

TOPRAK DOLGU BARAJLARDA SIZMANIN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

M. Salih KIRKGÖZ (*)

Mehmet ARDİCLİOĞLU (*)

ÖZET

Toprak dolgu baraj gövdelerinde su sızmasının kontrol edilmesi şev stabilitesi ve dolgudaki borulanma açısından önem taşımaktadır. Bu çalışmada, toprak dolgu baraj gövdelerindeki düzenli iki boyutlu sızma akımının analizi ve sızma debisinin hesabı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Bu yöntem ile zonlu toprak dolgu baraj olan Aslantaş baraj gövdesindeki sızma akımının analizi yapılarak, elde edilen teorik bulgular D.S.I. tarafından baraj gövdesinde ölçülen piyezometre değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, yüksek su seviyelerinde hesap ve ölçüm sonuçlarının birbirine oldukça yaklaştığı görülmüştür.

SEEPAGE ANALYSIS IN EARTH-FILL DAMS BY
FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

The control of the seepage flow through earth-fill dams is very important from the viewpoint of embankment slope stability and piping. In this study, two dimensional steady seepage flow through earth-fill dam, is analysed using finite element method. The method of finite element is used to analyse the seepage flow of the Aslantaş earth-fill dam and the theoretical results are compared with the measured pressures which are collected by D.S.I. . The theoretical results for the higher elevations in the reservoir, are quite close to the measured prototype results.

(*) Ç.U. Müh-Mim. Fak., İnşaat Müh. Böl., ADANA

1. GİRİŞ

Barajlar su kaynaklarından etkin bir şekilde faydalanmaya yönelik önemli su yapılarıdır. Bunların işletme sırasındaki güvenlikleri için gövde ve temeldeki su hareketinin bilinmesi gerekmektedir. Bir baraj ve temelinden sızan suyun miktarı ve sızmadan doğan basınçların dağılımı gözenekli ortamlardaki akım teorisi ile açıklanabilir. Sızma analizi sonunda bulunacak sızma debileri hazine sızma yolu ile kaybolacak su miktarının tahminine, hesaplamalar sonucu elde edilen basınç dağılımı ise stabilite analizi için gerekli boşluk suyu basınçlarının ve sızmanın borulanma etkisinin belirlenmesinde yardımcı olur.

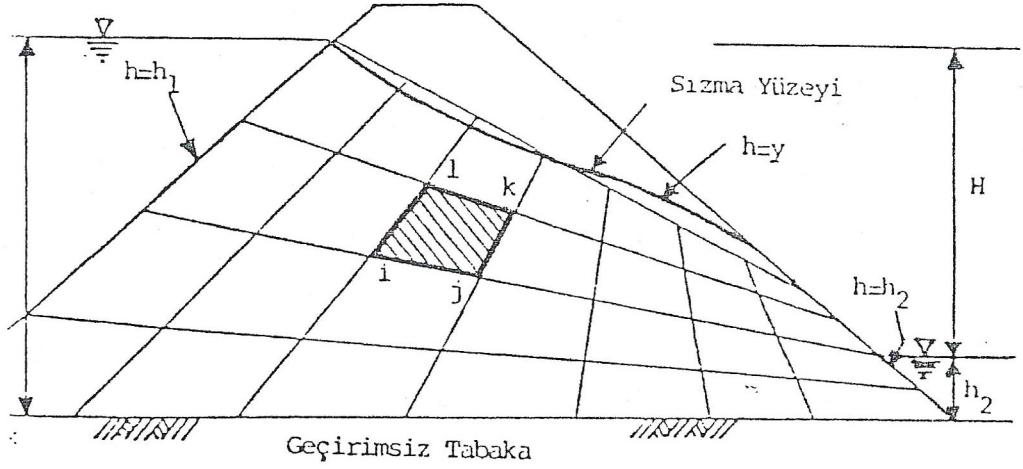
Bu çalışmada, dolgu baraj gövdesindeki düzenli, iki boyutlu sızma akımının analizi için sonlu elemanlar yöntemi ele alınmıştır. Bu yöntem ile geliştirilen paket program kullanılarak Aslantaş Barajı gövdesi için sızma analizi yapılmış ve basınç yükseklikleri için hesaplanan değerler, gövde dolgusunun çeşitli yerlerine yerleştirilmiş hidrolik piyezometrelerden elde edilen ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE SIZMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

Şekil 1 de bir baraj dolgusuna ait iki boyutlu sınırlandırılmamış bir sızma akımı ve bu akıma ait menba ve mansap sınır şartları görülmektedir. h değeri, basınç ve yersel yükseklikler toplamı olarak toplam enerji yüksekliğini ifade etmektedir:

$$h = \frac{P}{\gamma} + y \quad (1)$$

Dolgudan sızan akımın düzenli, çevrintisiz ve Darcy kanunu ile tanımlandığı kabul edilmektedir.



Şekil 1 Baraj Dolgusundaki Sızma Akımına Ait Sınır Şartları ve Sonlu Elemanlar Ağı

Sonlu elemanlar yönteminin sınırlandırılmış sızma akımına uygulanması ilk kez Zienkiewicz, Meyer ve Cheung [1] tarafından yapılmış ve zonlu izotropik olmayan akım bölgeleri için çözümler elde edilmiştir. Aynı yöntemin sınırlandırılmamış akıma uygulanması Finn [2], King ve Murray [3] tarafından ele alınmış ve ilave olarak akımın debisi de bulunmuştur.

Baraj dolgusundaki iki boyutlu (x,y) sızma akımı için Lagrangian fonksiyonu

$$J = \frac{\gamma}{2} \iint \left[i_x u + i_y v \right] dx dy - \gamma H q \quad (2)$$

dir. Denklem (2) de i_x ve i_y ler hidrolik eğimleri, u ve v hız bileşenlerini, γ suyun özgül ağırlığını, q birim genişlikten sızma debisini ve H potansiyel farkını göstermektedir.

Bu fonksiyonu lineer dörtgen elemanlara bölerek, elemanlara karşılık bir çözüm fonksiyonu h olarak seçilirse, eleman düğümlerinde h fonksiyonunun değerleri, verilen sınır şartları altında J nin minimize edilmesi ile bulunabilir. İzoparametrik dörtgen elemanda çözüm fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilebilir:

$$h = \alpha_1 + \alpha_2 \xi + \alpha_3 \eta + \alpha_4 \xi \eta \quad (3)$$

Burada ξ ve η lineer enterpolasyon parametreleridir.

Darcy kanununa göre, izotrop olmayan akım bölgelerinde x ve y yönündeki hız bileşenleri

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

şeklindedir. Burada $i_x = -\partial h / \partial x$ ve $i_y = -\partial h / \partial y$ dir. Bu değerlerin (2) denkleminde yerine yazılmasıyla

$$\dot{E}_h = \frac{\gamma}{2} \iint \left[k_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \gamma H q \quad (5)$$

ifadesi elde edilir.

(3) denkleminde her eleman üzerindeki enerji dağılımı h, enterpolasyon parametrelerine bağlı olarak ifade edilmektedir. Aynı ifade eleman düğüm noktalarındaki enerji değerleri ve şekil fonksiyonları cinsinden

$$h = N^T h_e \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. Burada N şekil fonksiyonu vektörü, h_e ise eleman düğümlerindeki enerji yüksekliklerini içeren vektörü göstermekte olup izoparametrik dörtgen elemanlara ait şekil fonksiyonları aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned} N_1 &= (1 - \xi - \eta + \xi \eta) / 4 \\ N_2 &= (1 + \xi - \eta - \xi \eta) / 4 \\ N_3 &= (1 + \xi + \eta + \xi \eta) / 4 \\ N_4 &= (1 - \xi + \eta - \xi \eta) / 4 \end{aligned} \quad (7)$$

(6) ifadeyi ile verilen enterpolasyon fonksiyonu açık olarak

$$h(\xi, \eta) = N_1 h_1 + N_2 h_2 + N_3 h_3 + N_4 h_4 \quad (8)$$

ve matris notasyonu ile de

$$h(\xi, \eta) = \langle N(\xi, \eta) \rangle \langle h_n \rangle \quad (9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada ξ ve η referans uzayındaki koordinatları göstermektedir. Gerçek uzayda x' ve y' elemanın merkez koordinatlarını, $2a$ ve $2b$ x ve y yönlerindeki eleman boyutlarını göstermek üzere, $\xi = x'/a$ ve $\eta = y'/b$ dönüşümlerinin yapılmasıyla elemana ait herhangi bir noktadaki enerji yüksekliğini ifade eden (8) denklemi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$h = \frac{1}{4ab} \begin{bmatrix} (ab - bx' - ay' + x'y'), & (ab + bx' - ay' - x'y') \\ (ab + bx' + ay' + x'y'), & (ab - bx' + ay' - x'y') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_i \\ h_j \\ h_k \\ h_l \end{bmatrix} \quad (10)$$

(10) denkleminin diferansiyeli alınırsa

$$\begin{bmatrix} \partial h / \partial x \\ \partial h / \partial y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-b + y'), (b - y'), (b + y'), (-b - y') \\ (-a + x'), (-a - x'), (a + x'), (a - x') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_i \\ h_j \\ h_k \\ h_l \end{bmatrix} \quad (11)$$

elde edilir. (11) denkleminin (5) de yerine konulmasıyla eleman için enerji denklemi

$$E_e = h_e^T \left[\int (B^T D B) dA \right] h_e - \gamma H q \quad (12)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bir noktadaki enerji yüksekliğinin minimum olması için o noktadaki enerji türevinin sıfıra eşit olması gerekmektedir. Bir düğümdeki enerji türevinin ifadesine herhangi bir elemandan gelen katkı matris notasyonunda

$$\left[\begin{array}{c} \frac{\partial E_h}{\partial h_e} \end{array} \right] = [S] \left[h_e \right] \quad (13)$$

şeklindedir. Burada $[h_e]$ elemana ait toplam yükseklik vektörü $[h_i, h_j, h_k, h_l]^T$, $[S]$ ise eleman matrisi olup 4×4 boyutunda bir kare matristir:

$$[S] = \begin{bmatrix} P+Q & -P+Q/2 & -P/2-Q/2 & P/2-Q \\ & P+Q & P/2-Q & -P/2-Q/2 \\ & & P+Q & -P+Q/2 \\ \text{SİMETRİK} & & & P+Q \end{bmatrix} \quad (14)$$

Burada $P = bk_x/3a$ ve $Q = ak_y/3b$ olup sayısal olarak hesaplanabilir. Bir düğüme komşu elemanlardan gelen tüm diferansiyel katkıların toplamı sıfırdır. Bir r düğümüne m adet elemanın bağlı olduğu düşünülürse

$$\sum_{e=1}^m \left(\frac{\partial E_h}{\partial h_r} \right)_e = 0 \quad (15)$$

olur. (15) ifadesi akım bölgesindeki tüm düğüm noktaları için yazıldığında aşağıdaki lineer denklem takımı elde edilir.

$$\left[\frac{\partial E_h}{\partial h} \right] = \sum_{e=1}^m \left[\frac{\partial E_h}{\partial h} \right]_e = 0 \quad (16)$$

Burada m bölge içindeki eleman sayısıdır. (16) denklemini kısa olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[SM] [h] = 0 \quad (17)$$

(17) ifadesinde $[SM]$ akım bölgesi için sızma matrisi ve $[h]$ tüm düğümler için toplam yükseklik vektörüdür. Bu denklemin verilen sınır şartları altında sayısal çözümü yapıldığında düğüm noktalarının toplam enerji yükseklikleri elde edilir.

Bir eleman için sızma debisi, elemanın bir kenarındaki iki düğümünde (11) denkleminin ayrı ayrı yazılıp toplanmasıyla bulunabilir. Eleman kenarına bağlı i ve l düğümlerinde (Şekil 1)

$$\frac{\partial E_h}{\partial h_i} = P(h_i - h_j - h_k/2 - h_l/2) + Q(h_i + h_j/2 + h_k/2 + h_l)$$

$$\frac{\partial E_h}{\partial h_l} = P(h_i/2 - h_j/2 - h_k + h_l) + Q(-h_i - h_j/2 + h_k/2 + h_l)$$

olup eleman debisi

$$q = \frac{\partial E_h}{\partial h_i} + \frac{\partial E_h}{\partial h_l} = 2bk \times \frac{\frac{h_i + h_l}{2} + \frac{h_j + h_k}{2}}{2a} \quad (18)$$

ifadesi ile bulunur.

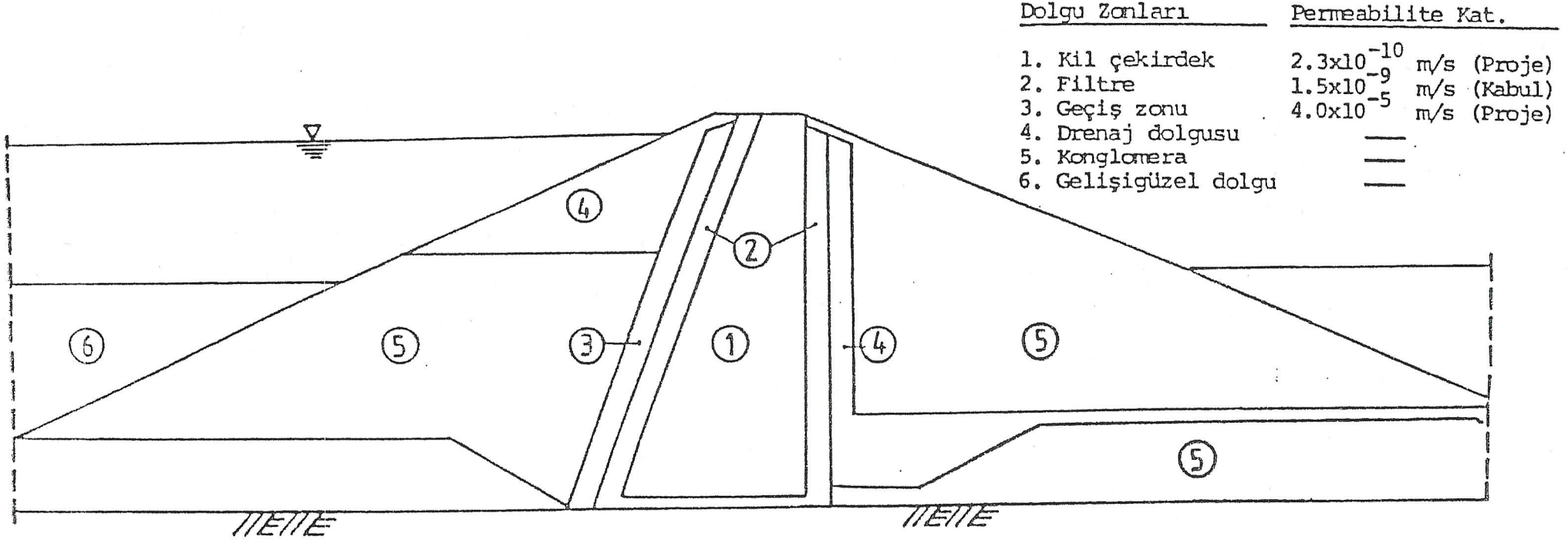
Gövdenin birim genişliğinden geçen toplam sızma debisi, akımın sınırlarından birindeki (örneğin menba yüzü) tüm düğüm noktalarına ait debilerin toplanması ile elde edilir. n adet düğüm noktasının bulunduğu akım menba yüzünden giren toplam debi

$$q = \sum_{r=1}^n \frac{\partial E_h}{\partial h_r} \quad (19)$$

ifadesi ile hesaplanabilir.

3. ASLANTAS BARAJI HAKKINDA KISA BİLGİ

Aslantas barajı Ceyhan nehri üzerinde, 1984 yılında işletmeye açılmış zonlu toprak dolgu türü bir barajdır. Baraj gövdesinin talvegdeki enkesiti Şekil 2 de görülmektedir. Kesitteki çeşitli zonlara ait malzeme türleri ve bu çalışmada kullanılan permeabilite katsayıları şekil üzerinde verilmiştir. Kil dolgu ve geçiş zonuna ait permeabilite katsayıları barajın inşası sırasında yapılmış olan zemin mekaniği deneyleri ile bulunan değerler olup 2 nolu filtre zonuna ait permeabilite katsayısı dolgu türüne uygun olarak tahminen seçilmiş ve bu katsayılar yatay ve düşey doğrultularda eşit kabul edilmiştir (İzotrop).



Şekil 2 Aslantaş Baraj Gövdesi Talveg En Kesiti ve Zon Özellikleri

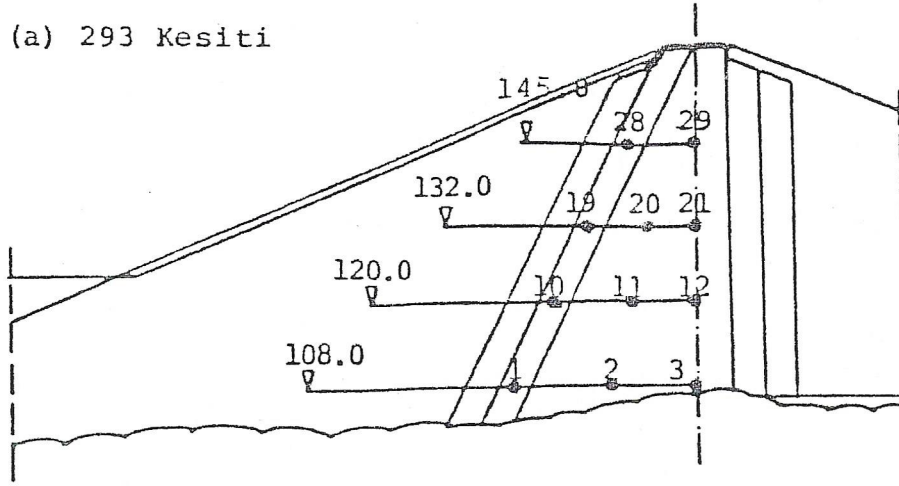
Aslantaş baraj gövdesi, güvenliğinin zamana bağlı olarak gözlenmesine imkan verecek çeşitli ölçüm cihazlarıyla donatılmıştır. Bu konu ile ilgili geniş bilgiler Devlet Su İşleri yayınlarında bulunmaktadır [4,5,6,7]. Diğer ölçümlerle birlikte dolgu içinde yer alan ve boşluk suyu basıncını ölçen Hidrolik Piyezometrelere ait ölçüm sonuçları D.S.İ. tarafından ayda iki kez alınarak gerekli takipler yapılmaktadır. Özellikle geçirimsiz bölgede yer alan bu piyezometrelerin ölçüm sonuçları bu çalışmada kullanılmış olup söz konusu piyezometrelerin gövdenin farklı üç kesitindeki yerleri Şekil 3 de gösterilmiştir.

4. BULGULAR

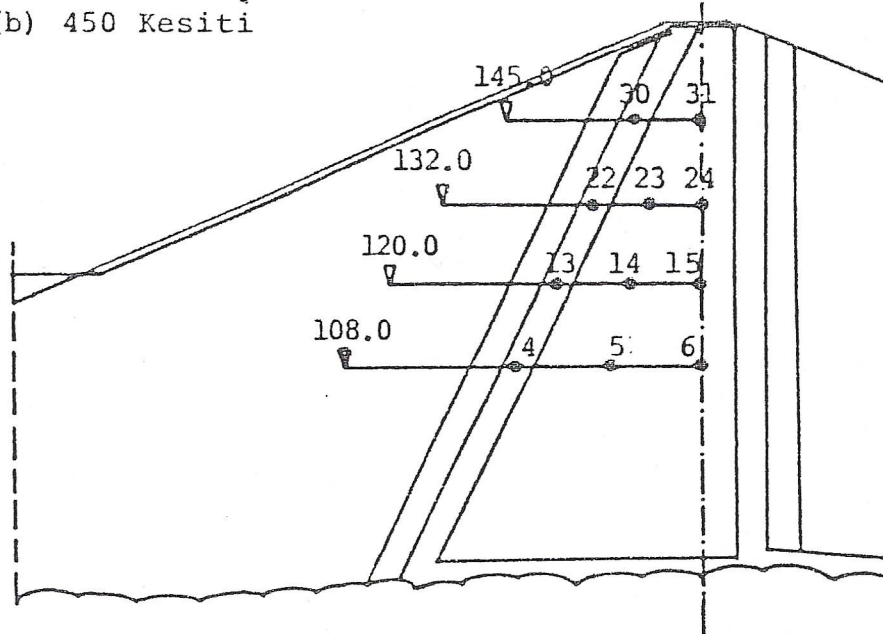
Bu çalışmada, ikinci kısımda açıklanmış olan sonlu elemanlar yöntemine dayalı sızma analizi ile Aslantaş Barajı için hesaplanan teorik bulgular, D.S.İ. 6. Bölge Müdürlüğü tarafından aynı baraj dolgusundan alınan Hidrolik Piyezometre ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Baraj dolgusundaki iki boyutlu sızma akımında hidrolik iletkenliğin izotrop olduğu varsayılarak yatay ve düşey doğrultulardaki k_x ve k_y permeabilite katsayıları eşit alınmıştır. Şekil 2 de görülen 4 nolu drenaj ve 5 nolu kabuk zonları malzeme özelliğine uygun olarak geçirimli kabul edilmiş ve analize dahil edilmemiştir. Diğer taraftan menba batardosu ile bağlantılı 6 nolu zon gelişigüzel dolgu olup hesaplarda göz önüne alınmamıştır. Buna göre, 3 nolu geçiş zonundan giren sızma suyu 4 nolu drenaj zonunda toplanmakta ve 5 nolu zondan geçerek baraj mansabına tahliye olmaktadır.

Sonlu elemanlar yöntemi ile sızma analizi kil çekirdek ,filtre ve geçiş zonlarında yapılmış olup talveg kesitine ait sonlu elemanlar ağı Şekil 4 de gösterilmiştir. Elemanların teşkilinde mümkün olduğunca hidrolik piyezometreler ile düğüm noktalarının çakıştırılmasına çalışılmıştır. Hesaplar, haznede yüksek ve alçak su seviyelerine karşılık gelmek üzere 155.08 m ile 134.40 m kotlarında iki farklı su seviyesi için yapılmış ve bu seviyelere ait piyezometre okumaları 31.5.1988 ve 29.1.1988 tarihli D.S.İ. kayıtlarından alınmıştır.

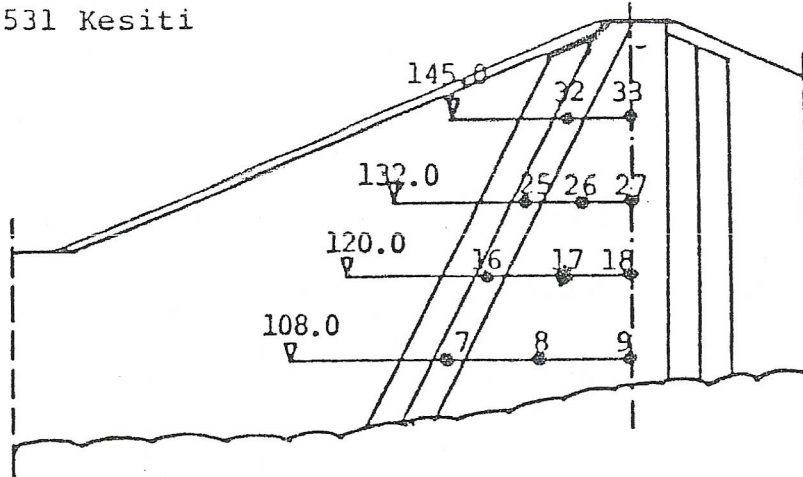
(a) 293 Kesiti



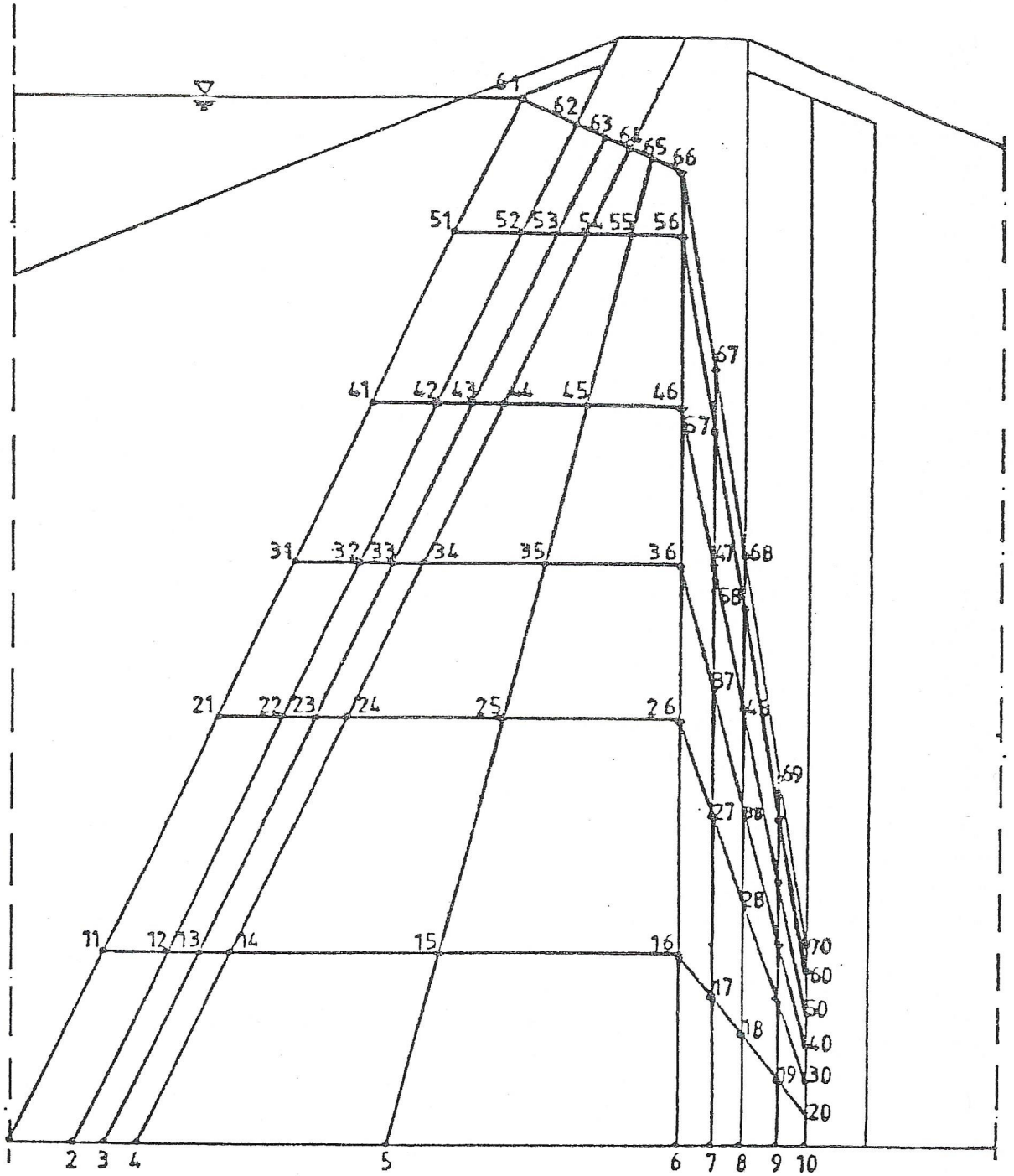
(b) 450 Kesiti



(c) 531 Kesiti



Şekil 3 Baraj Gövdesinde Hidrolik Piyezometrelerin Yerleri



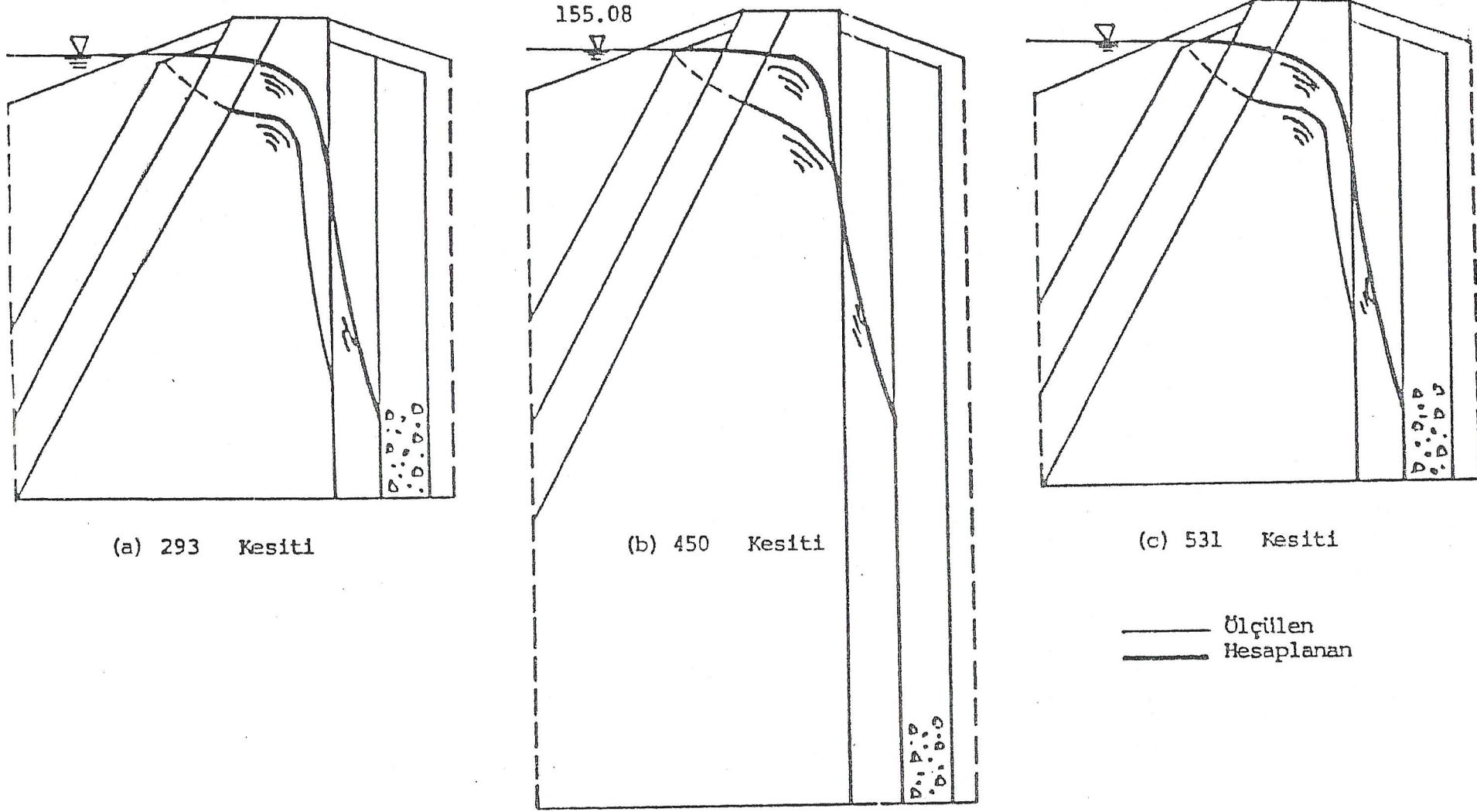
Şekil 4 450 Kesitinde Akım Bölgesinin Sonlu Elemanlara Bölünmüş Hali

Şekil 5 de hazne yüksek su seviyesinde (155.08 m) gövdenin farklı üç kesitindeki sızma akımına ait hesaplanan ve ölçülen serbest su yüzü profilleri verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi her üç kesitte de hesap ve ölçüm değerleri arasında belirli miktarda farklar mevcuttur. Bu farkların dolgunun çeşitli zonlarındaki permeabilitelerin kabulünden, dolgunun izotrop olarak ele alınmasından ve sızma akımının gerçekte düzenli olmamasından kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 6 da haznede ölçülen alçak su seviyesine (134.40 m) ait üç kesitteki teorik ve deneysel serbest su yüzü profilleri görülmektedir. Alçak su seviyesinde ölçülen su yüzü profillerinin hesaplanan değerlerin oldukça üzerinde bulunması gövdedeki sızma akımının zamana bağlı (değişken) akım olmasından ileri gelmektedir.

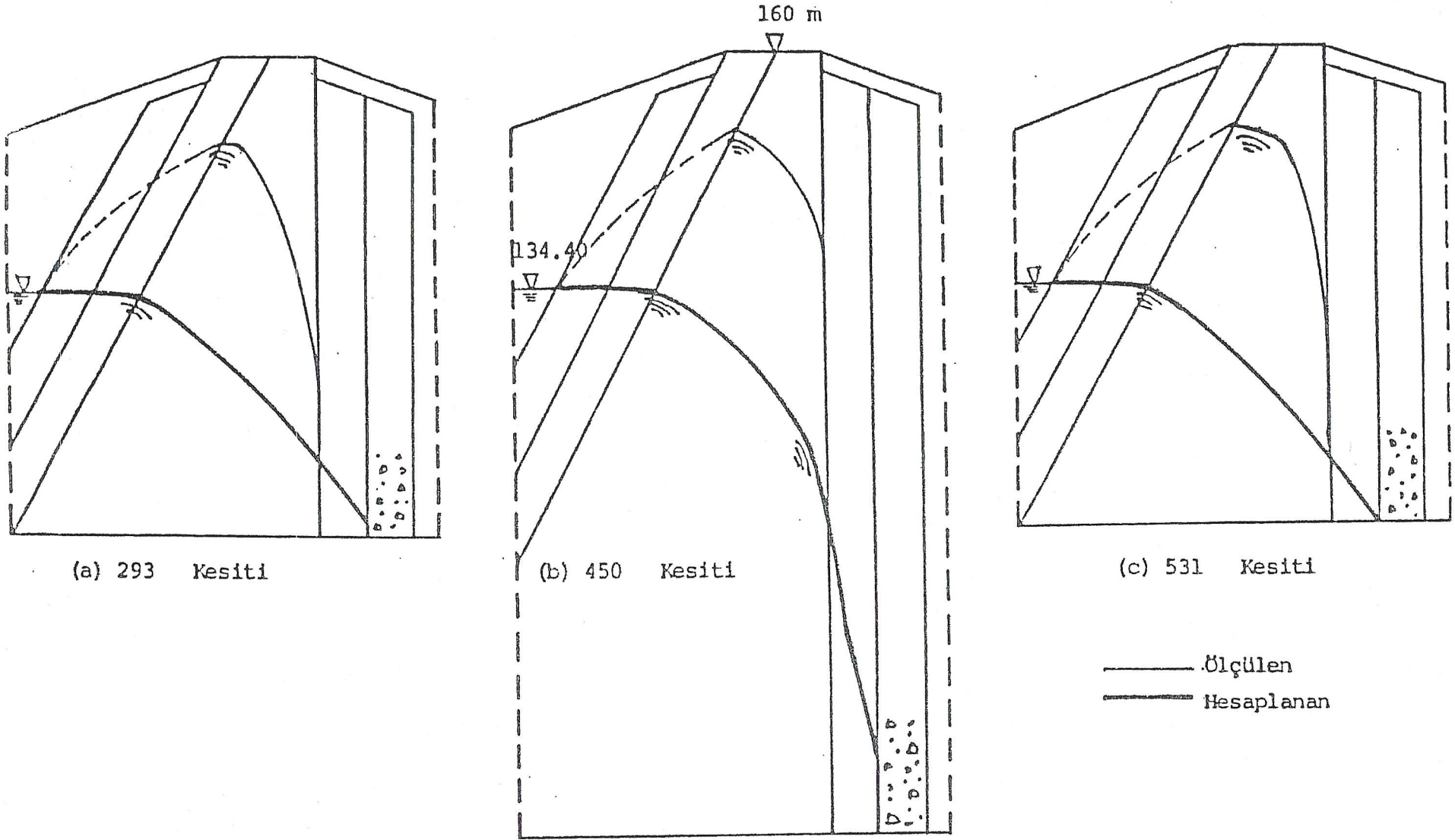
Bu çalışmada ele alınan teorik yöntem ile sadece düzenli sızma akımının analizi yapılabilmektedir. Dolayısıyla yüksek su seviyesinin altındaki hazne su kotlarında yapılan hesaplar ile ölçülen değerler arasında oldukça büyük farklar meydana gelmektedir. Akımın değişkenliği aslında yüksek su seviyelerinde de mevcuttur. Barajdaki yüksek su seviyesinin uzun süre kalacağı varsayılırsa Şekil 5 de görülen deneysel serbest su yüzünün hesaplanan profile daha yakın değerler alması beklenebilir. Bu nedenle, hazne su seviyesinin maksimum civarında uzun süre kalması durumunda hesaplanan su yüzü profilinin gerçeğe oldukça yakın olabileceği sonucuna varılmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, zonlu toprak dolgu baraj gövdesindeki düzenli iki boyutlu sızma akımı probleminin teorik olarak çözümü için bir sonlu elemanlar yöntemi açıklanmıştır. Sayısal hesaplamalar için Aslantaş baraj gövdesi örnek alınmış ve hesap bulguları bu barajda yapılan piyezometre ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda 1988 yılında baraj haznesinde piyezometre okumaları için ölçülen maksimum ve minimum iki su seviyesi esas alınmıştır. Maksimum su seviyesinde yapılan hesaplarda sızma suyuna ait serbest su yüzü çizgisi ölçülen değerlerin bir miktar üzerinde kalmaktadır. Aradaki farkın dolgunun çeşitli zonları için kabul edilen permeabilite katsayılarından ve ayrıca akımın düzenli kabul edilmesinden



Şekil 5 155.08 Hazne Su Kotu İçin Sızma Akımına Ait Ölçülen ve Hesaplanan Serbest Su Yüzü Profilleri



Şekil 6 134.40 Hazne Su Kotu İçin Sızma Akımına Ait Ölçülen ve Hesaplanan Serbest Su Yüzü Profilleri

Toprak Dolgu Barajlarda Sızmanın İncelenmesi

kaynaklandığı söylenebilir. Düzenli akım problemini ele alan mevcut teorik yöntemin minimum su seviyesindeki bulguları ile ölçülen su yüzü profilleri arasında zamana bağlı (değişken) sızma akımının özelliklerinden kaynaklanan önemli farklar mevcuttur. Bununla birlikte baraj dolgusundaki akımın gövdeye en fazla zarar verebileceği ve daha fazla su kaybının görüldüğü hazne yüksek su seviyelerinde, baraj gövdesinde oluşan sızma akımının serbest su yüzü çizgisi ve boşluk suyu basınçları gibi barajın güvenlik tahkikinde gerekli olabilecek bilgilerin mevcut yöntem ile gerçeğe oldukça yakın bir şekilde elde edilmesinin mümkün olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Zienkiewicz, O.C. ,P. Meyer, and Y.K.Cheung. " Solutions of anisotropic seepage by finite elements"., J.Eng. Mech. Div. A.S.C.E. , 92 (EM1),(1966),111-20.
- [2] Finn, W.D.L., "Finite element analysis of seepage through dams ". J. Soil Mech. and Found. Div., A.S.C.E., 93 (SM6), (1967), 41-53.
- [3] King, G. J. W. and R. N. Chowdhury. " Finite element solution for quantity of steady seepage ", Civ. Eng. and P. W. Rew.,66 (1971), 1317-21-1.
- [4] D.S.I. " Aslantaş barajı ve hidroelektrik santrali inşaat işleri teknik şartnamesi " , Acres - Syndibel - Su Yapı Müşavir Mühendisler, (1965) D.S.I. Genel Müd., Ankara.
- [5] D.S.I. " Ceyhan Aslantaş projesi ", International Engineering Company Inc. , 74 New Montgomery St., Sanfrancisco California 94105., (1966), D.S.I. Genel Müd., Ankara.
- [6] Solakoğlu Önder . " Dolgu barajlarda ölçüm sistemleri kılavuzu" (1983), D.S.I. Genel Müd., Ankara.
- [7] D.S.I. "Aslantaş Barajı ve hidroelektrik santrali as built proje resimleri.", Energoproject - Gemaş Consulting Engineers Beogard,(1989), D.S.I. Genel Müd., Ankara.