşitleri yıllık, mevsimlik, haftalık, günlük ve saatlik olarak sınıflandırılır;

Yıllık depolama; Enerjinin depolanması ve su ihtiyacının karşılanması amacıyla yararlanılan ender görülen bir depolama çeşididir. Bir yıldan daha uzun sürede depolama işlemi gerçekleşir. Elektrik üretiminin fazla olduğu zamanlarda pompalama işlemi gerçekleşirken yıllık ihtiyaç olduğu zamanlarda üretim gerçekleşir.

Mevsimlik depolama; Yağışlı mevsimler depolama için uygun zamandır. Yağış olmadığı zamanlarda veya elektrik ihtiyacının fazla olduğu zamanlarda da üretim moduna geçilir. Güneş ve rüzgar enerjisi gibi entegre sistemler ile diğer enerji kaynaklarından faydalanabilecek zamanlar da seçilerek suyun depolama işlemi gerçekleştirilir.

Haftalık depolama; Genellikle elektrik talebinin az olduğu hafta sonunda pompaj modunda çalışarak depolama işlemi gerçekleşir. Talebin yüksek olduğu hafta içi günlerde üretim modunda çalışır. Pompaj için diğer enerji kaynaklarından faydalanılıyorsa zaman aralığı farklılık gösterebilir.

Günlük depolama; Pompaj modu elektrik talebinin az olduğu gece saatlerinde üretim modu ise elektrik talebinin fazla olduğu gündüz saatlerinde gerçekleşir.

Saatlik depolama: Sistemde arıza veya elektrik ihtiyacı olması durumunda devreye girerek kısa süreli yedek güç oluşturmayı amaçlayan depolama çeşididir.

5.3. Dünyadaki PDHES Durumu

5.3.1. Çin

Çin 2021 yılında toplam PDHES 36.390 MW toplam kurulu gücüne sahiptir (IRENA, 2022:11). PDHES kurulumuna 1960'lı yıllardan sonra başlamıştır. Ekonomisinin hızlı gelişmesi sayesinde günümüzde önemli PDHES'ine sahip ülkelerden biridir. Tablo 5.1'deki verilere göre Çin'de mevcut 26 adet 1.000 MW üstü pompaj depolamalı hidroelektrik santrali bulunmaktadır (Vikipedi, 2022).

Çin 14. Beş Yıllık Kalkınma Planına göre (2021-2025) hedefi 13. Beş Yıllık Kalkınma Planının (2016-2020) iki katına çıkarak 62.000 MW kurulu gücünü geçmeyi hedeflemektedir. Ulusal Enerji İdaresi Pompaj depolama için Orta ve Uzun Vadeli Kalkınma Planına göre hedefi 2030 yılında 120 milyon kilovata ulaştırmaktır (Ulusal Enerji İdaresi, 2021).

Tablo 5.1. Çin’deki 1.000 MW Üstü PDS (Pompaj Depolama Santral)’ler

Tesis Adı (PDS)	Kurulu Gücü (MW)
Fengning	3.600
Huizhou	2.448
Guangdong	2.400
Meizhou	2.400
Changlongshan	2.100
Tianhuangping	1.836
Jixi	1.800
Liyang	1.500
Xianju	1.500
Dunhua	1.400
Qingyuan	1.280
Hohhot	1.224
Bailianhe	1.200
Baoquan	1.200
Heimifeng	1.200
Hongping	1.200
Pushihe	1200
Shenzhen	1.200
Tongbai	1.200
Xianyou	1.200
Xilongchi	1.200
Yimeng	1.200
Yangjiang	1.200
Huanggou	1.200
Baiyun	1.200
Zhouning	1.200

Kaynak: (Wikipedi, 2022)

Huizhou pompaj depolama santrali; Çin’in Guangdong eyaletinin Huizhou şehrinde inşa edilen santral 2011 yılında faaliyete geçmiştir (Şekil 5.1). Üst rezervuar ve alt rezervuar beton ağırlıklı baraj tipinde inşa edilmiştir. 306 MW gücünde 8 pompa jeneratöründen oluşan 2.448 MW kurulu güce sahip pompaj depolamalı hidroelektrik santralinin yıllık elektrik üretimi 4.560 gigawattsaat’dır.



Şekil 5.1. Huizhou Pompaj Depolama Santrali

Kaynak: (Xueqiu, 2017)

Guangdong pompaj depolama tesisi; Çin'in Guangdong eyaleti Conghua bölgesinde 1989 yılında inşaatına başlanmış ve 2000 yılında faaliyete geçmiştir (Şekil 5.2). Toplam kurulu gücü 2.400 MW (8x300 MW)'dır. Üst rezervuar kaya dolgu baraj tipinde deniz seviyesinden 900 metre yükseklikte, alt rezervuar ise beton ağırlık baraj tipinde deniz seviyesinden 270 m yükseklikte inşa edilmiştir (Baidu, 2021).



Şekil 5.2. Guangdong Pompaj Depolama Tesisi

Kaynak: (Baidu, 2021).

Fengning pompaj depolama santrali; Çin'in Hebein eyaletinin Fengning ilçesinde 2013 yılında inşaatı başlamıştır (Şekil 5.3). Yıllık elektrik üretimi yaklaşık 6,6 milyar kWh'tir. 300 MW'dan oluşan 12 adet tersinir pompa türbini jeneratör setinden oluşmak üzere toplam kurulu

gücü 3.600 MW'dır. Global düzeyde Pompaj Depolamalı Santrallerin kurulu gücü sıralamasında ilk sırada yer almaktadır (Xinhuanet, 2021).



Şekil 5.3. Fengning Pompaj Depolama Santrali

Kaynak: (State Grid Corp of China, 2021)

5.3.2. Amerika Birleşik Devleti

2021 Pompaj Depolama Raporuna göre ABD'de 43 PDHES bulunmaktadır ve depolama kapasiteleri toplamı 22.878 MW'dır. 67 yeni PDHES projesi ile minimum 50 GW depolama beklenmektedir (NHA, 2021: 7).

Amerika Birleşik Devletleri'nde pompaj depolama tesisleri inşası 1960 ve 1990 yılları arasında başlamıştır. ABD'de günümüzde faaliyette olan PDHES'lerin kapasitesinin nerdeyse yarısı 1970'li yıllarda inşa edilmiştir. PDHES'ler Amerika Birleşik Devletleri'nde kapasite ve santral sayısı bakımından en büyük elektrik enerjisi depolama sistemidir (Mayes, 2019).

Tablo 5.2. ABD’deki 1.000 MW Üstü PDHES’ler

Tesis Adı	Kurulu Gücü (Mw)
Bath County Pompaj Depolama	3.003
Ludington PDS	1.872
Rakun Dağı PDS	1.652
Kastaik E.S	1.566
Helms PDS	1.200
Blenheim-Gilboa Hidroelektrik	1.160
Rocky Mountain Hidroelektrik	1.095
“Northfield Dağı	1.080
Muddy Run PDS	1.071
Bad Creek Hidroelektrik Santrali	1.065

Kaynak: (Vikipedi, 2022)

Tablo 5.2’deki tabloya göre Bath County Pompaj Depolama İstasyonu (3.003 MW) önderliğinde 1.000 MW üstündeki PDHES kurulu gücü listelenmiştir (Vikipedi, 2022). Listedeki santrallerin toplam kurulu güce oranı yaklaşık % 65’tir.

Bath county pompaj depolama istasyonu; 1977 yılında Amerika Birleşik Devletlerinin Virginia eyaletinde inşaatına başlanmış ve 1985’de faaliyete geçmiştir (Şekil 5.4). 6x500 MW kurulu güce sahiptir. Depolama kapasitesi toplam 24.000 MWh ‘dır. Alt rezervuar 225 hektar, üst rezervuar ise 107 hektardır. İki rezervuar arasında 370 m yükseklik farkı vardır. Rezervuarlar inşa edilirken toprak ve kaya dolgu baraj tipinden faydalanılmıştır.



Şekil 5.4. Bath County Pompaj Depolama İstasyonu

Kaynak: (Google Earth Pro, 2022)

5.3.3. Japonya

Japonya'da 2021 yılında yaklaşık 21.894 MW toplam kurulu gücünde pompalı depolama santrali bulunmaktadır (IRENA, 2022: 11). Birçoğu öncelikle nükleer santralleri yedeklemek amacıyla inşa edilmiştir. Günümüzde yaklaşık 50 PDHES bulunmaktadır ve ilk PDHES Nojiri Gölü yakınında bulunan Ikejiri Nehri Enerji Santralidir. Tablo 5.3 verileri incelendiğinde Oku Tataragi Elektrik Santralini (E.S) de 1.932 MW kurulu gücü ile ilk sırada yer aldığı görülmektedir (Electrical Japan, 2022).

Tablo 5.3. Japonya'daki 300 MW Üstü PDHES'ler

Tesis adı	Gücü (MW)	Tesis adı	Gücü (MW)
Oku Tataragi E.S	1.932	Okumino E.S	1.500
Yeni Takasegawa E.S	1.280	Okuchi E.S	1.280
Okuyoshino E.S	1.206	Matanoagawa	1.200
Komarugawa E.S	1.200	Tamahara	1.200
Kuzunogawa E.S	1.200	Shintoyone E.S	1.125
Imaichi E.S	1.050	Shimogo E.S	1.000
Oku Kiyotsu S.	1.000	Kannagawa E.S	940
Shiobara E.S	900	Okuyahagi E.S	780
Numahara S.	675	Azumi S.	623
Minamihara E.S	620	Honkawa E.S	615
Tenzan E.S	600	Okukiyotsu No.2 E.S	600
Ohira E.S	500	Kisenzan E.S	466
İkinci Numazawa E.S	460	Kyogoku E.S	400
Ikehara E.S	350	Takane No.1 E.S	340
Okuyahagi No.1 E.S	323	Shinnarihagawa E.S	303

Kaynak: (Electrical Japan, 2022)

Okutataragi pompalı depolama santrali; Japonya'nın Hyogo eyaletinde 1970 yılında inşaatına başlanmış ve 1974 yılında faaliyete geçmiştir. Üst rezervuar olan Kurokawa rezervuarı 5,2 km² bir rezervuar yüzey alanına sahiptir (Şekil 5.5). Alt rezervuar olan Tataragi rezervuarı 13,4 km² rezervuar yüzey alanına sahiptir (Şekil 5.6). 1.932 MW kurulu güce sahip santralin maximum düşüşü 387,5 m'dir. Kaya dolgu baraj tipinde üst ve alt rezervuarlar inşa edilmiştir (Vikipedi, 2019).



Şekil 5.5. Kurokawa Rezervuarı

Kaynak: (Vikipedi, 2019)



Şekil 5.6. Tataragi Rezervuarı

Kaynak: (Vikipedi, 2019)

Dinorwig hidroelektrik santrali; Birleşik krallıktaki en büyük pompaj depolamalı hidroelektrik santralidir (Şekil 5.7). Kuzey Galler bölgesinde 1974 yılında çalışmalara başlanmış ve 1984 yılında faaliyete açılmıştır. 6 adet türbin ile maximum 1.728 GW kurulu gücüne sahiptir. Bölgede tesis inşa edilmeden önce faaliyeti sona ermiş bir taş ocağı bulunmaktaydı. Yüksek bir yapı olması ve önceden kazılmış olması santrali kurmayı kolaylaştırmıştır.



Şekil 5.7. Dinorwig Hidroelektrik Santrali

Kaynak: (Wikiwand, 2007)

5.3.4. Endonezya

Jakarta ve Bandung bölgeleri arasında inşası planlanan Yukarı Cisokan Pompaj Depolama Hidroelektrik Santrali Endonezya'nın ilk pompaj depolama santrali olacaktır. Yaklaşık 1.000 MW kurulu gücünde olması planlanmaktadır.

5.3.5. Türkiye

Ülkemizde PDHES çalışmaları ilk defa Mülga EİE Genel Müdürlüğü (Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü) tarafından başlatılmıştır. Mülga EİE Genel Müdürlüğü koordinasyonunda Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü ve Japonya Uluslararası İşbirliği Ajansı (JICA) aracılığı ile görevlendirilen Tokyo Electric Power Company (TEPCO) uzmanları eşliğinde Master Plan çalışmaları tamamlanmıştır. 2 Kasım 2011 tarih ve 28103 sayılı (mükerrer) Resmi Gazetede yayınlanan "662 sayılı Kanun Hükmünde Kararname" ile DSİ Genel Müdürlüğü bünyesinde kurulan Hidroelektrik Enerji Dairesi Başkanlığı tarafından devam ettirilmiştir (Ayder, 2015: 7).

Türkiye'de 2022 yılı itibari ile PDHES tesisi bulunmamaktadır. Etüt çalışmaları ve araştırılması devam eden projeler bulunmaktadır. Tablo 5.4'de etüt çalışması yapılan projeler hakkında bilgiler verilmiştir. Bu verilere göre Eğirdir gölü çevresinde 1.000 MW kurulu gücünde 175 m³/s debi ve 672 m düşü değerine sahip PDHES tasarımı ön etüt çalışması yapılmıştır. (Çiçek ve Özdemir, 2021: 32).

Tablo 5.4. Türkiye’de Pompaj Depolamalı HES’ler İçin Etüt Çalışması Yapılan Santraller

Santral Adı (PDHES)	Kurulu Gücü (MW)	Debi (m³/s)	Düşü (m)
Bayram Hacılı	1.000 MW	720	161
Hasan Uğurlu	1.000 MW	204	570
Aslantaş	500 MW	379	254
Yamula	500 MW	228	260
Oymapınar	500 MW	156	372
Eğirdir	1.000 MW	175	672
Karacaören 2	1.000 MW	190	615
Burdur	1.000 MW	316	370
Adıgüzel	1.000 MW	484	242
Yalova	500 MW	147	400
İznik 1	1.500 MW	687	255
İznik 2	500 MW	221	263
Demir Köprü	300 MW	166	213
Gökçekaya	1.600 MW	193	962
Sarıyar	1.000 MW	270	434
Kargı	1.000 MW	238	496

Kaynak: (Çiçek ve Özdemir, 2021: 32)

6. EĞİRDİR PDHES SANTRAL TASARIMI

6.1.Eğirdir Gölü ve Çevresinin İncelenmesi

PDHES tasarımıda alt rezervuar Eğirdir gölü olarak seçilmiştir (Şekil 6.1). Eğirdir gölü çevresinde PDHES tasarımı yapılırken bölgedeki deprem, iklim ve jeolojik yapısı hakkında araştırmalar yapılmıştır.



Şekil 6.1. Eğirdir Gölü

Kaynak: (Goller, 2021)

Tablo 6.1. Eğirdir Gölü Fiziki Özellikleri

Konum koordinatları	37° 50' 41"-38° 16' 55" kuzey enlemleri, 30° 57' 43"-30° 44' 39" doğu boylamları
Hacmi	4 milyar m ³
Yüzölçümü (ortalama)	475 km ²
Ortalama derinlik	10 m
En derin noktası	16,5 m
Deniz seviyesinden yüksekliği	918 m
Kuzey-Güney uzunluğu	48 km
Doğu-Batı genişliği	2,6-16 km

Kaynak: (Karabacak ve Pınar, 2018)

Eğirdir gölü Akdeniz bölgesinde yer alan Isparta ilinin Eğirdir ilçesi sınırları içerisinde yer alan bir tatlı su gölüdür. Tatlı su gölü olarak 2. sırada, genel göller sıralaması yüz ölçümü olarak 4. sıradadır. Bölgenin içme suyunu karşılama, tarımsal sulama ve turizm gibi katkıları ile önemli bir göldür. Gölün içerisinde doğal sit alanları mevcuttur. Göl üzerinde bulunan Can Ada ve Yeşil Ada gibi doğal güzelliklere sahip turizm açısından önemli yerleri mevcuttur. Tablo 6.1’de fiziki özellikleri verilmiştir. Bu özellikleri incelendiğinde ortalama derinliğinin 10 m olduğu ve en derin noktasının 16,5 m olduğu görülmektedir (Karabacak ve Pınar, 2018: 113). Bu çalışmada alt rezervuar su alma noktası belirlenirken bu değerler dikkate alınmıştır.

Eğirdir gölü yağış, dere, çay ve göl tabanından gelen sular tarafından beslenir ve yenilenir. Değirmen deresi, Akçay, Kocadere ve Özdere bazı örneklerdir. Adaçayı, Yaban gülü, Alıç, Meşe, Karaçam, Sedir, Kızılcı, Ardiç, Karaçal gibi birçok çeşit farklı yüksekliklerde bulunan bitki türleri ve örtüsü bulunmaktadır. Akdeniz ve karasal iklim arası bir iklime sahiptir.

Tablo 6.2. Isparta İli 1929-2021 Sıcaklık ve Yağış Ölçüm

Isparta	Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	Ortalama Yağışlı Gün Sayısı	Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)
Ocak	1,8	3,7	6,2	13,29	81,0
Şubat	3,0	4,7	7,8	10,35	67,0
Mart	6,0	5,6	11,6	11,88	58,7
Nisan	10,7	6,6	16,7	9,82	51,6
Mayıs	15,5	8,2	21,9	11,82	56,4
Haziran	19,9	10,1	26,6	9,71	35,5
Temmuz	23,4	11,1	30,4	3,29	15,8
Ağustos	23,3	10,5	30,6	3,47	14,1
Eylül	18,9	9,3	26,5	4,71	18,5
Ekim	13,4	6,8	20,6	8,00	38,1
Kasım	7,9	5,2	14,0	6,00	44,6
Aralık	3,6	3,3	8,2	11,06	87,1
Yıllık	12,3	7,1	18,4	103,4	568,4

Kaynak: (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022)

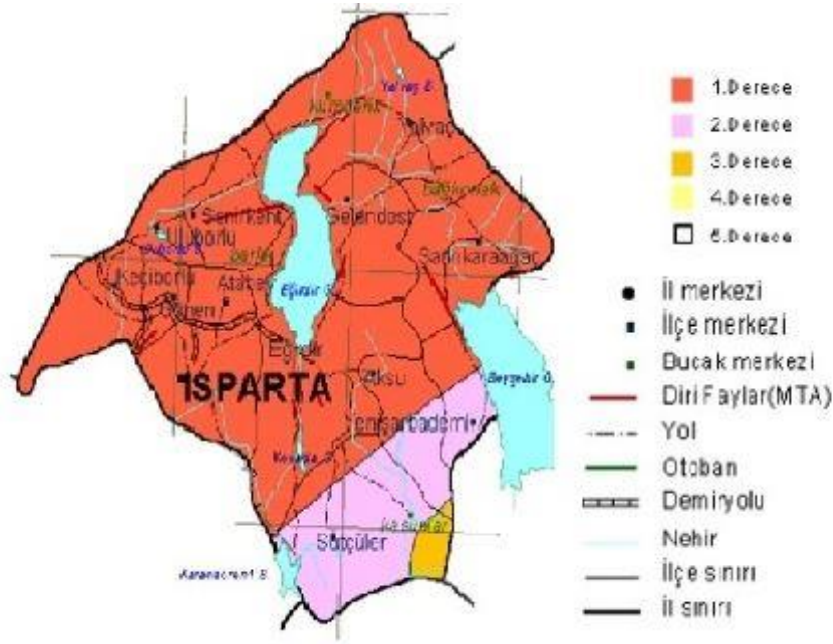
Isparta ili 1929-2021 Sıcaklık ve Yağış Ölçüm tablosu yukarıda verilmiştir (Tablo 6.2). Bu tabloya göre yıllık; ortalama sıcaklık 12,3 °C, ortalama güneşlenme süresi 7,1 saat, ortalama en yüksek sıcaklık 18,4 °C, ortalama yağışlı gün sayısı 103,4, aylık toplam yağış miktarı ortalaması 568,4 mm olduğu görülmektedir (Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2022).

Havzanın çevresinde çernozyum, bozkır, akdeniz kırmızı toprakları yaygındır. Havzanın çevresindeki bölgelerde kireç taşları, kil taşları, şistler, kumtaşları ve dolomitler bulunmaktadır. Eğirdir gölünün karstik ve tektonik etkiler sonrasında oluşan plüvyal dönemde ortaya çıktığı yaygın görüştür.

Ülkemiz Alp Himalaya deprem kuşağındadır. Kuzey Anadolu Fay Hatları, Doğu Anadolu Fay Hatları ve Batı Anadolu fay hatları en büyük ve en önemli fay hatlarıdır (Şekil 6.3). Deprem bölge haritasına göre 5 bölgeye ayrılmıştır. Isparta ili 1. derece deprem kuşağındadır (Şekil 6.2). Anadolu'nun batı yönünde kayması ve Afrika levhasının Girit Adası yönündeki hareketi, doğu ve batı yönünde sıkışmalara yol açmaktadır. Ayrıca kuzey ve güney yönünde genişleme de gerçekleşmektedir. Bu hareketlenme Isparta-Burdur yöresinde fay sistemlerini etkilemektedir (Satılmış, 2018: 299).

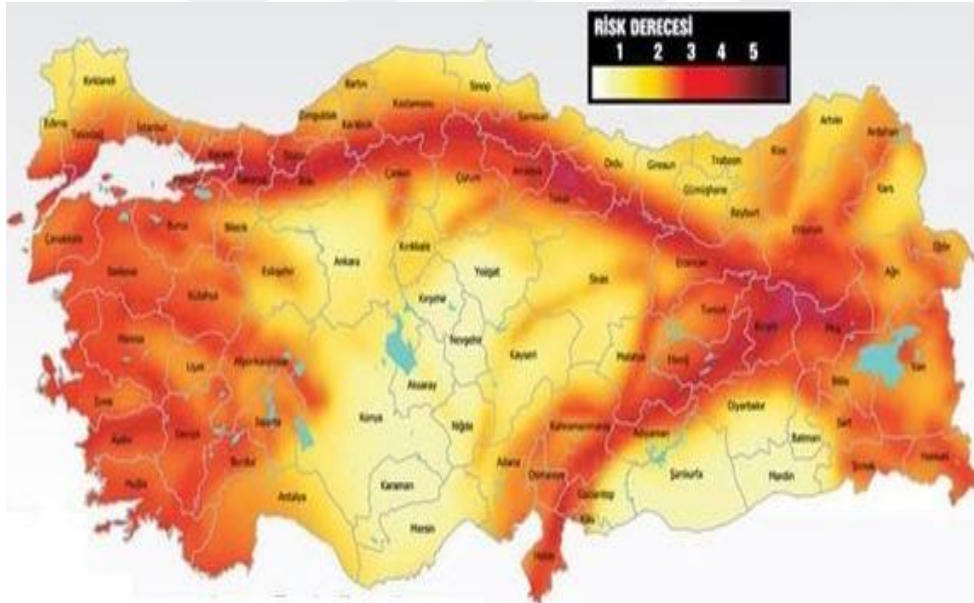
Depremi etkilerini azaltmak için alınacak bazı önlemler şunlardır:

- Denetim kontrolü
- Deprem standartlarına uygun yapı tasarımının olması
- Kaçak yapılara izin verilmemesi
- Deprem anında yönetim
- Kontrolsüz yapı inşasının önüne geçilmesi
- Stratejik ve riskli yapıların inşasında en tehlikesiz bölgelerin seçilmesi
- Toplumsal bilinçlenme
- Zemin incelemelerinin ve raporlarının dikkatli yapılması ve kontrolü
- Depreme dayanıklılık testlerinin yapılması ve ihtiyaç durumunda mümkünse güçlendirme yapılması



Şekil 6.2. Isparta İlinin Depremsellik Derecesi Haritası

Kaynak: (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022)



Şekil 6.3. Türkiye Deprem Risk Derecesi Haritası

Kaynak: (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022)

Üst rezervuar seçimi;

Üst rezervuar seçilirken yerleşkeden ve karayolundan uzak, yüksek düşü oluşturabilecek yerler tercih edilmiştir. Ayrıca olabildiğince çukur şeklinde olması inşaat işlerini ve maliyetini düşüreceği için bu tür yerler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Eğirdir gölü

çevresinde 38°11'34'' Kuzey ve 30°53'12'' Doğu koordinatında 1.430 m yükseklikteki nokta üst rezervuar merkezi olarak seçilmiştir (Şekil 6.4).



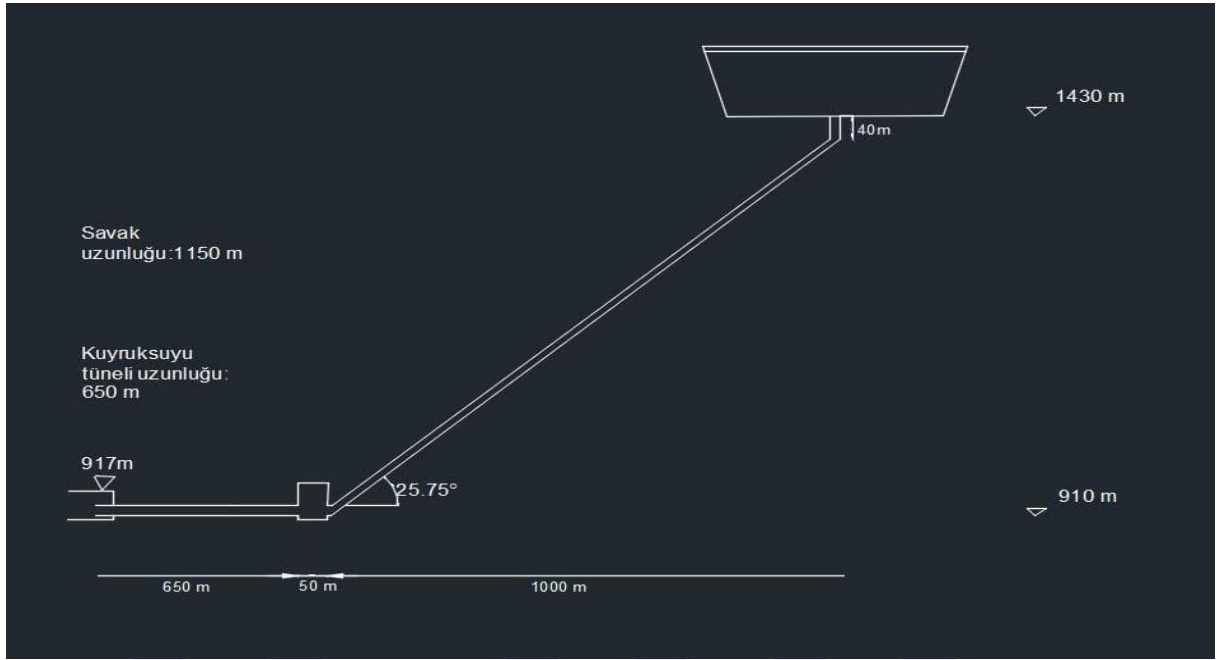
Şekil 6.4. Proje Üst Rezervuar Yer Tayini

Alt rezervuar seçimi; Alt rezervuar Eğirdir gölü olarak seçilmiştir. Gölün ortalama derinliği düşük olduğu için kıydan 60 m uzaklıkta 910 m kotu su alma noktası olarak seçilmiştir. Üst rezervuar ile yatay uzaklık 1.7 km'dir. Ülkemize yapılan pompalı depolama santrali ön etüt çalışmalarında Eğirdir gölünün olması bu bölgenin potansiyelinin olduğunun kanıtıdır.

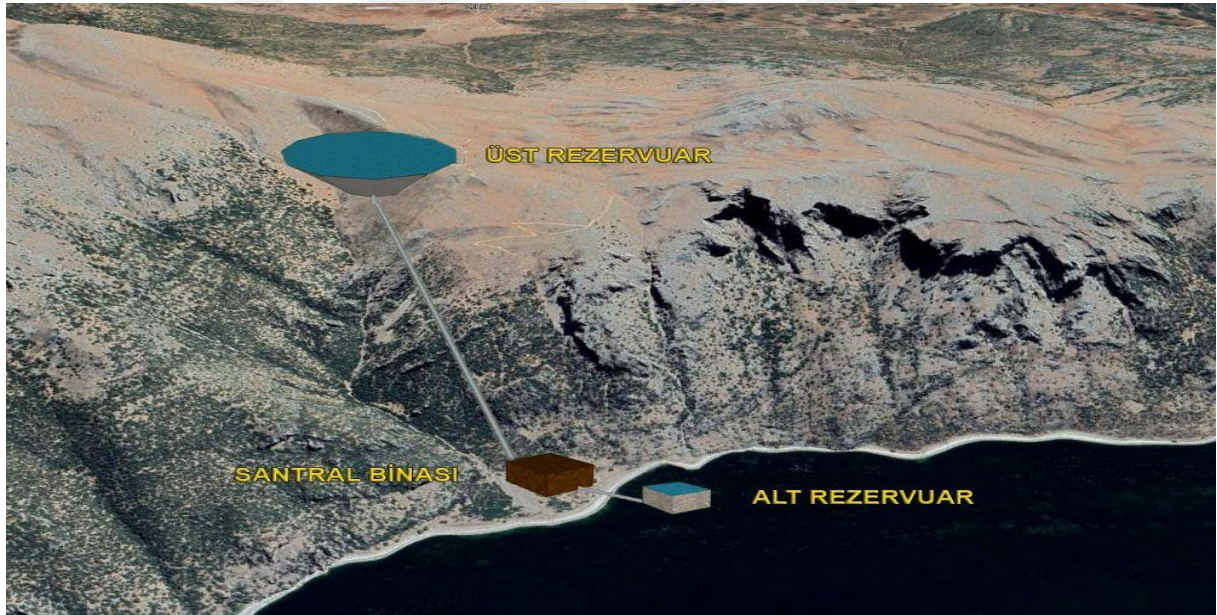
Santral binası yeri seçimi; Santral binası alt rezervuara daha yakın olacak şekilde 910 m kotunda santralin su alma yapısına yatay uzaklığı 650 m, üst rezervuara yatay uzaklığı ise 1.000 m'dir.

6.2. Proje Tasarım Bilgileri

Eğirdir Gölü Pompaj depolama santrali tasarımı yapılırken aynı düşüye sahip 6.000.000 m³, 4.000.000 m³, 2.000.000 m³ ve 1.000.000 m³ hacimlerinde 4 üst rezervuarın hesapları yapılmıştır. Hesaplar sonucu senaryolar halinde karşılaştırılmıştır. Toplam savak uzunluğu 1.150 m, toplam kuyruksuyu tüneli uzunluğu 650 m, cebri boru çapı 7 m, üst rezervuar en düşük su kotu 1.430 m, su alma kotu 910 m'dir (Şekil 6.5). Projede 4 adet türbin kullanılmıştır.



Şekil 6.5. Proje Tasarım Bilgileri



Şekil 6.6. Proje Tasarımı

Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu 31/12/2015 tarihli ve 29579 sayılı kararı ile Resmi gazetede yürürlüğe giren çok zamanlı tarifesine göre puant gücü seçilmiştir. Ekim ayının son Pazar günü ile Mart ayının son Pazar günü tarihleri arasında;

Gündüz dönemi saati: 07:00-18:00

Gece dönemi saati: 23:00-07:00

Puant dönemi saati: 18:00-23:00

Mart ayının son Pazar günü ile Ekim ayının son Pazar günü arasında;

Gündüz dönemi saati: 06:00-17:00

Gece dönemi saati: 22:00-06:00

Puant dönemi saati: 17:00-22:00'dir.

Tek terimli tarife sınıfı; Elektrik enerjisinin sadece dağıtım bedeli üzerinden kWh (kilovatsaat) olarak fiyatlandırıldığı tarife sınıfıdır.

Çift terimli tarife sınıfı; Sözleşme ile belirlenmiş kullanılacak güç karşılığında alınan bedel ve bu güce ek olarak daha fazla enerji tüketilmesi ile aşım bedelinin ödendiği tarifedir. Güç aşım bedeli, güç bedeli ve dağıtım bedelinden oluşur. Güç aşımı olmadığı sürece tek terimli tarife sınıfına göre daha tasarrufludur.

Bu çalışmada alçak gerilimli tek terimli tarife sınıfına göre mesken maliyet hesabı yapılmıştır. Üç zamana göre hesaplamalar yapılarak farklı hacimdeki rezervuarların senaryoları karşılaştırılmıştır. Tablo 6.3'de gündüz, puant ve gece olmak üzere dağıtım sistemi mesken fiyatları verilmiştir.

Tablo 6.3. Fiyatlandırma Tarifesi

Dağıtım Sistemi	Gündüz	Puant	Gece
Mesken (kr/kWh)	195,2907	286,0696	122,6951

Kaynak: (EPDK, 2022)

6.3. Hesaplamalar

EPDK tarifesine göre puant saatleri 18:00-23:00 ve 17:00-22:00 baz alınarak 5 saat olarak projede hesaplamalar yapılmıştır (EPDK, 2015).

5 saat= (5x60x60) saniye= 18.000 saniye

Q: Debi(m³/sn): Birim zamanda geçen akışkan maddenin hacmine denir.

$$Q = \text{Rezervuarın hacmi (m}^3\text{) / zaman (sn)} \quad (6.1)$$

Tablo 6.4. Üst Rezervuar Hacim Senaryoları

Üst rezervuar hacim senaryoları	m ³
1.Senaryo	6.000.000
2.Senaryo	4.000.000
3.Senaryo	2.000.000
4.Senaryo	1.000.000

Ayrıntılı hesaplamalar 2.senaryo üzerinden devam etmektedir. Daha sonra karşılaştırmalar yapılacaktır. Tablo 6.4’de verilen senaryoların hacimleri proje zamanına bölünerek debi değerleri bulunur (Eşitlik 6.1). Bulunan debi değerleri borunun kesit alanına bölünerek hız değerleri bulunur (Eşitlik 6.2). Tablo 6.5’de 4 senaryonun debi ve hız değerleri bulunmaktadır.

$$Q = 4.000.000 \text{ m}^3 / 18.000 \text{ sn} = 222,22 \text{ m}^3/\text{sn}$$

$$Q = V.A \quad (6.2)$$

$$Q = V.\pi.D^2/4$$

V: Akış hızı (m/s)

A: Borunun kesit alanı (m²)

D: Borunun çapı (m)

D: 7 m seçilir.

$$222,22 \text{ m}^3/\text{sn} = V.\pi.7^2 / 4$$

$$V = 5,774 \text{ m/sn}$$

Tablo 6.5. Debi ve Akış Hızı Senaryoları

Debi (Q)/Akış hızı (V)	Q (m ³ /s)	V (m/s)
1.Senaryo	333,33	8,661
2.Senaryo	222,22	5,774
3.Senaryo	111,11	2,887
4.Senaryo	55,55	1,443

6.3.1. Yük Kayıpları

Sürtünmeden kaynaklı borularda sürekli bir enerji kaybı olur. Bu enerji kaybı Weisbach formülü ile hesaplanmıştır (Eşitlik 6.3). Bernoulli denklemi ile yapılan düşü hesabı (Eşitlik 6.4) ve Weisbach formülü ile hesaplanan yük kayıpları senaryoları Tablo 6.6’da verilmiştir.

$$h_k = \frac{f}{D} \times \frac{V^2}{2g} \times L \quad (6.3)$$

h_k : Sürekli enerji kaybı (m)

f: Sürtünme katsayısı

D: Boru çapı (m)

V: Akışkanın ortalama hızı (m/s)

g: Yerçekim ivmesi (m/s²)

L: Boru boyu (m)

f: 0.02

D: 7 m

L: 1.150 m

V: 5,774 m/s

g: 9,81 m/s²

$$h_k = \frac{0.02}{7} \times \frac{5,774^2}{2 \times 9,81} \times 1.150$$

$$h_k = 5,583 \text{ m}$$

$$H_{\text{net}} = H - h_k$$

H_{net} : Net düşü (m)

H: Düşü (m)

Bernoulli denklemi; (Şekil 30)

$$Z_1+(P_1/\gamma)+(V_1^2/2g)=Z_2+(P_2/\gamma)+(V_2^2/2g) \quad (6.4)$$

Z_1, Z_2 : 1. ve 2. noktanın referans düzlemine göre yüksekliği (m)

P_1, P_2 : 1. ve 2. noktadaki basınç (kpa)

γ : Akışkanın birim hacim ağırlığı KN/m^3

g : Yerçekim ivmesi (m/s^2)

V_1, V_2 : 1 ve 2 noktasındaki akışkanın hızı (m/s)

(P/γ) : Basınç yüksekliği

$(V^2/2g)$: Hız yüksekliği

Z : Yersel yükseklik

Bernoulli denkleminde hız ve basınç değerleri aynı olduğu için referans düzeyine göre yükseklik farkı düşü miktarını verir. Bu çalışmada alt rezervuar su giriş ve çıkış kotu ile üst rezervuar su giriş ve çıkış kotu alınarak hesaplamalar yapılmıştır.

$$H = Z_2 - Z_1$$

$$H = (1.430-910) \text{ m} = 520 \text{ m}$$

$$H_{\text{net}} = 520-5,583 \text{ m} = 514,417 \text{ m}$$

Tablo 6.6. Yük Kaybı ve Net Düşü Senaryoları

Yük	$h_k(\text{m})$	$H_{\text{net}}(\text{m})$
1.Senaryo	12,562	507,438
2.Senaryo	5,583	514,417
3.Senaryo	1,395	518,605
4.Senaryo	0,348	519,652

6.3.2. Santral Gücü

$$P = g \times Q \times H_{\text{net}} \times \eta \quad (6.5)$$

P_t : Türbin gücü (kW)

η : Verim

$$\eta = \eta_n \times \eta_T \times \eta_i \times \eta_c \times \eta_t \times \eta_j$$

η_n : Nakil hattı verimi

η_T : Transformatör verimi

η_i : İnşaat verimi

η_c : Cebri boru verimi

η_t : Türbin verimi

η_j : Jeneratör verimi

Pompaj depolamalı hidroelektrik santral gücü yukarıdaki formül ile hesaplanmıştır (Eşitlik 6.5). Ofis projesi gibi kesin hesap verilerine ulaşmak mümkün olmadığı için verim % 80 alınarak hesaplamalara devam edilmiştir. Hesaplamalar sonucu 4 senaryonun santral gücü senaryoları Tablo 6.7’de verilmiştir.

$$P = 9,81 \text{ m/s}^2 \times 222,22 \text{ m}^3/\text{s} \times 514,417 \text{ m} \times 0.8$$

$$P = 897134,27 \text{ kW} = 897,71 \text{ MW} \quad (4 \times 225 \text{ MW})$$

Projede 4 adet türbin kullanılacaktır.

Tablo 6.7. Santral Gücü Senaryoları

Santral gücü senaryoları	KW	MW
1.Senaryo	1.327.444	4x335
2.Senaryo	897.134	4x225
3.Senaryo	452.219	4x115
4.Senaryo	226.545	4x60

6.3.3. Türbin Hesaplamaları

Türbin Özgül Hızı (n_s); 1 kW güç üretebilmek için 1 m düşüde dakikada yapabildiği devir sayısına özgül hız (n_s) denir. Türbin özgül hız değerlerinin hesaplanması türbin tipi seçiminde ilk adımdır (Eşitlik 6.6). Uygun şartları sağlayan düşü ve özgül hız ve debi değerlerini karşılayan türbin tipi seçilir. Bu tasarımda Francis türbin tipi seçilerek hesaplamalar yapılmıştır.

Francis türbini için özgül hız ;

$$n_s = 2334/H_{net}^{0.5} \quad (6.6)$$

$$n_s = 2334/(514,417)^{0.5}$$

$$n_s = 102,9 \text{ d/d (devir/dakika)}$$

Tablo 6.8. Türbin Tipi Özgül Hız Değer Aralıkları

Türbinler	Özgül hız (n_s)
Kaplan	250-300
Francis	51-250
PELTON	7-26

Kaynak: (Aylı, 2020)

Türbin devir sayısı (n);

$$n = H_{net}^{1,25} \times n_s / P^{0,5} \quad (6.7)$$

n : Türbin devir sayısı (devir/dakika)

n_s : Türbin özgül hızı (devir/dakika)

$$n = (514,417)^{1,25} \times 102,9 / 897,134^{0,5}$$

$$n = 266,15 \text{ d/d}$$

Türbin özgül hız değeri hesaplandıktan sonra türbin devir sayısı yukarıdaki formülü ile hesaplanmıştır (Eşitlik 6.7). Devir/dakika cinsinden değerler tablo 6.9’da yer almaktadır.

Tablo 6.9. Türbin Devir Sayısı Senaryoları (devir/dakika)

Türbin devir sayısı senaryoları	devir/dakika
1.Senaryo	217
2.Senaryo	266
3.Senaryo	377
4.Senaryo	534

Pompaj sırasında toplam türbin gücü;

$$P = g \times Q \times H_{\text{net}} / \eta \quad (6.8)$$

formülü ile hesaplanan pompaj sırasında toplam gücü senaryoları tablo 6.10’da verilmiştir (Eşitlik 6.8).

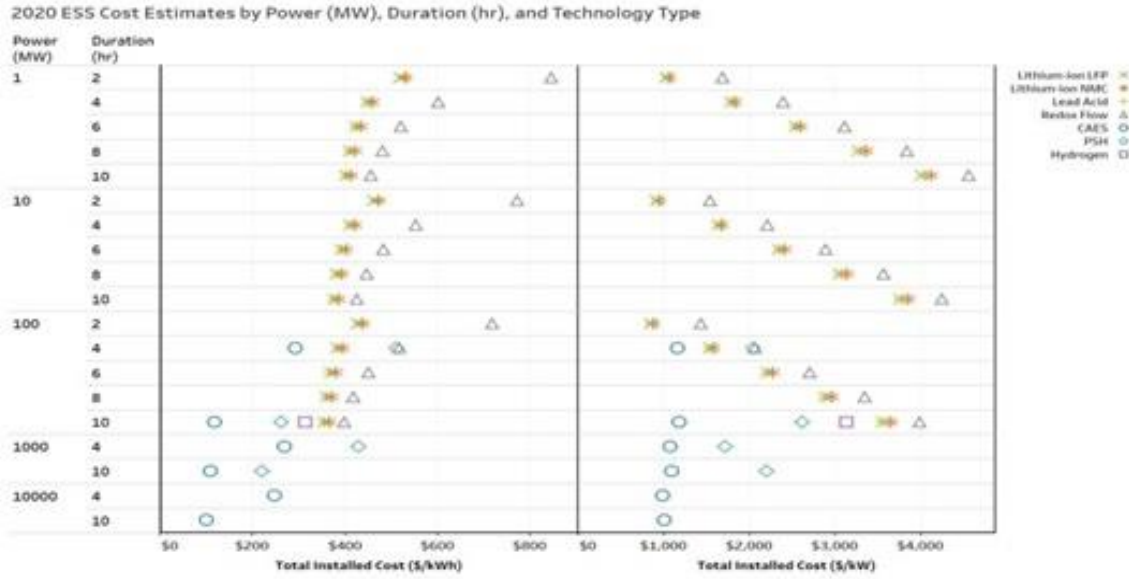
$$P = 9,81 \times 222,22 \times 514,417 / 0,8$$

$$P = 1.401.772 \text{ kW}$$

Tablo 6.10. Pompaj Sırasında Toplam Güç Senaryoları

Pompaj sırasında toplam güç senaryoları	(KW)
1.Senaryo	2.074.132
2.Senaryo	1.401.772
3.Senaryo	706.592
4.Senaryo	353.978

6.3.4. Maliyet hesabı



Şekil 6.7. 2020 Tahmini Süre, Teknoloji ve Güç Tipine Göre Enerji Depolama Sistemleri Maliyet Tahmini

Kaynak: (Mongird vd., 2020).

Ekipman maliyeti, kazı işlemleri maliyeti, cebri boru maliyeti, mühendislik çalışmaları ve proje maliyeti, rezervuar maliyeti, kur değişimleri, kullanılacak malzemenin miktarı ve cinsi, vana odası ve iletim hattı maliyeti gibi birçok faktörün detaylı hesabı yapılması gerekmektedir. Ofis çalışması olmadığı için PDHES maliyet hesabı ortalama değer alınarak hesaplamalara devam edilmiştir. 2020 Tahmini enerji depolama sistemleri maliyet tahmini yukarıda verilmiştir (Şekil 6.7). 2020 Grid Enerji Depolama Teknolojisi Maliyet ve Performans Değerlendirmesi Raporu dikkate alınarak ortalama PDHES maliyeti 2.000 \$/kW olarak alınmıştır (Mongird vd., 2020).

Pompalama işlemi için elektrik fiyatının ucuz olduğu gece zamanı seçilmiştir. Günlük 5 saatte bu işlemin gerçekleşmesi amaçlanarak hesaplara devam edilmiştir.

Günlük Pompalama maliyeti (GPM)= Santral Pompalama modunda $\text{güç} \times \text{Zaman} \times \text{Elektrik birim fiyatı}$ formülü ile hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar tablo 6.11’de verilmiştir.

$$\text{GPM} = 1.401.772 \text{ kW} \times 5 \text{ saat} \times 122,6951 \text{ kr/kWh} = 8.599.528 \text{ TL}$$

Tablo 6.11. Günlük Pompalama Maliyet Senaryoları

GPM Senaryoları	GPM (TL)
1.Senaryo	12.724.292
2.Senaryo	8.599.528
3.Senaryo	4.334.769
4.Senaryo	2.171.568

Elektrik üretimde türbin moduna geçilerek puant gücü olduğu zamanlarda üretim gerçekleşir. Elektrik birim fiyatının yüksek olduğu zamanlar değerlendirilerek kâra geçilir.

Günlük üretim kazancı (GÜK) aşağıdaki formülü ile hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar tablo 6.12’de verilmiştir (Eşitlik 6.9).

$$\text{GÜK} = \text{Santral Türbin modunda gücü} \times \text{Zaman} \times \text{Elektrik birim fiyatı} \quad (6.9)$$

$$\text{GÜK} = 897.134 \text{ kW} \times 5 \text{ saat} \times 286,0696 \text{ kr/kWh} = 12.832.138 \text{ TL}$$

Tablo 6.12. Günlük Üretim Kazancı Senaryoları

GÜK SENARYOLARI	GÜK (TL)
1.Senaryo	18.987.069
2.Senaryo	12.832.138
3.Senaryo	6.468.306
4.Senaryo	3.240.381

Günlük net kazancı ;

Günlük hesaplama net kazancı, üretim kazancından pompalama maliyeti çıkartılarak bulunur.

$$1.\text{senaryo net kazancı} = 18.987.069 - 12.724.292 = 6.262.777 \text{ TL/GÜN}$$

$$2.\text{senaryo net kazancı} = 12.832.138 - 8.599.528 = 4.232.610 \text{ TL/GÜN}$$

$$3.\text{senaryo net kazancı} = 6.468.306 - 4.334.769 = 2.133.537 \text{ TL/GÜN}$$

$$4.\text{senaryo net kazancı} = 3.240.381 - 2.171.568 = 1.068.814 \text{ TL/GÜN}$$

Yıllık üretim net kazancını hesaplamak için 360 ile çarpılır. Dolar cinsinden hesaplama yapmak için dolar kuru 1\$= 17 tl alınarak hesaplamalara devam edilmiştir. Hesapların sonucu Tablo 6.13’de yer almaktadır.

Tablo 6.13. Yıllık Üretim Net Kazanç Senaryoları

Yıllık Üretim Net Kazanç Senaryoları	Net Kazanç (\$/yıl)
1.Senaryo	132.623.513
2.Senaryo	89.631.741
3.Senaryo	45.180.783
4.Senaryo	22.633.708

Bu çalışmada sermaye maliyeti ortalama belirlenen kW başına 2.000 dolar ile türbin gücünün çarpılması ile bulunur (Eşitlik 6.10). Sermaye maliyeti bulunduğundan sonra bu maliyeti çıkartacağı süre olan amortisman süresi hesaplanmıştır. Her iki değerlerde tablo 6.14’de verilmiştir (Eşitlik 6.11).

$$\text{Sermaye Maliyeti} = \text{Santral üretim gücü} \times \text{Birim maliyet} \quad (6.10)$$

$$897.134 \text{ kW} \times 2.000 \text{ $/kW} = 1.794.268.000 \text{ $}$$

$$\text{Amortisman Süresi: Sermaye maliyeti/Net kazanç} \quad (6.11)$$

$$1.794.268.000 \text{ $} / 89.631.741 \text{ $/YIL} = 20 \text{ yıl}$$

Tablo 6.14. Amortisman Süresi Senaryoları

Senaryolar	Sermaye Maliyeti (\$)	Amortisman Süresi (yıl)
1.Senaryo	2.654.888.000	20
2.Senaryo	1.794.268.000	20
3.Senaryo	904.438.000	20
4.Senaryo	453.090.000	20

7. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Gelişen ülkelerin yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yaptığı ve bu konuda bilimsel araştırmalar yaptığı görülmektedir. Sera gazı salınımını engelleyerek küresel ısınmaya karşı olan çevre dostu bu enerji kaynaklarının depolanması ve ihtiyaç halinde tekrar kullanılması son derece önemlidir ve gerekliliktir.

Eğirdir gölünde yapılan bu çalışma ile mevcut olan göl alt rezervuar olarak kullanılarak yeni inşa edilen bir üst hazne ile bağlantılı olarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Üst haznede su depolanmıştır. Su pili olarak anılan sistemde potansiyel farktan faydalanılarak enerji değişimi depolama veya üretim modunda çalışmıştır. Ülkemizde PDHES ön fizibilite çalışması yapılmış yerler vardır ancak faaliyette olan santral yoktur.

Bu çalışmanın birinci kısmında enerji, yenilenebilir enerji kaynakları ve çeşitleri, enerji depolama yöntemleri, hidroelektrik enerji ve Türkiye'deki santraller, HES elemanları, avantaj ve dezavantajları, dünyada önemli HES santrallerinden örnekler verilmiştir. PDHES önemi, elemanları, depolama yöntemleri, yapılandırmaları, dünyadaki önemi ve proje kısmı ikinci bölümde yer almaktadır. Proje kısmında Eğirdir gölü çevresinde inşa edilecek üst hazne 4 farklı senaryo şeklinde farklı rezervuar hacimlerinde hesaplanarak veriler elde edilmiştir. Bu verilere göre 1. senaryoda $6.000.000 \text{ m}^3$, 2. senaryoda $4.000.000 \text{ m}^3$, 3. senaryoda $2.000.000 \text{ m}^3$, 4. senaryoda $1.000.000 \text{ m}^3$ hacmindeki üst rezervuarların net kazançları yıllık 1. senaryo 132.623.513 \$, 2. senaryo 89.631.741 \$, 3. senaryo 45.180.783 \$, 4. senaryo 22.633.708 \$ 'dır. Santral gücüne göre 1. senaryo 1.327.444 kW, 2. senaryo 897.134 kW, 3. senaryo 452.219 kW, 4. senaryo 226.545 kW olarak bulunmuştur.

Bu çalışma elektrik fiyatının düşük olduğu saatlerde pompaj işlemi gerçekleştirilirken elektrik fiyatının yüksek olduğu saatlerde üretim moduna geçilerek ekonomik katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Yapılan maliyet analizlerine göre amortisman süreleri 20 yıl sürmektedir. Yerli üretim PDHES elemanların üretimi ile bu maliyet daha da düşürülebilir. Yerli üretimin desteklenmesi ile istihdam olanakları artar ve nitelikli elemanlar yetişir.

Ülke ekonomisine katkı sağlanması ve enerjinin arz güvenliği oluşturması PDHES önemini arttırmıştır. İhtiyaca göre seçilecek üst rezervuar hacimleri seçilirken birçok detaylı hesap yapılması gereklidir. Bu çalışma ofis çalışması olmadığı için sadece teorik bilgiler içermektedir.

KAYNAKÇA

Açıkgöz, İ. C. (2019). Volan ve Lityum-İyon Batarya Enerji Depolama Sistemlerinin Kıyaslanması ve Hibrit Enerji Depolama Sisteminin Farklı Yük Profilleri Üzerinde Performans Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, s.1.

Ar-Ge ve Tasarım (2019). Pelton Türbin Tasarımı. [Erişim:25.11.2022, <https://argevetasarim.com/pelton-turbini-tasarimi/>]

Ayder, E. (2015). Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santraller (PDHES'ler) Teknik Rapor, s.7-8.

Aylı, E. (2020). Hidro Türbinlerin Deneysel ve Sayısal Yöntemler ile Tasarımı.

Baidu (2021). Guangdong Pompaj Depolama Tesisi. [Erişim:17.04.2022, <https://baike.baidu.com/>]

Bilim Genç (2021). Hidroelektrik Santrali. [Erişim:24.11.2022, <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/hidroelektrik-santrallerinde-surdurulebilirlik-saglayan-proje-milhes>]

Breeze, P. (2018). Power System Energy Storage Technologies, s.19.

Conference of Parties (COP) (2021). Birleşik Krallık COP (Conference of Parties) 26 Başkanlığı ve COP25 ve COP26 Üst Düzey İklim Şampiyonları adına yayınlanan basın açıklaması. [Erişim: 18.12.2021, <https://unfccc.int/news/end-of-coal-in-sight-at-cop26>]

Çamcı, S. (2020). Alışveriş Merkezlerinde Kullanılan Enerji Sistemlerinin Enerji Etüd Raporunun Hazırlanması ve Güneş Enerjisi ile Enerji Tasarrufu Sağlanması; Rings Avm Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, s.12.

Çiçek, Ö., & Özdemir, M. B. (2021). Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Santrali Tasarımı. Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Araştırma Makalesi, 7(1), 26-35 .

Çin Halk Cumhuriyeti Devlet Konseyi (2021). Üç Boğaz Barajı. [Erişim:28.03.2022, http://english.www.gov.cn/news/photos/202105/16/content_WS60a084d4c6d0df57f98d9937.html /]

Çoruh, B. (2019). Enerji Arz Güvenliği Kapsamında Türkiye'nin Enerji Politikaları. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İktisat Anabilim Dalı, s.31.

Electrical Japan (2022). Japonya'daki Pompaj Depolamalı Elektrik Santrallerinin Sıralaması. [Erişim:24.11.2022, <http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/energy/electrical-japan/type/5.html.ja>]

Enerji Atlası (2021). [Erişim:08.10.2022, <https://www.enerjiatlası.com/hidroelektrik/>]

Enerji Gazetesi (2020). Keban Barajı ve HES'i 46 Yılı Aşkın Süredir Enerji Üretiyor. [Erişim:25.11.2022, <https://www.enerjigazetesi.ist/keban-baraji-ve-hes-i-46-yili-askin-suredir-enerji-uretiyor/>]

Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) (2015). 31/12/2015 tarihli ve 29579 sayılı karar.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) (2022). 1 Temmuz 2022 tarihinden sonra faaliyete geçecek tarife.

Enerji Portalı (2018). Atatürk Barajı ve Hidroelektrik Santrali. [Erişim:25.11.2022, <https://www.enerjiportali.com/ataturk-baraji-ve-hidroelektrik-santrali/>]

Güneş, H. (2020). Türkiye'de Baraj Emniyeti ve Atatürk Barajı'nda Deformasyon İzleme Çalışmaları ve Son 12 Yıllık Analiz Sonuçları. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, s.60.

Goller (2021). Eğirdir Gölü. [Erişim:26.11.2022, <https://www.goller.gen.tr/egirdir-golu.html>]

Google Earth Pro (2022). Bath County Pompaj Depolama Santrali. [Erişim:25.11.2022, <https://bepa.enerji.gov.tr/>]

Huggins, R. A. (2010). Energy Storage Fundamentals, Materials and Applications. Springer International Publishing AG Switzerland is part of Springer Science+Business Media.

IRENA (2022). Yenilenebilir Enerji Kapasite İstatistikleri 2022, s.11.

Kademli, M. (2017). Hidrojen Teknolojisi, Potansiyeli ve Geleceği. Mesleki Bilimler Dergisi, 6(2), 106-110.

Karabacak, K., & Pınar, A. (2018). Eğirdir'in Fiziki Coğrafya Özellikleri. Route Educational and Social Science Journal, 112-131.

Kocaman, B. (2013). Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Derleme, 2(1), 119-127.

Küresel Dalga ve Gelgit Enerjisi Endüstrisi (2020). 2020-2027 Pazar yörüngesi ve Analitiği Raporu. [Erişim:25.12.2021,

<https://www.businesswire.com/news/home/20210212005455/en/Global-Wave-and-Tidal-Energy-Industry-2020-to-2027---Market-Trajectory-Analytics---ResearchAndMarkets.com>]

Mayes, F. (2019). ABD Enerji Bilgi İdaresi. [Erişim:23.04.2022, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41833>]

Mechtekno (2022). Hidroelektrik türbinler. [Erişim:25.11.2022, <https://mechtekno.com/>]

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2022). İllere Ait Mevsim Normalleri. [Erişim:26.11.2022, <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISPARTA>]

Mongird, K. vd. (2020). 2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment.

National Hydropower Association (NHA) (2021). 2021 Pumped Storage Report, s.7.

North Bay Business Journal (2021). North Bay'in Gözden Kaçan Yenilenebilir Enerji Kaynağı: Okyanus Dalgaları. [Erişim:25.11.2022, <https://www.northbaybusinessjournal.com/article/industrynews/north-bays-overlooked-renewable-energy-source-ocean-waves/?artslide=1>]

Satılmış, S. (2018). Birinci El Kaynaklara Göre Isparta Depremleri (19. Yüzyılın İkinci Yarısı). Selçuk Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi, 2018 (40), 297-312.

State Grid Corp of China (2021). Dünyanın En Büyük Kurulu Güce Sahip Pompaj Depolama Santrali 15 gün Süreyle Deneme İşletmesine Girecek ve Ay Sonunda Devreye Girecek. [Erişim:25.11.2022, https://www.sohu.com/a/507276551_114760]

Sevim, C. (2012). Küresel Enerji Jeopolitiği ve Enerji Güvenliği. Journal of Yasar University, 2012 26(7), 4378 – 4391.

Solemslie, B. W. (2016). Experimental Methods and Design of a Pelton Bucket, s.22.

Statista (2022). Enerji üretim kapasitesine göre 2021 itibariyle en büyük hidroelektrik barajları. [Erişim:24.11.2022, <https://www.statista.com/statistics/474526/largest-hydro-power-facilities-in-the-world-by-generating-capacity/>]

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2022). 17 Ağustos Depremini Unutmamalıyız "Deprem Öldürmez, Sağlam Olmayan Bina Öldürür". [Erişim:26.11.2022,

<https://isparta.csb.gov.tr/17-agustos-depremini-unutmamaliyiz-deprem-oldurmez-saglam-olmayan-bina-oldurur-haber-230406>]

T.C. Çüngüş Kaymakamlığı (2019). Çüngüş Karakaya Barajı. [Erişim:25.11.2022, <http://www.cungus.gov.tr/cungus-karakaya-baraji>]

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri (ETKB) (2021). Biyokütle Enerjisi Potansiyeli Atlası. [Erişim:01.06.2021, <https://bepa.enerji.gov.tr/>]

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri (ETKB) (2022). [Erişim:25.11.2022, <https://enerji.gov.tr/>]

T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı (2022). Keban. [Erişim:16.11.2022, <https://elazig.ktb.gov.tr/TR-58512/keban.html>]

Tilahun, M. A. (2009). Feasibility Study of Pumped Storage System for Application in Amhara Region. Master of Science Thesis, Department of Energy Technology, Division of Heat and Power Technology, s. 28-29.

Tutaşı, C. C. (2022). HES Su Alma Yapıları.

[Erişim:20.03.2022, <https://tutasi.com/2013/01/18/14-hes-su-alma-yapilari-2/>]

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) (2022). Kurulu Güç Raporu.

Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği (TMMOB) (2015). Türkiye Ziraat Mühendisliği VIII. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı II, s. 1171-1173.

Ulusal Enerji İdaresi (2021). Pompa Depolama Orta ve Uzun Vadeli Kalkınma Planı (2021-2035). [Erişim:21.11.2022, http://www.nea.gov.cn/2021-09/09/c_1310177087.htm]

Uluslararası Hidroelektrik Birliği (IHA) (2021). 2021 Hidroelektrik Durum Raporu.

Vikipedi (2019). Okutataragi Pompalı Depolama Santrali. [Erişim:16.04.2022, https://en.wikipedia.org/wiki/Okutataragi_Pumped_Storage_Power_Station]

Vikipedi (2021). Hidroelektrik Santrali. [Erişim:20.03.2022, https://tr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrik_santrali#3._%C4%B0letim_kanal%C4%B1/]

Vikipedi (2022). 1.000 MW kapasitesinden büyük santrallerin listesi. [Erişim:24.11.2022, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_pumpedstorage_hydroelectric_power_stations&action=history]

Wikiwand (2007). Birleşik Krallık'ta Hidroelektrik. [Erişim:25.11.2022, https://www.wikiwand.com/en/Hydroelectricity_in_the_United_Kingdom#Media/File:Dinorwig_Power_Station.jpg]

Xinhua (2021). Üç Boğaz Barajı. [Erişim:25.11.2022, http://english.www.gov.cn/news/photos/202105/16/content_WS60a084d4c6d0df57f98d9937.html]

Xinhuanet (2021). Dünyanın En Büyük Pompajlı Depolama Elektrik Santrali Faaliyete Geçti. [Erişim:15.04.2022, http://www.nea.gov.cn/2021-12/31/c_1310404022.htm]

Xueqiu (2017). PowerChina'nın Pompaj Depolamalı Elektrik Santrali İşİ. [Erişim:25.11.2022, <https://xueqiu.com/2297288645/84598950#>]

Yolcubal, E. (2021). Hidroelektrik Santrallerinde Governor Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, s.8.