

Yeraltı Barajlarında Plastik Beton Perdenin Uygulaması, Geçirimsizlik Performansı ve Korunması

Ahmet APAYDIN^{1*}

Öz

Dünyada ve ülkemizde yer üstü barajları başta olmak üzere çeşitli alanlarda uygulanan plastik beton (slurry wall) yöntemi yeraltı barajlarında bugüne kadar dünyada çok az uygulanmakla birlikte, Türkiye’de 2019 yılında “Cumhuriyetin 100. Yılında 100 Yeraltı Barajı” sloganıyla başlatılan Yeraltı Barajları Eylem Planı kapsamında ilk uygulamalar başlamıştır. Bu yöntemin yeraltı barajlarındaki uygulaması, akifer kesitini tamamen keserek kapatan ve böylece yeraltısuyu akışına engel olan geçirimsiz bir plastik beton perdenin inşasıdır. Yerüstü barajlarındaki gibi özel makinelerle yüzeyden yapılan bu işlem sonucunda, perde gerisinde yeraltısuyu seviyesi yükseltilerek depolanan su kuyularla veya cazibeyle kullanıma sunulmaktadır. Perdenin geçirimsizlik performansının test edilmesi sahada ve laboratuvarında bir dizi araştırma, test, ölçüm ve gözleme dayanır. Cazibeli projelerde yapılan drenaj kazıları ve suyun mansaba geçirilmesinde perdeye zarar vermemek için gerekli önlemler alınmalıdır. Ayrıca, taşkınlarla taban oyulması sonucu perdenin üst kısmının hasar görme ihtimaline karşı perde üzerinde beton veya kaya bloklarıyla destek yapılması, gerekiyorsa menba tarafta enerji kırıcı yapılar inşa edilerek taşkın anında suyun enerjisinin düşürülmesi sağlanmalıdır. Bu makalede bu tür koruyucu önlemlerin mevcut ve gelecekteki uygulamalarda dikkate alınması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı barajı, bulamaç hendeği, plastik beton perde, geçirimsizlik performansı

Application, Impermeability Performance and Protection of Slurry Concrete Wall in Underground Dams

Abstract

The slurry wall method, which is applied in various fields, especially in surface dams in the world and in our country, is rarely applied in underground dams in the world, but the first applications have started in Turkey in 2019 within the scope of the Underground Dams Action Plan, which was launched with the slogan "100 Underground Dams in the 100th Anniversary of the Republic". The application of this method in underground dams is the construction of an impermeable plastic concrete wall (slurry wall) that completely cover the aquifer section and thus prevents groundwater flow. Testing the impermeability performance of the curtain is based on a series of research, tests, measurements and observations in the field and in the laboratory. In structures where water is obtained by gravity, necessary precautions should be taken to prevent damage to the wall during drainage excavations and water flow downstream. In addition, in case of damage to the upper part of the wall as a result of the base carving, support should be made with concrete or rock blocks on the wall, and if necessary, energy-breaking structures should be constructed on the upstream side to reduce the energy of the water in the event of a flood. It is suggested in this paper that such protective measures should be considered in current and future applications.

Keywords: Underground dam, slurry trench, slurry concrete wall, impermeability performance

¹Giresun Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye, ahmet.apaydin@giresun.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-6437-7208>

1. Giriş

İngilizce literatürde slurry trench cut-off wall, slurry wall, plastic concrete wall olarak geçen ve ülkemizde “plastik beton geçirimsizlik perdesi” veya “plastik beton perde” olarak bilinen uygulama baraj gövdesi altında, atık sahalarında, madencilikte, büyük mühendislik yapılarında sızdırmazlığı sağlamak amacıyla inşa edilmektedir. Bulamaç hendeği (slurry trench) adı verilen dar, uzun ve derin çukur içinde inşa edilen plastik beton duvarın yerüstü barajlarındaki uygulaması; gövde altındaki geçirimli jeolojik formasyonun kazılarak kaldırılmayıp gövdenin veya batardonun altında bir perde (diyafram) duvar oluşturarak geçirimsizliğin sağlanması şeklindedir. Bu yöntem, kalın geçirimli jeolojik formasyonlar üzerinde dolgu tip barajların yapımına imkan sağlamıştır (Davidson ve ark. 1992; Balian, 2007). Yöntemde geçirimli formasyon içinde yüzeyden geçirimsiz formasyona kadar hendek kazılarak bu hendeğin içi su, çimento, bentonit ve agrega karışımı bir harç ile doldurularak (hendek içinde geçici olarak stabiliteyi sağlayan koyu ayan kıvamındaki bulamaç malzeme dışarı atılmak suretiyle) plastik beton duvar imal edilmektedir. Bu yöntem madencilikte (Davidson, 1992) akarsu kenarlarında sedde altından dışarıya, bazı büyük yapıların temellerine veya zemin altındaki katlarına, atık sahalarından yeraltılarına su sızmaması için de inşa edilmektedir (PCA, 1984; Ryan, 1984).

Dünyada uygulaması daha eskilere giden plastik beton geçirimsizlik perdesinin Türkiye’de baraj mühendisliğinde ilk uygulaması 1976 yılında Aslantaş Barajında gerçekleştirilmiştir (Karaoğullarından ve ark. 1977). Daha sonra Tahtalı, Akköprü (Tosun ve ark. 2002), Süreyyabey (Akman, 2001), Muratlı (Ünsever, 2007), Yedigöze (Nohut, 2010), Aslancık (Alp ve ark. 2014), Koyunbaba, Kalecik (Apaydin 2022), Sulakyurt (Önal, 2018) ve Büyükkumlu (Çakır ve Ünsever, 2019) vb. birçok barajda uygulanmıştır. Bu konuda Türkiye iyi bir deneyime sahiptir.

Yerüstü barajlarında kalın geçirimli alüvyon malzeme olması halinde uygulanan plastik beton yönteminin diğer bir uygulama alanı da yeraltı barajlarıdır. Plastik beton, yeraltı barajlarında yeraltısuyu akımına karşı bariyer oluşturarak perde gerisinde suyun bloke edilerek gözenekli ortam içinde depolanmasını sağlar. Uygulama pekişmemiş veya gevşek çimentolu taneli akiferlerle sınırlıdır. Çatlaklı kaya ve karstik akiferlerde kesişen kazık, enjeksiyon gibi yöntemler uygulanmaktadır ((JGRA, 2004; Ishida ve ark. 2011; Apaydin, 2014). Kalınlığı fazla olan vadi veya sahil alüvyonlarında inşa edilen yeraltı barajlarında kazı maliyetinin yüksek olması ve derin kazı yapılmasındaki zorluklar nedeniyle plastik beton yöntemi akla gelmektedir. Bu yöntem, yerüstünden özel makinelerle akifer kesitini tamamen kaplayacak şekilde kazılan dar ve derin çukur içinin özel bir karışımla doldurularak yeraltısuyu akışına karşı bir bariyer oluşturulması işlemidir. Donatısız ve kolay uygulanabilir olmasıyla tercih edilmektedir. Uygulamadan başarılı sonuç elde edilebilmesi perdeden, perde tabanı ile formasyon arasından veya formasyondan mansaba kaçak

olmamasına bağlıdır. Gövde maliyetinin düşürülmesi amacıyla yerüstü barajlarında olduğu gibi dar eksenler seçilir, ancak projenin uygulanabilir olmasında ve arzu edilen sonucun elde edilmesinde diğer gövde tipli yeraltı barajlarında olduğu gibi, gövde arkasındaki akiferin boyutları, hidrolik özellikleri, topoğrafik ve hidrolik eğimi, beslenme koşulları, elde edilecek suyun kimyasal özellikleri ve kalitesi belirleyicidir.

Dünyada plastik beton perde yönteminin uygulandığı çok az yeraltı barajı vardır. Sırasıyla 1984 ve 1992'de inşa edilen Japonya'daki Tsunekami ve Waita yeraltı barajları bilinen ilk örneklerdir. 1995 ile 2000 yılları arasında inşa edilen diğer bir örnek Kore'deki Sangcheon yeraltı barajıdır. Bundan sonra, Japonya'da birkaç yeraltı barajı daha inşa edilmiştir (Ishida ve ark. 2011). Ancak literatürde bunlarla ilgi bilgilere ulaşamamıştır. Türkiye'de 2000'li yıllarda özellikle yarı kurak iklime sahip iç bölgelerde sulama ve içme amaçlı yeraltı barajları inşa edilmiştir. Bu barajların neredeyse tamamı toprak dolgu tipinde olup, su çoğunlukla cazibe ile elde edilmektedir. Kırıkkale-Yahşihan, Ankara-Kalecik-Malıboğazı, Çorum-İskilip, Eskişehir-Seyitgazi-Sancar, Elazığ-Baskil yeraltı barajları bunlardan en çok bilinenlerdir (Apaydın 2014). Ankara'nın Elmadağ ilçesine içme suyu sağlamak amacıyla inşa edilen Elmadağ-Kargalı barajı Türkiye'de hem yeraltı, hem de yerüstü depolaması olan ilk örnektir (Apaydın ve Zengin 2016).

Tarım ve Orman Bakanlığı ve ona bağlı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) son yıllarda şiddetlenen ve neredeyse ülkenin tamamında hissedilen kuraklık ve iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı yerel, bölgesel veya ülke çapında bazı önlemler almaya çalışmaktadır. "Bin Günde Bin Gölet" ve "Yeraltı Barajları Eylem Planı" ülke ölçeğinde iki güncel örnektir. İlki 2015 yılında tamamlanmış, ikincisi ise halen uygulama aşamasındadır. Yeraltı barajları eylem planı "Cumhuriyetin 100. Yılında 100 Yeraltı Barajı" sloganıyla 22 Temmuz 2019 tarihinde bir açılış toplantısıyla bizzat Tarım ve Orman Bakanı tarafından kamuoyuna duyurulmuştur. Bu eylem planına göre, 2023 yılı sonuna kadar Türkiye'de en az 100 yeraltı barajı veya yeraltısuyu yapay besleme tesisinin inşa edilmesi hedeflenmiştir. 2022 yılı başı itibariyle inşa edilenlerin sayısı 50'dir. Bu eylem planı kapsamında Türkiye'de birkaç projede ilk defa plastik beton geçirimsizlik perdesi yönteminin uygulanması söz konusudur. Bilindiği kadarıyla ikisinin (Bartın-Bahçecik ve İzmir-Kiraz-Suludere) inşaatı büyük ölçüde tamamlanmış, diğerleri inşa veya proje sürecindedir.

2. Materyal ve Metot

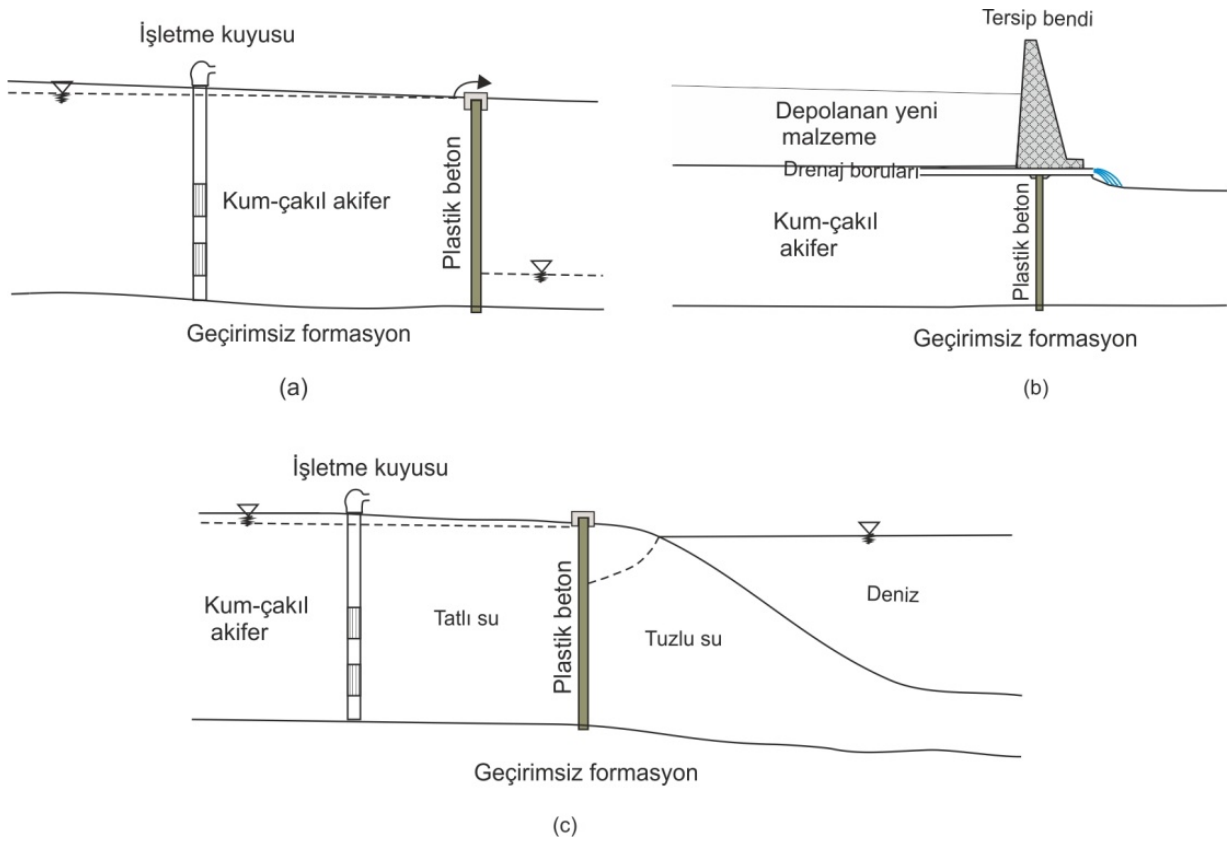
Plastik beton geçirimsizlik perdesi birbirine bitişik paneller şeklinde inşa edilir. Yöntemin uygulanmasında maksimum derinlikle ilgili olarak kısıtlama olmasına karşın, bu yöntem enjeksiyonla birleştirilerek düşük maliyetle geçirimsizlik elde edilmesini sağlar (Karaoğullarından ve ark. 1977). Plastik beton imal etmek için yapılan hendek kazısının derin ve yeraltısuyu

seviyesinin yüksek olduğu yerlerde zemin de yumuşak ve gevşek ise kazı duvarlarının göçmeyerek stabil kalması amacıyla bentonit çamuru kullanılmaktadır. Bu yöntem, perde oluşturmak amacıyla hendeği doldurmakta kullanılan malzemeler yönünden farklılıklar göstermektedir (Tosun ve ark. 2002). Perde derinliğine ve amaca bağlı olarak uygulama kum-bentonit, çimento-bentonit-su ve beton malzemeleri ile yapılabilmektedir. Buna göre, kullanılan kazı-dolgu yöntemleri ile ekipmanlar da değişiklik göstermektedir (Fell ve ark. 1992). Kazı yapılan jeolojik ortamın özelliğine (alüvyonun yumuşak veya bloklu olması, altındaki ana kayanın sertliği) bağlı olarak kullanılan makine ve kesici ucu da farklılık gösterebilmektedir.

Genellikle derinliğin fazla olması halinde perde kalınlığı biraz daha fazla tutulur. Dünyada plastik beton perde uygulamalarda alt ve üst sınırlar 50 ve 150 cm (Opdyke ve ark. 2005) olup, barajlarda kalınlık genellikle 60 cm ile 120 cm arasında uygulanmaktadır (DOD ETC, 1994) Yapım öncesi hazırlık, imalat ve geçirimsizliğin test edilmesi şeklinde üç aşama söz konusudur. Baraj mühendisliğinde plastik beton perdenin imalatı ve geçirimsizlik performansının test edilmesi uzmanlık gerektiren özel çalışmalar ile arazi ve laboratuvarında yapılan testlerle mümkün olabilmektedir. Geçirimsizlik perdesi inşaatı ile ilgili çeşitli yayınlarda (Karaoğullarından ve ark. 1977; D'Appolonia ve Ryan 1979; Millet ve Perez, 1981; PCA, 1984; Millet ve ark. 1992; Davidson ve ark. 1992; Evans ve Cooley, 1995; Filz ve Mitchell, 1995; Ryan ve Day 2003) ayrıntılı bilgiler verilmektedir. Buna göre işlem adımları (1) perdenin doğrultusunu ve sınırlarını belirleyen kılavuz duvarların inşası (duvar kalınlığı 0,7-1,5 m arasında uygulanır) ve panellerin sınırlarının ve numaralarının kılavuz duvar üzerine işaretlenmesi, (2) kazı işlemine geçilmeden önce kazı duvarlarının göçmesini önlemek amacıyla bentonit çamurunun ve plastik beton imalatı için gerekli karışımın hazırlanması, (3) ilk panel için bulamaç çukurunun açılması ve içinin duvar oluşturacak karışım malzemesi ile doldurulması, daha sonra arada bir panel boşluk bırakacak şekilde atlayarak üçüncü, beşinci, yedinci vb. devam eden panellerin aynı şekilde inşa edilmesi, (4) birincil paneller plastik hale geldikten sonra araların yani ikinci, dördüncü, altıncı panellerin önceki panelleri boylu boyunca bir miktar kesecek şekilde inşa edilmesi ve böylece perdenin projeye uygun olarak aralarında boşluk kalmayacak şekilde inşa edilmesi şeklinde özetlenebilir. Yöntemin yeraltı barajlarındaki uygulaması yerüstü barajlarındaki gibidir. Perde imalatı tamamlandıktan sonra yapılan testlerde (yanal ve düşey devamlılık, kalınlık ve hidrolik iletkenlik) performans yeterli kabul edilirse, üst kısmı boyunca yapılan tıraşlama ve düzeltmeden sonra başlık betonu atılır.

3. Plastik Beton Gövdeli Yeraltı Barajı Modelleri

Yeraltı barajlarında eskiden beri toprak dolgu, beton, stone, plastic sheet gibi gövde tiplerinin uygulandığı bilinmektedir (Hanson and Nilsson 1986; Nilsson 1988; JGRA 2004; Foster and Tuinhof 2004, Raju ve ark. 2006). 1980'lerden sonra özellikle Japonya, Kore ve Çin'de enjeksiyon, jet kolon (jet grout), yerinde karışım (mix in-place), plastik beton (slurry concrete wall veya slurry wall) gibi yöntemler de uygulanmaya başlanmıştır (Nagata ve ark. 1993, 1994; Ishida ve ark. 2003, 2011; JGRC 2001). Yeraltı barajlarında plastik beton geçirimsizlik perdesi özellikle sahil ve vadi alüvyonlarında birkaç şekilde uygulanabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Plastik beton geçirimsizlik perdesinin yeraltı barajlarında uygulama şekilleri (a: Kalın vadi alüvyonlarında kuyulardan pompajlı veya cazibeli, b: Sediment tutucu tersip bentlerinde cazibeli, c: Sahil akiferlerinde tuzlu girişimini önleyerek kuyulardan pompajlı).

(1) Kalınlığı veya kesit genişliği fazla olan akiferlerde su elde etmek amacıyla perde gerisinde yeraltısuyunu depolama veya doğal depolamayı artırma yöntemidir. Gövde üzerinden taşan su cazibeyle alınabilir veya kuyulardan çekimle su elde edilebilir (Şekil 1a). Kurak bölgelerde alüvyon akiferlerde eskiden beri kullanılan içme suyu kuyularının mansabında inşa edilerek, gövde arkasında yeraltısuyunun daha fazla depolanmasını sağlamak ve böylece kuraklıktan daha az

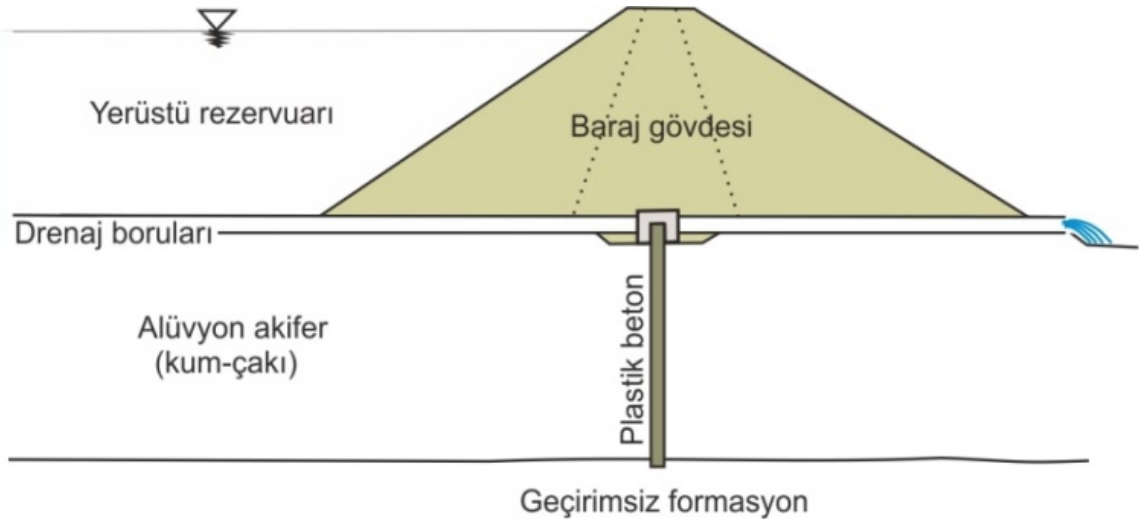
etkilenmek mümkün olabilir. Ancak, mansapta yakın bölgede kuyu veya kaynakların olumsuz etkilenmesi söz konusu ise avantaj ve dezavantajları iyi analiz edildikten sonra karar verilmelidir.

(2) Sediment tutucu olarak inşa edilen tersip bentlerinde gövdenin altında yeterli kalınlıkta ve genişlikte alüvyon akifer varsa gövde altında geçirimsizliği sağlamak amacıyla plastik beton perde inşa edilerek cazibeyle su elde edilebilir (Şekil 1b).

(3) Sahil akiferlerinde tuzlu su girişimini önlemek suretiyle plastik beton perde arkasındaki tatlı yeraltısuyundan cazibe veya kuyulardan pompajla faydalanılabilir (Şekil 1c).

(4) Hem yeraltı, hem de yerüstü depolaması mümkün olan yerlerde birleşik depolama yapıları inşa edilebilir. Bu tür yapılarda yeraltı sızdırmazlığı plastik beton perde ile sağlanabilir. Plastik beton, yerüstü barajlarında uygulandığı gibi homojen toprak veya kil çekirdekli barajlarda Şekil 2'deki gibi uygulanabilir. Bu tür projelerde yeraltı ve yerüstü rezervuarından faydalanmak için tek veya iki su alma yapısı inşa edilebilir. Bu modelde, yerüstü rezervuarında su kalmadığında sadece akiferin üst kısmında drenajlardan gelen suların faydalanılabilmekte, drenaj kotu altındaki ölü hacimden cazibeyle faydalanılamamaktadır.

Plastik beton perdeli yeraltı barajlarında Türkiye'deki bazı toprak dolgu yeraltı barajlarında olduğu gibi, suyun gövde altından (örneğin İskilip yeraltı barajı) veya gövdenin belirli bir seviyesinden (örneğin Kalecik-Malıboğazı yeraltı barajı) alınmasıyla daha etkin kullanılabileceği düşünülebilmekle birlikte iki önemli sorun nedeniyle şimdilik böyle bir uygulama çok zor görünmektedir. Bunlardan biri, gövdenin derin ve topoğrafyanın az eğimli olması nedeniyle suyun minimum eğimle yeryüzüne çıkarılması için mansapta uzun mesafeler boyunca derin kazı yapılması mecburiyetidir. Bu hem yüksek kazı maliyeti, hem kazı güçlüğü, hem de mansap bölgedeki bazı engeller nedeniyle oldukça zordur. Kaldı ki, kalın ve geniş kesitli akiferlerde plastik beton yöntemini uygulama gerekçesi kazı maliyetinin yüksek oluşu ve derinden alınan suyun cazibeyle yüzeye çıkarılmasındaki güçlüklerdir. Böyle bir uygulamada asıl risk, hassas ve ince bir duvar şeklindeki plastik betonun kazma ve delme işleminde tahrip edilmesidir. Sonuç olarak plastik beton perdeli yeraltı barajlarında suyun cazibeyle alınması için yapılabilecek uygulama, kret seviyesinden aşağıda döşenen drenaj borularıyla suyun derlenip toplanması ve suyun sol yamaç veya sağ yamaçta ana kayada kazı yapılarak veya perdenin üst kısmında bir kapı açılarak iletim borusunun buradan mansaba geçirilmesi şeklinde olabilir.



Şekil 2. Yerüstü ve yeraltı depolaması olan (birleşik depolamalı) barajlarda plastik beton geçirimsizlik perdesinin uygulaması.

4. Yeraltı Barajlarında Plastik Beton Perdenin Geçirimsizlik Performansı

Plastik beton perde inşasında amaç su akışına karşı bir bariyer oluşturmaktır. Bunun için en önemli performans kriteri “geçirimsizlik”tir. Baraj gövdesi veya batardo altında inşa edilmesi halinde üzerindeki yüklere karşı davranışı yani “dayanımı” ikinci parametredir. Yeraltı barajlarında perde üzerinde kayda değer yükler olmayacağından, perdenin geçirimsizlik yönünden standartlara uyması yeterlidir.

Plastik beton perde hangi amaçla imal edilirse edilsin, geçirimsizlik performansı konusunda bazı koşulları sağlaması gerekir. Bu konuda literatürde bazı öneriler veya kabul koşulları vardır. Bunlar ülkelere göre veya uygulama amacına göre farklı olabilir. Örneğin A.B.D’de, plastik beton geçirimsizlik perdesinin hidrolik iletkenliği en az 1×10^{-7} cm/s olmalıdır (Evans and Huang, 2016). D’Appolonia (1980), toprak dolgu barajlarda plastik beton perdenin hidrolik iletkenliğinin üst sınırının yaklaşık 1×10^{-6} cm/s olması gerektiğini öne sürmüştür. Diğer taraftan Xanthakos (1979) ve Furman ve ark. (1985) üst sınırı 1×10^{-8} cm/s olarak önermiştir. Bureau of Reclamation (2014)’a göre, söz konusu geçirgenlik koşullarının sağlanması için, perde içinde bulunan büyük parçacıkların aralarında oluşan gözeneklerin yeterli miktarda ince tane ile dolması gerekmektedir. Dolayısıyla, iyi derecelenmiş bir dolgunun bu koşulu sağlaması daha kolaydır. Dolayısıyla, dışarıda hazırlanan plastik beton malzemesinin stabilitesi bozulmayan hendek içinde homojen bir şekilde karışmış ve dağılmış olarak yerleşmiş olması, arzu edilen performansın elde edilmesi için en temel koşul olmaktadır. Plastik betonun homojenliği, derinliği, perde içinde imalat hatasından kaynaklanan anormalliklerin belirlenmesinde sondajsız yöntemler (tomografi, jeoradar vb) uygulanmaktadır. Ancak ülkemizde araştırma sondajı açma, karot örneklerini inceleme, karot örneklerinde laboratuvarında permeabilite testleri yapma, pompalama testleriyle menba-mansap ilişkisini test etme,

menba ile mansap taraf arasında su seviyesi farkını izleme gibi operasyonel yöntemler tercih edilmektedir.

Türkiye’de barajlarda geçirimsizliği sağlamak amacıyla inşa edilen plastik beton perdenin geçirimsizlik ve dayanım etkinliği konusunda yaygın uygulamaya göre, derinlik kontrolü için açılacak sondaj sayısı ve laboratuvarlarda geçirimsizlik ve dayanım testleri için alınacak örnek sayısına esas alan belirlenir ve bunlar yapım şartnamesinde belirtilir. Ancak, sondaj yerlerine ve numune derinliklerine perde inşaatı tamamlandıktan sonra karar verilir. Gerek görülürse sondaj ve numune sayısı artırılabilir. Genellikle karotlarda elle ve gözle yapılan inceleme sonucunda laboratuvar testleri için örnekler en zayıf yerlerden seçilir. Türkiye’de kabul edilen uygulamaya göre, perdeden alınan karot örneklerinde laboratuvarda yapılan deneyler sonucunda ideal olarak permeabilite değeri 1×10^{-6} cm/s'den düşük olmalıdır. Bununla beraber, karışımın doğası gereği olabilecek heterojenlik göz önüne alınarak, ideal koşul sağlanamıyorsa permeabilite değerlerinin en az %80'i 1×10^{-6} cm/s' den düşük ve aynı zamanda en az %95'i 1×10^{-5} cm/s' den düşük olmalıdır. Hiç bir deney sonucu 2×10^{-5} cm/s değerinden yüksek olmamalıdır (Apaydin, 2022).

Perdede bütünlük ve derinlikte projeden sapma konusunda belirli bir hüküm yoktur. Ancak genel uygulama, herhangi bir sapma olursa o panellerin yeniden inşası şeklindedir. Diğer parametrelerce sorun yoksa ve tamamlayıcı olarak pompaj testlerinde (Şekil 3) menba ile mansap tarafı mansap arasındaki hidrolik bağlantı oluşmamışsa perdenin etkinliği tescil edilmiş demektir. Menba-mansap arasında herhangi bir bağlantı tespit edilmişse öncelikle bunun nedeni ve yeri belirlenir. Gerekliyorsa kaçak olan yerdeki paneller yeniden inşa edilir. Perdenin etkinliğini kontrol eden bütün çalışmalar ve elde edilen veriler uzman bir heyet tarafından topluca değerlendirilir ve ona göre sonuca varılır.



Şekil 3. Bir barajda kil çekirdek altında kalacak plastik beton perdenin geçirimsizlik performansında pompalama testi (Menba taraftaki pompaj kuyusundan (a) çekilen suyun beton çamur havuzuna boşaltılması, mansaptaki gözlem kuyularının perde ve pompaj kuyusuna göre konumu (c) ve gözlem kuyusunda düdüklümetre ile su seviye ölçümü (d) (Foto: A.Apaydın).

5. Yeraltı Barajlarında Plastik Beton Perdenin Korunması

5.1. İmalat Süresince

Plastik beton imalatında başarının ilk koşulu hendeğin göçmeye karşı korunmasıdır. Duvarların göçmesinde iki zayıf noktadan biri yeraltısuyu basıncı, diğeri ise gevşek jeolojik zonların (tabaka veya mercek şeklinde) olmasıdır. Alüvyon akiferlerde kaba taneli gevşek zonlar yeraltısuyu akım hızının yüksek olmasıyla göçmeye karşı daha hassastır. Bu nedenle, proje aşamasında yapılan araştırma sondajları ve jeofizik yöntemlerle imalatın yapılacağı kesitteki heterojenlikler ve kolay göçebilecek yerler belirlenmelidir. Göçen kısımların permeabilitesi yüksek zonlar olması ve bu malzemenin çukur içine dökülen plastik beton içine karışarak permeabiliteyi yükseltmesi söz konusudur. Özellikle de bu tür defolu yerlerin (yerel veya bölgesel olabilmektedir) kayda değer alanı kaplaması, perdenin geçirimsizlik performansını düşürmektedir. Kısacası, imalat sonuna kadar hendek güvenliğinin sağlanarak, her panelin mümkün olduğu kadar eşit et kalınlığına

sahip, alttaki geçirimsiz formasyona kadar inen, permeabilite yönüyle heterojenlik içermeyen özellikte inşa edilmesi gerekir. Vaka ve model araştırmalarına göre sığ formasyonlarda uygulanan plastik beton uygulamalarında bölgesel veya tüm panelleri kapsayan göçmelerin 5-15 m arasında olduğuna işaret etmektedir (Wong 1984; Tsai ve ark. 2000; Li and Wang 1984; Washbourne 1984). Kılavuz duvarın altında oluşan boşluk içinin dolmasıyla genellikle bir çıkıntı olabilmektedir (Washbourne 1984).

Hendek duvarlarında göçme yapay nedenlerle de olmaktadır. Hendek içinde herhangi bir nedenle çamur seviyesinin 1 m alçalması veya ağır makine veya motorlu araçlarla duvar kenarında zemine baskı yapılması göçmelere neden olabilir (Wong 1984). Bu nedenle, hendek içinde derinlere sızma sonucu bulamaç çamuru kaybının devamlı takviye edilerek seviyenin düşürülmemesi önemlidir.

5.2. Performans Testleri Esnasında

Plastik beton geçirimsizlik perdesi bileşimi, inceliği ve elastik yapısı nedeniyle hassas yapılardır. Yerüstü veya yeraltı barajlarında imalat sonrası işlemlerden (örnekleme ve test sondajları, üstten tıraşlama, başlık betonu atılması vb.) hasar görmeden geçirimsizlik görevini sürdürmesi gerekir. Perdenin derinliğinin test edilmesi ve karot örnekleri alınması amacıyla yapılan sondajlamada çap mümkün olduğunca dar tutulup, perde ortasında açılmalı ve böylece perdeyi mümkün olduğu kadar az örseleyerek işlemler tamamlanmalıdır (Şekil 4) Laboratuvarda karot örnekleri üzerinde yapılan permeabilite testlerine tamamlayıcı olarak sondaj deliklerinde serbest permeabilite deneyi yapılabilir, ancak kesinlikle basınçlı su deneyi yapılmamalıdır. İşlemler tamamlandığında sondaj delikleri perde imalatında kullanılan karışım ile doldurulmalıdır.



Şekil 4. Plastik beton perdede sondaj işlemi (a) ve alınan karotlar (b) (Foto: A.Apaydın).

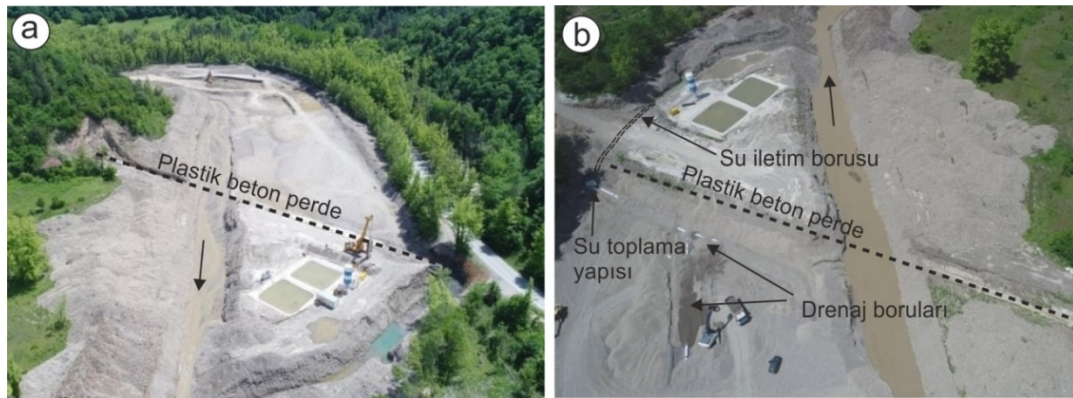
5.3. Suyun Derlenmesi ve Alınması İşlemlerinde

Perdenin geçirimsizliği tescil edildikten sonra, üst kısmında kret boyunca yapılan tıraşlama ve başlık betonunun atılması sırasında gerekli özen gösterilmelidir. Bunun için perdenin üst kısmı, her iki yanında boylu boyunca sığ bir kazı yapılarak açığa çıkarılıp, gerekiyorsa üstten tıraşlanarak başlık içine alınır. Bu işlemler perdenin geri kalan kısmına zarar vermeden yapılmalıdır (Şekil 5).

Yeraltı barajlarında plastik beton geçirimsizlik perdesinin güvenliği için diğer bir konu cazibeli projelerde drenaj kanallarının kazılması ve iletim borularının mansap bölgesine geçirilmesidir. Bu tür projelerde perde gerisinde drenaj borusu döşemek amacıyla hendekler açılırken perde ile temas edilmemelidir. Bunun için topoğrafik ve hidrolik eğim dikkate alınarak kolektör dren perdenin sağ veya sol ucuna doğru yönlendirilmeli, kolektör drende toplanan suyun uygun çapta boru ile mümkünse plastik beton perdeyi kesmeden perde dışında ana kayada kazı yapılarak (Şekil 6), bu mümkün değilse perdede çok dikkatli bir şekilde küçük bir kapı açılarak mansaba geçirilmesi önerilir. Bunu yaparken dikkatli olunması, boru dışında bir açıklık bırakılmaması veya geçiş yerinin etrafının betonla korumaya alınması gerekebilir.



Şekil 5. Plastik beton perdenin üst kısmının tıraşlanarak düzeltilmek üzere açığa çıkarılması (Foto: A.Apaydın).



Şekil 6. Bartın-Bahçecik yeraltı barajında plastik beton imalatının mansaptan görünüşü (a) ve drenaj borularıyla toplanan suyun ana kayada sandık yarma yapılarak plastik beton perde dışından geçirilmesi (b) (foto: www.sabah.com.tr, erişim tarihi 14.02.2022).

5.4. İşletme Süresince

Yukarıdaki işlemlerin haricinde plastik beton perdenin taşkınlarda yüksek debili ve yüksek basınçlı suya karşı da korunması gerekir. Yeraltı barajlarında yerüstündeki yapılar ve plastik perdenin zarar görmemesi ve akarsuyun rahat bir şekilde akması için yatak düzenlemesi ve perde üzerinden geçişte savak yapısı inşa edilir. Ancak taşkın zamanlarında yüksek debili ve yüksek basınçlı su nedeniyle bu yapıların zarar görme ihtimali vardır. Örneğin, homojen toprak dolgu gövde tipindeki Kalecik-Malıboğazı yeraltı barajının inşasından kısa bir süre sonra meydana gelen taşkında yerüstünde bulunan gözlem kuyusu ve yol geçişi altındaki büzler zarar görmüştür. Kretin talvegden 2 m aşağıda olması sayesinde taban oyulması gövdeye kadar inmemiştir.

Plastik beton perde gömülü olmasına ve üzerinde koruyucu başlık betonu olmasına rağmen şiddetli taşkınlarda taban oyulması nedeniyle yırtılma sonucu zarar görmesi söz konusu olabilmektedir. Buna karşı ilave tahkimat yapılarak riskin en aza indirilmesi gerekir. Buna ek olarak tesislerin işletme ömrü boyunca sürekli olarak izlenmesi, gerektiğinde tamir-bakım işlemlerinin yapılarak faydalı ömrünün mümkün olduğunca uzatılması önem taşımaktadır.

Terfili projelerde perde gerisinde kuyuların bataklık içinde kalmaması için pompa barakalarının ayaklar üzerinde yükseltilmesi, barakalara ulaşım yollarının dolgu üzerinde inşa edilmesi gerekebilmektedir.

6. Sonuç ve Öneriler

Barajlarda veya diğer uygulamalarda plastik beton geçirimsizlik perdesinin başarısında öncelikle hendek stabilitesinin korunması ve betonun istenen boyut ve standartta imal edilmesidir. İmalat sonrasında yapılan kontrol çalışmalarında perdede standart, sözleşme veya içtihatlarla uymayan ve aynı zamanda kabul edilebilir sınırlar dışına çıkan herhangi bir yerel veya bölgesel problem tespit edildiğinde o panellerin yeniden inşası gerekir. Türkiye’de yerüstü barajları için eskiden beri geçerli olan bu uygulama yeraltı barajları için de söz konusudur. Başka bir ifadeyle, yeraltı barajlarında plastik perdenin projelendirilmesi, inşaatı ve geçirimsizlik performans testleri yerüstü barajlarındaki gibidir. Ancak, perde yerüstü barajlarında ya batardo ya da gövde altında gömülü olduğundan dış etkenlere karşı koruma altındadır. Yeraltı barajlarında ise genellikle talveg seviyesine kadar çıktığından taşkınlarda karşı korunacak şekilde önlemler alınmalıdır.

Yeraltı barajlarında yerüstü barajlarında olduğu gibi yerüstünde bir göl olmadığından, perdeye olan hidrostatik basınç yüksek değildir. Bu durumda perde içindeki çok küçük çaplı gözeneklere daha az baskı oluşturduğundan geçirimsizlik yönünden avantaj sağlamaktadır. Yeraltı barajlarındaki plastik beton perdenin geçirimsizliği konusunda tercihan yerüstü barajlarında geçerli

olan ideal koşullar arzu edilse de, permeabilite katsayısının (K) üst sınırının 10^{-5} cm/s olarak kabul edilebileceği kanaatine varılmıştır. Ancak tamamlayıcı olarak perde derinliği ve yanal devamlılığının sağlanmış olması, menba-mansap arasındaki hidrolik bağlantının kesilip kesilmediğini test etmek amacıyla pompaj deneyleri yapılması, menba ve mansap bölgedeki gözlem kuyularında makul bir süre su seviyeleri izlenerek, elde edilen bütün verilerin birlikte değerlendirilmesiyle sonucu varılması uygun olacaktır.

Dünyada son 30 yıldır kalın ve geniş akiferlerde daha öncekilere göre daha büyük boyutlu yeraltı barajları inşa edilmiştir. Ancak ne yazık ki literatürde yeraltı barajları ile ilgili yayınlar azdır. Erişilebilenlerin çoğu tanımlayıcı veya yer seçimine yönelik modelleme çalışmalarıdır. Japonya, Hindistan, Brezilya ve kısmen de Kore’de inşa edilen bazı yeraltı barajları hakkında sınırlı da olsa erişilebilen yayınlar mevcuttur. Son yıllarda bu ülkelere Türkiye de katılmıştır. 21. Yüzyılın ilk 15 yılında inşa edilen yeraltı barajları ile ilgili bazı yayınlar (Apaydin 2009, 2014, 2016ab, 2019) yapılmıştır. Bu yayınlar inşa edilen yeraltı barajlarının yer seçimi, projelendirme, inşaat ve işletme konularında bilgiler vermektedir. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, 2019 yılında “Cumhuriyetin 100. Yılında 100 Yeraltı Barajı” adı altında uygulamaya koyduğu 4 yıllık eylem planıyla çeşitli gövde tipi ve su alma yöntemine sahip yeraltısuyu barajları ve yeraltısuyu yapay besleme tesisleri inşa etmektedir. Türkiye’dekiler de dâhil olmak üzere dünyanın neresinde inşa edilirse edilsin, bu tür uygulama projelerine ait proje, inşaat ve işletme bilgileri ve deneyimlerin sektör ve kamuoyu ile paylaşılması önem taşımaktadır. Özellikle de plastik beton yönteminin dünyada yeraltı barajlarında uygulamasının az olması ve Türkiye’de yeni uygulanmaya başlaması nedeniyle, yapılacak yeni yayınlar hem ülke hem de dünya literatürüne katkı sağlayacaktır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Akman, SB. (2001). Aşağı Çekerek Projesi Süreyyabey Barajı slurry trench uygulaması, 50 s, DSİ Genel Müd (yayımlanmamış rapor) Ankara.
- Alp, ÖK., Büyükçoban, H., Pelen, GM. (2014). Bulamaç hendeği yöntemi ile geçirimsizlik perdesi imalatı, Aslancık barajı ve HES örneği. 2. Barajlar Kongresi, 13-15 Şubat, İstanbul, 7-11.
- Apaydin, A. (2022). Multi-parameter analysis for impermeability performance of slurry wall under dams: Two case studies in central Turkey; *Arabian Journal of Geosciences* (2022) 15:11.
- Apaydin, A., Zengin E. (2016). A combined surface and groundwater storage project: the Elmadag dam, Turkey, *Quarterly Journal of Eng. Geology and Hydrogeology*, (Technical Note) doi:10.1144/qjegh2015-096, Vol. 49, pp. 237–243.

- Apaydın, A. (2014). *Yer seçiminden işletmeye yeraltı barajları*, DSİ Genel Müdürlüğü Destek Hiz. Daire Başkanlığı Basım ve Foto-Film İşletme Müdürlüğü ISBN:978-605-64763-0-3, web:<http://www.dsi.gov.tr/docs/yayinlarimiz>.
- Balian, S. (2007). Cut-off wall construction (Peribonka Dam). *International Water Power and Dam Construction*, 59(2): 42–44.
- Boyes, RGH. (1975). *Structural and cut-off diaphragm walls*. John Wiley and Sons, New York-Toronto, p. 181.
- Bureau of Reclamation (2014). *Design Standards No. 13 Embankment Dams Chapter 16: Cutoff Walls Phase 4 Final*, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 122 p.
- Çakır, EN., Ünsever, YS. (2019). *Büyükkuşla barajı'nda bulamaç hendeği yöntemi ile geçirimsizlik perdesi uygulaması ve sızma analizi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Cilt 23, Sayı 3, 974-980.
- D'Appolonia DJ., Ryan , CR. (1979). Soil-bentonite slurry trench cutoff walls. *Proceedings, Geotechnical Exhibition and Technical Conference*, Chicago, Illinois, March 26, www.geo-solutions.com/tech-papers/pdf/slurrywallpdf04.pdf.
- D'Appolonia, DJ. (1980). Soil bentonite slurry trench cutoffs, Journal of the Geotechnical Engineering Division, *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, Vol. 1, 106, No. 614.
- Davidson, RR., Levallois, J and Graybeal, K. (1992). Seepage cutoff walls for mud mountain dam. In *Slurry walls: design, construction, and quality control*. ASTM Special Technical Publication No. 1129. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, Pa. pp. 309–323.
- Davidson, RR., Denise, G., Findlay, B., Robertson, RB. (1992). *Design and Construction of a Plastic Concrete Cutoff Wall for the Island Copper Mine, Slurry Walls: Design, Construction and Quality Control*, STP 1129, David B. Paul, Richard R. Davidson and Nicholas, J. Cavalli, Eds., ASTM, Philadelphia, PA, 271-288.
- DOD ETC (1994). *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide-Second Edition*, DOD Environmental Technology Transfer Committee, [www.frtr.gov, http://207.86.51.66/download/remed/remtech.exe](http://207.86.51.66/download/remed/remtech.exe).
- Evans, JC., Costa, M., Cooley, B. (1995). The State of Stress in Soil-Bentonite slurry trench cutoff walls, ASCE Specialty Conference on Characterization, Containment, Remediation and Performance in Environmental Geotechnics, *The Geoenvironment 2000*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 46.
- Evans, JC., Huang, H. (2016). Hydraulic Conductivity of Soil-Bentonite slurry walls, Conference: Geo-Chicago 2016, August 14–18, 2016, Chicago, Illinois, DOI: [10.1061/9780784480144.054](https://doi.org/10.1061/9780784480144.054), 10 p.
- Fell, R., MacGregor, P., Stopledon D. (1992). *Geotechnical Engineering of Embankment Dams*, Balkema, Rotterdam, 675 p.
- Filz, GM., Mitchell, JK. (1995). Design, construction, and performance of soil- and cement-based vertical barriers, *International Containment Technology Conference*, Ralph R. Rumer and James K. Mitchell, Eds., US DoE, US EPA, and Dupont Company, Baltimore, MD, pp 63.
- Foster, F., Tuinhof, A.(2004). *Brazil, Kenya: Subsurface dams to augment groundwater storage in basement terrain for human subsistence*, World Bank Sustainable Groundwater Management Lessons from Practice, 1–8.
- Furman, CA., Spooner, CE., Spooner, PA., Tokarski, EF., Wetzal, RS. (1985). Slurry trench construction for pollution migration control, *Pollution Technology Review*, No. 118, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Noyes Publications, Park Ridge, NJ.
- Hanson, G. and Nilsson, A. (1986). Groundwater dams for rural-water supplies in developing countries. *Ground Water*, vol 24, no:4, 497-506.
- 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.
- 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.
- JGRA (2004). *Technical Reference for Effective Groundwater Development*, Japan Green Resources Agency (J-Green), <http://www.green.go.jp>.
- JGRC (2003). *History of underground dam construction in Miyakojima*, Japan Green Resources Corporation, Tokyo, 609p, (in Japanese).

- JGRC (2001). *Underground dams for agricultural use in subtropical region*, Report on an Agricultural Land Conservation Project in the Miyako Region, Japan Green Resources Corporation, Tokyo, 24 p.
- Karaoğullarından, T., Özügüzel, N., Akcanbaş, N. (1977). Alüvyonda bulamaç hendeği (slurry trench) yönetimiyle sızdırmazlık perdesi yapımı ve Aslantaş barajındaki uygulaması, *Jeoloji Mühendisliği*, Cilt 1, Sayı 3, 28 – 35.
- Millet, RA., Perez, J. (1981). Current USA Practice: Slurry wall specifications, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 107,, Issue 8, 1041-1056.
- Millet, RA., Perez, JY., Davidson, RR. (1992). USA practice slurry wall specifications 10 years later. Slurry walls: Design, construction, and quality control, ASTM STP 1129, Paul, Davidson and Cavalli, Eds., *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, PA, 42-68.
- 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
- Nagata, S., Azuma, K., Asano, M., Nishijima, T., Shiiba, H., Yang, DS., Nakata, R. (1994). Nakajima subsurface dam. *Proceedings of 21st Annual Conference*, Sponsored by the Resources Planning and Management Div./ASCE May 23-26, Denver, Colorado.
- Nilsson, A. (1988). *Groundwater dams for small-scale water supply*, Intermediate Technology Publications Ltd. London, pp. 69.
- Nohut, FM. (2010). *Yedigöze barajı ve hidroelektrik santrali inşaatında geçirimsiz perde duvar (slurry-trench) uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, jeoloji Mühendisliği ABD, 155 s.
- Opdyke, SM., Evans, JC. (2005). Slag-Cement-Bentonite Slurry Walls, *Journal of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 131:6, 673-681.
- Önal, FC. (2018). *Geçirimsizlik perdesi yapım yöntemleri ve Sulakyurt barajı slurry trench (bulamaç hendeği) uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 128 s.
- PCA (1984). *Cement-Bentonite slurry trench cutoff walls*, Portland Cement Association, 12 p. www.cement.org.tr
- Raju, NJ., Reddy, TVK., Munirathnam, P. (2006). Subsurface dams to harvest rainwater - a case study of the Swarnamukhi River basin, Southern India, *Hydrogeology Journal*, 14(4), 526–531.
- Ryan, CR. (1984). Slurry cutoff walls: Applications in the control of hazardous wastes, *Hydraulic Barriers in Soil and Rock*, STP 874, A.I. Johnson, R.K. Frobels, N.J. Cavalli, C.B. Pettersson, Eds., ASTM, Denver, CO, pp. 9-23.
- Ryan, CR., Day, SR. (2003). Soil-bentonite slurry wall specifications, *Pan American Conference on Soils Mechanics & Geotechnical Engineering*, ASCE Geo-Institute and MIT, Cambridge, MA, 8 p.
- Tosun, H., Ünal, SM., Türköz, M. (2002). Dolgu barajlarda bulamaç hendeği yöntemi ile plastik beton perde inşası ve bir uygulama, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi*, Bildiriler Kitabı, 21-22 Ekim 2002, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 484-497.
- Tsai, J.-S., Jou, L.-D., Hsieh, H.-S. (2000). A full-scale stability experiment on a diaphragm wall trench, *Geotechnical Journal*, vol. 37, no. 2, pp. 379–392.
- URL-1: Youtube, 3D Suludere Yeraltı Barajı ve Sulaması / Kiraz / İzmir, [www.Youtube.Com](https://www.youtube.com/watch?v=...): (Erişim tarihi: 14.02.2022)
- URL-2: www.trthaber.com. Kuraklık yer altı barajlarını artırıyor, (Erişim tarihi, 14.02.2022)
- Ünsever, YS. (2007). *An analysis of deformation behaviour of Muratlı asphalt faced rockfill dam*, *Yüksek Lisans Tezi*, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 112 p.
- Washbourne, J. (1984). The three-dimensional stability analysis of diaphragm wall excavations, *Ground Engineering*, vol. 17, no. 4, pp. 24–29.
- Wong, GCY. (1984). Stability analysis of slurry trenches, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 110, no. 11, pp. 1577–1590.
- Xanthakos, PP. (1979). *Slurry Walls*, McGraw-Hill, Inc., New York, NY.