

# EYS kuralı ile enjeksiyon projelendirmesi ve kontrolü

*G.Lombardi, D.U. Deere,*

(Water Power and Dam Construction, June, 1993)

*Çeviren : Adil Öktem* D.S.İ. Bölge Müdürlüğü, Antalya

*Bu makalede kütlelerinin enjeksiyonunuda geliştirilen EYS yöntemi sunulmaktadır. Yöntemin ana unsurları 1- enjeksiyon işleminde ağırlıkça S/Ç oranı 0.67 - 0.81 arasında olan ve karışımın sokulabilirliğini arttırmak için süper akışkanlaştırıcı katılmış tek tip karışım kullanılması; 2- düşükten ortay değişen düzenli pompalama debisi altında belirli bir süre aşılmaya karışımın kaya çatlaklarına daha fazla sokulmasını sağlamak için enjeksiyon basıncının göreceli olarak arttırılması; 3- PC grafikler aracılığı ile basınç, akış oranı, basılan miktar ve sokulabilirliğin zamana karşı; işlem anındaki eğrilerinin çizilerek gözlenmesi ve 4- enjeksiyon seyrinin; görüntülenen basınç - toplam alış diyagramının sınırlama basıncı, sınırlama hacmi veya enjeksiyon yoğunluk eğrilerinden birisiyle (ki bunlar seçilmiş EYS hiperbolik eğrisi tarafından belirlenmiştir) kesiştiğinde enjeksiyona ara verilmesidir. EYS hiperbolik eğrisi tüketilen enerjinin bir ölçümü olarak sabit bir pxV eğrisidir. Deneyimler bir çok ülkenin büyük hidroelektrik projelerinde kullanılan yöntemin teknik ve ekonomik açıdan etkili olduğunu göstermiştir.*

## Giriş

Kaya kütlelerinin mekanik ve hidrolik özelliklerinin çimento karışımları kullanılarak iyileştirilmesi inşaat mühendisliği uygulamalarında oldukça iyi gelişim göstermiştir. Bu uygulamalar sık sık dogmatik inançlara sürüklense de baş parmak kuralı ve kişisel veya kurumsal deneyimlerce yönlendirilmiştir.

Yazarlar son 25 yıllık dönemde; çeşitli ülkelerdeki inşaat halindeki büyük hidroelektrik projelerin; projeci-

si, jeoteknik mühendisleri, jeologları ve arazi kontrol mühendisleri ile sık sık bir araya gelerek enjeksiyon işleminin laboratuvar deneyleri, teori ve arazi araştırmaları ile birlikte daha iyi anlaşılmasına çalışmışlardır. Farklı enjeksiyon karışımlarının kohezyon (Yield mukavemeti) ve dinamik viskozitesi, akış ve sokulum özellikleri üzerine yapılan teorik çalışmalar, enjeksiyon basınçları ve alışları üzerindeki arazi gözlemleri; yazarları bu makalede tartışılacak olan Enjeksiyon Yoğunluk Sayısı (Grouting Intensity Number, EYS) kavramına yöneltmiştir.

Sunulan yorumlar taneli zeminler için de kullanılabilirse de; bu makale yalnızca kaya kütlelerinin enjeksiyonu ile ilgilidir. Yeraltı işleri ve konsolidasyon enjeksiyonlarından daha ziyade enjeksiyon perdelerine önem verilmiştir. Gerçekte EYS yöntemi perde dışındaki işlerde de bir kaç kez uygulanmıştır.

Bu makale enjeksiyonda gelinen seviyeyi ve son yıllarda yayımlanan kitaplarda belirtilen durumu gözden geçirmeyi amaçlamamaktadır. Bununla birlikte temel teorik bilgi ve EYS yöntemine ulaşmayı sağlayan teorik ve pratik bilgiler özet olarak verilmiştir. Kabullerin kanıtlanmış etkinliği, daha başarılı sonuçlar, basitlik ve daha ekonomik enjeksiyona ulaşma; yazarları yöntemi daha geniş kitlelere ulaştırmaya yöneltmiştir.

## Enjeksiyon akışı ve sokulumunun teorik kabulleri

Su ve yağ gibi Newtoniyen akışkanlara benzemeyen akışkanların reolojik davranışları yalnızca viskozite parametresi ile belirlenirken, duraylı bir enjeksiyon karışımı akış sırasında viskozite ve kohezyonun (Yield mukavemeti) etkisi altında Bingham akışkanı gibi davranır. Her ikisi de akışa direnç gösteren parametrelerdir, viskozite akış oranını yönlendirirken kohezyon (enjeksiyon uygulamasında belirli bir basınç altında ve belirli bir kaya çatlak açıklığında) hareket uzaklığını yönlendi-

rir. Geliştirilen formüller maksimum hareket uzaklığı-  
nı, maksimum miktarı ve maksimum hidrolik kaldırma  
kuvvetlerini hesaplamada kullanılmaktadır. (6-11)

Bu noktada maksimum hareket uzaklığı; doğru  
orantılı olarak uygulanan enjeksiyon basıncına ve çat-  
lak açıklığına bağlı iken ters orantılı olarak da karışı-  
mın kohezyonuna bağlıdır. Bu durumda; ince kaya çat-  
laklarında enjeksiyonun sokulumunu arttırabilmek için  
ya basınç artırılmalıdır veya kohezyon azaltılmalıdır  
veyahut her ikisi de yapılmalıdır.

Muhtemelen Bingham akış eşitliğinin en büyük de-  
ğeri enjeksiyon işlemi sırasında sağlanmaktadır. Bu de-  
ğer faktörlere bağlı olarak kaya çatlaklarına enjeksiyon  
sokulumunu ve enjeksiyon işlemi sırasında yaratılan  
ayrım kuvvetlerini etkiler. Duraylı karışımlar (1 000  
ml silindir numune üzerinde 2 saat sonraki çökmesi  
%5'den az olan) yaklaşık Bingham akışkanlığı davranışı  
gösterirler, bu eşitlikleri duraysız ve sulu karışımlara  
uygulamak olanaksızdır. Çimentonun su içinde duray-  
sız olduğu ince karışımlar veya bulamaç suspansiyon-  
larda; kaya çatlakları içinde enjeksiyon akışı sırasında  
aşırı çökme, erozyon, yeniden suspansiyona dönüş-  
me ve yeniden çökme davranışlarının görülebileceği  
beklenebilir. Bu durumları Bingham akış veya benzeri  
denklemlerle öngörmek ve karakterize etmek olanaksız-  
dır.

Aşağıda karışımın seçimine etki eden diğer etmen-  
ler açıklanmıştır.

## Karışımın seçimi

Kalın ve ince karışımlar üzerine tartışmalar daha  
uzun yıllar sürecektir. Yazarlar 1985 yılından bu yana  
tercihlerini kalın karışımlar yönünde kullanmışlardır  
(5-11). Çökelmeyi azaltma ve karışımı duraylı hale ge-  
tirme amacıyla karışıma %1-2 oranında bentonit katıl-  
ması işlemi; akışkanlaştırıcı katkı maddesi eklenmiş  
yüksek miktarda çimento içeren karışımların kullanıl-  
ması ile yer değiştirmiştir. Bu tür karışımlar az kohez-  
yon nedeniyle duraylıdır ve daha fazla sokulabilirliği  
ile katılma sonunda daha fazla mukavemete ulaşırlar.

Geleneksel olarak kalın karışım savunucuları; kalın  
karışımların enjeksiyon işlemi ve karışımın katılma-  
masından sonraki kullanım süresi içerisinde birçok  
avantajları olduğunu belirtmişlerdir.

İnce karışımlarla kıyaslandığında kalın, duraylı ka-  
rışımlar enjeksiyon sırasında aşağıdaki avantajlara sa-  
hiptir:

- düşük akış şartlarında çimento tanecikleri daha az  
çökeler

- akış yollarının dar zonlarında sokulum veya sıkış-  
ma şartlarında az kanama suyu (bleeding water) bırak-  
ması nedenleriyle daha az yalancı bloklama olur

- zamana ve mesafeye bağlı yüksek duraylılık (belir-  
lenen kohezyon ve dinamik viskozite ile Bingham akış-  
kanı) ve

- karışımın kohezyonunun sonucu olarak enjeksi-  
yon kuyusundan uzakta hızlı basınç düşüm nedeniyle  
hidrolik ayrılma veya hidrolik kaldırma da denilen hid-  
rolik kırılma ve jeolojik tabakaların altkaldırma riskinin  
azlığı. Böyle bir durum oluşsa bile çatlaklar yüksek ka-  
litedeki karışımla dolacaktır.

Katılmış enjeksiyonun kullanımı süresince ince  
karışımlara oranla kalın karışımların avantajları aşağı-  
da belirtilmiştir.

- katılma sırasındaki az büzülmenin sonucu ola-  
rak kaya çatlaklarının duvarları boyunca büyük bükül-  
me (bond) direnci ve bunların yeniden açılma olasılığı  
azdır,

- yüksek çimento içeriğinin sonucu olarak yüksek  
yoğunluk ve yüksek mekanik özellikler göstermesi ve  
bu nedenle borulanma ve erozyona karşı yüksek direnç  
göstermesi ve

- az boşlulukluk, az geçirimsizlik ve yüksek bükülme  
kuvvetine bağlı olarak yıkanmaya karşı yüksek muka-  
vemet ve baraj kullanımı süresince yüksek duraylılık.

İnce karışımlarla karşılaştırıldığında kohezyonu  
nedeniyle duraylı karışımları aynı uzaklığa ulaştırabil-  
mek için yüksek basınç gerekir. Bununla birlikte karışı-  
ma eklenen az miktardaki akışkanlaştırıcı sayesinde  
karışımın viskozite ve kohezyon parametreleri aşağı-  
ner.

Mevcut uygulama; arzulanan yoğunluk ve mukave-  
meti elde etmek için bir çok büyük projede ağırlıkça S/  
Ç oranı olarak 0.67 - 0.81 arasındadır. Ve enjeksiyonun  
yerleştirilmesi sırasındaki kohezyonunu düşürmek için  
karışıma az miktarda akışkanlaştırıcı katkı maddesi  
eklenmiştir. Farklı çimento ve farklı akışkanlaştırıcı-  
lar kullanılarak elde edilen karışımların akış, çökme,  
katılma ve mukavemet özellikleri laboratuvarlarda test  
edilmiştir.

Kohezyon ve viskozite özellikleri laboratuvarla kon-  
santrik (consentric) silindirik döner viskozimetrelerde  
saptanabilir (5-6). Bu alet karışıma daldırılmadan önce  
ve sonra tartılan 1.5 mm kalınlığında, 100x100 mm bo-  
yutlarında çelik bir levhadır. Ölçülen ağırlıklar iki yü-  
zeyin toplam alanına bölünür ve değerler arasındaki  
fark kesme mukavemeti birimi olarak kohezyon para-

metresini verir. Bağlı kohezyon değeri (Cr); kohezyon (C) değerinin, karışımın birim ağırlığına (g) bölünmesiyle ifade edilebilir ( $Cr = C/g$ ). Genel olarak mm cinsinden ifade edilir ve kalın karışımlar için bu değer 0.2 - 0.35 mm arasındadır. Katkı maddesi ile bu değer tavsiye edilen değer olan 0.08 - 0.15 mm düzeyine iner. Elde edilen Cr değeri gerçekte kohezyon levhasının her bir yüzeyine yapışan karışımın kalınlığıdır. Kohezyon levhası; üzerinde kırıntılar tarafından oluşturulan kesişen yivlerden temizlenmelidir. Bu nedenle çelik yüzey ile enjeksiyon karışımı arasındaki yapışma; levha yüzeyine yapışan enjeksiyon tabakasının yüzeyi ile geride kalan arasındaki kohezyondan daha büyük olacaktır. Aksi durumda bütün enjeksiyon kayıp gidecektir.

·Laboratuvarında elde edilen diğer tipik değerler özgül ağırlık 1.59 - 1.67 t/m<sup>3</sup> (99.2 - 104.2 lb/ft<sup>3</sup>), Mars hunisi akış zamanı 29 - 32 s ve 28 günlük mukavemeti 15 - 20 MPa (2250 - 3000 lb/in<sup>2</sup>) şeklindedir.

Gözönünde bulundurulması gereken diğer bir husus, yeraltı su tablası üzerinde kuru kay ortamında yapılan enjeksiyon kalınlaşabilir ve bu ise karışımın kohezyonunu (ve içsel sürtünmeyi) artırarak enjeksiyonun basılamayacağı noktaya ulaşmasına neden olur. Bunu önlemek için enjeksiyondan önce, enjeksiyon yapılacak ortama belirli bir süre su basılarak doymun hale getirmek ihtiyatlı bir tedbirdir. Ayrıca karışıma su tutucu katkılarda katılabilir.

İnce çatlaklı kayanın enjeksiyonunda, enjeksiyonun sokulumu karışımın aşırı su ile seyrelmesinden daha ziyade çimento tanelerinin ve topakların boyutuna bağlıdır. Bu nedenle yüksek sokulum özelliğini sağlamak için karışımı su ile inceltmek yerine; akışkanlaştırıcı ve ince çimento ile birlikte yüksek enjeksiyon basınçları kullanılmalıdır.

Laboratuvarında yapılan araştırmalar sonucunda arzulanan mekanik özellikleri taşıyan karışım belirlendikten sonra, bir projenin bütün enjeksiyon işlemlerinde aynı karışım kullanılmalıdır. Tek tip karışım kullanmanın diğer bir yararı ise enjeksiyon işleminde büyük kolaylıklar sağlamasıdır.

## Enjeksiyon işlerinin projelendirilmesi

Bir enjeksiyon perdesinin projelendirmesi aşağıdaki ana hususları içerir. Karışım, kuyu aralığı ve derinlik, enjeksiyon sırası, hacim ve basınç sınırlaması da dahil enjeksiyon işlemi ve arazideki kontrolün tanımlanması. Çalışılacak sahanın jeolojisinin çok iyi bilinmesi bu hususların belirlenmesinde çok büyük yararlar sağlayacaktır. Özellikle; enjekte edilecek kaya kütlelerinin süreksizliklerinin tip, sıklık, çatlak açıklığı, pürüzlülük, alte-

rasyon veya dolgululuk ve uzanımı gibi fiziksel özellikleri önemlidir. Gerilmelerin yerindeki durumu ve yeraltı suyuda gözönünde bulundurulmalıdır.

Mevcut jeolojik ve jeoteknik koşulların yeterince bilinmesine ek olarak projenin gerilim aşamasındaki değişimler ve hidrolik basınçların zamana bağlı değişimleri (rezervuarda su tutma ve su boşaltma aşamaları gibi) hesaba katılmak zorunluluğundadır.

Bu makale bütün bu konularda söylev vermeyecek yalnızca daha önemli olan hususlara değinecektir.

## EYS yönteminin gelişimi

### Açık, geniş çatlakların enjeksiyonu

Uygulamadaki gözlemler ve kuramsal çalışmaların her ikisi de kaya kütlelerindeki geniş ve açık çatlakların enjekte edilmeye hazır olduklarını göstermektedir. Karışımın yayılım uzaklığı oldukça yüksektir (bir kaç on metre gibi). İşte bu gibi durumlarda enjekte edilecek karışım miktarını ve yayılım uzaklığını azaltmak; hem uygulama hem de ekonomik açıdan gereklidir. Bu sınırlama 3 değişik seçenikle yapılabilir. 1- Sokulumu az karışım (kalın ve yüksek kohezyonlu) kullanmak, 2- enjeksiyon basıncını ve 3- karışım miktarını sınırlamak.

Sınırlama kriterinin saptanmasından önce kaya kütlelerinde ince çatlakların da olabileceği dikkate alınmalıdır. Geniş ve açık çatlakların dolması aşamasına kadar enjekte edilecek oldukça zordur. Ancak; ilk aşama enjeksiyon sırasında bu çatlakların bir kısmını enjekte etmek arzu edilir. Bu nedenle karışım kalınlaştırılmamalı süper akışkanlaştırıcı katkıları ile orta kalınlıkta ve duraylı olmalıdır. Basıncı sınırlama seçeneği ise ince çatlakların enjeksiyonunu azaltacağından cazip değildir. Geriye en uygun çözüm olarak miktar sınırlama seçeneği kalmaktadır.

### İnce çatlakların enjeksiyonu

Geniş veya açık çatlakların enjeksiyonundan sonra veya enjekte edilecek bölgede bu tür çatlakların olmaması durumlarında önceliği ince çatlaklar alır. Böyle bir enjeksiyon düşük kohezyonlu ince karışım veya yüksek basınç kullanılarak sağlanabilir. Yüksek akışkanlaştırıcı, orta kalınlıklı yüksek kaliteli karışım ile birlikte basıncı yükseltmek oldukça yaygındır. İnce karışımların yayılım uzaklığı azdır. Çünkü enjeksiyon basıncı uygulandığı kuyunun çevresinden uzaklaştıkça hızlı bir şekilde azalır. Toplam alt kaldırma basıncı yüksek enjeksiyon basınçlarında bile bir kural olarak üstteki kütlelerin ağırlığından az olmalıdır. Üstteki 5 - 10 m'lik kısım hariç kaya çatlaklarında ve tabakalanma düzlemlerinde hidrolik kırılma nadiren karşılaşılan bir sorundur. Sonuç olarak enjeksiyon alışlarının az oldu-

ğu durumlarda 30 - 40 bar'a kadar olan oldukça yüksek enjeksiyon basınçları (ki enjeksiyon aralıklarında 3 - 5 Mpa (425 - 570 lb/in<sup>2</sup>) olarak hesaplanmıştır) kabul edilebilir basınçlardır.

Bu faktörler gözönünde bulundurulduğunda; alış az olduğunda önerilen enjeksiyon basıncı günlenme, tabakalanma, zayıf zonlar, gerilmelerin yerindeki durumu ve diğerleri gibi jeolojik koşullara, gelecekteki su basıncına ve arzulanan enjeksiyon yoğunluğuna bağlı olarak 30 - 50 bar (3 - 5 MPa) aralığında önerilmektedir. Böylelikle EYS prensibinin ilk iki ögesi ortay çıkmış olmaktadır. Karışımın düşük basınçlarda kolayca verilebildiği durumlarda miktar sınırlaması ve karışımın güçlülükle girebildiği durumlarda ise basınç sınırlaması. Geriye ara oranlar kalmaktadır. Ancak bu ara oranların belirlenmesinden önce diğer enjeksiyon kabullerine kısaca göz atmak yararlı olacaktır.

### Enjeksiyon kuyularında seri olarak araya girme

Genel uygulama olarak çevreyi fazla etkilememeleri için birincil kuyular az geniş (10-12m) aralıkla açılarak enjekte edilmektedir. Genellikle diğer birincil kuyulardan önce araştırma kuyusu olarak hizmet etmeleri için her üçüncü veya dördüncü birincil kuyuların delinerek enjekte edilmesi belirtilmiştir. Bu kuyular genellikle karotlu olarak ve toplam derinliklerinin 0.75 x H'ı derinliğine (H= gelecekteki rezervuar yüksekliği) kadar su testli olarak açılırlar. Diğer birincil kuyuların derinlikleri ilksel araştırma kuyularından elde edilecek sonuçlara bağlı olarak düzenlenebilir. İkincil kuyular birincil kuyuların arasına gelecek şekilde açılırlar. Bu kuyular birincil kuyulardan 5 - 6 m uzaklıkta oldukları için zaman zaman katlanmış enjeksiyon karışımları ile özellikle geniş çatlaklarda karşılaşılabirler. Genel olarak alış miktarları birincil kuyulara nazaran azdır. Yeniden 2.5 - 3 m aralıklara girilerek açılan üçüncül kuyular daha az alışlı ve bu kuyulardan 1.25 - 1.5 m uzaklıktaki dördüncül kuyular ise kabul edilebilecek oranda düşük enjeksiyon alış ile sonuçlanırlar.

Her bir fazdan sonra; kayanın oldukça geçirimsiz duruma gelmesi nedeniyle bir sonraki aşamaya enjekte edilememiş ince çatlaklar kalır ve bu durumda etkili bir enjeksiyonu sağlamak için yüksek basınç uygulamak yararlı olur. Böylece EYS prensibinin üçüncü faktörü şu şekilde tanımlanabilir: aşamalı olarak ince çatlakları enjekte edebilmek ve kayayı sıkılaştırabilmek için aşamalı yüksek basınç uygulamak.

### Basınçlı su deneyleri (Lugeon)

Basınçlı su deneyi (Lugeon deneyi) enjeksiyon karışımını belirlemeye yardımcı olması amacıyla sıkça uygulanır. Deneyimler ve teori Lugeon değerleri ile enjek-

siyon alışları arasında çok zayıf ilişki olduğunu göstermiştir. Lugeon veya benzeri deneyler hala kullanılmaktadır. İlksel araştırma kuyularında bu deney yardımıyla; yamaçlar ve baraj temeli bölgelerindeki geçirimsizlikle ilgili genel bilgi sahibi olunur. Geçirimsizlikte yeterli bir azalmanın olup olmadığını görebilmek için enjeksiyondan sonra açılan kontrol kuyularından elde edilen değerlerle karşılaştırma yapılır.

## EYS yöntemi

### Tüketilen özgül enerji

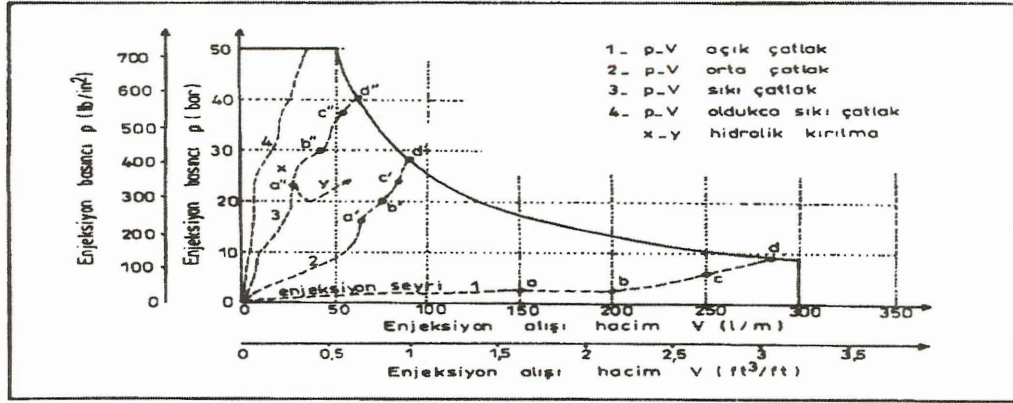
Bir kaya zonunu daha yoğun enjekte edebilmek için daha fazla enerji tüketilmelidir. Bir enjeksiyon aralığındaki tüketilen enerji yaklaşık olarak nihai enjeksiyon basıncı (p) ile enjekte edilen miktarın (V) çarpımının ürünü (pxV) ile doğru orantılıdır. pxV sayısı; Enjeksiyon Yoğunluk Sayısı (EYS) olarak adlandırılır. Alış, kademenin boyu düşünülerek litre / metre (l/m) olarak birimlendirilir (veya çimento ağırlığı olarak kg/m kullanılır; çünkü orta kalın karışımlar için sayısal değerler %5-%10 aralığında birbirlerine benzerler). Her ne kadar diğer birimler uygun dönüştürmeler yapmak için açıklıkla kullanılabilirse de basınç için genellikle bar birimi kullanıldığından; sonuç olarak EYS'nin veya pxV'nin birimi bar x l/m'dir.

### EYS sabiti kullanımının avantajları

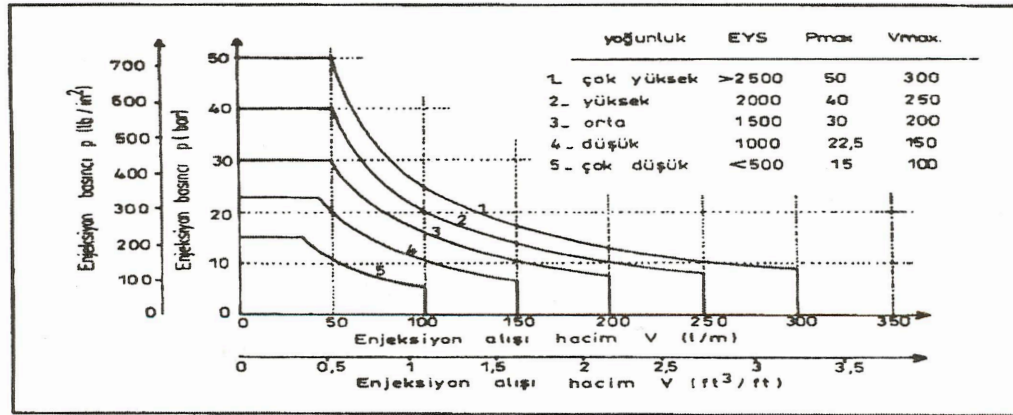
EYS yönteminde öncelikle enjeksiyon yoğunluk seviyesinin seçilmesi gerekir (200 bar x l/m gibi) bu değer; düşük basınçlarda yüksek alışlar yapan, kolayca enjekte edilebilen çatlaklar ile oldukça yüksek basınçlarda düşük alış yapan ince çatlaklarda kullanılmalıdır. Böylelikle sabit bir EYS değeri kullanılmış olur.

Bütün enjeksiyon aşamalarında EYS değerinin sabit tutulması ile enjeksiyona sabit bir yaklaşım sağlanır ve açık ve geniş çatlaklarda miktar otomatik olarak sınırlanırken, sıkı ve az enjekte edilebilir zonlarda ise basınç artırılır. Böylelikle büyük altkaldırma basınçları veya hidrolik ayırma kuvvetlerinin oluşmasını sağlayabilecek yüksek basınç ve yüksek alış kombinasyonları elemine edilmiş olunur. Benzer şekilde ince çatlakların uygun olmayan koşullarda enjekte edilmesini sağlayabilecek düşük basınç ve düşük alış kombinasyonları da elemine edilir.

Sabit bir EYS değeri; basınca karşılık gelen hacim grafiğine yerleştirildiğinde hiperbolik eğri oluşur. Enjeksiyon yoğunluğu veya EYS değerinin yüksekliği; eğrinin merkezden en uzak noktaya ulaşması sonucu verir. Böylelikle önceki bölümlerde tartışılan iki limiti birleştiren eksik faktörler tamamlanmış olmaktadır; hacim sınırlama hattı ve basınç sınırlama hattı. Bu üç



Şekil 1. Enjeksiyon seyri eğrilerinden örnekler.



Şekil 2. Enjeksiyon için sınırlama zarfları.

faktörün kombinasyonu enjeksiyon için bileşik sınırlama zarfını verir.

## Farklı enjeksiyon yoğunlukları için birleşik sınırlama zarfı

Şekil 1'de üç tip çatlakın p-V seyri verilmiştir. 1 nolu eğri basınçtaki az yükselmeye karşılık yüksek alışı sonuçlanan bir açık çatlak gösterir. 2 nolu eğri basıncın dereceli artımına karşılık alışı miktarında artan orta çatlak gösterir. Ancak, a noktasından sonra basınç hızlı bir şekilde artarken enjeksiyon sokulumuna karşı direncin artışı arasında ters orantı vardır. 3 nolu eğri enjeksiyon alışının az olduğu ve basıncın hızlı artmasına neden olan sıkı çatlakı temsil etmektedir. Benzer olarak 4 nolu eğri ise çok az alışı ve yüksek refü basıncını gerektiren oldukça sıkı çatlakı temsil eder.

Şekil 2 farklı enjeksiyon yoğunlukları için önerilen 5 sınırlama zarfını göstermektedir. Basıncı ve hacimi sınırlayan EYS değeri; gerçekte enjeksiyon için sınırlama zarflarını belirleyen üçten fazla veya az parametredir. Önerilen tanımlamada bu değerler birbirleriyle ilişkili gibi görünseler de gerçekte değildirler. En üst zarf

EYS= 2500 bar x l/m; 50 bar'lık çok yüksek sınırlama basıncı ve 300 l/m'lik çok yüksek sınırlama hacmine karşılık gelen; çok yüksek yoğunluktaki enjeksiyonu temsil etmektedir. En alt zarf ise 500 bar x l/m'lik EYS değeri ile minimum basınç olarak 15 bar ve sınırlama hacmi olarak 100 l/m'lik çok düşük yoğunluklu enjeksiyonu temsil etmektedir. Bir çok durum için yazarlar; EYS= 1500 bar x l/m, sınırlama basıncı olarak 30 bar ve sınırlama hacmi olarakta 200 l/m olan orta yoğunluktaki zarfı önerirler.

Jeolojik olarak kritik olan bölgelerde (yüzeğe yakın veya dik eğimli) çok düşük yoğunluklu eğri (Şekil 2 No. 5) uygulanabilir. Şekil 1 ve 2'nin kombinasyonundan kolaylıkla anlaşılmaktadır ki; enjeksiyon işlemi seçilen enjeksiyon zarfına bağlı olarak farklı noktalarda durdurulacaktır.

Şekil 1'deki 1 nolu eğride enjeksiyon işlemine 150 l/m'lik hacim sınırlamasına 3 bar basınçta ulaşılan a noktasında ara verilebilir. Bununla birlikte projeci orta yoğunluktaki zarfı seçmiş ise 200 l/m'lik hacme 3 bar basınçta ulaşılan b noktasına kadar enjeksiyon sürdürülecektir. 250 l/m'lik sınırlama hacmine 6 bar'da ula-

şan c noktasına kadar enjeksiyona devam edilebilmesi için yüksek yoğunluklu enjeksiyon seçilmelidir. Sonuçta eğer çok yüksek yoğunluk seçilmiş ise enjeksiyon d noktasına kadar devam edecektir. İşlem EYS= 2500 eğrisini kesmedikçe yalnızca hacim sınırlaması nedeniyle durdurulmamalıdır. Eğriyi kestiği d noktasında enjekte edilen miktar 285 l/m ve nihai basınç ise 9 bar olacaktır. Tanımlanan EYS'ye göre miktar 150 - 285 l/m arasında değişirken, basınç 3 - 9 bar arasında olacaktır.

Şekil 1'deki 2 nolu eğride a noktasındaki miktar 60 l/m ve basınç 13 bar civarında olacaktır. Enjeksiyon d'ye kadar sürdürülseydi çok yüksek yoğunluklu enjeksiyona ( $p \times V = 2500$ ) karşılık gelecekti; ancak enjeksiyon alışı 90 l/m'ye yükselirken basınç 28 bar gibi sınırlama basınç değeri 50 bar'dan oldukça az bir noktaya çıkacaktı. Benzer olarak 3 nolu eğride seçilmiş EYS kriterine ve basınç 28 bar gibi sınırlama basınç değeri 50 bar'dan oldukça az bir noktaya çıkacaktı. Benzer olarak 3 nolu eğride seçilmiş EYS kriterine ve basınç sınırlamasına bağlı olarak enjeksiyon a" ve d" noktaları arasında sürdürülecekti. x-y parçası ise; bir çatlak veya tabakalanma düzleminin bir güçle aniden açılarak; ani basınç düşmesi ve yüksek alışı neden olan hidrolik kırılma veya hidrolik ayrılmanın sonucudur. Düşük oranlarda ise; seçilmiş EYS eğrisine ulaşıncaya kadar enjeksiyon sürdürülebilir fakat basınç artarsa aynı basınçta veya çok az üzerinde hidrolik kırılma olayı ile karşılaşılabilir. Böyle durumlarda enjeksiyona devam edilip edilmemesi konusunda tereddütler vardır. Bununla birlikte çoğunlukla herhangi büyük bir problemle karşılaşılmaz. Sınırlama çizgisine ulaşmanın hemen öncesinde veya hemen sonrasında enjeksiyon durdurulmalıdır.

## EYS değerinin seçimi

Baraj projecileri ve projecinin jeoteknik ve enjeksiyon uzmanları, enjeksiyon perdesi için EYS değerini seçmelidirler. Yazarlar jeolojik koşullar, gelecekteki su kayıplarının miktarı ve su tutma sonrası oluşacak altkaldırma basınçlarını gözönünde bulundurarak, başlangıç olarak 1500 bar x l/m gibi ortalama değeri önerirler. Özel durumlarda projeci ve arazi kontrol mühendislerine; üst basınç sınırı ve üst miktar sınırı değiştirilenebilir. Sınırlama enjeksiyon zarfını seçmeden önce muhtemelen en iyi yaklaşım bir veya iki enjeksiyon testi yapmaktır.

Rezervuar derinliklerinin farklılığından ötürü, yamaçlardaki basınç sınırlaması vadi tabanına oranla daha az olabilir. Kıymete değer bir amaç olarak sınırlama basıncı rezervuar basıncının en azından iki katı olmalıdır. Fakat bu durumda istenmeyen hidrolik kırılmaları önlemek zor olabilir.

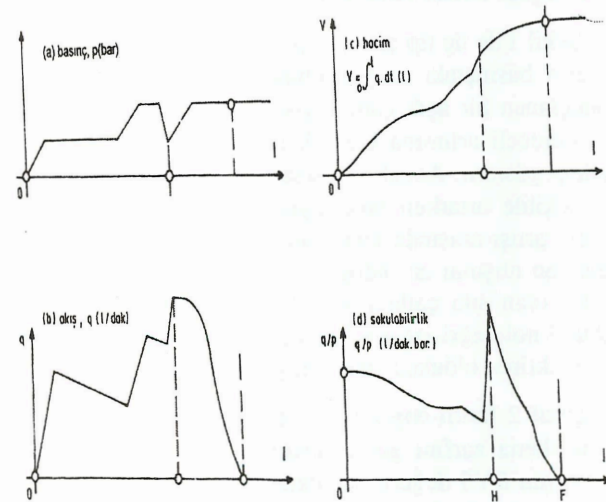
## Bilgisayar kontrollu enjeksiyon

Enjeksiyon sahalarında kişisel bilgisayarların kolayca yerleştirilmesi ve kullanılabilmesi; bilgisayarların enjeksiyon işleminde anında kontrolü (real - time controlling) yapabilmelerini olanaklı kılmıştır. Bilgisayar tarafından yalnızca gerçek enjeksiyon basıncı (p) ve akış oranı (q) değerlerinin sürekli okunması gerekir. q değeri birim uzunluğa enjekte edilen toplam hacim V değerinden yararlanılarak elde edilir. Eğer istenirse toplam enjekte edilen miktar (V) doğrudan ve akış oranı ise dönüştürülerek ölçülebilir.

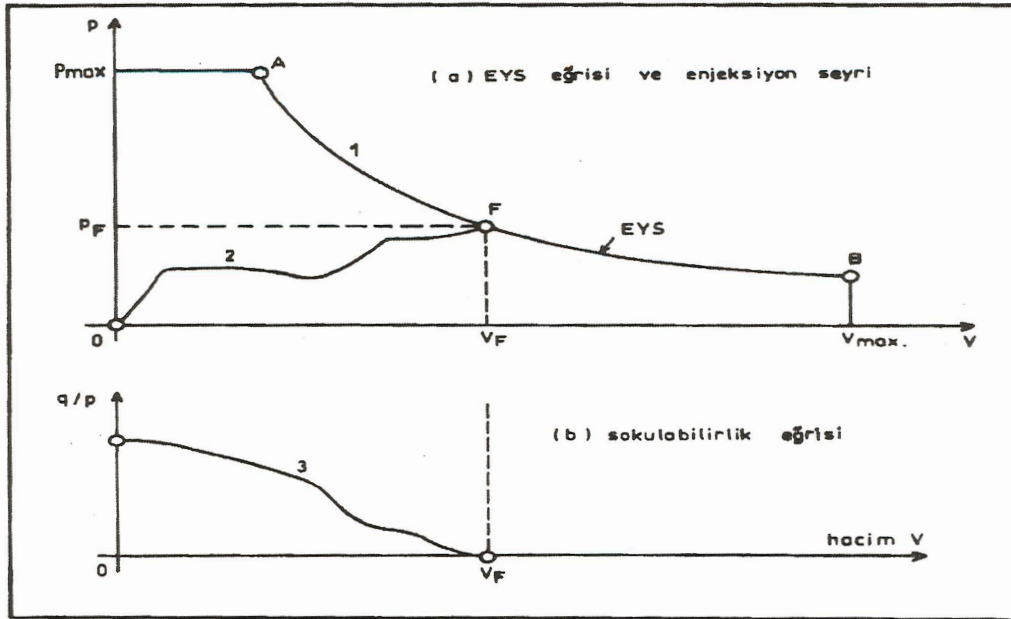
Ölçülen p ve q değerlerinden yararlanarak ekranda bir çok zaman grafiği (basınç, akış oranı, toplam miktar ve sokulabilirliğin zamana karşı grafikleri gibi) çizdirilir. Şekil 3 bu tür grafiklerden örnekleri göstermektedir. Özgül akışın ( $q / p$ ) veya sokulabilirliğin (akış oranının basınca bölümü) zaman karşı durumunu gösteren (d) grafiği incelendiğinde; eğriden bariz olarak çatlakların enjeksiyonla doluşu ve çatlaklardaki enjeksiyon direncinin artışı görülür. Bu direnç; enjeksiyon akışının tahrip edici kuvvetinin çatlak boyunca daha da ilerlemesiyle oluşmaktadır. Grafikteki ani sıçrama ise; hidrolik kırılma veya hidrolik kaldırmaya karşılık gelir.

## Pratik enjeksiyon kontrolü olarak EYS ve sokulabilirlik - hacim eğrileri

Şekil 4 bilgisayarın çizebileceği ana kontrol eğrilerini göstermektedir. Bu eğriler enjeksiyon işleminin kontrolünde kullanılabilir. Şekil 4(a) sınırlama basıncı  $p_{max}$ , birim uzunluktaki sınırlama hacmi  $V_{max}$  ve seçilmiş EYS hiperbolik eğrisi ile birlikte bir proje veya



Şekil 3. Tek kademenin enjeksiyon işlemi (a) basınç, (b) akış, (c) hacim ve (d) sokulabilirliğin zamana karşı eğrileri. O: başlangıç, H: hidrolik kaldırma, F: enjeksiyon bitişi.



Şekil 4. Tipik bir kademe enjeksiyonu 1: basınca karşılık alış sınırlama eğrisi, 2: basınca karşılık alışı gösteren enjeksiyon seyri, 3. sokulabilirliğe (q/p) karşılık enjeksiyon alışı, F: enjeksiyon bitiş noktası,  $P_F$ : nihai basınç,  $V_F$ : nihai alış.

projenin bir bölümü için seçilen sınırlama enjeksiyon zarfını göstermektedir. Bu zarf bilgisayarın hafızasına yerleştirilir ve istenildiği anda ekrana yansıtılır. Bu sınırlama zarf eğrilerine EYS eğrilerine denilir. Şekil 4 (a)'daki 2 nolu düzensiz eğri enjeksiyon işleminin sonucunu (enjeksiyonun seyrini) göstermektedir. Şekildeki enjeksiyon seyri; birim uzunluktaki toplam enjeksiyon miktarına karşılık; o andaki enjeksiyon basıncı küçük zaman artımlarıyla çizilmiştir. Bu eğri, EYS eğrisi ile F noktasında kesişir. Enjeksiyon F noktasında sıfır akış oranı,  $p_F$  nihai basıncı ve  $V_F$  toplam enjekte edilen miktar değerleri ile durdurulur.

Şekil 4(b)'deki ise önemli bir işlem anı (real - time) gözleme eğrisidir. Burada sokulabilirliğe (q / p) karşılık, toplam miktar (V) çizilmiştir. Benzer tipte eğriler olmasına karşın zamana karşı çizilen Şekil 3(d)'deki eğriye nazaran daha çok tercih edilen eğri çeşididir. Eğri incelendiğinde sokulabilirlikteki azalışla birlikte enjeksiyonun etkisinin de azaldığı anlaşılmaktadır. Sabit bir basınçta akış oranı azalmakta veya sabit bir akış oranına ulaşıldığında (hemen hemen sonda) ise enjeksiyon basıncı yükselmektedir. Hangisi uygulanırsa uygulansın bu kombinasyonlar pompa tipine ve enjeksiyon işleminin detaylarına (boru, valf) bağlıdır.

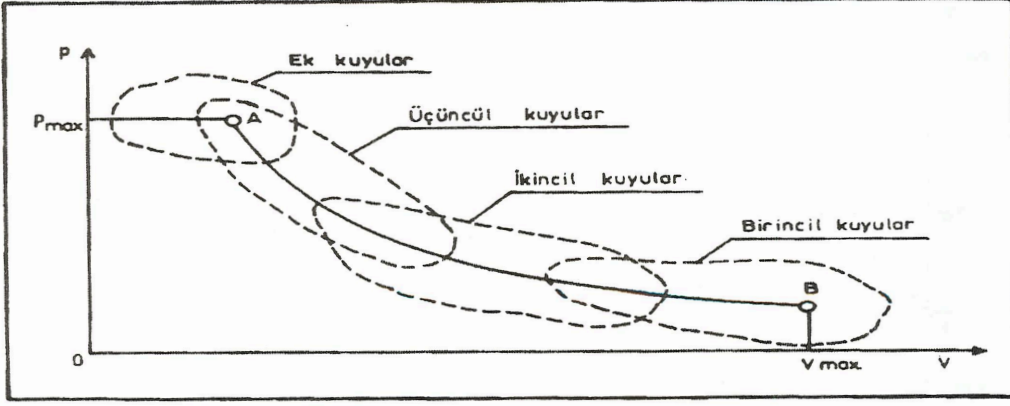
Sokulabilirlik - miktar eğrisindeki bir azalış enjeksiyon işleminin normal olarak ilerlediğini gösterir. Enjeksiyon basıncı sürekli olarak gözlenmeli ve EYS eğrisinin belirlediği sınırlarda durdurulmalıdır.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi işlemin sonuç

eğrisi (enjeksiyonun seyri) kaya çatlak açıklığının bir sonucu olarak EYS eğrisi ile farklı noktalarda kesişirler. Örneğin Şekil 4(a)'da dar çatlaklar A noktası, geniş çatlaklar ise B noktası yakınlarda eğriyle kesişirler. Sonuç eğrisi EYS eğrisine doğru yaklaşırsa; enjeksiyon sokulumu devam etse bile (örneğin 500 l/h gibi) pompalama debisi olabildiğince düşük tutulmalıdır. Deneyimler enjeksiyon işleminin sürekli ve etkin kontrolünde bu tür çeşitli çizimlerin büyük yararları olduğunu göstermiştir.

## Yöntemin enjeksiyon perdelerine uygulanması

EYS yöntemi öncelikle yukarıda anlatıldığı gibi enjeksiyonun bir aşaması veya bir kademesinde göz önünde bulundurulacak hususlarla uğraşır. Yöntem aynı zamanda bir kuyunun bütün kademelerine ve araya girmeli birincil kuyulara uygulanır. Katı teorik gerekçelerle tek sıralı perdelerde araya girme yönteminin etkili olduğu kanıtlanmıştır. Lav akıntıları, bazı kireçtaşı ve kumtaşları gibi boşluklu veya yüksek geçirimli kaya ortamlarında 3 sıralı perde inşa edilmiştir. Burada öncelikle mansap, sonra memba ve daha sonrada orta sıra kuyuları enjekte edilmektedir. Dış sıralar bir bariyer olarak kabul edilirler ve genellikle bu sıraların birincil ve ikincil kuyuları büyük çatlaklar ve boşlukları kabaca doldurmak için kullanılır. Daha sonra orta sıra ise tek sıralı perde işleme tutulurlar. Birinciden üçüncül kuyulara ve hatta gerekirse dördüncül veya beşincil kuyular da açılırlar.



Şekil 5. Enjeksiyon perdesinden bütün enjeksiyon aşamalarının nihai durumunu gösteren bir örnek.

Araya girme yönteminde birincil kuyular en geniş çatlakları kısmen veya tamamen doldurarak tıkarlar. ikincil kuyular ise birinciller tarafından doldurulamayanlar ile diğerlerini doldururlar. Şekil 5'te birincil, ikincil, üçüncül ve ek kuyuların (dördüncül veya kontrol) olası sonuç pozisyonları EYS eğrisi üzerinde gösterilmiştir. Ortalama enjeksiyon basınçları seriden seriye geçerken azalırken refü basınçları artmaktadır. Böyle bir durumla EYS yöntemi uygulanırsa otomatik olarak karşılaşılanır.

Birincil kuyu aralığı 10 ile 12 m arasında olursa muhtemelen 2. ve 3. seri kuyulara da gereksinim duyulur. Üçüncül kuyular komşu kuyudan 2.5 - 3 m uzaklıkta olur. Bu kuyular jeolojik koşullar ve ikincil kuyu sonuçlarına göre daha kısa açılabilir.

Dördüncül kuyular açılabilir veya açılmayabilir. En azından bir kısmı Lugeon testi yapmak amacıyla açılmalıdır. Böylece enjekte edilen kayada kabul edilebilir bir geçirimsizliğin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiş olunur. Geçirimsiz bir perde için yapılan su testlerinde, en katı kurallarda %90'ı 1 veya daha az Lugeon değeri ile sonuçlanmalıdır. Ayrıca 3 Lugeon'dan daha yüksek değer olmamalıdır.

### EYS ile kuyu aralığı arasındaki ilişki

İstenilen EYS değeri ile kuyu aralığı arasında bir ilişki olduğu açıktır. Örneğin birincil kuyuların aralığı çok fazla, EYS değeri çok az ise ikincil ve hatta üçüncül kuyularda bile enjeksiyon alışı birincil kuyulara nazaran belirgin bir azalış olmayacaktır. Bu gibi durumlarda delgi ve enjeksiyon harcamaları öngörüleni çok aşsa bile perdede başarılı olduğu söylenemez.

Eğer kuyu aralığı az ve EYS değeri çok yüksek ise iki seri kuyudan sonra bile alışı çok azalacak ve üçüncül kuyular boşu boşuna açılacaktır. EYS değeri ile kuyu aralığı arasında oluşturulan perdenin kalınlığı nedeniyle ilişki vardır. Çünkü perdenin kalınlığını enjeksiyonun yayılım uzaklığı belirlemektedir.

Baş parmak kuralı kullanılarak EYS değeri ve kuyu aralığı seçilir. Böylece bir seriden diğerine enjekte edilen kademenin her bir metresi için alış miktarı %50 oranında azalır (gerçekte %25 - %75 arasında). Böyle bir sonuç oluşturulan perdede gelişen bir kapanmanın olduğunu gösterebilir. İdeal birincil kuyu aralıklarını ve EYS değerini belirlemek için inşaatın başlangıcında veya proje aşamasında bir veya daha fazla test sahasında deneme enjeksiyonları yapılmalıdır.

### Kapanış kriteri

Son serideki kuyunun enjeksiyon seyri EYS'nin üst sınırlama basıncına ulaşmamış ise bu kuyunun her iki yanına ilave kuyular açılmalıdır. Böylece, perdenin bütün parçaları; sınırlama basıncında, göreceli az enjeksiyon alışı (örneğin 25 kg/m'den az alış gibi) karşılık gelen bir miktarla enjekte edilmiş olur. Uygun olmayan kuyu aralığı seçildiğinde, en azından belli bir kesime kadar amaçlanan enjeksiyon yöntemi kendi kendini düzenleyen bir işlem olur. Bu durum araya girme yönteminin (EYS eğrisi) ve son seri kuyularda sınırlama basıncında az enjeksiyon alışı gerekliliğinin doğal bir sonucudur.

Sonuç olarak; yukarıda anlatılan kurallar takip edilirse toplam enjeksiyon miktarının çok az kısmı hariç enjeksiyon perdesi boyunca yayılması sağlanacaktır. İşlem kaya kütlelerinin jeolojik şartlar nedeniyle oluşan süreksizliklerini otomatik olarak dikkate almaktadır. Böylebir uygulama ile enjeksiyon perdesinin yarar - bedel oranı en üst düzeye çıkarılmış olur.

### EYS yönteminin ana hususları

EYS'nin enjeksiyon işlemine uygulanmasındaki kabul ve işlemleri oldukça basittir. Bu hususlar aşağıda 4 ana başlık altında özetlenmiştir.

#### 1. Temel kabuller

a. Çökelmeyi azaltarak bloklamayı önlemek ve yo-



ğun, dirençli ve sertleşmiş enjeksiyon elde etmek amacıyla nispeten kalın, duraylı karışımlar kullanılır.

b. Özellikleri bilinen tek bir Bingham akışkanı sağlamak ve enjeksiyon işlemini basitleştirerek etkinliği arttırmak ve yanlışlıkları önlemek amacıyla işlemin tamamında tek karışım kullanılır.

c. Gereken yerlerde yüksek basınç kullanmak ve yüksek basıncın zararlı olabileceği yerlerde ise azaltmak için EYS eğrisi kullanılır ve bu eğri işlem sırasında gözlenir.

d. Basınç ve akış oranını anında takip etmek, seçilmiş EYS eğrisi üzerinde p-V enjeksiyon seyrini çizmek ve p-V enjeksiyon seyri ve sokulum - hacim eğrilerini kullanarak enjeksiyonun tamamlandığını belirtmek amacıyla enjeksiyon işlemi arazi bilgisayarları aracılığı ile takip edilir.

## 2. Karışımın Belirlenmesi

1- a. Kohezyon ve viskozitesini azaltan akışkanlaştırıcı kullanarak enjeksiyonun sokulumu artırılmalı ve b. sıkışma sırasında su kaybını önleyici su tutucu katkı kullanarak arzulanan enjeksiyon özellikleri sağlanmalıdır.

2- Ağırlıkça oranı 0.7:1'den 1:1'e değişen bir çok enjeksiyon karışımı üzerinde karşılaştırmalı bir seri test yapılmalıdır. Bu karışımlarda a. farklı incelikteki çimentolar ve b. farklı yüzdelerdeki karışımlar kullanılmalı; yapılan testler ile birim ağırlık, Marsh hunisi görünür viskozitesi, 2 saat sonraki çökeltme, kohezyon, priz başlangıç ve bitiş süreleri, karışımın 7 ve 28 günlük mukavemetleri ve sıkıştırma testi ile su kaybı miktarı gibi özellikleri belirlenmelidir.

## 3. Kuyu Paterni

1- Birincil kuyulardan üçüncül veya dördüncül kuyulara kadar a. askari üniformluğu her alanda sağlamak ve b. enjeksiyon sonuçlarının ve jeolojik koşulların belirlediği bölgelerde daha yakın kuyu aralığı sağlayabilmek için normal araya girme yöntemi uygulanmalıdır.

2- Kati proje veya inşaatın başlangıç aşamasında enjeksiyon testleri yapılmalıdır. a. Bu test sahaları vadi tabanı ve yamaçlar gibi farklı topoğrafik ve jeolojik koşullar içermeli, b. testlerde; enjeksiyon alışında bir sonraki seride %25 veya %75 arasında azalmayı sağlayıcı birincil kuyu aralıkları tespit edilmeli (10 - 12 m aralık gibi) ve c. her bir enjeksiyon aşamasının enjeksiyon seyrini; beklenen enjeksiyon yoğunluğuna veya birinci hatta ikinci hidrolik kırılmaya kadar olan p-V eğrilerini çizen farklı EYS eğrileri test edilmelidir.

## 4. Arazi Kontrolü

1- Test enjeksiyonu sonuçlarına göre EYS eğrilerinin kontrol unsurları özel mühendislik, kaya mekaniği veya jeolojik kabuller gibi belirlenmelidir. Bu amaçla; a. mevcut jeolojik koşullara bağlı olarak basınç ve hacim sınırlarının gerçekçi olduğundan emin olunmalı ve b. farklı arazi bölümlerinde kullanılacak farklı EYS değerleri belirtilmelidir.

2- Başlangıçta, test bölgeleri hariç, her dört birincil kuyudan birisi a. yeraltı jeolojik koşulları ve yeraltı suyu şartlarını belirleyebilmek için gelecekteki rezervuar yüksekliğine eşit derinlikte, karotlu ve Lugeon testli araştırma kuyusu olarak, b. diğer kuyuların nihai derinliklerini saptamak için geriye kalan birincil kuyular gelecekteki rezervuar derinliğinin  $0.5 \times h - 0.8 \times h'$  derinliğinde açılmalıdır ve c. seçilen EYS eğrisinin uygunluğundan emin olunmalıdır.

3- EYS ve sokulabilme eğrileri kullanılarak arazide bilgisayarlar ile enjeksiyon işlemi kontrol edilmelidir. Böylelikle a. enjeksiyon seyrinin gerçek - zaman (real time, anlık) gözleminden ve b. azalan sokulabilme eğrisi ve kontrol EYS eğrisine, p'ye karşılık V enjeksiyon seyrinin yaklaşmasından (EYS eğrisinin hacim ve basınç sınırlamalarını da dikkate alarak) kabul edilebilir bir sonuca ulaşıldığı düşüncesiyle enjeksiyonun tamamlandığına karar verilir.

4- Karışımın ilksel tıkanma sırasında su kaybetmesini azaltmak amacıyla enjeksiyondan önce su tablasının üstündeki kademelerde su ile yıkama yapılmalıdır.

5- Enjeksiyondan önceki ve sonraki geçirimsizlik değerlerini kıyaslayabilmek amacıyla araştırma ve kontrol kuyularında Lugeon testleri yapılmalıdır.

6- Kaya çatlaklarının gelişen kapanırlığı ve kalıcı geçirimsizliğin kabul edilebilir oldukları istatistiksel ve grafiksel yöntemler kullanılarak gösterilmelidir.

## Örnek

Geçmiş on yılda bu yöntem Arjantin, Avusturya, Ekvator, Meksika, İsviçre ve Türkiye'de uygulanmış ve yakın gelecekte de çeşitli ülkelerde planlanan birçok projede kullanılacaktır.

Meksika Aquamilpa barajında halen yürütülen enjeksiyon çalışmaları bu yöntemle bir örnek olarak verilebilir. 180 m yükseklikte ve Comision Federal de Electricidad'a ait olan beton yüzölçümlü kaya dolgu tipinde dünyanın en yüksek barajı olacaktır. Su tutma işlemine 1993 yılında başlanacaktır.

EYS yöntemi beton yüzey temel eteğinin konsolidasyon ve derin perde enjeksiyonunda kullanılmaktadır.

Yoğun labaratuvar ve arazi testlerinden sonra "normal" karışım adıyla tek bir karışım seçilmiştir. Özellikleri;

Çimento :5 100 cm<sup>2</sup>/g özgül yüzeyli, ince puzzolan

S/Ç oranı: 0.9:1 (bazen yüksek Blain değeriyle daha düşük)

Akışkanlaştırıcı: Çimentonun ağırlıkça %1.6'sı oranında Sikament NZ

Yoğunluk : 1.5 ile 1.55 g/cm<sup>3</sup>

Su bırakma: 2 h sonra %4

Marsh Hunisi akış: 28 - 32 s

Bağlı kohezyonu (C/γ) : 0.08 ile 0.2 mm, 2h sonra 0.2 ile 0.3

Mukavemet: 9-10 MPa 7 gün, 13-17 MPa 28 gün olan karışım ilk bir saat içerisindeki yüksek sokulum özelliği ve mekanik ve yıkanmaya karşı yüksek dirençlilik özellikleri ile duraylı fakat çok akışkan bir karışımı temsil eder.

Perde enjeksiyonu için aşağıdaki kurallar uygulanmıştır.

- Kademe boyu 5 m ve enjeksiyon aşağıdan yukarı doğrudur.

- Birincil kuyu aralığı 24 m'dir ve diğer serilerde araya girilmiştir.

- İlave yüksek seri numaralı kuyular alış 25 l/m'yi aşınca açılmıştır.

- YAS üstündeki kuyularda ön yıkama 2 bar basınç altında ve 1h süre ile enjeksiyondan hemen önce yapılmıştır.

- Enjeksiyon yoğunluğu 2 500 bar x l/l'dir. Beton yüzey eteğinde bu değer 1 500 bar x l/m'ye düşürülmüştür.

- En yüksek basınç 40 bar'dır ve 20 m'den sonra uygulanmıştır. Basınç satha yaklaştıkça 10 bar'a düşürülmüştür.

- En yüksek alış sınırı 400 l/m'dir. Bu miktar 5 m'lik kademede 2 000 l/m'ye karşılık gelir. Bazı bölümlerde sınır 300 l/m'ye düşürülmüştür.

- Refü kriteri; refü basıncındaki alış 3 l/m'den az olacaktır.

Yukarıdaki kurallar özellikle tek karışım kullanıldığından arazide kolayca uygulanabilmiştir.

Bir örnek olarak Şekil 6'da beton yüzey eteğindeki konsolidasyon enjeksiyonundaki enjeksiyon seyri veril-

miştir. Okumalar, arazi bilgisayarı yok ise 5 dakika aralıklar ile yapılmıştır. Şekil 6a'da p basıncı ve q akış oranı V enjeksiyon alış hacmine karşılık çizilmiştir. Basınç eğrisi EYS sınırlama sınırları ile karşılaştırılabilmektedir.

Enjeksiyon hedefi 1 500 bar x l/m idi ve sınırlama basıncı 300 l/m'yi biraz aşınca 2 510 bar x l/m'lik bir yoğunluğa ulaşıldı. Bu sonuç enjeksiyon noktası ile pompa operatörü arasındaki iletişim gecikmesinden kaynaklanmıştır. Bu durum işlem anının sürekli gözlenmesi isteğini ve bir PC aracılığı ile gösterilmesini; diğer yandan kontrol EYS eğrisine ulaşıldığında pompanın otomatik olarak kapatılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Şekil 6b'de sokulabilirlik V alış hacmine karşılık çizilmiştir. İşlemin başlangıcında kaya kütlesi süreksizliklerinin süregelen açılımı nedeniyle sokulabilirlik 0.2 den 0.5 l/dak x m x bar'a yükselmiştir. 200 l/m'lik bir alıştan sonra sokulabilirlik 320 l/m'den düzenli olarak sifıra düşmüştür. Gerçekte enjeksiyon bu değere ulaşılmadan hemen önce durdurulmuştur.

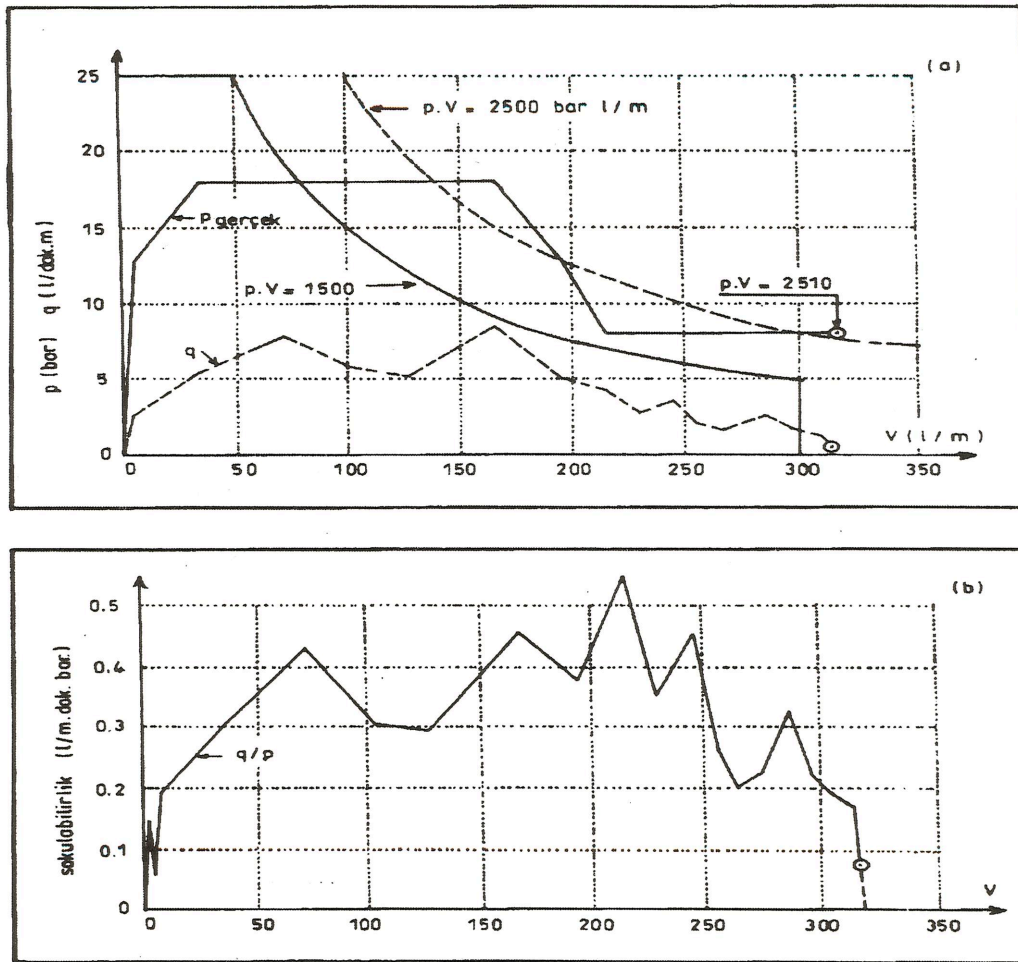
Sokulabilirlik eğrisi üzerindeki bazı düzensizliklerin operatörün bazı okumaları yinelemesinden olduğu düşünülmüştür. Aynı zamanda bu düzensizlik okumalar arasında fark edilemeyen iki veya daha fazla hidrolik kırılma nedeniyle de oluşabilir.

## Normal enjeksiyon işlemiyle karşılaştırma

Alışlagelen işlem; enjeksiyon basıncı ve oldukça az S/Ç oranlı farklı karışımların (4:1, 3:1, 2:1, 1:1 ve diğerleri) kullanılmasının belirlenmesinden oluşmaktadır. Karışım değişikliği kuyunun aldığı karışım miktarının belirli bir hacme ulaşmasından sonra yapılır. Karışımın kohezyonu birinden diğerine artacak ve bazı noktalarda akışa ve sokulabilirliğe karşı artan kohezyon direnci enjeksiyonun durmasına neden olacaktır.

EYS yönteminde tek karışım kullanıldığından kohezyon sabittir. Karışım çatlaklar boyunca yayıldığında karışımla çatlak duvarları arasındaki yüzey ve akışa karşılık toplam kohezyon direnci de artacaktır. Sonuç olarak; akış direncini aşabilmek için daha yüksek pompalama basıncı kullanılacaktır. Bu durum normaldir ve fiziksel olarak ta beklenen bir olgudur. EYS yöntemi; sınırlama basıncı, sınırlama miktarı veya belirlenen p-V eğrisi ile tanımlanan basınç - hacim kombinasyonları gibi üç sınırlama değerinden bir tanesine ulaşılan kadar göreceli olarak artan enjeksiyon basıncı altında enjeksiyonun sürdürülmesidir.

Alışlagelen yöntem ile EYS arasındaki mevcut di-



Şekil 6. Aquamilpa barajı, Mexico. Kuyu No : 674 P, kademe 17-22 m. (a) basınç p ve akış oranı q, hacim ve enjeksiyon sınırlama hattına karşılık (b) sokulabilirlik (q/p) hacmine karşılık.

ğer farklılıklar ise şunlardır. EYS yöntemi daima; mukavemet, dayanıklılık, büzülme ve yıkanmaya karşı direnç özellikleri göz önünde bulundurulduğunda yalnızca en iyi karışımı sürekli kullanır. EYS, ince karışımdaki yüksek miktardaki suyun kayaya enjekte edilmesinden sakınır. Hidrolik kırılma nedeniyle kayanın fazlaca örselenmesi duraylı karışımlar kullanılarak önlenir. İşlem sabit ve hızlı olup uygulama hataları en aza indirilmiştir. Karışım değişikliği nedeniyle oluşabilecek zaman kayıpları önlenir.

## Özet ve sonuçlar

Enjeksiyon işlemi; karışımın düzenli olarak düşük - orta pompalama oranında pompalanmasını ve kaya kütlesi içine sokulması sırasında basıncın yavaş bir şekilde artırılması ile ilgilidir. Bir kademe refü basıncına ulaşılırken belirlenen miktarda karışım kayaya basılmış ise veya saptanmış enjeksiyon yoğunluğunun önceden seçilen EYS eğrisi gözönünde bulundurularak sınırlama basınç ve miktarından daha az bir pozisyona ulaşırsa enjeksiyon durdurulur.

Eğrinin orijinden uzaklığı tüketilen enerjinin bir fonksiyonudur. Çok azdan çok yükseğe değişen aralıkta farklı enjeksiyon yoğunluklarına karşılık gelen bir grup eğri hazırlanabilir. Bir proje için bir adet veya vadi tabanında yüksek yoğunluklu; yamaçlarda, sığ derinliklerde veya jeolojik olarak zayıf zonlarda ise düşük yoğunluklu iki veya daha fazla eğri kullanılabilir.

Böylece komple sınırlama zarfı; sınırlama basıncı (15 -50 bar), sınırlama miktarı (her kademe için 100 - 300 l/m) ve iki sınırlama hattına (500 - 2 500 bar x l/m gibi çok azdan yükseğe değişen seçilmiş EYS değerli) bağlı olarak seçilmiş EYS eğrisinden oluşur.

EYS yöntemi enjeksiyonun; basınç - zaman, akış oranı - zaman, toplam akış-zaman, dönüştürülmüş sokulabilirlik (q/p)-zaman gibi PC ile oluşturulan grafikler yardımıyla yakın gözlemini gerektirir. Bahsedilen son eğri refüye yaklaşıldığında veya en azından alış azaldığında özel öneme sahiptir. EYS yöntemi enjeksiyon projelendirmesi ve kontrolünde yararlı bir araç olduğunu kanıtlamıştır. Hidrolik yapılarda enjeksiyonun

kullanılmasının artışı bu yöntemin gelişmesini sağlayacaktır. Yöntem basınç ve miktar sınırlaması ile ulaşılabilecek EYS değerleri hususlarında katı kurallar içermemektedir. Büyük bir olasılıkla mevcut ve gelecekteki projelerde kullanılmasıyla daha da gelişecektir.

#### DEĞİNİLEN BELGELER

- Houlsby, A.C., 1992, "Construction and design of cement grouting", John Wiley and Sons Inc, New York / Chichester.
- Weaver, K., 1988, "Dam foundation grouting", American Society of Civil Engineering, New York, USA.
- Nonweiller, E., 1988, "Grouting theory and practice", Elsevier, New York, USA.
- Ewert, F.K., 1985, "Rock grouting with emphasis on dam sites", Springer - Verlag, Berlin, Germany.
- Deere, D. and Lombardi, G., 1985, "Grout slurries - Thick or thin?", Issues in Dam Grouting, Proceedings of the session sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers in conjunction with the ASCE, Convention in Denver, Colorado; April.
- Lombardi, G., 1985, "The role of the cohesion in cement grouting of rock", Q58 R13, 15th ICOLD Congress, Lausanne, Switzerland.

- Lombardi, G., 1987, "Incection des massifs rocheux", Societe, Suisse de Mecanique des Sols et des Roches, Journee de printemps, No. 115; May.
- Lombardi, G., "La roca y el macizo rocoso-Leyes constitutivas", Academia Nacional da Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales, Buenos Aires, Argentina, Sesiones Cientificas, "Ing. Francisco Garcia Olano", La Mecanica de Rocas en la Ingenieria Civil; 12 December 1987, May 1989 edition.
- Lombardi, G., 1990, "La permeabilite et l'incetabile des massifs rocheux fissures", Reveu Française Geotechnique, No. 51 April.
- Lombardi, G., 1991, "Stoffgesetze für Feldfundationen von Betonsperren", 39 Geomechanik-Kolloquium, Salzburg, Austria, October 1990, Oesterreichische Gesellschaft für Geomechanik Felsbau, Jahrgang 9, No. 2.
- Lombardi, G., 1992, "The FES rock mass model-Part 1", Dam Engineering, Vol. III, Issue 1; February 1992; and, "The FES rock mass model-Part 2", Dam Engineering, Vol. III, Issue 3; August 1992.
- Lombardi, G., 1991, "Kölnbrein dam: An unusual solution for an unusual problem", Water Power and Dam Construction; June 1991.
- Oesterreichische Draukraftwerke AG, Klagenfurt Carithia / Austria, "Remedial project for Kölnbrein arch dam", Design and Construction; June 1991.