

**BARAJ ALTINDAKİ SIZMALARIN ANALİZ VE
KONTROLÜ: SAZLIDERE BARAJI UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Zeynep EYNUR**

(501021374)

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 Nisan 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 17 Mayıs 2004**

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. Necati AĞIRALIOĞLU

Diğer Jüri Üyeleri:

Prof.Dr. Emin SAVCI

Doç.Dr. Can GENÇ

MAYIS 2004

ÖNSÖZ

Barajlarda görülen sızma problemleri, içme, sulama, enerji gibi amaçlarla inşa edilmiş projelerin faydalarını azaltarak uzun süreli ve yüksek maliyetli iyileştirme programları gerektirebilmektedirler. Bazı durumlarda yapılan iyileştirmeler de beklenen düzelmeyi gerçekleştirmeyebilmektedir. Bu durumun proje safhasında mümkün olduğu oranda önlenmesi, özellikle ülkemiz gibi mali kaynakları sınırlı olan ülkeler için büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada barajlarda gövde altı su kaçaklarının kontrol, iyileştirme ve analiz metotları incelenerek, gövde altından su kaçakları problemleri ile karşılaşılacak ve ilave enjeksiyon perdeleri ile iyileştirme çalışmaları yapılan İstanbul'un içme suyu kaynaklarından "Sazlıdere Barajı" için "Sonlu Farklar Metodu"nun kullanıldığı matematik bir analiz modeli ile çeşitli enjeksiyon perde boyu alternatifleri için gövde altı su kaçakları değerleri ve optimum perde boyu hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar mevcut ölçüm değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın tüm safhalarında gösterdikleri yardımlardan dolayı Sayın Prof. Dr. Necati Ağırlioğlu'na ve çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen DSİ 14. Bölge Müdürlüğü Etüd ve Plan Şube Müdürü Erdinç Erbil'e ve değerli iş arkadaşlarıma, Sazlıdere Barajı kaçaklarını iyileştirme çalışmaları konusundaki bilgilendirmeleri için Jeoloji Müh. Kadir Görücü'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca manevi destekleri için aileme ve yüksek lisans öğrenimim boyunca emeği geçen tüm öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Nisan, 2004

Zeynep EYNUR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xii

1. GİRİŞ	1
1.1 Konunun Önemi	1
1.2 Çalışmanın Amacı, Seçilen Konu ve Uygulanan Metot	2
2. BARAJLARDA GÖVDE ALTI SIZMALARİ İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
2.1. Genel	3
2.2. Sızma Probleminin Analizi Çalışmaları	4
2.3. İyileştirme Çalışmaları	6
3. GEÇİRİMLİ TEMELLERDE SIZMA KONTROLÜ	12
3.1. Genel	12
3.2 Toprak Temellerde Sızma Kontrolü	12
3.2.1 Yatay Drenler	13
3.2.2 Saplama Hendekleri	13
3.2.2.1 Sıkıştırılmış Dolgu Saplama	14
3.2.2.2 Bulamaç Hendekleri	14
3.2.2.3 Beton Duvar	15
3.2.2.4 Çelik Palplanşlar	16
3.2.3 Memba Geçirimsiz Örtüleri	17
3.2.4 Mansapta Sızma Palyeleri	18
3.2.5 Basınç Azaltıcı Kuyular	19
3.2.6 Drenaj Hendekleri	20

3.3 Kaya Temellerde Sızma Kontrolü	22
3.3.1 Genel	22
3.3.2 Saplama Hendekleri	22
3.3.3 Enjeksiyon Perdeleri	22
3.3.4 Yüzey İyileştirilmeleri	23
3.3.5 Geçirimsiz Örtüler	23
3.3.6 Drenaj ve Enjeksiyon Galerileri	23
4. SIZMA KAÇAKLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ	24
4.1 Genel	24
4.2 İyileştirme Metotları	25
4.2.1 Metot Seçimini Etkileyen Faktörler	25
4.2.2 Kullanılan Metotların Diğer Yapısal Elemanlar Üzerindeki Etkileri	25
4.2.3 İzleme	25
4.3. Depolamanın Azaltılması	25
4.4. Enjeksiyon	26
4.5. Memba Geçirimsiz Örtüleri	26
4.6. Mansap Palyeleri	28
4.7. Sızdırmazlık (Saplama) Hendekleri	28
5. SIZMA ANALİZİ ESASLARI	29
5.1 Genel	29
5.2 Sınır Şartları	29
5.2.1 Geçirimsiz Sınırlar	30
5.2.2 Giriş ve Çıkış Yüzeyleri	31
5.2.3 Sızma Yüzeyi	31
5.2.4 Sızma Hattı (Freatik Hat)	31
5.3 Basınçlı veya Serbest Yüzeyli Akım Problemleri	31
5.4 Sızma Analizi	32
5.5 Laplace Denklemi	32
5.6 Sızma Analizi Metotları	35
5.6.1 Akım Ağı Metodu	35
5.6.1.1 Akım Ağı Teşkilinde Grafik Metodu	36
5.6.1.2 Anizotropik Zeminlerde Akım Ağı	37

5.6.1.3 Tabakalı Kesitlerde Akım Ağı	38
5.6.2 Modeller	38
5.6.2.1 Elektriksel Benzeşim (Analog)	39
5.6.2.2 Kum Modeller	41
5.6.2.3 Viskoz Akım Modelleri	42
5.6.3 Analitik Metotlar	42
5.6.3.1 Dönüştürme Metodu	42
5.6.3.2 Parçalar Metodu	42
5.6.3.3 Kapalı şekil (Closed Form) Metodu	45
5.6.4 Nümerik ve Bilgisayar Metodlar	46
5.6.4.1 Sonlu Farklar Metodu	46
5.6.4.2 Sonlu Elemanlar Metodu	46
6. SEÇİLEN MATEMATİK MODEL	48
6.1 Genel	48
6.2 Sızma Denklemleri	48
6.3 Sonlu Farklar Metodunda Fonksiyon Türevlerinin Kesikli Hale Dönüştürülmesi	49
6.4 İki Boyutlu Problemlerin Kesikli Hale Dönüştürülmesi	50
6.5 Sınır Şartları	51
6.6 Sızma Akımı	53
6.7 Akım Fonksiyonu ve Akım Ağları	54
7. SAZLIDERE BARAJI SIZMA DURUMU	56
7.1 Genel	56
7.2 Baraj Yeri ve Göl Alanı Genel Jeolojisi	58
7.3 Baraj İnşaatı ve Perde Enjeksiyonları	58
7.4 Kaçakların Ortaya Çıkması	59
7.5 Problemin İncelenmesi	59
7.6 Perde İyileştirme Enjeksiyonu	59

8. UYGULAMA VE SONUÇLARININ MEVCUT SONUÇLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI	64
8.1 Genel	64
8.2 Uygulama	64
8.3 Optimum Enjeksiyon Perde Boyunun Belirlenmesi	72
8.4 Sazlıdere Barajı Verileri	74
8.4 Yapılan Analiz SonuçlarınınDeğerlendirilmesi	76
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	78
KAYNAKLAR	81
EKLER	83
ÖZGEÇMİŞ	96



KISALTMALAR

HES	: Hidroelektrik santral
DSİ	: Devlet Su İşleri
İSKİ	: İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi Başkanlığı
WES	: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station)
USBR	: U.S. Bureau of Reclamation
A.B.D.	: Amerika Birleşik Devletleri
D/Y	: Düşey/Yatay
ICOLD	: International Comission of Large Dams



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Kalecik Barajı'nda sızma debilerinin rezervuar su seviyeleri ile değişimi.....	9
Tablo 5.1 Sızma Analizi Metotları.....	36
Tablo 5.2 Darcy Kanunu ve Ohm Kanunu arasındaki benzeşim.....	39
Tablo 8.1 Enjeksiyon boyunun 20 m olması durumunda potansiyel fonksiyonu değerleri.....	67
Tablo 8.2 Enjeksiyon boyunun 20 m olması durumunda akım fonksiyonu değerleri.....	68
Tablo 8.3 Sazlıdere Barajı'nda çeşitli enjeksiyon perde boyları için gövde altı akım kanallarında ve toplam sızma hız ve debi değerleri	71
Tablo 8.4 Değişik boylardaki enjeksiyon perdesi seçenekleri için hesaplanan değerler.....	73
Tablo 8.5 Sazlıdere Barajı'nda çeşitli rezervuar su seviyelerinde ölçülen kaçak su debileri.....	75
Tablo A.1 Enjeksiyon boyunun 40 m olması durumunda potansiyel fonksiyonu değerleri.....	84
Tablo A.2 Enjeksiyon boyunun 40 m olması durumunda akım fonksiyonu değerleri.....	85
Tablo A.4 Enjeksiyon boyunun 50 m olması durumunda potansiyel fonksiyonu değerleri.....	86
Tablo A.5 Enjeksiyon boyunun 50 m olması durumunda akım fonksiyonu değerleri.....	87
Tablo A.6 Enjeksiyon boyunun 60 m olması durumunda potansiyel fonksiyonu değerleri.....	88
Tablo A.7 Enjeksiyon boyunun 60 m olması durumunda akım fonksiyonu değerleri.....	89
Tablo A.8 Enjeksiyon perdesi yapılmaması durumunda potansiyel fonksiyonu değerleri.....	90
Tablo A.9 Enjeksiyon perdesi yapılmaması durumunda akım fonksiyonu değerleri.....	91

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 (a) Sızmanın z düzleminde şematik gösterilişi. (b) Sızmanın t düzleminde şematik gösterilişi.....	5
Şekil 3.1 Yatay dren yapılması ve yapılmaması durumları.....	14
Şekil 3.2 Toprak-bentonit ve çimento-bentonit saplama hendeklerinin yapılışı.....	15
Şekil 3.3 Çelik palplanşlar.....	17
Şekil 3.4 Basınç azaltıcı kuyu tip kesiti.....	20
Şekil 3.5 Temelden sızma kontrolünde drenaj hendeği uygulamaları.....	21
Şekil 4.1 Etkisi olmayan bir sızma kontrol önlemi	27
Şekil 5.1 Çeşitli sınır şartları.....	30
Şekil 5.2 Suyun hidrolik bir yapının altında doymuş geçirimli zemin vasıtası ile akımı.....	33
Şekil 5.3 Geçirimli bir temeldeki palplanş duvarı ile geçirimsiz sınır arasında oluşturulan akım ağı.....	37
Şekil 5.4 Akım çizgilerinin farklı geçirimlilikteki zeminlere geçişi.....	39
Şekil 5.5 Akım ve eşpotansiyel eğrilerini bulmak için iki boyutlu iletken kağıdın kullanımı.....	40
Şekil 5.6 Kum deposu ile modelleme.....	41
Şekil 5.7 Bazı parça tipleri ve şekil faktörleri.....	44
Şekil 6.1 f Sürekli fonksiyonunun simgesel olarak kesikli hale dönüştürülmesi..	49
Şekil 6.2 İki boyutlu alanın ağ sistemine bölünmesi	50
Şekil 6.3 i,j düğüm noktası	50
Şekil 6.4 Geçirimsiz sınır şartları	52
Şekil 6.5 Köşeler ve 45° eğimli geçirimsiz sınırlarda h_{ij} değerlerinin bulunması..	53
Şekil 6.6 Akım çizgileri ve toplam sızma miktarının toplam yükün kesikli değerlerinden elde edilişi.....	53
Şekil 7.1 Sazlıdere Barajı maksimum gövde enkesiti	57
Şekil 7.2 Sazlıdere Barajı rezervuar su seviyesi-kaçak ölçüm savağı eşel kotu grafiği.....	63
Şekil 8.1 Sazlıdere Barajı'nda sonlu farklar metodunun uygulama kesiti.....	66
Şekil 8.2 Enjeksiyon perde boyunun 20 m yapılması durumunda potansiyel çizgileri.....	69
Şekil 8.3 Enjeksiyon perde boyunun 20 m yapılması durumunda akım çizgileri.....	69
Şekil 8.4 Enjeksiyon perde boyu – sızma debisi grafiği.....	72
Şekil 8.5 Çeşitli boyutsuz enjeksiyon perde boyları için yük etkisi grafiği.....	73
Şekil 8.6 Çeşitli boyutsuz enjeksiyon perde boyları için akım etkisi grafiği.....	74

Şekil B.1 Enjeksiyon perde boyunun 40 m yapılması durumunda potansiyel çizgileri.....	92
Şekil B.2 Enjeksiyon perde boyunun 40 m yapılması durumunda akım çizgileri....	92
Şekil B.3 Enjeksiyon perde boyunun 50 m yapılması durumunda potansiyel Çizgileri.....	93
Şekil B.4 Enjeksiyon perde boyunun 50 m yapılması durumunda akım çizgileri....	93
Şekil B.5 Enjeksiyon perde boyunun 60 m yapılması durumunda potansiyel çizgileri.....	94
Şekil B.6 Enjeksiyon perde boyunun 60 m yapılması durumunda akım çizgileri....	94
Şekil B.7 Enjeksiyon perdesi yapılmaması durumunda potansiyel çizgileri.....	95
Şekil B.8 Enjeksiyon perdesi yapılmaması durumunda akım çizgileri.....	95



SEMBOL LİSTESİ

ϕ	: Hız potansiyeli
ψ	: Akım fonksiyonu
k	: Hidrolik iletkenlik katsayısı
v	: Akım hızı
v_x, v_z	: x ve z yönlerinde akım hızı bileşenleri
i	: Hidrolik eğim
h_1, h_2	: Su yükü
i_z	: z yönünde hidrolik eğim
q_e	: Birim hacme birim zamanda giren akım
q_1	: Birim hacimden birim zamanda çıkan akım
k_v	: Düşey hidrolik iletkenlik katsayısı
k_h	: Yatay hidrolik iletkenlik katsayısı
Q	: Debi
I	: Akım
ϕ_1, ϕ_2	: Parçalar metodunda boyutsuz şekil faktörleri
T	: Parçalar metodunda geçirimli zeminin kalınlığı
S	: Parçalar metodunda geçirimsiz sınır uzunluğu
$\Delta x, \Delta y$	: Sonlu Farklar Metodunda seçilen ağ sisteminde her bir dikdörtgensel hücrenin x ve y doğrultusundaki uzunlukları
n	: Sınır çizgisine normal doğrultuda koordinat
α	: k_x / k_y

ÖZET

Gövde altından sızma problemleri bütün barajlarda göz önüne alınması gerekli bir konudur. Sızma miktarlarının beklenmeyen boyutlarda olması ve gerekli iyileştirmelerin zamanında veya hiç yapılmaması durumunda, önemli miktarlarda su kaybının yanında, baraj ve mansap bölgesinin emniyetini tehdit edecek sonuçlarla karşılaşılabilir. Projelendirme aşamasında detaylı jeolojik araştırmaların yapılması, olası sızmaların yerlerinin ve miktarlarının analiz edilmesi, gerekli kontrol metotlarının belirlenmesi ve iyi uygulanması bu olumsuzlukların ortaya çıkmasını ve iyileştirme için daha fazla mali kaynak ve zamanın harcanmasını önleyebilmekte veya en aza indirebilmektedir.

Sızmalar tamamen yok edilemezler ancak zemin ve gövde tipine en uygun sızma kontrol metotlarından bir ya da birkaçının uygulanması ile en aza indirgenebilirler. En uygun sızma kontrol metoduna karar verilebilmesi için sızmaların yerleri ve büyüklükleri iyi belirlenmiş olmalıdır. Bu durum detaylı jeolojik etütlerin yanında uygun sızma analiz metotlarının uygulanmasını da gerektirir. Seçilen sızma kontrol metodunun ekonomik olarak uygulanabilir olması da büyük önem taşır, bu amaçla kabul edilebilir bir sızma için uygulanabilecek optimum boyutlar belirlenebilmektedir.

Barajlarda gerekli kontrol önlemleri uygulanmış olsa da, önceden tespit edilemeyen sebeplerle sızmalar ortaya çıkabilmektedir. Sızmalar rezervuardaki suyun kaybı ve baraj emniyeti açısından ihmal edilemeyecek boyutta ise en kısa zamanda oluşma yerleri belirlenmeli ve en uygun metodun seçimi ile gerekli iyileştirmeler yapılmalıdır. Her alanda olduğu gibi sızma kontrol, iyileştirme ve analiz metotlarında da gelişmeler sürekli devam etmektedir. Yeni gelişmelerin takip edilmesinin yanında geçmiş tecrübelerin bilinmesi de inşaat sırasında ve kaçaklar ortaya çıktıktan sonra alınacak önlemlerin başarısını artıracaktır.

Tez çalışmamızda gövde altından sızmalar için günümüzde uygulanan kontrol, iyileştirme ve analiz metotları incelenmiş, konu ile ilgili önceki çalışmalar araştırılmış ve İstanbul'a içme suyu temin eden barajlardan ve gövde altından önemli su kaçakları problemleri ile karşılaşmış olan Sazlıdere Barajı için “sonlu farklar metodu”nun kullanıldığı bir analiz ile çeşitli enjeksiyon perde boyu alternatifleri için sızma miktarları ve optimum perde boyu hesaplanmış ve sonuçlar mevcut verilerle karşılaştırılmıştır.



SUMMARY

Underseepage is a problem that should be considered for all types of dams. In case of unexpectedly great quantities of seepage water is faced and if late or no remedial works are conducted, not only great quantities of water is lost but also safety problems are faced threatening both dam and the downstream areas.

By conducting detailed geological investigations, analyzing the location and the quantities of the possible seepage sources, selection and good applications of the necessary control methods, these negative results and future expenses for the remedial works can be prevented or minimized.

Seepage can not be prevented completely, but can be minimized by using the suitable control methods. Locations and the magnitudes of the seepage must have been determined for the choice of the most suitable seepage control methods. Along with the detailed geological investigations, use of the suitable analysis methods to determine the magnitude of the seepage helps the selection of the best control methods. Even though all investigations are conducted and all control measures are taken, seepage problems can expose. If the quantity of the seepage water is not negligible, locations of the seepage and the suitable remedial methods must be determined and conducted. Along with the following of the new developments related to the seepage problems, knowledge of the previous experiences also helps the success for the seepage control and remedial seepage control applications.

In this study, control, remedial and analyzing methods of the underseepage problem of dams and the previous studies have been examined and the underseepage problem of “Sazlıdere Dam”, which is one of the domestic water supply dams of Istanbul and had important underseepage problem during the first filling of the reservoir, was examined and seepage quantities of the dam for different heights of grouting curtains have been calculated by using “finite difference method” and the optimum curtain height was determined and the results have been compared to the measured ones.

1.GİRİŞ

1.1 Konunun Önemi

Hidrolikte sızmanın (seepage) kelime anlamı, suyun zemin kütlesi içinde, bir su kitlesinden uzaklaşır şekilde küçük çatlaklar, boşluklar, yarıklar vb. boyunca yavaş olarak hareketidir. Kaçak (leakage) kelimesi ise suyun hidrolik bir yapıdan kontrol edilemeyen neden veya nedenlerle, hidrolik basınç altında kaybı anlamına gelir ve daha çok su kaybının problem boyutunda gerçekleştiği durumları belirtir. Su yapılarında meydana gelen su kayıpları genellikle her iki tanıma da uyan şekillerde gerçekleşmektedir. Bu nedenle literatürde aynı problem için, her iki kelime de kullanılmaktadır. Sızma ya da kaçak olarak tanımlanabilecek su kayıplarının tüm toprak barajlarda, hatta beton barajlarda gövde boyunca, gövde altından, yamaçlardan ve göl alanından gerçekleşmesi, muhtemeldir. Ancak su kayıpları beklenenin üzerinde ya da yapı emniyetini tehdit eder bir şekilde gerçekleşiyor ise büyük bir problem olarak belirtilir ve en kısa zamanda kabul edilebilir sınırlara çekilmesine çalışılır. Bu nedenle henüz projelendirme aşamasında iken, sızmaların ekonomik olarak gerçekleştirilebilen ölçülerde en aza indirgenmesine ve su yapısına zarar vermeden uzaklaştırılmasına yönelik tedbirlerin alınmasına çalışılmalıdır.

Su kaçakları çoğu kez, su ve zeminin kimyasal özelliklerini, zemin mekaniğini, hidroloji, jeoloji ve yeraltı suyu akımı konularını içine alan çok disiplinli bir konudur. Tüm önlemler alınmış olsa da, barajlarda sızmalar bir problem olarak ortaya çıkabilmekte, borulanmalar ve alttan kaldırma basınçlarına sebebiyet vererek yapının ve çevresinin emniyetini tehlikeye sokabilmektedir. Ancak, özellikle yeterli jeolojik araştırmalar yapılmadan ya da jeolojik koşullara ve gerekli inşaat kalitesine uygun olmayan şekilde inşa edilmiş olan barajlarda su kaçaklarının olması kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle sızmaların yerleri ve büyüklükleri projelendirme safhasında çok iyi analiz edilmeli ve emniyet ve ekonomi açısından optimum çözümlerin sağlanmasına çalışılmalıdır.

Türkiye’de bugüne kadar pek çok baraj yapılmıştır. Bundan sonra da yapılacak yüzlerce baraj vardır. Bu barajların pek çoğunda dünyanın her yerinde olduğu gibi sızma ve kaçaklarla karşılaşmaktadır. Gelişmiş ülkelerde hemen hemen her yıl, her bir barajdaki sızma durumları belli bir kurul tarafından incelenmekte ve rapor halinde ilgilere sunulmaktadır. Mevcut sızma problemlerinin araştırılması için standart kriterler belirlenmiş ve uygulanmaktadır.

Türkiye’deki barajlarda gövde içinden, gövde altından, yamaçlardan, baraj kapaklarından hatta çoğu kez baraj gölünden sızma ve kaçaklar olduğu bilinmektedir. Bunların bir kısmı yapının boyutlarını tehlikeye düşürecek boyutlara ulaşmaktadır. Bir kısmında ise sızma kayıpları büyük boyutlara ulaşarak kayıp su miktarı açısından önem kazanmaktadır. Özellikle barajların altındaki sızmalar zamanla borulanmalara sebep olabilmektedir. Borulanmalar ise bir yandan su kaybını artırırken diğer yandan baraj temelinin yapısını bozmakta, dolayısıyla baraj gövdesinin sağlamlığını tehlikeye düşürmektedir.

1.2 Çalışmanın Amacı, Seçilen Konu ve Uygulanan Metot

Bu çalışmanın amacı, barajlarda gövde altından gerçekleşen sızmaların kontrol ve iyileştirme esaslarını incelemenin yanısıra, kaçakların önceden tahminine yönelik analiz metotlarının incelenmesi ve bu amaçla “Büyük İstanbul İçmesuyu Projesi” kapsamında inşaatı 1995 yılında tamamlanmış olan, ancak daha sonra özellikle gövde altından su kaçağı problemleri ile karşılaşılan “Sazlıdere Barajı”nda çeşitli geçirimsiz perde boyu alternatifleri için “Sonlu Farklar Metodu” nun kullanıldığı bir analiz uygulayarak iyileştirme çalışmaları sonuçları ile bulunan sonuçların karşılaştırılarak en uygun olabilecek enjeksiyon perde boyu için değerlendirmeler yapmaktır. Aynı zamanda sızma ve kaçakların analiz, kontrol ve iyileştirilmeleri ile ilgili yayınlar değerlendirilmiştir.

2. BARAJLARDA GÖVDE ALTI SIZMALARI İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Genel

Sızma problemi, dünyanın pek çok yerinde bugüne kadar inşa edilmiş olan barajların emniyet ve fayda bakımından planlama, inşaat, ilk su tutmaya başlama ve işletme süresinin tüm safhalarında incelenmesi ya da takip edilmesi önemli bir konu olmuştur. Sızmaların planlama aşamasında doğru analiz edilerek, yapının ekonomik olarak yapılabilir inşa edilmesinin sağlanması amacıyla uygulanmış laboratuvar model çalışmaları, arazi gözlem çalışmaları, matematik modellerin yanında, inşaat sonrası gözlemler ve beklenmeyen miktarlardaki sızmaların kontrol altına alınması sürekli önemli bir konu olmuş ve bu amaçla çeşitli metotlar dünyanın değişik bölgelerindeki sızma problemi beklenen ya da gerçekleşen barajlarda araştırmacılarca uygulanmış ve yayınlanmıştır.

Yapılan literatür çalışması sonucunda bugüne kadar yayınlanan araştırmaların genellikle iki ana başlıkta toplandığı görülmüştür:

- a. Sızma probleminin analizi ile ilgili olan çalışmalar ki, bu çalışmalar, inşaat öncesi (projelendirme aşamasında) ya da inşaat sonrasında beklenmeyen bölgelerden ya da beklenmeyen miktarlarda açığa çıkan sızmaların çeşitli metotlarla analizini kapsamaktadırlar.
- b. İnşaat sonrası açığa çıkan su kaçaklarının tespit ve kontrolü amacıyla uygulanan metotların anlatıldığı (iyileştirme metotları ile ilgili) çalışmalar.

Bu bölümde her iki başlık altında, barajlarda gövde altından gerçekleşen su kaçakları ve bunların iyileştirilmesi için uygulanan önlemlerle ilgili olarak yapılan çalışmalardan örneklerle yer verilmiştir.

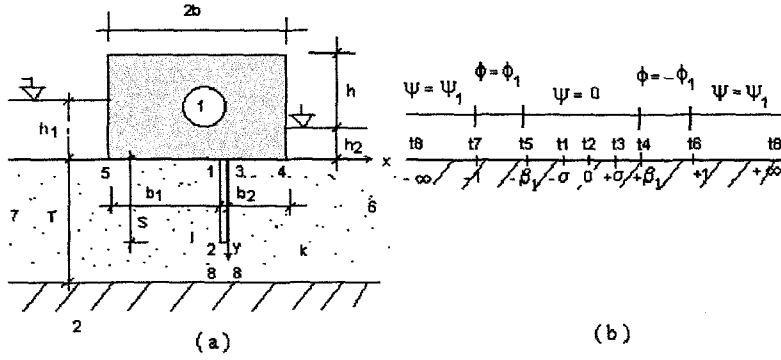
2.2 Sızma Probleminin Analizi Çalışmaları

1. Temelden sızmalar için yapılan bir analiz (Tadahiko SAKAMOTO, 1999)

Japonya'daki kaya dolgu bir barajın altından oluşan ölçülmüş sızmaların analizi için yapılan bir çalışmada, potansiyel teorisine dayalı bir metot (Dönüştürme Metodu-Method of Transformation) çalışılmış ve bu yolla sızmanın sayısal karakteristikleri hesaplanarak mevcut verilerle karşılaştırılmıştır. Merkez kil çekirdekli kaya dolgu barajların emniyeti için temellerden ve gövdeden sızmaların ölçülmesi büyük önem taşımaktadır ve baraj temelleri hakkında en önemli bilgiler ölçülen sızmalardan elde edilebilir. Bu amaçla Japonya'daki pek çok dolgu barajın araştırma galerine gözlem kuyuları yerleştirilmiş ve mansapta sızma toplama kuyuları veya sızma ölçüm savakları tesis edilmiştir. Geleneksel metot olarak adlandırılan sızma ölçüm savakları yağmur, kar erimesi gibi etkenler nedeniyle doğru bilgi veremedikleri için bu metottan 1970'lerden itibaren vazgeçilerek, sızma debilerinin temelde tesis edilen su toplama savakları ve piyozometre boruları ile ölçülmesi uygulamasına başlanmıştır.

Temelden sızmaların tespiti için yapılan teorik çalışmada, bu şekilde sızma ölçümleri yapılmış bir baraj için hidrolik iletkenlik katsayısı k ve kalınlığı T olan geçirimsiz bir kaya kütlesi ele alınmış ve çekirdek ve enjeksiyon perdesinin geçirimsiz olduğu, akımın Darcy Kanunu'na uyduğu kabulü iki boyutlu düzlem üzerinde yer alan basit bir model elde edilmiştir. Burada ϕ hız potansiyeli, ψ ise akım fonksiyonunu temsil etmektedir.

Şekil 2.1'de z düzlemi üzerinde, (1) bölgesi geçirimsiz kil çekirdeği göstermekte olup, 1' den 8' e kadar numaralandırılan bölgeler t düzlemi üzerinde t_1 'den t_8 ' ye kadar sıralanmış noktalarla temsil edilmekte ve iki düzlem arasında kurulan fonksiyonel bağıntılarla sızma miktarları bulunmaktadır. "Temsil Metodu ya da dönüştürme metodu (conformal representation method)" olarak bilinen bu metot(Engineering Manual, 1986), ilk kez bu çalışma ile kaya dolgu bir barajın gözlenmiş sızma değerlerini analiz etmede kullanılmıştır(Tadahiko SAKAMOTO, 1999).



Şekil 2.1 (a) Sızmanın z düzleminde şematik gösterilişi. (b) Sızmanın t düzleminde şematik gösterilişi.

Japonya'daki çok sayıda kaya dolgu baraj üzerinde incelenen metodun, geçirimsiz bir çekirdek ve temelinden olan sızmaların nicel analizinde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

2. Mardi Barajı için yapılan analiz (Gan J.K, Mc Donald L.A.,1999)

Mardi Barajı, 1960'lı yıllarda inşa edilmiş, geçirimli temel üzerinde bir barajdır. Avustralya Wyong'da bulunan baraj homojen toprak dolgu tipindedir. Bu çalışmada gövde sızma basınçları analiz edilerek mevcut ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Önce gövde ve temeldeki boşluk suyu basınçları araştırılmıştır. Akım ağlarını belirlemek üzere sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır.

Bunun için önce yatay/düşey hidrolik iletkenlik oranları farklı tabakalar için düzenlenmiştir. Drenaj örtüsü ve düşey drenaj kuyularının etkinliği, çıkan sonuçlar gözlenmiş olan basınç ve freatik hattın değerleriyle uyum gösterene kadar deneme yanılma yolu ile bulunmuştur. Eğik drenlerin ve ağırlık palyelerinin gövde ve temelin piyozometrik basınç dağılımı üzerindeki etkileri modellenmiştir. Analizde kullanılan hidrolik iletkenlik katsayıları aşağıda verilmiştir:

- Gövde : $k_h = 1 \cdot 10^{-9} \text{ cm/s}$
- Drenaj örtüsü ve düşey drenaj kuyuları : $k_h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$
- Doğal killi alüvyon blanket : $k_h = 1 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$
- Doğal kumlu alüvyon tabaka : $k_h = 1 \cdot 10^{-5} \text{ cm/s}$

- Killi artık toprak tabakası : $k_h = 1 \cdot 10^{-6}$ cm/s

Yapılan testler alüvyon tabakasının hidrolik iletkenlik katsayısının yer yer 10^{-3} cm/s olduğunu göstermiştir. Sızma modellemelerinde temel için düşük hidrolik iletkenlik katsayısı kullanılmasının gövde sızma ağında pek etkili olmadığı düşünülmektedir. Yatay ve düşey hidrolik iletkenlik katsayıları (k_h ve k_v) verilen gerçek büyüklüklerine göre keyfi değerler olarak atanmıştır. k_h/k_v oranı piyozometrik yükseklikleri değil, sadece debiyi etkilemektedir. k_h/k_v oranları ölçüm değerleri ile uyumlu sonuç bulunana dek çalışılmıştır.

Bu çalışmada değişik seçenekler denenmiştir. Sonuçta, k_h/k_v oranının gövdede yaklaşık 15/1 olduğu görülmüştür. Piyozometre ölçüm noktalarından alınan sonuçlar hesap sonuçlarıyla uyumlu çıkmıştır.

2.3 İyileştirme Çalışmaları

1. Bakoyianni Barajı'nda Yapılan İyileştirmeler (E.C.Kalkani, 1996).

Yunanistan'ın Agrinion kasabasında bulunan, inşa edildiği bölgede fay kırıkları ve sıcak su kaynakları bulunan ve sürekli sızma problemleri olan, çok amaçlı (HES, sulama ve taşkın kontrolü) toprak dolgu tipteki Bakoyianni Barajı'nda yapılan iyileştirmelerin değerlendirildiği çalışmada, bölgenin jeolojik koşulları ve ilk inşaat sırasındaki temel enjeksiyonları, sızmaların oluşması, yapılan iyileştirme enjeksiyonlarının sızma üzerine etkileri incelenmiştir.

Rezervuar hacmi 4.75 milyar m^3 , dolgu hacmi 8.1 milyon m^3 , kret uzunluğu 460 m ve yüksekliği 160 m olan proje 1960 - 1965 yılları arasında inşa edilmiş, 1966 yılında işletmeye açılmıştır.

Temel kayası birbiriyle geçişli silttaşı, konglomera, ve kumtaşıdır. Vadi tabanı genellikle kireçtaşı içeren sediment içermektedir. Baraj eksenine ve yüzeye yakın bulunan fay çatlakları bir kaç mm ile bir kaç m arasında değişir, bunlar kil, silt, kum ve kaya kırıkları ile dolmuşlardır. Yapılan su deneyleri fayların silttaşında geçirimsiz, ancak konglomerada geçirimli olduğunu göstermiştir.

Memba tarafındaki A Fayı suyun rezervuardan girdiği, F'de mansapta doğal drenajın yapıldığı faylardır. Mansaptaki D fayı gevşek kum ve küçük agrega

malzemesi ile, yine mansaptaki E fayı ise kırık kayaçlarla dolmuş ve her iki yamacın derinliklerine doğru uzanmaktadır. Bunlar sızmanın ana taşıyıcılarıdır.

Her iki sahilde küçük sülfürlü sıcak su kaynakları vardır, bunlar baraj inşaatı sırasında yapılan enjeksiyonlarla başarıyla kapatılmışlardır. Konglomerada çeşitli şekillerde eriyik kanalları oluşmuştur, rezervuarın su ile dolmasından sonra çok uzun mesafelere yayıldığı ve göl suyunu yamaçlardan uzaklara taşıdığı anlaşılmıştır. Baraj ekseninde kilin üst tabakasına saplanan beton sızdırmazlık hendeği inşa edilmiştir. Bu hendek inşasında kumtaşları ve silt taşları çimentolaşmış olduğundan çok iyi kazılmaları gerekli olmuştur.

Temel iyileştirmesinde öncelikle kayanın üzerindeki örtü tabakası kaldırılmıştır. Çok kırıklı kaya tabakasının üzerine beton tabaka döşenmiş ve kontak enjeksiyonu yapılmıştır. Bentonit içeren su-çimento enjeksiyonu ile sıcak su kaynaklarına enjeksiyon yapılmıştır. Betonun altındaki enjeksiyon perdesi gövde çekirdeğinin değişik derinliklerde dikey bir uzantısı olarak tasarlamıştır. Silttaşı tabakalarında enjeksiyon tüketimi az, konglomerada, eriyik kanallarında ve fay çatlaklarında ise çok miktarda olmuştur. D ve C faylarının arasında enjeksiyon perdesi olduğu için bu kısımlarda yapılan iyileştirmelerde kullanılan enjeksiyon miktarı düşük olmuştur. E fayının sağ sahildeki çatlakları çok sayıda çatlak içermektedir, enjeksiyondan önce bu çatlakları doldurmuş olan kil, silt ve kum yıkanmak suretiyle giderilmiştir. Sağ sahilde de F fayı ile bağlantılı çatlaklar ve eriyik kanalları vardır. Bozulmamış kayanın geçirimliliği oldukça düşüktür. Bu nedenle bağlantılar, kırıklar ve eriyik kanallarının geçirimliliği önemlidir. Silttaşının fay bölgesindeki bozulmuş kaya kısımları dışında enjeksiyon sarfiyatı az olmuştur.

Baraj 1965 yılının Temmuz ayında bitilmiş ve aynı ay derivasyon tüneli kapatılmıştır. Aynı yılın Ağustos ayında rezervuar dolmaya başlayınca her iki sahilin mansap topuklarında sızmalar olduğu fark edilmiştir. 1966 yılının bahar ayında ise her iki sahilden sızmalar en yüksek derecesine ulaşmıştır (500 l/s sağ sahilde, 400 l/s sol sahilde).

Sızmalar ilk fark edildiği andan itibaren hemen bir iyileştirme programına başlanmış, 1966 yılının başlarında ilave enjeksiyon programına başlanmıştır. Bu program içinde, enjeksiyon perdesinin her iki sahile doğru uzatılması, D fayına enjeksiyon yapılması vardır. Aynı yıl her iki sahilde kaya yığınlarını uzaklaştırabilmek ve böylece enjeksiyon perdesinin mansap kısmına ilave enjeksiyon

yapabilmek için bir ulaşım ve iki geçiş galerisi inşa edilmiştir. Galerilerin açılması ve ilave enjeksiyon işleri 1966 temmuz ayında bittiğinde sızmayı azaltmakla beraber beklenen düzeye getirememiştir.

İlk iyileştirmelerin yeterince başarılı olmadığı görüldüğü için, 1967 yılında yapılan değerlendirmelerde yeni iyileştirmelere karar verilerek her iki sahilde enjeksiyon ve drenaj işlerinden önce piyozometre ölçümleri yapılmasına karar verilmiş, gerekli sistemler yerleştirilmiştir. İlk enjeksiyonlara ve drenaja 1971 yılında başlanmış ve 1973 yılına kadar çalışılmıştır. Bu iyileştirme çalışmaları sırasında su seviyesi 273.6 m'ye düşürülmüştür.

Çalışmalar içinde sağ ve sol sahilde drenaj perdeleri, sızma ölçme tesisleri, uygun karışımlarla yapılan çeşitli aşamalarda ve çeşitli derecelerdeki enjeksiyonlar ve deneyler yapılmıştır. Sızmaların büyük bölümünün kaynağı D ve E fayları olarak belirlenmiştir. Sol sahildeki drenaj sisteminin ve su kaçağı ölçme tesislerinin 1968 yılındaki inşaatından ve 1969-1973 yıllarında piyozometrelerin yerleştirilmesini müteakip, kaçak debileri ve piyozometre seviyeleri belirli aralıklarla düzenli olarak ölçülmüştür. Enjeksiyon deliğinin toplam uzunluğuna karşılık gelen toplam su akımı, su test sonuçları ve enjeksiyon sarfiyatları noktalanmak suretiyle her bir enjeksiyon deliği için grafikler tutulmuştur. Enjeksiyon ilerledikçe deliklerdeki su enjeksiyon sarfiyatında azalma olmuştur. Her sızma noktası günlük olarak ölçülerek grafikler çıkarılmış ve enjeksiyonun rezervuar su seviyesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Her iki sahilin orta konglomerasındaki enjeksiyonlar tamamlandığında kaçak debisinde önemli miktarda azalma olmuştur. Sol sahildeki enjeksiyon tamamlandığında kaçak debisi % 45 azalmıştır.

Rezervuarın 30 yıllık işletmesi süresince proje maksimum su seviyesine hiç ulaşmamıştır.

2. Kalecik Barajı'ndaki Sızma Problemlerinin İyileştirilmesi(Türkmen S., 2002)

Kalecik Barajı Osmaniye İli' nde, Ceyhan Nehri'nin bir kolu olan Kalecik Nehri üzerinde yer alan 77 m yüksekliğinde kil çekirdekli kaya dolgu tipinde inşa edilmiş, sulama amaçlı bir barajdır. Yıllık ortalama su miktarı 31.25 milyon m³, maksimum su seviyesi 535 m ve minimum su seviyesi 493 m'dir. Rezervuar su seviyeleri ile sızma debileri arasındaki ilişki Tablo 2.1'de gösterilmiştir. Sızma kayıpları özellikle yaz aylarında uzun vadede sulama suyu açısından büyük sıkıntı yaratabilecektir.

Kalecik Barajı 1985 yılında inşa edilmiştir. Rezervuar dolmaya başladığında derivasyon tünelinin yanlarından ve üst kısmından sızmalara başlamıştır. Derivasyon tüneline meydana gelen hasarlar tünelin içinden yapılan enjeksiyonlarla giderilmiştir. 1986 yılında rezervuar su seviyesi 495 m'ye ulaştığında mansapta sızmalar gözlenmiş ve 81 l/s olarak ölçülmüştür.

Tablo 2.1 Kalecik Barajı'nda sızma debilerinin rezervuar su seviyeleri ile değişimi.

Rezervuar Su Seviyesi (m)	Sızma (l/s)
500	50
505	60
510	90
515	120
520	180
525	250
530	530
535	1035

1987 yılında su seviyesi arttıkça sızma miktarı artmış ve vadi içinde yeni kaynak noktaları oluşmuştur. 1987 yılının sonlarında sızmanın nedenini ve yapılabilecek en uygun iyileştirmeyi bulmak için araştırmalar başlatılmıştır. 1990 yılında jeolojik ve hidrojeolojik araştırmalar, boya izleme ve su kimyasal deneyleri yapılmış, araştırma kuyuları açılmış ve enjeksiyonlar yapılmıştır.

Baraj inşa edilirken kaçakların olması ihtimaline karşı ilave enjeksiyonlar da yapılmıştır. Başlangıçta temel oldukça geçirimsiz ve depolamada sorun yok iken, seviye 500 m'ye ulaştığında mansapta üç kaçak kaynağı belirmiştir(445, 460 ve 475. m'lerde). 1990 yılında gerçekleştirilen 1. ve 2. enjeksiyonlar sonucunda kaynaklardaki sızma debilerinde azalma olmadığı gibi yeni kaynakların açığa çıktığı ayrıca rezervuar su seviyesi zaman içinde yükselmesiyle sızma miktarının da arttığı görülmüştür. Mansapta ortaya çıkan kaçak suyu kaynakları ile ilgili bilgiler şöyledir: Kaynak 1: Derivasyon tüneli içindeki drenaj kuyusundan beslenmektedir. Ortalama debisi 15-20 l/s dir.

Kaynak 2: Derivasyon tüneli çıkışı yanlarından beslenmektedir.

Kaynak 3: Dolusavak sol sahilinde nehir yatağının yanında birden fazla kaynak oluşmuştur: Rezervuar seviyesinin yükselmesi ile, sızma suları daha geniş alanlara yayılmıştır.

Kaynak 4: Barajın mansap topuğunda birden fazla kaynak vardır ve rezervuar seviyesi 520 m'ye ulaştıktan sonra açığa çıkmışlardır.

Kaynak 5: Baraja uzaklığı en fazla olan kaynaktır. Baraj ekseninin 500 m mansabında sağ ve sol sahilde açığa çıkmışlardır. Değişik yerlerden beslenmektedirler.

Ayrıca, bu kaynakların haricinde, barajın mansabında olup, ölçümleri yapılmamış olan başka kaynaklar da vardır.

İyileştirme programında, enjeksiyon perde inşaatından önce, su kayıp miktarı basınçlı su deneyleri ile tahmin edilmiştir (packer test). Kireçtaşı tabakalarının birleşim yerlerinde sızma miktarının arttığı görülmüştür.

Kati proje aşamasında enjeksiyon perdesi inceleme kuyuları sonuçlarına göre tasarlanmıştır. Enjeksiyon delikleri aralığı 3 m, derinliği ise baraj temelinin 15-20 m aşağılarındadır. Hidrojeolojik çalışmalar ve boya izleme deneyleri sonucunda enjeksiyon perdesinin derinleştirilmesine karar verilmiştir. Perde, kireçtaşının altındaki geçirimsiz tabakanın içinde 10 m daha derine ve K-5 kaynağının kotu olan 442 m'ye inecektir. Bu seviye minimum su seviyesinin de altındadır. Enjeksiyon, üst sıra temel oturmaları, alt sıra enjeksiyon perdesi oluşturmak için olmak üzere, iki sıra olarak yapılmıştır. Perdenin alt sınırı 470 m kotundadır.

Barajın inşa edilmesinden ve su seviyesinin 500 m'ye ulaşmasıyla beraber mansapta kaynaklar belirmiştir. Karstik boşlukları ve çatlakları doldurmak için esas enjeksiyon perdesini destekleyici ilave enjeksiyonlar yapılmıştır. Perde derinliği ilk perde derinliğine eşit alınmış, delik aralıkları ise azaltılmıştır. Enjeksiyon düşük basınçlı olarak yapılmıştır ($P=0.23$ h bar, h =aşamadaki derinlik). Genellikle eğik olan perde deliklerinde ayrı ayrı basınçlı su deneyleri yapılmıştır. Bu aşamada açılan toplam 1814 m'lik 30 delikte, 126395 kg çimento ve 6187 kg bentonit kullanılmıştır. Enjeksiyon şerbeti ağırlık olarak % 37 çimento ve % 63 su içermektedir.

Sızmaları tam olarak belirleyebilmek için, esas ve ilave enjeksiyon perdesi ile aynı doğrultuda, 442 m derinliğe kadar inen araştırma kuyuları açılmıştır. Sonuçta kireç taşının altında yer alan biriminin çok geçirimsiz olduğu belirlenmiş ($k < 10^{-7}$ m/s) ve

enjeksiyon perdesinin bu birime kadar indirilmesine karar verilmiştir. Her enjeksiyon deliğinde 5'er m'lik aşamalar halinde, kayanın özelliğine göre farklı enjeksiyon uygulamaları yapılmıştır.

İyileştirme enjeksiyonlarının incelenmesi sonucunda enjeksiyon şerbeti tüketiminin 40 m derinlikte arttığı görülmüştür. Sonuçta enjeksiyon tüketiminin fazla olmasının herhangi bir sistematığının olmadığı, kesişim yerleri ve boşlukların düzensiz bir dağılım gösterdiği görülmüştür.

İlk enjeksiyon perdesi 14900 m², ilave enjeksiyon perdesi 12450 m² ve son enjeksiyon perdesi ise 27350 m²'dir; son iyileştirme enjeksiyonu için 825 ton çimento, 28 ton bentonit, 4.8 ton kum ve 0.2 ton sodyum silikattan oluşan bir enjeksiyon karışımı kullanılmıştır.

İlk enjeksiyon, çatlak yerlerini ve karstik boşlukları doldurmak için ilave iki aşama enjeksiyon ile güçlendirilmek zorunda kalmıştır. Enjeksiyon delik aralıkları sıklaştırılmıştır. Enjeksiyonun sızmayı azaltmaması üzerine eğik olarak açılan sondajlardan alınan karotlarda az yoğun enjeksiyon karışımı kullanılması, yoğun çatlaklar ve karstifikasyon nedeniyle çok az enjeksiyon maddesi olduğu görülmüştür. İkinci aşamada ilk enjeksiyonla aynı yönde araştırma kuyuları açılmış ve 442 m seviyesine inen enjeksiyonlar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda kaynaklar küçülmüştür.

Üçüncü aşamada dolusavak altına sondajlar yapılmış, ancak bu bölgedeki karstik oluşumların birbiriyle bağlantılı daha derin bölgelere uzanıyor olması sonucunda, sızmalar dolusavak çıkışına doğru ilerlemiştir, sızma kaynaklarının debileri değişmemiştir.

Yapılan tüm bu iyileştirme çalışmalarının sonucunda baraj mansabındaki kaçak kaynakları olan K-1 ve K-3 kaynaklarında debilerin azaldığı, ancak kaçağın dolusavak altına doğru yön değiştirdiği ve toplam kaçak debisinin aynı kaldığı belirlenmiştir. Kaçak debilerinin ve araştırma kuyularında YAS seviyelerinin ölçümlerine devam edilmesine karar verilmiştir.

3. TEMELLERDE SIZMA KONTROLÜ

3.1 Genel

Barajların üzerine inşa edileceği temeller iki ana başlık altında toplanır:

- Toprak temeller
- Kaya temeller

Temelden oluşacak sızmalar mansapta pınarlaşmalar ve ani toprak yükselmeleri yapmayacak kadar az olmalı ve rezervuardan belli bir miktarın üzerindeki suyun kaybı olmamalıdır. Sızma basıncının temelde iç erozyonla ince taneleri boşaltacak kadar büyük olmaması gereklidir (Ulugür, E. M., 1972). Her bir temelin kendine has problemleri vardır ve bunun için uygun tedbirlerin alınması gerekir. Projenin büyüklüğü ve önemi de alınacak önlemlere karar verilmesinde etkili olur. Sızma miktarlarının çeşitli metotlarla belirlenmesi gerekir.

3.2 Toprak Temellerde Sızma Kontrolü

Toprak temeller üzerindeki tüm barajlar alttan sızmaya maruzdur. Toprak temellerde sızma kontrolü, aşırı kaldırma basınçlarını ve temelde oluşabilecek borulanmaları önleyebilmek bakımından çok önemlidir. Projenin amacı, örneğin, uzun süreli depolama, taşkın kontrolü, enerji üretimi, vb. sızmaların kabul edilebilir limitini belirlerler. Genellikle, rezervuar tabanında zaman içinde oluşan siltlenmeler, alttan sızmanın etkisini azaltmaktadır. Basınç azaltıcı kuyular ve topuk drenleri gibi bazı sızma kontrol yöntemleri ise alttan sızmanın miktarını artırabilir. Toprak temellerindeki alttan sızmayı kontrol etmede kullanılan metotlar, yatay drenler, sıkıştırılmış saplama hendekleri (cutoffs), perde duvarlar(slurry walls), betonarme perde duvarlar, çelik kazık perdeler (sheet pile), memba geçirimsiz örtüleri, mansap sızma palyeleri, topuk drenleri ve basınç kırıcı kuyulardır. Barajların gövde ya da temellerindeki en uygun sızma kontrolü metoduna akım ağları ve çeşitli yaklaşım metotları kullanılarak yapılacak analiz sonucunda karar verilmelidir. Üzerinde

Çalışılan her baraj için alttan sızma miktarındaki değişimler, alttan kaldırma için emniyet faktörü, değişik kısımlarındaki alttan kaldırma basınçları belirlenmelidir.

3.2.1 Yatay Drenler

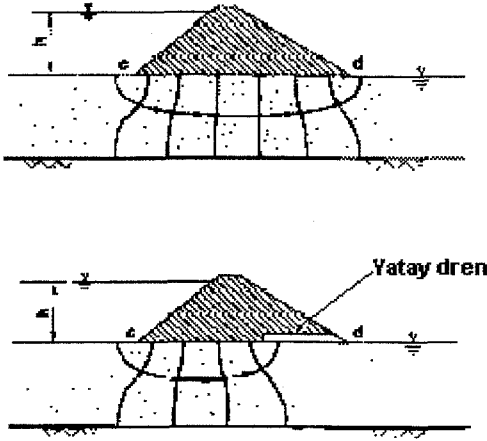
Yatay drenler gövde boyunca sızmanın kontrolünü sağlayarak temeldeki aşırı kaldırma kuvvetlerini önlerler, ancak sızan suyun miktarının artmasına neden olurlar. Şekil 3.1’ de yatay drenli ve yatay drensiz baraj enkesitleri verilmiştir.

3.2.2 Saplama Hendekleri

Geçirimli temel tabakası içindeki sızıntıları keserek sızma problemlerini gidermenin en emin yolu, sedde altına bir saplama hendeği teşkil etmektir(Altan E., 1986). Saplama hendeği (cut off), sıkıştırılmış kil dolgu ya da imento şerbeti ile doldurulan sızdırmazlık hendeği anlamına gelir. Saplama hendeklerinin görevi gövdenin geçirimsiz çekirdeğini temeldeki geçirimsiz tabakaya bağlamaktır. Baraj temelindeki geçirimli tabakanın çok derin olması durumunda, tam saplama hendeği ya da bir miktar sızmaya izin verilen kısmi saplama hendeği yapılmasına veya memba geçirimsiz örtüsü, mansap sızma palyesi, basınç kırıcı kuyu gibi seçeneklerden birine karar verilmek durumunda kalınır.

Bazı durumlarda,geçirimli tabaka çok derin değil ya da depolanan su kaçağa izin verilemeyecek kadar değerli ise, tam sızdırmazlık hendeği tercih edilir. A.B.D.’de Missouri’de bulunan HES amaçlı bir barajda hidroelektrik gücün temini için gerekli su yükünün kurak periyotta da sağlanabilmesinin, tam sızdırmazlık hendeği yapılmasına bağlı olduğu anlaşılmıştır (Engineering Manual, 1986). Tam ya da kısmi sızdırmazlık hendeği seçiminde şu hususlara dikkat edilmelidir:

- a.Yapılacak tam sızdırmazlığın maliyeti, kaybedilecek su miktarı ve HES gücü vb. maliyetleri ile karşılaştırılmalıdır.
- b. Alüvyonun borulanmaya karşı dayanıklılık derecesi araştırılmalıdır. İnce malzemeli kohezyonsuz alüvyonlar küçük bir sızmada bile tehlike oluşturabilir.
- c. Depolamadaki askıda olan silt ve kilin miktar ve boyutları araştırılmalıdır,çünkü zamanla göl tabanında birikerek sızmayı azaltırlar.
- d. Kısmi sızdırmazlık perdeleri, sadece daha az geçirimli bir zemine saplama yapılabiliyorsa ve bu tabaka vadi boyunca sürekli ise etkilidir.



Şekil 3.1 Yatay dren yapılması ve yapılmaması durumları

3.2.2.1 Sıkıştırılmış Dolgu Saplamlar

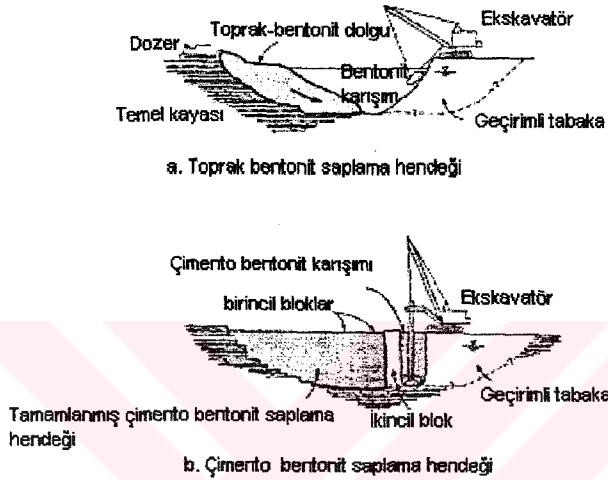
Geçirimsiz zeminde açılan hendek geçirimsiz sıkıştırılmış malzeme ile doldurulur. Zemin incelenebildiği, gerekirse iyileştirilebildiği için en etkili yöntemdir. Kullanılan malzeme ve sıkıştırma özellikleri gövde geçirimsiz bölümüyle aynıdır. Hendek temelinin genişliği 6 m den az olmamalıdır ancak altındaki tabakanın hidrolik iletkenlik özelliğine göre daha geniş tutulabilir. Hendek geçirimsiz tabakaya saplanmalıdır. Kazının kuru tutulması ve çok iyi sıkıştırma yapılması önemlidir. Bu nedenle su boşaltım sistemleri ve kuyular gerektirirler ancak bu durum maliyeti yükseltir.

3.2.2.2 Bulamaç Hendekleri

Bulamaç hendekleri (slurry trench), sulu, çamurlu ortamlarda su boşaltma maliyetleri ve/veya geçirimsiz tabakanın derinliği çok fazla ise tercih edilmelidir(Engineering Manual, 1986). İki şekilde uygulanır, ilkinde bentonit-su bulamacı kullanılarak kazılan ve doldurulan hendekteki dolgu daha sonra yerini geçirimsiz dolgu toprağına bırakır(Toprak-bentonit bulamaç hendeği veya Amerikan Metodu) .Toprak olarak kazıdan çıkan toprak kullanılabilirdiği gibi başka malzeme de kullanılabilir. Hidrolik iletkenlik katsayısı 10^{-7} cm/s'dir. Zamanla bir miktar oturmalar olur. İkinci alternatiften daha ekonomiktir.

İkinci metotta toprak yerine çimento kullanılır (Çimento-bentonit bulamaç hendeği -Avrupa Metodu ya da Diyafram Duvarı olarak da adlandırılır.) Hendekler daha dar

yapılabilir, doldurulan bulamacın kazılıp tekrar değiştirilmesi gerekmez, zayıf zeminlerde ve derin hendekler için uygulanması daha elverişlidir. Hidrolik iletkenlik katsayısı 10^{-6} cm/s'dir. Zaman içinde önemli oturmalar olmaz. Her iki metoda ait inşaat yöntemleri Şekil 3.2'de görülmektedir. Bulamaç hendekleri genellikle barajın memba topuğuna yerleştirilirler.



Şekil 3.2 Toprak-bentonit ve çimento-bentonit saplama hendeklerinin yapılışı.

3.2.2.3 Beton Duvarlar

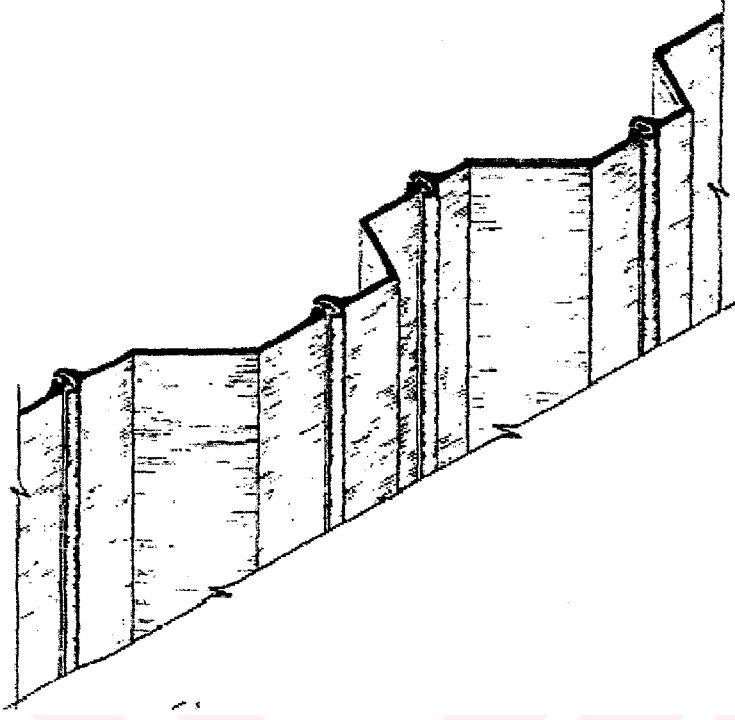
Geçirimli temelin derinliği çok fazla ise (≤ 45 m) ve/veya temel agrega, boşluklu kireçtaşı vb. bir yapı içeriyorsa, beton duvar, alttan sızmanın kontrolünde etkili bir yöntem olabilir. Bentonit ile desteklenmiş hendeğe yerinde dökülmek suretiyle imal edilir. Panel (blok) duvar ya da tekil beton duvar şeklinde yapılmaktadır, bunlar rijit yapılar oldukları için eğer bölgede şiddetli depremlerin olması ihtimali varsa tercih edilmemelidir. Ayrıca küçük barajlar için pahalıdır (Engineering Manual, 1986).

Sıkıştırılmış toprak dolgu hendekleri gibi temel suyunun boşaltılmasını ve aynı kazının yapılmasını gerektirmeleri nedeniyle dolgudan daha pahalıdır. Normalde gövdenin inşasından sonra memba ucunda imal edilir ve geçirimsiz bir örtü ile gövde çekirdek zonuna bağlanırlar. Beton duvarın memba ucuna yapılmasının

başlıca nedeni gövde ağırlığı ile oturmalarla maruz olacak temeldeki negatif yüzeysel sürtünmenin beton duvarı yıkma ihtimalini ortadan kaldırmasıdır. Önce gövdenin, sonra memba ucuna duvarın inşa edilmesi ile, beton duvarın, gövdenin inşaatının etkisiyle temelde gerçekleşen yatay hareketlilik sonucu yıkılması ihtimali minimuma indirilmiş olur. Mevcut barajların temel sızma kontrolü çalışmalarında ise, temel zaten oturmasını tamamlamış olduğu ve rezervuarı boşaltmanın ekonomik olmaması nedenleri ile merkezde inşa edilecek bir beton duvar daha uygun olacaktır. Hidrolik iletkenlik katsayıları yeterince düşüktür (su/çimento oranı 0.6 alındığında 10^{-10} cm/s). Betonun imalatında kullanılan karışım, ayrışmanın önlenmesi için çok önemlidir. Doğal yuvarlak agregalar, karışımın akışkanlığını artırarak, köşeli olanların kullanıldığı beton karışımlarına göre daha az çimento kullanılmasını gerektirirler.

3.2.2.4 Çelik Palplanşlar

Çelik palplanşlar ile temeldeki sızmaların kontrolü, birleşim yerlerindeki sızmalardan dolayı pek iyi değildir, genellikle taşkın kontrolü ve taşımacılıkla ilgili beton tesislerde temelde oluşabilecek borulanmaları önlemek için kullanılırlar (Şekil 3.3). Çelik palplanşların etkili sonuç vermesi, malzemenin özelliğine ve geçirimsiz tabakaya uygun bir derinliğe kadar çakılabilmiş olmasına bağlıdır (Engineering Manual, 1986). İçinde iri çakıl içermeyen kum tabakalarında kullanılması uygun olur. Temelin iri çakıllar içermesi hem palplanşların çakılmasını zorlaştırır, hem de çelik levhanın, özellikle de bağlantı yerlerinin hasar görerek, palplanşın etkisinin oldukça azalmasına sebep olurlar. Teorik çalışmalar küçük bir deliğin bile (toplam alanın %1'den azı) sızdırmazlık olarak palplanşın etkisini %10 ~ %100 oranlarında ortadan kaldırabildiğini göstermiştir. Zaman içinde çelik palplanşlardaki kayıplar %50 kadar artar. Bunun başlıca nedeni borulanma nedeniyle ince parçacıkların yıkanarak uzaklaşmasının yanı sıra, çelik levha birleşim yerlerindeki korozyondur.



Şekil 3.3 Çelik palplanşlar

3.2.3 Memba Geçirimsiz Örtüleri (Blanketler)

Tam saplama hendekleri çeşitli nedenlerle yapılamıyor ise, temelden olan sızmaları minimuma indirebilmek için kullanılabilecek metotlardan biri de gövde geçirimsiz çekirdek zonu ile bağlantılı memba geçirimsiz örtüleridir. Örtü boyunca etkiyen hidrolik eğimler borulanma ve dolayısıyla ciddi sızmalara neden olabileceği için rezervuarın su yükü 60 m'yi geçiyorsa uygulanmamalıdır. Alttan kaldırma kuvvetlerini ve borulanmaları önleyebilmek için mansap kontrol önlemleri (basınç azaltıcı kuyular ya da topuk drenleri) ile birlikte uygulanmalıdır. Etkinlikleri, uzunluk, kalınlık, düşey hidrolik iletkenlik ve üzerine uygulandıkları zeminin geçirimsizlik özelliklerine bağlıdır. Farklı (heterojen) tabakalı zemin durumunda tabaka kalınlığı hesabında en düşük hidrolik iletkenlik katsayısı kullanılmalıdır.

Barajlar sık sık üst tabakası geçirimsiz ya da yarı geçirimli ince daneli kil, silt, kum olan, altında bulunan katmanın ise geçirimli ince, orta ya da iri daneli kum, çakıl içerdiği (alüvyonlu) zeminler üzerinde inşa edilirler.

Geçirimsiz memba örtülerinin tasarımında kabul edilen varsayımlar şunlardır:

1-Örtü içinden geçen akım dikeydir.

2-Geçirimli temelden geçen akım yataydır.

3-Tüm akımlar laminar ve karardlıdır.

4-Baraj gövdesi ya da çekirdek zonu geçirimsizdir.

5-Örtü ve altındaki zemin tabakası sabit kalınlıkta ve yataydır.

Eğer doğal örtü varsa, alt tabakadaki geçirimli bir katmanın açığa çıktığı bir yerin olup olmadığı, sızmanın olabileceği diğer boşluk ya da delik vb. dikkatle araştırılmalı, varsa geçirimsiz malzeme ile kaplanması sağlanmalıdır. Blanketin sızma yönünden etkinliği, kalınlığına, uzunluğuna ve hidrolik iletkenliğine bağlıdır (Altan E., 1986). Soğuk iklimlerde don olaylarının üst tabakanın gevşemesine neden olarak geçirimsizliğe olumsuz etkiler yapması nedeni ile, örtü kalınlıkları daha fazla alınmalıdır. Rezervuarın siltlenmesi zamanla örtü kalınlığını artırır, ancak bu durum hesaplarda dikkate alınmamalıdır.

Hidrolik geçirimsizlik özelliğini yitirmemiş birçok kil dolgusu örneği verilebileceği gibi, bunun aksinin yaşandığı örnekler de mevcuttur. Ancak bunun sebebi genellikle kil dolgu malzemesi değil, yetersiz ya da kalitesiz sıkıştırma gibi durumlardır.

Ayrıca geçirimsizliğin sağlanmasında yeni bir metot jeosentetik kil sergilerdir. Geçirimsizlik ince bir kil tabakasının iki jeotekstil arasına yerleştirilmesi ile sağlanır. Tüm jeosentetik sergiler m² ye yaklaşık 5 kg bentonit içerirler. Serildikten hemen sonra koruyucu bir örtü ile kapatılmalıdırlar(Çalışkan H., 1995).

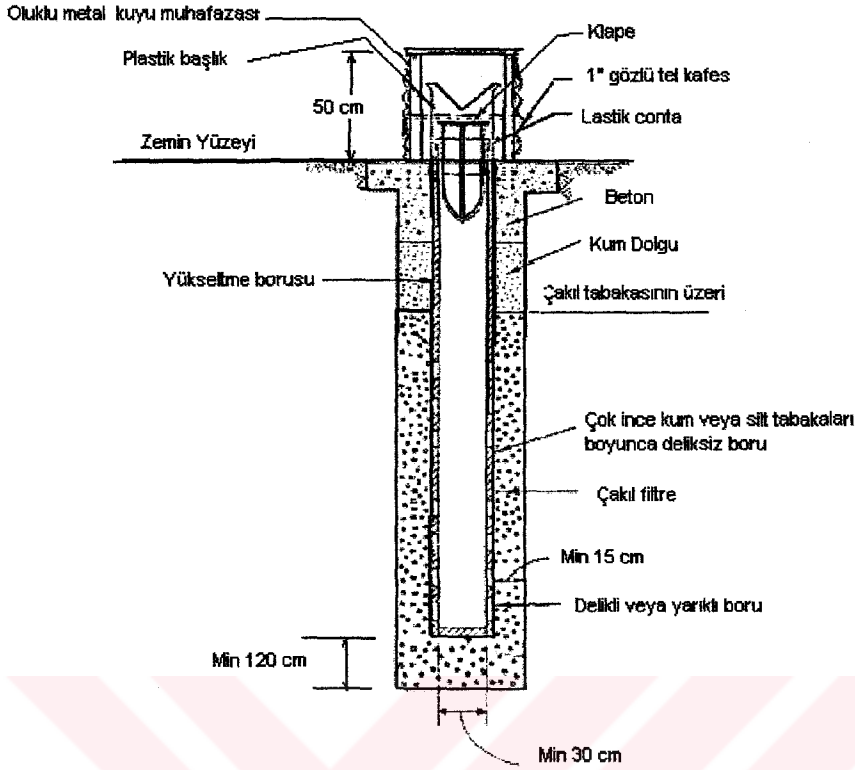
3.2.4 Mansapta Sızma Palyeleri

Tam saptama hendeği gerekli değil, ya da maliyeti çok fazla ise ve geçirimsiz memba örtüsü tertip etmek uygun bulunmamışsa, geçirimsiz üst tabakanın altında yer alan geçirimli temelde oluşan kaldırma basınçlarını azalmak için barajın mansap ucunda mansap sızma palyesi uygulanabilir. Mansap sızma palyeleri ile birlikte genellikle diğer mansap alttan sızma kontrol önlemlerinin de (basınç azaltıcı kuyular veya pabuç hendeği drenleri) kullanılması gerekir. Seddenin arazi tarafında büyük bir mesafe boyunca devamlı olarak yayılan geçirimsiz yüzey tabakasının kalınlığı az ise ve altında geçirimli tabakaların yer alması halinde, eğer geçirimli tabakaların içindeki alttan kaldırma basınçları yüzey tabakasının etkili ağırlığından fazla ise, yüzey tabakasında kum kaynamalarına neden olan kabarmalar ve kırılmalar meydana gelir. Bu tehlikeyi gidermek için arazi tarafında sızma palyeleri inşa edilir. Bunun için yukarı tesir eden kaldırma kuvvetine karşı koyabilecek ilave ağırlığın

belirlenmesi ve palye topuğundaki kaldırma basınçlarını müsaade edilebilir değerlere düşürebilmek için gerekli ilave uzunluğun uygun bir şekilde projelendirilmesi gereklidir. Palye geçirimsiz üst tabakanın uygun kalınlıkta olduğu bölgeye kadar uzatılmalıdır. Palye tipine mevcut dolgu malzemesinin cinsine, seddenin arazi tarafında mevcut yer durumuna ve maliyetlere göre karar verilir. Geçirimsiz, yarı geçirimli, geçirimli (kum) ve serbest drenajlı olmak üzere dört farklı şekilde inşa edilebilirler. Geçirimsiz palyeler, ağırlıkları nedeniyle alttan kaldırmayı önlemekle beraber, sızmanın yüzeye çıkmasını önlediği için yüzey tabakası altında alttan kaldırma basınçlarını artırır. Yarı geçirimli olanlar yüzeydeki doğal tabakanın hidrolik iletkenlik katsayısına eşit ya da daha fazla olacak şekilde inşa edilir. Kum palyeler akmaya karşı az dirençlidir. Daha az yer ve malzeme gerektirirler. Serbest drenajlı palyeler baraj dolgularındaki gibi yatay kum, çakıl tabakaları ve delikli toplayıcı boru sistemi ile projelendirilir, daha az uzunluk ve kalınlık gerektirirler ancak maliyetleri fazladır.

3.2.5 Basınç Azaltıcı Kuyular

Tam saplama hendeği çeşitli nedenlerle yapılmamış ise temeldeki aşırı alttan kaldırma basınçlarını ve borulanmaları önlemek için mansap topuğu boyunca basınç azaltıcı kuyular inşa edilebilir (Şekil 3.4). Sızma debilerini artırır. Alternatif olabilecek mansap sızma palyelerine göre daha az istimlak gerektirmekle beraber, çamurlu yüzey sularıyla kuyu deliklerinin tıkanması vb. nedenlerle periyodik bakım gerektirirler. Geçirimli temel zemininin üzerinde doğal geçirimsiz bir tabakanın mevcudiyeti durumunda uygulanabilirler. Bu kuyular, sızmanın kontrollü bir şekilde çıkışını sağlayacak şekilde tertip edilirler, aksi takdirde mansapta kontrolsüz sızma çıkışları ve borulanmalar oluşabilir. Basınç kırıcı kuyuların geçirimli tabaka içine yeterli bir derinlikte yerleştirilmelerinin diğer kuyularla birlikte hidrostatik basınçları emniyetli değerlere düşürecek şekilde olmasına dikkat edilmelidir. Jeolojik ve topoğrafik olarak doğal sızma yolları üzerine yerleştirilmelidirler. Kuyular arasındaki alttan kaldırma basınçlarını normal bir seviyeye getirmek için yerlerinin, ebatlarının ve geçirimli tabakaya girme boylarının belirlenmesinde şu hususlara dikkat edilmelidir: a. Temel tabakasının derinliği ve geçirimliliği, b. Etkili sızma kaynağına olan mesafe, c. Mansap tarafı üst zemin tabakasının özellikleri, d. Hedeflenen basınç azaltma derecesine karar verilmelidir.



Şekil 3.4 Basınç azaltıcı kuyu tip kesiti

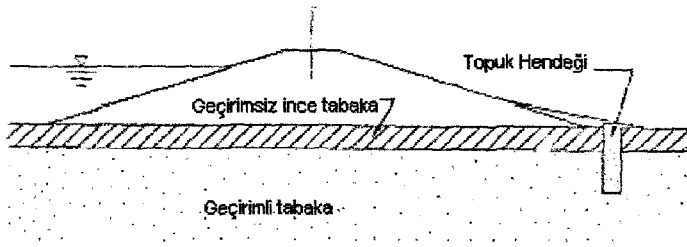
3.2.6 Drenaj Hendekleri

Yine çeşitli nedenlerle tam saplama hendeğinin teşkil edilmediği durumlarda diğer alttan sızma kontrolü önlemleri (geçirimsiz memba örtüsü ve/veya basınç kırıcı kuyular) ile birlikte drenaj hendeği de yapılabilir. Genellikle içine delikli bir toplama borusu yerleştirilerek filtre malzemesi ile doldurulur. Hendek drenleri genellikle geçirimli üst tabakanın ince olduğu ya da hiç olmadığı durumlarda, derin olmayan alt sızmaları kontrol etmek ve gövde topuğu civarındaki bölgeyi zararlı alt sızmalara karşı korumak amacıyla yapılırlar. Geçirimli alt tabakaların kalın olması halinde, alttan sızma akımlarının büyük kısmı hendeğe toplanmadan geçer. Bu durumda uygun bir derinlikte yapılan yardımcı drenaj kuyu sistemleri ile birlikte kullanılmalıdır. Drenaj kuyuları minimum 60 cm olarak açılan sondaj kuyularının ortasında delikli bir boru bulunan çakıl ile doldurulması suretiyle tesis edilirler.

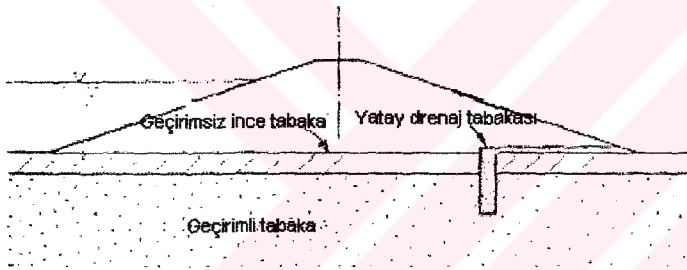
Drenaj hendekleri genellikle gövdenin yatay drenaj halısına bitişik olarak mansap topuğunda imal edilirler. Hendek vasıtası ile toplanan sızma suları yatay geçirimli bir drenaj tabakası içinden akar. Drenaj hendeklerinin içinden akan suyun alttan

sızma basınçları oluşturmaması için yeterince derin yapılması gerekir. Drenaj hendeğinin enkesit şekli: a. Beklenen sızma debisine, b. Altan kaldırma basıncının ne ölçüde azaltılmak istendiğine, c. İnşaat kolaylığına, d. İçinde teşkil edileceği zeminin malzeme özelliklerine bağlıdır.

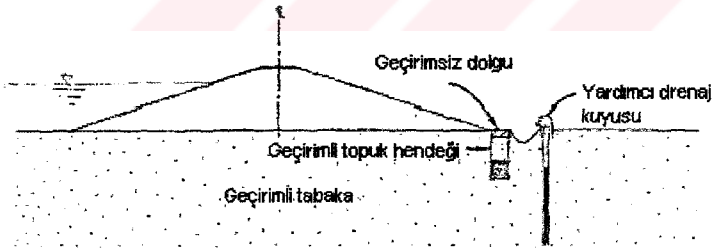
Hendek genişlikleri 60 cm ile 180 cm arasında değişebilir. Hendek içinde toplayıcı boru kullanılması durumunda etrafı minimum 30 cm kalınlığında çakıl ile sarılmış olmalıdır.



a. Drenaj hendeğinin mansap topuğunda olması durumu



b. Geçirimli hendeğin mansap şevi altında olması durumu



c. Yardımcı drenaj kuyusu ile birlikte kullanılan drenaj hendeği

Şekil 3.5 Temelden sızma kontrolünde drenaj hendeği uygulamaları

3.3 Kaya Temellerde Sızma Kontrolü

3.3.1 Genel

Kaya temeller en güvenilen ve sağlam temellerdir. Kaya temellerde en önemli problem, derz, çatlak, yarık, geçirimli tabakalar ve fay düzlemleri boyunca olan sızmalardır(Sungur, T. 1989). Kaya temellerde sızma kontrolünün ne şekilde yapılacağını belirlemek için temelin karakteristikleri ve sızmaların nerelerden olabileceğinin araştırılması çok önemlidir. Bunun için arazide jeolojik ve jeofizik etütlerin detaylı bir şekilde yapılması gereklidir. Pek çok kez bir kaç kontrol yönteminin birlikte uygulanması gerekebilmektedir. Emniyet ve maliyet açısından metodunun seçiminde değerlendirilerek karar verilmelidir. Kaya temellerdeki temizlik kazısı bütün gevşek ve ayrılmış kaya parçalarının ve temel üzerindeki hafif toprağın temizlenmesi şeklinde olur.

3.3.2 Saplama Hendekleri

Saplama hendekleri özellikle enjeksiyonun yapılmasına elverişli olmayan temellerde tercih edilirler. Hendekler, genellikle sıkıştırılmış geçirimsiz toprak veya çimento şerbeti gibi bir malzeme ile doldurulurlar. Seçilecek malzemenin cinsine, temelin şartlarına, maliyete ve kazının boyutlarına göre karar verilir.

Hendeklerin ilk açılması normalde çeşitli patlatma yöntemleri ile olur. Saplama hendekleri toprak temellerde olduğu gibi gövdenin geçirimsiz zonunun zemindeki geçirimsiz bir tabakaya bağlanması ile sızma kontrolünü sağlarlar. Bu durumda saplama hendeği sadece en üstteki geçirimsiz tabakada etkili olabilir. Bazen geçirimsiz tabakanın altında geçirimli bir tabaka olabilir. Geçirimli tabakanın ve üstteki geçirimsiz tabakanın kalınlığı yeterli ise alttan kaldırma basınçları engellenebilir.

3.3.3 Enjeksiyon Perdeleri

Enjeksiyon perdeleri kaya temellerde sızma kontrolünde oldukça etkili bir kontrol metodudur. Genellikle, fay kırıkları ya da geçirimli tabakaları olması gibi sızma kontrolü gerektiren her tür kaya zeminler için uygulanırlar.

Kaya temel ya da yamaçlarda enjeksiyon işlemleri sadece enjeksiyon perdesinden ibaret değildir. Temellerin iyileştirilmesi ve özellikle de kireçtaşının karstik boşluk, mağara gibi oluşumlarının doldurulması için de uygulanır. İnşaat öncesi yapılacak araştırmalarla perde boyuna ve kaç sıra teşkil edileceğine karar verilir.

Genellikle enjeksiyonun etkinliği yapım öncesi ve sonrası yapılan basınçlı enjeksiyon testlerinde temelin su alım miktarı ile ölçülür.

3.3.4 Yüzey İyileştirmeleri

Kaya temellerinde yapılan yüzey iyileştirmeleri yapılacak dolgu ile temel kontağının başarısı için önemlidir. Kazı ile açığa çıkan ve bozulan tüm boşluklar, çatlaklar vb. ileride kırılarak bozuk temele sebep olabilirler, bu nedenle temizlenerek (kaya zeminlerde bu temizlik basınçlı su ile olur) genellikle çimento ve ince kum şerbeti ile doldurulur.

3.3.5 Geçirimsiz Örtüler

Barajlarda toprak temellerde olduğu gibi kaya temellerde de özellikle yamaçlarda kullanılabilen etkili bir sızma kontrol metodudur. Ancak kaya temeller üzerinde taban filtresi gerektirirler.

3.3.6 Drenaj ve Enjeksiyon Galerileri

Temellerde inşa edilen galeriler ve tüneller, temel drenlerinin tasfiyesini, aynı zamanda rehabilitasyon ve gerektiği takdirde ilave enjeksiyon yapılabilmesini sağlarlar. Drenaj galerilerinin çıkış seviyesi kaldırma basınçlarını kontrol eder. Genellikle ilave enjeksiyonları gibi iyileştirme çalışmaları bu galerilerden yapılır. Ülkemizde yapımı ve işletmesi sırasında, proje safhasında öngörülenin çok ötesinde geçirimsizlik ve temel problemleri ile karşılaşılın ve karstik mağaralar içeren Keban Barajı temel zemini içinde ileride olabilecek ihtiyaçlar için 10 km den fazla yaklaşım galerisi ve şaftlar açılmıştır.

4. SIZMA KAÇAKLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

4.1 Genel

Mevcut bir yapıdaki sızma problemi belirlendiği zaman çeşitli metotlarla tanımlanmalı ve iyileştirmenin nasıl olacağına karar verilmelidir. Yapılacak iyileştirmelerin uygulaması sonrasında problemin doğru belirlenmiş ve iyi uygulanmış olup olmadığının anlaşılması için çalışmasının takibe alınması büyük önem taşır. Sızmanın tüm olumsuz sonuçları da dahil olmak üzere konunun jeotekniği (gövde, temel, yamaçlar) ve ekonomisi iyileştirici sızma kontrolünün tipini ve derecesini belirleyen etkenlerdir. Sızmanın neden olduğu olumsuzluklar şöyle sıralanabilir:

1. Borulanmalar nedeniyle yapısal elemanlardaki destek kaybı ve alttan kaldırma basınçlarının oluşması ile baraj emniyetinin tehdit edilmesi.
2. Sızmanın sebep olduğu malzeme ya da mukavemet kaybı etkisiyle şev stabilitesinin bozulması ve gövdede çatlak, yarık vb. oluşması.
3. Göl suyu hacminde önemli miktarlarda kayıplar.
4. Baraj gövdesinin mansap şevindeki sızmalar nedeniyle faydalı arazilerin kaybı veya bakım problemleri.

Yüksek miktarlarda sızmalar, temeldeki (aynı zamanda yamaçlarda ve gövdede de olabilir) toprak ya da kaya içinde olabilen kimyasal maddelerin erimesine ve sızma yollarının giderek büyümesine yol açmakta, zeminin doygun hale gelerek zayıflaşmasına ve alttan kaldırma basınçlarının artmasına neden olmaktadır. Sızmaların düzenli olarak gözlenmesi, yerlerinin belirlenmesi ve miktarlarının ölçülmesi büyük önem taşır. Sızma miktarlarının ölçülmesi için parshall ölçüm savakları, açık kanal ve boruların kullanıldığı çeşitli metotlar vardır (Encardio-rite application note, 2001).

4.2 İyileştirme Metotları

4.2.1 Metot seçimini etkileyen faktörler

Sızmanın oluştuğu gövde, temel ve yamaçlar oldukça karmaşık bir yapı oluştururlar. Bu da sızmanın tam olarak nereden oluştuğunun ve iyileştirmenin kontrolünü çok zorlaştırmaktadır. İyileştirme çalışmalarının etkisi sürekli veya ilave gözlemden barajın yeniden inşasına ya da barajın terk edilmesine kadar farklı boyutlar içerebilir. İyileştirme metodunun seçimi pek çok etkene bağlıdır :

- Jeoteknik durum
- Risk
- Gerekli düzenlemenin derecesi
- Maliyet

4.2.2 Kullanılan Metotların Diğer Yapısal Elemanlar Üzerindeki Etkileri

Yapılacak iyileştirmenin diğer baraj elemanlarına olabilecek etkileri açısından durumu değerlendirmelidir. Örneğin;

- Yapılacak kazının drenler, cut-off hendeği ve gövde stabilitesi üzerindeki etkileri,
- Yapılacak iyileştirmenin mevcut sızma kontrolü elemanlarına bağlantısındaki zorluklar
- Enjeksiyon esnasında oluşabilecek hidrolik kırılma durumu dikkate alınmalıdır.

4.2.3 İzleme

Tüm durumlarda iyileştirmenin öncesi ve sonrasında sızmanın izlenmesi iyileştirmenin verimliliğini saptamada büyük önem taşır. İyileştirmelerin verimi öncelikle problemin yer aldığı bölgedeki jeoteknik karakteristiklerle, rezervuarın kullanımı ve göl alanının geçmişteki kullanımları ile ilgilidir

4.3 Depolamanın Azaltılması

Sızma problemini azaltmanın en kestirme metodu rezervuardaki su seviyesini azaltmak ve böylece sızmayı ve olumsuz etkilerini durdurmak ya da azaltmaktır. Bu metoda genellikle problemin teşhisi aşamasında başvurulur. Eğer bu sırada

piyozometre ya da ölçme aletleri yerinde olursa, bu iyileştirmenin sonucu deneysel olarak da saptanır. Depolamanın azaltılması ile ilgili göz önüne alınması gerekli bazı hususlar şöyledir:

- Mansapta suyun bastığı alanla ilgili problemler ve seviyesinin azalması ile gövdede çatlamlar ve bozulmalar oluşabilir,
- Baraj gölü seviyesinin düşürülmesinin su temini, taşkın kontrolü, enerji üretimi, rekreasyon alanları ve çevre üzerindeki etkileri .

Normalde, baraj gölünün alçaltılması uzun dönemde kabul edilebilecek bir çözüm değildir. Ani boşalma mansap şevinde stabilitenin bozulmasına sebep olabileceği için baraj seviyesi azaltılırken dikkatli olunmalıdır. Ancak mansap şevindeki hasar gövdenin çatlayıp rezervuarın tamamen boşaltılmasına tercih edilir.

4.4 Enjeksiyon

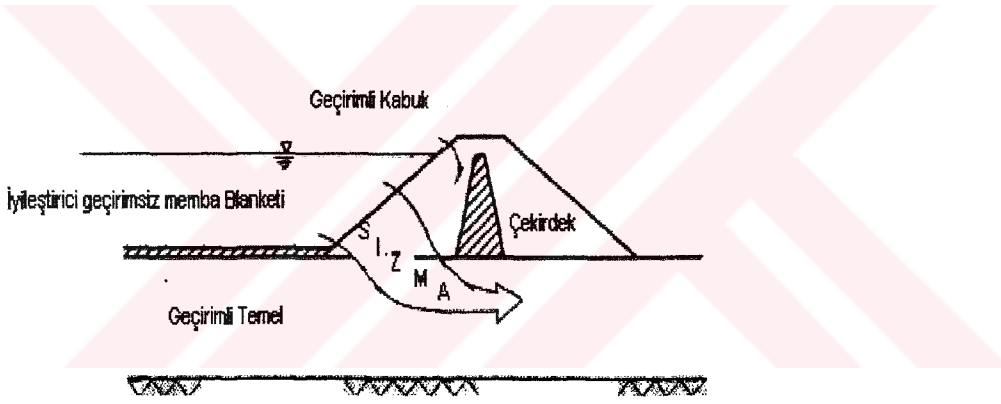
Enjeksiyon uzun zamandır kullanılan, oldukça yaygın bir iyileştirme yöntemidir. Başarılı sonuç alınabilmesi sızma bölgesinin tam olarak belirlenerek uygulanmasına bağlıdır. Bu işlem sırasında gövdeye zarar verilmemelidir. Olası hasarlar, geçirimsiz çekirdeğin veya gövde, temel ya da yamaçlardaki geçirimsiz diğer elemanlarda çatlakların oluşması ve drenlerin tıkanmasıdır. Eğer enjeksiyon ile temelin sadece mansap kısmı ya da barajın mansap tarafındaki alt kısmı geçirimsiz hale gelirse, gövde altından kaldırma basınçları artabilir veya gövdenin mansap kısmına doğru sızmalar artırılabilir. Enjeksiyona başlamadan önce bu tür değişimlerin izlenebilmesi için, boşluk suyu ölçüm aletleri yerleştirilmiş olmalıdır. Enjeksiyon işlemi pek çok şekilde yapılabildiği için bu konuda çok tecrübeli saha mühendisleri ve müteahhitler seçilmelidir. Çoğu kez, enjeksiyonun istenen şekilde nüfuz edip etmediğini görebilmek için enjeksiyon sonrası sondaj yapılır.

4.5 Memba Geçirimsiz Örtüleri

Eğer gövdenin membaındaki rezervuarın tabanının ve yanlarının geçirimsiz hale getirilmesinin, istenmeyen miktarlarda sızmayı ve gövde altındaki basınçları azaltmada faydası olacağı belirlenirse, geçirimsiz bir memba örtüsü uygulanır. Eğer başarıyla ve ekonomik olarak uygulanırsa gövde altından sızmalar, temelin

membaında kontrol edilebileceği için en etkili yöntemlerden biridir. Bazı küçük rezervuarlarda çeşitli malzemelerle suyun önü kapatılabilmekle beraber, genellikle rezervuardaki suyun boşaltılmasını gerektirir. İnce taneli malzeme ve bazen de geçirimli malzeme ocakları gerekir. Geçirimsiz malzemeler genellikle rezervuarın tabanına yerleştirilir. Eğer rezervuarı çevreleyen yamaçlar gibi eğimli bölgeler kaplanacaksa dalga etkileri ve yüzeysel akışlardan kaynaklanan yamaç erozyonuna karşı da koruma önlemleri düşünülmelidir. Eğer sızmalar Şekil 4.1'deki gibi gövdenin memba kısmından temele doğru gidiyor ise memba örtüsü etkili olamayacağı için saplama hendeği gibi başka önlemler gerekebilir.

Rezervuar taban malzemesinin jeolojik karakteristikleri iyi belirlenmiş olmalıdır. Mevcut olabilecek tüm büyük boşluklar sıkıştırılmış toprak ya da beton gibi stabil olabilecek bir malzeme ile doldurulmalıdır. Derin rezervuarlarda muhtemelen örtü boyunca özellikle de gövdeye yakın yerlerde yüksek eğimler olacaktır.



Şekil 4.1 Etkisi olmayan bir sızma kontrol önlemi.

Geçirimsiz örtünün yapımından önce örtü malzemesinin temele doğru borulanmasını önleyebilmek için filtre malzeme döşenmesi gerekebilir. Örtü uzunluğunun derecesi çeşitli analizlerle saptanır ve sızma miktarının ve basınçların hangi mertebede azaltılmak istendiği gibi pek çok faktöre bağlıdır. Geçirimsiz doğal malzemelerin ekonomik olarak bulunamadığı koşullarda hazır kaplamalar alternatif olabilmektedir. Ancak genellikle oldukça pahalıdırlar ve yerleştirilebilmeleri için oldukça düzgün bir yüzey gerektirirler; delinmeye, güneş ışığına maruz olduğunda bozulmaya karşı da korunmalıdırlar (normalde toprak ile). Ayrıca parçaların bir araya getirilmesi de kritik ve zor bir konudur. Bunların birleşim yerleri çok dikkatli kontrol edilmelidir.

4.6 Mansap Palyeleri

Palyeler ağırlıkları ile üst tabakanın ağırlığını arttırmak suretiyle alttan kaldırma basıncına olan direnci artırarak sızmayı da kontrol ederler. Düşük geçirimli malzeme ile teşkil edilmeleri durumunda sızmayı azaltırlar, fakat sızmayı baraj mansabının çok ilerisine doğru zorladıkları için, mansap topuğunun altındaki kaldırma basıncını artırırılar. Eğer kullanılan malzeme geçirimli ise, temeldeki ince malzemelerin yukarı doğru sürüklenmemesi için, filtre olarak ya da taban filtresi olarak projelendirilmelidirler. Gövdenin mansap şevi stabilitesi palyenin sağladığı kaymaya karşı direnç nedeniyle artmaktadır. Uygun uzunlukta ve 1-2 m yüksekliğinde örtüler mansap tarafında sızmanın olduğu bölgede yapılmakta, bu hem ilave yük sağlamakta, hem de sızmanın yoğun olduğu noktalara basınç kırıcı kuyular yerleştirilebilmektedir.

4.7 Saplama Hendekleri

Saplama hendeklerinin sızmanın iyileştirme metodu olarak kullanılmasında göz önüne alınması gerekli iki konu vardır: a) Hendek kazısının gövde stabilitesi üzerindeki etkisi ve nispeten zayıf düşey toprak düzlemi olması durumu (toprak-bentonit dolgusu durumunda). b) Saplama hendeğinin diğer mevcut ya da önerilen sızma kontrol yapılarına bağlantısı. Uygun bir memba örtüsü mevcut ise hendek gövdenin membana yerleştirilerek örtü ile bağlantısı yapılabilir, ya da eğer stabilite sorunları var ise baraj gövdesi ve geçirimli alt tabaka boyunca yerleştirilebilir. Stabilite riski nedeniyle açık hendek ve zayıf toprak-bentonit karışımı kabul edilebilir bulunmuyorsa, bloklar halinde çimento-bentonit karışımı kullanılabilir, ya da ayrı ayrı kazılmış elemanlara beton duvarlar yapılabilir.

5. SIZMA ANALİZİ ESASLARI

5.1 Genel

Sızma analizinde, suyun homojen, doymuş toprak vasıtası ile, kararlı şartlar altında aktığı, toprak parçacıklarının, toprak yapısının, suyun sıkıştırılmadığı ve akışın ($v=k i$) şeklindeki Darcy kanununa uyduğu kabul edilir. Enerji hareketini iletken ortam içinde karakterize eden ilkeler, toprak içindeki suyun hareketi için de geçerlidir ve bu nedenle sızma modeli çalışmalarında ısı ve elektrik akımı kullanılabilir. Homojen ortamda her iki durum da Laplace denklemini uyar. Su daha yüksek bir enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine doğru hareket eder. Sızma halinde enerji durumlarının farkı, suyun toprağın içerisinde hareket etmesi için gereken, yani suyun akımına karşı toprağın direncini kırarak enerji miktarıdır. Bu bölümde sızmayı kontrol eden faktörler, yöneten denklemler, akım ve potansiyel fonksiyonları ve sızma miktarını saptamak için geliştirilen metotlar incelenecektir. Sızma analizlerinde, göz önüne alınan zemin bölgesinin sınırları, geçirimsizlik katsayıları, homojen ve izotrop olup olmadığı ve üzerine etki eden su yükü tanımlanmış olmalıdır.

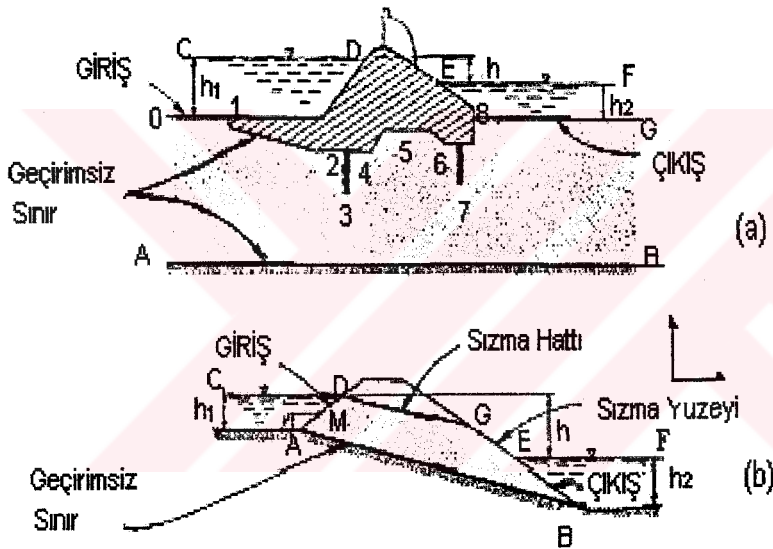
5.2 Sınır Şartları

İdeal akışkanlarda akım hızının bir ϕ fonksiyonunun gradyanı olarak ifade edildiği akımlara potansiyel akım denir (Erkek C., Ağırlioğlu N., 1993). Şekil 5.1’de görülen örnekte memba tarafındaki geçirimli zemin yüzeyi eş potansiyel çizgilerden birini, mansap tarafındaki yüzey ise bu çizgilerden diğer birini oluşturur. Ayrıca, geçirimli zeminin üzerine oturduğu geçirimsiz tabanın yüzeyi de bir akım çizgisidir. Potansiyel akımda rastlanan en önemli hidrolik sınır şartları;

- Geçirimsiz yüzeyler bir akım çizgisidir.

- Yükün oluştuğu suyun taban yüzeyi bir eşpotansiyel yüzeyidir.
- Suyun atmosfer basıncına sahip olduğu en üst akım çizgisi serbest sızma çizgisidir.

Akım ağı, bu sınır şartlarına uygun fonksiyonlar elde edilmek suretiyle bulunur. Analizde göz önüne alınan zemin kütesinin sınır tipleri, özellikleri ve bu sınırların durumu belirlenmelidir. Normalde analizi uygulanabilir kılacak sınırları oluşturmak için basitleştirici varsayımlar gereklidir. Genelde barajlardaki sızma analizi problemlerinde 4 olası sınır tipi vardır ve bunların örnekleri Şekil 5.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Çeşitli Sınır şartları

5.2.1 Geçirimsiz Sınırlar

Doymuş geçirimli zemin ile bitişiğinde yer alan çok düşük hidrolik iletkenlik katsayısına sahip zemin tabakası veya betonun arasındaki yüzeyin geçirimsiz olduğu kabul edilir. Bu ara yüzey boyunca akımın hiç olmadığı varsayılır, böylece geçirimsiz toprağın bitişiğinde yer alan geçirimli topraktaki akımın doğrultusu, sınıra paralel olur. Şekil 5.1’de AB ve 1-8 hatları geçirimsiz sınırlardır.

5.2.2 Giriş ve Çıkış Yüzeyleri

Suyun geçirimli zemin tabakasına girdiği ya da çıktığı bölgeyi tanımlayan hatlar sırasıyla giriş ve çıkış sınırları olarak bilinir. Bu çizgiler arasında Şekil 5.1.a'daki 0-1 ve 8-G ve Şekil 5.1.b'deki AD ve BE eş potansiyel çizgileridir ki bu çizgiler için piyozometrik seviye tüm hat boyunca yön ve şekilden bağımsız olarak aynıdır. Akım giriş ve çıkış yüzeylerine diktir.

5.2.3 Sızma Yüzeyi

Şekil 5.1.b'deki GE hattında olduğu gibi doymuş geçirimli toprak kütleğinde, suyun açığa çıktığı, atmosfere maruz bir sınır olabilir. Basınç bu yüzey boyunca atmosferiktir(Engineering Manual, 1986).

5.2.4 Sızma Hattı (Freatik Hat)

Serbest yüzey olarak da bilinir. Bu sınır suyun atmosferik basınçta olduğu Şekil 5.1.b de, DG hattındaki geçirimli zeminde yer alır. Kapiler kuvvetler nedeniyle geçirimsiz zeminde yer alan doymuş tabaka hafifçe sızma hattının üzerine doğru uzanır. Fakat bu kapiler tabaka sızma analizlerinde nadiren önem taşır. İlk iki sınır normal olarak doymuş zemin kitlesinin geometrik sınırları ile tanımlanırken, sızma hattı, bir metot vasıtasıyla tayin edilmelidir ve akım ağı bu hat belirlendikten sonra çizilebilir. Yine, geçirimsiz bir zeminde olduğu gibi sızma hattı boyunca akımın olmadığı varsayımı yapılır, Böylece geçirimli zeminin içindeki akım sızma hattına paralel olmaktadır.

5.3 Basıncı veya Serbest Yüzeyli Akım Problemleri

Sızmanın iki genel durumu vardır: Birinci durum geçirimsiz tabakalar arasında gerçekleşen ve sızmanın gerçekleştiği doymuş geçirimli zemin tabakası içinde sızma sınırı olmayan akımdır ve, Şekil 5.1.a bu akıma bir örnektir. İkinci durumda doymuş zemin tabakasında bir sızma hattı olduğu kabul edilir (Şekil 5.1.b). Birinci durumda akımın tüm sınırları tanımlanmış iken, ikinci durumda akım bölgesindeki ve sızma hattı analizle tanımlanmalıdır.

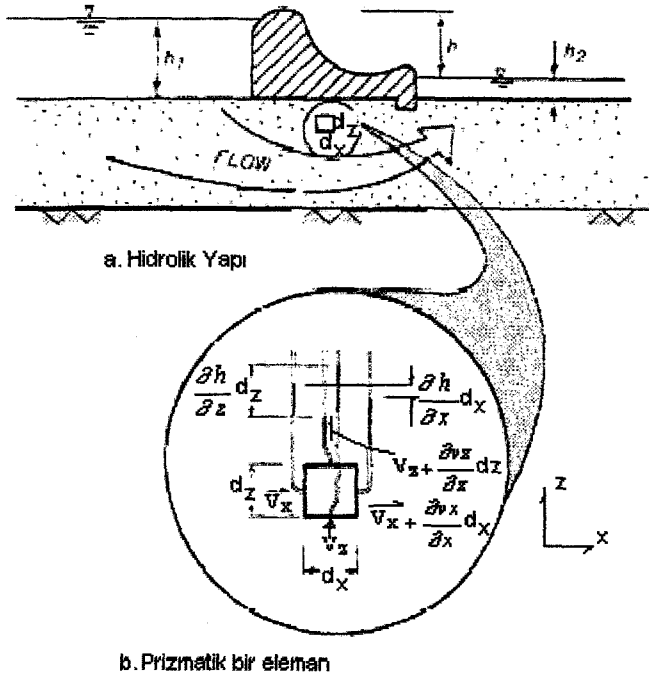
5.4 Sızma Analizi

Sızma analizi yapmak için , sızma olayını tanımlayabilecek genel bir modelin olması gereklidir. Bu model özel sınır şartları ve zemin özelliklerinin belirlenmesi ile oluşturularak, yük ve akım dağılımları ve sızma miktarlarının belirlenmesinde kullanılabilir. ‘Laplace Denklemi’ sızma analizlerinde kullanılan pek çok model ve metodun matematiksel temelidir.

5.5 Laplace Denklemi

Şekil 5.2, bir kesitteki genel sızma durumunu göstermektedir. Laplace Denklemi 6 varsayıma dayanır:

1. h_1 ve h_2 yükleri sabittir ve böylece akım kararlıdır.
2. Su sıkıştırılmaz.
3. Boşlukların hacmi değişmez-zemin sıkıştırılmaz.
4. Akım laminardır-Darcy Kanunu uygulanır.
5. Söz konusu birimin şekil düzlemine dik bir dy boyutu ve birim hacmi vardır, fakat şekil düzlemine dik yönde herhangi bir akım olmaz, yani akım iki boyutludur.
6. Doymuş geçirimli zemin tabakası homojendir.



Şekil.5.2 Suyun hidrolik bir yapının altında doymuş geçirimli zemin vasıtası ile akımı.

Şekil 5.2.b'de; v_x ve v_z sırasıyla x ve z yönlerindeki akım hızı bileşenleridir.

x yönünde hidrolik eğim: $i_x = - \frac{\partial h}{\partial x}$

z yönünde hidrolik eğim: $i_z = - \frac{\partial h}{\partial z}$

şeklinde gösterilir, bu bağıntılarda eksi işareti eğimin artan piyozometrik yüke ters yönde olduğunu belirtmektedir.

1., 2., ve 3. varsayımlar akımın sürekliliği ile ilgilidir ki, bu birim hacme birim zamanda giren suyun ($q_e = v_x dz dy + v_z dx dy$), yine birim hacimden birim zamanda çıkan suya (q_1) eşit olduğu anlamına gelir, y şekil düzlemine dik olan eksendir.

$$q_1 = v_x dz dy + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dz dy + v_z dx dy + \frac{\partial v_z}{\partial z} dz dx dy$$

q_e, q_1 'ye eşitlenirse :

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} dx dz dy + \frac{\partial v_z}{\partial x} dz dx dy = 0$$

veya

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial x} = 0 \quad (5.1)$$

olur.

Darcy Kanunu kullanılarak ($v = k i$) ve x ve y yönlerinde aynı hidrolik iletkenlik katsayısının geçerli olduğu varsayılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilir :

$$v_x = k i_x = -k \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_z = k i_z = -k \frac{\partial h}{\partial z}$$

h potansiyel ya da hız potansiyeli olarak adlandırılır ve genellikle ϕ ile gösterilir.

$$\phi = k h$$

yerine konulursa,

$$v_x = - \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \text{ve} \quad v_z = - \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

elde edilir.

Yukarıdaki bağntılar (5.1) denkleminde yerine konulursa,

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (5.2)$$

homöjen, izotropik gözenekli ortamdaki laminar, iki boyutlu akım için Laplace denklemi elde edilir(Dönmezer, H., 1974). Laplace Denklemi, sıkışmayan herhangi bir boşluklu madde içinden sıkışmayan bir sıvının akışının, bu akış iki boyutlu olarak kabul edilebildiğine göre, incelenmesini sağlar. Lineer ve eliptik kısmi diferansiyel bir denklem olan Laplace denklemini sağlayan sonsuz çözüm bulmak mümkündür. Mühim olan denklemin geçerli olduğu akım alanının sınır şartlarını da sağlayan

çözümü elde etmektir (Sümer B.M., Ünsal İ., Bayazıt M.,1983). Çizimsel olarak bu denklem birbirini dik açı altında kesen iki eğri ile gösterilebilir. Birinci takımı temsil eden eğrilere akım, ikinci takımdakilere ise eşpotansiyel çizgileri adı verilir. Herhangi bir eşpotansiyel çizgisinin tüm noktalarında su, piyozometrik bir boru içinde aynı seviyeye yükselir; bu seviye piyozometrik seviye adını alır ve göz önüne alınan eşpotansiyel çizgiyi temsil eder. Akım çizgilerini izleyen su daneciklerinin yörüngeleri eşpotansiyel çizgilerine dik olur. Birbirine komşu olan iki akım çizgisi arasında kalan şeritvari alan akım tüpü olarak adlandırılmaktadır ve bu şerit boyunca her kesitte akım miktarı sabittir.

5.6 Sızma Analizi Metotları

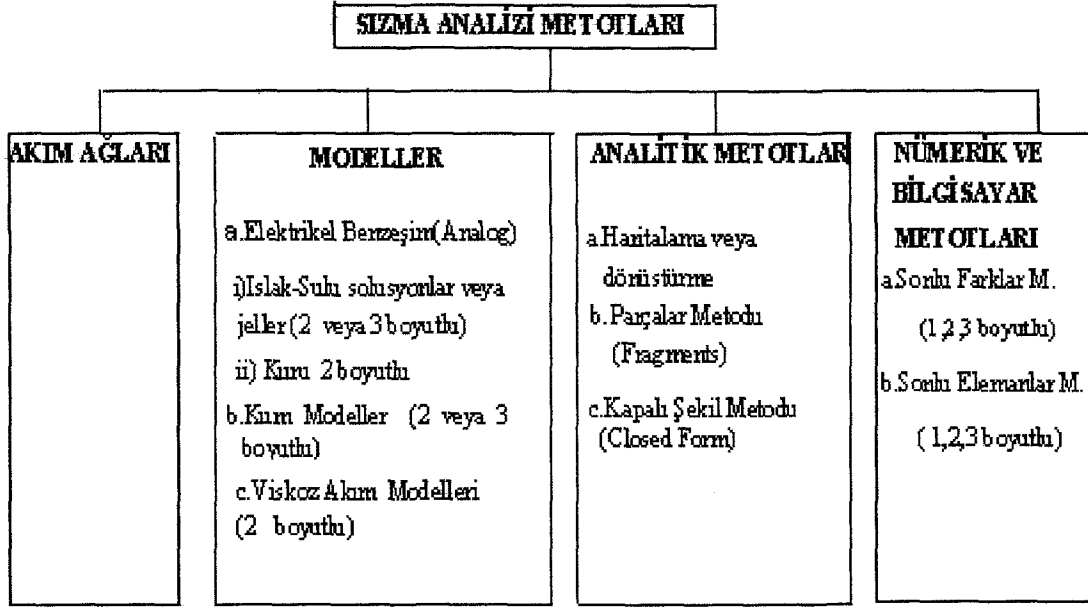
Çeşitli sızma durumları için Laplace Denklemini tam ya da yaklaşık olarak çözmenin bazı metotları geliştirilmiştir (Tablo 5.1). Sızma analizi için bir metot seçebilmek ve uygulayabilmek için, problemin aşağıda bahsedilen hususları incelenmiş olmalıdır :

- 1.Sızma olması beklenen bölge ve yapının boyutları
- 2.Yapı ve temeli oluşturan malzemelerinin hidrolik iletkenlik katsayıları, homojen olup-olmadığı
- 3.Yatay ve dikey hidrolik iletkenlik oranları
- 4.Sınır şartları (simetrik olarak geçirimsiz tabakalar)
- 5.Giriş ve çıkışlar (potansiyelin sabit olduğu yerler)
- 6.Kararsız akım durumundaki yük-zaman bağıntısı

5.6.1 Akım Ağı Metodu

Akım ağı metodu, baraj temellerindeki ya da hidrolik yapılarla ilgili diğer projelerdeki gövde altından sızma (underseepage) ve gövdeden sızma (throughseepage) problemlerinde en çok kullanılanlardan ve Laplace Denklemi'nin çözümü için en faydalı ve kabul edilebilir metotlardan biridir. Akım ağının çizilmesi için gerekli elemanlar 5.2 denkleminin çözülmesi ile elde edilmelidir, ancak su yapılarında sınır şartları basit olmadığı için bu çözüm matematik olarak mümkün değildir. Akım ağlarını belirlemede kullanılabilen deneysel metotlar olmakla beraber en uygun ve yaygın kullanılanı grafik metodudur.

Tablo 5.1 Sızma Analizi Metotları(Engineering Manual, 1986).



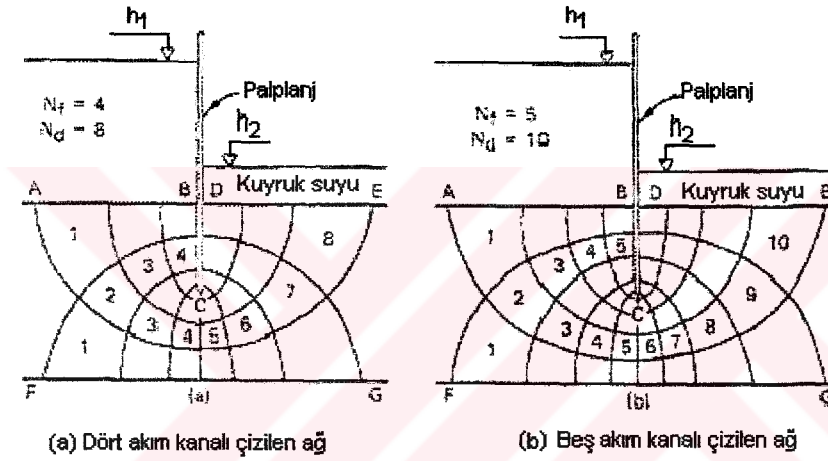
Bir akım ağının çizilebilmesi için sızma problemi ile ilgili bazı temel özellikler bilinmeli ya da kabul edilmelidir. Buna göre;

1. Geçirimli ortamın geometrisi bilinmelidir.
2. Sınır şartları saptanmalıdır.
3. Laplace denklemini oluşturmak için gerekli varsayımlar yapılmalıdır (Bölüm 5.5)
4. Geçirimli ortam homojen ve izotropik olmalıdır.

5.6.1.1 Akım Ağı Teşkilinde Grafik Metodu

Eğer bir akım bölgesinin sınır şartları ve geometrisi bilinir ve iki boyutlu olarak gösterilebilirse, bu akım ağı akım bölgesinin özellikleri hakkında görsel olarak bilgi verebilir. Laplace denklemi, çözümü ortogonal eğrilerle simgelenebilen eliptik, kısmi diferansiyel bir denklemdir. Akım ağının dik kesişme özelliğinden yararlanılarak sınır koşullarına uyacak şekilde eğrisel karelerden oluşan akım ağı deneme yoluyla çizilir. Akım ağının sık olduğu yerlerde hız büyük, seyrek olduğu yerlerde küçüktür. Bir eğriler seti geçirimli ortam içindeki su akım yollarını simgelerken, bunlara dik olan eğriler ise geçirimli ortam içinde aynı piyozometrik yüke sahip noktaların yerlerini gösterir. Daha önce bahsedildiği gibi, ilki akım eğrileri, sonuncusu ise eşpotansiyel eğrileri olarak adlandırılır. Eşpotansiyel eğrisi boyunca potansiyel fonksiyonunun değeri değişmez. İki boyutlu akım halinde hem hız potansiyeli hem

de akım fonksiyonu Laplace Denklemini sağlar. Akım ağı özel bir sızma durumuna ait tek çözümdür, yani verilen geometri ve sınır şartlarını çözecek tek bir eğriler ailesi vardır. Bu durum, verilen problem sadece tek bir akım ağına sahip olacak anlamına gelmez, problemi tanımlamak üzere eğriler ailesinden değişik eğri setleri seçilebilir (Şekil 5.3). Ancak aynı problemdeki eşpotansiyel düşüm aralıkları sayısı (N_d) ile akım kanalları sayısı (N_f) arasındaki ilişki değişmez. Şekil 5.3' ün incelenmesi neticesinde nerelerde akım miktarının en fazla, hızın en yüksek, ve eğimin en yüksek olduğu anlaşılır; yani geçirimli toprak içinde palplanşa en yakın yerde, Şekil 5.3.a'da 4. akım kanalında, Şekil 5.3.b'de 5. akım kanalında hız en yüksektir.



Şekil 5.3 Geçirimli bir temeldeki palplanş duvarı ile geçirimsiz sınır arasında oluşturulan akım ağı

5.6.1.2 Anizotropik Zeminlerde Akım Ağı

Doğal oluşumlu ve dolgu zeminlerde yatay hidrolik iletkenlik katsayıları düşeyden daha yüksek değerlere sahiptir. Bu durum izotropik zemin varsayımının geçerli olduğu Laplace Denkleminin çözümünü sağlayan akım ağının şeklini etkiler. Bunun için geçirimli ortamın boyutları iki hidrolik iletkenlik katsayısının oranının karekökü ile çarpılarak oranlanır. Eğer k_h yatay ve k_v düşey hidrolik iletkenlik katsayısı ise geçirimli ortamın enkesitinin yatay boyutları $\sqrt{k_v / k_h}$ oranı ile değiştirilir, örneğin, eğer bir barajın temeli 1000 m ise bu durumda $\sqrt{k_v / k_h}$ faktörüyle çarpılacak, yani $\sqrt{k_v / k_h}$ oranının 1000 katı olacaktır. Aynı oran dönüştürülmüş bir kesit oluşturabilmek için diğer bütün yatay boyutlara da uygulanacaktır. Dönüştürülmüş

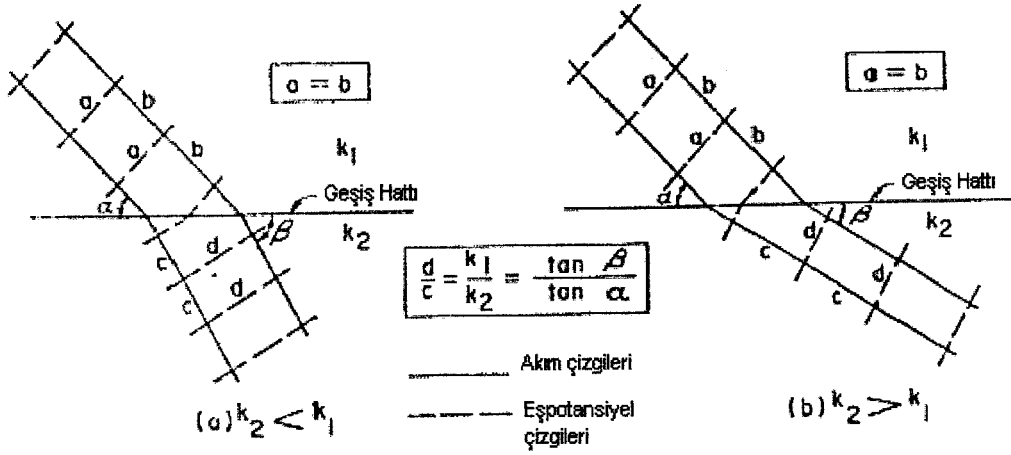
kesit üzerine akım ağı çizilir ve akım ağını da içeren kesit karesel olmayan akım ağına dönüşen gerçek (orijinal) kesite dönüştürülür. Hesaplar karesel olmayan akım ağı kullanılarak yapılır, çünkü karesel akım ağları izotropik zemini temsil ederler. Aynı şekilde dikey yöndeki boyutlar da $\sqrt{kv/kh}$ faktörüyle değiştirilebilir, karesel ya da normal akım ağı, bu şekilde dönüştürülmüş kesit üzerine çizilir ve gerçek kesite dönüştürülür (Engineering Manual, 1986).

5.6.1.3 Tabakalı Kesitlerde Akım Ağı

Genelde sızma analizi gerektiren projeler farklı parametrelere sahip farklı jeolojik tabakalar içerirler (çok katmanlı temeller ya da zonlu barajlar gibi). Bu durumda, iç sınırlar arası geçiş yapan akım çizgilerine, eşpotansiyel çizgilerine ve farklı geçirimsizlikteki topraklar arasında geçiş yapan sızma hatlarına belirli kurallar uygulanır. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi, akım düşük geçirimsizlikteki topraktan yükseğe doğru gittikçe, akım çizgileri arasındaki mesafe azalır (akım kanalı küçülür) ve eşpotansiyel düşüler arası mesafeler artar. Aynı akım uzunluğu için yüksek geçirimsizlikteki bir zemindeki enerji kaybı, düşük olana göre daha az olmaktadır. Tüm durumlarda akım ve eşpotansiyel çizgilerinin doğrultuları ani değişime uğrasa da zemin geçişlerinde süreklilik durumunu korurlar. Ayrıca akım kanallarının sayısı akım ağının tamamında sabit olmalıdır.

5.6.2 Modeller

Gözenekli bir ortamda su akımı simülasyonu yapılarak uygulanan modeller, sızma esnasında neler olduğunun iyi anlaşılmasını sağlar ve su yükü değişimlerinde, geometrinin seçiminde ve diğer varsayımlarda akım sisteminde oluşan reaksiyonların fiziksel olarak iyi kavranmasını sağlar.



Şekil 5.4 Akım çizgilerinin farklı geçirimsizlikteki zeminlere geçişi

5.6.2.1 Elektriksel Benzeşim (Analog)

Daha önce bahsedildiği gibi, enerji potansiyelindeki farkın oluşturduğu akım ile geçirimsiz tabakalar arasında akan yeraltı suyu akımı aynı ilkelere sahiptirler. Bu durum Tablo 5.2’de belirtilmiştir.

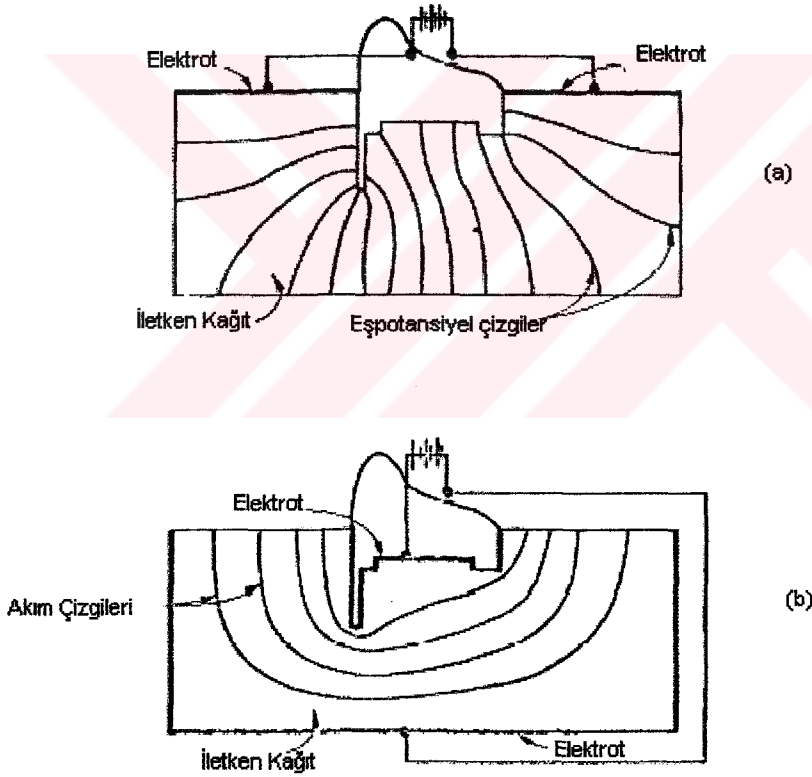
Tablo 5.2 Darcy Kanunu ve Ohm Kanunu arasındaki benzeşim

Darcy Kanunu	Ohm Kanunu
$Q=KAH/L$ $Q=Debi$	$I=K'A'V/L'$ $I=Akım$
$k=Hidrolik iletkenlik katsayısı$	$k'=İletkenlik Katsayısı$
$A=Enkesit alanı$	$A'=Enkesit Alanı$
$H= Akım oluşturan Yük$	$V= Akım oluşturan Voltaj$
$L=Sızma yolu uzunluğu$	$L'= Akım yolu uzunluğu$

Bu nedenle, eşpotansiyel veya akım çizgilerinin örneğini elde etmek için akım bölgesi benzer geometrik şekle sahip elektrik iletkene aktarılabilir. Elektrik benzeşimler ıslak ve kuru olarak yapılabilir. Bu modeller için iki boyutlu iletken kağıt veya sulu solüsyon içeren üç boyutlu depolar kullanılabilir.

1. Islak Modeller: Islak elektrik analoglarında freatik hattı olmayan, doymuş, poroz bir zemin modellenir ve normalde iletken sulu bir solüsyon veya jel kullanılır. Islak modeller geometrisi düzensiz bir yapının bir akifere saplanmış olduğu projelere iyi uyarlar. Bir potansiyel seti veya voltaj uygulandığında jel ya da solüsyonun incelenmesi ile bir model akiferin içindeki elektrik potansiyeli çeşitli noktalarda saptanır.

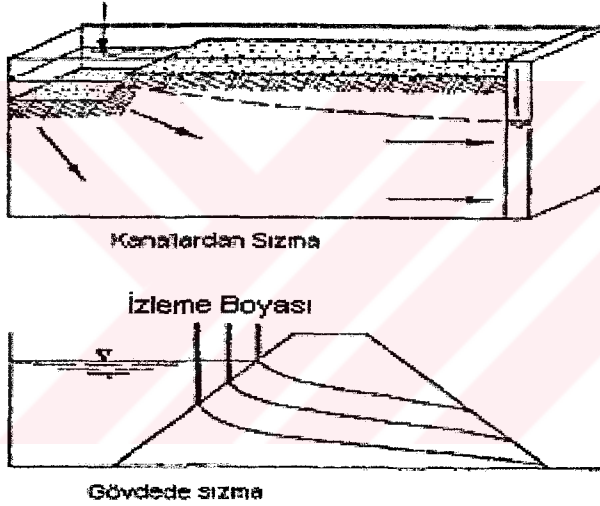
2. Kuru Modeller: Arazi şartları iki boyutlu plan ya da kesite dönüştürülerek iletken kağıt modelleriyle akım ağı oluşturulabilir(Şekil 5.5); genellikle uygulaması kolaydır ve değişik geometrilere uygulanabilir. Ancak değişik hidrolik iletkenlik katsayılarına sahip zeminlerin benzeşimini yapmak zordur ve kararlı akıma sahip akiferlere uygulanabilirler.



Şekil 5.5 Akım ve Eşpotansiyel Eğrilerini bulmak için iki boyutlu iletken kağıdın kullanımı.

5.6.2.2 Kum Modeller

Prototip malzemelerin kullanılabildiği kum modeller akım yolları ve belirli noktalardaki su yükleri hakkında bilgi sağlayabilirler. Homojen şartları sağlamak için su altına kum ya da gözenekli malzemeler yerleştirilebilir ya da tabakaların iç sınırlarındaki etkileri araştırmak için farklı boyutlardaki kum tabakaları kullanılabilir. Akım, boya enjeksiyonu ile izlenebilir ve küçük piyozometreler yardımıyla yükler saptanabilir. Prototipteki hidrolik iletkenlik katsayılarını ve sınır etkilerini modellemenin zorlukları dezavantajlardır. Şekil 5.6'da gösterilen kum model (hidrolik model) içerisine kum, havası alınmış su ve ölçüm aletleri yerleştirilmiş olan, şeffaf ön yüzlü, rijit ve su geçirmez bir depo ile teşkil edilir. Deponun geometrisi prototipe uygundur.



Şekil 5.6 Kum deposu ile modelleme.

Eğer akım basınçlı değilse ve modelde ve prototipteki malzeme aynı ise, modeldeki kapiler yükselme telafi edilmelidir. Kararlı akıma ulaşıldığında, akım çizgilerini belirleyebilmek amacıyla, memba sınırı boyunca yüzeye yakın çeşitli noktalarda boya karıştırılmalıdır. Değişik bölgelerde oluşan basınç yüklerini belirlemek için piyozometreler kullanılır. Kum tankı modelleri yeraltı suyu kalite ve kirlilik araştırmalarında da kullanılır.

5.6.2.3 Viskoz Akım Modelleri

Bu metot, yağ veya gliserin gibi viskoz bir akışkanın paralel iki plaka arasından akıtılmasına dayanır ve genellikle iki boyutlu akımların modellenmesinde kullanılır. Kum modellerinde olduğu gibi, akımı izlemek için boya kullanılabilir. Akım laminar olmalıdır, ancak sınırlarda ve sınırların keskin dönüşlerinde bunu sağlamak güçtür. Paralel Plaka veya Hele-Shaw olarak da adlandırılan viskoz akım modelleri, geçirimli, doymuş zemindeki akım ile iki paralel plaka arasındaki dar aralıktan akan sıvının akımında geçerli olan diferansiyel denklemlerin benzerliği esasına dayanır. Viskoz akım modelleri araştırılacak olan yapının şeklini içerir ve kararlı akıma ulaşıldığında memba kenarı boyunca renkli boyalar enjekte edilerek akım çizgileri gözlemlenebilir. Zonlu toprak dolgu barajlarda olduğu gibi homojen olmayan ortamlardaki hidrolik iletkenlik durumu, paralel plakaların arasındaki boşluk mesafesi değiştirilerek modellenenebilir. Viskoziteyi etkilemesi bakımından viskoz akım model deneyleri sıcaklığın kontrol altında olduğu bir yerde yapılmalı ya da sıcaklık deney esnasında tüm giriş ve çıkış noktalarında ölçülmeli ve buna göre hesaplar düzeltilmelidir.

5.6.3 Analitik Metotlar

5.6.3.1 Dönüştürme Metodu

Sızma probleminin geometrisi karmaşık olan bir düzlemden diğerine aktarılabilmesi esasına dayanır. Bu metoda göre, problemin geometrisi çözümün ne olduğunun bilinmediği bir düzlemden bilinene aktarılabilir. Bu model genel problemlere uygulanmış olmakla beraber uygun dönüştürme fonksiyonları ve kompleks değişken teorisinin kullanımını gerektirmesinden dolayı özel arazi problemlerinde pek sık kullanılmaz.

5.6.3.2 Parçalar Metodu

Parçalar metodu, herhangi bir yeraltı suyu sistemindeki basınç yüklerini ve sızmayı hesaplamak için kullanılabilen analitik bir yaklaşım metodudur (Engineering Manual, 1986). 1935 Yılında geliştirilen bu metodun temelinde, akım alanının içindeki kritik noktalarda eşpotansiyel çizgilerin düşey düz çizgilere yaklaştırılabilmesi varsayımı bulunur. Bu düşey çizgiler akım alanını parçalara

ayırır. Ayrıca metot ile şu kabuller yapılmaktadır: a) Darcy Kanunu geçerlidir. b) Kararlı akım durumu mevcuttur. c) Zemin homojen - izotropik tek bir tabaka ya da tabakalardan oluşur. Bu metoda göre, her bir parçadaki akım miktarı şöyle hesaplanır:

$$q = \frac{k * h_i}{\Phi_i} \quad (5.3)$$

Burada,

k = Hidrolik iletkenlik katsayısı

h_i = Parça boyunca yük kaybı

Φ_i = Boyutsuz şekil faktörü

olarak tanımlanmıştır.

Parça sınırlarını eşpotansiyel çizgiler oluşturduğuna göre, her bir parçadaki akım, tüm sistemdeki toplam akıma eşittir.

$$Q = \frac{k * h_1}{\Phi_1} = \frac{k * h_2}{\Phi_2} = \dots \dots \dots \frac{k * h_n}{\Phi_n} \quad (5.4)$$

Her bir parçadaki yük kayıplarının toplamı toplam yük kaybına eşit olduğu için toplam akım miktarı şu şekilde ifade edilebilir:

$$Q = \frac{k * h}{\sum_{i=1}^n \Phi_i} \quad (5.5)$$

Burada h , kesit boyunca toplam yük kaybıdır. Aynı hat boyunca her bir parçadaki yük kaybı aşağıdaki eşitlikten elde edilir:

$$h_i = \frac{h * \Phi_i}{\sum_{i=1}^n \Phi_i} \quad (5.6)$$

Parçadaki herhangi bir geçirimsiz sınır boyunca yük kaybının lineer olarak değiştiği varsayılmaktadır. Metodun esasında akım alanının parçalara bölünmesi vardır, bazı parça tipleri için şekil faktörleri Şekil 5.6' da verilmiştir.

Parça tipi	Gösterilişi	Şekil Faktörü Φ
I		$\Phi = \frac{L}{a}$
II		$\Phi = \frac{1}{2} \left(\frac{kh}{Q} \right)$
III		$\Phi = \frac{1}{2} \left(\frac{kh}{Q} \right)$
IV		$b \leq s$ $\Phi = k \left(1 + \frac{s}{a} \right)$ $b \geq s$ $\Phi = k \left(1 + \frac{s}{a} \right) + \frac{s-s}{T}$

Şekil 5.7 Bazı parça tipleri ve şekil faktörleri

Parça Tipleri: Dokuz farklı parça tipi vardır. İlk altı tanesi basınçlı (confined), diğer üçü basınçsız akımlara aittir. Aşağıda bazı parça tipleri için şekil faktörleri verilmiştir:

Tip I. Bu parça tipi basınçlı paralel yatay akımı temsil eder. Birim genişlikteki akım:

$$Q = \frac{kh_i a}{L} \quad (5.7)$$

yazılabilir. Şekil Faktörü,

$$\Phi = \frac{L}{a} \quad (5.8)$$

olarak tanımlanmıştır.

2) Tip II. Bu parça tipi S uzunluğundaki geçirimsiz sınırın, T kalınlığındaki geçirimli zemine saplanmış olduğu durumu temsil eder. Bir giriş ya da çıkış koşulunu simgeleyebilir. Burada şekil faktörü;

$$\Phi = \frac{1}{2} \left(\frac{kh}{Q} \right) \quad (5.9)$$

şeklinde dir.

- 3) Tıp III. Bu parça tipi T kalınlığındaki geçirimli zeminde, b genişliğine ve S düşey derinliğine sahip geçirimsiz bir tabakayı temsil eder.
- 4) Tıp IV. Bu tip T kalınlığındaki geçimli tabakada bulunan b uzunluğuna ve S gömülü uzunluğuna sahip bir iç parçayı simgeler. Akım bölgesi elektrik analog deney sonuçlarına göre aktif ve pasif olmak üzere ikiye bölünmüş ve iki bölümün 45° açısı ile birbirinden ayrıldığı varsayılmıştır. $b > S$ ve $b < S$ durumları için şekil faktörleri Şekil 5.7’de verilmiştir.
- 5) Tıp V. Bu parça tipi geçimli bir tabakada eşit S derinliğinde gömülü olan iki düşey sınır mevcuttur.
- 6) Tıp VI. Gömülü uzunluğun simetrik olmaması dışında Tıp V ile aynıdır.

Diğer parça tipleri serbest yüzeyli akım şartları temsil edilmektedir.

Sızma problemlerinde çok sayıda faktör değişiyorsa, akım ağlarının çizilmesi çok fazla zaman almaktadır. Parçalar metodu özellikle analizi yapılacak problemdeki çeşitli faktörler değiştirildiğinde ortaya çıkacak sonucun hızlı bir şekilde değerlendirilmesi isteniyorsa iyi bir metottur. Ancak çözüm için bazı genellemeler yapılmalıdır. Parçalar metodu uygulanacak akım alanı sadece yatay ve düşey sınırlar olacak şekilde düzenlenmelidir. İşlemler akım alanındaki akım çizgilerini modellemektedir, ancak yönle ilgili şüphe varsa, kabaca bir akım ağı çizilmelidir. Bu durum, özellikle yapının, çok parçadan oluşan bir bölümü modellendiğinde önemli olur, çünkü akım çizgileri yanlış yönde çizilebilirler. Sonuçların doğruluğu parça sınırlarının düşey eşpotansiyel çizgileri ne kadar iyi temsil ettiğine bağlıdır. Sapma büyüdükçe hata oranı da büyür. Bununla beraber, pek çok uygulamada oldukça iyi sonuçlar alınmıştır.

5.6.3.3 Kapalı Şekil (Closed Form) Metodu:

Bu metod, dairesel olarak beslenen bir kuyuya olan akım gibi basit durumlar için kullanılmaktadır. Barajlarla ilgili sızma problemleri, oldukça karmaşık akım şartlarından dolayı yaklaşım metotları ile çözülürler.

5.6.4 Nümerik ve Bilgisayar Metodlar

Karmaşık sızma şartlarında Laplace Denklemi için kabul edilebilir yaklaşımlar yapabilmek için bilgisayar modelleri kullanılır. Nümerik çözümler için “sonlu farklar” ve “sonlu elemanlar” metotları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Her ikisi de iki ve üç boyutlu modellemeler için kullanılabilir. Bu metotlar için geliştirilmiş bilgisayar programları mevcuttur.

5.6.4.1 Sonlu Farklar Metodu

Sonlu Farklar Metodu’nda Laplace Denklemleri, matematiksel bir yaklaşım ile bir dizi lineer cebrik ifadeye dönüştürülürler. Laplace Denklemi için sonlu farklar bağıntılarının çözümünde kullanılan ilk metotlar elle yapılabilmekteydi, ancak günümüzde bilgisayarlar programları ile birlikte pek çok çözüm metodu geliştirilmiştir. Çözüm için akım bölgesi yük değerleri belirlenmiş olan düğüm noktaları ile dikdörtgen bir ağ sistemine bölünür. Sabit yük sınır veya noktalara bilinen yük değerleri, başlangıçta yük değerleri bilinmeyen düğüm noktalarına ise tahmini yükler atanır. Darcy Kanunu ve verilen bir düğüm noktasındaki yükün çevresindeki düğüm noktalarındaki yüklerin ortalaması olduğu varsayımı kullanılarak N sayıda bilinmeyen yük değeri olan bir dizi N lineer cebrik denklemi geliştirilir (N, düğüm noktası sayısına eşittir). Az sayıda düğüm noktası olan basit ağ sistemleri elle çözülebilir. Normalde N sayısı büyüktür ve iterasyon yapılan metotlar uygulanmalı ve bilgisayar kullanılmalıdır. Düzensiz koordinat hücrelerine değer girişi yapmak zor olduğu için problemin geometrisi uygun hale getirilmelidir. Sonlu farklar metodu, çok katmanlı ve anizotropik koşullarda da kullanılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen Sazlıdere Barajı sızma akımlarının hesaplanması için sonlu farklar metodu seçilmiş olup, çözüm esasları Bölüm 6’da verilecektir.

5.6.4.2 Sonlu Elemanlar Metodu

Nümerik çözümlerin ikinci bir yolu olan bu metot, problemin farklı elemanlara bölünmesi ve N bilinmeyenli N denklem sağlayan ağ sistemi (dikdörtgen olmak zorunda değil) oluşturulması esasına dayanmaktadır. Akım bölgesi elemanlara bölünerek her bir eleman için hidrolik iletkenlik katsayıları tanımlanır. Her bir elemandaki sınır şartları, yük ve akım oranları olarak tanımlanır ve değerler hesaplanır. Düğüm noktalarındaki yükler ve elemanlardaki akımların hesaplaması için bir denklemler sistemi çözülür. Serbest yüzeyli ya da geçirimsiz tabakalar arası

sızma problemlerinin çözümü için iki ve üç boyutlu bilgisayar programları geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar metodunda ağ sisteminin oluşturulması için interaktif bir grafik işlemcisi vardır. Akım fonksiyonlarını ve potansiyelleri hesaplayarak akım ve potansiyel eğrilerini çizmek ve böylece akım ağını elde etmek mümkün olabilmektedir.

Daha kompleks sızma problemleri için sonlu elemanlar metodu sonlu farklar metoduna göre daha avantajlıdır. Bu avantajlar;

1. Malzemenin eğimli tabakaları gibi zor geometrik koşullar kolayca yerleştirilebilir.
2. Elemanların boyutları değiştirilerek sızma eğim veya hızlarının büyük olduğu bölgeler doğru bir şekilde modellenenebilir.
3. Bir tabaka içindeki malzeme cepleri modellenenebilir.



6. SEÇİLEN MATEMATİK MODEL

6.1 Genel

“Sonlu Farklar Metodu”, Bölüm 5.6.4.1’de belirtildiği gibi, geçirimli bir ortamdaki sıvının iki boyutlu, kararlı akımında etkin olan kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılan nümerik bir yaklaşımdır. Sonlu farklar metodu, düzgün geometri ve belirli sınır şartları olan geçirimsiz tabakalar arası problemler için hesap tablosu programlarına uygulanabilmektedir. Problemin geometrisinin ve sınır şartlarının uygun olması nedeniyle, Sazlıdere Barajı gövde altı sızmalarının analizi için sonlu farklar metodu seçilmiştir.

6.2 Sızma Denklemleri

Bölüm 5.5’te sızma akımında belirli koşullar altında geçerli olan Laplace Denlemi’nin elde edilişi açıklanmıştır. Sızmanın iki boyutlu, geçirimli, anizotropik ($k_x \neq k_y$) bir zemin içinden gerçekleşiyor olması halinde, doymun zemindeki toplam yük dağılımı için aşağıdaki kısmi diferansiyel denklem geçerli olur (Bardet, J.P., 1997):

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (6.1)$$

Zemin koşullarının izotropik ($k_x = k_y$) olması durumunda denklem (6.1) aşağıdaki şekle dönüşür:

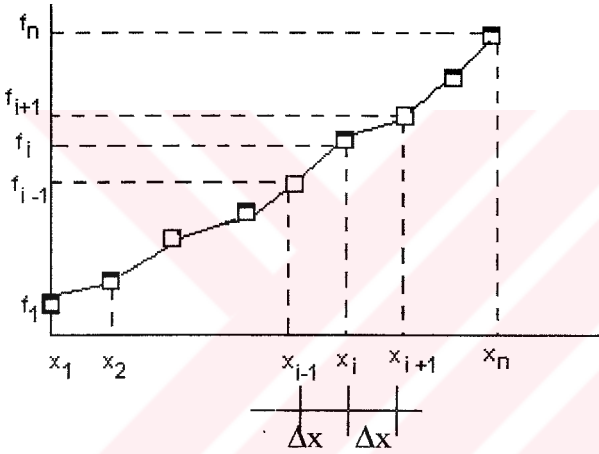
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (6.2)$$

Basmçlı(confined) sızma problemlerinde (akımın gerçekleştiği bölgede serbest su yüzeyi olmaması durumu) toplam yük ya da akım hızı sınırlarda tanımlanır. Matematiksel olarak, sınır şartları toplam yük ya da toplam yük değişimleri olarak

tarif edilir. Hidrolik yük h_{ij} değerleri, kurulan ağ sisteminin düğüm noktalarında hesaplanır (Koutitas, C.G., 1983).

6.3 Sonlu Farklar Metodunda Fonksiyon Türevlerinin Kesikli Hale Dönüştürülmesi

Şekil 6.1’de gösterildiği gibi, sürekli bir $f(x)$ fonksiyonu, x ekseninde çeşitli aralıklarla bulunan x_i değerlerine karşılık gelen kesikli f_i değerleri olarak tanımlanabilir. f Fonksiyonunun türevi alınabilir bir fonksiyon olduğu kabul edilirse, x için Taylor Açılımı kullanılmak suretiyle, f fonksiyonu uzatılabilir:



Şekil 6.1 f Sürekli fonksiyonunun simgesel olarak kesikli hale dönüştürülmesi

$$f(x+\Delta x) = f(x) + \frac{df}{dx}(x)\Delta x + \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dx^2}(x)\Delta x^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3f}{dx^3}(x)\Delta x^3 + \dots \quad (6.3)$$

$x=x_i$ için,

$$f_{i+1} = f_i + \left. \frac{df}{dx} \right|_i \Delta x + \left. \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dx^2} \right|_i \Delta x^2 + \left. \frac{1}{3!} \frac{d^3f}{dx^3} \right|_i \Delta x^3 + \dots \quad (6.4)$$

$$f_{i-1} = f_i - \left. \frac{df}{dx} \right|_i \Delta x + \left. \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dx^2} \right|_i \Delta x^2 - \left. \frac{1}{3!} \frac{d^3f}{dx^3} \right|_i \Delta x^3 + \dots \quad (6.5)$$

(6.4) ve (6.5) denklemlerinin farkını almak suretiyle birinci derece türevin yaklaşık değeri bulunur:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_i \approx \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \quad (6.6)$$

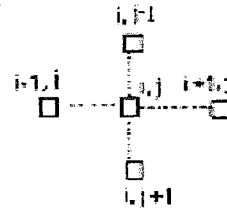
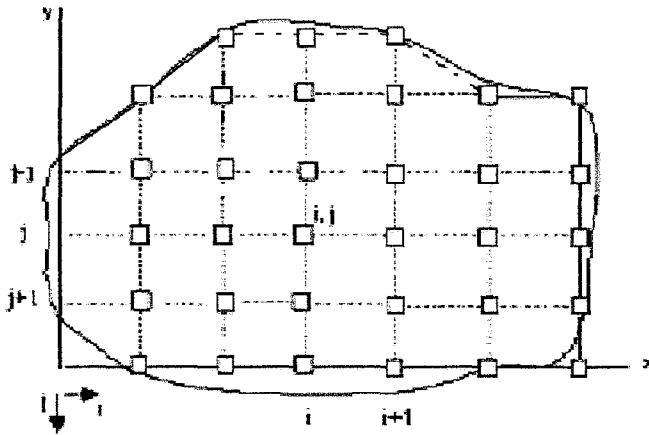
(6.4) ve (6.5) denklemleri toplanarak, ikinci derece türevin yaklaşık değeri elde edilir:

$$\left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_i \approx \frac{f_{i+1} + f_{i-1} + 2f_i}{2\Delta x} \quad (6.7)$$

(6.6) ve (6.7) denklemleri 1. ve 2. derece türevlerin ikinci dereceden yaklaşımlarıdır. Tam ile yaklaşık diferansiyeller arasındaki hata Δx^2 ile orantılıdır. Δx sıfıra yaklaştıkça, yaklaşık diferansiyel de tam değere karesel olarak yaklaşır.

6.3.2 İki Boyutlu Problemlerin Kesikli Hale Dönüştürülmesi

(6.6) ve (6.7) denklemleri iki boyutlu akiferdeki toplam yük dağılımı gibi x ve y değişkenli fonksiyonlara da uygulanabilir. Şekil 6.2’de gösterildiği gibi iki boyutlu bir düzlem, koordinatları i ve j ile gösterilen noktasal bir ağ ile bölünmüştür. Eğik sınırlar noktalarla tanımlanabilmeleri için düz çizgilere yaklaştırılmışlardır.



Şekil 6.2 İki boyutlu alanın ağ sistemine bölünmesi Şekil 6.3 i,j düğüm noktası

Δx ve Δy , sırasıyla x ve y yönlerindeki nokta aralıkları ise, (6.1) denkleminin i,j noktasındaki kesikli hale dönüştürülmüş şekli şöyle olur:

$$\frac{k_x}{\Delta x^2}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} - 2h_{i,j}) + \frac{k_y}{\Delta y^2}(h_{i,j+1} + h_{i,j-1} - 2h_{i,j}) = 0 \quad (6.8)$$

Şekil 6.3' te gösterildiği gibi, (6.8) eşitliğinde sadece i,j noktasını çevreleyen h değerleri bulunur.

$\Delta x = \Delta y$ durumunda ise (6.8) eşitliği aşağıdaki şekli alır:

$$h_{i,j} = \frac{1}{2(1+\alpha)}(\alpha h_{i+1,j} + \alpha h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) \quad (6.9)$$

Burada α değeri k_x/k_y oranını temsil etmektedir.

$\Delta x = \Delta y$ ve $k_x = k_y$ ($\alpha = 1$) olması durumunda (6.8) eşitliği :

$$h_{i,j} = \frac{1}{4}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}) \quad (6.10)$$

şekline dönüşür.

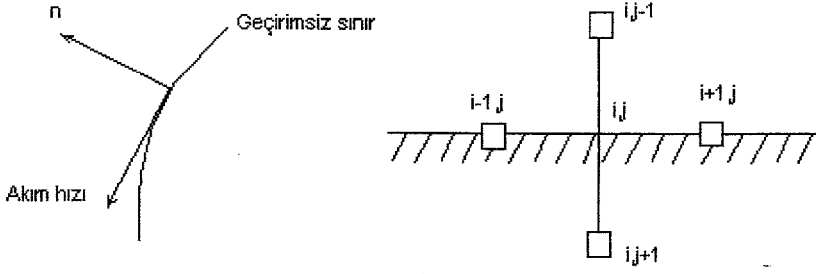
6.5 Sınır Şartları

Geçirimsiz tabakalar arasında sızma şartlarında, tüm sınırlar üzerindeki toplam yük veya toplam akım denklemleri tanımlanır. Belirtilen akım sınırları için, sadece geçirimsiz sınırlar göz önüne alınır. Geçirimsiz bir sınır için, sızma hızı sınıra teğetseldir, yani,

$$\frac{\partial h}{\partial n} = 0 \quad (6.11)$$

Burada n , Şekil 6.4 'te görülen sınır çizgisine normal doğrultuda olan koordinattır. Yatay bir yüzey için, $n=y$ olduğundan denklem (6.11) şu şekli alır:

$$\frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (6.12)$$



Şekil 6.4 Geçirimsiz sınır şartları

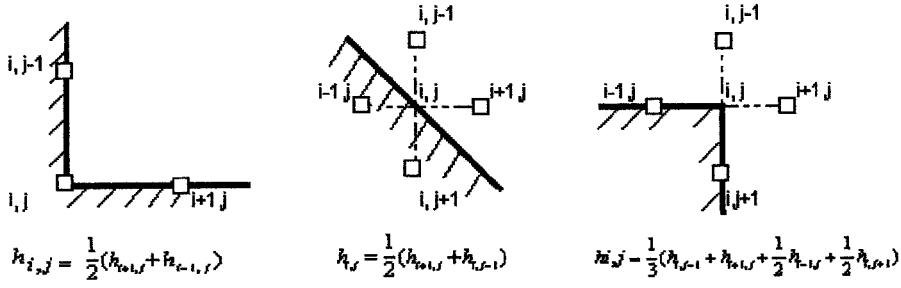
Şekil 6.4' te görülen sızma alanının dışında fiktif bir noktanın olduğu varsayımı ile, birinci derece diferansiyel yaklaşım yapılır: Denklem (6.6) kullanılarak i,j noktasında,

$$\frac{\partial h}{\partial y} \approx h_{i,j+1} - h_{i,j-1} = 0 \quad (6.13)$$

olur, bu nedenle, $h_{i,j+1} = h_{i,j-1}$ 'dir. Fiktif $h_{i,j+1}$ noktasındaki toplam yük, (6.10) ve (6.13) denklemlerinin toplanmasıyla elimine edilmiş olur:

$$h_{i,j} = \frac{1}{4}(h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + 2h_{i,j-1}) \quad (6.14)$$

Benzer şekilde, akım bölgesinin diğer bir yatay sınırı olan üst kısmı ve dikey geçirimsiz sınırlar tanımlanabilir. Bu tanımlarda, yatay, geçirimsiz bir sınırın mevcut olması durumunda, fiktif noktalar tanımlamak gerekli değildir; ancak, (6.10) eşitliği yerine (6.14) eşitliği kullanılmalıdır. Denklem (6.14)'teki 2 katsayısı, sınır üzerinde değil, dışında yer alan noktalara uygulanır. Böylece (6.14) eşitliği, dikey bir sınır için de genelleştirilebilir. Şekil 6.5'te eğik ve çeşitli konumlarda bulunan köşeli sınırlarda yer alan noktalar için bazı eşitlikler verilmiştir. Tüm konumlar için eşitliklerde katsayılar toplamı 1'e eşittir.

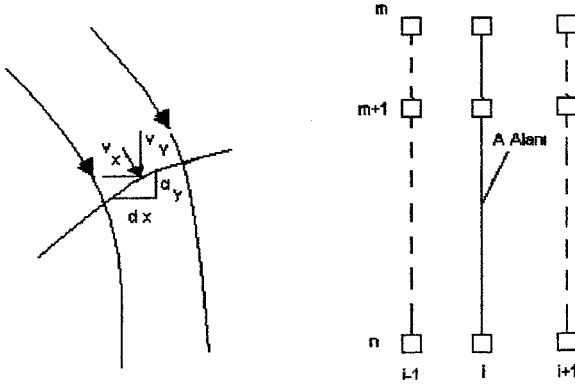


Şekil 6.5 Köşeler ve 45° eğimli geçirimsiz sınırlarda $h_{i,j}$ değerlerinin bulunması.

6.6 Sızma Akımı

Birim zamandaki toplam akım debisi, akım ağı çizilmeksizin, toplam yük değerlerinin kesikli değerlerinden hesaplanabilir. Debi değeri akımı tamamen kesen herhangi bir A alanı için bulunabilir. Eğer Şekil 6.6'da gösterilen A alanı, akıma dik herhangi bir alan ise birim zamanda sızma miktarı,

$$q = v_x dA = k_x \frac{\partial h}{\partial x} dA \quad (6.15)$$



Şekil 6.6 Akım çizgileri ve toplam sızma miktarının toplam yükün kesikli değerlerinden elde edilmesi.

Denklem (6.15)'de yer alan A alanı, akımı tamamen kesmesi şartıyla istenen yerde seçilebilir. Dikey kesit durumunda ($m < n$) , (6.15) eşitliği, trapez kuralı kullanılarak integre edilebilir:

$$\frac{\Delta x}{2} v_{i,m} + \Delta x \sum_{j=m+1}^{n-1} v_{i,j} + \frac{\Delta x}{2} v_{i,n} \quad (6.16)$$

Burada,

$$v_{i,j} = \frac{k_x}{2\Delta x} (h_{i+1,j} - h_{i-1,j}) \quad (6.17)$$

olmaktadır.

Sonuç olarak toplam sızma miktarı için aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$q = \frac{kx}{4} \left[h_{i+1,m} - h_{i-1,m} + 2 \sum_{j=m+1}^{n-1} (h_{i+1,j} - h_{i-1,j}) + h_{i+1,n} - h_{i-1,n} \right] \quad (6.18)$$

Burada m akım bölgesinin üst kısmı, n alt kısmıdır.

6.7 Akım fonksiyonu ve akım ağları

Akım ağı eşpotansiyel ve akım çizgilerinden oluşur. Tanım olarak akım fonksiyonu $\Psi(x,y)$ aşağıda verilmiştir:

$$v_x = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad \text{ve} \quad v_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (6.19)$$

Kenarları dx ve dy olan küçük eleman boyunca sızma miktarı dq :

$$dq = v_x dy - v_y dx = \frac{\partial \Psi}{\partial y} dy + \frac{\partial \Psi}{\partial x} dx = d\Psi \quad (6.20)$$

eşitliği kullanılarak, (i,j) ve $(i,j+1)$ noktaları arasındaki sızma miktarı Δq bulunur:

$$\Delta q = \int_{i,j+1}^{i,j} v_x dy = \frac{k_x}{4} (h_{i+1,j} - h_{i-1,j} + h_{i+1,j+1} - h_{i-1,j+1}) \quad (6.21)$$

$$\Delta \Psi = \Psi_{i,j} - \Psi_{i,j+1} = \frac{1}{4} (h_{i+1,j} - h_{i-1,j} + h_{i+1,j+1} - h_{i-1,j+1}) \quad (6.22)$$

Ψ_{ij} değerleri, genellikle dıştaki sınır üzerindeki akım çizgilerinden biri boyunca sıfıra eşit alınır. Toplam yük $h_{i,j}$ ' nin hesaplanmasından sonra, $\psi_{ij}=0$ olan akım çizgisinden ilerleyerek, (6.22) eşitliğinden i kısımdaki ψ_{ij} değerleri bulunur. Akım fonksiyonu akım çizgileri boyunca sabittir.



7. SAZLIDERE BARAJI SIZMA DURUMU

7.1 Genel

Metodun uygulandığı ve karstik özellikler taşıyan kireçtaşı tabakası üzerine inşa edilmiş olan Sazlıdere Barajı'nda sızma kontrolü amacı ile inşaat aşamasında ortalama 70 m derinlikte bulunan geçirimsiz kilitli tabakasına kadar inilerek 5 m saplanan enjeksiyon perdesi yapılmıştır. Ancak barajın işletmeye açılmasının ve rezervuar su seviyesinin belirli bir seviyeye ulaşmasının ardından kaçak problemleri ortaya çıkmış ve ilave enjeksiyonlar yapılması gerekli olmuş, daha sonra DSİ tarafından uygulanan iyileştirme programı ile beklenen düzeyde geçirimsizlik sağlanmış ve iyileştirme çalışmaları rapor edilmiştir (Görücü K., DSİ, 2000).

İstanbul'un içme suyu temini için DSİ XIV. Bölge Müdürlüğü tarafından "Büyük İstanbul İçme suyu II. Merhale Projesi" kapsamında inşa edilen "Sazlıdere Barajı", İstanbul İli'nin Avrupa yakasındaki Küçükçekmece Gölü'nün yaklaşık 5 km kuzeyinde, Sazlıdere üzerinde bulunur. "Sazlıdere Barajı ve Tesisleri İnşaatı"na 1992 yılında başlamış ve 1995 yılında tamamlanmıştır. Baraj gövdesi, kil çekirdekli, zonlu kaya dolgu tipinde inşa edilmiştir. Maksimum gövde enkesiti Şekil 7.1'de verilen barajın yüksekliği talvegden 23 m, temelden 49 m olup, kret kotu 27.00 m, temel kotu - 22.00 m, çekirdek hendeği taban kotu -28.00 m, maksimum su seviyesi 25.60 m, normal su seviyesi 22.40 m ve işletme kotunda göl hacmi 91.3 hm³ tür. Barajdan ortalama 49.56 hm³/yıl su alınması planlanmıştır.

Baraj gövdesi, temel zeminindeki derin (21~23 m) alüvyon malzemenin gövde altında tamamen kaldırılması suretiyle kireçtaşı tabakası üzerine oturtulmuş ve ortalama 70 m derinlikte (saplama hendeği dahil) yer alan kilitli tabakasına kadar inen ve 5 m saplanarak yapılan enjeksiyon perdesi ile karstik özellikler taşıyan kireçtaşı tabakasında geçirimsizliğin sağlanmasına çalışılmıştır.

7.2 Baraj Yeri ve Rezervuar Alanı Genel Jeolojisi

Baraj yeri ve göl alanının tabanında, Paleozoik (Karbonifer) yaşlı Trakya formasyonu yer almaktadır. Bu formasyon, düşey ve yanal geçişli grovak-killi şistlerle temsil edilir. Rezervuar alanının memba tarafındaki vadilerde olup, geçirimsiz özelliktedir. Bu formasyonların üzerinde ise alttan üste doğru, koyu gri-siyahımsı renkli, bol fosilli, geçirimsiz özellikteki kilitaşı başlar ve gri renkli karbonat çimentolu, ince seviyeler halinde silitaşı-kumtaşı içeren tabakalar ile devam eder. Bunların üzerinde gri renkli, yer yer kumtaşı seviyeli, kırık ve çatlaklı, karmaşık karstik yapı ve karstifikasyon seviyelerinde geçirimli, kireçtaşı katmanları gelir. Bu kireçtaşları üzerinde ise, yine uyumlu olarak geçirimsiz kilitaşı-marn ve karstik yapı, karstlaşma zonlarında geçirimli kireçtaşları yer alır. Proje alanı dolayında karstik kaynaklar ve mağaralar yaygındır(Proje Raporu, 1990).

Baraj yeri ve göl alanındaki jeolojik formasyonların üzerine, alüvyon malzeme depolanmıştır. Alüvyon üst seviyelerinde (3-5 m) silt-kum dane boyutlu malzeme, alt seviyelerde ise kum-silt-kil dane boyutlu ve turba karakterli haliç malzemesi niteliğindedir. Üst seviyelerde geçirimsiz, alt seviyelerde geçirimli-yarı geçirimli olup, taşıma gücü düşüktür.

7.3 Baraj İnşaatı ve Perde Enjeksiyonları

Baraj gövdesi, alüvyon niteliği nedeniyle -21.00 m kotuna kadar tamamen kaldırılarak Eosen yaşlı kireçtaşı ve kilitaşı-marn katmanları üzerinde inşa edilmiştir. Konsolidasyon sonrası derinlik -22.00 m kotuna ulaşmaktadır. Gövde sağ sahile doğru kilitaşı-marn, talveg bölümünde kireçtaşı ve sol sahile doğru yine kilitaşı- marn katmanları üzerine oturmuştur. Sol sahilde tertiplenen dolusavak yapısı ise kilitaşı-marn ve kireçtaşı üzerindedir.

Baraj gövdesi altındaki Eosen kireçtaşlarının karstik ve geçirimli olması nedeniyle, ilk inşaat sırasında geçirimsizliği sağlamak için iki farklı bölgede enjeksiyon çalışması yapılmıştır. Bunlardan biri, gövde altı geçirimsizliğini sağlayacak perde ve konsolidasyon enjeksiyonları, diğeri ise, göl alanındaki karstik özellikli kireçtaşlarının geçirimsizliğini sağlayacak sağ ve sol sahil perde enjeksiyonlarıdır. Enjeksiyon perdesi sağ sahilde Km: 0+000'dan başlamak üzere vadi genişliği olan Km: 431.39'a doğru devam ederek dolusavak eşiği eksenine doğrultusunda sol sahil

yamaçlarına uzatılmıştır. Sağ ve sol sahil perde enjeksiyonları, alttaki geçirimsiz katmanlara 5 m girecek şekilde 3 m aralıklarla yapılmıştır. Ayrıca kontrol kuyuları ve sonuçlarına göre açılan ara kuyular ile enjeksiyonlar tamamlanmış ve gövde altı perde enjeksiyonuna bağlanmıştır. Sağ ve sol sahil perde enjeksiyonlarında toplam 76074 m delgi yapılarak 6229 ton çimento, 1000 ton kum, 600 ton bentonit zemine enjekte edilmiştir. Ayrıca 5 m derinlikte konsolidasyon enjeksiyonları yapılmıştır (Görücü K., DSİ, 2000).

7.4 Kaçakların Ortaya Çıkması

Sazlıdere Barajı inşaatı, 1995 yılında tamamlanmış ve Nisan 1996 tarihinde göl alanında su tutmaya hazır hale getirilmiştir. Baraj rezervuar su kotu, çeşitli işlerin bitirilmesi amacıyla, Şubat 1997 tarihine kadar 11.00 – 12.00 m civarında tutulmuştur. Baraj su kotu, 16.00 – 17.00 metreye yükseldiğinde, dolusavak sol kütle betonu tarafında birkaç gözeden ve yine aynı zamanda, baraj gövdesinin mansap tarafındaki denge dolgusunun çeşitli noktalarından basınçlı su gelişi başlamıştır. Şubat 1998 tarihinde rezervuar su kotu 18.60 metreye ulaştığında, dolusavak kütle betonu yanındaki su kaçağı 70 l/s, gövde mansabındaki su kaçağı ise 1500 l/s mertebesine ulaşmıştır.

7.5 Problemin İncelenmesi

Barajdaki su kaçaklarının önlenmesi için, inşaat aşamasında yapılan tüm enjeksiyon çalışmaları ve su testleri yeniden değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucu, oluşan su kaçaklarının, sol sahil perde enjeksiyonunun dolusavağa yakın kesimleri ile gövde altı perde enjeksiyonunun bazı bölümlerinden olabileceği tespit edilmiş ve iki ayrı iyileştirme programı hazırlanmıştır. Bu iyileştirmelerden ilki, dolusavak -gövde kontağı arasından olan sızmaların giderilmesini sağlamıştır. Diğer iyileştirme programı gövde altı enjeksiyon perdesindeki su kaçaklarının önlenmesi için olmalıdır.

7.6 Perde İyileştirme Enjeksiyonu

Gövde altı enjeksiyon perdesindeki su kaçaklarının önlenmesi için Ağustos 1998'de kret üzerinden iyileştirme enjeksiyonlarına başlanmıştır. Enjeksiyon

alışmalarının gelişimini takip edebilmek için, kaçan suyu deşarj eden düzgün kesitli bir savak yapılmış ve sürekli kaçak suyu ölçümleri yapılmıştır. İnşaat aşamasında yapılan perde enjeksiyonundaki çimento alışları ve kontrol kuyularındaki su testleri değerlendirilerek, enjeksiyon delgilerine, talveg kesiminde, 3'er m aralıklarla, ilk perde kuyularının 0.5 m membaında ve aralarına girecek şekilde başlanmıştır. Enjeksiyon kuyularında, kil çekirdek susuz ve burgu ile temele kadar delinmiş, muhafaza borusu indirilmiş ve borunun tabandan itibaren 75 cm' lik kısmı çimento şerbeti ile tecrit edilmiştir. Daha sonra muhafaza borusunun içinden sulu olarak geçirimsiz birime kadar delinerek, aşağıdan yukarıya doğru 5'er metrelik kademeler halinde enjeksiyonlar yapılmıştır. Bazı kuyularda, özellikle -23 ile -33 kotları arasında basınçsız çimento şerbeti alımları olmuş, baraj su kotunun yüksekliğinden kaynaklanan hidrolik yükün, kaçak bölgelerindeki su hızını arttırması nedeniyle, çimento şerbeti mansaptaki kaynaklardan çıkmıştır.

Enjeksiyonlar esnasında, sol taraftaki ana kaynaktan hızlı ve yoğun bir şekilde çıkan çimento zayı olmuştur. Bu nedenle, açılan ilave kuyulara aynı anda enjeksiyon şerbeti ile birlikte kum-çakıl da verilerek çimento kaybı önlenmeye çalışılmıştır. Bu işlemler sonucunda, kuyulardan enjekte edilen çimentonun zeminde kalması büyük ölçüde sağlanmış ve enjeksiyon kademelerinde refüler elde edilmiştir. Enjeksiyon çalışmalarının bu aşamasında, enjeksiyonun etkisiyle savaktaki kaçak su miktarının 1500 l/s den, 650 l/s mertebesine düştüğü tespit edilmiştir. Bu arada, perdenin tümünün kontrol edilmesi amacıyla, 6 m aralıklı kuyuların delgisine başlanmıştır. Bu kuyuların enjeksiyonlarında kademeler fazla şerbet almamış ve gövde mansabındaki kaçan su ile çimento irtibatı olmamıştır.

Kaçakların azalarak da olsa devam etmesi üzerine, sol sahil bölümünde kuyu aralıklarını 1.5 metreye düşürecek şekilde delgilere başlanmıştır. Bu kesimde 19 adet delgi yapılmış, daha önce yüksek çimento alımı yapan kademelerde yine şerbet alışları olmuş ve gövdenin mansabındaki kaynaklardan çıkmıştır. Ancak, rezervuar su kotundaki düşüş ve önceki enjeksiyonların olumlu etkisiyle, kuyu kademelerinde daha çabuk refü şartı elde edilmiştir. Bu bölümdeki kuyulardan birinde ilerleme esnasında -32.5/-33.0 kotları arasında 0.5 m boşluk geçilmiş ve kademenin ön enjeksiyonu yapılmıştır. Zemine enjekte edilen çimento şerbeti, yoğun bir şekilde gövde mansabındaki su kaynakları ile irtibat kurarak yüzeye taşınmıştır. Kademedeki basınç yükselmediği için, serbest olarak kum-çakıl verilmiş ve yoğunluğu yüksek

olan barit, çimento şerbetine katılmıştır. Bu arada gövde mansabında su gelişinin fazla olduğu beş kaynak, ters hidrolik basınç uygulamak amacıyla varil içine alınmış ve bu işlem suyun akışını büyük ölçüde engelleyerek enjeksiyonlara yardımcı olmuştur.

Ayrıca su kaçağının devam ettiği tespit edilen km 0+269 – 0+283 ve km 0+303 – 0+317 aralarındaki bölümlerde iyileştirme perdesinin 1 m membaında ve önceki kuyuların aralarına gelecek şekilde ek bir enjeksiyon perdesine başlanmıştır. A sırası olarak oluşturulan bu perdenin kuyularında fazla çimento şerbeti alışıları olmamıştır. Sadece iki kuyudaki iki kademe, basınçsız alış yaparak gövde mansabındaki kaynaklarla irtibat sağlamıştır. Her iki kuyunun enjeksiyonları koordineli bir şekilde yapılmış ve aynı yöntemler uygulanarak, toplam 1993 ton çimento, 80 ton çakıl, 255 ton kum, 5 ton barit, 12 ton kalsiyum klorür ve 13 ton bentonit basılarak refü elde edilmiştir.

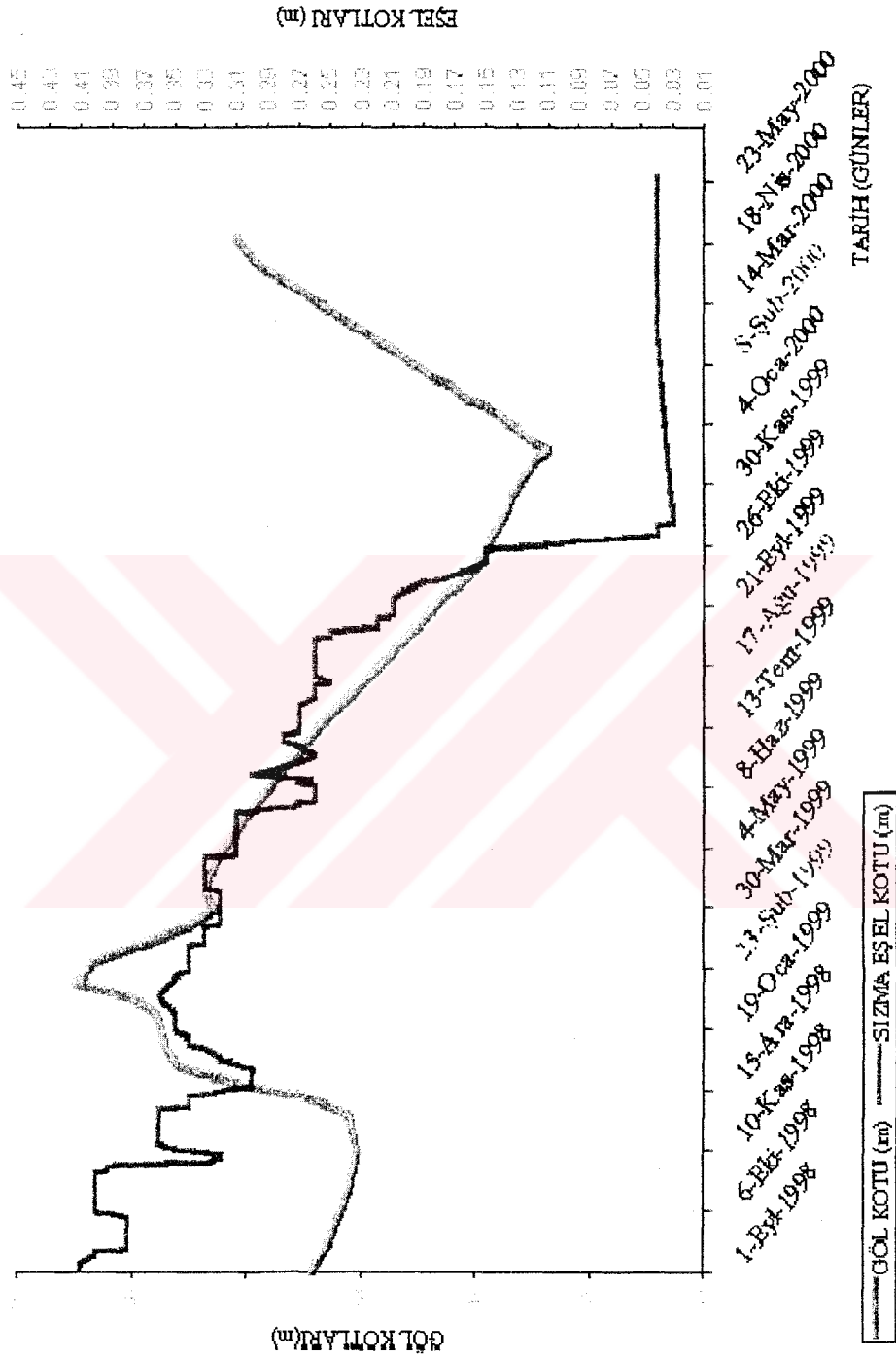
Yapılan bu enjeksiyonlarla birlikte su kaçağı devamlı ve süratle azalmış ve açılan kontrol kuyularındaki su testlerinde, enjeksiyon perdesinin iyileştirildiği sonucuna varılarak enjeksiyonlara son verilmiştir. Enjeksiyonların başlamasından sonra mansapta bir ölçme savağı tesis edilmesiyle kaçak suların eşel okumaları ve debileri ile göl su kotu arasındaki ilişki kayıt altına alınmıştır (Görücü K.,2000). Bu veriler ile 1 Eylül 1998 ile 30 Eylül 2000 tarihleri arasında kapsayan rezervuar su kotu - eşel seviyesi grafiği çizilerek Şekil 7.2’de verilmiştir. Grafiğin incelenmesi neticesinde, iyileştirme enjeksiyonlarının ilk devam ettiği sırada yüksek olan kaçak ölçüm savağı eşel seviyesinin iyileştirme çalışmaları ilerledikçe giderek düştüğü ve çalışmaların sonuçlandırıldığı tarihlerde 0.03-0.04 m seviyelerine indiği ve daha sonra göl seviyesinin yükselmesinin sızma ölçüm savağı eşel seviyesini etkilemediği görülmektedir.

Gövde altı perde iyileştirme enjeksiyonları, kret üzerinden kil çekirdeğin susuz delinmesi ve bazı enjeksiyon kademelerindeki refü şartının zor sağlanabilmesi nedeniyle 12 ayda tamamlanabilmiştir. Büyük bir bölümü gövde kreti üzerinden yapılan ilave enjeksiyonlarla, kaçak problemi iyileştirilmiştir. Tüm çalışmalarda kret üzerinde ve iki sıra halinde, toplam 116 adet kuyu açılarak, 9623 m delgi yapılmış, enjeksiyon kademelerine, yaklaşık 5650 ton çimento, 600 ton çakıl, 900 ton kum, 84 ton bentonit, barit ve kalsiyum klorür enjekte edilmiştir. İyileştirilen enjeksiyon

perdesinin geçirimsizliğinin, baraj rezervuar su kotunun yükselmesine bağlı olarak sürekli izlenmesine karar verilmiştir.



Şekil 7.2 Sazlıdere Barajında rezervuar su kotu-kaçak ölçüm sav ağı eşel kotu ilişkisi



8. UYGULAMA VE SONUÇLARININ MEVCUT SONUÇLAR İLE KARŞILAŞTIRILMASI

8.1 Genel

Metodun uygulaması için seçilen baraj, İstanbul İli'nin Avrupa yakasında bulunan Sazlıdere Barajı'dır. Baraj, kil çekirdekli kaya dolgu tipindedir. Baraj gövdesi, 23 m derinliğindeki alüvyon tabakasının tamamen kaldırılması suretiyle 70 m kalınlığındaki kireçtaşı tabakasına oturtulmuştur. Kil çekirdeğin memba ve mansabında yer alan kaya dolgunun tamamen geçirimli olduğu kabul edildiği için su yükü 47.60 m olarak kabul edilmiştir. Sonlu farklar metodu kullanılarak enjeksiyon perdesinin 20 m, 40 m, 50 m ve 60 m yapılması ile hiç yapılmaması durumları için sızma miktarları tespit edilecektir.

Kireçtaşı tabakasının ortalama derinliği 70 m'dir. Hidrolik iletkenlik katsayısı 10^{-3} cm/s ile 10^{-4} cm/s arasında olan kireçtaşı tabakasında uygulama için 10^{-3} cm/s değeri kullanılmış olup, incelenen bölgenin homojen ve anizotropik olduğu ve sızmanın kararlı akım şartlarında gerçekleştiği kabul edilmiştir.

8.2 Uygulama

Şekil 8.1' de verilen metodun uygulama kesitinde de görüldüğü gibi, akım alanında A-N ve 2-3 geçirimsiz sınırlar, 1-A ve N-4 sırasıyla giriş ve çıkış sınırlarıdır. Akım alanı memba ve mansaba doğru uzamakla birlikte, metodun uygulanabilmesi için baraj gövdesine ait geçirimsiz sınırın her iki tarafında su yükünün maksimum etkili olduğu mesafe kadar uzaklıkta (82 m) 1-2 ve 3-4 hatları ile de sınırlandırılmıştır.

Metodun uygulamasında Excel programı seçilmiştir. Seçilen karesel ağ sisteminde düğüm noktaları arası mesafe $\Delta x = \Delta y = 2$ m, ayrıca uygulama kolaylığı bakımından enjeksiyon perdesinin kalınlığı da 2 m olarak alınmıştır. Derinliği gövde altında ortalama 70 m olan kireçtaşı tabakasına saplanan enjeksiyon perdesinin 20 m, 40 m,

50 m, 60 m yapılması ve hiç yapılmaması durumlarında her bir seçenek için akım alanında yer alan, x doğrultusunda 102 ve y doğrultusunda 36 olmak üzere 3672 düğüm noktası için, 10000 iterasyon ile akım ve potansiyel fonksiyonu değerleri hesaplanmıştır.

Problemin çözümünde kullanılan Excel hesap tablosunda birim değerler kullanılmıştır. Uygulamada kullanılan diğer boyutlar şöyledir:

Kireçtaşı tabakasının hidrolik iletkenlik katsayısı : $k = 10^{-5}$ m/s

Memba su yükü = $H_1 = 47.60$ m

Mansap su yükü = $H_2 = 0$ m

İşletme yükü = $H' = 47.60$ m

Geçirimli zeminin kalınlığı = $D = 70$ m

Memba geçirimli zeminin uzunluğu = 82 m

Mansap geçirimli zeminin uzunluğu = 82 m

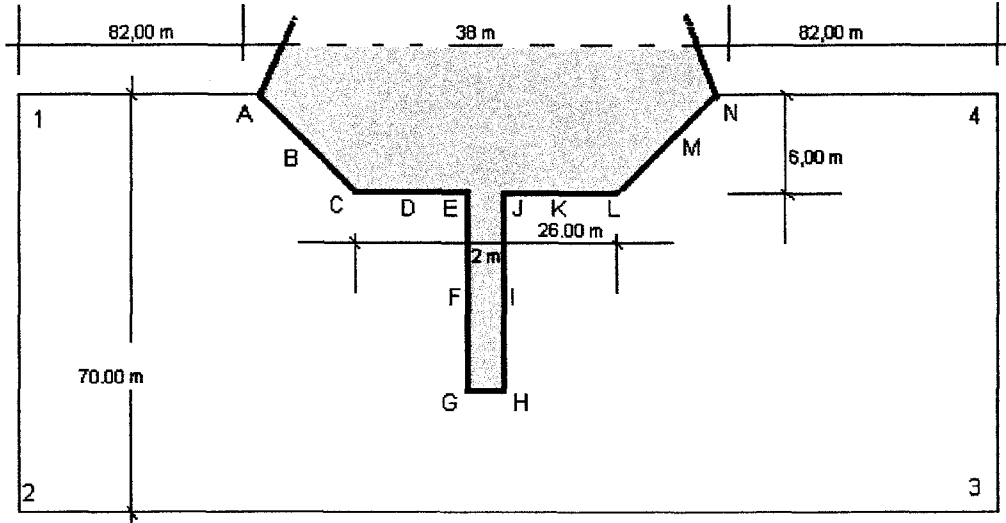
Çekirdek hendeğinin taban genişliği = 26 m

Çekirdek hendeğinin üst genişliği = 38 m

Geçirimli zeminin genişliği = $W = 230$ m

Çekirdek hendeğinin derinliği = 6 m

Enjeksiyon perde boyu = $d = 20$ m, 40 m, 50 m, 60 m



Şekil 8.1 Sazlıdere Barajı'nda sonlu farklar metodu uygulama kesiti

Barajın sızma analizine esas su yükü değeri olan maksimum su seviyesi (25.60 m) ile sızmanın gerçekleştiği zemin bölgesini oluşturan kireçtaşı tabakası seviyesi (-22.00 m) arası yükseklik 47.60 m'dir. Bu su yükü değeri talvegden vadi yamaçlarına doğru gidildikçe azalarak sızmaya olan etkisini kaybetmektedir. Ayrıca gövdenin üzerine oturduğu vadinin genişliği yaklaşık 432 m'dir, ancak Bölüm 7.3'te belirtildiği gibi, gövde sadece talveg bölgesinde kireçtaşına oturmaktadır ki inşaat sonrası mansapta beliren kaçak su kaynakları da bu kısımlardan belirmiştir. Baraj gövdesi sağ ve sol sahillerde kıltaşı-marn tabakalarına oturmaktadır. Bu nedenle baraj yeri genel jeoloji planının incelenmesi neticesinde sızmanın gerçekleşebileceği tabakanın genişliği 230 m olarak belirlenmiştir. Enjeksiyon perde boyunun 20 m yapılması durumu için hesaplanan potansiyel ve akım fonksiyonu değerleri (birim değerler) sırasıyla Tablo 8.1 ve Tablo 8.2' de, potansiyel ve akım çizgileri grafikleri de sırasıyla Şekil 8.2 ve 8.3'de verilmiştir. Ayrıca enjeksiyon perde boylarının 40 m, 50 m, 60 m yapılması ve hiç yapılmaması durumları için hesaplanan potansiyel ve akım fonksiyonu değerleri EK-A bölümünde Tablo A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6, A.7 ve A.8'de; aynı boylar için çizilen potansiyel ve akım çizgileri grafikleri de EK-B bölümünde Şekil B.1, B.2, B.3 B.4, B.5 B.6 B.7 ve B.8' de verilmiştir. Potansiyel ve akım fonksiyonu tabloları sayfaya sığdırılabilmeleri için, hücre numaraları belirtilmek suretiyle küçültülerek verilmiştir.

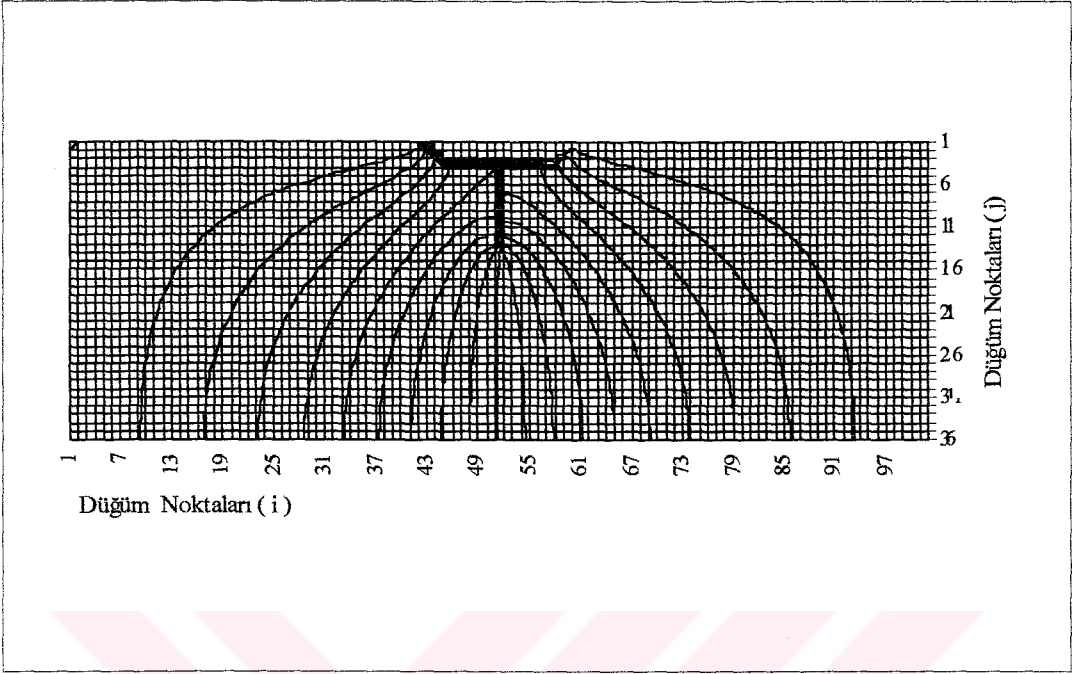
Tablo 8.1 Enjeksiyon boyunun 20 m olması durumunda potansiyel fonksiyonu değerleri

			82 m										38 m										82 m									
d(m)	i	j	1	2	3	40	41	42	43	44	45	46	47	50	51	52	53	54	57	58	59	60	61	62	63	100	101	102				
			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.84	0.82	0.79	0.76	0.75	0.75	0.23	0.23	0.21	0.19	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.84	0.82	0.81	0.79	0.75	0.75	0.24	0.23	0.21	0.19	0.17	0.15	0.14	0.12	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
2			1.00	1.00	0.97	0.97	0.96	0.94	0.89	0.85	0.82	0.81	0.79	0.75	0.75	0.75	0.24	0.24	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
4			1.00	1.00	0.95	0.94	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82	0.81	0.78	0.75	0.75	0.74	0.24	0.24	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
6			1.00	1.00	0.92	0.91	0.90	0.88	0.86	0.84	0.82	0.81	0.79	0.76	0.75	0.75	0.23	0.23	0.21	0.19	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
8			1.00	1.00	0.90	0.89	0.88	0.86	0.84	0.82	0.81	0.79	0.77	0.74	0.75	0.75	0.24	0.24	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
10			1.00	1.00	0.89	0.87	0.86	0.85	0.83	0.82	0.81	0.79	0.77	0.74	0.75	0.74	0.24	0.24	0.22	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
12			1.00	1.00	0.87	0.86	0.84	0.83	0.82	0.81	0.79	0.77	0.75	0.74	0.74	0.69	0.25	0.25	0.22	0.21	0.20	0.18	0.17	0.16	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
18			1.00	1.00	0.83	0.81	0.80	0.79	0.77	0.76	0.75	0.73	0.70	0.70	0.69	0.61	0.29	0.29	0.26	0.25	0.24	0.23	0.21	0.20	0.19	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
24			1.00	1.00	0.79	0.78	0.76	0.75	0.73	0.72	0.71	0.69	0.67	0.64	0.62	0.54	0.38	0.37	0.32	0.30	0.28	0.27	0.25	0.24	0.23	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00		
26			1.00	1.00	0.78	0.77	0.75	0.74	0.72	0.71	0.69	0.67	0.65	0.61	0.58	0.54	0.44	0.40	0.33	0.32	0.30	0.28	0.27	0.25	0.24	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00		
15			1.00	1.00	0.77	0.75	0.74	0.73	0.71	0.69	0.68	0.66	0.64	0.59	0.56	0.52	0.47	0.43	0.35	0.33	0.31	0.29	0.28	0.26	0.25	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00		
16			1.00	1.00	0.76	0.74	0.73	0.72	0.70	0.68	0.67	0.65	0.63	0.58	0.55	0.51	0.47	0.44	0.36	0.34	0.32	0.31	0.29	0.27	0.26	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00		
30			1.00	0.99	0.68	0.67	0.65	0.64	0.62	0.61	0.60	0.58	0.53	0.53	0.52	0.50	0.49	0.47	0.43	0.41	0.40	0.38	0.37	0.35	0.34	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00		
66			1.00	0.99	0.68	0.67	0.65	0.64	0.62	0.61	0.60	0.58	0.53	0.53	0.52	0.50	0.49	0.47	0.43	0.41	0.40	0.38	0.37	0.35	0.34	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00		
68			1.00	0.99	0.68	0.67	0.65	0.64	0.62	0.61	0.60	0.58	0.53	0.53	0.52	0.50	0.49	0.47	0.43	0.41	0.40	0.38	0.37	0.35	0.34	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00		
70			1.00	0.99	0.68	0.67	0.65	0.64	0.62	0.61	0.60	0.58	0.53	0.53	0.52	0.50	0.49	0.47	0.43	0.41	0.40	0.38	0.37	0.35	0.34	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00		

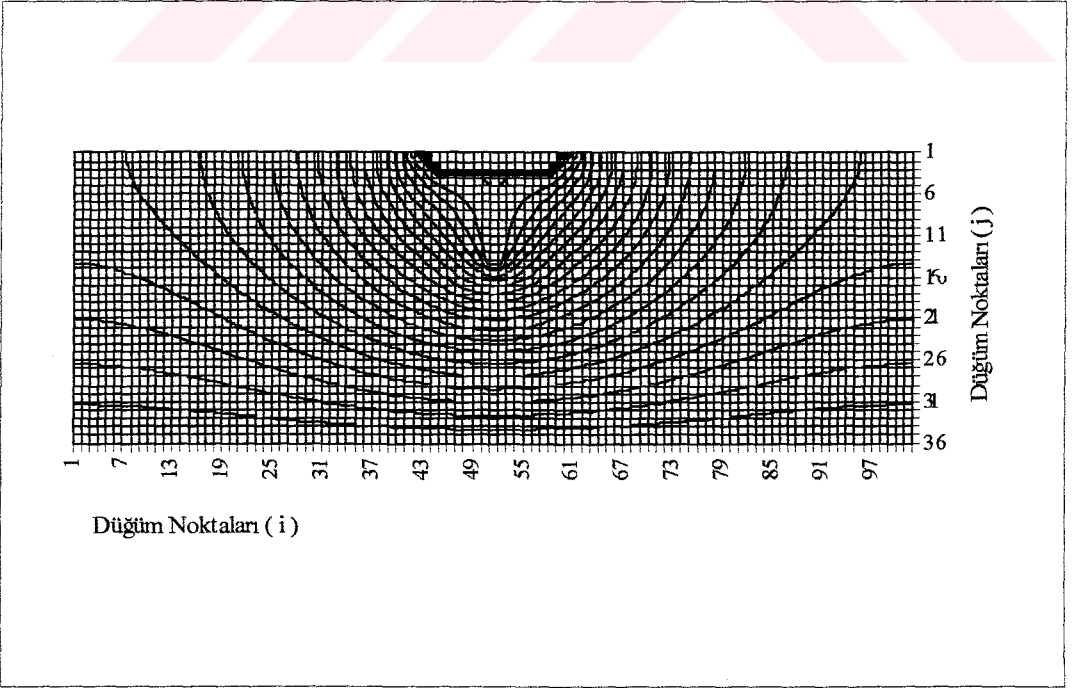
Tablo 8.2 Enjeksiyon boyunun 20 m olması durumunda akım fonksiyonu değerleri

		38.00										82 m										82 m									
Z(m)	i	1	2	3	40	41	42	43	44	45	46	47	50	51	52	53	54	57	58	59	60	61	62	63	100	101	102	102	102	102	102
		0.00	0.24	0.24	0.24	0.76	0.81	0.87	1.00	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	1.00	0.94	0.87	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
j	2	2.00	0.24	0.24	0.24	0.76	0.81	0.87	0.94	1.00	0.96	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	0.97	0.96	0.95	0.92	0.89	0.85	0.81	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
		4.00	0.24	0.24	0.24	0.76	0.80	0.85	0.91	0.96	1.00	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	0.95	0.93	0.91	0.89	0.86	0.82	0.79	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
4	4	6.00	0.24	0.24	0.24	0.75	0.79	0.83	0.88	0.92	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	0.92	0.88	0.83	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
		8.00	0.24	0.24	0.24	0.73	0.77	0.81	0.85	0.89	0.92	0.95	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	0.97	0.96	0.95	0.92	0.89	0.85	0.81	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
6	6	10.00	0.24	0.24	0.24	0.72	0.75	0.79	0.82	0.86	0.89	0.91	0.98	0.99	1.00	1.00	0.99	0.95	0.93	0.91	0.89	0.86	0.82	0.79	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
		12.00	0.23	0.23	0.23	0.70	0.73	0.76	0.80	0.83	0.86	0.88	0.91	0.96	0.98	1.00	0.98	0.93	0.91	0.88	0.86	0.83	0.80	0.76	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
8	8	18.00	0.22	0.22	0.22	0.64	0.67	0.70	0.72	0.75	0.78	0.81	0.84	0.93	0.96	1.00	0.96	0.87	0.84	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
		24.00	0.21	0.21	0.21	0.58	0.60	0.63	0.65	0.68	0.70	0.73	0.76	0.87	0.93	1.00	0.93	0.79	0.76	0.73	0.70	0.68	0.65	0.63	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
14	14	26.00	0.20	0.20	0.20	0.56	0.58	0.60	0.62	0.65	0.67	0.70	0.73	0.84	0.90	1.00	0.90	0.76	0.73	0.70	0.67	0.65	0.62	0.60	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
		28.00	0.20	0.20	0.20	0.53	0.55	0.58	0.60	0.62	0.64	0.67	0.69	0.79	0.83	0.87	0.87	0.72	0.69	0.67	0.64	0.62	0.60	0.58	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
16	16	30.00	0.19	0.19	0.19	0.51	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.63	0.66	0.74	0.76	0.78	0.76	0.68	0.66	0.63	0.61	0.59	0.57	0.55	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
		36.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
36	36	70.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Şekil 8.2 Sazlıdere Barajı enjeksiyon perdesinin 20 m olması durumunda potansiyel çizgileri



Şekil 8.3 Sazlıdere Barajı enjeksiyon perdesinin 20 m olması durumunda akım çizgileri



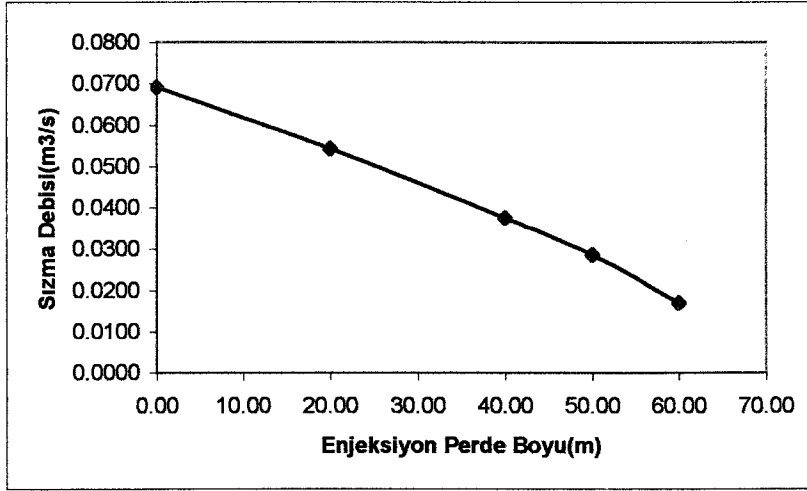
Enjeksiyon perdesi yapılmaması ve enjeksiyon perde boyunun 20 m, 40 m, 50 m ve 60 m yapılması seçenekleri için, uygulama kesitinde H noktasının altında kalan akımı dik kesen kesitte yer alan her bir düğüm noktasındaki hız ve sızma debileri hesaplanarak Tablo 8.3’de gösterilmiştir. Tabloda yer alan tüm değerler etkili su yükü olan $H' = 47.60$ m değeri ile çarpılarak birim değerden gerçek büyüklüğe dönüştürülmüş olup, her kesitteki toplam sızma debi değerleri de aynı tabloda gösterilmiştir.



Tablo 8.3 Sazlıdere Barajı'nda çeşitli enjeksiyon perde boyları için gövde altı akım kanallarında ve toplam sızma hız ve debi değerleri

Der. (m)	Enj.perdesi yok									
	$v_x(m/s)$	$Q(m^3/s)$								
6.00	7.32E-06	1.68E-03	$k=1*10^{-5}m/s$ $L=230\ m$ $v_x=\delta\phi/\delta x$ $q=v_x\delta y$ $Q=qL$							
8.00	7.27E-06	3.34E-03								
10.00	7.13E-06	3.28E-03								
12.00	6.92E-06	3.18E-03								
14.00	6.67E-06	3.07E-03								
16.00	6.41E-06	2.95E-03								
18.00	6.14E-06	2.82E-03								
20.00	5.87E-06	2.70E-03								
22.00	5.62E-06	2.59E-03								
24.00	5.39E-06	2.48E-03								
26.00	5.17E-06	2.38E-03	1.67E-05	0.0038	Enj.per.boyu 20 m					
28.00	4.97E-06	2.29E-03	1.13E-05	0.0052						
30.00	4.79E-06	2.20E-03	8.81E-06	0.0041						
32.00	4.63E-06	2.13E-03	7.42E-06	0.0034						
34.00	4.47E-06	2.06E-03	6.55E-06	0.0030						
36.00	4.34E-06	2.00E-03	5.95E-06	0.0027						
38.00	4.21E-06	1.94E-03	5.50E-06	0.0025						
40.00	4.10E-06	1.89E-03	5.16E-06	0.0024						
42.00	4.00E-06	1.84E-03	4.89E-06	0.0022	Enj.per.b. 40 m					
44.00	3.91E-06	1.80E-03	4.66E-06	0.0021						
46.00	3.83E-06	1.76E-03	4.48E-06	0.0021						
48.00	3.76E-06	1.73E-03	4.33E-06	0.0020						
50.00	3.70E-06	1.70E-03	4.20E-06	0.0019						
52.00	3.64E-06	1.67E-03	4.09E-06	0.0019						
54.00	3.59E-06	1.65E-03	4.00E-06	0.0018						
56.00	3.55E-06	1.63E-03	3.92E-06	0.0018						
58.00	3.51E-06	1.62E-03	3.86E-06	0.0018						
60.00	3.48E-06	1.60E-03	3.81E-06	0.0018						
62.00	3.46E-06	1.59E-03	3.76E-06	0.0017	Enj.per.b. 50 m					
64.00	3.44E-06	1.58E-03	3.73E-06	0.0017						
66.00	3.42E-06	1.58E-03	3.71E-06	0.0017						
68.00	3.42E-06	1.57E-03	3.70E-06	0.0017						
70.00	3.41E-06	7.85E-04	3.69E-06	0.0008						
62.00	3.46E-06	1.59E-03	3.76E-06	0.0017						
64.00	3.44E-06	1.58E-03	3.73E-06	0.0017						
66.00	3.42E-06	1.58E-03	3.71E-06	0.0017						
68.00	3.42E-06	1.57E-03	3.70E-06	0.0017						
70.00	3.41E-06	7.85E-04	3.69E-06	0.0008						
62.00	3.46E-06	1.59E-03	3.76E-06	0.0017	Enj.per.b. 60 m					
64.00	3.44E-06	1.58E-03	3.73E-06	0.0017						
66.00	3.42E-06	1.58E-03	3.71E-06	0.0017						
68.00	3.42E-06	1.57E-03	3.70E-06	0.0017						
70.00	3.41E-06	7.85E-04	3.69E-06	0.0008						
62.00	3.46E-06	1.59E-03	3.76E-06	0.0017						
64.00	3.44E-06	1.58E-03	3.73E-06	0.0017						
66.00	3.42E-06	1.58E-03	3.71E-06	0.0017						
68.00	3.42E-06	1.57E-03	3.70E-06	0.0017						
70.00	3.41E-06	7.85E-04	3.69E-06	0.0008						
Top.SızmaDebisi(Q) (m3/s)		0.0691		0.0543		0.0375		0.0287		0.0169

Sazlıdere Barajı'nda göz önüne alınan enjeksiyon perde boyu (d) alternatifleri ile kaçak debisi (Q) arasındaki ilişki Şekil 8.4' teki grafikte verilmiştir.



Şekil 8.4 Enjeksiyon perde boyu – Sızma debisi grafiği

8.3 Optimum Enjeksiyon Perde Boyunun Belirlenmesi

Sızma kontrol yapısının etkinliği, yük etkisi ve akım etkisi terimleri ile tanımlanabilmektedir (Novak et al., 1990), (Ağırlioğlu N, Aytek A., Üneş F., 1999).

Yük etkisi şöyle tanımlanabilir:

$$E_H = \frac{h'}{H'} \quad (8.1)$$

Burada h' enjeksiyon perdesinin neden olduğu yük kaybı ve H' toplam yük farkı veya işletme yüküdür.

Akım etkisi de şu şekilde tanımlanmaktadır:

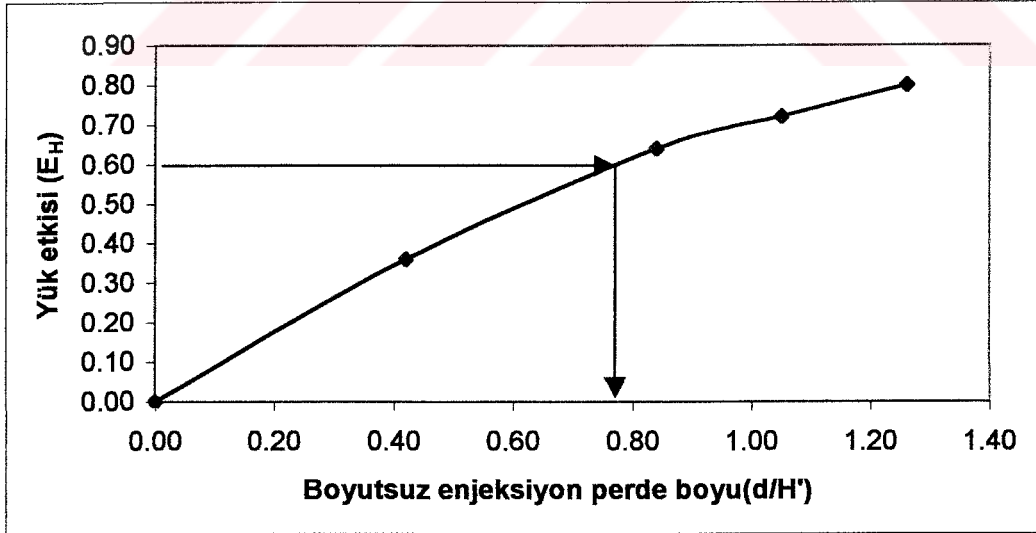
$$E_Q = 1 - \frac{Q}{Q_0} \quad (8.2)$$

Q ve Q₀ sırasıyla enjeksiyon perdeli ve perdesiz koşullardaki sızma debileridir. İyi inşa edilmiş bir kontrol yapısının etkisi her ikisi (E_H ve E_Q) için de % 50-60 kabul edilmektedir.

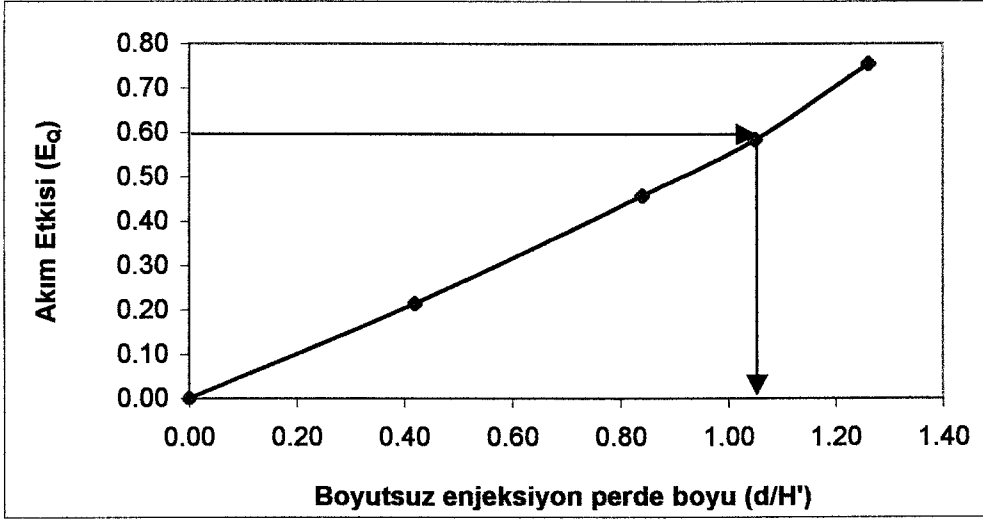
Enjeksiyon perdesi yapılmaması ve 20 m, 40 m, 50 m ve 60 m yapılması durumlarında Şekil 8.1’de verilen uygulama kesitindeki L noktasında hesaplanan yük (h) ve yük kaybı (h’) değerleri Tablo 8.4’de verilmiştir. $Q = q \cdot k \cdot W$ bağıntısından hesaplanan toplam sızma debileri ile yük ve akım etkisi değerleri de aynı tabloda gösterilmiştir. Optimum enjeksiyon perde boyunu elde etmek için boyutsuz enjeksiyon perde boyları ile yük etkisi (E_H) ve akım etkisi (E_Q) arasındaki bağıntıları gösteren grafikler çizilerek sırası ile Şekil 8.5 ve Şekil 8.6’da verilmiştir.

Tablo 8.4 Değişik boylardaki enjeksiyon perdesi seçenekleri için hesaplanan değerler

Enjeksiyon Perdesi Boyu(d)	m	0	20	40	50	60
L noktasındaki yük değeri, h	m	11,90	7,62	4,28	3,33	2,38
L noktasındaki yük kaybı, h'	m	0,00	4,28	7,62	8,57	9,52
Toplam sızma debisi, Q	m ³ /s	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02
Yük etkisi, E_H	-	0,00	0,36	0,64	0,72	0,80
Akım etkisi, E_Q	-	0,00	0,21	0,46	0,58	0,76
Boyutsuz perde boyu (d/H')	-	0,00	0,42	0,84	1,05	1,26



Şekil 8.5 Çeşitli boyutsuz enjeksiyon perde boyları için yük etkisi grafiği



Şekil 8.6 Çeşitli boyutsuz enjeksiyon perde boyları için akım etkisi grafiği

Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'daki grafiklerin incelenmesi neticesinde, emniyetli sızma kontrolü için d/H' değeri yaklaşık olarak 1.10 seçilebilmektedir. Bu durumda enjeksiyon perde boyu değeri $1.10 * 47.60 = 52.36 \text{ m} \sim 55 \text{ m}$ seçilebilmektedir. Sazlıdere Barajı'nda enjeksiyon perde boyu, kireçtaşının karstik özellikleri nedeniyle geçirimsiz zemine kadar ve 5 m saplamalı olarak, ortalama 69 m boyunda yapılmıştır.

8.4 Sazlıdere Barajı Verileri

Sazlıdere Barajı'nda mansap bölgesinde kaçak problemlerinin başlamasının ardından çeşitli büyüklüklerde ölçülen debi değerleri, Şubat 1998 tarihinde rezervuar su kotu 18.60 m' ye ulaştığında $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ değerine kadar ulaşmıştır.

Sazlıdere Barajı'ndaki çeşitli rezervuar su seviyelerinde ölçülen kaçak su debileri Tablo 8.5'te verilmiştir. Tabloda yer alan ilk değer iyileştirme çalışmaları öncesinde, diğer değerler gövde altı sızmaları iyileştirme çalışmalarının devam ettiği dönemlerde yapılan ölçümlere aittir.

Tablo 8.5 Sazlıdere Barajı'nda çeşitli rezervuar su seviyelerinde ölçülen kaçak su debileri

Tarih	Rezervuar Su Seviyesi (m)	Kaçak Debisi (l/s)
02.1998	18.60	1500
01.09.98	16.89	1320
14.09.98	16.11	1200
12.12.98	17.22	650
16.12.98	17.82	630
04.01.99	19.38	650
25.05.99	17.98	600
01.06.99	17.82	560
02.06.99	17.77	620
03.08.99	16.10	590
15.09.99	14.90	350
30.09.99	14.39	333
07.10.99	14.17	290
11.10.99	14.10	250
16.10.99	13.95	180
02.11.99	13.68	5

Teorik olarak gövde geçirimsiz çekirdeği ile geçirimsiz zemin arasındaki irtibatın sağlandığı (tam saplama durumu) enjeksiyon perdesi, ya da sızdırmazlık hendekleri gibi uygulamalarda sızdırmazlığın tam olarak sağlandığı varsayılmaktadır. Uygulamalarda bu durum tam olarak mümkün olmasa da, sızma debileri ihmal edilebilecek boyutta minimum değerlere inebilmektedir. Sazlıdere Barajı'nda kireçtaşı tabakasında sızdırmazlık sağlamak üzere yapılan enjeksiyon perdesinin kaçakları önlemekte yetersiz kalmasının olası nedenleri şöyle sıralanabilir:

- Kireçtaşının karstik özellikler taşıması ve bu nedenle tabakalar ve çatlaklar arasında gelişmiş olan erime boşluklarının olması. Bu tür zeminlerde enjeksiyon işlemlerinin istenen seviyelerde gerçekleşmesi genellikle güç olmakta, bazı çatlakların veya boşlukların tespit edilememesi nedeniyle inşaat sonrası problemlerle sıkça karşılaşılabilmekte ve başka alternatif yok ise baraj temeli olarak tercih edilmektedirler.

- Enjeksiyon perdesi yapımı sırasında gerçekleşmiş olabilecek bazı sorunlar: Çatlak sistemlerindeki yalancı refüleri(enjeksiyonu geçici olarak almaması), ani tıkanmalar, enjeksiyon öncesi yıkamadaki bazı aksamalar, personel hataları vb.

8.5 Yapılan Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sonlu farklar metodu kullanılarak yapılan analizde geçirimli kireçtaşı tabakasının $k=1*10^{-5}$ m/s olması durumu ve geçirimli tabakanın çeşitli derinliklerine kadar inen çeşitli enjeksiyon perde boyu seçenekleri için potansiyel ve akım fonksiyonları elde edilmiş, hız ve debi değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan debi değerleri 69 l/s (enjeksiyon perdesi yapılmaması durumu) ile 17 l/s (enjeksiyon perdesinin 60 m yapılması durumu) arasında değişmektedir. Sazlıdere Barajı'nda ise tam sızdırmazlık perdesi uygulanmış olmakla beraber, iyileştirme öncesi gövde altı su kaçaqları için 1500 l/s değerine kadar ulaşan debiler de ölçülmüş, yani, kaçak debisi hiç enjeksiyon yapılmaması durumu için hesaplanan sızma miktarının da üzerine ulaşmıştır. Bu durum Bölüm 8.4'te izah edildiği gibi, Barajın temelinde yer alan kireçtaşındaki karstik oluşumlar ve enjeksiyon perdesinin yapımındaki bazı sorunlardan kaynaklanmaktadır. Karst kelimesi yağmur ve kar suları etkisiyle kolay eriyebilen taşların oluşturduğu şekiller anlamına gelmektedir ve özellikle kireçtaşı ve kalkerli zeminlerde görülmektedir (Acar A., 1975). Bu tür temellerde inşa edilen barajlarda, tespit edilememiş veya kapatılamamış çatlak veya boşluklar nedeniyle beklenen değerlerin çok üzerinde kaçaqlarla karşılaşılabilen, çalışma konusu olan Sazlıdere Barajı'nda olduğu gibi tam sızdırmazlık sağlaması planlanan enjeksiyon perdeleri de uygulamadaki sorunlar nedeniyle sızmayı önlemede yetersiz kalabilmektedir. Bu tür zeminlerde inşaat öncesi sızma yollarının çeşitli akım izleme teknikleri (boya, izotop vb.) ile tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde Keban Barajı(Elazığ), Armağan Barajı (Kırklareli), Karacaören II Barajı(Antalya), Alakır Barajı(Antalya), Berke Barajı (Adana) karstik özellikler taşıyan kireçtaşı temeller üzerine inşa edilmiş barajlardan bazılarıdır. Bu barajların bir kısmında inşaat esnasında ya da sonrasında mağara büyüklüğünde boşluklar tespit edilmiş (Keban Barajı) ve önemli iyileştirme programları gerekli olmuştur (Akarun R., 1999). Berke Barajı'nda sızma kontrolü için inşa edilen enjeksiyon perdesi 533000 m² 'lik yüzey alanı ile dünyanın en büyük enjeksiyon perdelerinden biridir(Başar M., Altuğ S., Vauloup L.,1999).

Tez çalışmamızda kullanılan analizin bu tür zeminler için sızmaları önceden belirleyici olamayacağı görülmektedir. Ancak diğer zeminlerde kullanılmasında ve kabul edilebilir sızma miktarlarının saptanması suretiyle optimum kontrol önlemlerinin belirlenmesinde büyük yarar vardır. Geçirimsiz zemin tabakasının çok

derinde olması durumunda tam sızdırmazlık metotlarının uygulanması, çok uzun memba geçirimsiz örtülerinin yapılması gibi kontrol önlemlerinin gerekli olup olmadığına ancak bu tür analizler yapılarak karar verilebilir ve pek çok problem için boyutlar ve dolayısıyla maliyetler büyük oranda azaltılabilir. Sazlıdere Barajı örneğinde baraj temelının problemlili yapısı göz önüne alınarak tam sızdırmazlık enjeksiyon perdesi uygulanmıştır. Ancak bu tür problemleri olmayan temeller üzerinde inşa edilen barajlarda projenin özelliklerine göre kabul edilebilir bir sızma debisini sağlayan kontrol metodu, sonlu farklar metodu ya da diğer analiz metotları vasıtasıyla belirlenerek daha ekonomik çözümler uygulanabilir.



9.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sızmalar ya da su kaçakları bir problem olarak ortaya çıktığında giderilmesi büyük maliyet ve zaman almakta, depolanan suyun kaybına neden olmakta, mansapta bulunan arazi ya da tesislere zarar verebilmekte, hatta barajın emniyetini tehdit eden durumlarda barajın terk edilmesine sebep olabilmektedir. Barajlarda planlama ve proje aşamalarında detaylı jeolojik ve jeofizik etütlerin yapılması suretiyle sızma miktarlarının ve yerlerinin doğru analiz edilmesi, problem ortaya çıkmadan gerekli önlemlerin alınabilmesini sağlayabilmek açısından büyük önem taşımaktadır. Barajlarda uygulanacak sızma kontrol metotlarının ekonomik olarak yapılabilir olması da önemli bir husustur. Sızmaları tamamen ortadan kaldırmaya yönelik çok büyük boyutlarda kontrol metotlarının uygulanması, özel durumları olan veya büyük önem arz eden bazı projeler dışında, pek çok baraj için gereksiz olabilmektedir. Uygulamalarda önemli olan tüm zemin etütlerinin detaylı bir şekilde yapılması suretiyle problemin doğru saptanması; zemine, barajın tipine, ve ekonomik olarak elde edilebilir malzemelere göre uygun bir kontrol metoduna ve seçilen metotta uygulanacak optimum boyutlara karar verilmesi; daha sonra da çalışmasının sürekli takip edilmesidir. Optimum ölçüler, uygun bir ya da birkaç metotla yapılacak analizler vasıtasıyla belirlenebilmektedir. İnşaat aşamasında uygulanacak optimum sızma kontrol tesislerinin maliyeti, kaçaklar ortaya çıktıktan sonra iyileştirme programları için harcanmak durumunda kalınan maliyetlerin çok altındadır.

Tez çalışmamızda barajlarda gövde altı sızmaları için uygulanan kontrol, iyileştirme ve analiz esasları araştırılmış, konu ile ilgili önceki araştırmalar incelenmiş ve matematik bir analiz metodu olan “sonlu farklar metodu” kullanılarak “Büyük İstanbul İçmesuyu Projesi” kapsamında inşaatı 1995 yılında tamamlanmış olan, ancak daha sonra özellikle gövde altından su kaçağı problemleri ile karşılaşılın Sazlıdere Barajı için farklı enjeksiyon perde boyu alternatiflerindeki gövde altı sızma miktarları ve optimum perde boyu hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar mevcut sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Sazlıdere Barajı sızma durumu şöyle özetlenebilir:

1. 1995 yılında inşa edilen Sazlıdere Barajı'nın gövdesi, temeli oluşturan zemindeki derin alüvyonun (21 m) kaldırılması suretiyle ortalama 70 m kalınlığındaki kireçtaşı tabakası üzerine oturtulmuştur.
2. Şubat 1998 tarihinde rezervuar su kotu 18.60 metreye ulaştığında, gövde altından 1500 l/s büyüklüğünde su kaçağı tespit edilmiştir.
3. Enjeksiyon perdesine kret üzerinden yapılan iyileştirme enjeksiyonları ile 12 aylık bir çalışmanın sonucunda gövde altı su kaçaqları kabul edilebilir bir değere (4-5 l/s) indirilmiştir. Zeminin karstik oluşuna bağlı olarak önceden tespit edilemeyen bazı akım yolları ve enjeksiyonlarla ilgili bazı sorunlar nedeni ile normal değerlerin çok üzerinde kaçaqların gerçekleştiği düşünülmektedir.

Sazlıdere Barajı sızma analizinde uygulanan sonlu farklar metodu ile bulunan sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1. Sazlıdere Barajı gövde altı sızmaları için sonlu farklar metodu kullanılarak potansiyel ve akım fonksiyonları elde edilmiş ve sızma debileri hesaplanmıştır. Sonlu farklar metodu, enjeksiyon perdesinin uygulandığı barajlarda gövde altı sızma akımlarının gerçekleştiği bölgedeki potansiyel ve akım fonksiyonlarının belirlenmesinde kolaylıkla uygulanabilmektedir.
2. Enjeksiyon perdesi için uygulanabilecek optimum boy, yük etkisi ve akım etkisi değerlerine bağlı olarak hesaplanmıştır.
3. Metodun uygulanması neticesinde Sazlıdere Barajı gövde altında sızdırmazlığın sağlanması için yaklaşık 55 m boyunda yapılacak enjeksiyon perdesinin yeterli olabileceği görülmüştür. Barajda uygulanan enjeksiyon perdesi tam sızdırmazlık şeklindedir (saplama derinliği olan 5 m ile beraber yaklaşık 70 m boyunda).

Sazlıdere Barajı'nın üzerine inşa edildiği zeminin karstik kireçtaşı özelliği taşıdığı göz önüne alındığında uygulamanın doğru olduğu düşünülmektedir. Nitekim barajdaki su kaçaqları enjeksiyon perdesi yapılmaması durumu için bulunan değerlerin çok üzerinde gerçekleşmiştir.

“Sonlu farklar metodu” nun bu tür problemleri olmayan homojen zemin tabakalarına sahip baraj temellerinde uygulanması, optimum sızma kontrol metodunun belirlenmesinde yararlı olacaktır. Özellikle geçirimsiz tabakanın çok derinde olması

nedeniyle tam sızdırmazlık sağlamaya yönelik önlemlerin ekonomik olmadığı koşullarda yapılacak analizlerle, geçirimsiz memba örtüsü, geçirimsiz saplamalar vb. metotlar için çeşitli büyüklüklerde alternatifler değerlendirilmeli ve optimum çözümlerin bulunması sağlanmalıdır. Barajlarda inşaat ya da iyileştirme sonrası sızmaların sürekli izlenmesi, olası kaçakların ve yerlerinin zamanında tespit edilmesi, ve gerekli iyileştirmelerin en kısa zamanda yapılması da emniyet ve ekonomi bakımından büyük önem taşımaktadır.



KAYNAKLAR

Acar, A., 1975. Jeoloji, Cilt 2, *Sevinç Matbaası, Ankara*.

Ağralıoğlu N, Aytek A., Üneş F., 1999. Determination of seepage under a dam with a long upstream blanket, *Dam foundations, problems and solutions, 67th Annual Meeting of International Commission on Large Dams (ICOLD), September 1999, Antalya, Türkiye*.

Akarun R., 1999. Keban Barajı ve HES, Yapı Teknik Publication No.1.

Altan E., 1986. Seddelerin Projelendirilmesi ve İnşaatı, *Devlet Su İşleri Matbaası, Ankara*.

Başar M., Altuğ S., Vauloup L. *Dam foundations, problems and solutions, 67th Annual Meeting of International Commission on Large Dams (ICOLD), September 1999, Antalya, Türkiye*.

Bardet, J.P., 1997. Experimental Soil Mechanics, *Prentice Hall*.

Çalışkan, H., 1995. Gölet ve sulama inşaatları ihale, tatbikat ve kesin hesap notları, *DSİ IV. Bölge Müdürlüğü, Konya*.

Dönmezer, H., 1974. Teorik ve Pratik Zemin Mekaniği, Cilt 1, *Kutulmuş Matbaası, İstanbul*.

Encardio-Rite Application Note, 2001. Seepage Measurement in an Open Channel Through A Weir, *AN-9608*.

Engineering Manual, 1986. Engineering and Design Seepage Analysis and Control For Dams, EM No.1110-2-1901, *U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington D.C.*

Erkek C., Ağralıoğlu N., 1993. Su Kaynakları Mühendisliği, *Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş., İstanbul*.

Gan J.K, Mc Donald L.A.,1999. Mardı Dam- A Case Study on Permeable Structures, *Dam foundations, problems and solutions, 67th Annual Meeting of International Commission on Large Dams (ICOLD), September 1999, Antalya, Türkiye*.

Görücü K., 2000. Sazlıdere Barajı İyileştirme Enjeksiyonları Sonuç Raporu, *DSİ XIV. Bölge Müdürlüğü, İstanbul*.

Kalkani, E.C., 1997. Geological Conditions, seepage grouting, and evaluation of piezometer measurements in the abutments of an earth dam, *Engineering Geology*, 46(1997), 93-104

Koutitas, C.G., 1983. Elements of Computational Hydraulics, *Pentech Press*.

Novak P., Motfat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan, R., Hydraulic Structures, *Unwin Hyman*, 1990.

Proje Raporu, 1990. Sazlıdere Barajı ve Tesisleri Uygulama Projesi, Cilt 1. (İSKİ-SUIŞ Proje Müh. ve Müş. Ltd. Şti., İstanbul .

Sakamoto T., 1999. A method of analyzing measured seepage through rockfill dam and its foundation, *Dam foundations, problems and solutions*, 67th Annual Meeting of International Commission on Large Dams (ICOLD), September 1999, Antalya, Türkiye.

Sungur, T. 1989. Su Yapıları, Cilt 1, Baraj ve Göletler (Su biriktirme yapıları, teknik rehber), *DSİ Basım ve Foto-Film İşletme Müdürlüğü Matbaası, Ankara*.

Sümer B.M., Ünsal İ., Bayazıt M., 1983. Hidrolik, *Birsen Yayınevi, İstanbul*.

Türkmen S., 2002. Treatment of the seepage problems at the Kalecik Dam (Turkey), *Engineering Geology*, 68(2003), 159-169.

Ulugür, E. M., 1972. Su Mühendisliği, *Çağlayan Kitabevi, İstanbul* .

EKLER

EK-A

ÇEŞİTLİ ENJEKSİYON BOYLARI İÇİN AKIM VE POTANSİYEL FONKSİYONLARI DEĞERLERİ

EK-B

ÇEŞİTLİ ENJEKSİYON BOYLARI İÇİN AKIM VE POTANSİYEL ÇİZGİLERİ

Tablo A.1 Enjeksiyon boyunun 40 m olması durumunda potansiyel fonksiyonu değerleri

		38.00										82 m										82 m									
d(m)	i	1	2	3	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	100	101	102
		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
0		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
2		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
4		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
6		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
8		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
10		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
30		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
42		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
44		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
46		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
48		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
66		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
68		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
70		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.91	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86

Tablo A.2 Enjeksiyon boyunun 40 m olması durumunda akım fonksiyonu değerleri

		38 m										82 m																				
d(m)	i	2	3	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	100	101	102		
0	1	0.27	0.27	0.80	0.84	0.89	1.00	0.93	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.28	0.28	0.27	0.27		
2	2	0.27	0.27	0.80	0.84	0.89	0.95	1.00																	1.00	0.95	0.89	0.28	0.28	0.27	0.27	
4	j	0.27	0.27	0.79	0.83	0.88	0.92	0.96	1.00																1.00	0.96	0.88	0.28	0.27	0.27	0.27	
6	4	0.27	0.27	0.78	0.82	0.86	0.90	0.93	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	0.90	0.86	0.27	0.27	0.27	0.27	
8	5	0.27	0.27	0.77	0.81	0.84	0.88	0.91	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.91	0.88	0.84	0.27	0.27	0.27	0.27
10	6	0.27	0.27	0.76	0.79	0.82	0.86	0.88	0.91	0.93	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.93	0.91	0.88	0.86	0.82	0.27	0.27	0.27	0.27
30	7	0.22	0.22	0.61	0.64	0.67	0.69	0.72	0.75	0.79	0.82	0.85	0.89	0.92	0.96	1.00	1.00	1.00	0.96	0.92	0.89	0.85	0.82	0.79	0.75	0.72	0.69	0.67	0.22	0.22	0.22	0.22
42	17	0.16	0.16	0.48	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.65	0.70	0.74	0.79	0.85	0.92	1.00	1.00	1.00	0.92	0.85	0.79	0.74	0.70	0.65	0.62	0.59	0.56	0.53	0.16	0.16	0.16	0.16
44	23	0.15	0.15	0.45	0.48	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62	0.66	0.71	0.76	0.82	0.90	1.00	1.00	1.00	0.90	0.82	0.76	0.71	0.66	0.62	0.59	0.56	0.53	0.50	0.15	0.15	0.15	0.15
46	24	0.14	0.14	0.42	0.45	0.47	0.49	0.52	0.55	0.58	0.62	0.66	0.71	0.77	0.86	1.00	1.00	1.00	0.86	0.77	0.71	0.66	0.62	0.58	0.55	0.52	0.49	0.47	0.14	0.14	0.14	0.14
48	25	0.13	0.13	0.39	0.41	0.44	0.46	0.48	0.51	0.54	0.58	0.61	0.66	0.71	0.76	0.82	0.82	0.76	0.71	0.66	0.61	0.58	0.54	0.51	0.48	0.46	0.44	0.44	0.13	0.13	0.13	0.13
66	26	0.03	0.03	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.03	0.03	0.03	0.03
68	35	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	
70	36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tablo A.3 Enjeksiyon boyunu 50 m olması durumunda potansiyel fonksiyon değerleri

		82 m										38 m										82 m									
d(m)		1	2	3	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	100	101	102
0		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	0.95	0.93	0.92	0.91	0.90	0.90	0.90	0.89	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
2		1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95									0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4		1.00	1.00	1.00	0.98	0.97	0.97	0.96	0.95	0.93								0.05	0.04	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6		1.00	1.00	1.00	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
8		1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.92	0.92	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00
10		1.00	1.00	1.00	0.95	0.94	0.94	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89	0.89	0.89	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00
48		1.00	1.00	1.00	0.80	0.79	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.71	0.71	0.29	0.29	0.28	0.27	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.21	0.01	0.01	0.00
50		1.00	1.00	1.00	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.73	0.72	0.71	0.70	0.69	0.69	0.68	0.31	0.31	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.22	0.01	0.01	0.00
52		1.00	1.00	1.00	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.73	0.72	0.71	0.70	0.68	0.67	0.66	0.65	0.34	0.34	0.32	0.31	0.30	0.29	0.27	0.26	0.25	0.24	0.23	0.01	0.01	0.00
54		1.00	1.00	1.00	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.72	0.71	0.69	0.68	0.66	0.65	0.63	0.61	0.38	0.37	0.35	0.33	0.32	0.30	0.29	0.27	0.26	0.25	0.23	0.01	0.01	0.00
56		1.00	1.00	1.00	0.78	0.77	0.75	0.74	0.73	0.71	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.59	0.55	0.45	0.40	0.37	0.35	0.33	0.31	0.30	0.28	0.27	0.25	0.24	0.01	0.01	0.00
66		1.00	1.00	1.00	0.76	0.75	0.73	0.72	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.60	0.57	0.54	0.51	0.48	0.45	0.43	0.40	0.38	0.35	0.33	0.31	0.30	0.28	0.26	0.01	0.01	0.00
68		1.00	1.00	1.00	0.76	0.74	0.73	0.71	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.59	0.57	0.54	0.51	0.48	0.46	0.43	0.40	0.38	0.36	0.33	0.32	0.30	0.28	0.27	0.01	0.01	0.00
70		1.00	1.00	1.00	0.76	0.74	0.73	0.71	0.70	0.68	0.66	0.64	0.62	0.59	0.57	0.54	0.51	0.48	0.46	0.43	0.40	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.27	0.01	0.01	0.00

TabloA.5 Enjeksiyon boyunun 60 m olması durumunda potansiyel fonksiyonu değerleri

		82 m										38.00										82 m									
d(m)	i	1	2	3	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	100	101	102
		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	j	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
4		1.00	1.00	1.00	0.98	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
6		1.00	1.00	1.00	0.98	0.97	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
8		1.00	1.00	1.00	0.97	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
10		1.00	1.00	1.00	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
56		1.00	1.00	1.00	0.85	0.84	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.78	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
58		1.00	1.00	1.00	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
60		1.00	1.00	1.00	0.84	0.83	0.83	0.82	0.81	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.73	0.73	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
62		1.00	1.00	1.00	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.77	0.76	0.74	0.73	0.71	0.70	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
64		1.00	1.00	1.00	0.84	0.83	0.82	0.81	0.79	0.78	0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
66		1.00	1.00	1.00	0.84	0.83	0.81	0.80	0.79	0.78	0.76	0.74	0.72	0.69	0.66	0.62	0.57	0.43	0.37	0.33	0.30	0.28	0.26	0.24	0.22	0.21	0.19	0.18	0.01	0.00	0.00
68		1.00	1.00	1.00	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.77	0.75	0.73	0.71	0.68	0.65	0.60	0.54	0.46	0.39	0.35	0.31	0.29	0.26	0.24	0.22	0.21	0.20	0.18	0.01	0.00	0.00
70		1.00	1.00	1.00	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.77	0.75	0.73	0.71	0.68	0.64	0.59	0.53	0.46	0.40	0.35	0.32	0.29	0.26	0.24	0.23	0.21	0.20	0.18	0.01	0.01	0.00

Tablo A.6 Enjeksiyon boyunun 60 m olması durumunda akım fonksiyonu değerleri

		82 m										38.00										82 m															
$\alpha(m)$	i	j																																			
		1	2	3	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	100	101	102						
0	0.29	0.29	0.29	0.81	0.85	0.90	1.00	0.90	0.94	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	0.29	0.29	0.29						
2	0.29	0.29	0.29	0.81	0.85	0.90	0.96	1.00	0.94	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.96	0.90	0.29	0.29	0.29						
4	0.29	0.29	0.29	0.80	0.84	0.88	0.93	0.97	1.00	0.94	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	0.88	0.29	0.29	0.29						
6	0.29	0.29	0.29	0.80	0.83	0.87	0.90	0.94	0.97	1.00	0.94	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.87	0.29	0.29	0.29						
8	0.29	0.29	0.29	0.79	0.82	0.85	0.88	0.91	0.94	0.96	0.98	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	0.85	0.29	0.29	0.29						
10	0.28	0.28	0.28	0.78	0.81	0.84	0.87	0.89	0.92	0.94	0.95	0.97	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.84	0.29	0.28	0.28						
56	0.09	0.09	0.09	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.54	0.60	0.66	0.74	0.82	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.45	0.38	0.09	0.09	0.09						
58	0.08	0.08	0.08	0.29	0.31	0.34	0.37	0.40	0.45	0.49	0.55	0.62	0.70	0.79	0.89	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.40	0.34	0.08	0.08	0.08						
60	0.07	0.07	0.07	0.25	0.27	0.29	0.32	0.35	0.39	0.44	0.49	0.56	0.65	0.75	0.87	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.35	0.29	0.07	0.07	0.07						
62	0.05	0.05	0.05	0.20	0.22	0.24	0.26	0.29	0.33	0.37	0.42	0.49	0.58	0.69	0.83	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.29	0.24	0.05	0.05	0.05						
64	0.04	0.04	0.04	0.15	0.17	0.18	0.20	0.22	0.25	0.29	0.34	0.40	0.48	0.60	0.77	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.25	0.20	0.04	0.04	0.04						
66	0.03	0.03	0.03	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15	0.17	0.20	0.23	0.28	0.35	0.46	0.64	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.17	0.12	0.03	0.03	0.03						
68	0.01	0.01	0.01	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.15	0.19	0.24	0.33	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.08	0.06	0.01	0.01	0.01						
70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						

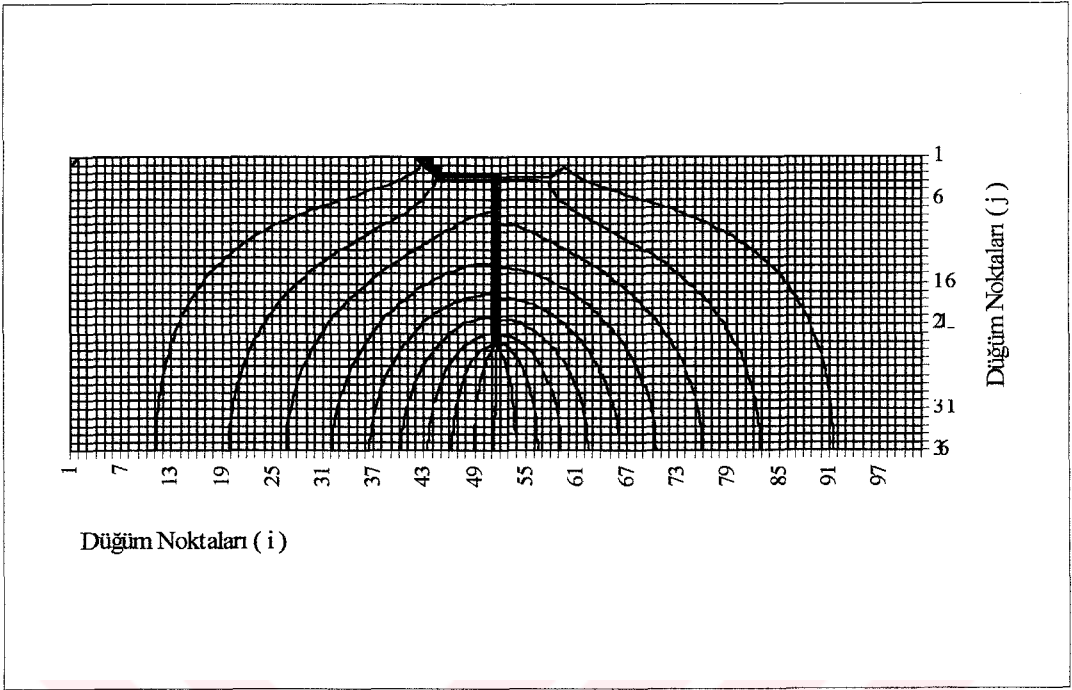
Tablo A.7 Enjeksiyon perdesi yapılınması durumunda potansiyel fonksiyonı değeri

		82 m										38.00										82 m									
d(m)	1	2	3	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	100	101	102	
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.75	0.71	0.67	0.63	0.60	0.56	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38	0.34	0.30	0.25	0.20	0.17	0.14	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	
2	1.00	1.00	0.96	0.95	0.94	0.91	0.84	0.76	0.70	0.66	0.63	0.60	0.56	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38	0.34	0.31	0.27	0.23	0.20	0.17	0.14	0.11	0.06	0.00	0.00	
4	1.00	1.00	0.93	0.91	0.89	0.86	0.81	0.76	0.69	0.66	0.62	0.59	0.56	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38	0.35	0.31	0.28	0.25	0.22	0.19	0.17	0.15	0.00	0.00	0.00	
6	1.00	1.00	0.90	0.88	0.86	0.83	0.79	0.75	0.67	0.63	0.60	0.56	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38	0.34	0.30	0.25	0.20	0.17	0.14	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	
8	1.00	1.00	0.87	0.85	0.83	0.80	0.77	0.74	0.66	0.63	0.60	0.56	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38	0.34	0.30	0.25	0.20	0.17	0.14	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	
10	1.00	1.00	0.83	0.83	0.81	0.78	0.75	0.72	0.69	0.66	0.62	0.59	0.56	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.38	0.35	0.31	0.28	0.25	0.22	0.19	0.17	0.15	0.00	0.00	0.00	
42	1.00	0.99	0.69	0.68	0.66	0.65	0.63	0.62	0.60	0.58	0.57	0.55	0.53	0.52	0.50	0.48	0.47	0.45	0.43	0.42	0.40	0.39	0.37	0.35	0.34	0.32	0.31	0.00	0.00	0.00	
44	1.00	0.99	0.69	0.67	0.66	0.64	0.63	0.61	0.60	0.58	0.57	0.55	0.53	0.52	0.50	0.48	0.47	0.45	0.44	0.42	0.40	0.39	0.37	0.36	0.34	0.33	0.32	0.01	0.01	0.00	
46	1.00	0.99	0.68	0.67	0.66	0.64	0.63	0.61	0.60	0.58	0.56	0.55	0.53	0.52	0.50	0.48	0.47	0.45	0.44	0.42	0.41	0.39	0.37	0.36	0.34	0.33	0.32	0.01	0.01	0.00	
48	1.00	0.99	0.68	0.67	0.65	0.64	0.62	0.61	0.59	0.58	0.56	0.55	0.53	0.52	0.50	0.48	0.47	0.45	0.44	0.42	0.41	0.39	0.38	0.36	0.35	0.33	0.32	0.01	0.01	0.00	
64	1.00	0.99	0.67	0.65	0.64	0.63	0.61	0.60	0.59	0.57	0.56	0.54	0.53	0.51	0.50	0.49	0.47	0.46	0.44	0.43	0.41	0.40	0.39	0.37	0.36	0.35	0.32	0.01	0.01	0.00	
66	1.00	0.99	0.67	0.65	0.64	0.63	0.61	0.60	0.59	0.57	0.56	0.54	0.53	0.51	0.50	0.49	0.47	0.46	0.44	0.43	0.41	0.40	0.39	0.37	0.36	0.35	0.32	0.01	0.01	0.00	
68	1.00	0.99	0.67	0.65	0.64	0.63	0.61	0.60	0.59	0.57	0.56	0.54	0.53	0.51	0.50	0.49	0.47	0.46	0.44	0.43	0.42	0.40	0.39	0.37	0.36	0.35	0.32	0.01	0.01	0.00	
70	1.00	0.99	0.67	0.65	0.64	0.63	0.61	0.60	0.59	0.57	0.56	0.54	0.53	0.51	0.50	0.49	0.47	0.46	0.44	0.43	0.42	0.40	0.39	0.37	0.36	0.35	0.32	0.01	0.01	0.00	

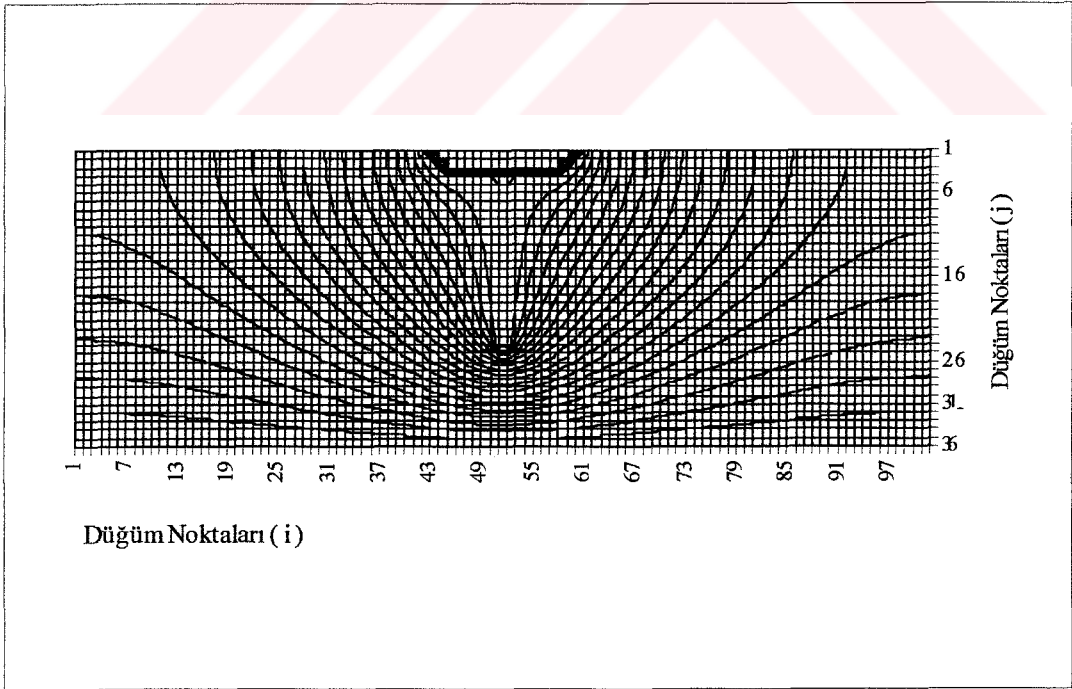
Tablo A.8 Enejksiyon perdesi yapılmanası duruunda akım fonksiyonu değeri

			38 m										82 m																	
d(m)	1	2	3	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	100	101	102
0	0.21	0.21	0.72	0.72	0.78	0.84	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.84	0.21	0.21	0.21
2	0.21	0.21	0.72	0.72	0.78	0.84	0.93	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	0.84	0.21	0.21	0.21
j3	0.21	0.21	0.71	0.76	0.82	0.89	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.82	0.21	0.21	0.21
4																														
6	0.21	0.21	0.70	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95	0.90	0.84	0.79	0.21	0.21	0.21
5																														
8	0.21	0.21	0.68	0.72	0.76	0.80	0.85	0.89	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.93	0.92	0.89	0.85	0.80	0.76	0.21	0.21	0.21
6																														
10	0.21	0.21	0.66	0.69	0.73	0.77	0.80	0.83	0.86	0.88	0.89	0.89	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.88	0.86	0.83	0.80	0.77	0.73	0.21	0.21	0.21
7																														
42	0.12	0.12	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30	0.12	0.12	0.12
25																														
44	0.12	0.12	0.26	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.28	0.28	0.28	0.27	0.12	0.12	0.12
26																														
46	0.11	0.11	0.24	0.25	0.25	0.26	0.26	0.26	0.27	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.11	0.11	0.11
27																														
48	0.10	0.10	0.22	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.10	0.10	0.10
28																														
64	0.03	0.03	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.03	0.03	0.03
34																														
66	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02
35																														
68	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

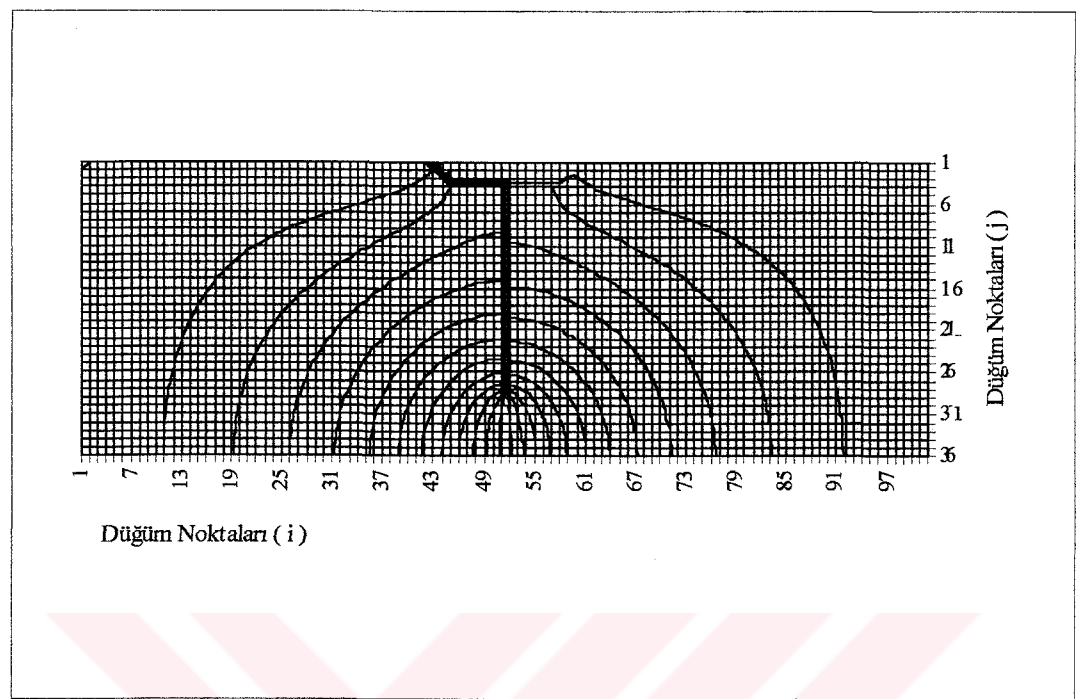
Şekil B.1 Sazlıdere Barajı enjeksiyon perdesinin 40 m olması durumunda potansiyel çizgileri



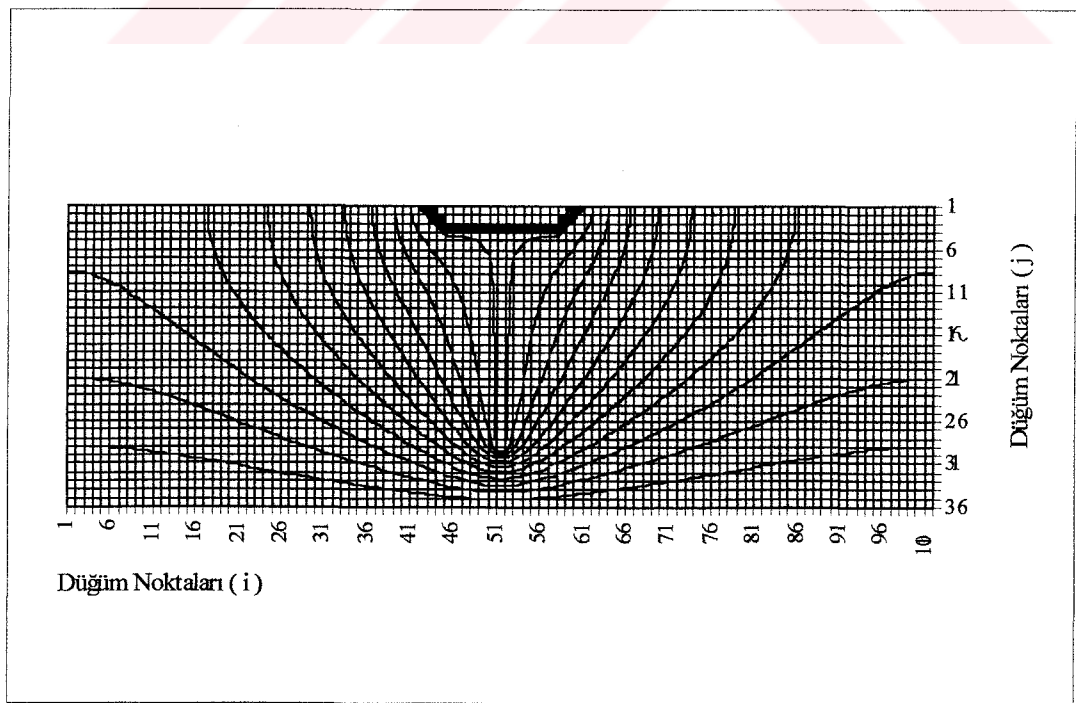
Şekil B.2 Sazlıdere Barajı enjeksiyon perdesinin 40 m olması durumunda akım çizgileri



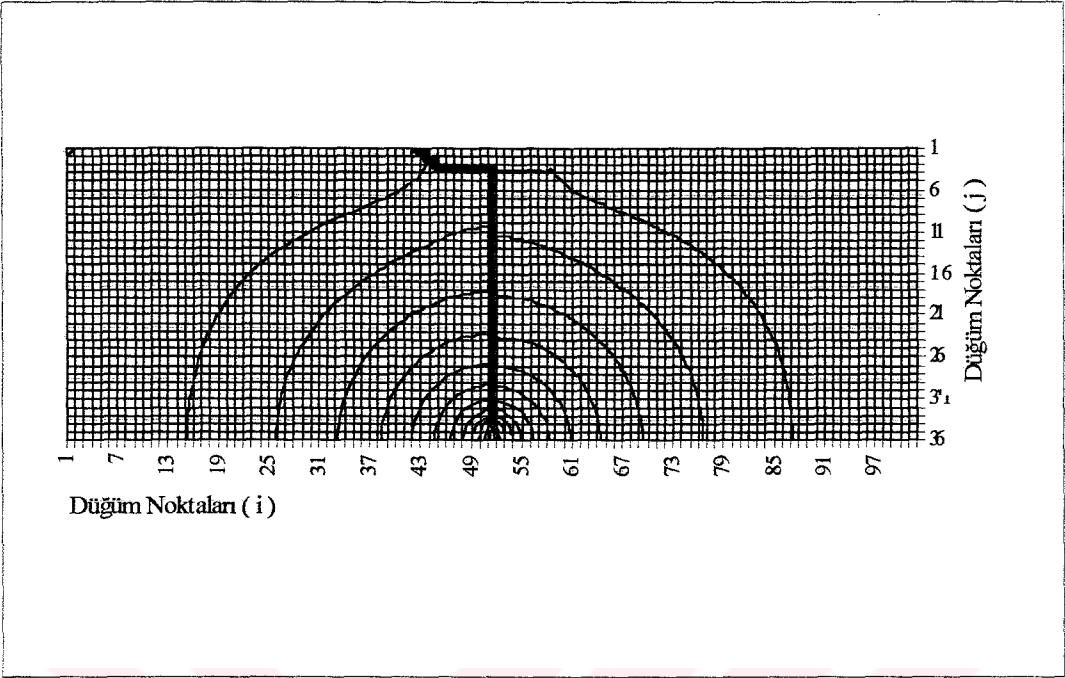
Şekil B.3 Sazlıdere Barajı enjeksiyon perdesinin 50 m olması durumunda potansiyel çizgileri



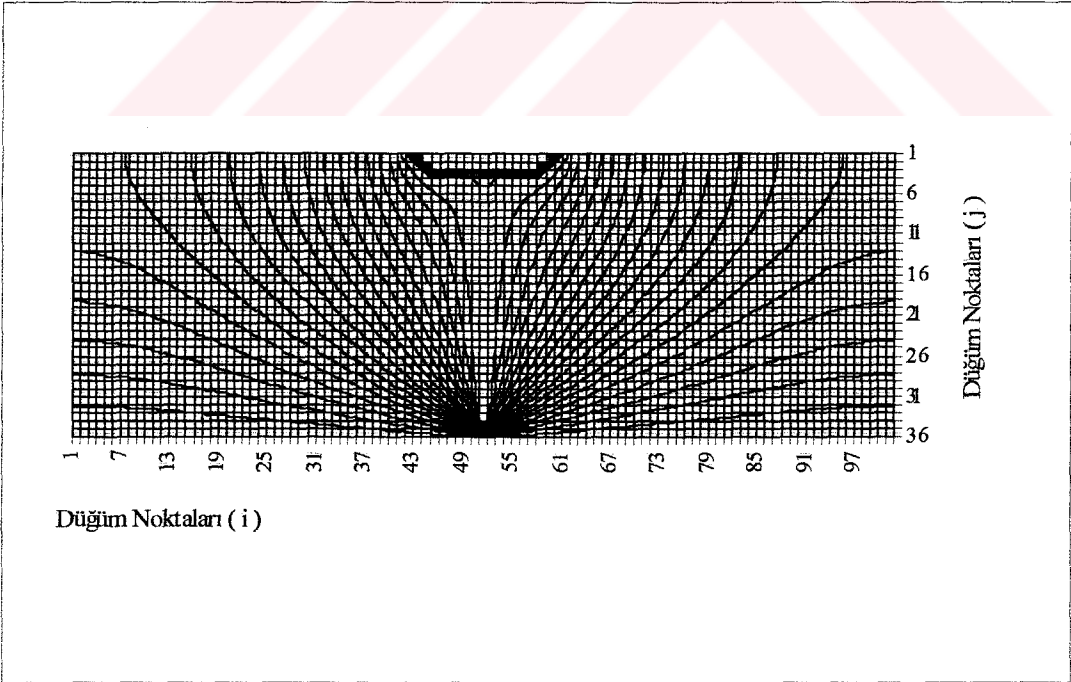
Şekil B.4 Sazlıdere Barajı enjeksiyon perdesinin 50 m olması durumunda akım çizgileri



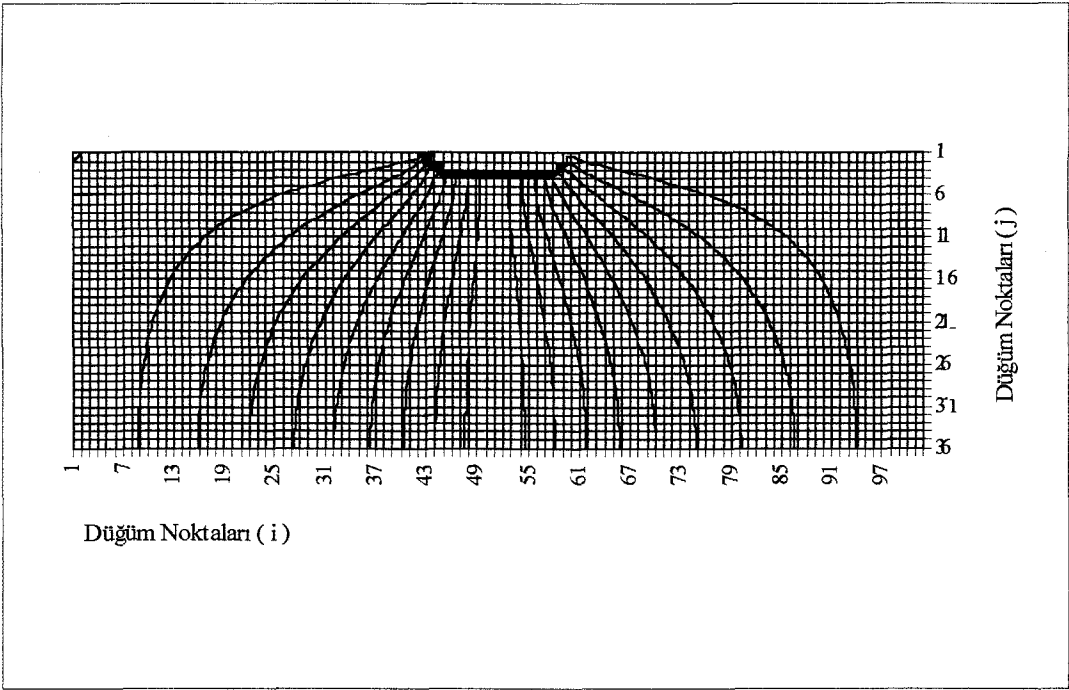
Şekil B.5 Sazlıdere Barajı enjeksiyon perdesinin 60 m olması durumunda potansiyel çizgileri



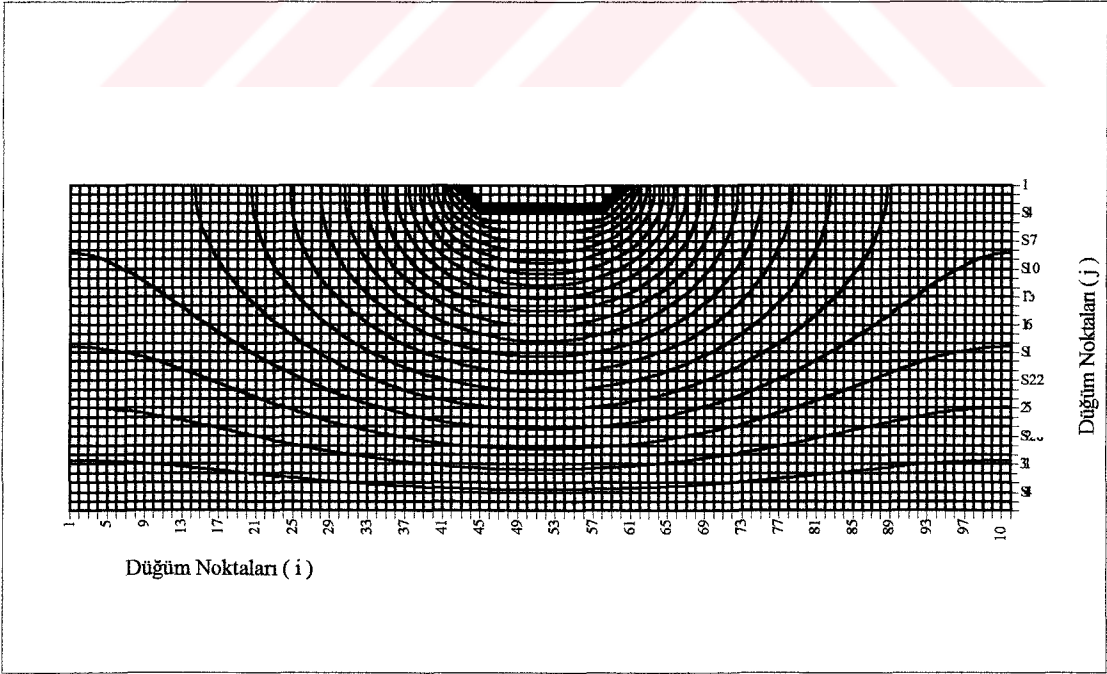
Şekil B.6 Sazlıdere Barajı enjeksiyon perdesinin 60 m olması durumunda akım çizgileri



Şekil B.7 Sazlıdere Barajı'nda enjeksiyon perdesi yapılmaması durumunda potansiyel çizgileri



Şekil B.8 Sazlıdere Barajı'nda enjeksiyon perdesi yapılmaması durumunda akım çizgileri



ÖZGEÇMİŞ

Zeynep EYNUR 1966 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kütahya ve Tavşanlı’da tamamladı. 1984 yılında başladığı Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 1988 yılında mezun oldu. Aynı yıl mecburi hizmetli olarak atandığı Edirne DSİ XI. Bölge Müdürlüğü’nde 2002 yılına kadar çalıştı. Halen İstanbul DSİ XIV. Bölge Müdürlüğü Etüt ve Plan Şube Müdürlüğü’nde İnşaat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

