

# Baraj Enjeksiyon Perdesinin Tasarımı için Gerçekleştirilen Tahkikler

Sadettin Topçu<sup>1</sup>

Evren Seyrek<sup>2</sup>

## Özet

Baraj yapılarının temelindeki kaya birimlerin kırıklı olmasından dolayı rezervuar kaynaklı memba-mansap doğrultusunda gelişecek sızma kapasitesi yapının stabilite güvenliği ve rezervuarda biriken suyun miktarı açısından değerlendirilmesi gereken bir husustur. Bu gibi durumlarda inşa edilen baraj enjeksiyon perdeleri, geçirimsizlik zonu oluşturularak sızma kapasitesinin ve baraj gövdesine etki eden kaldırma basınçlarının düşürülmesini sağlar. Baraj enjeksiyon perdelerinin tasarımında ve inşasında uzun süre deneme-yanılma ve tecrübeden kaynaklı pratik uygulama esaslarının kullanıldığı bilinmektedir. Son yıllarda bu konuda gerçekleştirilen araştırmaların sonuçlarıyla birlikte analitik yöntemlerle yapısal,işlevsel ve dayanıklılık esasında baraj enjeksiyon perde tasarımı ve inşaatı mümkün olmaktadır. Bu analitik yöntem kapsamında baraj enjeksiyon perdesinin tasarımında mutlak surette dikkate alınması gerekli tahkikler: Geçirimsizlik kriteri, Kaldırma basıncı kriteri ve İçsel erozyon kriteridir. Bu kitap bölümü kapsamında da bu gerekli tahkikler detaylandırılarak anlatılmaktadır.

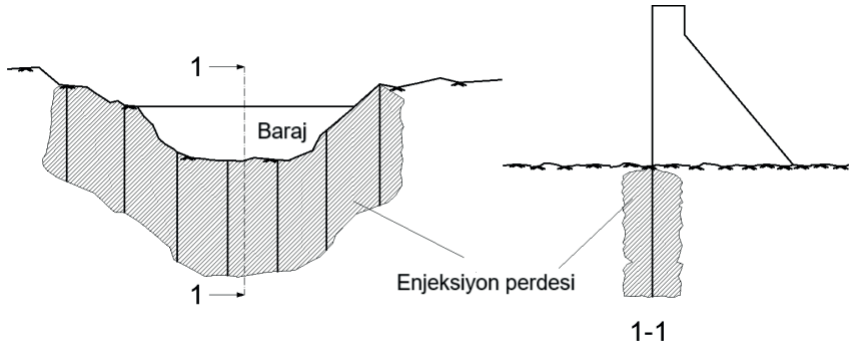
## 1. Giriş

Dolgu barajlarda göçmenin en dikkat çeken sebepleri; üstten aşma, sızma-basınçlı boru akımı nedeniyle gövde ve temelde meydana gelen içsel erozyon ve baraj temelindeki kusurlardır (ICOLD, 1993). Bilinmeyen özelliklere sahip süreksizliklerin varlığı nedeniyle, temeldeki kaya kütlelerinin mühendislik özelliklerinin ve su geçirimsizliğinin iyileştirilmesine ihtiyaç

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, sadettin.topcu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1306-2502

2 Doç. Dr, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, evren.seyrek@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4373-6723

olabilir. Enjeksiyon, genellikle yer yapısının iyileştirilmesine yönelik bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır (Şekil 1). Enjeksiyon, akışkan malzemelerin basınç altında yer yapısına enjekte edilmesi ve zeminin mühendislik özelliklerini, davranışını değiştirme ve/veya iyileştirme olarak tanımlanabilir.



Şekil 1. Baraj Enjeksiyon Perdesi

Genelde çimento esaslı inşa edilen geçirimsiz enjeksiyon perdeleri (EP), farklı baraj tiplerinin temelinde yer alan kaya kütesinin hidrolik iletkenliğini azaltmak ve böylece içindeki sızma akımını kontrol etmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir (USBR, 1976; Houlsby 1990; ICOLD, 1993; FERC, 2016). Özellikle de rijit-beton barajlar için geçirimsiz enjeksiyon perdesi drenaj sistemiyle birlikte barajın stabilitesini bozacak temel altında gelişen kaldırma basınçlarını azaltır (Casagrande, 1961; Ruggeri, 2004; Chai ve Cui, 2012). Dolgu barajlar için, kaya temelindeki yetersiz enjeksiyon işleminden kaynaklanan aşırı sızıntı veya kaçak, geçirimsiz baraj çekirdeğinin içsel erozyonuna yol açabilir.

Enjeksiyon işleminde kullanılan malzemenin etkinliği ve kalitesi çok sayıda faktör tarafından kontrol edilir (Bruce and Dreese, 2010). Bölgedeki jeolojik oluşumlar, anakayanın durumu ve konumu, zemin ve kayanın mühendislik özellikleri, süreksizlikler, geçirgenlik vb. gibi jeolojik faktörler enjeksiyon perdesinin başarılı bir şekilde inşa edilmesinde önemli rol oynarlar. Bunlar arasında, özellikle yeraltı suyunun transferine neden olan süreksizliklerin ve bunların sayısı, durumu özel bir öneme sahiptir (Ewert, 2012).

Barajların kaya birimlerinden oluşan temellerindeki enjeksiyon perdeleri, Houlsby (1990), Weaver (1991) ve Weaver ve Bruce (2007) dahil olmak üzere ilgili çeşitli ders kitaplarında anlatıldığı gibi, tecrübe ve deneysel yöntemlere dayanarak tasarlanabilmektedir. Son yıllarda enjeksiyon işlemiyle

İlgili teorik bilgi, esas olarak İsveç'teki KTH (Kraliyet Teknoloji Enstitüsü) ve Chalmers Teknik Üniversitesi'nde yürütülen araştırmalarla elde edilmiştir. Bu çalışmalarla birlikte artık çatlaklara basılan enjeksiyon malzemesinin yaklaşık yayılımını hesaplamak ve hangi çatlakların kapatılabileceğini tahmin etmek mümkün olmaktadır. Bununla birlikte temeldeki sızma basınçlarından kaynaklanan kaldırma etkisini önlemek için hangi enjeksiyon basıncının yeterli olabileceği tahmin edilebilmektedir.

Uzun yıllar boyunca deneme-yanılma ve pratik kurallar çerçevesinde tasarlanarak inşa edilen enjeksiyon perdeleri, son yıllarda yapılan araştırmalarla birlikte analitik hesaplama yöntemleri kullanılarak projelendirilebilmektedir. Bu kitap bölümünde analitik hesap yöntemi kapsamında ön tasarım aşamasındaki baraj enjeksiyon perdesi için gerekli tahkikler anlatılacaktır.

## 2. Enjeksiyon Uygulamasının Tarihçesi

Boşlukları ve çatlakları enjeksiyon malzemesiyle doldurarak yer yapısının özelliklerinin değiştirildiği enjeksiyon yöntemi, iki asır öncesinden beri uygulanmaktadır (Weaver ve Bruce 2007). Enjeksiyon uygulaması Avrupa'da doğmuş bir iyileştirme uygulamasıdır. Glossop'a (1960) göre, Charles Bérigny adlı Fransız bir mühendis, 1802'de Fransa'nın Dieppe kentinde bir su yolunun temelini iyileştirmek için enjeksiyon benzeri işlemi uygulayan ilk kişiydi. Enjeksiyon malzemesi olarak kullanılan şerbette puzolanik özelliğe sahip bağlayıcı malzeme kullanılmış ve daha sonra bu uygulamanın boşlukları kapatma açısından tatmin edici olduğu kanıtlanmıştır. Sonraki yıllarda, enjeksiyon işlemi Fransa'daki birkaç limanın inşasında ve onarımında kullanılmıştır. Su kaçaklarının enjeksiyon işlemiyle durdurma girişimleri Fransa'da 1818 yılında Rochefort'ta (tamamlanmadı) ve 1831 yılında ise Rhone-Ren kanalında da gerçekleştirildi. İkinci uygulama başarıyla tamamlanmış bir işlem olarak tarihe geçmiştir ancak küçük bir sızıntının da devam ettiği görülmüştür.

Enjeksiyon işleminde zamanla bağlayıcı malzeme kullanımında çimentoya yönelindi. Çimento enjeksiyonunun ilk defa kimin tarafından uygulandığına dair tartışmalar hala devam etmektedir. 1876 yılında Thomas Hawksley, İngiltere'deki Tunstall rezervuarındaki bir dolgu barajın temelindeki kayaya çimento enjeksiyonunu ilk uygulayan kişi olarak bilinmektedir. Bu uygulamada portland çimeno kullanıldı. Fakat uygulama sonrası kaçak 1886 yılında tekrar ortaya çıktı ve bu sorunda tekrar gerçekleştirilen iyileştici enjeksiyon uygulamalarıyla çözüldü. Boşluklu kaya kütlelerine enjeksiyon işlemi, kaya mühendisliği pratiğinde önemli bir adımdı ve kuzey Fransa'daki kömür yataklarının keşfinden sonra hızla gelişti (Glossop 1961). Çimento

enjeksiyonunun sistematik olarak uygulandığı ilk proje, ABD'nin New York şehrinde 1983'de inşa edilen New Croton Barajı'nın kireçtaşından oluşan temelindeki uygulamadır. Glossop (1961) bu projedeki amacın su kaçağını engellemek yerine kaldırma basınçlarının azaltılması olduğunu bildirmiştir.

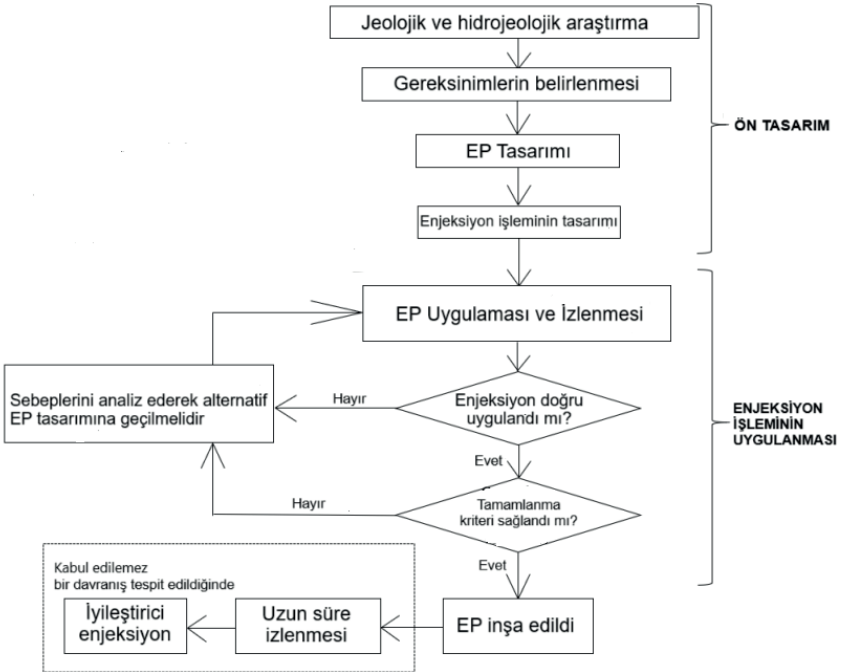
Küçük ölçekte birkaç katof tipinde enjeksiyon uygulamasından sonra, 1912 yılında Oregon, Portland'daki Estacada Barajı'nda enjeksiyon perdesi inşa edildi. Bu eneksiyon perdesi, ABD'de çimentolu enjeksiyon perdesinin ilk büyük uygulamasıydı (Weaver ve Bruce, 2007). Estacada Barajı'ndaki enjeksiyon işleminin ayrıntılarını anlatan teknik bir makale yayınlandı (Rands, 1914). Bu teknik makalenin baraj temellerindeki enjeksiyon perde uygulamasına dair ilk çalışma olduğuna inanılmaktadır. Glossop (1961), Hoover Barajı'nın (1932-1935 yılları arasında inşa edilmiştir) enjeksiyon perdesi için sistematik bir tasarım yaklaşımının kullanıldığı ilk barajlardan biri olduğunu bildirmiştir. 1933 yılında Maurice Lugeon, kendisinin adını taşıyan önemli bir hidrolik iletkenlik birimiyle kaya birimlerin hidrolik iletkenlik kriterlerini belirlemiştir. Lugeon'un çalışmaları, kaya kütlelerinin hidrolik iletkenliğini değerlendiren hidrojeolojik araştırma yöntemlerine büyük katkıda bulunmuştur ve belirlenen Lugeon değerleri, baraj temellerindeki enjeksiyon uygulamalarının gerekliliği konusunda kullanılmaya başlanan bir kriter olarak kısa sürede kabul görmüştür.

Lombardi ve Deere (1993) enjeksiyon şiddeti sayısı yöntemini (GIN yöntemi) geliştirdi. Bu yöntemde enjeksiyon perdesi uygulamasında enjeksiyon işlemi için harcanan özgül enerji hesaba katılarak, gerekli enjeksiyon basıncı belirlenebilmektedir. GIN yöntemi birçok ülkede barajlar için kullanılmıştır. Ancak, GIN yönteminin bazı koşullar altında uygulanabilirliğini sorgulayan tartışmalar devam etmektedir (Weaver ve Bruce, 2007; Rafi ve Stille 2015).

### 3. Enjeksiyon Perdesinin Tasarım Aşamaları

Bir enjeksiyon perdesinin (EP) doğru bir şekilde gereksinimleri karşılayan ve gerçekçi bir tasarımı için Şekil 2'de verilen akış şeması izlenebilir. Kaya birimlerindeki karşılaşılması muhtemel öngörülemez durumlardan dolayı EP'nin kesin ve mutlak bir tasarımı olmadığı için ön tasarım esasında değerlendirmeler yapılabilir. Bu ön tasarım esnasında kaya kütlelerinin kalitesinin ve süreksizliklerinin belirlenebilmesi için gerekli ve yeterli jeolojik araştırmaların yapılması gerekir. Bununla birlikte kaya kütlelerinin geçirimsizliğinin belirlenebilmesi için Basıncılı Su Testi (Lugeon Testi) gerçekleştirilmelidir. EP tasarımıdaki gerekli tahkikler, üç başlıkta incelenmektedir: i) Kaya kütlelerindeki çatlakların, boşlukların enjeksiyon

malzemesiyle doldurularak geçirimsizliğin sağlanması ve işlem sonunda kabul edilebilir rezidüel hidrolik iletkenliğin sağlanması. ii) Baraj temelinde sızmaya bağlı olarak gerçekleşecek kaldırma kuvvetlerinin minimize edilmesi. iii) Kaya birimlerindeki çatlakların arasını dolduran ve enjeksiyon malzemesinin nüfuz edip kapatamadığı kum ve kil benzeri dolgu malzemelerinin gelişecek sızma akımıyla içsel erozyona uğramasının engellenmesi. Kabul edilebilir rezidüel hidrolik iletkenlik gerekliliği ve çatlaklardaki dolgu malzemelerinin erozyona uğramasına ilişkin gereklilik her zaman birlikte yerine getirilmelidir. Ancak kaldırma kuvvetlerini en aza indirme gerekliliği, isteğe bağlı olarak yalnızca optimizasyon durumunda yerine getirilmelidir ve diğer iki kriter yerine getirilip barajın stabilite hesaplamalarında varsayılan kaldırma basınçları aşılmadığı sürece olası tüm tasarım alternatifleri için zorunluluk olmaktan çıkabilmektedir. Bu gereksinimlere ek olarak, kullanılan enjeksiyon malzemesinin tipi, jeokimyasal yönü ve yeraltı suyuyla etkileşimi de EP'nin durabilitesini etkiler ve belirli koşullar altında dikkate alınması gereken önemli bir sorun olabilir.



Şekil 2. EP Tasarımı ve Uygulamasının Akış Şeması

EP tasarımında imalatın pozisyonu belirlenerek, perde kalınlığı ve gerekli uygulama derinliği hesaplanmalıdır. Enjeksiyon işleminde ise kaya birimlerin yerinden oynamasına neden olacak hidrolik kaldırma basıncına dikkat edilerek enjeksiyon basıncı, enjeksiyonun yayılma çapı ve enjeksiyon delikleri arasındaki mesafe belirlenebilmektedir. Enjeksiyon işlemi sonrasında kontrol kuyularında Lugeon testi yapılarak rezidüel hidrolik iletkenlik kriterinin sağlanmasıyla EP inşaatı tamamlanmış oluyor. Fakat inşa edilen EP uzun süre izlenerek, baraj stabilitesini bozarak güvenliğini tehlikeye atacak bir durumla karşılaşılması durumunda iyileştirici enjeksiyon işlemleriyle bu durum ortadan kaldırılmalıdır. Eğer enjeksiyon işlemi doğru bir şekilde gerçekleştirilemiyor (kaya kütlesi hidrolik kaldırma kuvvetine maruz kalıyor vs.) veya tamamlanma kriteri sağlanamıyorsa buna sebep olan etkiler analiz edilerek alternatif EP ve/veya enjeksiyon işlemi tasarımına geçilmelidir.

### 3.1. Jeolojik Araştırmalar

Enjeksiyon perdesinin ön tasarım aşamasında saha araştırmaları kapsamında değerlendirilen jeolojik ve hidrojeolojik araştırmalar mutlak surette yapılmalıdır (Houlsby, 1990; Weaver ve Bruce 2007; Stille, 2015). Araştırma sonuçları, EP'nin gerekliliğini değerlendirmek, gerekli tahkiklerin yapılabilmesi için veri toplamak ve bunlara bağlı olarak doğru bir EP tasarımı belirlemek için kullanılmaktadır. Jeolojik ve hidrojeolojik araştırmalar sonucunda elde edilen bilgiler, saha koşulları da dikkate alınıp yorumlanarak belirsizliklerin ortadan kaldırılmasını sağlayabilmektedir.

Sahada gerçekleştirilen jeolojik araştırmalar; EP'nin uygulanacağı kaya kütleindeki çatlak/kırık deseninin bilgisini sağlamaktadır. Böylece kırıkları düzgün bir şekilde kesecek ve onları etkili bir şekilde kapatacak enjeksiyon delikleri tasarlanarak enjeksiyon işleminin optimize edilmesine yardımcı olunur. Sadece EP'nin tasarımı amacıyla kapsamlı bir jeolojik araştırma yapmak ne gereklidir ne de maliyet açısından uygundur. Enjeksiyon işleminin temel amacının kırıkları enjeksiyon malzemesiyle doldurarak kapatmak olduğu göz önüne alındığında kırık deseni ve özellikleri genellikle kaya kütlelerinin diğer özelliklerine kıyasla daha kritik bir öneme sahiptir.

Jeolojik araştırma tüm sahalarda özellikle de potansiyel olarak çok çeşitli kaya oluşumlarına sahip olabilecek büyük alanlar için çok önemlidir. Enjeksiyon işleminin farklı tasarım esaslarını ilgilendiren konularında kapsamlı araştırmalar yapılmalıdır. Baraj sahalalarında yamaç ve rezervuar sahalalarının sızma kapasitelerine bağlı tehditler de araştırma kapsamında incelenmelidir. Jeolojik araştırmalar yüzey incelemesi ve sondaj işlemleriyle gerçekleştirilebilmektedir (Palmström ve Stille, 2014). Houlsby (1990),

tarafından enjeksiyon perdesi tasarımını etkileyebilecek jeolojik özellikler aşağıda ifade edilmektedir:

- Kırık aralıkları: Kırık deseni ne kadar yoğun ise başarılı bir enjeksiyon yapmak o kadar zor olur.
- Kırık açıklığı ve sürekliliği: Kırık açıklıklarının boyutlarının büyük olması enjeksiyon malzemesinin daha kolay yayılmasını sağlar. Ancak bu durum kaya kütleindeki enjeksiyon işleminin başarılı bir şekilde tamamlanmasını zorlaştırabilmektedir.
- Kırık oryantasyonu: Eğim açısı  $0^\circ$  ile yaklaşık  $60^\circ$  arasında değişen kırıklar için dikey enjeksiyon delikleri en uygunu olabilir, aksi takdirde enjeksiyon deliği ile kırıkların kesişimi belirli düşey eğime sahip enjeksiyon delikleriyle sağlanabilir. Kırık deseninin karakterizasyonu ile ilgili en yaygın uygulama, BIPS kayıdır. Bu uygulamada sondaj kuyularının duvarları ve sondaj karotlarının kırık doğrultuları ve açıklıkları haritalanabilmektedir.
- Sahanın üniformluğu: Enjeksiyon deliklerinin düzenli yerleşim planı, üniform kırık desenleri için yeterli olabilir. Ancak daha karmaşık kırık desenlerinin olması veya sahanın farklı jeolojik birimlere bölünmesi durumunda farklı düşey eğimlerde ve düzensiz yerleşim planına sahip enjeksiyon perdeleri inşa edilebilmektedir.
- Kaya kütleinin kalitesi: Enjeksiyon deliklerinin duvarındaki düşük kaya kalitesi, enjeksiyon işlemini zorlaştırabilmektedir.
- Kaya kütleinin mukavemeti: Enjeksiyon işlemi genellikle güçlü, masif ve kendini iyi tutabilen kayalarda daha kolaydır.
- Kaya kütleindeki gerilme koşulları: Kaya kütlei için yüksek tektonik gerilmeler belirlenmiş ise enjeksiyon işlemi için özel iyileştirmeler ve işlemler gerekebilir.
- Erozyon: Enjeksiyon işleminden sonra gelişen sızma akımı enjeksiyon malzemesiyle kapatılan bölgedeki zayıf kırık duvarlarını veya kırıklardaki dolgu malzemelerini aşındırabilir. Bu erozyonu önlemek için enjeksiyon işlemi çok yüksek standartlarda gerçekleştirilmelidir.
- Kimyasal reaksiyonlar: Kaya kütlei veya enjeksiyon malzemesi, zararlı kimyasal etkileşime eğilimliyse daha yüksek standartta enjeksiyon işlemi gerekebilir.
- Karstik ve diğer boşluklar: Büyük boşlukların enjeksiyon işlemiyle doldurulabilmesi için özel yöntemler uygulanabilir.

Houlsby (1990) tarafından belirtilen öneriler dışında kırıklardaki dolgu malzemelerinin tanımlanması da jeolojik araştırmalar için önemli bir aşamadır (Palmström ve Stille, 2014). Sondaj deliğine yakın dolgu malzemelerinin çoğu sondaj sırasında yıkanıp gitti için BIPS kayıtlarında ve sondaj çekirdeklerinin haritalanmasında gözlemlenmeleri zorlaşmaktadır.

### 3.2. Hidrojeolojik Araştırmalar

Hidrojeolojik inceleme kapsamında gerçekleştirilen geçirimsizlik araştırmaları EP tasarım parametrelerinin ortaya konulmasında gerekli bir etüt çalışmasıdır. Çünkü EP uygulamasındaki amaç nihai sızma akımının minimize edilmesidir. Bu araştırma kapsamında en çok tercih edilen test yöntemi Basınçlı Su Testi olarak da bilinen Lugeon Testidir. Bu testin sonuçları, kuyuda kaya kütlelerinin belirli bir kademesine sabit basınç altında suyun enjekte edilmesiyle gerçekleşen su kaybının ölçülmesiyle değerlendirilmektedir.

1 Lugeon değeri, 10 atmosfer ( $\approx 10 \text{ kg/cm}^2$ ) basınç altında 1 dakika içerisinde kuyuda 1 metre uzunluğundaki kaya kütlelerine (1 metre kademeye boyuna) 1 litre su basılması sonucu elde edilmektedir. Birimi ise litre/metre/dakika'dır. Burada dikkate alınması gerekli olan husus enjekte edilen suyun basıncının, efektif basınç olarak dikkate alınması gerektiridir. Efektif basınç ise manometre basıncı ve statik su çizgisi yüksekliği toplamından boru, tij ve vana gibi elemanlarda oluşan yersel ve sürtünme yük kayıplarının çıkartılmasıyla hesaplanmaktadır. Bunun yanında Lugeon testinin gerçekleştirileceği kademe boyunun 5-6 m olması yeterlidir. Kademe boyu, kaya biriminin durumuna göre 1 m'ye kadar düşebilir. Çeşitli nedenler ile 10 atmosfer basınç altında deneylerin gerçekleştirilememesi durumunda Lugeon değeri Denklem 1'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir. Bu denklemde, Q: Kuyuya basılan su miktarı (litre/dakika), P: Su enjeksiyon basıncı ( $\text{kg/cm}^2$ ), L: Kademe boyu (m) değeridir.

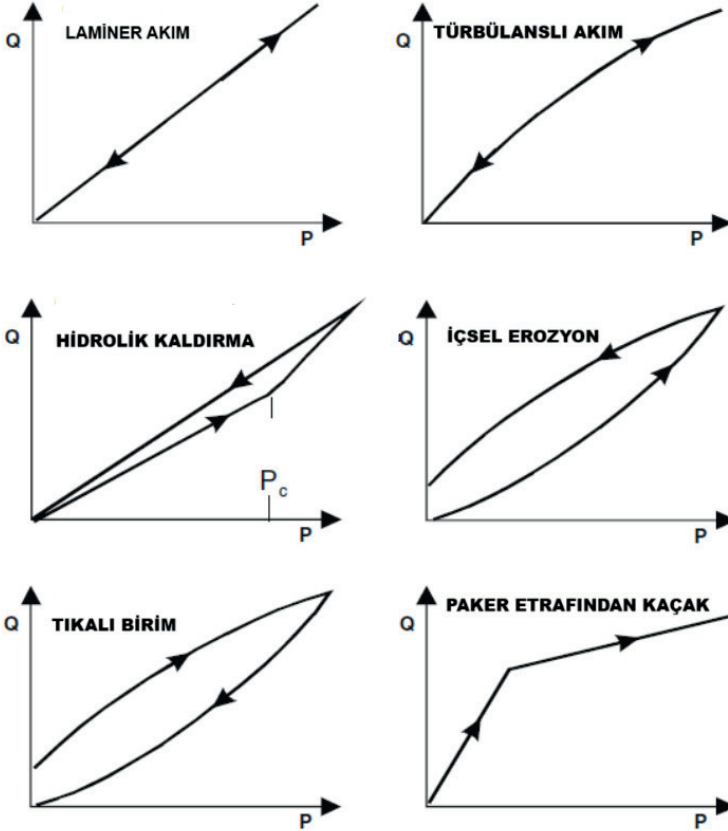
$$\text{Lugeon} = \frac{Q \times 10}{P \times L} \quad (1)$$

Lugeon testinde, paker test edilen kademe bölümünü kuyunun geri kalanından izole edecek şekilde yerleştirilmektedir. Çift paker genelde pekişmiş ve sağlam kayalarda uygulanmaktadır. Tek paker ise pekişmemiş zayıf kayalarda kullanılmaktadır. Lugeon değerleri kırık deseninden bağımsız bir şekilde belirlenmemelidir. Aynı Lugeon değerlerine tek bir büyük çatlak veya birçok ince kırıkla da ulaşılabileceği gerçeği göz önüne alındığında

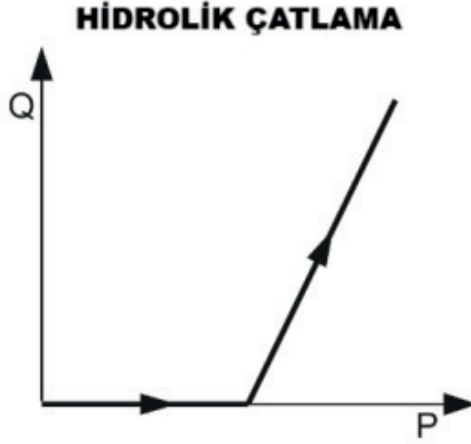


Lugeon değerlerinin yorumlanmasında jeolojik araştırma sonuçlarının da dikkate alınması gerekir.

Lugeon testi her bir kademede aşama aşama artış ve azalış gösteren toplamda beş su enjeksiyon basıncında gerçekleştirilmektedir. Düşük-Orta-Yüksek-Orta-Düşük su enjeksiyon basınçlarında gerçekleştirilen testlerde her bir enjeksiyon basıncında Lugeon değerleri hesaplanmalıdır. Lugeon testinde kuyuya basılan su miktarının, su enjeksiyon basıncına göre çizildiği grafikler için altı farklı senaryo gelişebilir (Stille vd., 2012) (Şekil 3). Bunun yanında kaya birimlerin su enjeksiyon basıncı etkisiyle çatlatılması olarak tanımlanan hidrolik çatlama senaryosunun değerlendirildiği Q-P eğrisi Şekil 4'de verilmektedir. Hidrolik çatlama senaryosunda, su enjeksiyon basıncı artmasına rağmen kuyuya basılan su miktarı belli bir noktadan (hidrolik çatlama basıncı) sonra artarak test gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3. Farklı Lugeon test sonuçlarının yorumlanması



*Şekil 4. Hidrolik çatlama senaryosu*

Weaver ve Bruce (2007) Lugeon testinde su enjeksiyon basınçlarının belirlenmesinde hidrolik çatlama basıncına ve kaya birimleri yerinden oynatan kaldırma basınçlarına dikkat edilerek kaya kütlelerinin dayanımının esas alınmasını önermiştir. Buna göre, zayıf kaya kütleleri için su enjeksiyon basınçları 2, 4, 6, 4, 2 kg/cm<sup>2</sup> ve sağlam kaya kütleleri için 10, 20, 40, 20, 10 kg/cm<sup>2</sup> değerlerinin uygun olabileceği ifade edilmiştir (Littlejohn, 1992).

### 3.3. Gerekli Tahkikler

#### 3.3.1. Geçirimsizlik Kriteri

Lugeon testi sonucunda hidrolik iletkenlik değeri (K) Moye formülü yardımıyla hesaplanabilir (Denklemler 2). Kademe boyu için basılan su miktarı (m<sup>3</sup>/s), L: Kademe boyu (m), ΔH: Su enjeksiyon basıncının su sütunu yüksekliği (m).

$$K = \frac{Q}{L \cdot H} \quad (2)$$

Lugeon değeri (Lu) ve hidrolik iletkenlik (K) esasta aynı anlama gelse de aralarındaki birim dönüşümü Denklem 3'de gösterildiği gibi yapılmaktadır.

$$K = Lu \times 1.3 \times 10^{-7} \quad (3)$$

Kademe derinliği boyunca kesitin transmisivitesi ( $T_s$ ) Denklem 4'de verildiği gibi hidrolik iletkenlik ve kademe boyuna bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$T_s = K.L \quad (4)$$

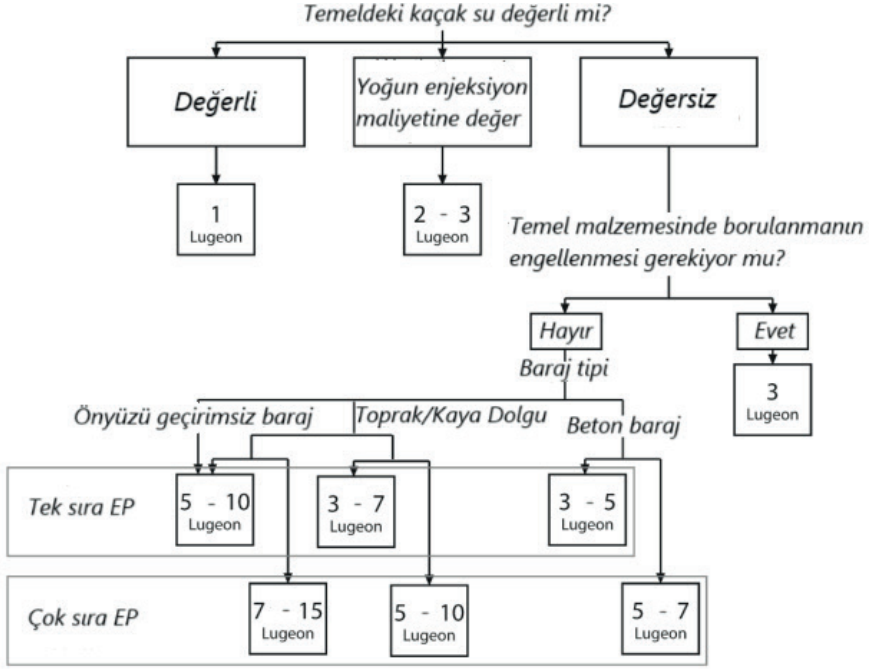
Kesit içerisindeki su geçirgenliğinin en büyük açıklığa sahip kırık tarafından kontrol edildiği kabulü yapılarak kesit içerisindeki maksimum hidrolik açıklık ( $b_{mh}$ ) Denklem 5'de gösterildiği gibi hesaplanabilir (Stille, 2015).  $\mu$ : Suyun 10 °C'deki dinamik vizkositesi ( $1.3 \times 10^{-3}$  Pa.s),  $k_2$ : 1.1~2.0 arasında değerler alabilen katsayı,  $\rho_w$ : Suyun yoğunluğu ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$ : Yerçekimi ivmesi ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) değerini ifade etmektedir.

$$b_{mh} = \sqrt[3]{\frac{T_s \times 12 \mu}{k_2 \times \rho_w \times g}} \quad (5)$$

Gerçek kaya kütlesi ortamında enjeksiyon malzemesinin alımını kırığın fiziksel açıklığı ( $b_h$ ) belirlemekte olup, kırığın fiziksel açıklığı hidrolik açıklığın kabaca 1.5~2 katı olarak alınabilmektedir. Ve aynı zamanda  $k_3$  katsayısı olarak da tanımlanabilmektedir (Zimmerman ve Bodvarsson, 1996).

Baraj temelinde bulunan kaya kütesinin hidrolik iletkenliğinin düşürülmesiyle ilgili gereksinim ön tasarım esnasında karşılanmalıdır. Lugeon değerlerinin Denklem 3'de gösterildiği gibi birim dönüşümleri yapılarak Denklem 6'daki hidrolik iletkenlik kriteri sağlanmalıdır. Bu denklemde,  $K_g$ : Hesaplanan rezidüel hidrolik iletkenlik değeri,  $K_{exp}$ : Gerekli rezidüel hidrolik iletkenlik değerini göstermektedir. Gerekli rezidüel iletkenlik değeri Şekil 5'den projenin niteliğine bağlı olarak seçilebilir (Houlsby, 1990).

$$K_g \leq K_{exp} \quad (6)$$



*Şekil 5. Gerekli rezidüel lugeon değerleri*

Baraj enjeksiyon perdesi uygulamasından sonra beklenen rezidüel iletkenlik değeri ( $K_g$ ) Denklem 7'de verildiği gibi hesaplanmaktadır (Stille, 2015). Denklemdaki değişkenlerden biri olan  $k_1$ , Lugeon test derinliğinde kesitlerin ortalama transmisivite değerinin maksimum transmisivite değerine oranı olarak tarif edilmekte ve genellikle 0.2~0.6 arasında değişen değerler almaktadır.  $b_{crit}$  değeri ise enjeksiyon malzemesinin serbestçe akabileceği en büyük kırık açıklığıdır ve laboratuvar testleri sonucu belirlenebilmektedir (Stille, 2015). Aynı zamanda seçilen enjeksiyon malzemesinin kontrolü de Denklem 7'de  $K_g$ 'nin hesaplanmasıyla yapılabilmektedir.  $k_4$ ,  $b_{crit}$  değerinin, enjeksiyon malzemesiyle tamamen kapatılabilecek kırık açıklığına oranı olarak dikkate alınmaktadır.

$$K_g = \frac{k_1 k_2}{k_3 k_4} \frac{1}{L} \frac{\rho g}{12\mu} b_{crit}^3 \quad (7)$$

### 3.3.2. Kaldırma Basıncı Kriteri

Enjeksiyon perdesi uygulaması, baraj gövdesinde etkili olan temeldeki boşluk suyu basınçlarından kaynaklanacak kaldırma basıncı potansiyelini

azaltmaktadır. Özellikle beton barajlar için bu kritere çok dikkat edilmelidir. Kaldırma basınçlarındaki düşme etkisi baraj gövdesinde kullanılan malzemelerin metrajını azaltmaya ve dolayısıyla maliyetini düşürmeye yardımcı olabilmektedir. Ancak baraj güvenliği için birçok rehber ve şartname EP uygulamasıyla kaldırma basınçlarındaki azalmanın baraj tasarım hesaplarında dikkate alınmasını önermemektedir. Buna rağmen hidrolik iletkenliği düşürmek ve barajın uzun vadede güvenliğinden ödün vermeden enjeksiyon perdesi tarafından sağlanan düşük kaldırma basınçlarına ulaşmak yine de faydalıdır.

### 3.3.3. İçsel Erozyon Kriteri

Kaya kütlelerinde kırıklardaki daneli zemin olarak yer alan dolgu malzemelerinin içsel erozyonunun ön tasarım aşamasında önlenmesine dair gerekli tahkikler yapılmalıdır. Yüksek hidrolik eğim sonucu gelişen büyük sızma hızları enjeksiyonlu bölgelerdeki dolgu malzemelerini erozyona uğratarak yeni akış yollarının oluşmasına neden olurlar. Bu durum EP'nin durabilitesini tehdit eder ve barajın stabilitesini de tehlikeye atar. Bu gereksinimin karşılanması için EP uygulaması sonrası hesaplanan hidrolik eğim ( $i_g$ ), Denklem 8'de ifade edildiği dolgu malzemesinin taşınmasına neden olan kritik hidrolik eğimle ( $i_{crit}$ ) mukayese edilmelidir.

$$i_g < i_{crit} \quad (8)$$

Kırıklardaki dolgu malzemeleri kil ve kum zeminler olabilir. Buradaki en önemli tartışmalardan bir tanesi de kohezyonlu (kil) zeminlerin sızma akımıyla taşınıp taşınamayacağıdır. Dispersif olmayan zeminler için kritik hidrolik eğimlerin, dispersif zeminlere göre daha büyük olacağı kuşkusuz bir gerçektir. Bunun yanında taşınmayı başlatan sızma akımı hızlarının kohezyonsuz (kum) zeminler için görece kohezyonlu zeminlere göre daha düşük olacağı da bir gerçektir.

## 4. Sonuç

Bu kitap bölümü kapsamında baraj enjeksiyon perdesinin tasarımındaki gerekli tahkiklerden olan geçirimsizlik, kaldırma basıncı ve içsel erozyon kriterleri detaylandırılarak anlatılmıştır. Özellikle bu tahkiklerin gerçeğe yakın sonuçlar verebilmesi için doğru ve etkin jeolojik-hidrojeolojik saha araştırmalarının yapılması kesinlikle tavsiye edilmektedir. Jeolojik araştırmalar kapsamında kaya kütleindeki kırık deseni, kırık açıklık boyutu, kırık doğrultu-eğimi ve kırık içerisindeki dolgu malzemesinin varlığı hakkında verilerin toplanması; baraj enjeksiyon perdesinin imalatını kolaylaştıran ve imalat sonrasındaki durabilitesini koruyan en kritik işlemdir. Bu sebeple, baraj

sahalarındaki kaya formasyonların tabakalanma, kıvrımlanma, eklemleme, faylanma ve diskordans-konkordans gibi yapısal jeolojik araştırmalarının mutlak surette en etkili bir şekilde yapılması önerilmektedir. Yapısal jeolojik araştırmalar kapsamında da kırık doğrultu-eğimlerinin, açıklık miktarının ve kırık açıklığındaki dolgu malzemesinin gözlemlenebildiği hat etütü çalışmalarının da yapılmasının faydalı olacağı düşünölmektedir.

## Kaynakça

- Bruce, D. A., & Dreese, T. L. (2010). Specifications for Rock Mass Grouting. In Proceedings of the Association of State Dam Safety Officials Conference on Dam Safety.
- Casagrande A (1961) Control of Seepage through Foundations and Abutments of Dams *Geotechnique* 11:161–182.
- Chai J, Cui W (2012) Optimum thickness of curtain grouting on dam foundation with minimum seepage pressure resultant Structural and Multidisciplinary Optimization. 45:303–308
- Ewert, F. K. (2012). Rock grouting: with emphasis on dam sites. Springer Science & Business Media.
- Federal Energy Regulatory Commission (FERC) (2016) Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects: 3 revised chapter 3—gravity dams. Federal Energy Regulatory Commission, Washington
- Glossop, R. (1960). The invention and development of injection processes. Part I, 1802-1850. *Geotechnique*, Vol. 10(No. 3), 91-100.
- Glossop, R. (1961). The Invention and Development of Injection Processes Part II: 1850–1960. *Geotechnique*, Vol. 11(No. 4), 255-279
- Houlsby AC (1990) Construction and design of cement grouting. John Wiley and Sons, New York
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1993) Bulletin 88: rock foundation for dams. International Commission on Large Dams, Paris
- Littlejohn, G. S. (1992). Report on Session 2: Consolidation Grouting. Paper presented at the Grouting in the ground, London.
- Lombardi, G., Deere, D. (1993). Grouting Design and Control Using the GIN Principle. *International Water Power and Dam Construction*, Vol. 45(No. 6), 15-22.
- Palmström, A., Stille, H. (2014). Rock Engineering, second edition: ICE Publishing
- Rafi, J. Y., Stille, H. (2015). Applicability of Using GIN Method, by Considering Theoretical Approach of Grouting Design. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 33, 1431–1448.
- Rands, H. A. (1914). Grouted Cut-Off for the Estacada Dam. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 40(No. 1), 3-38
- Ruggeri G (2004) Uplift pressures under concrete dams: final report. ICOLD European Club
- Stille, H. (2015). Rock Grouting - Theories and Applications. Stockholm: BeFo-Rock Engineering Research Foundation

- Stille, H., Gustafson, G., Hässler, L. (2012). Application of New Theories and Technology for Grouting of Dams and Foundations on Rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 30, 603-624
- United States Bureau of Reclamation (USBR) (1976) Design of Gravity Dams—Design Manual for Concrete Gravity Dams. Denver
- Weaver, K. D. (1991). *Dam Foundation Grouting*. New York: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Weaver, K. D., Bruce, D.A. (2007). *Dam Foundation Grouting, Revised and Expanded Edition*. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Zimmerman, R. W., Bodvarsson, G.S. (1996). Hydraulic Conductivity of Rock Fractures. *Transport in Porous Media*, Vol. 23, 1-30.