

ISSN: 1012 - 0726 (Baskı)
ISSN: 1308 - 2477 (Online)



SAYI: 128
YIL : NİSAN 2018

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Sahibi

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Adına Genel Müdür
Mevlüt AYDIN

Sorumlu Müdür

Turkay ÖZGÜR

Yayın Kurulu (DSİ)

Murat Ali HATİPOĞLU
Mehmet ALP
Dinçer AYDOĞAN
Oğuzhan BEKTAŞ
Şenay ÖZKAN
Harun MEYDAN
Ali Alper ÇETİN
Vehbi ÖZAYDIN
Erkan EMİNOĞLU
Bekir YAPAN
Hasan ÇAKIRYILMAZ
Gökay AKINCI
Tuncer DİNÇERGÖK

Editörler

Figen ÖZYURT KUŞ
Özgür KÜÇÜKALİ

Haberleşme Adresi

DSİ Teknik Araştırma ve
Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı 06100
Yüce-tepe - Ankara

Tel (312) 454 38 00
Faks (312) 399 27 95
bulten@dsi.gov.tr

Basıldığı Yer

Destek Hizmetleri Dairesi
Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube
Müdürlüğü
Etilik - Ankara

SAYI : 128

YIL : NİSAN 2018

Yayın Türü

Yaygın süreli yayın
Üç ayda bir yayınlanır
(Ocak, Nisan, Temmuz,
Ekim)

ISSN 1012 - 0726 (Baskı)
1308 - 2477 (Online)

İÇİNDEKİLER

BETON AĞIRLIK BARAJLARDA KONSOLİDASYON ENJEKSİYONU DERİNLİĞİNİN DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ M. Cihan AYDIN, Seçkin AYDIN	1
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ KULLANILARAK ÇEŞİTLİ JET HIZLARI VE AYIRICI AÇILARI İÇİN BİR PELTON TÜRBİN KEPÇESİNE ETKİ EDEN KUVVETLERİN BELİRLENMESİ Sedat YAYLA, Azhin ABDULLAH, Mehmet ORUÇ	11
YERALTISUYU TERMAL ENERJİSİNİN ISITMA VE SOĞUTMADA KULLANIMI: AVRUPA VE TÜRKİYE'DEKİ DURUMUN TEKNİK VE YASAL YÖNLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ Ayşegül ÇETİN, Ahmet APAYDIN, Halime Ö. PAKSOY	22

DSİ Teknik Bülteni TÜBİTAK ULAKBİM (Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi) ve uluslararası veritabanı EBSCO (Elton B. Stephens Company) tarafından taranmaktadır.

DSI TECHNICAL BULLETIN

Publisher

On behalf of GENERAL
DIRECTORATE OF
STATE HYDRAULIC
WORKS
Mevlüt AYDIN
General Director

Director in charge

Turkay ÖZGÜR

Editorial Board (DSI)

Murat Ali HATİPOĞLU
Mehmet ALP
Dinçer AYDOĞAN
Oğuzhan BEKTAŞ
Şenay ÖZKAN
Harun MEYDAN
Ali Alper ÇETİN
Vehbi ÖZAYDIN
Erkan EMİNOĞLU
Bekir YAPAN
Hasan ÇAKIRYILMAZ
Gökay Akıncı
Tuncer DİNÇERGÖK

Editors

Figen ÖZYURT KUŞ
Özgür KÜÇÜKALİ

Contact Address

DSİ Teknik Araştırma ve
Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı 06100
Yücetepe – Ankara /
TURKEY

Tel (312) 454 38 00
Faks (312) 399 27 95
bulten@dsi.gov.tr

Place of Publication

Destek Hizmetleri Dairesi
Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube
Müdürlüğü
Etilik – Ankara / TURKEY

ISSUE: 128

YEAR : APRIL 2018

Publication Type

Widely distributed
periodical
Published quarterly
(January, April, July,
October)

ISSN

1012 - 0726 (Press)
1308 - 2477 (Online)

CONTENTS

THE EFFECT OF CONSOLIDATION INJECTION DEPTH ON DYNAMIC BEHAVIORS OF CONCRETE GRAVITY DAMS M. Cihan AYDIN, Seçkin AYDIN	1
DETERMINATION OF A FORCE ACTING ON A PELTON TURBINE BUCKET FOR A VARIETY OF JET VELOCITY AND SPLITTER ANGLES USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS Sedat YAYLA, Azhin ABDULLAH, Mehmet ORUÇ	11
GROUNDWATER THERMAL ENERGY USE: TECHNICAL AND LEGAL ASSESSMENT OF THE SITUATION IN EUROPE AND TURKEY Ayşegül ÇETİN, Ahmet APAYDIN, Halime Ö. PAKSOY	23

DSI Technical Bulletin is indexed by TUBITAK ULAKBİM (Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi) and international database EBSCO (Elton B. Stephens Company).

DSİ TEKNİK BÜLTENİ'NİN AMACI

DSİ Teknik Bülteni'nde, su ile ilgili konularda, temel ve uygulamalı mühendislik alanlarında gönderilen makaleler yayınlanır. Makaleler, ilk önce konunun uzmanı tarafından incelenir ve değerlendirilir. Daha sonra, Hakem Kurulu uzman görüşünü de esas alarak makalenin yayınlanıp yayınlanmamasına karar verir. Makalelerin tamamı veya büyük bir kısmı diğer yayın organlarında yayınlanmamış olması gereklidir. DSİ Teknik Bülteni TÜBİTAK ULAKBİM (Ulusal Akademik Ağ ve Bilgi Merkezi) ve Eylül 2016 tarihi itibarı ile uluslararası veritabanı kuruluşu EBSCO (Elton B. Stephens Company) tarafından taranmaya başlamıştır.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ BİLDİRİ YAZIM KURALLARI

1. Gönderilen yazılar kolay anlaşılır dilde ve Türkçe kurallarına uygun şekilde yazılmış olmalıdır.
2. Yazıların teknik sorumluluğu yazarına aittir (yazılardaki verilerin kullanılması sonucu oluşabilecek maddi ve manevi problemlerde muhatap yazardır).
3. Yayın Kurulu, makaleler üzerinde gerekli gördüğü düzeltme ve kısaltmaları yapar.
4. Makaleler bilgisayarda Microsoft Word olarak bir satır aralıkla yazılmalı ve Arial 10 fontu kullanılmalıdır. Makaleler A4 normundaki kâğıdın her kenarından 25 mm boşluk bırakılarak yazılmalıdır.
5. Sadece ilk sayfada, yazı alanı başlangıcından sola dayalı olarak, italik 10 fontunda Arial kullanılarak ilk satıra "DSİ Teknik Bülteni" yazılmalıdır.
6. Konu başlığı: Yazı alanı ortalanarak, "DSİ Teknik Bülteni" yazısından sonra dört satır boş bırakıldıktan sonra Arial 12 fontu kullanılarak büyük harflerle koyu yazılmalıdır.
7. Yazar ile ilgili bilgiler: Adı (küçük harf), soyadı (büyük harf), yazarın unvanı ile bağlı olduğu kuruluş (alt satıra) ve elektronik posta adresi (alt satıra) başlıktan iki boş satır sonra ilk yazardan başlamak üzere Arial 10 fontu ile yazı alanı ortalanarak yazılmalıdır. Diğer yazarlar da ilk yazar gibi bilgileri bir boşluk bırakıldıktan sonra yazılmalıdır.
8. Türkçe özet, elektronik posta adresinden dört boş satır sonra, özetten bir boş satır sonra ise anahtar kelimeler verilmelidir. Aynı şekilde, Türkçe anahtar kelimelerden iki boş satır sonra İngilizce özet, bir boş satır sonra ise İngilizce anahtar kelimeler verilmelidir.
9. Bölüm başlıkları yazı alanı sol kenarına dayandırılarak Arial 10 fontu kullanılarak koyu ve büyük harfle yazılmalı. Bölüm başlığının üzerinde bir boş satır bulunmalıdır.
10. Ara başlıklar satır başında başlamalı, üstlerinde bir boş satır bulunmalıdır. Birinci derecedeki ara başlıktaki bütün kelimelerin sadece ilk harfi büyük olmalı ve koyu harflerle Arial 10 fontunda yazılmalıdır. İkinci ve daha alt başlıklar normal harflerle Arial 10 fontu ile koyu yazılmalıdır.
11. Yazılar kâğıda iki sütün olarak yazılmalı ve sütün aralarındaki boşluk 10 mm olmalıdır.
12. Paragraf sola dayalı olarak başlamalı ve paragraflar arasında bir boş satır bırakılmalıdır.
13. Eşitlikler bilgisayarda yazılmalı ve numaralandırılmalıdır. Eşitlik numaraları sayfanın sağına oturmali ve parantez içinde yazılmalıdır. Her eşitlik alttaki ve üstteki yazılardan bir boş satır ile ayrılmalıdır. Eşitliklerde kullanılan bütün semboller eşitlikten hemen sonraki metinde tanımlanmalıdır.
14. Sayısal örnekler verildiği durumlarda SI veya Metrik sistem kullanılmalıdır. Rakamların ondalık kısımları virgül ile ayrılmalıdır.
15. Yararlanılan kaynaklar metinde kaynağın kullanıldığı yerde köşeli parantez içerisinde numaralı veya [Yazarın soyadı, basım yılı] olarak belirtilmelidir. Örneğin: "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [1]" veya "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [Aktan, 1999]" gibi.
16. Kaynaklar yazar soyadlarına göre sıralanmalı, listelenirken yazar (veya yazarların) soyadı, adının baş harfi, yayın yılı, kaynağın ismi, yayınlandığı yer ve yararlanılan sayfa numaraları belirtilerek, köşeli parantez içerisinde numaralandırılmalı ve yazarken soldan itibaren 0,75 cm asılı paragraf şeklinde yazılmalıdır. Makale başlıkları çift tırnak içine alınmalı, kitap isimlerinin altı çizilmelidir. Bütün kaynaklara metin içinde atıf yapılmalıdır.
17. Çizelgeler, şekiller, grafikler ve resimler yazı içerisine en uygun yere gelecek şekilde yerleştirilmelidir. Fotoğraflar net çekilmiş olmalıdır. Şekil ve grafikler üzerine el yazısı ile ekleme yapılmamalıdır.
18. Makalenin tamamı 20 sayfayı geçmemeli, şekil, çizelge, grafik ve fotoğraflar yazının 1/3'ünden az olmalıdır.
19. Sayfa numarası, sayfaların karışmaması için sayfa arkalarına kurşun kalem ile hafifçe verilmelidir.
20. Yazım kurallarına uygun olarak yazılmış makalenin tam metni eğer e-posta ortamında gönderilebilecek kadar küçük boyutta ise e-posta adresine , değilse; hem A4 kâğıda baskı şeklinde (2 adet) hem de dijital ortamda (CD veya DVD) yazışma adresine gönderilmelidir.
21. Yayınlanan bütün yazılar için "Kamu Kurum ve kuruluşlarınca ödenecek telif ve işleme ücretleri hakkındaki yönetmelik" hükümleri uygulanır.
22. Makaleyi gönderen yazarlar yukarıda belirtilenleri kabul etmiş sayılırlar.
23. Yazışma adresi aşağıda verilmiştir:

Yasal Uyarı

Bu Teknik Bülten yalnızca genel bilgilendirme amacıyla yayımlanmaktadır ve içeriğinde yer alan malzemelerin, prosedürlerin veya yöntemlerin tek mevcut ve uygun malzeme, prosedür veya yöntem olduğunu ima etmemektedir. Malzemeler, prosedürler veya yöntemler özel koşullara, yerel imar kanunlarına, tasarım şartlarına veya tüzel ve yasal şartlara göre değişebilir. Bu Teknik Bülten'deki bilgilerin doğru ve güvenilir olduğuna inanılmakla beraber, yayımlayıcı olarak Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü bu Teknik Bülten'in içeriğinde bulunan yöntemlerin, malzemelerin, talimatların veya fikirlerin herhangi bir şekilde kullanılması kaynaklı mal veya can kaybından veya oluşabilecek zararlardan sorumlu değildir.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı Yıldırım Beyazıt Mah. DSİ Küme

Evleri No:5 Pirsaklar / ANKARA

Tel (312) 454 3800

Faks (312) 399 2795

E-posta bulten@dsi.gov.tr

Web <http://www.dsi.gov.tr/yayinlarimiz/dsi-teknik-bultenleri>

BETON AĞIRLIK BARAJLARDA KONSOLIDASYON ENJEKSİYONU DERİNLİĞİNİN DİNAMİK DAVRANIŞA ETKİSİ

M. Cihan AYDIN
Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Merkez/Bitlis
mcaydin@gmail.com

Seçkin AYDIN
DSİ Genel Müdürlüğü, Ankara
seckinaydin@dsi.gov.tr

(Makalenin geliş tarihi: 09.08.2018, Makalenin kabul tarihi: 12.12.2018)

ÖZ

Konsolidasyon enjeksiyon derinliği inşaat maliyetlerini ve barajın dinamik davranışını önemli düzeyde etkileyen bir faktördür. Baraj mühendisliğinde bu derinlikler tecrübe ve sezgisel olarak belirlenmekle birlikte, literatürde konsolidasyon enjeksiyonu derinliği için herhangi bir kriter ve yöntem mevcut değildir. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak üzere, bu çalışmada öncelikle Beton ağırlık barajlarının temel iyileştirmesi için kullanılan konsolidasyon enjeksiyonu özetlenmiş; daha sonra barajın dinamik davranışına olan etkisini görmek için $H=100$ m yüksekliğindeki bir baraj $H/20$, $H/10$, $H/7$, $H/5$, $H/4$, $H/3$, $H/2$, H derinliğinde konsolidasyon enjeksiyonu ile birlikte modellenerek lineer elastik analizler yapılmıştır. Analizler Beton Elastisite modülünün iyileştirilmiş temel Elastisite modülüne oranı $1/8$ ve $1/4$ değerleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Baraj gövdesinde dikkate alınan kritik noktalarda düşey ve asal çekme gerilmesi-zaman sonuçları elde edilerek yorumlanmıştır. Sonuç olarak, konsolidasyon enjeksiyonunun 5 m ile $H/10$ aralığında alınmasının pratikteki uygulamalar için yeterli olacağı belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Beton ağırlık baraj, Konsolidasyon enjeksiyonu, Dinamik analiz

THE EFFECT OF CONSOLIDATION INJECTION DEPTH ON DYNAMIC BEHAVIORS OF CONCRETE GRAVITY DAMS

ABSTRACT

The consolidation injection is a factor that significantly effects construction cost and dynamic behavior of the dam. Although these depths are determined intuitively in dam engineering, there is no criteria and method for the depth of consolidation injection in literature. In order to fill this gap in the literature, in this study firstly, the consolidation injection methods to improve the foundation of concrete gravity dams were summarized. Then, to see its effects on the dynamic behaviors of the dam, a dam having $H=100$ m height were analyzed using linear-elastic theory modeling with consolidation injection of $H/20$, $H/10$, $H/7$, $H/5$, $H/4$, $H/3$, $H/2$, H depths. These analyses were performed individually for the rate of concrete elastic modulus to the foundation elastic modulus of $1/8$ and $1/4$ values. The validation of vertical and principal stress with time at the some critical points on the body of the dam were determined and discussed. Consequently, it was stated that it would be sufficient for practical applications to take the depth od consolidation injection between 5 m and $H/10$.

Keywords: Concrete gravity dam, Consolidation injection, Dynamic analysis.

1 GİRİŞ

En basit tanımı ile ağırlık baraj, tüm dış yüklerin etkisi sonucu meydana gelecek kayma ve devrilmeye karşı kendi ağırlığı ile karşı koyan, çoğunlukla dik üçgen şeklinde kesite sahip kütsel bir yapıdır. Günümüzde gelenksel beton ağırlık barajların yerini Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) barajlar almaktadır. SSB ağırlık barajlar, şekil olarak klasik beton dökümü ile yapılmış olan beton ağırlık barajların benzeridir. Klasik beton ağırlık barajlar, betonun kendisi ve betonu oluşturan malzemelerde aranan özellikler (agreganın yıkanması gereği v.b.) ve inşaat tekniği yönüyle maliyeti yüksek yapılardır. Farklı bir beton malzemesi olan sıfır çökmeli betonun imali, taşınması, serilmesi ve silindirle sıkıştırılmasıyla imal edilen SSB barajlarda önemli tasarruf sağlanarak bu barajlarda klasik betonun özelliklerine eşdeğer bir beton malzemesi elde edilmiştir. Silindirlerin ve diğer inşaat makinelerinin batmadan üzerinde dolaşmasına imkan veren bu beton malzemesiyle kısa sürede ve düşük maliyette beton baraj inşa edilmesi mümkün olmuştur. Bu durumda, SSB barajlar toprak ve kaya dolgu ve diğer tipdeki barajlarla maliyet bakımında yarışır hale gelmiştir.

Beton ağırlık barajların temeline yapılan konsolidasyon enjeksiyonunun genel amacı, temelde bulunan açık çatlak ve boşlukları doldurmak, kaya kütselinin yapısal özelliklerini iyileştirmek ve baraj yüklemesi altında temel deformasyonlarını azaltmaktır. Yerel olarak çatlaklı bölgelerin iyileştirilmesi ve böylece temelin homojenleştirilmesi için ve kaya bloklarının hareketini azaltmak amacıyla çatlaklar enjeksiyon harcıyla doldurulur. Konsolidasyon enjeksiyonunun başarı seviyesi kaya kütsesi koşullarına bağlıdır. En büyük fayda çok çatlaklı kayalarda elde edilir. Kırık kayaçta meydana gelen deformasyonlar, kırılma süreksizlikleri ile ayrılmış sağlam kaya bloklarında meydana gelir. Uygulanan yük altında kaya kütsesi davranışı, bozulmamış bloklar ile süreksizlikler arasındaki etkileşim tarafından yönetilir. Sonuç olarak, kırık kaya kütseleri nadiren ideal bir elastik malzeme gibi davranır ve gerilme-zorlanma tepkileri tipik olarak doğrusal değildir. Konsolidasyon enjeksiyonunda belli bir uygulama için seçilen tasarım, jeolojik koşullar, yük yoğunlukları, yapının hassasiyeti ve yapının kritikliğine bağlıdır. Pek çok rutin uygulama için konsolidasyon enjeksiyonu gerekli olmayabilir, ancak yine de önlem olarak veya mevcut koşulların hem müsait hem de üniform

olacağına dair güven seviyesini arttırmak için konsolidasyon enjeksiyonu yapılabilir. Çizelge 1'de süreksizlik düzeltilmesi yapılmamış RMR (Rock Mass Rating) değerine göre konsolidasyon enjeksiyonu ilişkisi görülmektedir bu çalışmada enjeksiyon derinliği birkaç metre olarak önerilmiştir (Romana, 2003).

Çizelge 1- Konsolidasyon Enjeksiyonu RMR ilişkisi (Romana 2003)

BARAJ TİPİ	RMR* DEĞERİNE GÖRE KONSOLIDASYON ENJEKSİYONU GEREKLİLİĞİ		
	Sistematik	Seyrek şekilde	Gereksiz
Toprak	-	-	-
Kaya Dolgu	20-30	30-50	>50
Beton Ağırlık	40-50	50-60	>60
Kemer	50-60	60-70	>70

RMR* = Süreksizlik Düzeltmesi Yapılmamış RMR

Tipik uygulamalar, oldukça kırılmış çatlaklı kayaların lokal bölgelerinin iyileştirilmesini ve yapıların temel bölgeleri altına muamele edilmesini içerir. Bu tür uygulamalarda, sağlanan koruma seviyesi için iyileştirme maliyeti nispeten düşüktür ve tasarımın temeli analitik olmaktan çok sezgiseldir. Kritik uygulamalar, büyük beton barajlar, su alma yapıları ve büyük boyutlu kapaklı dolusavak eşikleri gibi hareketli özellikler içeren yapıları içerebilir. Bu tür uygulamalarda, konsolidasyon enjeksiyonu tasarımı için, yerinde deformasyon testleri, sonlu elemanlar yardımı ile deformasyon-gerilme analizleri ve konsolidasyon enjeksiyonuyla elde edilen faydaları ölçmek için doğru ölçeklendirilmiş saha pilot testleri gibi kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır [USACE, 2017]. Çoğu uygulamada, konsolidasyon enjeksiyonunun olumsuz etkiler yaratma potansiyeli yoktur. Bununla birlikte, barajlar için bu durum her zaman geçerli değildir. Özellikle konsolidasyon enjeksiyonu, dolgu barajlarındaki cut-off mansabında veya beton barajlarda geçirimizlik perdesinin mansabında gerçekleştirildiğinde drenaj sisteminde olumsuz etkiler oluşturabilir. Konsolidasyon enjeksiyonunun amacı sadece kaya kütselinin yapısal özelliklerini iyileştirmek olmasına rağmen hidrolik iletkenliği ve sızıntı akış yollarını etkileyerek temeldeki planlı bir drenaj sistemini etkisiz hale getirebilir. Barajlar için konsolidasyon derz enjeksiyonu düşünülürken, etkilerin net bir şekilde anlaşılması ve tasarımın bu etkileri uygun bir şekilde barındırabilmesi için konsolidasyon enjeksiyon bölgesi sızıntı analiz modellerine dahil edilmelidir [USACE, 2017].

Beton bir baraj gövdesi içindeki aşırı kesme ve/veya çekme gerilmelerinin oluşumunu önlemek için kabul edilebilir oturmaların büyüklüğü yeterince düşük olmalı ve tolere edilebilir limitler içerisinde olmalıdır [USACE, 1994]. Yumuşak kaya üzerine inşa edilmiş kütle beton yapılar için, kaya deformasyon modülü önemli ölçüde betonun elastik modülünden daha az ise, temel kayacının yana doğru genişlemesi eğilimi nedeniyle baraj tabanı boyunca ek gerilmeler meydana gelecektir. Deere vd. [1967] yaptıkları çalışmalarda, temel kayası deformasyon modülü (E_t) betonun elastisite modülü (E_c) olmak üzere E_t/E_c oranı için üç farklı aralık belirlemişlerdir:

- 1) $E_t/E_c > 0.25$ durumunda, temel kayanın elastisite modülü beton içerisinde meydana gelen gerilmeler üzerinde çok az etkisi vardır.
- 2) $0.06 < E_t/E_c < 0.25$ durumunda, temel kayanın elastisite modülünün beton gövde içerisinde meydana gelen gerilmeler üzerinde daha önemli hale gelir.
- 3) $E_t/E_c < 0.06$ olması durumunda, temel kayanın Elastisite modülü beton gövde içerisinde oluşan gerilmelere neredeyse tamamen hakimdir.

Benzer şekilde Rocha [1976], ağırlık barajları için yapmış olduğu çalışmasında, $E_t/E_c > 0.125$ olması durumunda yeterli güvenliği sağlanacağını belirtmiştir.

Konsolidasyon enjeksiyonu, yüksek oranda kırıklı kaya kütlelerinde baskın sayıda açık çatlaklar bulunduğu daha etkili olduğu belirtilmektedir [USACE, 1994]. Bir konsolidasyon enjeksiyon programını başlatmadan önce potansiyel iyileştirmeyi değerlendirmek için mutlaka bir test saha çalışması yapılmalıdır. Pilot saha çalışması, güçlendirilecek kaya kütlelerini temsil eden bir miktar kaya kütlelerinin denenmesi olarak yapılacaktır. Elde edilen iyileştirme derecesini değerlendirmek için enjeksiyon öncesinde ve sonrasında yerinde deformasyon testleri yapılmalıdır. Temelde meydana gelecek farklı oturmaları azaltmanın en etkili yolu temel tasarımının değiştirilmesidir. Bu tasarım değişiklikleri üç temel kavramdan birini veya daha fazlasını içerir. Bunlar; temel kaya üzerine uygulanan gerilmeleri azaltmak ve/veya yeniden dağıtmak, kaya katmanları ve esnek temeller içeren durumlarda temel rijitliğini artırarak maksimum deformasyonları azaltmak şeklinde sıralanabilir. Bu şekilde nihai tasarıma dahil edilen kavramın seçimi, temel kaya koşullarına, yapısal faktörler ve maliyet durumuna bağlıdır. Beton barajlar için konsolidasyon enjeksiyonu, özel iyileştirmeye

tabi tutulan lokal bölgeler haricinde barajın tüm taban alanında, tipik olarak 3 m aralıklı ızgaralar halinde yapılır.

Konsolidasyon enjeksiyon derinliğinin inşaat maaliyetlerini ve barajın dinamik davranışı üzerinde önemli etkileri vardır. Baraj mühendisliğinde konsolidasyon enjeksiyonu derinliğinin tespiti için belirlenmiş herhangi bir kriter ve analiz mevcut değildir. Pratikte, konsolidasyon enjeksiyonu derinliği genellikle sezgisel olarak belirlenir. Dünya üzerinde yapılan barajlarda 5-10 m'den fazla alınmadığı belirtilmiş olsa da, ülkemizde bazen bu derinliğin herhangi bir analize dayandırılmadan yüksek tutulduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada konsolidasyon enjeksiyonu ile temelin elastisite modülünün artırıldığı düşünülen barajın dinamik davranışına olan etkisini görmek için $H=100$ m yüksekliğindeki bir baraj $H/20$, $H/10$, $H/7$, $H/5$, $H/4$, $H/3$, $H/2$, H derinliğinde konsolidasyon enjeksiyonu ile birlikte modellenerek lineer elastik analizler yapılmıştır. Analizler, beton elastisite modülünün iyileştirilmiş temelin elastisite modülüne oranı $1/8$ ve $1/4$ değerleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Baraj gövdesinde dikkate alınan kritik noktalarda düşey ve asal çekme gerilmesi-zaman sonuçları elde edilerek davranışları incelenmiştir.

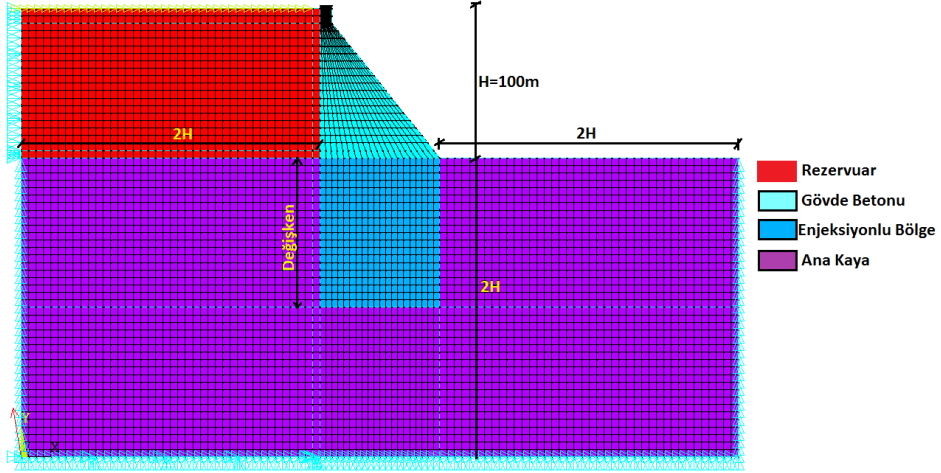
2 MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Geometri ve Model

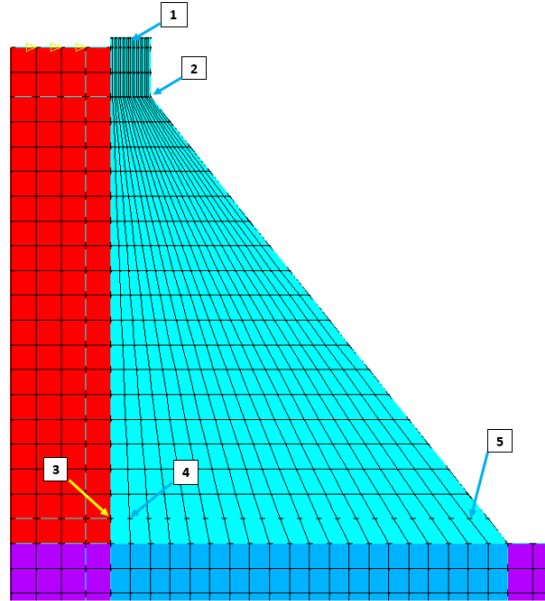
Analizlerin yapıldığı baraj 100 m yüksekliğinde Silindire Sıkıştırılmış Beton (SSB) dolgu tipinde olup, 8 m kret genişliğine sahiptir. Kesit geometrisi Şekil 1'de verilen baraj, mamba yüzü dik mansap seviye ise $1D/0.8Y$ eğim verilerek modellenmiştir. Maksimum su seviyesi, kretin 2 m altında yer almaktadır. Baraj gövdesi hedef dayanımı 16 MPa olarak alınmıştır. Baraj gövdesi içerisinde yer alan drenaj ve ölçüm galerileri ve enerji kırıcı havuz modele dahil edilmemiştir. $H/20$, $H/10$, $H/7$, $H/5$, $H/4$, $H/3$, $H/2$, H derinliğinde konsolidasyon enjeksiyonu ile birlikte modellenerek tasarımın lineer elastik analizler yapılmıştır. Barajın deprem davranışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi için oluşturulan 2-B model Şekil 1'de gösterilmektedir. Baraj gövdesi üzerinde kret deplasmanı, ivme değişimi ve 5 adet noktada düşey gerilmelerle büyük asal gerilme değişimleri elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Şekil 2'de maksimum enkesit ve incelenen kritik noktalar görülmektedir. Model 5320 adet sonlu elemana bölünmüş ve modelin sağ ve sol kısımları, sınır koşulların sistemin dinamik davranışına olan etkisini

azaltmak amacıyla memba doğrultusunda baraj yüksekliğinin iki katı mansap ve temel doğrultusunda yüksekliğin iki katı seçilmiştir. Rezervuar memba doğrultusunda yüksekliğin iki katı olarak modele dahil edilmiş ve rezervuar

sonunda Sommerfeld sınır şartı uygulanmıştır. ANSYS programı kullanılarak yapılan modelde temel ve baraj gövdesi için PLANE 42, rezervuar için FLUID29 elemanı kullanılmıştır.



Şekil 1 - Baraj-Temel-Rezervuar sonlu eleman modeli



Şekil 2 - Maksimum gövde enkesiti ve modelde incelenen noktalar

2.2 Malzeme Parametreleri ve sönüm

Temel ana kayası için elastisite modülü $E_r=1$ GPa olarak seçilmiştir. Bu değer Rocha [1976]'ya göre $E_f/E_c < 0.125$ olduğu için beton baraj yapımına uygun temel kayası değildir. Dolayısıyla sadece barajın altına uygun bir sistemle yapılacak konsolidasyon enjeksiyonu ile barajın altındaki temelin $E_r=3$ GPa ($E_f/E_c=0.125$) getirildiği düşünülmüştür. Aynı şekilde temelin elastisite modülünün

konsolidasyon enjeksiyonu ile $E_r=6$ GPa ($E_f/E_c=0.25$) getirildiği düşünülerek analizler yapılmıştır. Analizlerde ana kaya lineer elastik bir malzeme olarak kabul edilmiştir.

Gövde betonu hedef basınç dayanımının 16 MPa seçilmiştir. Yatay derzlerde düşey yöndeki, gövde betonunda ise asal yöndeki hedef çekme dayanımları, gerekli olan yerlerde tabakalar arasında soğuk derz oluşmasını engelleyecek yastık betonu uygulanacağı dikkate alınarak,

USACE [2000] kriterlerine göre Denklem (1) ve (2)'de verilen şekilde belirlenmiştir.

Analiz depremi için SSB çekme dayanımı:

$$\sigma_v = 0.05 \sigma_c = 0.80 \text{ MPa}, \sigma_{v\text{-dinamik}} = 2.00 \sigma_v = 1.60 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\sigma_p = 0.09 \sigma_c = 1.44 \text{ MPa}, \sigma_{p\text{-dinamik}} = 2.00 \sigma_p = 2.88 \text{ MPa} \quad (2)$$

Yukarıdaki ifadelerde, σ_v ve $\sigma_{v\text{-dinamik}}$ sırasıyla düşey yönde; σ_p ve $\sigma_{p\text{-dinamik}}$ ise sırasıyla asal yönde statik ve dinamik çekme dayanımını göstermektedir. Andıraz barajının statik ve dinamik analizlerine kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir. Sonlu eleman modelinde zemin kütlesiz modellenerek zeminin atalet etkisi oluşturulması sağlanmıştır. Fenves ve Chopra [1985]'nin çalışmalarını temel alan USACE-EP-1110-2-12 dökümanında, kütlesiz temel yardımıyla çözülen sonlu eleman beton baraj analizlerinde kullanılacak sönüm oranının üç faktörün (yapı-zemin-rezervuar) etkisi dikkate alınarak hesaplanabileceği belirtilmiştir.

$$\xi = \frac{1}{R_r R_f^2} + \xi_f + \xi_b \quad (3)$$

Bu formülde ξ_1 , R katsayıları (R_f yumuşak temelli baraj periyodunun rijit temelli baraj periyoduna oranı, R_r rezervuar dolu baraj

periyodunun rezervuar boş baraj periyoduna oranı) ile modifiye edilen barajın tek başına boş durumda iken yapısal sönümü, ξ_f rezervuardan dolayı sistemin sönüm oranına eklenecek ilave sönüm oranını, ξ_b ise temelden dolayı sistemin sönüm oranına eklenecek ilave sönüm oranını ifade etmektedir. Chopra ve Fenves [1985]'e göre 0.05'lik kaya ve beton elastisite oranı (20 MPa beton için) ve % 100 rezervuar seviyesinde, rezervuar tabanındaki alüvyon da dikkate alınarak R_r ve R_f katsayıları 1.31 ve 1.10 olarak belirlenmiştir. USACE-EM-1110-6051 ve 6053 [ASCE, 2003 ve 3007] dökümanında önerilen değer olarak $\xi_1 = \%7$ alınmıştır. ξ_f ve ξ_b değerleri Chopra ve Fenves [1985] tarafından verilen tablolar kullanılarak %1 ve %5 elde edilmiştir. Bu tablo ve abaklar 20 MPa dayanımlı beton için hazırlanmış grafik ve çalışmalardır. Bu değerler (3) denkleminde yerlerine yazılarak tüm sistem için sönüm oranı %10 olarak elde edilmiştir. Analiz edilecek baraj için beton dayanımı ortalama 16 MPa olduğundan kütlesiz temelli çözümlere için tüm sistemin sönüm oranı emniyetli tarafta kalınarak %15 olarak alınmıştır. Her enjeksiyon derinliği için sistem modal analizi yapılarak birinci doğal titreşim modu ile % 90 katılımın sağlandığı mod elde edilmiş elde edilen açılal frekanslar kullanılarak % 15 sönüm verecek şekilde her model için ayrı ayrı Rayleigh katsayıları α ve β hesaplanmıştır.

Çizelge 2 - Malzeme Parametreleri

Parametre adı	Baraj Gövde Betonu	Ana Kaya	Enjeksiyon bölgesi	Rezervuar
Statik Elastisite Modülü (Es) (GPa)	19	1	3 (6)*	2,02
Dinamik Elastisite Modülü (Ed) (GPa)	23,75	-	-	-
Poisson Oranı	0,2	0,3	0,3	-
Kütle Yoğunluğu (kg/m3)	2400	2600	2600	1000
Kohezyon (MPa)	1,6	-	-	-
İçsel Sürtünme açısı (°)	45	38	38	-
Basınç Dayanımı (MPa)	16	-	-	-
Düşey Çekme Dayanımı (MPa)	1,44	-	-	-
Dinamik Düşey Çekme Dayanımı (MPa)	2,88	-	-	-
Asal Çekme Dayanımı (MPa)	0,8	-	-	-
Dinamik Asal Çekme Dayanımı (MPa)	1,6	-	-	-
Rezervuar Sediment yansımaya katsayısı	-	-	-	1
Sonik Dalga Hızı (m/s)	-	-	-	1440

* : (Ef/Ec=0,25) olması durumunda temel Elastisite modülü.

2.3 Sıvı Yapı Etkileşimi İçin Euler Formülasyonu

Sıvı-yapı sistemlerinin Euler yaklaşımıyla analizinde, yapının hareketi yer değiştirmeler, sıvının hareketi ise basınçlar cinsinden ifade edilmektedir. Lineer sıkışabilir, viskoz olmayan ve rotasyonsuz bir sıvının küçük genlikli yer değiştirmeler altındaki iki boyutlu hareketi,

$$P_{,xx} + P_{,yy} = \frac{1}{c^2} P_{,tt} \quad (4)$$

dalga denkleminde verilebilir. Burada x, y, z kartezyen koordinatları, t zamanı, C sıvıdaki basınç dalgası hızını ve $P_{,ii}$ ise hidrodinamik basıncın i değişkenine göre iki kez kısmi türevini belirtmektedir. Herhangi bir etki sonucu sıvı sisteminde oluşan hidrodinamik basınçlar, Denklem (4)'ün uygun sınır şartları altında çözülmesiyle elde edilir. Sıvı sistemi için sıvı-yapı ara yüzeyinde, sıvı tabanında, sıvı yüzeyinde ve sonlu eleman ağının kesildiği arka yüzeyde (dalga yayılma şartı) sınır şartları belirlenmelidir. Sıvı sistemi sınır şartları toplu olarak aşağıda verilmiştir:

1. Sıvı-yapı (baraj-rezervuar) ara yüzeyinde,

$$P_{,n} = -\rho_w \ddot{U}_n \quad (5)$$

2. Sıvı (Rezervuar) yüzeyinde,

$$P = 0 \quad (\text{Sıvı serbest yüzeyinde yüzey dalgaları yoksa}) \quad (6)$$

$$P_{,n} = -\frac{P_{,tt}}{g} \quad (\text{Sıvı serbest yüzeyinde sıvı dalgaları varsa}) \quad (7)$$

3. Sıvı tabanında (Rezervuar tabanında)

$$P_{,n} = -\rho_w \ddot{U}_{ng} \quad (\text{rezervuar tabanı rijitse}) \quad (8)$$

$$P_{,n} = -\rho_w \ddot{U}_{ng} - qP_{,t} \quad (9)$$

4. Sıvının (rezervuarın) arka yüzeyinde Sommerfeld dalga yayılma sınır şartı ise,

$$P_{,n} = -\frac{P_{,t}}{c} \quad (10)$$

olarak tanımlanabilir (Humar ve Roufaiel, 1983; Yang vd.,1996) (5 – 10) denklemlerinde geçen yeni büyüklükler olarak; n sıvı yüzeyi dış normalini, $P_{,n}$ basıncın yüzey normali doğrultusundaki türevini, \ddot{U}_n sıvı-yapı ara yüzeyinde normal doğrultusundaki yapı

ivmelerini, ρ_w sıvının kütle yoğunluğunu, g yerçekimi ivmesini, \ddot{U}_{ng} sıvı tabanı dış normal doğrultusundaki yer ivmesini, $P_{,t}$ basıncın zamana göre bir kez türevini ve q ise rezervuar tabanı sönüm katsayısını belirtmektedir. Burada q sönüm katsayısı rezervuar tabanında bir boyutlu dalga yayılma şartı kullanılarak,

$$q = \frac{(1-\alpha)}{c(1+\alpha)} \quad (11)$$

Eşitliği ile verilebilir [Hall ve Chopra, 1982]. Burada α katsayısı rezervuar tabanından yansıyan dalganın gelen dalgaya oranını göstermektedir.

Sıvı ortamının hareketini temsil eden Denklem (4), (5, 7, 9, 10) denklemleriyle verilen sınır şartları altında çözülmesiyle hidrodinamik basınçlar elde edilir. Söz konusu sıvı denklemleri için sonlu eleman yaklaşımı kullanılırsa, sıvı sistemine ait sonlu eleman hareket denklemleri matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[M_f^p]\{P\} + [C_f^p]\{P\} + [K_f^p]\{P\} = -\rho_w [R]^T \{\ddot{U}_{sf}\} + \{F_{fg}\} \quad (12)$$

Burada $[M_f^p]$ yüzey dalgalarının etkisini içeren sıvı kütle matrisini, $[C_f^p]$ yayılma sınır şartı ile rezervuar tabanı dalga sönümlenme etkisinden dolayı ortaya çıkan sönümü içeren sıvı sönüm matrisini, $[K_f^p]$ sıvı rijitlik matrisini göstermektedir. $[R]$ sıvı-yapı arayüzeyi ile ilgili bir matris olup; yapı ortamından oluşan ivmelerden sıvı yük vektörünü ve sıvı ortamında oluşan basınçlardan yapı düğüm noktası ilave kuvvetlerini belirlemede kullanılır. Bu denklemdeki $\{\ddot{U}_{sf}\}$ sıvı-yapı ara yüzeyindeki yapı ivmelerini, $\{F_{fg}\}$ sıvı tabanındaki yer ivmelerinden dolayı ortaya çıkan sıvı yük vektörünü, $\{P\}$ hidrodinamik basınç vektörünü, $\{P\}$ ve $\{P\}$ ise bu vektörün zamana göre bir ve iki kez kısmi türevlerini göstermektedir.

Yapı ortamının dinamik hareketine ait sonlu eleman denklemleri;

$$[M_s]\{\ddot{U}_s\} + [C_s]\{\dot{U}_s\} + [K_s]\{U_s\} = \{F_s\} + \{F_{sf}\} \quad (13)$$

Bağıntısıyla verilebilir. Burada $[M_s]$, $[C_s]$ ve $[K_s]$ sırasıyla yapı ortamına (baraj+temel) ait kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini; $\{\ddot{U}_s\}$, $\{\dot{U}_s\}$ ve $\{U_s\}$ büyüklükleri de yapı ortamına ait ivme, hız ve

yer değiştirme vektörlerini temsil etmektedir. $\{F_s\}$ yapının diş yük vektörünü; $\{F_{sf}\}$ ise sıvı ortamında oluşan hidrodinamik basınçlardan ötürü yapıya gelen ek diş yük vektörünü belirtmektedir. $\{F_{sf}\}$ vektörü,

$$\{F_{sf}\} = [R]^T \{P\} \quad (14)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece sıvı-yapı sistemine ait ortak hareket denklemleri (7) ve (8) denklemlerinin,

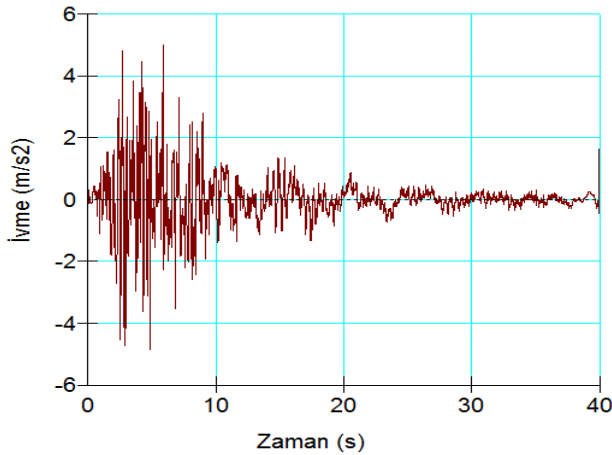
$$\begin{bmatrix} [M_s] & [0] \\ [M_{fs}] & [M_f^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_s\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & [0] \\ [0] & [C_f^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_s\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & [K_{sf}] \\ [0] & [K_f^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U_s\} \\ \{P\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_s\} \\ \{F_{fg}\} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

şeklinde birleştirilmesiyle elde edilebilir. Burada,

$$[M_{fs}] = A_w [R]; [K_{sf}] = -[R]^T \text{ dir.} \quad (16)$$

2.4 Dinamik Yük

Dinamik analizlerde A grubu kaya yada kaya benzeri formasyonlar üzerinde kayıt yapılmış olan Loma Prieta depremi ivme kaydı 0.50g değerine ölçeklenerek kullanılmıştır. Analizlerde yatay ivme kaydının 1/2'si dişey ivme kaydı olarak modele uygulanmıştır. şekil 3'te ölçeklenmiş ivme kaydı görölmektedir.

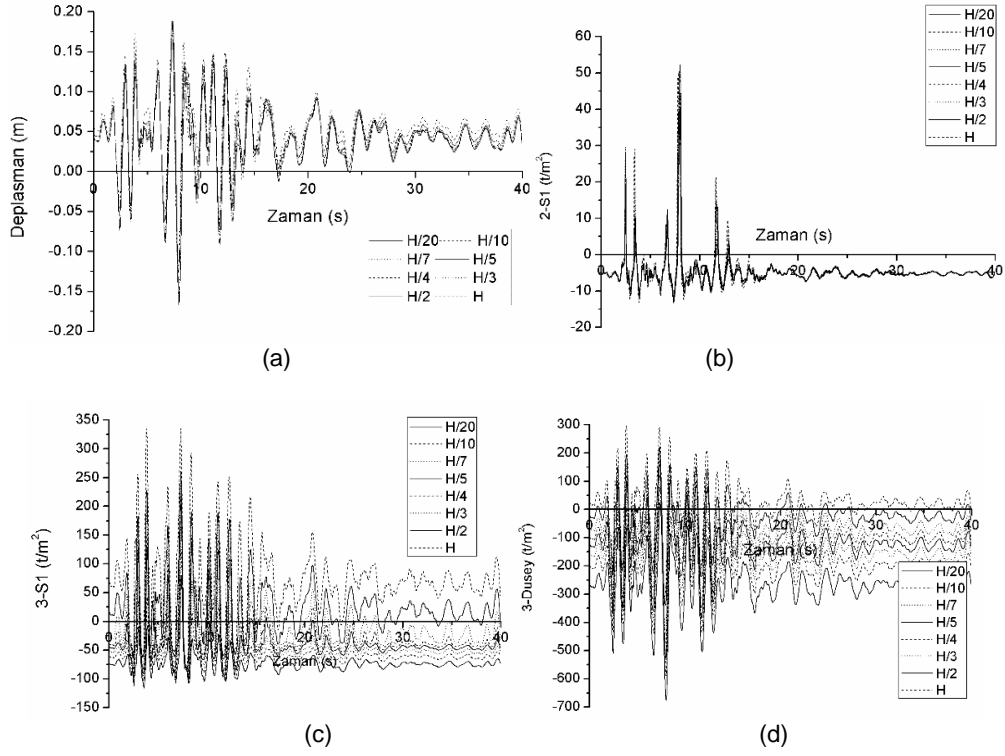


şekil 3 - Loma Prieta depremi ölçeklenmiş ivme kaydı.

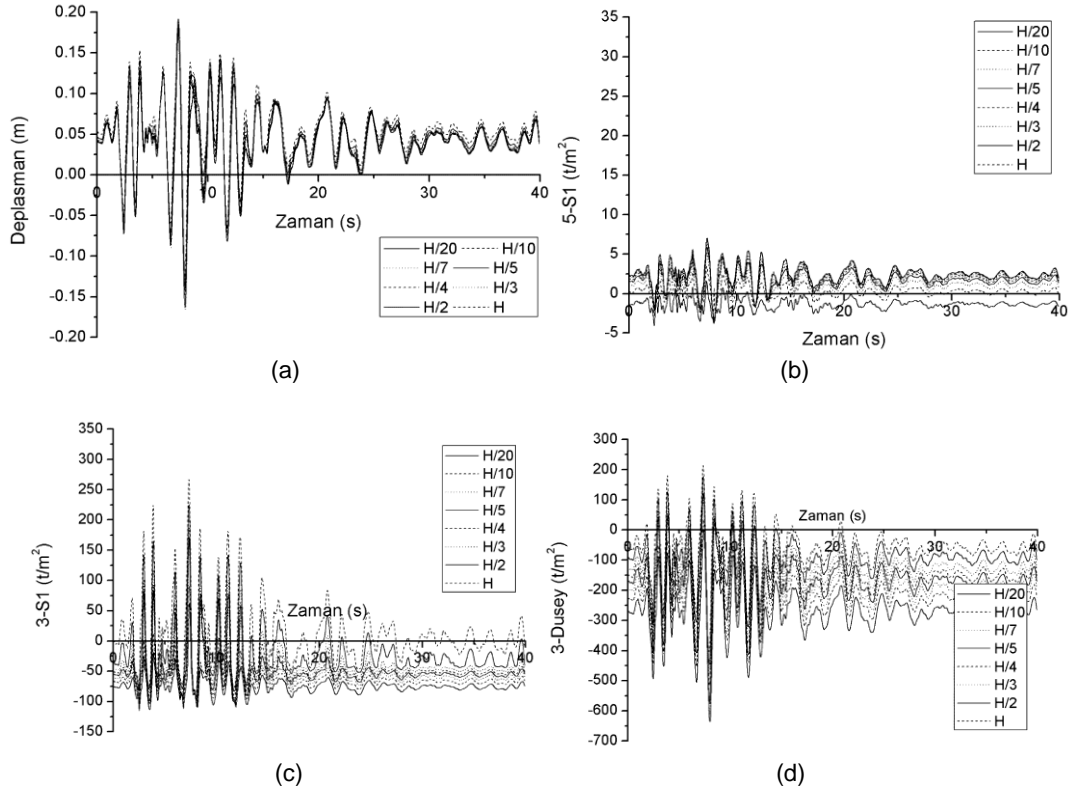
3 BULGULAR VE TARTIşMA

Heirany ve Ghaemian [2012], Gupta [2013] ve Zeidan [2015], bu çalışmadan farklı olarak tüm temel kütesinin elastisite modülünü değiştirerek yaptıkları çalışmalarda, temel in Elastisite modülü arttıķa kret deformasyonunun azaldığını dişey ve büyük asal gerilmenin arttığını göstermişlerdir. Bu çalışmada ise sadece barajın alt bölümündeki temel in çeşitli derinliklerde konsolidasyon enjeksiyonu ile elastisite modülünün artırıldığı varsayılmıştır. şekil 4 – 5(a)'da derinlik kret deformasyonuna çok az etki ederken şekil 6(a)'da temel modülü nün beton Elastisite modülüne oranı 1/8 den 1/4 değerine artırıldığında kret deformasyonu da azalmakta olduğu görölmektedir. şekil 4(b) ve 6(b) incelendiğinde krete yakın 2 nolu noktadan büyük asal gerilme değerinin önemli bir değişiklik sergilemediği görölmektedir. Aynı şekilde çıkan sonuçlardan kret ivmesinde de önemli değişimlere rastlanmamıştır. En büyük değişimlerin göröldüğü bölgeler menba ve mansap topuk bölgeleridir. şekil 4, 5, 6'nın (c) ve (d) şekillerinde 3 nolu noktada büyük asal gerilmelerin derinlik ve temel elastisite modülü arttıķa arttığı görölmektedir. Bu değişimler depremin $t=0$ başlangıç anından itibaren başlamaktadır. Enjeksiyon derinliğinin etkisini daha iyi gösterebilmek için bazı gerilme dağılımları maksimum gerilmelerin oluştuğu 6.5-8 s zaman aralığına ölçeklendirilerek şekil 7'de gösterilmiştir. Bu durum bu etkilerin yukarıda bahsi geçen çalışmalardaki statik analiz sonuçlarıyla elde edilen sonuçlarla aynı sonuçlardır.

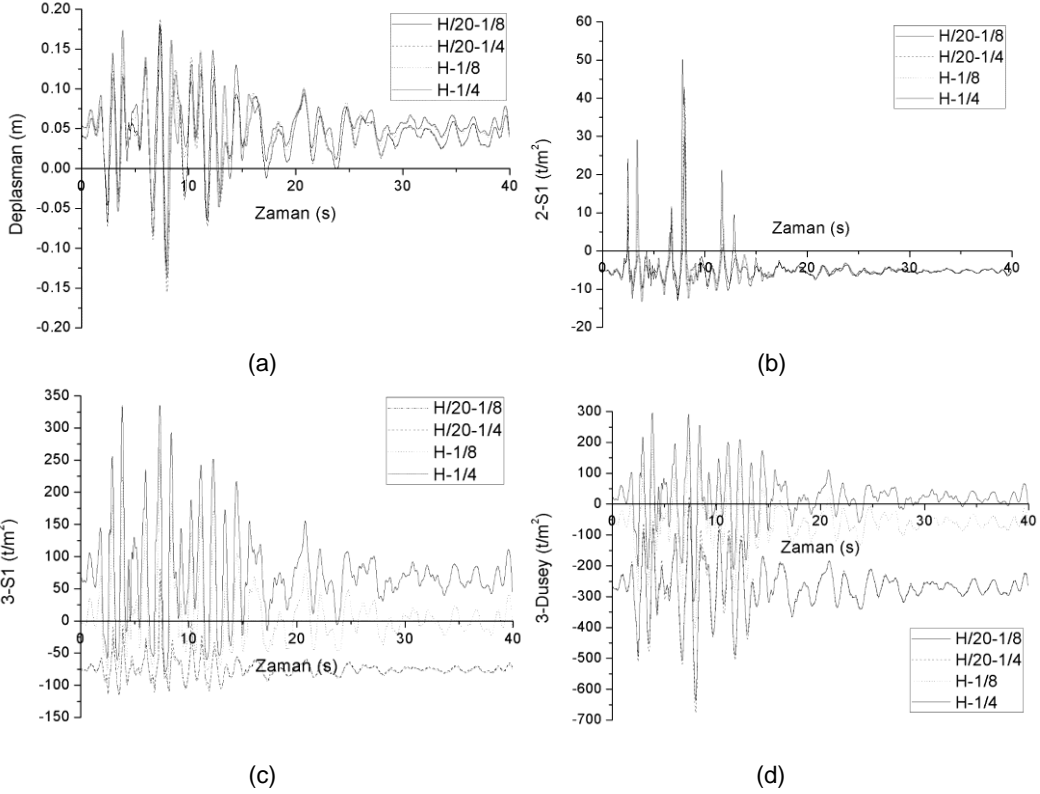
Analizler sonucunda görölmektedir ki barajın temelinde yapılacak konsolidasyon enjeksiyonu derinliğinin artması barajda incelenen kritik noktalardaki çekme gerilmelerini yükseltmektedir. Bu durumda Beton barajlar için konsolidasyon enjeksiyonu, özel iyileştirmeye tabi tutulan lokal bölgeler haricinde barajın tüm taban alanında, Konsolidasyon delik derinlikleri 5 - 10 m'den fazla verilmemesi gertiği vurgulanmıştır. Normal barajlar ve yüksek barajlar için nadiren 20 m derinliğe kadar yapıldığı da olsada [Londe ve Le May 1993] bu durum dikkatlice değerlendirilmelidir.



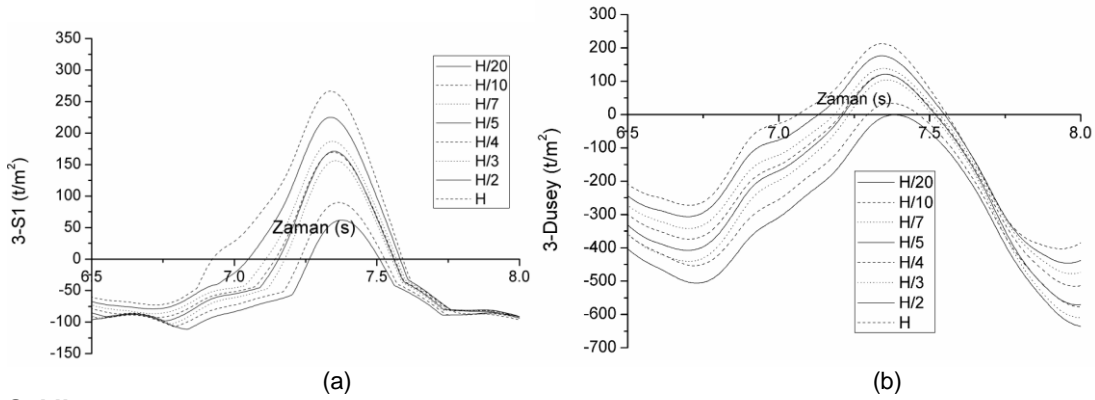
Şekil 4 - Beton Elastisite modülünün iyileştirilmiş temelin Elastisite modülüne oranı 1/4 olması durumunda, Farklı Konsolidasyon enjeksiyonu iyileştirme derinliklerinde (a)Baraj kret deplasmanı , (b) 2 nolu noktada S1 asal gerilmesi, (c) 3 nolu noktada S1 asal gerilmesi, (d) 3 nolu noktada düşey gerilmenin zamanla değişimleri



Şekil 5 - Beton Elastisite modülünün iyileştirilmiş temelin Elastisite modülüne oranı 1/8 olması durumunda, Farklı Konsolidasyon enjeksiyonu iyileştirme derinliklerinde (a)Baraj kret deplasmanı , (b) 5 nolu noktada S1 asal gerilmesi, (c) 3 nolu noktada S1 asal gerilmesi, (d) 3 nolu noktada düşey gerilmenin zamanla değişimleri



Şekil 6 - Beton Elastisite modülünün iyileştirilmiş temel Elastisite modülüne oranı 1/4 ve 1/8 olması durumunda, Sığ ve derin Konsolidasyon enjeksiyonu iyileştirilmesinde (a)Baraj kret deplasmanı , (b) 2 nolu noktada S1 asal gerilmesi, (c) 3 nolu noktada S1 asal gerilmesi, (d) 3 nolu noktada düşey gerilmenin zamanla değişimleri



Şekil 7 - Maksimum gerilmelerin oluştuğu 6.5-8 s zaman aralığında ölçeklendirilmiş; (a) 3 nolu noktada S1 asal gerilmesi, (b) 3 nolu noktada düşey gerilmenin zamanla değişimleri

Özellikle Şekil 7 incelendiğinde baraj gövdesinin en kritik noktası olan 3 nolu noktada $t=7-7.5$ s ler arasında konsolidasyon enjeksiyonu derinliği arttıkça asal ve düşey gerilmelerin çekme bölgesine kaydığı açıkça görülmektedir. Bununla beraber beton baraj dinamik analizlerinde çoğunlukla modelde konsolidasyon enjeksiyonu dikkate alınmadığı düşünüldüğünde, baraj gövdesi üzerinde 3 nolu noktanın çatlamayacağı ön görülürken pratikte konsolidasyon enjeksiyonu nedeniyle

çatlamalar oluşabilecektir. Bu da gösteriyor ki, konsolidasyon enjeksiyon derinliğinin fazla tutulması, faydadan çok inşaat maliyetlerine olduğu gibi baraj stabilitesi üzerine de olumsuz etkileri olabilecektir.

4 SONUÇ

Bu çalışmada konsolidasyon enjeksiyonu ile temel elastisite modülünün artırıldığı düşünülen barajın dinamik davranışına olan etkisini görmek için $H=100$ m yüksekliğindeki

bir baraj H/20, H/10, H/7, H/5, H/4, H/3, H/2, H derinliğinde konsolidasyon enjeksiyonu ile birlikte modellenerek lineer elastik analizler yapılmıştır. Analizler, Beton Elastisite modülünün iyileştirilmiş temel elastisite modülüne oranı 1/8 ve 1/4 değerleri için ayrı ayrı yapılmıştır. Baraj gövdesinde dikkate alınan kritik noktalarda düşey ve asal çekme gerilmesi-zaman sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda konsolidasyon enjeksiyonu derinliğinin artması yani enjeksiyonla iyileştirilmiş zeminin derinliğinin artması baraj kesiti üzerinde kritik noktalarda düşey gerilmenin ve özellikle asal gerilmenin azalmasıyla çekme bölgesine doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç Heirany ve Ghaemian [2012], Gupta [2013] ve Zeidan [2015] yaptıkları çalışmalarla da uyumlu olduğu görülmüştür. Genel olarak Beton ağırlık ve kemer barajlarda özellikle çatlaklı kayalarda başarı ile uygulanan konsolidasyon enjeksiyonu derinliğine sezgisel ve tecrübi yaklaşımlarla karar verilmekte ve genel olarak 5 m ile 15 m arasında yapılmaktadır.

Bu çalışma sonuçları göstermiştir ki; konsolidasyon enjeksiyonu derinliğinin pratik değerlerden fazla yapılması daha güvenli bir yapı ortaya çıkarmak yerine çekme gerilmesi yönünden daha fazla yüklenen yapılar ortaya çıkarmaktadır. Bu bağlamda Baraj yüksekliğinin fonksiyonu olarak yapılacak Enjeksiyon derinliği H/20 ile H/10 arasında olmalıdır denebilse de pratikte derinliği 5 m den az enjeksiyonlar anlam taşımayacaktır. Bununla beraber genel olarak H baraj yüksekliği dikkate alınarak 5 m < Konsolidasyon Enjeksiyonu Derinliği < H/10 sınırları pratikteki uygulamalar için yeterli olacaktır.

5 KAYNAKLAR

- [1] Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D., and Cording, E.J., 1967, Design of surface and near surface construction in rock. In Failure and breakage of rock, proceedings of the 8th US symposium on rock mechanics. (ed. C. Fairhurst), 237-302. New York: Soc.Min.Engrs, Am. Inst. Metall. Petroleum Eng.
- [2] Fenves, G., Chopra, A.K.,1985, "Simplified analysis for earthquake resistant design of concrete gravity dams" Report No.UCB /EERC-85/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- [3] Gupta, M., 2013, "Elastic and Elasto-Plastic Analysis of Gravity Dam-Foundation System Without and With Shear Seams", Indian Institute of Technology Delhi.
- [4] Hall, J.F., Chopra, A.K., 1982, Hydrodynamic Effects in the Dynamic Response of Concrete Gravity Dams. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp. 333-345.
- [5] Heirany Z., Ghaemian M., 2012, "The Effect of Foundation's Modulus of Elasticity on Concrete Gravity Dam's Behaviour", Indian Journal of Science and Technology, Vol:5.
- [6] Humar, J., Roufaiel, M., 1983, Finite Element Analysis of Reservoir Vibration, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 215-230.
- [7] Londe, P., Le May, Y., 1993, "Rock Foundations for Dams." ICOLD Bull. 88.
- [8] Roca, M., 1976, "Algunos problemas relativos a mecanica das rochas dos materiais de baixa resistencia" Geotecnia. Revista de Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Novembro, pp 3-27
- [9] Romana, M., 2003, "DMR (Dam Mass Rating), an adaptation of RMR Geomechanics Classification for use in Dam Foundation", Inst. Cong. On Rock Mechanics (Technology roadmap for rock mechanics) South Inst. Of Min and Met.
- [10] USACE, 1994,. Rock Foundations, USACE EM1110-1-2908.
- [11] USACE, 2003, Time History Dynamic Analyses of Concrete Hydraulic Structures, EM-1110-2-6051.
- [12] USACE, 2007, Earthquake Design and Evaluation of Concrete Hydraulic Structures, EM-1110-2-6053.
- [13] USACE, 2017,. Engineering and Design Grouting Technology, USACE EM1110-2-3506.
- [14] Weaver Kenneth, D., Donald, Bruce A., 2007, "Dam Foundation Grouting" American Society of Civil Engineers.
- [15] Yang, R., Tsai, C. S., Lee, G. C., 1996, Procedure for Time-domain Seismic Analyses of Concrete Dams, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 122, No. 2, pp. 116-122.
- [16] Zeidan, B.A., 2015, "Effect of Foundation Flexibility on Dam-Reservoir-Foundation Interaction", Eighteenth International Water Technology Conference, IWTC18, Sharm El-Sheikh, 12-14 March 2015.

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI KULLANILARAK ÇEŞİTLİ JET HIZLARI VE AYIRICI AÇILARI İÇİN BİR PELTON TÜRBİN KEPÇESİNE ETKİ EDEN KUVVETLERİN BELİRLENMESİ

Sedat YAYLA

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 65080, Kampüs/VAN
sedyayla@yahoo.com

Azhin ABDULLAH

Ministry of Municipality Directorate Water Surrounding in Erbil
azhinshanya@gmail.com

Mehmet ORUÇ

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 65080, Kampüs/VAN
mehmetoruc@yyu.edu.tr

(Makalenin geliş tarihi: 07.11.2018, Makalenin kabul tarihi: 27.12.2018)

ÖZ

Bu çalışmada, ANSYS-Fluent programı ile gerçekleştirilen sayısal analizlerde iki fazlı akışkan ile akış hacim modeli kullanılmıştır. Güç üretiminin değerlendirilmesi için Pelton türbin kepçesinde mevcut olan kuvveti belirlemek amacıyla, iki farklı kepçe şeklindeki modelin kepçe ayırıcı açıları, giriş hız değerleri ve jet çapları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Her bir parametrenin, kepçe yüzeyinde oluşturduğu kuvvetin üzerindeki etkisinin belirlenmesi için çalışmada; 20, 25, 30, 35 ve 40 m / s'lik çeşitli giriş hızlarındaki iki farklı kova modelinin 55, 75, 90 ve 115 ° 'lik dört farklı ayırıcı açısına sahip 30 ve 40 mm'lik iki jet çapı kullanmıştır. Kova üzerindeki kuvvet ve jet giriş hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğu ortaya çıkmıştır; bu nedenle Model 1 ve 2 için daha yüksek jet hızları için kova üzerinde daha yüksek bir kuvvetin elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HAD, İki fazlı akış, Serbest yüzey akışı, Kova tasarımı, Ayırıcı açısı

DETERMINATION OF A FORCE ACTING ON A PELTON TURBINE BUCKET FOR A VARIETY OF JET VELOCITY AND SPLITTER ANGLES USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

ABSTRACT

In the present study, the two-phase flow volume of fluid approach was utilized in a numerical analysis performed with the ANSYS-Fluent program. The effects of bucket splitter angles, inlet velocity values and jet diameters of two different bucket-shape models were investigated to determine the force existed on the Pelton turbine bucket for the evaluation of power generation. The study utilized two diverse bucket models at various inlet velocities of 20, 25, 30, 35 and 40 m/s, four diverse splitter angles of 55, 75, 90 and 115° and two jet diameters of 30 and 40 mm for the identification of every single parameter's impact on the effective force generated on the bucket surface. It was revealed that there was a linear relationship between force on the bucket and jet inlet velocity; therefore, a higher force on the bucket could be obtained for higher jet velocities for both Models 1 and 2.

Keywords: CFD, Two-Phase Flow, Free Surface Flow, Bucket Design, Splitter Angle

1 INTRODUCTION

Hydropower has been used for producing power since ancient times. People have seen hydropower as a water power energy resource that has the capability of producing electricity from machines powered by water movement; therefore, hydropower is considered to be renewable energy. However, the processes and activities involved in hydroelectricity production such as dam construction, a change in water level and flow rate, and building new infrastructures generally have negative effects on the environment [1].

When the type of hydropower turbines is considered, impulse and reaction turbines differ from each other based on energy conversion mechanisms. Briefly, impulse turbines such as Pelton, Turgo, and cross-flow turbines obtain kinetic energy from flowing water while reaction turbines like Francis, propeller and Kaplan turbines acquire potential energy from pressurized water. Besides, impulse and reaction turbines depend on different points, changes in kinetic energy, and changes in velocity and pressure heads, respectively [2]. Pelton turbine being a kind of the turbine that utilizes kinetic energy of water to obtain mechanical power is the most appropriate type of the turbine for generating electricity especially in low flow rates and high heads in power plants [3]. The potential energy of water at height is converted into kinetic energy by this kind of turbines via permitting water to fall spontaneously on the Pelton runner. The impact of water provides essential rotation necessitated for the rotation of the runner by overcoming its inertial forces. The rotation of the runner advances into mechanical energy, which is converted to electrical energy via a generator. Therefore, researchers, designers, and engineers attempt to acquire high-efficiency power production in Pelton turbines by optimizing geometrical aspects of a bucket and a nozzle. However, the flow is multifaceted and the fluid flow is quite complex in a Pelton turbine. Therefore, our comprehension of the interface between a high-speed water jet and the rotating Pelton buckets can be facilitated by utilizing the computational fluid dynamics (CFD) method because, in the design of a Pelton turbine bucket, CFD and model testing are common techniques for the optimization of the power output of the Pelton turbines. Numerical simulation of the flow in a moving Pelton turbine bucket was conducted by Hana [4],

Sick et al. [5], Janetzky et al. [6], and Mack and Moser [7]. The Pelton jet flow employing a single-phase model and the break-up phenomenon that occurs in the Pelton jet surface was particularly highlighted. The analysis was based on the numerical study, experimental work conducted and the analytical discussions on the Pelton jet surface. The resulting analysis has led to the development of the single-phase CFD model also referred to as the virtual interphase method (VIP) analyzed by Gottfred [8]. In another study, Zoppe et al. [9] supplied numerical and experimental analysis in detail for the flow in a fixed bucket of a Pelton turbine. The CFD was employed for visualizing flow pattern of the multi-phase free surface flow on the Pelton turbine. Their numerical results present a good consistency with their experimental findings. The comparison of flow characteristics on a Pelton bucket with a circular and rectangular jet utilizing numerical multi-phase flow simulations was performed by Gupta and Prasad [10]. It was observed that abundant studies had been conducted on the field on the modeling of bucket flow; however, a few of them compared their findings with experimental measurements. For instance, Kvicinsky [11] preferred comparison of pressure distribution calculation with experimental data in a Pelton turbine. In another study, Pudasaini et al. [12] performed a CFD analysis of a Khimti Hydropower's Pelton runner by meeting IEC601 standard to scale down the runner. ANSYS Fluent was utilized to perform the entire simulation and they documented high pressure in the splitter and deep face of the bucket from their simulation results.

The present study was motivated by the importance of bucket design on power production in Pelton turbines. Particularly, the findings of Zoppe et al. [9] were selected for validation purposes because their pressure distribution results were very well predicted for the whole range of the studied parameters. In this paper, two different buckets of the Pelton turbine models, two different diameters of jet nozzle, four different splitter angles and five different jet velocities were investigated to determine the force on the Pelton turbine bucket. In addition, fluid flow visualization in the fluid domain was also observed.

2 MATERIAL AND METHODS

The Pelton bucket comprises of a disc attached to the horizontal shaft and its runner and the buckets bowl shape are evenly set [13]. The nozzle is a circular device used as a water flow rate regulator and navigator. Its spear inside controls the volume of water that comes through the nozzle as the spear is pushed inside; otherwise, a large volume of water comes in if it is shoved outwards. The spear can be manually controlled or automated. By-pass nozzles are also incorporated to keep pipes from bursting when the water supply is abruptly halted since these nozzles prevent the water to hit the buckets in place [14]. Defectors come along with Pelton wheel turbines to interrupt the water jet and prevent hitting the buckets with large volumes of flowing water.

2.1 Numerical Model Details

In this present study, a solid modeling module of ANSYS was applied for generating two various buckets of Pelton turbine geometry. Briefly, both models had the width of the bucket by being 67 mm while nozzle diameters (nd) for model 1 and 2 were selected to be 40 mm and 30 mm, respectively when the length of the jet was 55 mm. Geometric details of both bucket models are illustrated in Figure 1 and 2. Five different velocities (20, 25, 30, 35 and 40 m/s) were utilized as a velocity inlet boundary condition for the jet while four different splitter angles (55°, 75°, 90°, and 115°) were determined to study fluid flow characteristics on the bucket surface. Specifically, the impacts of force on the Pelton turbine bucket shapes and visualization fluid stream on the buckets were examined in the present study. A Mesh independency test was also performed based on the force on the bucket and in Table 1 we

can see the variation of force on the bucket with different mesh number models. It can be stated that nearly 1.3 million elements produced 1345 N force on the bucket and an additional increase in a number of mesh caused the insignificant change in force magnitude on the bucket. Therefore, the mesh independency test was performed based on the model with 1.3 million elements. The purpose of this technique was to refine the mesh size along the direction of the flow [16, 17]. The lowest size of mesh was set to be smaller than the first layer thickness close to the wall in the models so that the velocity gradient at the wall could be correctly captured. Furthermore, the minimum mesh sizes were determined to be 0.000019 m to avoid incorrect automatic mesh generation in the solver. The sweep method was utilized to capture the free surface of flow profile. Figure 3(a) and 4(a) display the full-size mesh elements for model 1 and 2, respectively from isometric views. In addition, enlarged views are also provided at the interface between the jet and the bucket for model 1 and 2 in Figure 3(b) and 4(b), respectively. Fluid flow simulations were executed using commercial software named ANSYS Fluent to computationally determine the forces on the Pelton turbine buckets and visualize velocity and pressure variation in solution domain. Several assumptions were made prior to the simulations. The first one was that every phase proposed to be continuous while the second one was that the first phases (water) disperse itself in the second phase air [15]. In the numerical model, the free surface was modeled utilizing a homogeneous two-phase model, multi-fluid model, or a volume of fluid VOF method.

Table 1 - Results of the mesh independence study

Number of element	Force on the bucket(N)	Difference (%)
331,694	1310	2.6
658,152	1324	1.56
966,322	1335	0.74
1,299,188	1345	0
1,475,688	1345	0

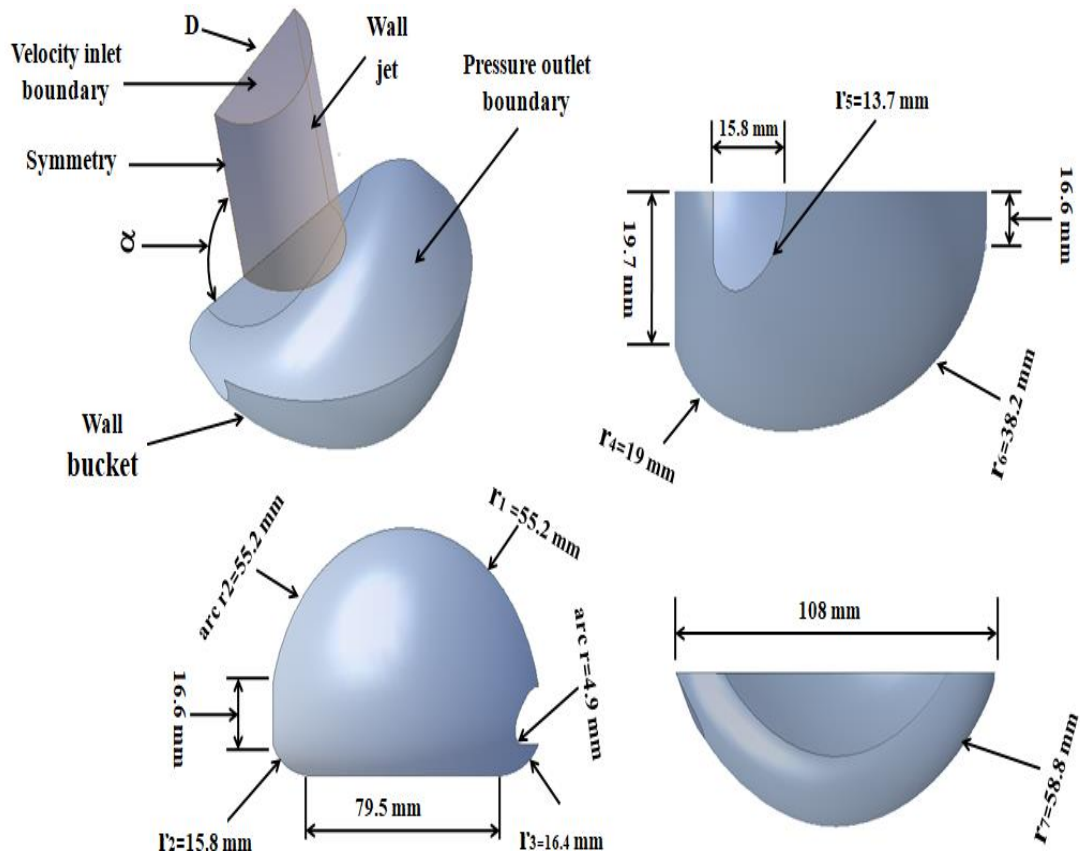


Figure 1- Model 1 geometry and associated solution domain with boundary conditions

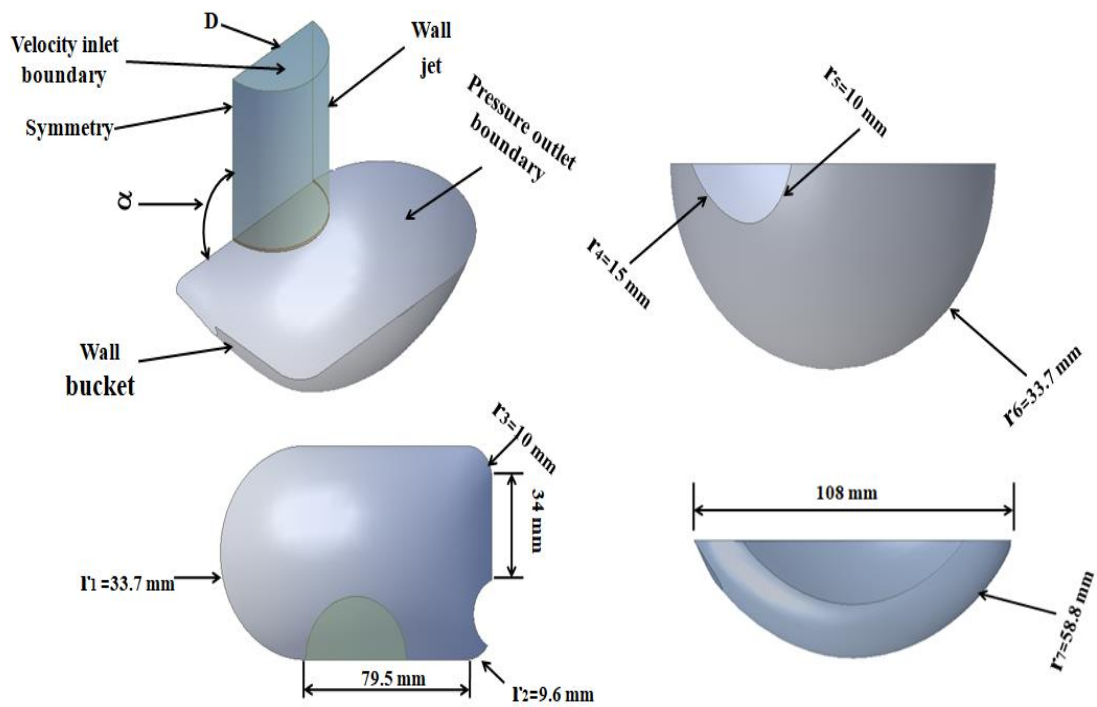


Figure 2 - Model 2 geometry and associated solution domain with boundary conditions

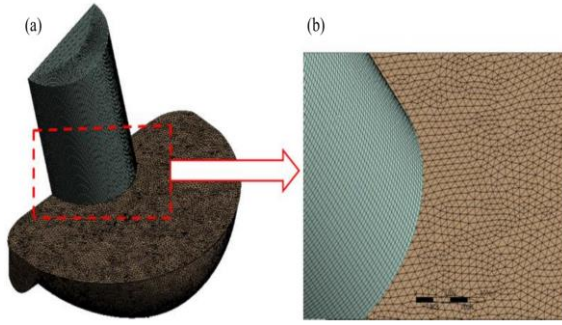


Figure 3 - Sample mesh utilized during the study of Model 1

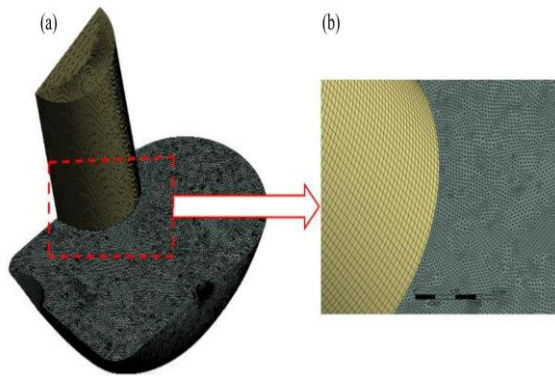


Figure 4 - Sample mesh utilized during the study of Model 2

2.2 Governing Equations

The continuity equation or conversation of mass is given in equation (1) for steady state condition [18-20].

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

(1)

Here, ρ is fluid density while u_i is the average fluid velocity component. A single momentum equation is solved for each field and also the velocity field is shared between the phases. The momentum equation on the volume fractions of every phase throughout the characteristics ρ and μ is stated by,

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

(2)

Where p is a fluid pressure, μ is dynamics viscosity of the fluid, μ_t is the eddy viscosity and determined from $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$, ϵ is a

gravitational acceleration and C_μ is a constant. A single restriction of the shared field is that the precision of the velocities calculated nearby the interface can be adversely influenced when a great velocity variance exists among the phases [18-20]. Fluid flow characteristics in the fluid flow domain were determined from Reynolds number given in equation (3). In here, μ , ρ , D and V represent dynamic viscosity of the fluid, the density of the fluid, the diameter of the nozzle and velocity of the water, respectively.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3)$$

Reynolds number was calculated to be between 800,000 and 1,600,000; therefore, fluid flow was accepted to be turbulent in the fluid domain. In this study, k- ϵ model (RNG) and enhanced wall treatment were selected to be employed for the computational domain as Yakhot et al. [21] developed the RNG model by utilizing Re-normalization group (RNG) methods for renormalizing the Navier-Stokes equation. The eddy viscosity was determined from a single turbulence length scale, in the standard k- ϵ model; thus, the calculated turbulent diffusion happens merely at the particular scale while entire scales of motion virtually contribute to the diffusion of the turbulent. The RNG method, which is a mathematical method that might be utilized for deriving a turbulence model same as the k- ϵ , causes an adapted form of the ϵ equation, which tries to take into account the various scales of motion via alteration to the generic term. Equation (4) and (5) give k- ϵ model transport equations for k and ϵ , respectively.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon - Y_{sr} + S_k$$

(4)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + S_\epsilon$$

(5)

In here, turbulent kinetic energy and turbulent kinetic energy's rate of dissipation are expressed with k and ϵ equations, respectively. σ_k and σ_ϵ are the turbulent Prandtl numbers and they were determined from experiments with air and water for fundamental turbulent shear flows including homogeneous shear flows and decaying isotropic grid turbulence. They have been found to work fairly well for a wide range of wall-bounded and free shear

flows. While C_1 and C_2 are constants, the turbulent kinetic energy generation term was referred with G_k because of mean velocity gradients. Fluctuating dilatation contribution was considered by Y_M while S_k and S_ϵ were responsible for source term of k and ϵ , and these terms were taken to be default because our models did not have any instability in convergence. The volume of the fraction for the phases was achieved by solving the equation of continuity for the volume fraction of one or two phases. Equation (6) states the volume of fraction equation [18, 19].

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}\right) * [\nabla \cdot (\alpha_q * \rho_q * v_q)] = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_p - \dot{m}_q) \quad (6)$$

Where, \dot{m}_q is the mass transfer from secondary phase (q) to primary phase (p) and \dot{m}_p is the mass transfer from phase primary (p) to secondary phase (q). Furthermore, $\alpha q = 0$ expresses that the cell is empty and $\alpha q = 1$ states that the cell is full while $0 < \alpha q < 1$ claims that the cell comprises boundary among two fluids such as water and air. The suitable variables and characteristics were allocated to each controller volume inside the field depending on the value of αq .

2.3 Creating Mesh and the Boundary Layer

The optimal mesh size was chosen by the mesh independence study. The minimum mesh size is set to be less than the first layer thickness near the wall. The maximum mesh size is set to 000014 and the minimum mesh size is set to 0.001 and 0.001 m to prevent false automatic mesh formation in the FLUENT. Finally, necessary steps have been taken so that the ratio of mesh size between two adjacent elements is not greater than 1.5. A great feature of Mesh is that it is of great importance for effective mathematical and numerical simulation. The wall of the Pelton turbine and the size of the substance near the turbine affect the accuracy of the flow structure and are more detailed and sensitive. However, in 3D simulation, small changes in the size of the substance will lead to a significant increase in the number of substances. As a result, the calculation time will increase significantly. Optimum mesh size must be selected to compensate for the accuracy of the (CPU) time and simulation.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Validation of the Numerical Model

The numerical model was chosen to be the same with Zoppe et al. [9] for validation purposes. A two-phase flow (free surface), three-dimensional geometry and turbulent flow were utilized to model flow visualization on the bucket and determine forces on the bucket when the volume of fluid method (VOF) was employed [22]. In that study [9], two non-dimensional parameters were defined as non-dimensional driving force (F^*) and the jet diameter's non-dimensional magnitude (D^*). Particularly, F^* was identified as a ratio of force obtained in the numerical or experimental study to a maximum force in simulations while D^* was determined to be a ratio of the diameter of the nozzle to the width of the bucket. Therefore, Figure 5 gives a comparison of experimental and numerical data taken from Zoppe et al. [9] and the findings of the present work. The results of the CFD model used in the present study are in agreement with both experimental and numerical findings of Zoppe et al. [9] indicating that this CFD model can be used for further analysis in flow visualization and force determination of bucket at different Reynolds numbers and splitter angles.

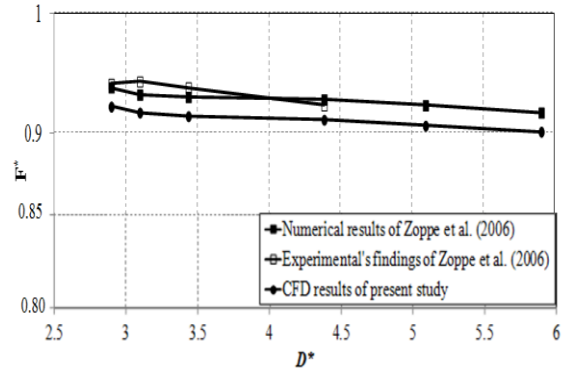


Figure 5 - Comparison of non-dimensional driving force versus the jet diameter's non-dimensional magnitude for the present study with Zoppe et al. [9]

3.2 The Effect of Splitter Angle on Pressure at Bucket Surface

The flow into a Pelton turbine is similar to the flow of a free jet; therefore, there are huge variations in the density between the two phases of the flows. Utilizing the VOF method for modeling the water and the air phases, the density difference was taken into consideration

in the present work's simulations. Hydraulic design in both single and two-phase flow systems are extremely impacted by pressure. As a result, the present study determines the outlet of pressure boundary, principally in the Pelton turbine; furthermore, the pressure generated on the bucket was evaluated because of the effect of high jet pressure distributed in the bucket.

Figure 6 demonstrates the variety of pressures on the bucket when jet velocity was 25 m/s and jet diameter was 40 mm for different splitter angles of Model 1 and 2. In the splitter angle of 55° in both models, the pressure distribution in the bottom edge is varied according to the jet strike of the flow. Therefore, the generated pressure on the bucket in this splitter angle is low as the water force is divided into two components. While one of these components (i.e., lateral direction to the flow) does not affect the bucket according to the impulse-momentum principle, the other component (i.e., parallel direction to the flow) has the sole contribution. Furthermore, another reason for the low pressure in the splitter angle of 55° is that there is a flow leakage through the bottom edge. In the splitter angle of 75° case, the effect of pressure was located near the middle of the bucket and the pressure values were greater than 55° for both models; moreover, the leakage of the flow was less in comparison to the splitter angle of 55° cases. Finally, the pressure distribution in the splitter angle of 90° was located at the middle of the bucket and there was no leakage for both models. In addition, the pressure value of 90° case was the highest in comparison to the splitter angle of 55°, 75°, and 115° cases because the proportion of the alteration of the momentum was equal to the applied force and occurred in the force direction. The results agree with Gupta and Prasad [10] and Zoppe et al [9].

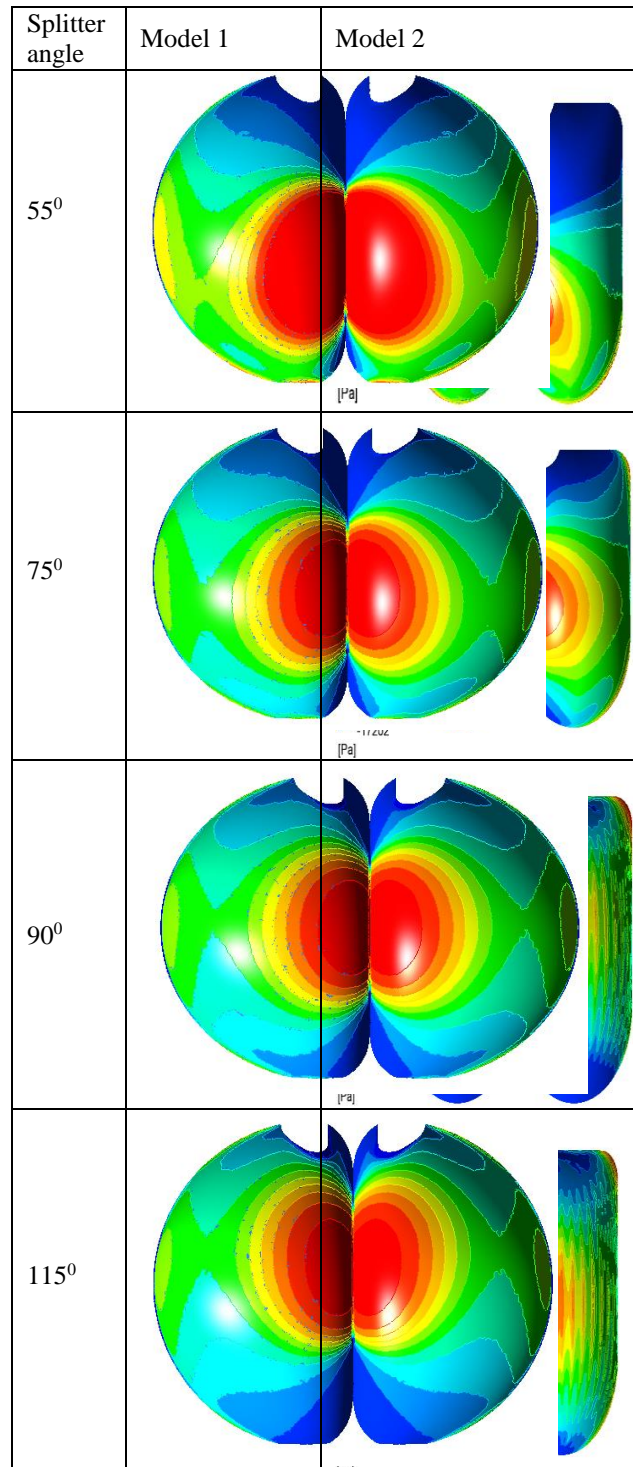


Figure 6 - Variation of pressure on the bucket surface for Model 1 and 2 when the jet velocity is 25 m/s and jet diameter is 40 mm

3.3 Identification of Water Volume Fraction on Bucket Surface

The water and air phases upon the bucket are typically demonstrated by water volume fraction contours. These contour plots can play an important role in the explanation of pressure and force on the buckets since the water phase is primarily responsible for the magnitude of the force. Generally, red and blue colors symbolize water and air phases, respectively while the mixture of water and air phase is indicated by the rainbow color. In the present work, the variation of the water volume fraction inside the bucket for four different splitter angles of two models is demonstrated in Figure 7 when the jet velocity is 25 m/s and jet diameter is 40 mm. First, water volume fraction findings of Model 1 show larger areas than Model 2 for all the studied splitter angle cases. This indicates that Model 1 geometry is capable of producing more pressure than Model 2 geometry. This can result in more power production for Model 1 compared to Model 2. Moreover, when the splitter angle becomes 90°, the layer of water prolongs to the cutout edge and becomes thinner. In this case, the whole jet penetrates the bucket and the whole layer of water is confined in the bucket. Secondly, it is noted that when splitter angle moves away from 90°, the less red region appears implying that the water pressure acting on bucket surface decreases for both model 1 and 2 yielding less power production for the Pelton turbine.

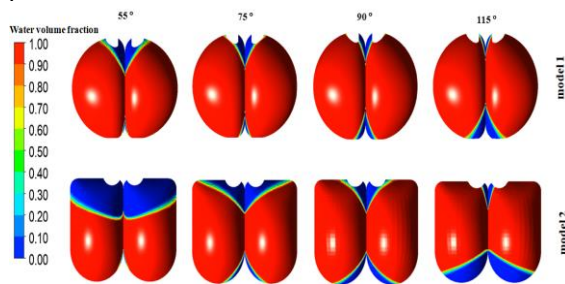


Figure 7 - Variation of the water volume fraction for Model 1 and 2 when the jet velocity is 25 m/s and jet diameter is 40 mm

3.4 Determination of Streamlines in Fluid Flow Domain

The streamlines can be curved or straight depending on the fluid flow. Figure 8 illustrates the XY plane streamlines for Model 1 and 2 when the splitter angle is 90° and jet velocity is 25 m/s. It can be seen that the velocity at the inlet was high and then decreased gradually for all cases. The jet has parallel streamlines

prior to crushing the bucket as seen from streamline patterns. Due to the deflection of the jet, the streamlines diverse near the bucket. After striking the bucket, the jet diffuses. Besides, the streamline constants of Model 2 seem to have larger values compared to that of Model 1. Since both models have the same boundary conditions, larger constants imply higher velocities near the bucket surface of Model 2. This actually yields to lower pressure values for Model 2 compared to Model 1. The streamline findings agree with the pressure contour and water volume fraction results. Lastly, it was observed that higher amounts of water leave throughout the cut-out which results in wastage without contribution to the impulse force for Model 2. These results also agree with Gupta and Prasad [10].

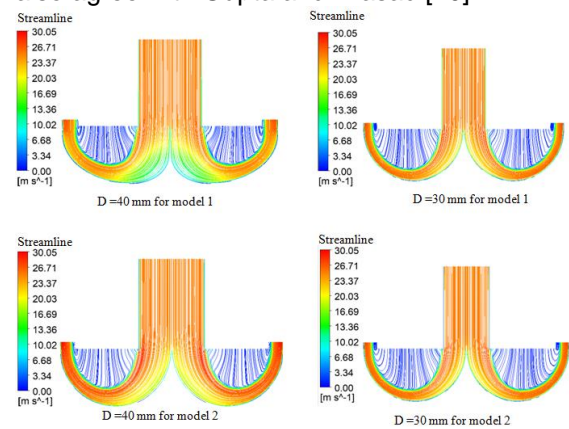


Figure 8 - XY plane streamlines for Model 1 and 2 when splitter angle is 90° and jet velocity is 25 m/s

3.5 Evaluation of Force on the Bucket for Different Splitter Angles

The relationship between force on the bucket and splitter angle for four diverse velocities is displayed in Figure 9 for Model 1 and 2. It is clear that the increasing the splitter angle from 55° to 75° resulted in the increase in the force on the bucket for all the studied cases. Then, the force on the bucket decreased for the whole cases after 90°. It was discovered that splitter angle has a noteworthy impact on the force of the bucket; for example, increasing the splitter angle to 90° will influence the amount of force on the bucket. It was noted that the impulse force of 90° splitter angle cases was reached the maximum value for all velocities because in this splitter angle water flow hits the bucket perpendicularly. When a splitter angle was away from 90°, the force value declined, for both more and less than 90° because of the leakage of flow through the cut-out and edge of the bucket Pelton turbine with changing of the

splitter angle for all case which results in decreasing momentum force. It was also realized that the impulse force in Model 1 was higher in comparison to Model 2. This effect increased with increasing the velocity. It can be stated that there is a strong positive relationship between the velocity and force. For example, an increase of jet velocity from 30 m/s to 40 m/s with nearly 33% raise yields almost doubles the force on bucket indicating that large forces can be obtained at Pelton turbine buckets at large velocities.

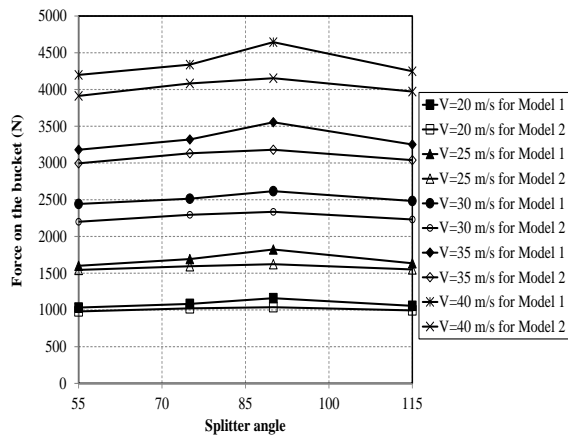


Figure 9 - Force on the bucket versus splitter angle when the jet diameter is 40 mm for different jet velocities

3.6 Evaluation of Force on the Bucket for Different Reynolds Numbers

The force on the Pelton turbine's bucket was evaluated for varying Reynolds number for four different splitter angles of Model 1 and 2 in Figure 10. It was documented that the force on the bucket increased with the rise in the Reynolds number (i.e., jet velocity since ρ , μ and D stays constant) because the momentum increase in base flow directly causes an increase of water impact on the Pelton turbine's bucket yielding large power generation. Thus, the force is positively correlated with the velocity through the momentum equation. Furthermore, it can be stated that the Reynolds number and the amount of force on the bucket are positively correlated by escalating the splitter angle. Actually, bucket shape has a significant effect on the alteration of force value.

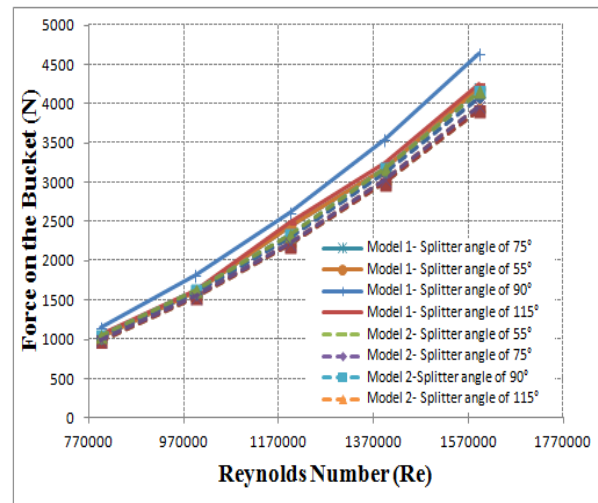


Figure 10 - Force on the bucket versus Reynolds number when the jet diameter is 40 mm and splitter angle is 55°, 75°, 90° and 115° for Models 1 and 2

4 CONCLUSION

The Pelton turbine can be utilized in the low water stream and high head in the construction of hydro-electric power plants. To obtain a Pelton hydraulic turbine with the highest efficiency throughout different working circumstances, the turbine parameters have to be encompassed in the designing process. In the present study, the simulation of the visualized stream on the bucket was observed and force values on the bucket of a Pelton turbine were determined for four different inlet velocities, namely 20, 25, 30, 35 and 40 m/s for two different bucket shape models. Moreover, four dissimilar splitter angles of 55, 75, 90 and 115° were applied for both models while two jet diameters, namely 30 and 40 mm, were utilized for both models. It was discovered that there is a linear relationship between inlet velocity and the force on the bucket (i.e., by increasing velocity, the amount of force on the bucket was increased for both models) due to the fact that increased momentum of the jet contributes to the large value of force on the bucket. The examination also revealed that the relationship between splitter angle and force on the bucket is linear until 90°. It can be concluded that;

The results of the present work evidently indicate that the maximum force on the bucket is generated at 90° for both models and jet diameters since the momentum of the water jet are fully utilized.

Pressure distribution varies with the changing shape of the Pelton turbine's bucket. This

indicates that the design optimization process of a bucket is very important for the Pelton turbines.

Water volume fraction figures were also helpful in displaying a leakage flow through the cut-out and edge of the bucket Pelton turbine when the splitter angle was varied for all cases.

The most important thing is that flow visualization and determining force is generally altered by changing the shape of the bucket of the Pelton turbine. Furthermore, escalating the jet diameter results in the decrease in the force on the bucket.

5 REFERENCES

- [1] Barstad, L.F., "CFD analysis of a Pelton turbine", Master of Science in Product Design Manufacturing, Norwegian University of Science and Technology, 2012
- [2] Noor, A.I., "Modeling of micro-hydroelectric system design", Faculty of Electrical and Electronic Engineering University Tun Hussein Onn Malaysia, 2012
- [3] George, N.J., Sabu, S., Joseph, K.R., Alex, A.C., "Static analysis on Pelton wheel bucket structural deformation and material property study", International Journal of Engineering Research & Technology, 3, p. 2278-0181, 2014
- [4] Hana, M.A., "Discussion on numerical simulation in Pelton turbines", Proceedings of 19th IAHR Symposium, Singapore, Sept. 9–11, and Paper Presented at SingaporeWorld Scientific, p. 306–315, 1998
- [5] Sick, M., Keck, H., Parkinson, E., Vullioud, G., "New challenges in Pelton research", Paper presented at Hydro 2000 Conference, Bern Switzerland, 2000.
- [6] Janetzky, B., Göde E., Ruprecht A., Keck H., Schärer C., "Numerical simulation of the flow in a Pelton bucket", Paper Presented at Proceedings of 19th IAHR Symposium, Singapore, Sept. 9–11, p. 276–284, 1998
- [7] Mack, R., Moser, W., "Numerical investigations of the flow in a Pelton turbine", Proceedings of XXI st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Sept. 9–12, Lausanne, Laboratory For Hydraulic Machines, Lausanne, p. 373–378, 2002
- [8] Gotfred, S.B., "Numerical analysis of the two-phase Pelton jet flow using a single-phase model and analytical discussions of the Pelton jet surface break-up phenomenon", Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2003
- [9] Zoppe, B., Pellone, C., Maitre, T., Leroy, P., "Flow analysis inside a Pelton turbine bucket ", Journal of Turbomachinery, 128, p. 500-511, 2006
- [10] Gupta, V., Prasad, V., "Numerical investigations for jet flow characteristics on Pelton turbine bucket ", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2, p. 2250-2459, 2012
- [11] Kvicinsky, S., "Méthoded'analysedesécoulements 3d à surface libre application aux turbines pelton [j], Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, p. 2526, 2002
- [12] Pudasaini, S., Neopane, H.P., Panthee, A., Pathak, A., Chaudhary, B.B., "Computational fluid dynamic analysis of Pelton runner of khimti hydropower project of Nepal", Paper Presented at Reattach Symposium Compendium, 4, p. 91-94, 2014
- [13] Yadav, S., "Some aspects of performance improvement of Pelton wheel turbine with reengineered blade and auxiliary attachments", International Journal of Scientific and Engineering Research, 2, p. 2229-5518, 2011
- [14] Prakash, M.N.S., "Hydraulics and hydraulic machines", Journal of Nano Science and Nanotechnology, p. 1-22, 2010
- [15] ANSYS CFX Modeling Theory, Version 14.0, 2011
- [16] Olcay, A.B., Krueger, P.S., "Momentum evolution of ejected and entrained fluid during laminar vortex ring formation received in CFD applied", Journal of Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 10, p. 105-107, 2009
- [17] Mohamed, S.M, Con, J. D., Vincent, Grid., "Convergence study for two dimensions of flow around a square cylinder at a low Reynolds number", Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, p. 1-6, 2009.
- [18] ANSYS Fluent User's Guide 2009

- [19]** Emani, V.L., "Computational analysis for multi-phase flow in helical water oil separator using CFD", Master Thesis, College of Graduate Studies Texas A&M University-Kingsville, 2006
- [20]** Xia, Y., "Numerical simulation of fine particle separation in hindered –settling bed separators by (CFD)", Ph.D. Thesis, College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University, 2004
- [21]** Yakhot, V., Orszag, S.A., "Development of the turbulence models for shear flows by double expansion techniques", *Physics of Fluids*, 4, p. 1510, 1992
- [22]** Hirt, C. W., Nichols, B. D., "Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, *Comput. Phys*, 391, p. 201–225, 1981

YERALTISUYU TERMAL ENERJİSİNİN ISITMA VE SOĞUTMADA KULLANIMI: AVRUPA VE TÜRKİYE'DEKİ DURUMUN TEKNİK VE YASAL YÖNLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Ayşegül ÇETİN
İller Bankası Üstyapı ve Uygulama Dairesi-ANKARA
aysegulcetin32@gmail.com

Ahmet APAYDIN
Devlet Su İşleri 5. Bölge Müdürlüğü-ANKARA
aapaydin@dsi.gov.tr

Halime Ö. PAKSOY
Çukurova Üniversitesi Çevre Sorunları Araştırma Merkezi-ADANA
hopaksoy@cu.edu.tr

(Makalenin geliş tarihi: 16.11.2018, Makalenin kabul tarihi: 17.12.2018)

ÖZ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan sığ jeotermal sistemlerden konutlarda ve bölgesel ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanmasından yol ve havalimanlarındaki kar ve buzlanmanın giderilmesine kadar birçok alanda faydalanılmaktadır. Sığ jeotermal sistem uygulamaları yer yüzeyinin kabaca 20-200 metre sığ derinliklerinde bulunan yer ısısının kullanılması ya da bu derinliklere değişik kaynaklardan gelen ısının depolanması şeklindedir. Yeraltısuyunun termal amaçlı kullanımı sığ jeotermal sistemlerin uygulama alanında yer almakta olup, akiferde ısı depolama ve yer kaynaklı ısı pompası olarak iki grupta uygulanmaktadır. Bunlar genel olarak "Akifer Termal Enerjisi Depolama" (ATED) ve "Yeraltısuyu Kaynaklı Isı Pompası" (YASKIP) yöntemleri olarak adlandırılmaktadır. ATED yöntemi sistemin bulunduğu iklim koşullarına bağlı olarak doğrudan ısıtma ve soğutma ya da ısı pompası destekli ısıtma ve soğutma olmak üzere farklı şekillerde uygulanabilmektedir. YASKIP yeraltı suyunun doğal sıcaklığından yararlanarak ısı pompasının daha verimli olarak kullanıldığı sistemlerdir. Genellikle biri çekim, diğeri enjeksiyon amaçlı olmak üzere iki kuyu veya iki kuyu grubu kullanılmaktadır.

Yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarımızın kullanılması açısından konutlardaki ısıtma ve soğutma yüklerinin karşılanması ülkemiz açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda yeraltısuyunun termal amaçlı kullanılmasının kentsel alanlardaki enerji talebinin karşılanmasına ciddi katkılar yapabileceği düşünülmektedir. ATED ve YASKIP uygulamaları kapalı devre sistemler olması nedeniyle yeraltısuyu başka kaynaklarla karışarak kirlenmemekte, fiziksel olarak sıcaklığın değişmesine bağlı olarak su kimyası etkilenebilmektedir. Ülkemizde yeraltısuyunun termal amaçlı kullanımına ait sıcaklık sınırlaması ile ATED ve YASKIP sistemleri konusunda herhangi bir yasal düzenleme bulunmamakta ve yeraltı suyunun termal enerji potansiyeli değerlendirilememektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan doğal yer ısısının kullanımının artırılabilmesi için yeraltısuyu sıcaklık değişimlerinin de göz önüne alınarak mevzuatta gerekli düzenlemelerin yapılması ve belirli sınırlar içinde kalmak şartıyla ATED ve YASKIP sistemlerinin yaygınlaşmasının önemli olduğu düşünülmektedir. Bu makalede yeraltısuyunun termal amaçla kullanımı ile fiziksel-kimyasal özellikleri arasındaki ilişkiler, ülkemiz ve uluslararası mevzuat açısından değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Akifer Termal Enerji Depolama, Yeraltısuyu Kaynaklı Isı Pompası, Yeraltısuyu mevzuatı, Türkiye

GROUNDWATER THERMAL ENERGY USE: TECHNICAL AND LEGAL ASSESSMENT OF THE SITUATION IN EUROPE AND TURKEY

ABSTRACT

Shallow geothermal system applications, which is one of the renewable energy resources have wide range of uses from heating and cooling of buildings to de-icing of roads and airports. These systems have been implemented as Ground Source Heat Pumps and Underground Thermal Energy Storage systems, which use the heat in shallow region at 20 to 200 meter depths below ground. Thermal uses of the groundwater is within shallow geothermal systems and can be implemented with two methods. These are Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) and Groundwater Source Heat Pump (GWSHP) methods. ATES systems depending on climatic conditions where it is located, could be used directly for cooling and heating or heating-cooling with heat pump. GWSHP systems have been implemented with groundwater and heat pump to benefit from temperature of groundwater for a more efficient operation. Two well groups - supply and injection - are generally used.

Meeting heating and cooling loads of residences from local and renewable energy resources has a great importance for our country. Thermal usage of groundwater to meet energy demand in urban areas can make a significant contribution. ATES and GWSHP systems operate in a closed circuit, which avoids contamination of groundwater from other sources and physical change of its temperature may affect chemical composition depending on the level of change. In Turkey, there are no legislations on limitations of temperature for thermal usage of groundwater, ATES and GWSHP systems, so the potential of groundwater cannot be exploited. It is important to make the necessary changes in existing groundwater legislation by taking groundwater temperature changes in consideration and allowing implementation of ATES and GWSHP for enhancing usage of natural ground thermal energy, which is one of the renewable energy resources, within certain limits. In this paper, the relations between the thermal usage of groundwater and physical and chemical properties have been evaluated with respect to international and Turkish groundwater legislations.

Keywords: Aquifer thermal energy storage, Groundwater source heat pump, Groundwater legislation, Turkey

1 GİRİŞ

Ülkemizde son yıllarda iklim değişikliği etkileri ve enerjide arz güvenliğinin sağlanması açısından yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Doğalgaz, kömür ve petrolden oluşan fosil yakıtların ülkemiz enerji tüketiminde birinci sırada yer aldığı görülmektedir. Son yıllarda artan yapılaşma nedeniyle sektör bazında konutlar enerji kullanımında sanayinin önüne geçerek birinci sıraya yükselmiştir. Konutlarda kullanılan enerjinin büyük bir bölümü ise ısıtma amaçlıdır, ancak son yıllarda soğutma yüklerinde de küresel iklim değişikliğine bağlı olarak artışlar gözlenmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan simülasyon çalışmalarına göre önümüzdeki 50 yıl içinde soğutma yüklerinde yaklaşık %30 oranında artış olacağı öngörülmektedir. Dolayısı ile enerjide arz güvenliğinin sağlanması ve iklim değişikliği etkilerinin en aza indirilmesi açısından konutlardaki ısıtma ve soğutma yüklerinin yerli yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması önem taşımaktadır. Enerji güvenliği sadece artan

ihtiyacın karşılanması için enerji üretmekle sınırlı olmayıp enerji depolamayı da kapsamaktadır. Enerjiyi saklamada yani depolamada temel fikir enerji talebi ve arzı arasında oluşan boşluğun giderilmesini sağlamaktır. Bu kapsamda şehirlerin kurulu olduğu bölgelerdeki yeraltısuyunun termal amaçlı olarak kullanılması ile konutlarda enerji talebinin karşılanmasına ciddi katkılar yapılabileceği düşünülmektedir. Ülkemizde genel yaklaşım olarak yeraltısuyunun içme-kullanma ve sulama suyu amaçlı kullanımı yaygındır. Ancak bunların dışında yeraltısuyunun ısıtma-soğutma, yollarda ve havalimanlarında buzlanmanın giderilmesine yönelik "termal amaçlı" olarak kullanımı henüz istenen seviyeye gelememiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan "Sığ Jeotermal Sistemler" konutlar, bölgesel ısıtma ve soğutmasından başlayarak yollar ve havalimanlarındaki kar ve buzlanmanın giderilmesi gibi çok geniş kullanım alanlarına sahiptir ve birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde sıcak su

akışkanına dayalı olarak bilinen "jeotermal enerji" kavramından farklı olarak "sığ jeotermal sistemler" genellikle 20-200 metre arasındaki sığ derinliklerde bulunan yer ısının kullanılması ya da bu derinliklere değişik ısı kaynaklarından elde edilen ısının depolanması amacıyla ısı pompası yardımıyla veya ısı pompasız olarak kullanılmaktadır. Sığ derinliklerdeki depolama ortamı yeraltısuyuna doygun akiferler olduğu gibi yeraltındaki doğal veya yapay boşluklar (kanallar, mağaralar vb.) da olabilmektedir.

Yeraltısuyunun termal amaçlı kullanılması, akiferde termal enerji depolanması ve yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası olmak üzere iki ana başlıkta uygulanmaktadır. "Yeraltısuyu Kaynaklı Isı Pompası" (YASKIP) ile ısıtma döneminde akiferden ısı çekilmekte, soğutma döneminde ise akifere ısı verilmektedir. "Akifer Termal Enerji Depolama" (ATED) (Aquifer Thermal Energy Storage) yönteminde yeraltısuyu, ısı transfer akışkanı olarak kullanılmakta, depolama ortamı da akifer olmaktadır.

Termal enerji depolama teknolojisi enerjinin depolanması ve ihtiyaç duyulduğunda kullanılması konusunda yenilikçi bir yaklaşım olarak geliştirilmiştir. Uygulama, Avrupa ve Kuzey Amerika'da birçok ülkenin enerji pazarına girmiş durumdadır. Avrupa'da Hollanda ve İsveç sistemin uygulanmasında başı çekmektedir. ATED sistemlerinin kullanımı Hollanda'daki kamu binaları ve tesislerinde standart bir uygulama haline gelmiştir. Akiferin termal enerjisi, akifer formasyonunun potansiyel ve kinetik enerjilerinin toplamı olup, depolama kapasitesi ise; yeraltısuyunun özgül ısı kapasitesine, sıcaklığına, akım karakteristiklerine ve akiferin hacmi, gözenekliliği, litolojisi gibi özelliklere bağlıdır.

Söz konusu yöntemlerin sürdürülebilir olarak uygulanmasında akiferin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bozulmaması önem taşımaktadır. Türkiye dışında, özellikle Avrupa'da uygulamaları çok yaygın olan söz konusu sistemler ile ilgili yasal düzenlemelerde akiferin hidro-jeokimyasal özelliklerinin korunmasına önem verilmekte ve bu nedenle uygulamada belirli sıcaklık sınırlamaları getirilmektedir.

2 AKİFERİN TERMAL ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ŞEKİLLERİ

Yeraltı sularının kaynağını oluşturan yağışların yeraltına süzülürken sıcaklığı deniz seviyesinden yüksekliğe, yağış türüne, mevsimine, beslenme zamanındaki hava sıcaklığına ve coğrafik bölgeye göre değişiklik göstermektedir. Yer yüzeyine düştükten sonra

önce toprak ve vadoz zonda hareket eden su jeolojik ortam sıcaklığı ile dengeye ulaşma eğilimindedir. Doymun zona ulaşana kadar çok karmaşık fiziksel ve kimyasal süreçlerden geçen su akiferde zamanla ortam sıcaklığı ile dengeye ulaşır. Yeraltısuyunun hızı doymun zonda üstteki vadoz ve onun en üst katmanı olan toprak zonuna göre çoğunlukla yavaş olması ve atmosfer sıcaklığından daha az etkilenmesinden dolayı doymun zondaki yeraltısuyunun sıcaklığı bulunduğu ortamın sıcaklığı ile dengeye ulaşarak az-çok sabitlenmektedir.

Bu konuda yapılan çalışmalar göstermiştir ki yaklaşık 15-20 metreden sonraki derinliklerde atmosferik etkiler gözlenmemekte ve ortamın sıcaklığı değişmemektedir. Bu sabit sıcaklık güneş ısı akısı ve yer içinden gelen yer ısı akısının dengede olduğu nötral zon içerisinde yer alır ve "bozulmamış yer sıcaklığı" olarak adlandırılmaktadır. Yer katmanlarının derinlerine doğru bu sıcaklık değeri yer içinden gelen ısının etkisi altında kalarak artmaktadır (Şekil 1).

Yeraltısuyunun termal amaçlı kullanımı genel olarak "Akifer Termal Enerjisi Depolama" (ATED) "Yeraltısuyu Kaynaklı Isı Pompası" (YASKIP) yöntemleri olmak üzere iki şekildedir. Yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası (YASKIP) uygulamasında kış dönemi boyunca ısıtma süresince akiferde bulunan doğal ısı çekilmekte, yaz dönemindeki soğutma sırasında da akifere ısı verilmektedir. Bu yöntemde belli derinliklerde sıcaklığı pek fazla değişmeyen akiferin ısı enerjisi, yeraltı suyunun taşıyıcı akışkan olarak kullanıldığı bir ısı pompası yardımıyla ısıtma, ya da soğutma ihtiyaçları için kullanılmaktadır. Genellikle biri çekim, diğeri enjeksiyon amaçlı olmak üzere iki yeraltısuyu kuyusu veya kuyu grubu kullanılmaktadır.

Akiferde Termal Enerji Depolama (ATED) yönteminde ise YASKIP'nin tersine, akifere başka bir enerji kaynağından aktif olarak ısı enerjisinin depolanması söz konusudur. Genel olarak biri sıcak, diğeri soğuk depolama olmak üzere iki ayrı kuyu grubu ile birlikte uygulanmaktadır.

2.1 Akiferde Termal Enerji Depolama Sistemi (ATED)

ATED yöntemi uzun süreli depolama sistemidir ve genellikle mevsimsel depolama amaçlı olarak kullanılmaktadır. Enerji depolamada kullanılan sıcak kaynaklar; güneş enerjisi, ısı pompasından soğutma döneminde atılan enerji, sanayi proses atık enerjisi, soğuk kaynaklar ise

kış ortam soğukluğu, kar ve buz olmaktadır. Sistemin kurulacağı iklim ve hidrojeolojik koşullara bağlı olarak doğrudan ısıtma ve soğutma, doğrudan soğutma, ısı pompası destekli ısıtma ve soğutma, ya da ısı pompası destekli soğutma olmak üzere farklı şekillerde uygulanabilmektedir.



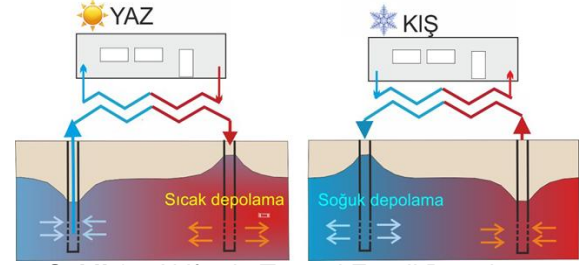
Şekil 1 - Yer içindeki derinliklere bağlı ısı akısı bölgelerinin şematik gösterimi (SenGesUmV, 2010 dan değiştirilerek)

ATED sisteminin temel mantığı bir mevsim süresince elde edilen soğuk veya sıcak enerjinin, diğer mevsimde oluşan ısıtma veya soğutma ihtiyaçlarının karşılanması olarak tanımlanabilir. Genellikle sıcak ve soğuk olmak üzere iki kuyu ya da kuyu grubu kullanılmaktadır. Yaz ve kış dönemleri boyunca elde edilen enerji, gözenekli akifer ortamında depolandığında kuyular etrafında sıcak ve soğuk cepheler oluşturulmaktadır. Yaz dönemi boyunca elde edilen sıcak enerji sıcak kuyu grubu etrafında depolanarak izleyen kış döneminde ısıtma ihtiyacının karşılanması için kullanılmaktadır.

Kış döneminde bir önceki yaz sezonunda akiferde depolanan ısının ısıtmada, yaz sezonunda ise bir önceki kış sezonunda akiferde depolanan soğukluğun kuyularla çekilerek soğutmada kullanılması olarak uygulanmaktadır (Şekil 2).

Akiferde Termal Enerji Depolama yöntemi ısı pompası ile birlikte de kullanılabilir. Isı pompası ile birlikte kullanılan ATED yönteminde yaz boyunca soğutma döneminde ısı

pompasından atılan ısı akiferde depolanmaktadır. Depolanan ısı ise kış döneminde ısıtma ihtiyacının karşılanması için kuyudan pompa ile çekilen yeraltısuyu ile tekrar ısı değiştiricisine ya da ısı pompasına aktarılarak sistem verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 2 - Akiferde Termal Enerji Depolama (ATED) Sistemi

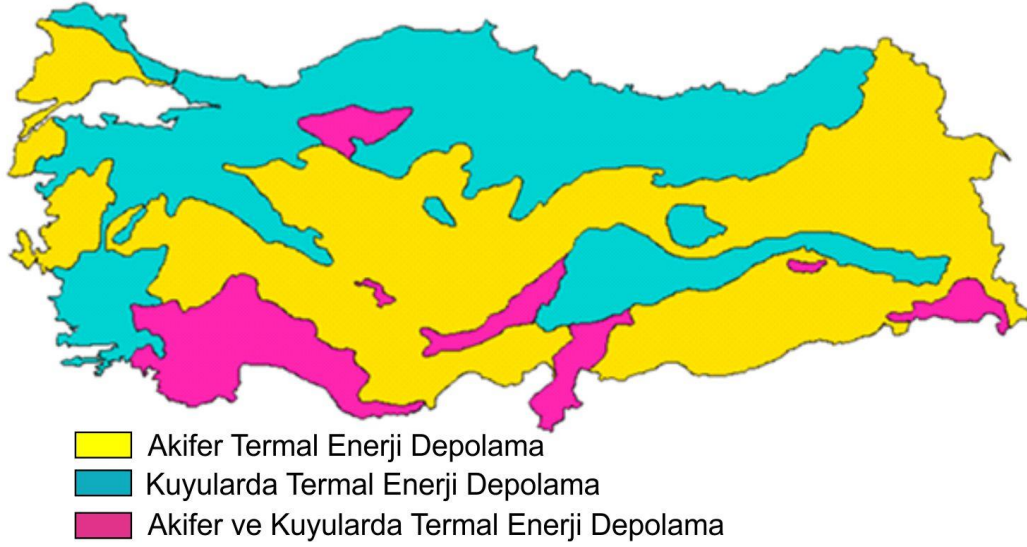
ATED sistemleri doğal yeraltısuyu sıcaklığının altında veya üstünde işletilebilmektedir. Sistem tasarımında sıcak ve soğuk depolama yapılan kuyuların birbirini termal olarak etkilememesi gereklidir. Bu nedenle akifere depolanacak enerji miktarı ile kuyuların birbiri ile olan mesafesinin seçiminde akiferin hidrojeolojik özellikleri önem taşımaktadır. ATED sistemleri yeraltından ısı çeken yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası sistemlerine göre daha verimlidir ve daha az enerji tüketimine sahiptir (Bonte vd., 2013).

Son yıllarda özellikle Avrupa'da ATED sistemine ilgi artmıştır. Örneğin, Hollanda'da 2000 yılında 200 olan (Segers vd. 2006) sistem sayısı 2012 yılında 2000'in üzerine çıkmıştır (Bonte vd. 2013). Türkiye'de ATED uygulamaları ile ilgili ilk çalışmalar 1990'lı yılların sonunda AR-GE uygulamaları kapsamında gerçekleştirilmiştir. Coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak hazırlanan haritada Türkiye'nin Yeraltında Isı Depolama potansiyel alanları oluşturulmuştur (Şekil 3).

Türkiye'deki uygulamalardan biri; tarımsal verimliliğin yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak artırılması konusunda Çukurova Üniversitesi-Sera ATED uygulamasıdır (Turgut, 2008). Bu çalışmada Akdeniz iklim koşullarında 360 m² lik iki seranın ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanmasında ATED yöntemi ile geleneksel yöntemler karşılaştırılmıştır. Söz konusu ATED sisteminde 90 metre derinlikte, debileri 1,3 ve 0,8 l/s olan iki adet yeraltı suyu kuyusu kullanılmıştır. Yaz boyunca sera içerisinde biriken ısı enerjisi akiferde aktararak yeraltı suyu sıcaklığı 18 °C den 34 °C ye çıkarılarak akiferde depolanmış, depolanan ısı, kış döneminde sera ısıtmasında kullanılmıştır. Kış döneminde ise sera içindeki havadan ve 10 °C nin altına düştüğünde dış ortam havasından

yararlanarak ısı değiştiriciler ile yeraltısuyu soğutulularak akiferde soğuk depolama yapılmıştır. Soğuk depolama yapılan kuyu yazın sera iklimlendirilmesinde kullanılmıştır. Sistem uygulamasında elde edilen sonuçlar ısıtmada 60% oranında enerji tasarrufu elde edildiğini ve geri ödemesinin bir yıldan az olduğunu göstermiştir (Turgut vd., 2008). Diğer önemli bir ATED çalışması Çukurova Üniversitesi Balcalı Hastanesinin ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla

hazırlanan fizibilite çalışmasıdır. Sistemin tasarımında soğuk enerji kaynağı Seyhan göl suyu, sıcak enerji kaynağı olarak güneş kollektörleri kullanılmıştır. Balcalı Hastanesinin bulunduğu alanda yer alan akifere 6 adet sıcak ve 6 adet soğuk yeraltısuyu kuyusunu kullanmak üzere tasarlanmıştır. Bu sistemle yılda 3250 MWh elektrik ve 1000 m³ fuel oil enerji tasarrufu sağlanabileceği hesaplanmıştır (Paksoy vd., 2000).



şekil 3 - Yeraltında Termal Enerji Depolama yöntemleri için potansiyel alanlar (Paksoy, 1999).

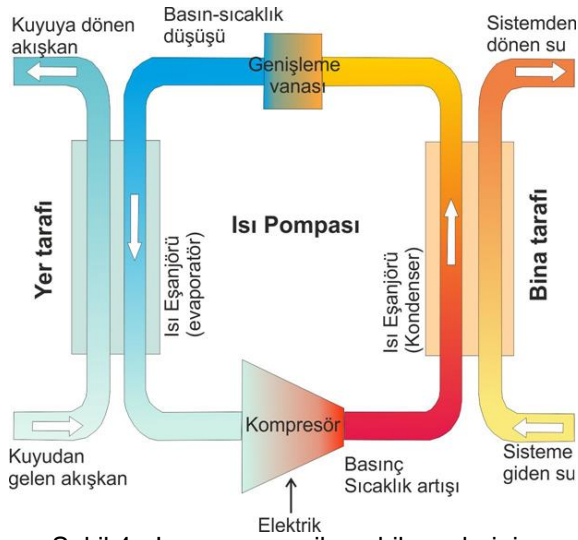
2.2 Yeraltısuyu Kaynaklı Isı Pompası Sistemi (YASKIP)

Isı pompası genel anlamda düşük sıcaklıktaki bir enerji kaynağından ısı enerjisini alarak içerisindeki ekipmanlar yardımıyla ısının daha yüksek sıcaklıkta kullanılabilir hale getirilmesini sağlayan bir cihazdır. Binalarda ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanması, havuz ısıtma, kullanma sıcak suyu, sebze meyve kurutma, kimyasal endüstri vb. gibi birçok alanda kullanılan ısı pompaları son zamanlarda bilgi işlem ve telekomünikasyon merkezleri ile nükleer tesislerde soğutma ihtiyacının karşılanması için de kullanılmaktadır. Uygulama alanlarına göre kapasiteleri 7 kW ile 44MW arasında değişmektedir. Isı pompası ile teknolojisindeki son gelişmeler kullanılarak su sıcaklığı 105 °C ye kadar yükseltilebilmektedir. Isı pompası ya elektrikle ya da gazla çalışmakta olup içerisinde çok düşük sıcaklıkta buharlaşan soğutucu gazlar bulunmaktadır. Isı pompası içerisindeki soğutucu akışkan basıncını ve sıcaklığını değiştiren parçalar (kompresör,

evaporatör, genişleme valfi, kondensör) yardımıyla sıcaklığı yükselterek veya düşürerek diğer bir ortama ileten cihazlardır (şekil 4). Isı pompasının çalışma prensibi Carnot çevrimine dayanmaktadır. Isı pompasında soğutucu akışkanın akım yönü değiştirilerek hem ısıtma ve hem de soğutma çevriminde kullanılmaktadır (ASHRAE Handbook, 2016).

YASKIP sistemlerinde enerji kaynağını akifer oluşturmaktadır. Kuyulardan biri çekim diğeri enjeksiyon amaçlı olmak üzere ihtiyaca göre iki kuyu ya da iki kuyu grubu uygulanmaktadır. Çekim kuyusundan yeraltısuyuyla çekilen akiferin ısı, ısı pompasının buharlaştırıcı (evaporatör) bölümüne aktarıldıktan sonra diğer enjeksiyon kuyusuna biraz daha soğuyarak gönderilmektedir. Yeraltısuyu doğrudan ısı pompasının içerisine girmemekte sadece ısıyı evaporatörden cihazın kendi içerisinde bulunan soğutucu akışkana aktarmakta ve bu işlem sonunda soğumaktadır (şekil 5). Yeraltısuyu sıcaklığı bulunulan jeolojik ve coğrafi konuma göre değişmektedir. Isıtma çevriminde akiferin

ısıyı yeraltısuyu tarafından ısı pompasındaki evaporatöre aktarıldıktan sonra sıcaklığı yaklaşık 3-4°C düşürerek soğutmakta, soğutma çevriminde ise su 3-4 °C civarında ısınarak enjeksiyon kuyusuna ya da alıcı ortama deşarj edilmektedir. Çekim ve enjeksiyon kuyuları arasında termal kısa devrenin oluşmaması ve kuyuları birbirini etkilememesi için uygun mesafede açılması gerekmektedir. Bu mesafenin bölgede yer alan jeolojik formasyonların hidrojeolojik özelliklerine göre tasarımının yapılması sistemin sürdürülebilirliği ve enerji verimliliği açısından önem taşımaktadır. Yeraltısuyu sıcaklığının yıl boyunca çok değişmemesi ve ani sıcaklık değişimleri gibi iklimsel değişiklikten etkilenmemesi en büyük avantajıdır.



Şekil 4 - Isı pompası cihazı bileşenlerinin şematik görünümü (Ashrae, 2016'dan değiştirilerek)

Yeraltısuyu ısısının ısı değiştiricisi ile ısı pompasına aktarılmasından sonra soğuyan ya da ısınan yeraltısuyu enjeksiyon kuyusu ile akiferin diğer bir bölümüne, göl veya akarsu gibi başka bir ortama verilebilmektedir. Yani bu sistemde ısıtma veya soğutmada kullanılan su uygun şartlarda tekrar yeraltına verilebildiği gibi, başka ortamlara da deşarj edilebilmektedir. Sistemde akiferden çekilen yeraltısuyu sadece ısı değiştiricileri ile temas ederek birbiri ile kimyasal olarak herhangi bir etkileşime uğramamaktadır. Yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası sistemlerinde donma etkisinin önlenmesi için yeraltısuyu sıcaklığının 4°C'nin altına düşmemesi önerilmektedir. Sadece ısıtma uygulamalarında ise yeraltısuyu

sıcaklığının 40 ve 50°C den daha fazla olmaması istenmektedir (Milenic vd. 2010).

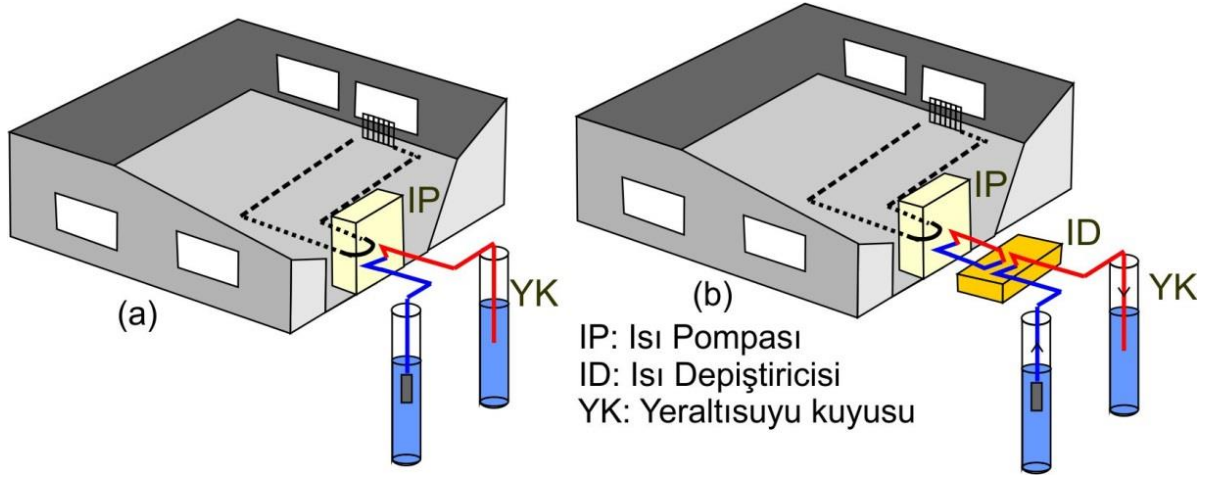
Kimyasal özelliklerinin uygun olması halinde yeraltısuyu doğrudan ısı pompasına da gönderilebilmektedir. Yeraltısuyu, pH seviyesine bağlı olarak korozif (aşındırıcı) ya da çökelime neden olmaktadır. Bu nedenle, doğrudan ısı pompasına gönderilmesi durumunda yeraltısuyunun kimyasal özelliklerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Su içerisinde yüksek Demir (Fe), Mangan (Mn) ve Karbonat (CO₃) iyonları konsantrasyonlarının hem evaporatör hem de boşalım kuyusunda çökelim oluşturma tehlikesi vardır. Eğer evaporatör içinde çökelim olursa ısı pompası çalışmaz duruma gelmektedir. Yeraltısuyu korozif özelliğe sahip ise nikel kaplı ısı değiştiricilerinin kullanılması önerilmektedir. Eğer su çok aşındırıcı ise bu durumda sisteme oksijen girişini engelleyecek şekilde basınçlı uygulama yapılması gereklidir.

Sistem tasarımında yeraltından alınacak debinin belirlenmesi gerekmektedir. Sistemin avantajı; yer kaynaklı ısı pompasına oranla daha düşük maliyetlidir ve enerji verimliliğinin yaklaşık %20 daha fazla olmasıdır. Hem ısıtma ve hem de soğutma için idealdir. Sadece soğutma amaçlı kullanıldığında ısı pompasının kullanılmasına gerek olmayabilir. Kapalı sistem yer kaynaklı ısı pompalarına göre dezavantajı ise su içeriğine bağlı olarak mangan ve demir iyonları çökelmeye veya korozyona neden olabilir. Yeraltısuyu kaynaklı ısı pompaları yeraltısuyunun doğrudan evaporatörden geçirilip geçirilmemesine bağlı olarak "yeraltısuyunun ısı pompasından ayrıldığı" (b) ve "yeraltısuyunun ısı pompasından ayrılmadığı" (a) iki farklı grupta uygulanmaktadır.

2.2.1 Yeraltısuyunun ısı pompası ile birlikte kullanıldığı sistem

Şekil 5a'da ısı pompasından ayrı olmayan yeraltısuyu sistemine ait şematik gösterim yer almaktadır. Bu ısı pompası sisteminde yeraltından alınan su doğrudan evaporatörün içinden geçirilmektedir. Bu maksimum enerji etkinliği sağlamaktadır. Ancak su debisinin yetersiz olması durumunda evaporatörün buzlanma riski vardır, ayrıca aşındırıcı suların evaporatörü korozyona uğratma riski mevcuttur. Bu tip ısı pompası uygulamalarında titanyum gibi korozyona dayanıklı malzemeden yapılmış ısı değiştiricisi kullanılması uygundur. Bunların dışında evaporatörden sızıntı olması durumunda soğutucu akışkanın yeraltısuyuna karışma riski olabilmektedir. Bu risklerin çoğu,

Şekil 5b'deki gibi, sistemde dolaşan yeraltısuyunun sistemden ayrı tutulması ile önlenmektedir.



Şekil 5 - Yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası sistemi: Yeraltısuyunun (a) ısı pompasından ayrı olmayan, (b) ısı pompasından ayrı olan

2.2.2 Yeraltısuyunun ısı pompasından ayrı olduğu sistem

Yeraltısuyu ile evaporatör arasında su-antifriz karışımı içeren kapalı bir döngü bulunmaktadır (Şekil 5b). Bu durum evaporatörü donma tehlikesinden ve su kimyasından kaynaklanabilecek risklere karşı korumaktadır. Ayrı sistemler için plakalı ısı değiştiricisinin kullanılması önerilmektedir. Bu ısı değiştiricisi tümüyle paslanmaz çelikten yapıldığı için suyun korozif olması durumunda da kullanılmaya elverişlidir. Bu tip ısı değiştiricisinin çıkarılıp temizlenmesi kolaydır. Çevre koruma açısından avantajlıdır. Dezavantajları ise, ek bir döngü içermesi nedeniyle evaporatöre giriş sıcaklığının düşmesi ve sirkülasyon pompası için ek bir enerji gerekmesidir. Bu nedenle bu tür ısı pompası sisteminde toplam işletim verimliliği diğerlerine göre düşüktür.

Avrupa ve Amerika'da özellikle 1990'lı yıllardan itibaren kullanımı yaygınlaşmaya başlayan yer kaynaklı ısı pompaları dünyada doğrudan kullanım jeotermal enerji kurulu kapasitesinin % 71'ini oluşturmaktadır ve toplamda tüm dünyadaki kurulu kapasitesi 49,898 MWt ve yıllık enerji kullanımı 325,028 TJ/yıl olmaktadır (Lund and Boyd, 2015). Ülkemizde son zamanlarda bu konudaki çalışmalar hızlanmış olmakla birlikte istenen seviyeye henüz gelinebilmiştir. Türkiye'de yer kaynaklı ısı pompası uygulamaları ilk olarak 1990'ların başlarında villa tipi uygulamalar ile başlamıştır.

Son yıllarda yaygın olarak alışveriş merkezleri, okul ve ofis binalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Çetin ve Paksoy, 2013).

Türkiye'de yer alan yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası uygulamaları, genellikle otel, ofis ve alışveriş merkezlerinde gözlenmektedir. Türkiye'deki ilk büyük uygulama Antalya Lara alışveriş merkezinde 17°C sıcaklıkta yeraltısuyu kullanmaktadır ve 2MW kurulu kapasiteye sahip olup, 50% oranında elektrik enerjisi tasarrufu sağlamıştır (Korun, 2005). Diğer büyük uygulamalardan biri olan Terracity alışveriş merkezinde 12 MW yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası sistem kapasitesi mevcut olup, yaklaşık 12000 m² alanın ısıtılması ve soğutulmasında kullanılmaktadır (Korun, 2012).

3 AKİFERİN TERMAL AMAÇLI KULLANIMINDAKİ EKİPMANLAR VE ÖZELLİKLERİ

Akiferin termal amaçlı olarak kullanımında genel olarak işletme kuyusu, ısı değiştiricileri ve ısı pompası kullanılmaktadır. Akiferden ısı çekme veya ısı depolama amaçlı açılan kuyular işletim amaçlı kuyulardır. Kuyulardan bir pompa yardımıyla çekilen yeraltısuyu Bölüm 2.2'de anlatıldığı şekilde yeraltısuyu kimyası uygun ise doğrudan ısı pompasına, eğer uygun değilse ısı değiştiricisine bağlanmaktadır. Yeraltısuyu ya ısı pompasının kendi içerisinde yer alan ısı değiştiricisinden, ya da ısı pompasına girmeden

kuyu ile ısı pompası arasındaki ayrı bir ısı değiştiricisinden geçirilmektedir. Isı değiştiricileri adından da anlaşıldığı gibi ısı iki farklı kanalda dolaşan ve birbirleriyle temas etmeyen farklı akışkanlar arasında transfer edilmekte olup yeraltısuyu herhangi bir arıtmadan geçirilmemekte sadece ısı değiştiricisinin kanalları arasında kapalı devre dolaşmakta ve tekrar akifer ortamına verilmektedir. Bu bölümde yeraltısuyunun temas ettiği ısı değiştiricilerin tipleri, özellikleri ve malzeme yapıları hakkında detaylı bilgi verilmektedir.

3.1 Isı değiştiricisi

Isı değiştiricileri sıcak akışkandan soğuk akışkana aradaki hareketsiz bir yüzey yardımıyla ısının aktarılması için üretilmiş ekipmanlardır. Sıcak ve soğuk akışkan arasında herhangi bir kütle alışverişi olmadan ısı aktarımı gerçekleştirilmektedir. Sıcak su, ısı değiştiricilerinin bir yüzeyinde dolaşırken diğer yüzeyinde soğuk su dolaşmaktadır.

3.1.1 Isı değiştiricisi tipleri

Isı değiştiricileri borulu ve plakalı olmak üzere iki grupta uygulanmaktadır. Jeotermal sahalardaki akışkanlar ısı değiştiricilerine zarar verebilecek değişik bileşimlerde kimyasallar içermektedir. Plakalı ısı değiştiricileri borulu tiplerine oranla korozyona dayanımlı titanyum, paslanmaz çelik vb. malzemeden yapıldığı için ısı pompaları ve jeotermal ısıtmada çok daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Rafferty, 1991). Isı pompalarında kullanılan plakalı ısı değiştiricileri DIN EN ISO 9001 standartlarını karşılamalıdır. Aşağıda ayrıntılı olarak özellikleri verilmektedir:

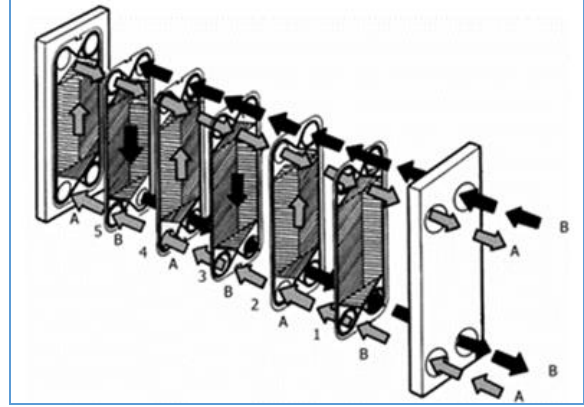
Plakalı ısı değiştiricileri

Oluklu plakaların birbiri ile basınçla sıkıştırılarak bir araya getirilmiş, karbon çelik çerçeveli ekipmanlardır. Genellikle 1 MPa basınçta ve 150°C sıcaklığa dayanımlı olarak üretilmişlerdir. Oluklu plakalar sıkıştırıldıktan sonra birbiri arasındaki boşluklar iki farklı akışkanın birbiri ile temas etmeden dolaşması için elverişli ortam oluşturmaktadır (Raju 2011). Genellikle plakalar üzerindeki akışkanlar birbirlerinin tersi yönünde akarlar (Şekil 6).

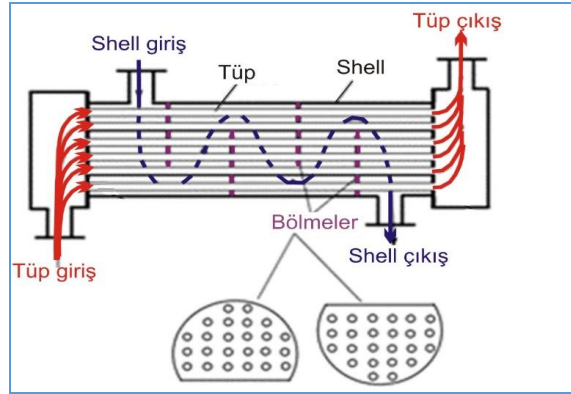
Borulu ısı değiştiricileri

Borulu ısı değiştiricileri en çok kullanılan ısı değiştiricilerdir. Genellikle buhar yoğunlaştırucuları ve kazanlar gibi ağır endüstride kullanılmakla birlikte konut sıcak su ve ısıtma sistemlerinde de kullanılmaktadır. Gövde, boru içine yerleştirilmiş paralel borulardan oluşan bu ısı değiştiricisinde akışkanlardan birisi boruların

içinden, diğer akışkan ise gövde tarafında borulara paralel veya çapraz olarak akar (Şekil 7). Gövde içerisinde dolaşan akışkanın yönünü değiştirmek için bölmeler kullanılmaktadır (Raju, 2011).



Şekil 6 - Plaka tipi ısı değiştiricileri (Raju, 2011)



Şekil 7 - Borulu değiştiriciler (Raju, 2011)

3.1.2 Isı değiştirici malzeme özellikleri

Yeraltısuyu ile beraber kullanılacak ısı değiştiricileri korozyon etkisine dayanımlı olması için genellikle Titanyum ve paslanmaz çeliktan üretilmektedir. Plakalı ısı değiştiricilerinde kullanılan malzeme çeşitleri olarak en çok 304,316 paslanmaz çelik malzemeler kullanılmakla birlikte, Tantalyum, Titanyum, Incaloy825, Monel ve Hastelloy malzemeleri de kullanılmaktadır (Raju 2011). Plaka tipi ısı değiştiricilerinde kullanılan contaların üretildiği malzemeler ise (Çizelge 1) 185 ile 200°C sıcaklığa dayanıklı olup yeraltısuyuna herhangi bir etkisi bulunmamaktadır (Raju, 2011).

Çizelge 1 - Plaka tipi ısı değiştiricilerinde kullanılan contaların üretildiği malzemeler (Raju, 2011).

Malzeme	Adı	Sıcaklık Üst Sınırları (°C)
Stiren-Bütadin	Buna-S	85
Neopren	Neoprene	121
Akrilonitril-Bütadin	Buna-N	135
Etilen/Propilen	EPDM	149
Florokarbon	Viton	149
Reçine kürü-Butil	Resin-Cuted Butyl	149
Sıkıştırılmış asbest	Compressed Asbestos	260

Plaka ve contaların dışında kullanılan diğer bağlantı malzemeleri ise karbon çelik ve paslanmaz çelik malzemelerden üretilmekte ve yeraltısuyu kuyularının teçhizi ve yeraltısuyunun kuyudan çekilmesini sağlayan pompalarda kullanılan malzemelere benzer olarak yeraltısuyuna kimyasal olarak herhangi bir etkisi bulunmamaktadır.

4 SİSTEMLERİN YERALTISUYU İLE ETKİLEŞİMİ

4.1 Yeraltısuyu Miktarına Olası Etkiler

4.1.1 Yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası (YASKIP) uygulamasında

Şekil 5'de gösterilen ve Bölüm 2.2'de ayrıntılı olarak anlatılan kapalı sistem içinde dolaştırılan yeraltısuyunun borular haricinde başka bir cisim ile teması söz konusu değildir. Sadece, yeraltından çekilen su, ısıtmada kullanıldığında bir miktar soğuyarak, soğutmada kullanıldığında ise bir miktar ısınarak akifere geri verilmektedir. Dolayısıyla miktar yönünden bir kayıp söz konusu değildir. Ancak, yeraltından pompajla çekilip termal enerji amaçlı kullanıldıktan sonra yeraltısuyu herhangi bir nedenle başka bir alıcı ortama veriliyorsa, yeraltısuyunun diğer içme-kullanma, sulama, sanayi vb. ihtiyaçlar için kullanımında olduğu gibi, yeraltısuyu sisteminden bir kayıp söz konusudur.

4.1.2. Akiferde termal enerji depolama (ATED) uygulamasında

Şekil 2'de gösterilen ve Bölüm 2.1'de açıklanan bu yöntemde çekilen yeraltısuyu her durumda tekrar sisteme geri verilmek zorunda olduğundan akifer rezervinde önemli bir değişim söz konusu değildir. Ancak, gerek ATED sisteminde dolaşım suyunun tekrar akifere geri verildiği yöntemde, gerekse YASKIP sisteminde akiferde bir miktar sıcaklık değişimi yaratılmaktadır. Ayrıca sistemden su çekerken

ve sisteme suyu geri verirken sistem dinamiğine yapay bir etki oluşturulmaktadır. Başka bir ifade ile akiferden su çekilirken etrafında bir düşüm konisi, akifere su enjekte edilirken yükselim konisi oluşturulmaktadır. Bu etkiler hangi amaçla kullanılırsa kullanılsın çekim kuyularında ve suni besleme kuyularında bilinen ve normal olan etkilerdir.

Akiferden çekilen yeraltısuyu sistemde sadece ısı değiştiricileri ile temas ettiğinden kimyasal değişime uğramamakta, ancak yeraltısuyunun sıcaklığının kimyasal etkiye neden olmayacak seviyede tutulması gerekmektedir.

ATED sistemlerinin dünyada birçok verimliliği yüksek ve ekonomik uygulaması bulunmaktadır. ATED yöntemi Çin tekstil fabrikalarında 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlanmış olup (Wu vd, 2000) halen Avrupa, kuzey Amerika, Japonya ve Çin de çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Hollanda'da 1980 yılından başlayarak yapılan 200'den fazla ATED projesinin %80 ninin konut sektöründe uygulandığı ve 2020 yılında enerji üretimine 500 milyon m³ doğalgaz karşılığı 15 PJ katkıda (Snijder vd., 1997) bulunacağı belirtilmektedir (Paksoy ve Turgut, 2012).

ATED yöntemi akiferde depolanan ısı enerjisinin bir sonraki sezona kadar (kış sezonundan yaz sezonuna, yaz sezonundan kış sezonuna) değişmemesi esasına dayandığından, sistem tasarımı akiferin hidrolik parametreleri göz önüne alınarak yapılır ve sezon boyunca ihtiyaç duyulan debinin azalmadan sağlanması önem taşımaktadır. ATED sisteminin ön-tasarımında belirlenmesi gereken özellikler şunlardır:

- bölgenin hidrojeolojik özellikleri
- akiferin kalınlığı, yayılımı ve beslenme koşulları,
- yeraltısuyunun kimyasal özellikleri,
- yeraltısuyu seviyesi,
- hidrolik iletkenlik ve iletimlilik,
- depolama katsayısı
- sınır koşulları (pozitif/negatif sınırlar)

ATED sistemi için açılan kuyular sistemin en hassas ve önemli bölümüdür. Bu kuyularda aranan özellikler başlıca kuyudan su çekme ve beslemenin minimum akış direnci ile gerçekteşmesi, sistemin, akiferin dışardan gelebilecek kirleticilerden etkilenmeyecek şekilde tasarlanması, korozyon ve tıkanma sorunları olmadan uzun süre kullanılabilmesidir (Paksoy ve Turgut, 2012). ATED sisteminin ısıtma ve soğutma ihtiyacının karşılanabilmesi için ATED sisteminde açılacak kuyuların yeterli debiyeye sahip olması istenir. Kuyuların inşası normal içme suyu kuyularına benzer

yöntemlerle yapılmakla beraber, bazı farklar bulunmaktadır. Öncelikle kuyular açılmadan önce yukarıda verilen özellikleri belirlemek üzere araştırma kuyuları açılmalıdır. ATED sistemi için açılacak her bir kuyuda yapılması gerekenler (Paksoy ve Turgut, 2012)'den faydalanılarak aşağıda verilmektedir.

Kuyu yeri tespiti: Açılacak kuyunun civardaki diğer binalara olan mesafesinin 7 m'den daha az olmaması, kuyu açılmadan önce yeraltında olabilecek iletim hatlarının (içmesuyu, doğalgaz, elektrik hattı vb.) belirlenmesi ve bunlara zarar verilmemesi, civarda bulunan kuyuların hangi amaçla kullanıldığının ve kapasitelerinin bilinmesi, açılacak ATED kuyu yerinin bu kuyuların etki alanının dışında seçilmesi,

Delme Yöntemi: Sistemin kurulacağı alandaki jeolojik yapıya göre sondaj yönteminin belirlenmesi

Jeofizik log: Sondaj esnasında kesilen tabakaların daha iyi tanımlanması ve ona uygun kuyu tasarımının yapılması için rezistivite, SP, gamma-ray logu alınması

Kuyu inşası: Filtre ve kapalı boruların yerleştirilmesi, çakılamanın ve gerekiyorsa tecrit işleminin yapılması

Kuyu geliştirme: Yıkama, basınçlı hava ile geliştirme yapılması

Pompaj testleri: Kuyuda en az 24 saat süreli sabit debili ve gerekirse kademeli pompaj deneylerinin yapılması

Kuyu başı ekipmanı: Sıcaklık ve su seviye sensörlerinin yerleştirildiği kuyu başı ekipmanının montajı

Enerji sistemine bağlantı: Araştırma kuyusundan elde edilen kapasite, sıcaklık ve ısıtma/soğutma ihtiyacı kullanılarak gerekli ısı değiştirici tasarımları, ATED sistemi ile bina enerji sistemi arasında ısı değiştiricisi bağlantısı, ısı enerjisi kaynakları ile ATED kuyuları arasında ısı değiştirici bağlantıları

4.2. Yeraltısuyu Kimyasına Olası Etkiler

Akiferden ısı enerjisi elde edilmesine yönelik kullanımlarda yeraltı enerji dengesinin korunması önem taşımaktadır. Dengeyi korumak için yerel iklim ve jeolojik koşullardan yararlanılır. Eğer akiferde sürekli bir ısı kullanım mevcut ise yeraltısuyunda bir sıcaklık

artışı veya azalışı olmaktadır. Bu sıcaklık değişimi yeraltısuyunun fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini dolaylı olarak etkilemektedir. Çoğu fiziksel özellikler sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir (viskozite veya yoğunluk). Yeraltısuyunda gelişen bazı kimyasal reaksiyonlar da sıcaklığa bağlıdır. Genellikle 10°C'lik bir artışta kimyasal reaksiyon hızları iki katına çıkmaktadır. Sıcaklık düşüşleri ise yeraltısuyunda çözünmüş gaz ve mineral dengesini değiştirmektedir (Bonte vd, 2013, Mileniç 2010). Hollanda'nın Eindhoven kenti yakınlarında içmesuyu temin edilen kuyulara 650 m mesafede 10 sıcak, 10 soğuk kuyudan oluşan ATED uygulaması modellenmiştir ve bizzat pilot olarak uygulanmıştır (Bonte vd. 2013). Üzerinde 25 m kalınlığında akıtarad olan 50 m kalınlığındaki kaba kum akiferinden yıl boyunca 2.6 hm³ su çekilerek (saatte 25 m³) sisteme geri verilmektedir. Akiferde sıcaklık 10.5-12°C'dir. Su kalitesi içme suyuna uygundur, ancak zemine yakın kısımlarda karayollarından kaynaklı tuzlanma, atmosferik kükürt ve gübrelemeden kaynaklanan azot türevleri (NO₃ gibi) ve Cl, SO₄ biraz yüksektir. Akiferde yatay yöndeki hidrolik iletkenlik (K_h) 30 m/gün, düşey yöndeki hidrolik iletkenlik (K_v) 15 m/gün, akiferin üzerindeki akıtaradda yatay eksendeki hidrolik iletkenlik (K_h) 0.05-20, m/gün, düşey yöndeki hidrolik iletkenlik (K_v) 0.01-10 m/gün, ve porozite 0.35'dir. Dispersiyon, difüzyon, adveksiyon ve başlangıç koşulları uygun olarak modele girilmiş ve model çalıştırılmıştır. Ayrıca, arazide uygulama izlenmiştir. Laboratuvar ve arazi verileri ATED uygulamasının yeraltısuyu sistemini birkaç yönden etkilediğini göstermiştir. Uygulama sonucunda arazideki gözlem kuyusunda ölçülen en düşük ve en sıcaklık 7°C ve 22°C'dir. Uygulama öncesinde en düşük ve en yüksek sıcaklık sırasıyla 10.5 °C ve 12 °C idi. Sistem çalışırken yeraltısuyu kalite ve sıcaklık değerleri dalgalı bir seyir izlemiştir. Bunun nedeni yeraltısuyu akım hızının yüksek oluşudur. Uygulanan sistem, farklı seviyelerden farklı kaliteye sahip suları çeken ve karıştırdıktan sonra tekrar akifere geri verecek şekilde çalışmaktadır. Dolayısıyla akifere enjekte edilen farklı kaliteli su yeraltısuyu kalitesini bir miktar etkilemektedir. Bu durum, farklı kimyasal özellikte yeraltısuyu içeren heterojen akiferlerde ortaya çıkmakta, kimyasal özelliği yatay ve düşey yönde homojen olan akiferlerde söz konusu olmayacağını göstermektedir. Pilot uygulamada 25 °C'ye kadar olan deşarj sıcaklıklarında, sıcaklığın yeraltısuyu kimyasına etkisinin ihmal edilir

düzeyde olduğu görülmüştür. Ancak arsenik konsantrasyonunun yüksek olduğu akiferlerde bu duruma dikkat etmek gerekmektedir.

Simülasyon verilerine göre yüksek sıcaklıkta işleyen sistemlerde (örneğin deşarj sıcaklığı 60°C), yeraltısuyu kalitesi sıcaklık değişiminden etkilenmektedir. Çözünmüş oksijen, As, K ve Si konsantrasyonunun yükselmesi belirgin olmuştur. Bu hususların özellikle içmesuyu temin edilen akiferlerde uygulama yapılırken veya yapılıp yapılmayacağına karar verilirken göz önüne alınması önemlidir.

4.3. Yeraltısuyunun YASKIP veya ATED Sistemine Etkileri

Yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası sistemleri ve akiferde ısı depolama sistemlerinin tasarımında

yeraltısuyunun kalitesi önemli bir faktördür. Yüksek oranda korozyon/çökeltim neden olabilecek yeraltısuyu ve oksijenin sistem üzerindeki etkisinin yeterince bilinmemesi açık sistemlerde kimyasal çökeltim, biyofilm oluşumu ve korozyona neden olmakta ve sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Genel olarak sistem tasarım aşamasında su kimyasına yönelik parametrelerin (Çizelge 2) araştırılması önem taşımaktadır. Uluslararası uygulamalarda tavsiye edilen bazı sınır değerler Çizelge 3'te yer almaktadır. Söz konusu parametrelerin sahanın özelliklerine ve sistem kapasitesine göre uzman bir hidrojeoloji mühendisi tarafından değerlendirme yapılması ve makina mühendisi ile birlikte sistem tasarımının yapılması gerekmektedir.

Çizelge 2 - Yeraltısuyu Kaynaklı Isı Pompası ve Akiferde Termal Enerji Depolama sistemleri için göz önüne alınması gereken yeraltısuyu kimyası parametreleri (NGWA, 2015).

Yeraltısuyu Kimyası Parametreleri	
Sahada ölçülen parametreler	pH, sıcaklık, çözünmüş oksijen, elektriksel iletkenlik, redox potansiyeli
İnorganik parametreler	Toplam çözünmüş katı, toplam askıda madde,
Organik parametreler	Toplam organik karbon
Önemli anyonlar	Klor, bikarbonat, karbonat, sülfat, sülfid, nitrit, nitrat
Önemli katyonlar	Kalsiyum, Magnezyum, Sodyum
Çözünmüş metaller	Demir, Mangan
Redoks potansiyeli	Redox potansiyeli, beklenen en düşük ve en yüksek işletim sıcaklığında Langelier indeksi
Su mikrobiyolojisi	
Koloni sayısı (koloni/ml)	
Demir ve kükürtü yükseltgeyen sülfatı indirgeyen bakteriler	
Toplam koliform	
Adenozin trifosfat tanımlaması ile bakteri sayımı (hücre/ml)	
Anaerobik büyüme (toplam bakteri sayısının yüzdesi olarak)	

5 ATED VE YASKIP UYGULAMASINDA ULUSLARARASI YASAL DURUM

Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanan teknolojilerden olan Akiferde Termal Enerji Depolama ve Yeraltısuyu Kaynaklı Isı Pompası sistemleri ile ilgili uluslararası birçok yasal düzenlemede yeraltısuyunun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin korunması amacıyla sistemlerin inşasından kullanılmasına kadar olan aşamalarda dikkat edilmesi gereken hususlar ele alınmaktadır. Bu hususlar genellikle yeraltısuyu kuyularının tekniğine göre inşa edilmesi, aynı sistemde veya ayrı mülkiyette olan sistemlerin birbirini etkilememesi için gerekli mesafeler ve sıcaklık eşiklerinin belirlenmesidir. Şu ana kadar bazı araştırmacılar ve uygulamacılarca çevresel, sürdürülebilir, tekno-ekonomik açılardan bazı öneriler yapılmış olmakla birlikte, bu konuda

yapılan düzenlemeler ülkelere göre değişiklik göstermektedir.

2000'li yıllarda yayınlanan Avrupa Su Çerçeve direktifinde yeraltısuyunun sıcaklığının artırılması bir kirlilik olarak tanımlanmakla birlikte, soğutulması konusuna değinilmemiştir. Buna ek olarak Avrupa Yeraltısuyu Direktifi, yeraltısuyundaki kirlenmenin önlenmesi için yapılması gereken izleme ve ölçüm çalışmalarına yer vermektedir.

Bazı ülkelerin yasal düzenlemelerinde bu çerçeveye tam uyan veya kısmen farklı hususlar yer almaktadır. Örneğin Almanya'da fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerin bozulmasından kaçınılması gerektiği belirtilmiştir (WHG, 2002). Yine İsviçre'de suyun biyolojik özelliklerinin doğal halde kalması gerektiği vurgulanmıştır (Danielopol vd., 2009).

Çizelge 3 - Su kimyası özellikleri ve olası etkileri (NGWA , 2015)

Yeraltısuyu karakteristیکleri/bileşenleri	Sınır değeri	Sisteme etkisi
pH	<7 >8	Korozyon
Toplam çözünmüş katı	>1000 mg/l	Mineral çökeli mi
Toplam askıdaki katı	>100 mg/l	Elektrolitik korozyon ve mineral çökeli mi
Klor	>250 mg/l	Aşındırma ve sistemdeki akışın sınırlanması
Sülfat	>175 mg/l	Karbon ve paslanmaz çeliğin korozyonunu hızlandırır.
Kalsiyum	>100 mg/l	Vanalarda, ısı değıştiricilerde ve borularda potansiyel mineral çökeli m
Oksijen	>4 mg/l	Genellikle 180 mg/l üzerinde çökeli m olmaktadır, ancak ısınan yüzeylerde bu değeri yaklaşık 120 mg/l dir.
Toplam organik karbon	>1 mg/l	Bakteri büyümesi ve metal çökeli mi
Demir (toplam)	>1 mg/l	Bakteri oluşumu
Demir+Mangan	>1 mg/l	Bakteri oluşumu, potansiyel çökeli m ve vanaların, ısı değıştiricilerin, filtrelerin ve boruların tıkanması
Mangan	>0,1 mg/l	Metal çökeli mi, mikrobiyolojik aktivite
Redoks potansiyel	>+150 mv	Aktif korozyon veya bakteri artışı (özellikle >+150 mv
Redoks potansiyelindeki değışim	>25%	Mineral çökeli mi
Langelier doygunluk indeksi (LSI)	>0,2 <-0.2	Korozyon

Genel olarak mevcut yasal düzenlemeler; yeraltının ve yeraltısuyunun izin verilebilir mevsimsel sıcaklığının tanımlanması, minimum ve maksimum yer ve yeraltısuyu sıcaklığının belirlenmesi, ısıl kullanımdan dolayı mülkiyet sınırları dışına olabilecek etkilerin önlenmesi, yeraltısuyunun kirlenmesinin izlenmesi, yeraltısuyu kaynaklarının ısıl özelliklerinin izlenmesi konularını içermektedir. Sıcaklık artışı suyun viskozitesini ve dolayısıyla akış özelliklerini değıştirmektedir. Bu nedenle yasal düzenlemelerde a) minimum izin verilebilir sıcaklık, b) maksimum izin verilebilen sıcaklık c) bozulmamış yer sıcaklığına göre izin verilen sıcaklık farklılığı gibi sıcaklık eşığı kriterleri göz önüne alınmakla birlikte bölgeye ve teknik kısıtlamalara göre değerlendirilmesi gerekmektedir.

YASKIP ve ATED sistemlerinde yeraltısuyunun sıcaklık farklılığı genellikle 0-10°C arasındadır. Yeraltısuyu kullanım sıcaklık sınırları ülkelere göre değışmektedir (Haehnlein vd. 2010, Bonte 2013). Örneğin Hollanda'da ATED sistemi, doğal yeraltısuyu sıcaklığına göre eksi ya da artı yönde 11°C (+-1°C) uygulanmaktadır. Ancak yeraltısuyu sıcaklığının 25°C'nin üzerine çıkarılmasına izin verilmemektedir. Alt sınır içinse bir kısıtlama yoktur. Üst sıcaklık sınırı İngiltere ve Danimarka'da da 25 °C, Almanya ve Avusturya'da 20°C'dir. Bazı ülkelerde alt sınır yoktur, bazılarında ise 5°C'dir (Çizelge 5). Akifere maksimum enjeksiyon sıcaklığı üst sınırı 25-30°C arasındadır. Ancak son yıllarda üst sıcaklık sınırının 40-80°C ye yükseltilmesi konusunda çalışmalar artmaktadır (Bonte vd. 2008).

Çizelge 5 - Bazı ülkelerde yeraltısuyu ısıl kullanım sıcaklık sınırlamaları (Haehnlein vd. 2010)

Ülke	Sıcaklık değışimi (°C)	Maks. sıcaklık (°C)	Min. sıcaklık (°C)
Almanya	6	20	5
Avusturya	6	20	5
Danimarka	-	25	2
Fransa	11	-	-
Hollanda	-	25	5
İngiltere	10	25	-
İsviçre	3	-	-
Lihtensteyn	-3/+1,5	-	-

6 TÜRKİYE'DEKİ MEVZUAT

ATED ve YASKIP uygulamasında söz konusu olan su, ülkemizde 167 sayılı Yeraltı suları Hakkındaki Kanun kapsamındaki yeraltı sularıdır. Bu kapsamdaki yeraltı sularının araştırılması, işletilmesi, tahsis ve yönetimi bu kanuna bağlı olarak uygulamaya konan Yeraltı suları Tüzüğü ve DSİ Yeraltı suları Teknik Yönetmeliği (mevzuat 1) hükümlerine göre Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yapılmaktadır. Yeraltı sularının kalite yönüyle korunması ise Yeraltı sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Yönetmeliği hükümlerine göre yürütülmektedir. Genel çerçevenin belirlenmesi, eşik değerler, izleme ve sonuçların değerlendirilmesinde DSİ ile birlikte Su Yönetimi Genel Müdürlüğü yetkilidir. YASKIP ve ATED yöntemlerinde üç tür uygulama söz konusudur. Birincisi; kuyulardan çekilen yeraltı suyunun sistemden geçtikten sonra soğuyarak veya ısınarak tekrar akifere enjeksiyonu, ikincisi; aynı amaçla kullanılan suyun akifere verilmeyip başka alıcı ortamlara deşarjı, üçüncüsü de ATED yöntemindeki kışın bir önceki yaz sezonunda akiferde depolanan sıcaklığı ısıtmada, yazın ise bir önceki kış sezonunda akiferde depolanan soğukluğu kuyularla çekerek soğutmada kullanımı şeklindedir. Yani başka kaynaktan alınan (ısınmış veya soğumuş hava, kar-buz, ısınmış proses suları vb) ısının mevsimsel depolama yöntemi olan ATED'de yaz dönemi boyunca yeryüzündeki ortam sıcaklığı sıcak kuyu grubuna aktarılmakta, izleyen kış döneminde sıcak kuyudan çekilen suyun ısı enerjisi ısıtmada kullanılmaktadır.

Alıcı ortamlardan deniz, göl veya akarsu gibi yerüstü su kütlelerine deşarj şartları 31.12.2004 tarihli Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (mevzuat 2) hükümlerine göre, içmesuyu havzalarının korunması hususları ise 28.10.2017 tarih, 30224 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan İçme-Kullanma Suyu Havzalarının Korunmasına Dair Yönetmelik (mevzuat 3) hükümlerine göre yürütülmektedir. Buna göre, akarsu, göl, deniz gibi açık su kütlelerine atıksu deşarjında belirli eşik değerler bulunmaktadır. Ancak, içmesuyu havzalarında mevzuat-3'ün "tabii göl, baraj gölü ve göletler için genel koruma esasları" başlığı altındaki 8. Maddede "İçme-kullanma suyu temin edilen veya edilmesi planlanan tabii göl, baraj gölü ve göletlere atılrsa dahi atıksuların doğrudan deşarjına izin verilmez" hükmü yer almaktadır. 07.04.2012 tarih, 28257 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Yeraltı sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Yönetmeliğinde

(mevzuat 4) yeraltı suyunun deşarjı "Kirleticilerin insan faaliyetleri sonucu doğrudan veya dolaylı olarak yeraltı suyunun boşaltılması", yeraltı suyunun doğrudan deşarjı ise "kirleticilerin zemin veya zemin altından süzülmesizin doğrudan yeraltı suyunun boşaltılması" şeklinde tanımlanmıştır. Yönetmeliğin 5. Maddesinde yeraltı sularına kalitesi her ne olursa olsun atık suların doğrudan deşarjı yasaklanmıştır. Maddenin devamında "içmesuyu temini maksadıyla kullanılan ve/veya kullanımı planlanan YAS kütlelerinin koruma alanlarına, artırılmış olsun ya da olmasın atık suların doğrudan ve/veya dolaylı deşarjı yasaktır. Risk altında olduğu belirlenen veya risk altında olma ihtimali bulunan YAS kütlelerinde yapılan izlemeler sonucunda Ek-2'de (yönetmeliğin ekinde) yer alan YAS kalite standartlarının ve o kütle için belirlenmiş olan parametrelere ait eşik değerlerin aşılması durumunda artırılmış dahi olsa atık suların bu su kütlelerine doğrudan ve/veya dolaylı deşarjı yasaktır. Bunun dışında kalan durumlarda artırılmış atık suların YAS kütlelerine dolaylı olarak deşarjına yeraltı suyunun kullanma maksadı, kalitesi ve verilecek olan artırılmış suların yeraltı suyunun karışması halinde yeraltı suyunun taşıma kapasitesi dikkate alınarak yapılacak olan mühendislik çalışmaları sonucunda 29.04.2009 tarih ve 27214 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Çevre Kanununa Alınması Gereken İzin ve Lisanslar Hakkında Yönetmelik hükümleri gereğince Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından izin verilir" hükmü bulunmaktadır.

Yukarıda değinilen mevzuat çerçevesinde YASKIP ve ATED uygulamasını doğrudan veya dolaylı olarak ilgilendiren aşağıdaki yasak ve sınırlamalar söz konusudur.

1-Isıtma ve soğutmada kullanılan yeraltı suyu mevzuat-1 hükümlerine göre "faydalı ihtiyaç" kapsamında olup, (167 sayılı Yeraltı suları Hakkındaki Kanunda içme-kullanma, sulama, sanayi vb. gibi ihtiyaçlar "faydalı ihtiyaç" olarak tanımlanmıştır) yeraltı suyunun kuyularla çekilmesi ve kullanılmasında yasaklayıcı bir hüküm bulunmamaktadır. Bu nedenle konunun Yeraltı suları Kanununun 9, 10 ve 11. Madde hükümleri çerçevesinde değerlendirilmesi söz konusudur.

2-Isıtma ve soğutmada kullanılan yeraltı suyunun içme-kullanma suyu temin edilen veya edilmesi planlanan tabii göl, baraj gölü ve göletlere atılrsa dahi deşarjı mevzuat-3'e göre yasaktır. Bunun haricindeki açık su kütlelerine veya onları besleyen havzalara

deşarj şartları (arıtma vb) yerine getirildiğinde izin verilebilmektedir (mevzuat 2).

3-Yeraltı sularına kalitesi her ne olursa olsun atık suların doğrudan deşarjı yasaktır (mevzuat 4).

4-Isıtma ve soğutmada kullanılan yeraltısuyunun içmesuyu temini maksadıyla kullanılan ve/veya kullanımı planlanan yeraltısuyu kütlelerinin koruma alanlarına, arıtılmış olsun ya da olmasın atık suların doğrudan ve/veya dolaylı deşarjı yasaktır (mevzuat 4).

5-İçmesuyu amacıyla kullanılmayan akiferlerde, arıtılmış atık suların yeraltısuyu kütlelerine dolaylı olarak deşarjına, yeraltı suyunun kullanım maksadı, kalitesi ve verilecek olan arıtılmış suların yeraltı suyuna karışması halinde yeraltısuyunun taşıma kapasitesi de dikkate alınarak yapılacak olan mühendislik çalışmaları sonucunda izin verilebilir (mevzuat 4).

7 SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Sığ jeotermal sistemlerden olan ATED ve YASKIP uygulaması, bina ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarından kesintisiz yararlanma sağlayan önemli seçeneklerden biridir. Her iki sistemde de kullanılan ekipmanlar yeraltısuyu ile kimyasal bir etkileşime girmemekle birlikte yeraltısuyu sıcaklığını değiştirerek dolaylı olarak kimyasal özellikleri değiştirebilmektedir. Sistem seçiminde Türkiye'nin farklı iklim bölgelerindeki soğutma ve ısıtma yüklerinin göz önüne alınması gerekmektedir. Ancak son yıllarda iklim değişikliği nedeniyle yazları birçok bölgede soğutma yüklerinde artışlar gözlenmektedir. Artan soğutma ihtiyaçlarının karşılanmasında akiferde termal enerji depolama ve yeraltısuyu kaynaklı ısı pompası sistemlerinin kullanılması giderek önem kazanmaktadır. Özellikle yerli ve yerel yenilenebilir enerji kaynaklarımızın kullanılması açısından konutlardaki ısıtma ve soğutma yüklerinin karşılanması ülkemiz açısından önemlidir. Bu kapsamda şehirlerin kurulu olduğu bölgelerdeki yeraltısuyunun termal amaçlı olarak kullanılması ile enerji talebinin karşılanmasına ciddi katkılar yapılabileceği düşünülmektedir.

Mevzuat-4, yeraltısularına kirleticilerin doğrudan veya dolaylı deşarjı hususlarını hükme bağlamıştır. Mevzuata göre yeraltısuyuna doğrudan deşarj yasaklanmıştır. Dolaylı deşarja (zemine, toprağa veya vadoz zona) ise belirli şartlarda izin verilmektedir. Mevzuatta "yeraltısuyu" ile "kirleticisi" etkileşimi

konu edinmiştir. Başka bir ifadeyle, kullanıldıktan sonra atılan su "kirlenmiş" kabul edilmektedir. Oysa ki termal amaçlı kullanıldıktan sonra akifere deşarj edilen su "kirlenmiş su" olarak tanımlanamaz; çünkü kapalı olan sistemden dönen su sadece bir miktar ısınmak veya soğumakla, dolaylı olarak kimyasal değişikliğe uğramış olabilir. Dolayısıyla, konunun öncelikle yeraltısuyu kütlesi veya vadoz zon sıcaklığının artırılıp, azaltılması çerçevesinde değerlendirilip, mevzuatta buna göre yer verilmesi gerekir. Soğutma amacıyla sistemde dolaşırken ısınan su yeraltına kuyularla verilirken bakteri üremesi vb. nedenlerle filtrelerde tıkanma olmakta, ayrıca doymuş veya vadoz zonda ılık su bazı kimyasal dönüşümlere-reaksiyonlara neden olabilmektedir. Ancak kentsel alanlarda, yoğun yerleşimlerde ve sanayi bölgelerinde bundan daha fazlası kendiliğinden gerçekleşmektedir. Mutfak suları, sanayiden dönen sıcak-ılık sular, hamamlar, oteller, saunalar, termal tesislerin atıkları ister istemez şebeke kaçakları nedeniyle yeraltısuyuna karışarak doğal sıcaklığını değiştirmektedir. Ayrıca atmosfer ve yer yüzeyindeki kentsel faaliyetlerden kaynaklanan katı, sıvı ve gaz atıklar yeraltı sularını kirlenmektedir. Başkent Ankara, Eskişehir, İzmir, İstanbul, Adana kenti altındaki yeraltı sularının durumu bunlara en iyi örneklerdir. Akiferin ATED ve YASKIP uygulamasıyla etkileşimi diğer etkenlere göre çok daha az, kabul edilebilir ve kontrol edilebilir düzeydedir. Dolayısıyla, yeraltısuyu kalitesinin bozulduğu kentsel ve sanayi bölgeleri ile yeraltısuyu kalitesinin jeolojik kaynaklı kirlilik nedeniyle doğal olarak içme-kullanmaya uygun olmadığı bölgeler başta olmak üzere gerek YASKIP gerekse ATED yönteminin uygulanması mümkün görülmektedir. Bu nedenle mevzuat-4'ün kısıtlayıcı hükümlerinin doğrudan uygulanması yerine, yeraltısuyunda sıcaklık değişiminin yeraltısuyunun kimyasını olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde mevzuata eklenerek belirli sınırlar içinde kalmak şartıyla yöntemin uygulanmasına izin verilmesi gerekir. Bunun için Avrupa'daki uygulamalardan faydalanılabilir. Mevzuatta belirlenecek sıcaklık sınırları dahilinde YASKIP ve ATED uygulamasına kentsel alanlarda içme-kullanmaya uygun olmayan akiferlerde, jipsli-tuzlu bölgelerde suların içme-kullanmaya, hatta sulamaya uygun olmadığı durumlarda rahatlıkla izin verilebilir. Suların arıtılarak içme-kullanmaya uygun hale getirilebileceği akiferlerde koşullu izin, doğal haliyle içmesuyu kalitesinde yeraltısuyu taşıyan akiferlerde

deşarjda sıcaklık değişimine kısıtlı izin verilmeli (sıcaklık değişimi sınırlı tutulmalı) ancak içme suyu kaynakları veya kuyularının koruma alanları bunun dışında tutulmalıdır. Ancak özellikle içmesuyu kalitesindeki yeraltısuyu kütleleri başta olmak üzere, sistemin uygulandığı her yerde izleme ve denetim son derece önemlidir.

8 KAYNAKLAR

- [1] ASHRAE, Handbook, HVAC Systems and Equipment. Description of the 2016 ASHRAE, 2016
- [2] Bonte M, Breukelen BMV, Stuyfzand PJ, "Environmental impacts of aquifer thermal energy storage investigated by field and laboratory experiments", *Journal of Water and Climate Change*, 04.2, 77-89, 2013
- [3] Bonte M, Van Den Berg G, Wezel AM, "Underground thermal energy storage in relation to groundwater protection", *Bodem* 2008, 22-26 (Flemenkçe), 2008
- [4] Çetin, A., Paksoy, H., "Shallow Geothermal Applications in Turkey", *European Geothermal Energy Conference (EGEC)*, Pisa, Italy, 2013
- [5] Danielopol, DL., Riebler, C., Gunatilaka, A., Notenboom, J., "Present State and future prospects for groundwater ecosystem", *Freshwater Biology*, 54, 649-77, 2009
- [6] Haehnlein, S., Peter Bayer, Philipp Blum, "International Legal Status of the use of shallow geothermal energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (14), pages 2611-2625, 2010
- [7] Lund W. J, and Boyd, T.L., "Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review", *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia*, 19-25 April 2015
- [8] Korun T., "Case Study of a Villa for Cooling and Heating by GSHP in Zekeriyaköy – İstanbul, NATO Summer School on Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Storage", June 2005, Cesme, Izmir, 2005
- [9] Korun, T., "Terracity Shopping Center: Commercial Heat Pump Applications in Turkey", *European Heat Pump Newsletter*, No:4, December 2012
- [10] Milenic D, Vasiljevic P, Vranjes A, "Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump system for building heating/cooling purposes", *Energy and Building*, pages 649-657, 42, 2010
- [11] NGWA (Natural Groundwater Association), "Understanding Hydrogeology and Its Impact on Large Scale Geothermal Heat Pump Systems", National Ground Water Association, NGWA press, 2015
- [12] Paksoy, H.O., "Underground thermal energy storage potential in Turkey", *IEA ECES Annex 8 report*, 1999
- [13] Paksoy, H.O., Andersson, O., Abaci, S., Evliya, H. and Turgut, B., "Heating and cooling of a hospital using solar energy coupled with seasonal thermal energy storage in aquifer", *Renewable Energy*, 19 117-122, 2000
- [14] Paksoy, H.O. ve Turgut, B., "Akifer Termal Enerji Depolama ile Binalarda Sürdürülebilir Enerji Kullanımı", *Türk Tesisat Mühendisleri Dergisi*, 2012
- [15] Rafferty, K.D., *Heat exchangers*, Chapter 11, *Geo Heat Center*, 1991
- [16] Raju, K.S.N., "Fluids Mechanics, Heat Transfer, and Mass Transfer", *Chemical Engineering Practice*, AIChE, Wiley, 2011
- [17] SenGesUmV-2010, *Arbeitsgruppe Geologie und Grundwasser management*, 2010
- [18] Segers R, Melis F, Wilmer M., *Aquifer thermal energy storage: Reliability figures and provincial data*, Central Bureau of Statistics, Voorburg/Heerlen, 3 pp (Flemenkçe), 2006
- [19] Snidjers, A.L., Bakema, G., "The Successful Introduction of Aquifer Cold Storage in the Netherlands", *Proceedings of MEGASTOCK'97, 7TH International Conference on Thermal Energy Storage*, Sapporo, Japan, (2): 919-924, 1997
- [20] Turgut B., Paksoy H., Bozdog S., Evliya H., Abak K., Dasgan H.Y., "Aquifer Thermal Energy Storage Application in Greenhouse Climatization", *World Renewable Energy Congress*, July 19-25, 2008
- [21] Turgut, B., 2008, *Akdeniz İkliminde Akiferde Termal Enerji Depolaması ile*

Seralarda Isıtma-Soğutma Potansiyelinin
Belirlenmesi, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enst.
Doktora Tezi, 90s, Adana

[22] WHG, Detcher Bundestag,
Wasserhaushaltsgesetz.s, 2002

[23] Wu X., Ma J., Bink, B., Aquifer
Thermal Energy Storage Technique in
China and Future Development",
Terrastock 2000 Congress. Stuttgart
Germany VI pp 69-73, 2000