

VADİ ALÜVYONLARINDA İNŞA EDİLECEK YERALTI BARAJLARINDA SU ALMA VE İŞLETME SEÇENEKLERİNİN BİR ANALİZİ

Ahmet APAYDIN
Giresun Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 28200 Giresun
ahmet.apaydin@giresun.edu.tr

(Makalenin geliş tarihi: 15.04.2019, Makalenin kabul tarihi: 08.07.2019)

ÖZ

Türkiye'nin özellikle yarı-kurak bölgelerinde, yeraltısuyu yapay besleme teknikleri ile potansiyeli artırma ve daha güvenli su elde etmeye yönelik projelerin geliştirilmesi düşünülebilir. Bunlardan biri de yeraltı barajlarıdır. Türkiye'nin birçok bölgesinde ana vadilerin yan kolları boyunca uzanan alüvyon çökellerin daraldığı kesitler yeraltı barajı inşası için uygun ortamlar olabilmektedir. Yeraltı barajları, yerüstü barajlarına göre gövde hacmi daha küçük, sanat yapıları yönünden daha sade ve bu nedenle inşaat maliyeti daha düşüktür. Rezervuarı, gövdesi ve su alma yapısı tamamen yerin altında olan yeraltı barajlarının yapımı için öncelikle jeolojik-hidrojeolojik koşulların uygun olması istenir. Yeraltı barajlarında su alma noktasının derinliğine göre gövde tipi ve suyun cazibeyle yeryüzüne çıkış noktasına göre farklı seçenekler bulunmaktadır. Cazibeli işletmede su alma noktası gövde tabanına ne kadar yakın olursa depolamadan azami derecede faydalanılacak ve hidrolik eğimin yükselmesi nedeniyle debi artacaktır. Ancak bu durumda suyun cazibeyle yeryüzüne çıkarılması için uzun bir mesafe kazı yapılarak iletim hattı döşenmesi gerekmektedir. Su alma noktası tabandan yeryüzüne yaklaştıkça iletim hattı mesafesi ve bunun için yapılacak miktarı azalmakta, ancak debi ve aktif rezervuar hacmi düşmektedir. Su alma noktası yeryüzüne kadar çıkarıldığında, sistem bir dolusavak gibi çalışmakta ve bu durumda derin ve hacimli iletim hattı kazısına gerek kalmamaktadır. Ancak bu durumda debi azalmakta ve kret kotu altındaki rezervuar ölü hacim olarak kalmaktadır. Yerüstü barajlarında olduğu gibi, en uygun lokasyonun belirlendikten sonra doğal malzeme imkanları, akiferin geometrisi ve yeraltısuyu dinamiği, topoğrafya, çevresel koşullar, maliyet gibi temel unsurların karşılaştırmalı analizi yapılarak en uygun tasarım ve işletme şekli belirlenir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı barajı, depolama, gövde tipi, su alma yapısı, fizibilite

AN ANALYSIS OF WATER INTAKE AND OPERATION ALTERNATIVES FOR GROUNDWATER DAMS TO BE CONSTRUCTED IN THE VALLEY ALLUVIUMS

ABSTRACT

Particularly in semi-arid regions of Turkey, development of the projects for water supply by using artificial recharge techniques for groundwater that increased the potential, can be applied. One of them is subsurface dams. Narrow sections of the alluvial valleys in the secondary stream valleys are suitable for subsurface dams. Subsurface dams are smaller and simple, so cheaper compared to surface dams. For the construction of groundwater dams, that the reservoir, dam body and water intake structure is completely underground (subsurface dam), it is desirable that geological-hydrogeological conditions are suitable. There are various alternatives depending on the depth of the water intake for the subsurface dams according to the dam type and the location of the water that risen to the ground surface. If the water intake is located close to the bottom of the dam body the maximum utilization will be achieved and the yield will increase due to the increase of hydraulic gradient. However, in order to attract water to the ground by gravity, a long transmission line should be constructed. As the water intake facility approaches the ground from the bottom, the transmission line and the excavation amount decrease. But the yield and active reservoir decreases. When the water intake facility reaches the ground surface, the system works like a spillway and no considerable excavation is required. However, in this case the yield

decreases and the reservoir under the intake elevation remains as dead volume. As it is in the surface dams, after determining the most suitable location, natural material facilities, aquifer geometry and groundwater dynamics, topography, environmental conditions, cost analysis are done by making a comparative analysis, and the most suitable design and operation model are determined.

Key Words: Subsurface dam, storage, dam type, water intake facility, feasibility

1 GİRİŞ

Yeraltı barajı; gözenekli ve geçirimli jeolojik formasyonlar içinde geçirimsiz bir perde inşa edilerek yeraltısuyunun depolandığı ve suyun çeşitli yöntemlerle alınıp kullanıma sunulduğu mühendislik yapısıdır [Nilsson 1988; Apaydın, 2009, Apaydın 2014]. Yapı tamamen yeraltında bulunduğundan yeryüzünde bir arazi işgali olmaması, buharlaşma-terleme kayıplarının olmaması, ucuz ve pratik olması gibi nedenlerle yerüstü barajlarına göre avantaj sağlar. Ancak, yerüstü depolama tesislerine göre genellikle daha küçük kapasitelidir [Apaydın 2014]. Yeraltı barajı için uygun yerler nispeten kısıtlı olup, yer seçiminden inşaata, hatta işletme aşamasına kadar yapılacak çalışmalar için uzmanlık gerektirir.

Yeraltı barajlarının yapımı için en temel koşul hidrojeolojik şartların uygun olmasıdır. Çünkü barajın gövdesi ve su alma yapısı gibi tesisler yeraltında olup, suyun depolandığı rezervuar gözenekli jeolojik formasyondur. Bunun yanı sıra su ihtiyacı ile teknik, ekonomik ve sosyal koşullar da belirleyicidir (Apaydın vd. 2015).

Türkiye'nin özellikle yarı-kurak bölgelerinde, yeraltısuyu seviyesinin çekimler nedeniyle veya doğal koşullar nedeniyle uzun süre veya kalıcı olarak düştüğü durumlarda yeraltı barajı gibi yapay besleme teknikleri ile güvenli su elde etmeye yönelik projelerin geliştirilmesi düşünülebilir (Apaydın, 2009, 2014, 2016). Orta Anadolu Bölgesi başta olmak üzere Türkiye'nin birçok bölgesinde ana vadilerin yan kolları boyunca uzanan alüvyon çökellerin daraldığı kesitler yeraltı barajı inşası için uygun ortamlar olabilmektedir.

Yeraltı barajlarında gövdenin geçirimsiz formasyona oturtulması esastır. Gövde tipi yerüstü barajlarında olduğu gibi, dolgu, beton veya plastik beton (slurry trench), kesişen kazık vb. olabilmektedir. Suyun depolanacağı gözenekli jeolojik ortam altındaki geçirimsiz formasyon derinse, başka bir ifade ile suyun depolanacağı rezervuar formasyonun (akifer) kalınlığı fazla ise ve kesiti geniş ise kazı ve gövde hacmi de fazla olacaktır. Cazibe ile su elde edilen yeraltı barajlarında genellikle gövde arkasında keson kuyu şeklinde bir su alma yapısı inşa edilir ve suyun mümkün olduğunca rezervuarın tabanından alınarak cazibeyle yeryüzüne çıkarılması tercih edilir. Ancak bu, topoğrafyanın düz olması veya akiferin kalın

olması nedeniyle mümkün olmayabilir. Bu durumda, su alma seviyesi yukarı çıkarılır veya eğer kazı ve gövde dolgusu için yüksek maliyet gerekiyorsa, gövde tipi plastik beton seçilip, gövde üzerinden taşmalı bir sistem düşünülebilir. Hem cazibeli, hem de kuyulardan pompajlı işletme modeli de mümkün olabilmektedir.

Yeraltı barajları çoğunlukla vadi alüvyonlarında inşa edilmektedir; ancak Japonya gibi ülkelerde sahil akiferlerinde de inşa edildiği bilinmektedir [Nagata vd. 1993; Ishida vd. 2003, 2006, 2011; JGRC, 2001; Hori ve Kayane, 2000]. Vadi alüvyonlarında inşa edilen barajlarda işletme tercihen cazibelidir, ancak bunun için topografik, hidrojeolojik ve ekonomik koşulların uygun olması gerekir. Gövde tipi, su alma şekli ve su alma yapısı yeri, su alma kotu, işletme şekli gibi hususlar, kazı ve gövde dolgu maliyeti ile elde edilecek su miktarına göre fayda-masraf analizlerine göre belirlenir [Apaydın, 2014].

Yeraltı barajlarında en önemli hususlardan biri; su alma şekli ve cazibeli sistemlerde su alma noktasının yeryüzünden derinliğidir. Su alma derinliği; topoğrafya, jeolojik yapı, hidrodinamik gibi faktörlere bağlıdır. Su alma derinliği aynı zamanda gövde tipi ile de ilişkilidir. Su alma derinliği gözenekli ortam olan rezervuarda cazibe ile kullanılabilecek su miktarını da etkilediğinden gövde tipi-su alma seviyesi-su verimi-kazı hacmi gibi ana parametrelerin birbiriyle ilişkisi değerlendirilerek fizibilite analizleri yapılır ve en uygun işletme modeli belirlenir.

2 YERALTI BARAJLARINDA GÖVDE TİPİ

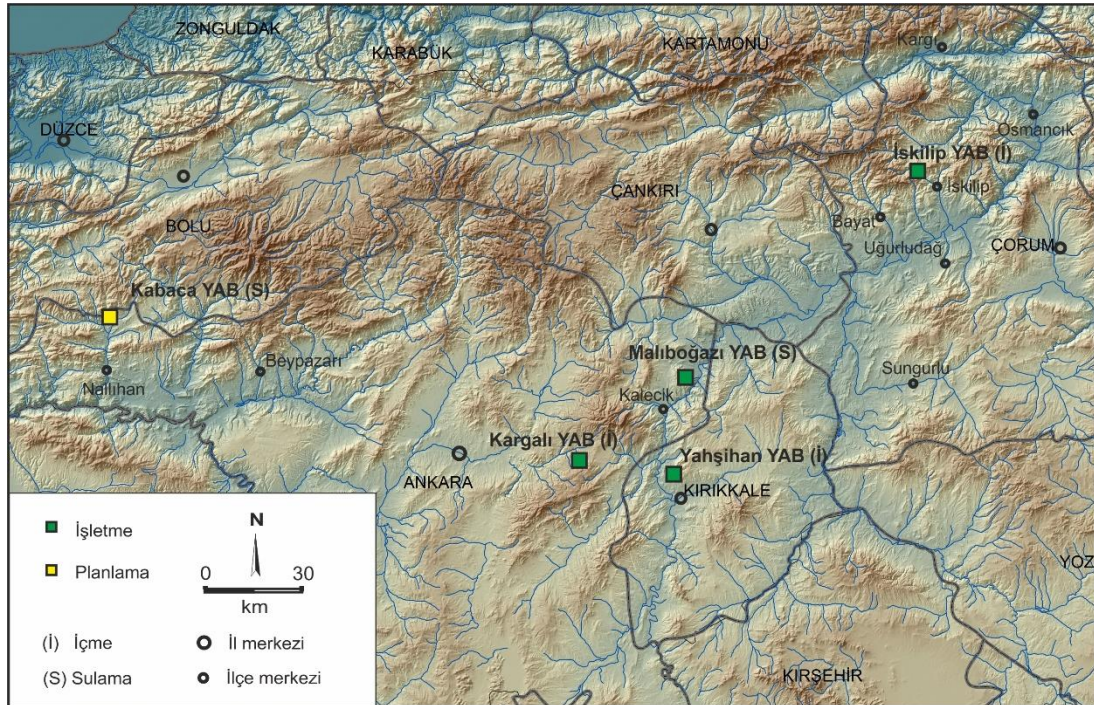
Bugüne kadar dünyadaki uygulamalardan anlaşıldığı kadarıyla yeraltı barajlarının su elde etmek amacıyla depolama, ikincisi ise sahil akiferlerinde tuzlu su girişimini önlemek üzere iki temel amacı bulunmaktadır. Barajın yapılış amacı, işlevi ve malzeme imkanlarına göre gövde tipine karar verilmektedir. Su elde etmek amacıyla inşa edilen yeraltı barajında gövde tipi nasıl olursa olsun (dolgu, beton, klasik enjeksiyon perdesi, kesişen kazık, plastik beton perde vb.) en önemli husus; suyun nasıl elde edileceği ve tesisin nasıl işletileceğidir. Pompajlı projelerde iş sadece geçirimsizliği sağlayacak perdeyi inşa edip, gövde arkasındaki rezervuarda kuyular açarak yeraltısuyunu pompalamaktan ibarettir. Ancak su cazibe ile

elde edilecekse, suyun hangi kottan alınacağı (gövde tabanından, ortalarından veya üstten taşmalı olabilir), su alma yapısının nasıl inşa edileceği, su alma yapısı ile birlikte drenajı hızlandıracak uygulamalara ihtiyaç olup olmadığı, suyun gövdeden geçirilip mansaba nasıl iletileceği gibi hususlar proje aşamasında

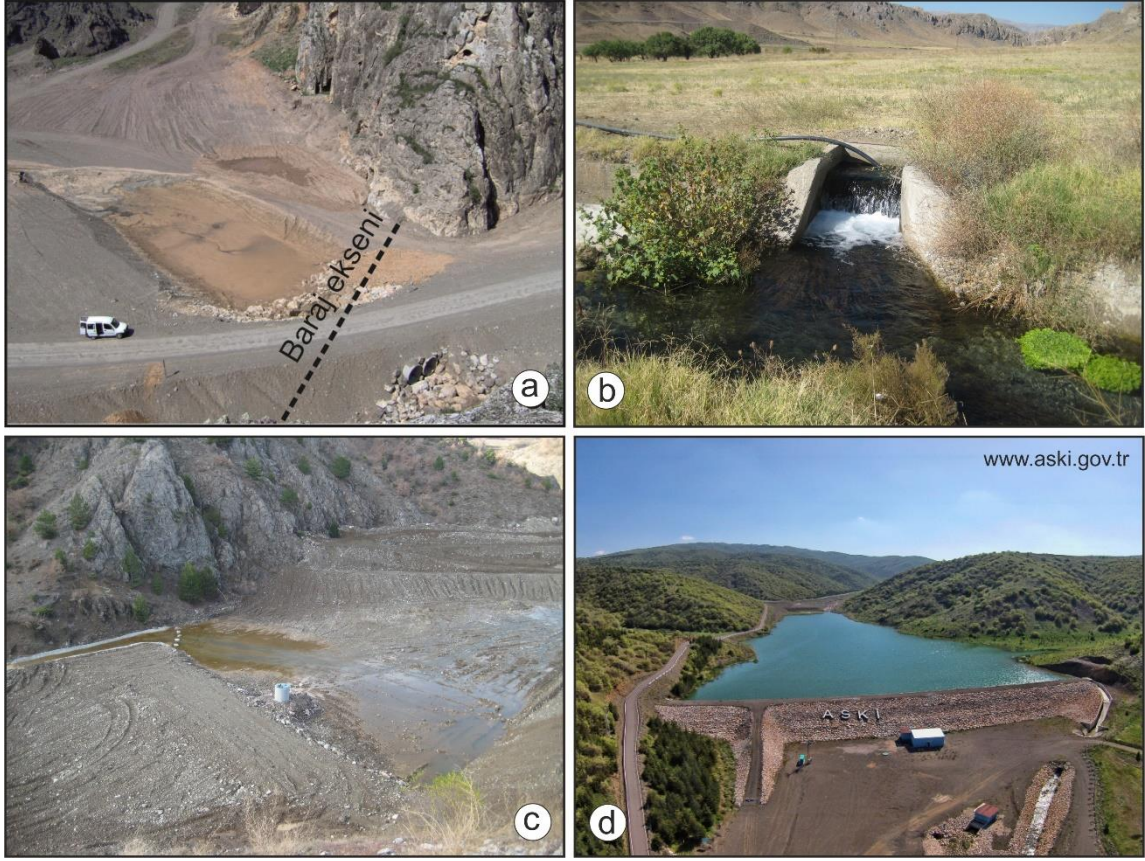
çalışılarak belirlenir. Türkiye’de ve yurt dışında farklı gövde tiplerinde inşa edilen bazı yeraltı barajlarına ait bilgiler Çizelge 1’de, ülkemizde 2000’li yıllarda inşa edilen ve araştırmaları devam eden bazı yeraltı baraj yerlerini gösteren harita Şekil 1’de, bu tesislere ait görüntüler Şekil 2’de verilmiştir.

Çizelge 1 - Türkiye ve yurtdışında inşa edilen farklı gövde tipli yeraltı barajlarına örnekler (Apaydın 2014, 2015)

Baraj Adı	Gövde Tipi	Gövde Yüksekliği (m)	Kret Uzunluğu (m)	Gövde Kalınlığı (m)	Kullanım Amacı	Kapasite (hm ³ /yıl)
Kabasima (Japonya)	Enjeksiyon perdesi	24.8	58.5	3	Tuzlu su girişimini önleme ve İçme	Yapay besleme ile kapasite arttırılmıştır
Nakajima (Japonya)	Kalıp beton	24.84	88	0.55	Tuzlu su girişimini önleme ve sulama	-
Tsunegami Waita (Japonya)	Plastik beton (slurry trench)	21.5	202	0.5	Tuzlu su girişimini önleme ve İçme	Yapay besleme ile kapasite arttırılmıştır
Yahşihan (Türkiye)	Beton+homojen toprak	2+12	20	-	İçme	0.3-1.5
Malıboğazı	Homojen toprak	20.6	50	-	Sulama	0.6-1.9
İskilip	Homojen toprak	13	50	-	İçme	0.6-1.5



Şekil 1 - Türkiye’de 2000’li yıllarda inşa edilen ve araştırmaları devam eden yeraltı barajlarının yerleri



Şekil 2 - Türkiye'de 2000'li yıllarda inşa edilen bazı yeraltı barajlarına ait görüntüler; a: Maliboğazi barajı inşaatı yeni tamamlandığında (2004), b: Maliboğazi yeraltı barajından suyun 2 km mansapta sulama kanalına dökülürken (Temmuz, 2012), c: İskilip yeraltı barajı yeni inşa edildiğinde (2011), Yeraltı ve yerüstü depolaması olan Elmadağ-Kargalı barajı işletmede iken (www.aski.gov.tr)

3 YERALTI BARAJLARINDA SU ELDE ETME SEÇENEKLERİ

Yeraltı barajının cazibeli veya pompajlı olmasında topografik ve jeolojik yapı ile yeraltısuyu dinamiği belirleyicidir. Örneğin eğimli vadilerdeki alüvyon akiferlerinde yeraltı barajı inşa edilirken gövde arkasında kayda değer ilave bir hacim kazanılamayacağından suyun tabandan alınmasına gerek yoktur. Bu tip yerlerde su, gövde orta hizalarından alınabileceği gibi, gövde üzerinden taşırılarak da cazibe ile alınabilir. Ancak, topoğrafyası düz ve derin vadi alüvyonlarında cazibeli yöntemle birlikte kuyulardan pompajla da yararlanılması düşünülebilir.

Cazibeli projelerde gövde ile birlikte su alma yapısı dolgunun inşaatı sırasında projesinde belirtilen kota inşa edilir. Bunun için genellikle gövde arkasına etrafı kaba taneli çakıl filtre malzeme (çakıl zarfı) ile kuşaklanan bir keson kuyu şeklinde su alma yapısı inşa edilerek isale hattının ucu gövde içinden keson kuyuya bağlanmaktadır. Su alma yapısının kotu, topografik yapıya bağlı olarak isale hattı için yapılacak kazı miktarına ve suyun iletileceği

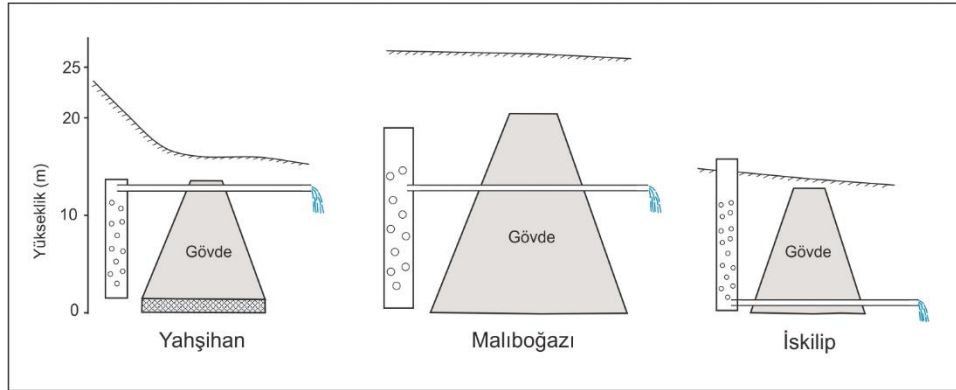
sulama alanının veya havuz/depo gibi ikinci depolama yapısının kotuna bağlıdır. Su alma yapısı ne kadar derine inşa edilirse, cazibe ile alınabilecek su o kadar fazla olacaktır. Ancak, su alma yapısı derine indikçe isale hattı için kazı maliyeti ve kazı güçlüğü de artmaktadır. Barajdan kuyular açılarak pompajla yararlanılması planlanmışsa, kuyu yerlerinin seçimi için ayrıntılı çalışma yapılır, bu çalışmalardan elde edilen verilere göre en uygun işletme şekli belirlenir. Eğer baraj yüksek eğimli bir vadiye inşa edilecekse veya gövde yüksekliği fazla ise cazibe ile su alınması daha kolaydır. Ancak akifer ince taneli malzemeden oluşuyorsa ve bu nedenle hidrolik iletkenliği düşüktürse cazibe ile su elde edilecek şekilde su alma yapısı ve isale hattı inşa edilmiş olsa da, istenen miktarda su elde edilemeyecektir. Çünkü fazla su elde edebilmek için cazibeli su alma yapısının derine inşa edilerek hidrolik eğimin artırılmasının yanında, akiferde hidrolik iletkenliğin de yüksek olması gerekmektedir. Akiferde hidrolik iletkenlik yüksek değilse ve sistem cazibeli değilse geniş çaplı kuyulardan pompajla çekim yapılması en uygun çözüm olmaktadır. Bazen, yeraltı barajları cazibeli ve aynı zamanda pompajlı işletme

modeline göre inşa edilebilmektedir. Sonuç olarak; topografik ve jeolojik yapı ile birlikte elde edilebilecek su miktarı, su ihtiyacı ve maliyet dikkate alınarak en uygun işletme şekli belirlenir. Ülkemizde iki binli yıllarda inşa edilen yeraltı barajlarından hemen hemen tamamı (örneğin, Kırıkkale-Yahşihan, Ankara-Kalecik-Malıboğazı ve Çorum-İskilip) cazibeli'dir. Ankara'ya bağlı Elmadağ ilçesi sınırları içindeki Kargalı barajı ise

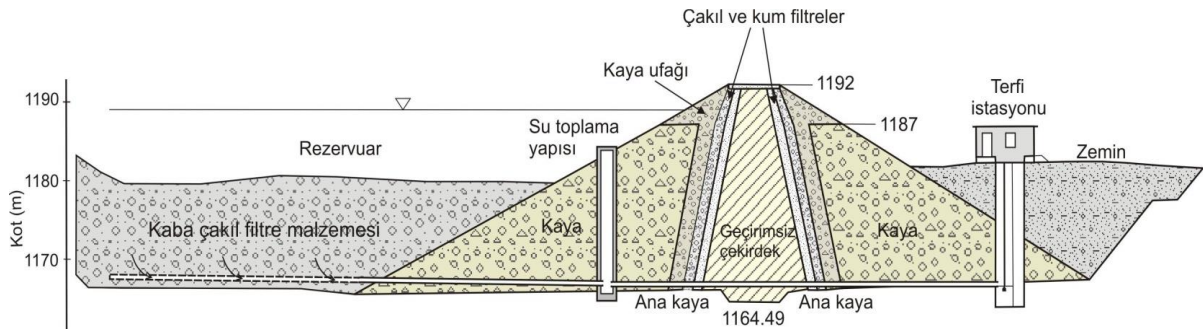
pompajlıdır. Söz konusu yeraltı barajlarına ait su alma, işletme ve kapasite bilgileri Çizelge 2'de, su alma yapısının konumu Şekil 3'te verilmiştir. Türkiye'nin bilindiği kadarıyla hem yeraltı, hem de yerüstünde rezervuarı olan ilk barajı olan Elmadağ-Kargalı barajında gövde arkasında drenaj borularıyla su alma yapısında toplanan su, gövde altından boru ile mansaptaki pompa istasyonuna iletilmektedir (Şekil 4).

Çizelge 2 - Ülkemizdeki bazı yeraltı barajlarında işletme ve su alma bilgileri (Apaydın 2014, 2015)

Baraj Adı	Gövde Tipi	Gövde Yüksekliği (m)	İşletme Şekli	Su alma yeri	Kullanım Amacı	Kapasite (hm ³ /yıl)
Yahşihan	Beton+homojen toprak	2+12	Cazibeli	Tabandan 13 m yüksekte	İçme	0.3-1.5
Malıboğazı	Homojen toprak	20.6	Cazibeli	Tabandan 12.5 m yukarıda, talvegden 13 m aşağıda	Sulama	0.6-1.9
İskilip	Homojen toprak	13	Cazibeli	Tabandan 2 m yukarıda, talvegden 12 m aşağıda	İçme	0.6-1.5
Elmadağ-Kargalı	Kil çekirdekli kaya	26 (15 m yeraltında, 11 m yer üstünde)	Pompajlı	Tabandan 2 m yukarıda, talvegden 12 m aşağıda	İçme	2.5 (yeraltı ve yerüstü depolaması)



Şekil 3 - Orta Anadolu'da inşa edilen bazı yeraltı barajlarında gövde ve su alma noktasının yerleri



Şekil 4 - Türkiye'nin ilk yeraltı-yerüstü depolamalı tesisi Elmadağ-Kargalı barajının gövdeye dik (membra-mansap yönlü) kesiti (Apaydın 2014)

4 FİZİBİLİTE ANALİZLERİ

4.1 Genel Hususlar

Yeraltı barajlarında geçirimsizliği sağlayacak olan perdenin inşaatında değişik türde doğal veya yapay malzemeler kullanılabilir. En çok kullanılanlar kil, beton, plastik, blok kaya veya bunların bileşimidir. Malzemenin seçiminde, yerüstü barajlarında olduğu gibi, doğal koşullar ile piyasa koşulları etkili olmaktadır (Nilsson 1988).

Yeraltı barajlarında inşaat maliyetini etkileyen kalemler yerüstü barajlarında olduğu gibi gövde hacmi, gövde malzemesinin türü, satın alma ve taşıma maliyeti, gövde ve isale hattı kazıları, su alma yapısı veya sondaj kuyusu inşaatları, pompalar ve enerji tesisleri gibi önemli unsurlardır. Maliyet yönünden, yerüstü barajlarında olduğu gibi maliyeti en az olan malzeme kullanılmalıdır. Bunun için, mümkün olduğu kadar baraj yerinden veya yakın çevresinden kazılan malzemenin kullanılması en ekonomik çözümdür. Farklı gövde tipindeki barajların tasarım standartları baraj tipine göre değişmektedir. Genel olarak en ucuz yeraltı barajları gövdede kullanılacak malzeme yakın yöreden sağlanabilen toprak veya kaya dolgu barajlardır. Ancak, dünyada çatlaklı kaya akiferlerinde enjeksiyon perdesi, plastik beton perde veya kesişen kazık ile inşa edilen barajlar yapılmaya başlamıştır.

Yeraltı barajlarında fizibilite analizi yerüstü depolama tesislerine benzerdir. Projenin giderleri ve gelirleri hesaplanarak birbirine oranlanır ve rantabilite hesabı yapılır. Bir yeraltı barajında planlama aşamasında genel olarak yatırım giderleri, işletme ve bakım giderler, yıllık faiz ve amortisman giderleri olmak üzere üç tür gider bütün kalemleriyle hesaplanır. Daha sonra gelirler kaleminde sulama faydası, enerji faydası, taşkın koruma faydası, içmesuyu faydası ve varsa diğer faydalar hesaplanır. Toplam gelir toplam gidere oranlanır. Değişik yöntemlerle rantabilite (verimlilik) hesaplanır. Elde edilen yıllık toplam gelirin yıllık toplam gidere oranı (rantabilite=verimlilik) 1'den büyük ise proje uygulanabilir demektir. Proje aşamasında muhtemel gövde tipleri tek tek incelenir ve maliyetler karşılaştırılarak en uygun gövde tipine karar verilir.

Dünyanın çeşitli yerlerinde inşa edilen birçok yeraltı barajının uygulanabilir çıktığına dair kayıtlar bulunmaktadır (Nilsson 1988). Yarıkurak ve kurak bölgelerde küçük ve orta ölçekli içmesuyu, sulama, sanayi vb. ihtiyaçları karşılamada cazibeli yeraltı barajlarının uygulanabilir çıkması çoğunlukla mümkündür. Kuyulardan pompajlı tesislerde ise varsa uzaktaki bir cazibeli kaynaktan su getirmenin maliyeti ile pompajlı tesisin inşaat ve işletme

giderleri karşılaştırılarak projenin uygulanıp uygulanmayacağına karar verilebilir. Ancak proje ve kaynak seçimi için yapılan fizibilite analizlerinde doğrudan hesaplama girmeyen su kalitesi, çevresel ve sosyal şartlar da dikkate alınarak kapsamlı bir değerlendirme yapılmalıdır.

Son yıllarda inşa edilen İskilip yeraltı barajının tesis maliyeti 2018 fiyatları ile yaklaşık 2 milyon TL'dir. Cazibeli tesisin işletme maliyeti neredeyse sıfırdır. En az 50 yıl ömrü olan tesisin iletim hattında bu süre içinde 1 defa yenileme olacağı dikkate alınarak toplam gider 2 milyon üçyüz bin TL hesaplanmıştır. Ortalama 30 L/s su elde edilen ve yeni bir şebeke inşa etmeden mevcut şebeke ile dağıtım yapılan tesisten yaklaşık 13000 kişinin içmesuyu ihtiyacı karşılanmaktadır. Suyun m³'ünün en düşük fiyatla 2 TL olması halinde bile yıllık gelir yaklaşık 1.9 milyon TL olmakta ve yeraltı barajı kendini ikinci yılında amorti etmektedir. Yeraltı barajı inşa edilmeden önce ilçenin su ihtiyacının büyük bir kısmı kuyulardan pompajla karşılanmakta idi. Belediye yetkililerinden alınan bilgiye göre yıllık enerji gideri 2010 fiyatları ile 1 milyon TL'yi aşmaktadır. Yeraltı barajının yapımı ile Belediye ciddi bir pompaj maliyetinden kurtulmuştur.

4.2 Ankara-Nallıhan-Kabaca Yeraltı Barajı Örneği

4.2.1 Kabaca yeraltı barajının genel özellikleri

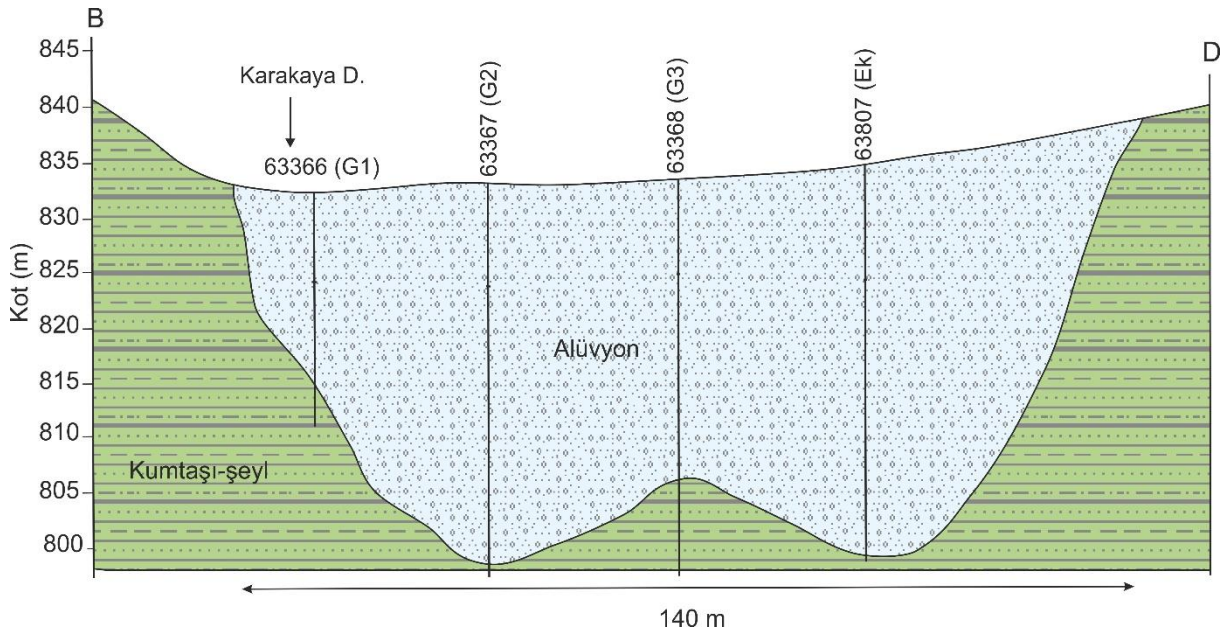
Ankara'nın Nallıhan ilçesi sınırları içinde bulunan kabaca yeraltı baraj yeri Kabaca köyünün 2 km kuzeyinde, Karakaya dere vadisindedir. Sulama amaçlı olarak inşa edilmesi düşünülen barajın planlama şamasında yapılan araştırma sondajların göre eksen yerinde alüvyon kalınlığı 15-36 m arasındadır. Eksen yerinde alüvyon genişliği 140 m'dir (Çizelge 3, Şekil 5). Maksimum 36 m kalınlığındaki alüvyon kaba taneli (kum-çakıl ve blok boyutlu), gözenekli ve geçirimlidir. Pompaj kuyusunda 48 l/s ve 50 l/s sabit debiyle iki farklı tarihte (Temmuz-2015 ve Haziran-2017) 24 saat süreyle yapılan testlere göre hidrolik iletkenlik (K) 7.4×10^{-4} m/s ve 1.2×10^{-3} m/s elde edilmiştir. İki farklı durum için yapılan hesaplamalara göre akifer kesitinden geçen su miktarı 96,5 l/s (8342 m³/gün) ve 48 l/s (4125 m³/gün) dür. Bu miktarların yıl boyunca değişmediği kabul edildiğinde yeraltısuyu potansiyelinin, yağışlarla beslenimin yüksek olması nedeniyle yeraltısuyu seviyesinin yüksek olduğu 2015 yılında 3 hm³, daha önceki yıllara göre kurak geçen 2016-2017 yıllarında beslenimin az olmasıyla yeraltısuyu seviyesinin düşük olduğu 2017 yılında (Şekil 6) ise 1,5 hm³dür (Apaydın ve Kaya, 2017).

Temmuz 2015-Aralık 2018 arasında gözlem kuyularında yapılan ölçümlere göre eksen yerinde yeraltısuyu seviye yağış rejimindeki değişimlere göre 7-8 m ile 24-25 m arasında dalgalı bir seyir izlemiştir. Kurak-yarıkurak bir bölgede bulunan alüvyon aiferin yayılım alanının fazla olmaması nedeniyle yıl içinde özellikle Kış ve ilkbahar aylarında kar ve yağmurların yetersiz

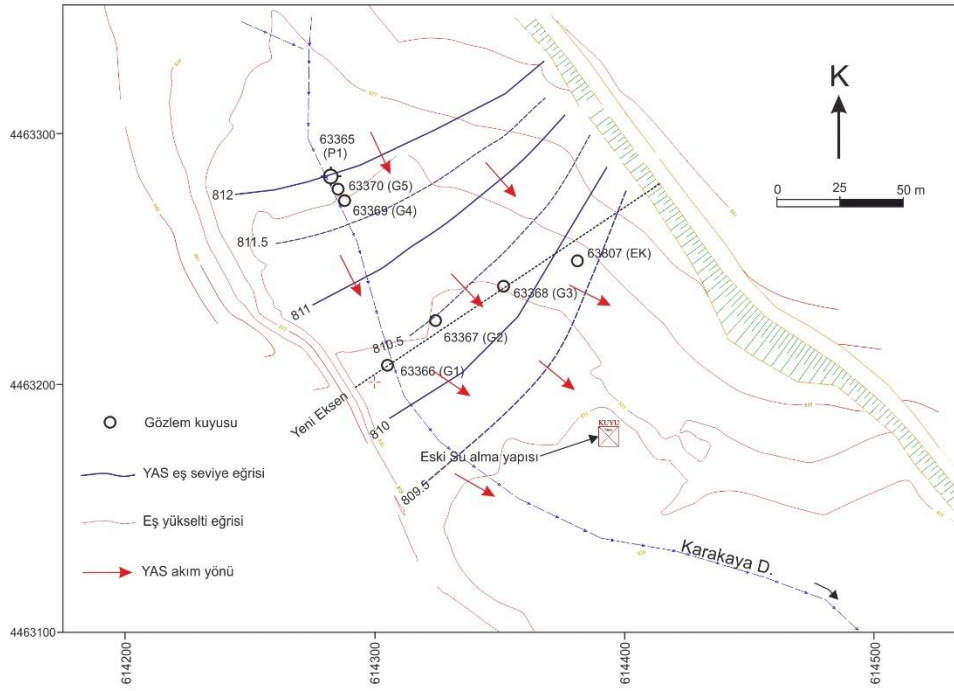
olması halinde yeterli beslenme gerçekleşemediğinde yeraltısuyu seviyesi düşmekte, bunun bir-iki yıl sürmesi halinde ise bu düşüm iyice artmaktadır. Dolayısıyla, Kabaca yeraltı barajının inşa edilmesiyle, kurak yıllarda daha güvenli su temin edileceği öngörülmektedir (Apaydın ve Kaya, 2017).

Çizelge 3 - Nallıhan-Kabaca yeraltı barajı karakteristik bilgileri [Apaydın ve Kaya, 2017]

Yeri	Nallıhan'ın 20 km, Kabaca köyünün 2 km kuzeyi
Amacı	Sulama
Talveg kotu	833-835 m
Yağış alanı	46 km ²
Yağış havzasında min-maks.-ort. kot	830-1600-1230 m
Ortalama yağış	546 mm
Akifer	Az killi, kumlu çakıllı, bloklu alüvyon
Anakaya	Kretase fliş (kumtaşı, şeyl)
Eksen genişliği	140 m
Akifer alanı	2 km ²
Potansiyel sulama alanı (brüt)	200-250 ha



Şekil 5 - Kabaca yeraltı baraj ekseninde alüvyon kesiti



Şekil 6 - Kabaca yeraltı baraj yeri Mart-2017 su tablası haritası (Apaydın ve Kaya, 2017)

4.2.2 Proje alternatifleri

Kabaca yeraltı barajı eksen yerinde 4 adet ve eksen yerinin 60-70 m membayında açılan 3 adet araştırma sondaj kuyusunda maksimum 36 m alüvyon kesilmiştir. Alüvyonun altında yer yer ince şeyl içeren tabakalı kumtaşları bulunmaktadır. Eksenden geçen kesit incelendiğinde, alüvyonun tabanının bir “v” veya “u” şeklinde olmayıp, orta kısmının tümsek şeklinde olduğu görülmektedir. Bu haliyle alüvyon ile ana kaya dokanağı keskin olmayan bir “w” şeklinde olup, kalınlık orta kısımda 27 m, sağ ve sol tarafta ise azami 36 m’dir. Buna göre dolgu gövde için maksimum 36-37 m kazı yapılması gerekecektir. Bu kesit dikkate alınarak ortalama kalınlık 30 m, kret genişliği ise 140 m civarındadır. Mansaba ve membaya doğru alüvyon genişlediğinden bu civardaki en dar kesit, çalışılan kesit olarak görünmektedir. Türkiye’de 2000’li yıllarda alüvyon akiferlerde inşa edilen yeraltı baraj veya göletleri açık kazı ve pozitif cut-off denilen yöntemle inşa edilmiş, geçirimsiz perde çoğunlukla kil çekirdek malzemeden oluşturulmuştur [Apaydın 2014]. Kabaca yeraltı barajının açık kazı ve dolgu gövde şeklinde inşa edilmesi halinde maksimum kazı derinliğinin (36-37 m) fazla, eksenin de epeyce geniş olması (krette 140 m, ortalama 130 m) nedeniyle ana kayaya kadar yüksek miktarda kazı yapılması gerekmektedir. Kazı miktarının yüksek oluşu ve ayrıca kazı güçlükleri

dikkate alındığında, açık kazılı dolgu gövde yerine plastik beton (slurry trench) seçeneğini akla getirmektedir. Bu nedenle, akiferin boyutları, kazı güçlüğü ve maliyeti, inşaat avantajları-dezavantajları, elde edilebilecek su miktarına bağlı olarak gövde tipi, su alma şekli ve su alma kotu, sanat yapıları vb. hususlara göre dolgu gövde ve plastik beton perde seçenekleri çalışılmıştır.

Açık kazı ve dolgu tip gövde

Kabaca yeraltı barajının dolgu gövde şeklinde inşa edilmesi halinde maksimum kazı derinliğinin (36-37 m) olması gerekecektir. Alüvyonun kalın olmasıyla birlikte, gövde ekseninin geniş olması (krette 140 m, ortalama 120 m) nedeniyle, gövde altında alüvyonun kaldırılması için ana kayaya kadar yüksek miktarda (150000 m³) kazı yapılması gerekmektedir. Ayrıca, bu yöntemde, gövde arkasında depolanacak sudan azami derecede faydalanılması için su alma yapısının mümkün olduğu kadar derine inşa edilmesi gerekmektedir. Su alma seviyesinin talvegden 30 m, 20 m ve 10 m derinde olması halinde (Çizelge 4, Şekil 7), suyun boru vasıtasıyla cazibe ile binde iki eğimle mansapta yeryüzüne çıkarılabilmesi için (Şekil 8) gereken kazılar hesaplanmıştır (Çizelge 5). İletim hattı boyunca ortalama taban genişliği 1 m, eğim yatayda bir, düşeyde bir alınmıştır. Topografik eğim, iletim hattı boyunca aynı kabul edilmiştir.

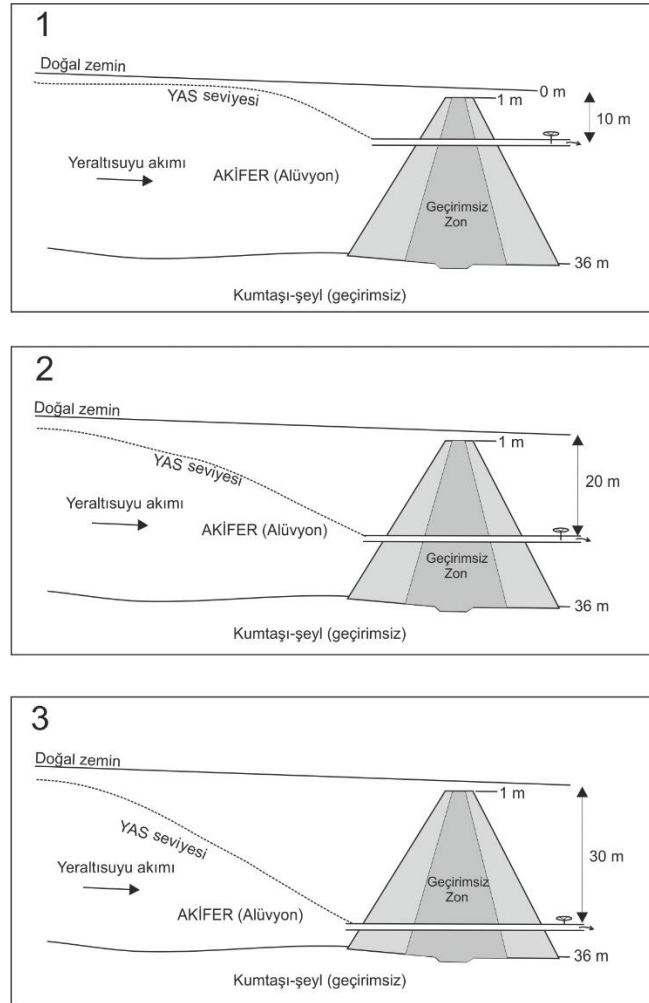
Çizelge 4 - Kabaca yeraltı barajında farklı su alma seviyelerine göre suyu yeryüzüne cazibeyle çıkaracak iletim hattı mesafeleri

Seçenek	Zemin Seviyesinden Su Alma Derinliği (m)	Su Alma Kotu (m)	Minimum Cazibe Mesafesi (m)
1	10	823	330
2	20	813	660
3	30	803	1113

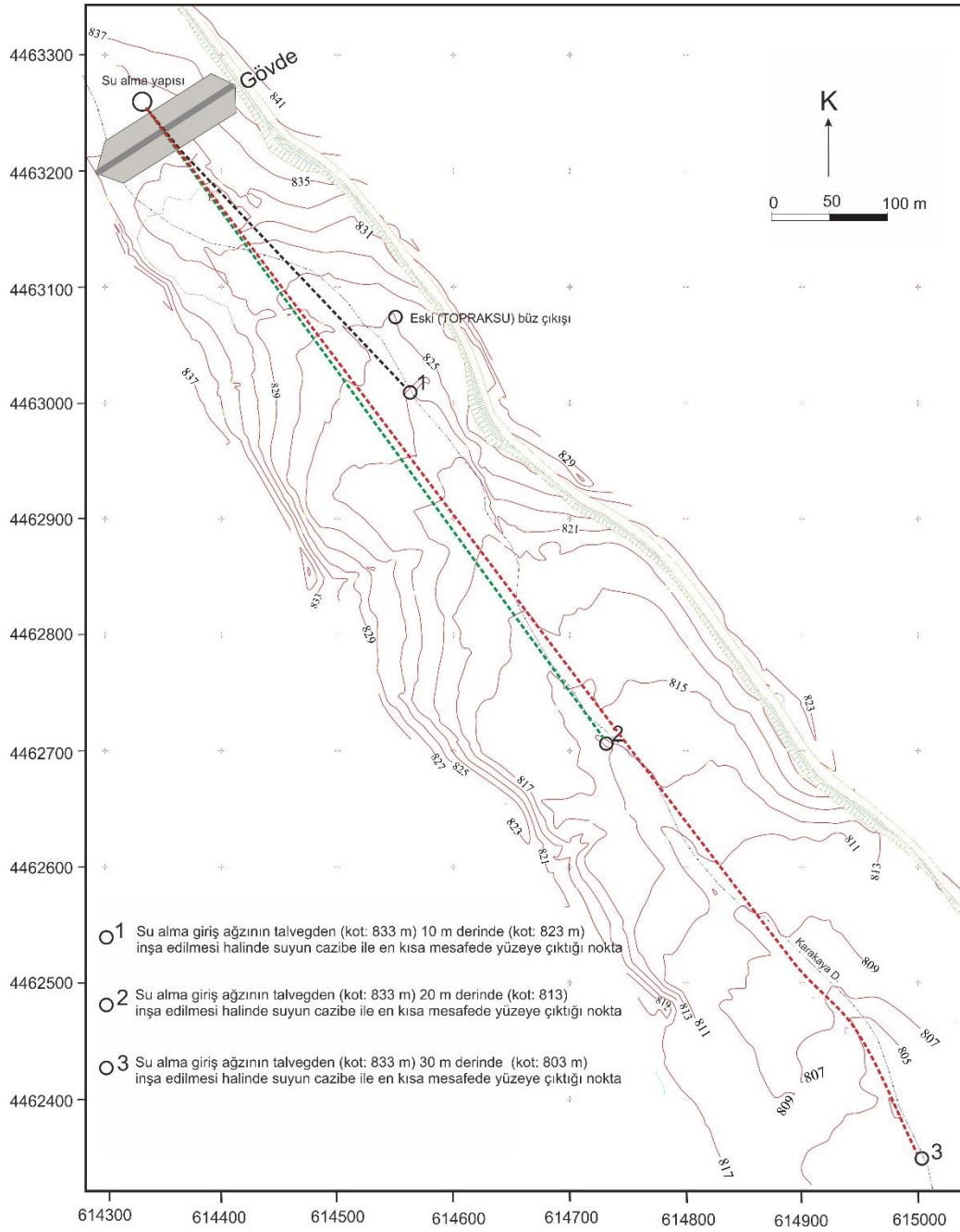
Su alma yapısı üzerinde talveg kotu (zemin kotu) 833 m'dir.

Çizelge 5 - Kabaca yeraltı barajında dolgu gövde uygulanması halinde kazı miktarları

Gövde Altı Kazısı	Ölçüler/Miktarlar
Maksimum kazı derinliği	36 m (çekirdek hendeğinde 37 m)
Ortalama kazı derinliği	30 m
Eksen genişliği	Krette 140 m, tabanda 75 m, ortalama 120 m
Şev eğimi	1/2
Gövde altı kazı miktarı	150 000 m ³
İletim Hattı Kazıları	
Su alma yapısı 10 m derinde ((mesafe: 330 m)	10000 m ³
Su alma yapısı 20 m derinde (mesafe: 660 m)	73000 m ³
Su alma yapısı 30 m derinde (mesafe:1113 m)	267000 m ³
Toplam kazı miktarı (min-maks)	160000 m ³ - 417000 m ³



Şekil 7 - Kabaca yeraltı barajında dolgu gövde modeline göre su alma seviyesi seçenekleri

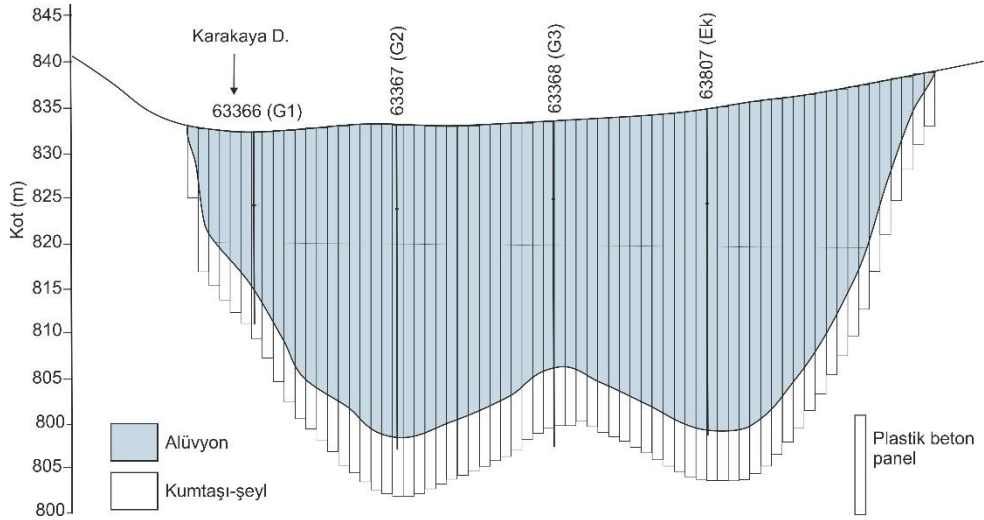


Şekil 8 - Kabaca yeraltı barajında farklı su alma seviyelerinde suyun cazibe ile yüzeye çıktığı yerler

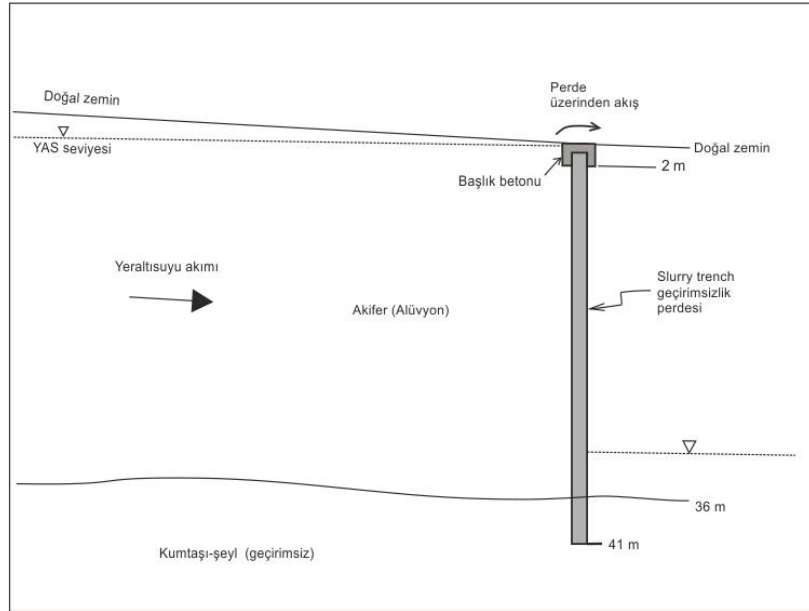
Plastik Beton Perde (Slurry Trench Perdesi)

Kabaca yeraltı barajında alüvyonun kalın (maksimum 36 m) ve eksenin nispeten geniş (140 m) olması nedeniyle kazı güçlüğü ve kazı maliyeti dikkate alınarak açık dolgu gövde tipine karşı plastik beton perde yöntemi de çalışılmıştır. Buna göre, 140 m genişliğindeki eksen boyunca, tabanda ana kayaya (kumtaşı-şeyl) en az 5 m soketlenecek şekilde plastik beton perde imalatı (slurry trench/slurry wall) önerilmiştir (Şekil 9). Eksen yerindeki kuyular arasında 25-30 m mesafe bulunmaktadır. Bu

nedenle özellikle iki kuyu arasının orta kısımlarında alüvyon kalınlıkları bir miktar farklılık gösterebilecektir. Bu nedenle slurry trench kazısı sırasında her anodaki kazıdan çıkan malzeme dikkatli bir şekilde takip edilip incelenerek alüvyon-ana kaya sınırı ve plastik beton uygulama derinliği tespit edilip, imalat buna göre uygulanmalıdır. Plastik beton geçirimsizlik perdesi inşa edildikten sonra membada ve mansapta su tablasının konumu şematik olarak Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9 - Kabaca yeraltı barajında önerilen slurry trench uygulamasının kesitte gösterimi



Şekil 10 - Plastik beton geçirimsizlik perdesi üzerinden suyun taşması

4.2.3 Seçeneklerin karşılaştırılması

Kabaca yeraltı barajında su alma noktasının derinliğine göre gövde tipi ve suyun cazibeyle yeryüzüne çıkış noktasına göre farklı seçenekler birbiriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre, cazibeli işletmede su alma noktası gövde tabanına ne kadar yakın olursa depolamadan azami derecede faydalanılacak ve hidrolik eğimin yükselmesi nedeniyle debi artacaktır. Ancak bu durumda suyun cazibeyle yeryüzüne çıkarılması için uzun bir mesafe kazı yapılarak iletim hattı döşenmesi gerekecektir. Ayrıca arazilerin bir kısmı, suyun yeryüzüne çıkış noktasından

yüksek kotta kalacak ve cazibeyle sulanamayacaktır. Barajda su alma noktası yukarıya çıkarıldıkça, başka bir ifade ile yeryüzüne yaklaştıkça iletim hattı mesafesi ve bunun için yapılacak kazı mesafesi azalacak, baraja yakın araziler de cazibeli sulama kapsamına girecek, ancak debi ve aktif rezervuar hacmi biraz düşecektir. Su alma noktası yeryüzüne kadar çıkarıldığında, sistem bir dolusavak gibi çalışacak ve barajın hemen yakınındaki araziler de cazibeyle sulanabilecek, iletim hattı kazısına gerek kalmayacaktır. Ancak debi minimuma inecek ve kret kotu altındaki

rezervuar ölü hacim olarak kalacaktır (Çizelge 6).

Kabaca yeraltı göletinde dolgu tip gövdenin inşa edilmesi halinde gövde altında 150 bin m³ kazı yapılması gerekecektir. Su alma giriş ağzının zeminden 10 m, 20 m ve 30 m aşağıda inşa edilmesi halinde suyun cazibeyle yerüstüne çıkarılabilmesi için sırasıyla 330 m, 660 m ve 1113 m mesafelere kadar yine sırasıyla 12000, 80000 ve 284000 m³ ilave kazı yapılması gerekmektedir. Dolgu tip yeraltı barajlarında su alma yapısı giriş ağzının akiferin tabanına mümkün olduğunca yakın inşa edilmesi ve suyun cazibeyle yeryüzüne çıkarılması en çok tercih edilen modeldir (Apaydın 2014). Ancak derine doğru inildikçe gövde altı kazısına ilave olarak iletim hattı kazı hacminin artması proje maliyetini olumsuz yönde etkilemektedir.

Günümüzde slurry trench vb. açık kazı yapılmadan geçirimsiz perde inşa yöntemleri geliştirildikten sonra, kalın akiferlerde dolgu tip gövdeli yeraltı barajları maliyetin daha yüksek olması nedeniyle inşaatı pek tercih edilmemektedir. Ancak, akifer kalın ve su alma kotu altında rezervuar hacmi fazla ise depolamadan daha fazla faydalanmak için (su alma kotunu düşürmek için) dolgu gövde tercih edilebilmektedir. Kabaca yeraltı göletinde dolgu tip gövde düşünüldüğünde su alma seviyesinin 10 m derinde olduğu model, doğaldır ki suyun 20 ve 30 m derinden alındığı modellere göre iletim hattı kazısının en az olduğu modeldir. Ayrıca,

elde edilen suyun diğer seçeneklere göre en kısa mesafede yeryüzüne çıkarılarak arazilere dağıtımının yapılabilmesi mümkün olduğundan gölete yakın olan arazilerin de sulanması mümkündür. Ancak membada akiferin fazla eğimli (%3) olması nedeniyle plastik beton gövde inşa edilerek suyun gövde üzerinden taşırılarak doğal zemin kotundan elde edilmesi halinde depolamadan ve hidrolik eğimden fazla bir kayıp olmayacaktır. Su alma kotunun daha düşük olduğu diğer iki modelde gövde arkasındaki gözenekli ortamdaki depolamadan daha fazla yararlanılması mümkün olmakla birlikte, suyun yeryüzüne cazibe ile çıkarılabilmesi ancak vadinin alt kotlarına kadar kazı yapılması ile mümkün olacağından, kazı güçlüğü ve maliyetinin yanında, üst kottaki arazilerin cazibeyle sulanması mümkün olmayacaktır. Dolgu tip gövde için geçirimsiz malzeme teminindeki güçlük de dikkate alındığında gövde tipinin plastik beton olarak seçilmesi en uygun seçenek olarak görülmüştür (Apaydın ve Kaya, 2017).

Kabaca yeraltı barajının plastik beton gövde ile inşa edilmesi halinde suyun şebekeye verildiği yerde bir debi ölçer monte edilerek debinin sürekli kaydedilmesi, barajın dolgu gövde tipinde inşa edilmesi halinde iletim hattı üzerinde bir vana odası inşa edilerek suyun kontrollü bir şekilde kullanılması uygun olacaktır. Böylece kullanılmadığı zamanlarda vana kapatılarak suyun akiferde depolanması sağlanmış olacaktır.

Çizelge 6 - Kabaca yeraltı göletinde gövde tipleri ve su alma şekillerinin karşılaştırılması (Apaydın ve Kaya, 2017)

No	Gövde Tipi	Su Alma Ağızı	Avantaj	Dezavantaj
1	Dolgu	10 m derinde	Gövde altı kazısı fazla ancak iletim hattı kazı hacmi ve maliyet az, kazı nispeten kolay	Hidrolik eğim fazla arttırılamayacak, 10 m'nin altında depolanmış su akiferde kalacak
2	Dolgu	20 m derinde	Akiferde depolanmış suyun büyük bir kısmından cazibe ile faydalanılabilecek	Gövde altı kazısı fazla, iletim hattı kazı hacmi ve maliyet yüksek, kazı zor
3	Dolgu	30 m derinde	Akiferde depolanmış suyun neredeyse tamamından cazibe ile faydalanılabilecek	Gövde altı kazısı fazla, iletim hattı kazı hacmi ve maliyet çok yüksek, kazı zor
4	Plastik Beton	Gövde üzerinden taşımalı	Gövde altı kazısı yok, gövde inşaatı ucuz ve kolay, iletim hattı kazısı en fazla 1-2 m derinden yapılacaktır	Hidrolik eğim arttırılamayacak, akifer eksende doygun hale geldikten sonra gövde üzerinden akan sudan faydalanılabilecek

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Yeraltı barajları, yerüstü barajlarına göre gövde hacmi daha küçük, sanat yapıları yönünden daha sade ve bu nedenle inşaat maliyeti daha düşüktür. Örneğin, DSİ tarafından inşa edilen Maliboğazi yeraltı barajının ve İskilip yeraltı barajlarının inşaat maliyeti 2018 fiyatlarına göre sırasıyla 4 milyon TL ve 2 milyon TL civarındadır. Yerüstü barajlarına göre daha sade, daha ucuz ve genellikle daha küçük boyutlu olmalarıyla birlikte araştırma teknikleri yönünden daha karmaşık olabilmektedir.

Yerüstü barajlarında su potansiyeline yönelik hidrolojik çalışmaların yerini yeraltı barajlarında hidrojeolojik araştırmalar almaktadır. Yerüstü barajlarına giriş akımları doğrudan ölçülebilen, yeraltı barajlarında pompaj ve gözlem kuyularında yapılan testler, akifer ve hatta havza ölçeğinde yapılan beslenime yönelik saha ve laboratuvar araştırmaları ile bilgisayar destekli modelleme çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır. En uygun yer seçimi, su potansiyelinin doğru hesaplanması, sınır koşulları ve işletme seçenekleri gibi projelendirmeye esas verilerin analizi bu konuda uzman kişiler tarafından yapılabilir. Bunun için en temel koşul; hidrojeoloji konusunda uzmanlık ve yeraltı barajları konusunda bilgiye sahip olunmasıdır. Ancak yanlış yer seçimi, potansiyele yönelik hesaplamaların yetersiz olması veya yanlış yapılması, su kalitesi ile ilgili örnekleme, analiz ve değerlendirmelerin eksik veya yanlışlığı, araştırma sondajlarında özellikle akifer-ana kaya sınırının doğru belirlenmemesi, uygulamada gövdenin geçirimsiz formasyona soketlenmemesi veya gövdenin istenen standartlarda inşa edilememesi, topografik ve hidrojeolojik yapıya göre en uygun projelendirme yapılmaması halinde başarısız sonuçlarla karşılaşılabilir.

6 KAYNAKLAR

- [1] Apaydın, A., Kaya, S., 2017, Ankara-Nallıhan-Kabaca yeraltı barajı jeoteknik planlama raporu, DSİ 5. Bölge Müdürlüğü, 46 s
- [2] Apaydın, A. 2016, "Applicability of Groundwater Dams in Semi-Arid Regions: A Study in the North-Central Turkey", International Journal of Engineering Research and Development, Volume 12, Issue 10 (October 2016), PP. 59-69
- [3] Apaydın, 2015. Apaydın, A., Zengin E. 2016, "A combined surface and groundwater storage project: the Elmadag dam, Turkey", Quarterly Journal of Eng. Geology and Hydrogeology, doi:10.1144/qjegh2015-096, Vol. 49, pp. 237-243
- [4] [4] Apaydın, A, 2014, Yer Seçiminden İşletmeye Yeraltı Barajları Kitabı, DSİ Destek Hizmetleri Dairesi Başkanlığı Basım ve Foto Film İşletme Müdürlüğü, ISBN: 978-605-64763-0-3
- [5] Apaydin, A, 2009, "Malibogazi groundwater dam: An alternative model for semi-arid regions of Turkey to store and save groundwater", Environmental Earth Sciences 59 (2), 339-345
- [6] Hori K, Kayane H 2000, "Submarine morphology of the island shelf off the middle and south Ryukyu Islands, southwest Japan (in Japanese)", Geograph Rev Jpn 73A-3:161-181
- [7] Ishida S, Kotoku M, Abe E, Fazal M.A, Tsuchihara T, Imaizumi M. 2003, "Construction of subsurface dams and their impact on the environment", *RMZ - Materials and Geoenvironment*, 50, 149-152
- [8] Ishida S, Tsuchihara T & Imaizumi M 2006, "Fluctuation of NO3-N in groundwater of the reservoir of the Sunagawa Subsurface Dam, Miyako Island, Japan", *Paddy Water Environ* 4: 101-110
- [9] Ishida S, Tsuchihara T, Yoshimoto S and Imaizumi M. 2011, "Sustainable use of groundwater with underground dams", *Japan Agricultural Research Quarterly*, 45 (1): 51-61
- [10] Japan Green Resources Corporation (JGRC) 2001, Report on an Agricultural Land Conservation Project in the Miyako Region
- [11] Nagata S, Enami N, Nagata J & Katho T 1993, "Design and construction of cutoff walls for subsurface dams on Amami and Ryukyu islands in the most southwestern part of Japan", *IAH Selected Papers on Environmental Hydrogeology*, 4, 229-245
- [12] Nilsson, A, 1988, Groundwater dams for small-scale water supply, Intermediate Technology Publications Ltd. London, pp. 69