

ISSN: 1012 - 0726 (Baskı)
ISSN: 1308 - 2477 (Online)



SAYI: 108

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

Sahibi

DEVLET SU İŞLERİ
GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
Adına
Haydar KOÇAKER

Sorumlu Müdür

M. Fatih KOCABEYLER

Yayın ve Hakem Kurulu

İsmail GÜNEŞ
Zuhal VELİOĞLU
Tuncer DİNÇERKÖK
Servan YILDIRIM
Kemal ŞAHİN

Haberleşme adresi

DSİ Teknik Araştırma ve
Kalite Kontrol (TAKK)
Dairesi Başkanlığı 06100
Yüce-tepe - Ankara

Tel (312) 399 2793
Faks (312) 399 2795
bulten@dsi.gov.tr

Basıldığı yer

İdari ve Mali İşler Dairesi
Başkanlığı
Basım ve Foto-Film Şube
Müdürlüğü
Etilik - Ankara

SAYI : 108

YIL : Temmuz 2010

Yayın Türü

Yaygın süreli yayın
Üç ayda bir yayınlanır

ISSN

1012 - 0726 (Baskı)
1308 - 2477 (Online)

İÇİNDEKİLER

YÜZEY VE YERALTISUYU İZLEME TEKNİKLERİ Müfit Şefik DOĞDU, Oğuz YİĞİTLER	1
OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK BERKE BARAJI'NIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ Alemdar BAYRAKTAR, Barış SEVİM, Ahmet Can ALTUNIŞIK.....	13
DEMİRKÖPRÜ BARAJI AYLIK BUHARLAŞMA YÜKSEKLİKLERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİN EDİLMESİ Umut OKKAN, H. Yıldırım DALKILIÇ	30
TÜNEL DELME MAKİNELERİ VE PERFORMANS ANALİZLERİ ÖRNEK ÇALIŞMA: ERMENEK (KARAMAN) ENERJİ TUNELİ Ayhan KOÇBAY	37
SU DAĞITIM ŞEBEKELERİNİN TASARIMINDA HESAP ÇİZELGELERİNİN KULLANIMI Birol KAYA, Umut OKKAN.....	51
SAVAKLARDA KRET ŞEKLİNİN DEBİ KATSAYISINA ETKİSİ M. Emin EMİROĞLU, Nihat KAYA, Yusuf DOĞAN.....	57

DSİ Teknik Bülteni'nde, su ile ilgili konularda, temel ve uygulamalı mühendislik alanlarında gönderilen bildiriler yayınlanır. Bildiriler, ilk önce konunun uzmanı tarafından incelenir ve değerlendirilir. Daha sonra, Hakem Kurulu uzman görüşünü de esas alarak bildirinin yayınlanıp yayınlanmamasına karar verir. Bildirilerin tamamı veya büyük bir kısmı diğer yayın organlarında yayınlanmamış olması gereklidir.

DSİ TEKNİK BÜLTENİ BİLDİRİ YAZIM KURALLARI

1. Gönderilen yazılar kolay anlaşılır dilde ve Türkçe kurallarına uygun şekilde yazılmış olmalıdır.
2. Yazıların teknik sorumluluğu yazarına aittir (yazılardaki verilerin kullanılması sonucu oluşabilecek maddi ve manevi problemlerde muhatap yazardır).
3. Yayın Kurulu, bildiriler üzerinde gerekli gördüğü düzeltme ve kısaltmaları yapar.
4. Bildiriler bilgisayarda Microsoft Word olarak bir satır aralıkla yazılmalı ve Arial 10 fontu kullanılmalıdır. Bildiriler A4 normundaki kâğıdın her kenarından 25 mm boşluk bırakılarak yazılmalıdır.
5. Sadece ilk sayfada, yazı alanı başlangıcından sola dayalı olarak, italic 10 fontunda Arial kullanılarak ilk satıra "*DSİ Teknik Bülteni*" yazılmalıdır.
6. Konu başlığı: Yazı alanı ortalanarak, "*DSİ Teknik Bülteni*" yazısından sonra dört satır boş bırakıldıktan sonra Arial 12 fontu kullanılarak büyük harflerle koyu yazılmalıdır.
7. Yazar ile ilgili bilgiler: Adı (küçük harf), soyadı (büyük harf), yazarın unvanı ile bağlı olduğu kuruluş (alt satıra) ve elektronik posta adresi (alt satıra) başlıktan iki boş satır sonra ilk yazardan başlamak üzere Arial 10 fontu ile yazı alanı ortalanarak yazılmalıdır. Diğer yazarlar da ilk yazar gibi bilgileri bir boşluk bırakıldıktan sonra yazılmalıdır.
8. Türkçe özet, elektronik posta adresinden dört boş satır sonra, özetten bir boş satır sonra ise anahtar kelimeler verilmelidir. Aynı şekilde, Türkçe anahtar kelimelerden iki boş satır sonra İngilizce özet, bir boş satır sonra ise İngilizce anahtar kelimeler verilmelidir.
9. Bölüm başlıkları yazı alanı sol kenarına dayandırılarak Arial 10 fontu kullanılarak koyu ve büyük harfle yazılmalı. Bölüm başlığının üzerinde bir boş satır bulunmalıdır.
10. Ara başlıklar satır başında başlamalı, üstlerinde bir boş satır bulunmalıdır. Birinci derecedeki ara başlıktaki bütün kelimelerin sadece ilk harfi büyük olmalı ve koyu harflerle Arial 10 fontunda yazılmalıdır. İkinci ve daha alt başlıklar normal harflerle Arial 10 fontu ile koyu yazılmalıdır.
11. Yazılar kâğıda iki sütün olarak yazılmalı ve sütün aralarındaki boşluk 10 mm olmalıdır.
12. Paragraf sola dayalı olarak başlamalı ve paragraflar arasında bir boş satır bırakılmalıdır.
13. Eşitlikler bilgisayarda yazılmalı ve numaralandırılmalıdır. Eşitlik numaraları sayfanın sağına oturmalı ve parantez içinde yazılmalıdır. Her eşitlik alttaki ve üstteki yazılardan bir boş satır ile ayrılmalıdır. Eşitliklerde kullanılan bütün semboller eşitlikten hemen sonraki metinde tanımlanmalıdır.
14. Sayısal örnekler verildiği durumlarda SI veya Metrik sistem kullanılmalıdır. Rakamların ondalık kısımları virgöl ile ayrılmalıdır.
15. Yararlanılan kaynaklar metinde kaynağın kullanıldığı yerde köşeli parantez içerisinde numaralı veya [Yazarın soyadı, basım yılı] olarak belirtilmelidir. Örneğin: "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [1]" veya "..... basamaklı dolusavaklar için geometri ve eşitlikler [Aktan, 1999]" gibi.
16. Kaynaklar yazar soyadlarına göre sıralanmalı, listelenirken yazar (veya yazarların) soyadı, adının baş harfi, yayın yılı, kaynağın ismi, yayınlandığı yer ve yararlanılan sayfa numaraları belirtilerek, köşeli parantez içerisinde numaralandırılmalı ve yazarken soldan itibaren 0,75 cm asılı paragraf şeklinde yazılmalıdır. Makale başlıkları çift tırnak içine alınmalı, kitap isimlerinin altı çizilmelidir. Bütün kaynaklara metin içinde atıf yapılmalıdır.
17. Çizelgeler, şekiller, grafikler ve resimler yazı içerisine en uygun yere gelecek şekilde yerleştirilmelidir. Fotoğraflar net çekilmiş olmalıdır. Şekil ve grafikler üzerine el yazısı ile ekleme yapılmamalıdır.
18. Bildirinin tamamı 20 sayfayı geçmemeli, şekil, çizelge, grafik ve fotoğraflar yazının 1/3'ünden az olmalıdır.
19. Sayfa numarası, sayfaların karışmaması için sayfa arkalarına kurşun kalem ile hafifçe verilmelidir.
20. Yazım kurallarına uygun olarak basılmış bildirinin tam metni hem A4 kâğıda baskı şeklinde (2 adet) hem de dijital ortamda (CD veya DVD) yazışma adresine gönderilmelidir.
21. Yayınlanan bütün yazılar için "Kamu Kurum ve kuruluşlarınca ödenecek telif ve işleme ücretleri hakkındaki yönetmelik" hükümleri uygulanır.
22. Bildiriyi gönderen yazarlar yukarıda belirtilenleri kabul etmiş sayılırlar.
23. Yazışma adresi aşağıda verilmiştir:

DSİ TEKNİK BÜLTENİ

DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol (TAKK) Dairesi Başkanlığı

06100 Yüce-tepe ANKARA

Tel (312) 399 2793

Faks (312) 399 2795

E-posta bulten@dsi.gov.tr

Web http://www.dsi.gov.tr/kutuphane/dsi_teknik_bulten.htm

YÜZEY VE YERALTISUYU İZLEME TEKNİKLERİ

Müfit Şefik DOĞDU

Dr., Hidrojeoloji Yük. Müh., DSİ Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, ANKARA
mufitd@dsi.gov.tr

Oğuz YİĞİTLER

Kimya Müh., DSİ Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, ANKARA
yigitler@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 11.01.2010, Bildirinin kabul tarihi: 25.01.2010)

ÖZET

Akarsu, dere vb. yüzey sularının akım miktarlarının ölçümü, su depolama yapılarından olası su kaçaklarının nedenlerinin araştırılması, yeraltısuyu hızı ve yönünün belirlenmesi, suların beslenme ve koruma alanlarının belirlenmesi vb. gibi oldukça geniş bir yelpazeyi kapsayan hidrolojik ve hidrojeolojik çalışmalarda izleme teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Sunulan bu çalışmada: yüzey veya yeraltısuyu izlemesinde kullanılan doğal ve yapay izleyici tiplerinden, değişik amaç ve tipteki çalışmalarda kullanılacak izleyici miktarı hesaplarından, izleme deneyi aşamalarından, izleme deneyinde özellikle floresan özelliğe sahip izleyicilerin ölçümünde kullanılan fluorometre aletinden, izleme deneyinde yüzey veya yeraltısuyu sistemine verilen izleyicinin geri kazanım miktarı hesabına değinilmiş ve son olarak da gerçekleştirilen bir izleme deneyi ve sonuçları örnek olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Floresan boyalar, fluorometre, izleme deneyi, yeraltısuyu, yüzey suyu

SURFACE AND GROUNDWATER TRACING TECHNIQUES

ABSTRACT

Tracing techniques are widely used in hydrologic and hydrogeologic studies' spectrums which include flow rate determination of surface waters like stream and creek, searching of possible water leakage problems of water storage structures, determination of flow rate, direction and protection area of groundwater and etc. Natural and artificial tracers types used in surface water and groundwater tracing, calculation of tracer amount used in various tracing studies, stages of tracer test, fluorometer tool used for measuring fluorescence intensity, recovery amount calculations of tracer which given to surface water and groundwater systems have been explained and one example of tracing test and its results have been given in this presented study.

Keywords: Fluorescence dyes, fluorometer, tracing test, groundwater, surface water

1 GENEL

Yüzey ve yeraltısuyu izleme teknikleri hidrolojik ve hidrojeolojik çalışmaların birçok aşamasında kullanılmaktadır. Akarsu, ırmak, dere vb. yüzey sularının akım miktarlarının ölçümünde, barajdan olası su kaçaklarının nere(ler)den olabileceğinin belirlenmesinde, yeraltısuyu hızının hesaplanmasında, yeraltısuyu veya kaynak suyunun beslenme alanının belirlenmesinde, yeraltısuyundaki kirletici kaynağının nedeninin saptanmasında,

yeraltısuyu veya kaynak koruma alanlarının sınırlarının çizilmesinde vb. gibi yüzey veya yeraltısuyu hareketini ilgilendiren tüm çalışmalarda izleme teknikleri kullanılmaktadır.

Yüzey veya yeraltısuyu izleme çalışmaları genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, izleme deneyinin yapılacağı alanda bir ön çalışma yapmaktır. Ön çalışma sırasında: alana izleyici verme (enjekte) ve izleyici gözlem noktalarının belirlenmesi, eğer alanda bu

noktalar (kuyu vb.) yoksa izleme deneyi öncesi alandaki eksiklerin saptanarak bu eksikliklerin giderilmesi ve gerekli hazırlıkların yapılması sağlanır. Ön değerlendirme sonrası alanda belirlenen eksikliklerin tamamlanmasından sonra belirlenen noktalardan sistemin (yüzey veya yeraltısuyu) akış yukarısından (mamba) izleyicinin verilmesi ikinci basamağı oluşturmaktadır. Üçüncü aşamada ise, alanda belirlenen ve izleyici verilen noktanın akış aşağısında (mansap) yer alan izleyici gözlem noktalarından su örnekleri alınarak bu su örneklerinde izleyici olup olmadığı ölçülür. İzleme çalışmasının en son aşamasında ise ölçülen izleyici miktarlarının kullanılmasıyla çalışma konusuna göre nicelik (*nicel (kantitatif): sayısal hesaplamaaya ilişkin*) ve/veya nitelik (*nitel (kalitatif): dış görünüş, renk, tat, biçim gibi sayısal olarak deyimlenemeyen ya da ölçülemeyen özellikler*) ilgili değerlendirme ve yorumlar gerçekleştirilir.

İlk izleme deneyi, günümüzden 2000 yıl önce Ürdün Nehri'nin mambaında yer alan kaynakları belirlemek için Ran Krater Gölü'ne tahıl kabuğu, saman vb. atılarak gerçekleştirildiği [Mazor, 1976] tarafından belirtilmektedir. Bu tarihten sonra teknolojik gelişmelere bağlı olarak izleme deneyinde kullanılan aletler ve izleyici tipleri de oldukça gelişmiştir. 1960'lı yılların ortalarına kadar yüzey veya yeraltısuyu izlemesi şamandıra, kimyasal tuzlar ve kirleticiler kullanılarak yapılmıştır. 1960'lı yıllarda sonra ise doğal (*suda yer alan iyonlar, çevresel izotoplar vb.*) ve yapay (*boyalar, tuzlar, sporlar, izotoplar vb.*) izleyiciler kullanılarak yüzey veya yeraltısuyu izleme deneyleri gerçekleştirilmiştir [Wilson vd., 1986].

Sunulan bu çalışmada: yüzey veya yeraltısuyu izlemesinde kullanılan izleyiciler, kullanılacak izleyici miktarı, deney sonunda izleyici kazanım miktarı, izleme deneyi aşamaları ve örnek izleme deneyi çalışması ve sonuçları hakkında genel bilgiler verilmiştir.

2 YÜZEY VE YERALTISUYU İZLEMESİNDE KULLANILAN İZLEYİCİLER

Yüzey veya yeraltısuyu izleme deneyi çalışmalarında kullanılan izleyiciler iki gruba ayrılırlar. Bunlar doğal ve yapay izleyicilerdir (Çizelge 1). Doğal ve yapay izleyiciler hakkında genel bilgiler aşağıda sunulmuştur.

2.1 Doğal İzleyiciler

Suda yer alan mikroorganizmalar, iyonlar ve çevresel izotoplar doğal izleyici olarak adlandırılmaktadır. Doğal izleyicilerle ilgili genel bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Sularda kirlenme sonucu oluşan bakteriyolojik veya virolojik mikroorganizmalar olası kirlilik kaynağının belirlenmesinde oldukça yararlıdırlar. Yeraltısuyu izlemesinde yaygın olarak kullanılan bakteri türleri: *Serratia marcescens*, *Chromobacterium violaceum* ve *Bacillus subtilis*'dir [Ford ve Williams, 1989].

Çizelge 1 - Yüzey ve yeraltısuyu izleme çalışmalarında kullanılan izleyici türleri

Doğal izleyiciler

- Mikroorganizmalar: Bakteriler, virüsler, vb.,
- İyonlar: Klorür (Cl), Florür (F), Bor (B), vb.,
- Çevresel izotoplar: Trityum (^3H), Döteryum (^2H), Oksijen 18 (^{18}O), Karbon 14 (^{14}C), Argon (Ar), Kripton (Kr), vb.

Yapay izleyiciler

- İzotoplar: Trityum (^3H), Brom (^{82}H), Krom (^{51}Cr), İyot (^{131}I), vb.,
- Boyalar (renkli izleyiciler): Na-Fluoresein (Uranin), Rodamin-WT, Eosin, Sulforodamin-B, vb.,
- Tuzlar: Sodyum klorür (NaCl), Lityum klorür (LiCl), Potasyum Klorür (KCl), vb.,
- Sporlar: Likopodyum (*Lycopodium clavatum*), vb.

Suda yer alan iyonlardan klorür (Cl) anyonu özellikle sahil akiferlerinde tuzlu su girişiminin (*salt water intrusion*) belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan doğal izleyicilerdendir. Bunun dışında suda yer alan diğer iyonlar (SO_4 , Ca vb.) da jeolojik koşulların el verdiği ölçüde doğal izleyici olarak kullanılmaktadır.

Suda doğal olarak bulunan kararlı ve radyoaktif çevresel izotoplar^(a) da hidroloji ve izleme çalışmalarında son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevresel izotop terimi: bu izotopların hidrolojik döngü içerisinde suda kendiliğinden doğal yollarla (*herhangi bir insan etkisinin olmadığı*) oluşan izotopları tanımlamak için kullanılmaktadır.

Su molekülünü (H_2O) oluşturan hidrojen atomunun kararlı izotopu olan döteryum (^2H) ve radyoaktif izotopu olan trityum (^3H) ile oksijen atomunun kararlı izotopu olan oksijen-18 (^{18}O) izleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

^(a) Atom numarası aynı, kütle numarası farklı olan atomlara "izotop" denir. Diğer bir deyişle proton sayıları (proton sayısı=atom numarası) aynı, nötron sayıları (kütle numarası=proton sayısı+nötron sayısı) farklı atomlara izotop denir.

Yeraltısuyu çalışmalarında yaygın olarak kullanılan diğer çevresel izotoplar karbon 12, 13 ve 14 (^{12}C , ^{13}C ve ^{14}C)'dür. Bunların dışında daha az sıklık da argon (Ar), klor (Cl), helyum (He), kripton (Kr), azot (N), radyum (Ra), radon (Rn), toryum (Th), ve uranyum (U) izotopları kullanılmaktadır [IAEA, 1983]. Çevresel izotoplar değişik kökene ait karışım sularının belirlenmesi, yeraltısuyunun akım yönü ve hızı hakkında bilgi edinilmesi ve yeraltısuyu yaşının saptanması vb. konularda yaygın olarak kullanılır. Çevresel izotopların hidrojeolojik çalışmalarda kullanılması oldukça kapsamlı konuları içerdiği için sunulan bu çalışmada çevresel izotoplara ayrıntısıyla değinilmemiştir.

Yukarıda belirtildiği üzere, çevresel izotoplar kararlı ve radyoaktif izotoplar olarak ayrılmaktadır. Radyoaktif izotoplar genelde yeraltısuyu yaşının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Radyoaktif izotopların yarılanma ömürleri ($T_{1/2}$) kullanılarak suların yaşı aşağıdaki eşitlikle belirlenebilmektedir.

$$C = C_0 e^{-\lambda t} \rightarrow t = -\lambda^{-1} \ln(C/C_0) \quad (1)$$

Burada:

C: t zaman sonra radyoaktif izotop derişimi,
 C_0 : t=0 anındaki radyoaktif izotop derişimi,
 λ : bozunma sabiti ($\lambda = \ln(2)/T_{1/2} = -\ln(0,5)/T_{1/2}$),
 $T_{1/2}$: radyoaktif izotopun yarılanma ömrü,
t: radyoaktif izotopun bozunması için geçen süredir.

Yeraltısuyu yaşının belirlenmesinde en yaygın olarak kullanılan ve radyoaktif izotop olan trityum (^3H)'un yarılanma ömrü ($T_{1/2}$) 12,43 yıl, karbon-14 (^{14}C)'ün ise 5730 yıl'dır. Hidrojeolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanılan bazı radyoaktif izotopların yarılanma ömürleri ve bozunma sabitleri Çizelge 2'de verilmiştir.

İyon olarak suyun bünyesinde bulunan çevresel izotoplardan döteryum (^2H) ve oksijen-18 (^{18}O) kararlı izotopları da yeraltısularının kökeninin, beslenme alanının ve beslenme yüksekliğinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2 Yapay İzleyiciler

Doğal izleyicilerin yanı sıra çalışmanın amacına ve özelliğine bağlı olarak izleme çalışmalarında yapay izleyiciler de kullanılmaktadır. Yapay izleyiciler, izlenecek sisteme (yüzey veya yeraltısuyu) dışarıdan verilen izleyicilerdir. İzleme deneylerinde kullanılacak olan yapay izleyiciler aşağıda verilen özelliklere sahip olmalıdır.

- Zehirleyici etkisi olmamalı ve sağlığa zarar vermemelidir.

- Suda çözünebilir olmalıdır.
- Çok düşük derişimlerde bile olsa suda belirlenebilmelidir.
- Sularda doğal olarak ya hiç bulunmamalı ya da eser miktarda olmalıdır.
- Sudaki diğer iyonlarla kimyasal tepkimeye girerek çökmemelidir.
- Kullanıldığı ortamdaki sediman (dere yatak sedimanı veya akifer malzemesi) malzemesi tarafından tutulmamalıdır.
- Ucuz olmalı ve kolaylıkla sağlanabilmelidir.

Çizelge 2 - Bazı radyoaktif izotopların yarılanma ömürleri [Browne ve Firestone, 1999; Cook ve Herczeg, 1999]

İzotop	Bozunma Sabiti (λ)		Yarılanma Ömrü ($T_{1/2}$)	
	(yıl^{-1})	(gün^{-1})	(yıl)	(gün)
^{87}Rb	$1,46 \times 10^{-11}$	$4,00 \times 10^{-14}$	$4,75 \times 10^{10}$	$1,73 \times 10^{13}$
^{238}U	$1,55 \times 10^{-10}$	$4,24 \times 10^{-13}$	$4,47 \times 10^9$	$1,63 \times 10^{12}$
^{129}I	$4,41 \times 10^{-8}$	$1,21 \times 10^{-10}$	$1,57 \times 10^7$	$5,73 \times 10^9$
^{36}Cl	$2,30 \times 10^{-6}$	$6,30 \times 10^{-9}$	$3,01 \times 10^5$	$1,10 \times 10^8$
^{234}U	$2,82 \times 10^{-6}$	$7,75 \times 10^{-9}$	$2,46 \times 10^5$	$8,97 \times 10^7$
^{81}Kr	$3,03 \times 10^{-6}$	$9,03 \times 10^{-9}$	$2,29 \times 10^5$	$8,36 \times 10^7$
^{14}C	$1,21 \times 10^{-4}$	$3,31 \times 10^{-7}$	5730	$2,09 \times 10^6$
^{226}Ra	$4,33 \times 10^{-4}$	$1,19 \times 10^{-6}$	1600	$5,84 \times 10^5$
^{39}Ar	$2,58 \times 10^{-3}$	$7,06 \times 10^{-6}$	269	$9,83 \times 10^4$
^{32}Si	$4,95 \times 10^{-3}$	$1,36 \times 10^{-5}$	140	$5,11 \times 10^4$
^{90}Sr	0,0241	$6,65 \times 10^{-5}$	28,78	$1,05 \times 10^4$
^3H	0,0558	$1,53 \times 10^{-4}$	12,43	4540
^{85}Kr	0,0644	$1,77 \times 10^{-4}$	10,756	3929
^{228}Ra	0,121	$3,31 \times 10^{-4}$	5,75	2100
^{35}S	2,89	$7,92 \times 10^{-3}$	0,24	87,51
^{37}Ar	7,23	$1,98 \times 10^{-2}$	0,0959	35,04
^{222}Rn	66,0	0,181	0,0105	3,8235

İzotoplar, boyalar, tuzlar ve sporlar-mayalar gibi yapay izleyiciler de yeraltısuyu çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapay izleyicilerle ilgili genel bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Trityum (^3H), brom (^{82}Br), kükürt (^{35}S), krom (^{51}Cr), skandiyum (^{46}Sc), lantan (^{140}La), iyot (^{131}I) vb. izotoplar yapay olarak suya verilerek yeraltısuyu izleme çalışmalarında kullanılmaktadır. Bu tip izotopların izleme çalışmalarında kullanılmasına sağlık açısından hoş bakılmadığı için kullanımları son yıllarda oldukça azalmıştır. Bu izotopların pahalı ve araziye götürülmelerinin zor olması, sağlık açısından tehlike oluşturması vb. nedenlerle bunların yerine renkli boyaların veya kimyasal izleyicilerin kullanılması önerilmiştir [Ford ve Williams, 1989].

Boylar, 1800'lü yılların sonundan itibaren yeraltısularını izlemek amacıyla karstik bölgelerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [Aley ve Fletcher, 1976: USEPA, 1988]. Boylar, izleme deneylerinde günümüzde de en yaygın olarak kullanılan yapay izleyici tiplerindedir.

Birçok floresan^(b) (ışıkla parılayan, ışık yayan) boya olmasına rağmen, yüzey ve yeraltısuyu izlemelerinde genellikle suya kırmızı renk veren rodamin-WT (*Rhodamine-WT*, kimyasal formül: $C_{29}H_{29}N_2O_5ClNa_2$) ve suya yeşilimsi-sarı renk veren uranın (*sodyum floresein*, kimyasal formül: $C_{20}H_{12}O_5Na_2$) boyları daha yaygın olarak kullanılmaktadır. İzleme deneyi sırasında veya sonunda derlenen su örneklerindeki boya miktarları, belirli bir dalga boyundaki floresan değerini/boya şiddetini ölçen "Fluorometre" olarak adlandırılan aletlerle belirlenmektedir.

Sodyum klorür (NaCl, tuz), yüzey ve yeraltısuyu izleme çalışmalarında ilk ve en yaygın olarak kullanılan yapay tuzlardandır. Sodyum klorür'ün dışında, lityum ve potasyum klorür (LiCl ve KCl) gibi tuzlar da izleme çalışmalarında kullanılmaktadır. İzleme deneyi sırasında veya sonunda derlenen su örneklerindeki tuz miktarları, elektriksel iletkenlik (EC) ölçen aletlerle (EC metre) bağlı olarak (*suyun EC değeri tuz miktarı ile doğrusal olarak artmaktadır*) belirlenebilmektedir.

Spor^(c) ve mayalar^(d) da yüzey ve yeraltısuyu izleme çalışmalarında kullanılmaktadır. Yosun türünden olan ve 30-35 µm'lik çapa sahip olan *Likopodium* (*Lycopodium clavatum*) sporu en yaygın kullanılan spordur. Bu spor suda çözünmez ve 1 g toz halindeki *Likopodium* yaklaşık 80 milyon adet spor içermektedir [Milanovic, 1981]. Bu sporlar değişik renklere boyanarak aynı alanda farklı noktalardan sisteme izleyici verme imkanı sağlamaktadır. Sporların izleyici olarak suya verilmesinden sonra 25 µm'lik ağ gözü açıklığına sahip plankton ağlarıyla örneklenebilmekte ve laboratuvarında mikroskop altında belirlenip, sayılabilmektedir.

^(b) *Floresan*: İngilizce "fluorescent". Uyarılmış bir sistemden, temel hâldeki bir sisteme geçiş sırasında yayılan ışık; ^(c) *Spor*: Yunanca "sporos" = tohum. Bitkilerin ya da bir hücreli hayvanların çok özelleşmiş olan ve hayatın devamını sağlayan üreme yeteneğindeki hücreleri; ^(d) *Maya*: İngilizce "yeast". Ekmek, bira vb. bazı gıdaların üretiminde kullanılan, tomurcuklanmayla çoğalan tek hücreli mantar (Kelimelerin anlamları Türk Dil Kurumu Bilim ve Sanat Terimleri Ana Sözlüğü (<http://tdkterim.gov.tr>)'nden alınmıştır).

Sporların kullanılmasına benzer olarak ekmek mayası (*Saccharomyces cerevisiae*) da izleyici olarak kullanılabilir [Ford ve Williams, 1989].

3 İZLEYİCİ MİKTARI HESABI

Boya ile yüzey veya yeraltısuyunu izleme deneyinde boya miktarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Boya miktarının belirlenmesinin önemi, su örnekleme noktasına veya başka bir deyişle boya gözlem noktasına ölçüm aleti ile belirlenebilecek miktarda boyanın ulaşmasını sağlamaktadır. İzlemede kullanılacak boyanın miktarı; boyanacak su kütlesinin büyüklüğüne, akış hızına, boya enjeksiyon noktası ile boya gözlem noktası arasındaki mesafeye, ortamın jeolojik özelliğine vb. gibi faktörlere bağlıdır.

Çoğu durumda akış hızı, su kütlesinin büyüklüğü gibi bilgiler izleme deneyi öncesi tam belirlenemese de bu parametreler için tahmini değerler kullanarak boya miktarının hesaplanmasında yarar vardır. Birçok araştırmacı tarafından izleme deneyinde kullanılacak boya miktarını hesaplamaya yönelik, değişik parametreler içeren eşitlikler türetilmiştir ([USEPA, 2003]'de boya miktarını hesaplamaya yönelik birçok eşitlik verilmiştir). Bu eşitliklerden en çok kullanılanlarından bazıları aşağıda sunulmuştur. Aşağıda sunulmuş olan bu eşitliklerin birçoğu özellikle karstik ortamlarda gerçekleştirilecek izleme deneylerinde kullanılacak izleyici miktarı hesabına yöneliktir. Pekışmemiş sedimanter ortamlarda (alüvyon vb.) yapılacak izleme deneyi çalışmalarında bu husus dikkate alınmalıdır.

[Aley ve Fletcher, 1976], çözünme kanalları ve kırıklı-çatlaklı ortamda gelişen yeraltısuyu akım sisteminde kullanılacak boya miktarını belirlemek için aşağıdaki eşitliği önermiştir.

$$M = 1,478 [(L Q / V)^{0,5}] \quad (2)$$

Burada:

M : kullanılacak floresein boya miktarı (kg),
L : boya enjeksiyon noktası ile boya gözlem noktası arasındaki mesafe (km),
Q : çıkış noktasındaki debi (m³/s),
V : yeraltısuyu akım hızıdır (m/saat).

Boya miktarını belirlemek için başka bir eşitlik ise aşağıda verilmiş olan Dienart eşitliğidir [Milanovic, 1981].

$$M = L Q C \quad (3)$$

Burada:

M : kullanılacak floresein boya miktarı (kg),

L : boya enjeksiyon noktası ile boya gözlem noktası arasındaki mesafe (km),
Q : çıkış noktasındaki debi (m³/s),
C : boya sabitidir (C = 2,5*10⁻⁹).

[Çelik ve Ünsal, 1996] karstik kireçtaşlarında boya izleme deneyinde kullanılacak boya miktarı hesabı için Ravier'in geliştirdiği eşitliği aşağıda şekilde vermiştir.

$$M = (Q L) / 2V \quad (4)$$

Burada:

M : kullanılacak floresein boya miktarı (kg),
L : boya enjeksiyon noktası ile boya gözlem noktası arasındaki mesafe (m),
Q : çıkış noktasındaki debi (m³/s),
V : yeraltısuyu akım hızıdır (m/gün).

[Stepinac, 1969]'ın çıkış noktasındaki debinin 5 m³/s'ye eşit veya küçük (Q≤5 m³/s) ve boya enjeksiyon noktası ile boya gözlem noktası arasındaki mesafenin 12 km'ye eşit veya büyük (L≥12 km) olduğu durumda boya miktarını belirlemek için önerdiği eşitlik aşağıdadır.

$$M = L (C + Q) \quad (5)$$

Burada:

M : kullanılacak floresein boya miktarı (kg),
L : boya enjeksiyon noktası ile boya gözlem noktası arasındaki mesafe (km),
Q : çıkış noktasındaki debidir (m³/s).
C : C = [1 + (Q / 5)]

İzleyici olarak % 20'lik rodamin-WT kullanılması durumunda [Kilpatrick ve Cobb, 1985]'e göre boya miktarı aşağıdaki eşitlik ile belirlenebilmektedir.

$$V_s = 3,79 \times 10^{-5} \frac{Q(1,5L)}{V} C \quad (6)$$

Burada:

V_s : kullanılacak % 20'lik rodamin-WT hacmi (mL),
Q : debi (ft³/s), (1 ft³=0,028317 m³=28,317 L)
L : boya gözlem uzaklığı (ft) (1 ft=0,3048 m),
V : yeraltısuyu akım hızı (ft/s),
C : boya gözlem noktasında ölçülmek istenen boya pik derişim değeridir (µg/L).

[Worthington ve Smart, 2003]'ün karstik bölgelerde gerçekleştirilmiş olan 203 adet izleme deneyinde kullanılan boya miktarı ve izleyici pik derişimlerinden yararlanarak türettiği eşitlik aşağıda sunulmuştur.

$$M = 19 [(L Q C)^{0,95}] \quad (7)$$

Burada:

M : kullanılacak floresein boya miktarı (g),
L : boya enjeksiyon noktası ile boya gözlem noktası arasındaki mesafe (m),
Q : çıkış noktasındaki debi (m³/s),
C : boya gözlem noktasında ölçülmek istenen boya pik derişim değeridir (g/m³=mg/L).

İzleme deneyinde kullanılacak boya miktarının (M) belirlenmesine yönelik bir örnek aşağıda verilmiştir. Boya miktarı (M) hesabı için yukarıdaki verilmiş olan 7 numaralı eşitlik kullanılmıştır.

Örnek: Boya enjeksiyon noktası ile boya ölçümü yapılacak 250 L/s'lik (Q) debili kaynak arası mesafe (L) 500 m'dir. Boya ölçümü yapılacak kaynakta boya pik derişiminin (C) 0,5 mg/L olması için kullanılması gereken boya miktarı (M) kaç kg'dır? (Not: 0,03 mg/L derişimindeki boya (sodyum floresein: Uranin) suda gözle görülebilmektedir)

$$M = 19 [(L Q C)^{0,95}]$$

M : kullanılacak floresein boya miktarı (g),
L : boya enjeksiyon noktası ile boya gözlem noktası arasındaki mesafe (500 m),
Q : çıkış noktasındaki debi (0,25 m³/s),
C : boya gözlem noktasında istenen boya pik derişim değeridir (0,5 g/m³ = 0,5 mg/L)

$$M = 19 [(500 \cdot 0,25 \cdot 0,5)^{0,95}] = 965,7 \text{ g} \cong 1 \text{ kg}$$

Yukarıda verilen tüm eşitlikler yeraltısuyu izleme çalışmalarında kullanılacak boya miktarının hesabına yöneliktir. Nehir, dere, akarsu gibi yüzey sularının izlenmesinde kullanılacak boya miktarı hesabına yönelik olarak [Kilpatrick, 1970] tarafından türetilmiş eşitlik aşağıda verilmiştir (eşitlik [Cox vd., 2003]'den alınmıştır).

$$H = 3,4 \times 10^{-4} \left(\frac{QL}{V} \right)^{0,94} C \quad (8)$$

Burada:

H : Kullanılacak % 20'lik rodamin-WT boyasının hacmi (L),
Q : nehir akımı (ft³/s), (1 ft³=0,028317 m³=28,317 L),
L : boya gözlem uzaklığı (mil), (1 mil=1609,344 m),
V : ortalama nehir akım hızı (ft/s) (1 ft=0,3048 m),
C : boya gözlem noktasında ölçülmek istenen boya pik derişim değeridir (µg/L).

Nehir, dere, akarsu gibi yüzey sularının boya ile izlenmesinde diğer önemli konu ise verilen boyanın yüzey suyunda tam karışım yapıp yapmadığıdır. Yüzey suyu izlenmesinde boya örnekleme/ölçümünün yapılacağı yer boyanın yüzey suyuna tam karışım yaptığı noktanın mansabında olmalıdır. Dereye verilen boyanın en uygun biçimde dere suyuna karışacağı mesafe [Yotsukura ve Cobb, 1972] ve [Fischer, 1979] tarafından türetilmiş ve aşağıda verilmiş olan eşitlik ile hesaplanabilmektedir. Eşitlik, boyanın derenin ortasından verildiği, boyanın yanal olarak tam karıştığı varsayımına dayanmaktadır [Kilpatrick ve Wilson, 1989].

$$L_o = 0,1 \frac{V B^2}{E_z} \quad (9)$$

Burada:

L_o : boya karışımının sağlanacağı en uygun dere uzunluğu (ft) (1 ft=0,3048 m),
 V : ortalama nehir akım hızı (ft/s),
 B : ortalama nehir genişliği (ft),
 E_z : yatay karışım katsayısıdır (ft²/s) (Çizelge 3),
(1 ft²=0,09290304 m²)

Çizelge 3 - Ortalama akış derinliği (d) ve eğim (s) için yatay karışım katsayısı (E_z) değerleri [Kilpatrick ve Wilson, 1989]

Derinlik d (ft)	Eğim, s (ft/ft)					
	0,001	0,002	0,004	0,006	0,008	0,010
1,0	0,04	0,05	0,07	0,09	0,10	0,11
2,0	0,10	0,14	0,20	0,25	0,29	0,32
3,0	0,19	0,26	0,37	0,46	0,52	0,59
4,0	0,29	0,40	0,57	0,70	0,82	0,90
5,0	0,40	0,56	0,80	0,98	1,13	1,26
6,0	0,52	0,74	1,05	1,29	1,48	1,66
8,0	0,81	1,14	1,62	1,98	2,29	2,56
10,0	1,13	1,60	2,26	2,77	3,20	3,57
15,0	2,07	2,94	4,15	5,08	5,87	6,56

Not: $E_z = 1,13 d^{3/2} s^{1/2}$
(d: ortalama nehir derinliği, s: nehir yatak eğimi)

4 İZLEME DENEYİ AŞAMALARI, FLUOROMETRE ALETİ VE BAZI HESAPLAMALAR

Aşağıda, izleme deneyi gerçekleştirme aşamaları, izleme deneyinde kullanılan boyanın ölçümünde kullanılan alet (fluorometre) ve bazı hesaplamalarla ilgili genel bilgiler verilmiştir.

4.1 İzleme Deneyi Aşamaları

İzleme deneyi çok genel olarak: yüzey veya yeraltısuyu gibi bir su kütlelerinin akışının, akış yönünün ve akış hızının belirlenmesi için gerçekleştirilmektedir. İzleme deneyine başlamadan önce deneyin gerçekleştirileceği alanın jeolojik ve hidrojeolojik yapısının çok iyi irdelenmesi gereklidir. Bölgedeki genel yeraltısuyu akım yönü, suların memba ve mansap ilişkileri izleme deneyi öncesinde bir kavramsal modelle mümkün olduğu kadar ortaya konmalıdır.

Deneyin gerçekleştirileceği alanın yukarıda bahsedilen özellikleri genel olarak saptandıktan sonra alandaki en uygun boya enjeksiyon ve boya gözlem noktaları belirlenir. Arazide boya enjeksiyon noktasının ve boya gözlem noktasının belirlenmesinden sonraki aşama, boyanın suya verilemeden önce suda çözünerek enjeksiyona hazır hale getirilmesi işlemidir. Enjekte edilecek boya genellikle izleme deneyinin yapılacağı alanda hazırlanır. Rüzgarlı ve yağışlı havalarda boya hazırlanmamalıdır. Boyanın suda çözünmesi için plastik bidonlar veya variller kullanılır. 1 kg boyanın çözünmesi için yaklaşık 50 L suya ihtiyaç vardır. Floresein boyanın çözünürlüğünü arttırmak için boya ilk olarak alkolde çözülür (1 kg boya için 5 L alkol). Alkol ve suda çözünen boya, enjeksiyon noktasından ilgili su kütlelerine (yüzey veya yeraltısuyu) verilir. Eğer boya bir kuyu aracılığı ile veriliyorsa, boyanın tamamen borulardan yıkanıp akifere karıştığından emin olmak için kuyuya belirli bir miktar daha su verilir. Boya enjeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra tüm boya paketleme malzemesi ve boya hazırlarken kullanılan malzeme imha edilir. Boya hazırlamada yer alan tüm görevliler tek parçalı ve başlıklı giysiler (tulum vb.) kullanılmalı ve boya enjeksiyon işleminden sonra bu giysiler de imha edilmelidir. Boya hazırlamada yer alan görevliler, boya taşımada kullanılan araçlar boya enjeksiyon işleminden sonra test alanından uzaklaştırılmalıdır. Boya hazırlama aşamasında yer alan görevliler ve araçlar kesinlikle boya gözlem noktalarının veya başka bir deyişle su örnekleme noktalarının yakınına gelmemelidirler. Boya izleme deneyini planlayan ve yürüten kişiler deney süresi boyunca boya hazırlama ve enjeksiyon ekibi ile bir araya gelmemeli ve bu kişilerle temastan kaçınılmalıdır. Boya izleme deneyini planlayan ve yürüten kişiler boyanın taşınması ve hazırlanmasında yer alan ekibe 20-30 m'den daha fazla yaklaşmamalıdır [Milanovic, 1981].

4.2 Fluorometre Aleti

Boya enjeksiyon işleminden sonra boya gözlem noktalarından belirli zaman aralıklarıyla su örneği alımı işlemi başlar. Alınan su örneklerindeki boya miktarı fluorometre olarak adlandırılan aletlerle ölçülür. Yüzeysel ve yeraltı suyu çalışmalarında yaygın olarak kullanılan rodamin-WT (*Rhodamine-WT*, kimyasal formül: $C_{29}H_{29}N_2O_5ClNa_2$) ve uranın (*sodyum floresein*, kimyasal formül: $C_{20}H_{12}O_5Na_2$) boyaları hakkında genel bilgiler aşağıda sunulmuştur.

Filtreli fluorometre aleti, suda bulunan floresan özelliğe sahip boyadaki elektronların ilk olarak ultraviyole (*mor ötesi*) lamba ile uyarılması (*excitation*) ve elektronların üst orbitale (*elektronun atom çekirdeği etrafında en fazla bulunduğu ve takip ettiği yörünge*) sıçramasını, daha sonra bu elektronların ışın yayarak (*emmission*) tekrar kararlı hale (*ground state*) gelmesi sırasında açığa çıkan/yayılan ışığın bağıl şiddetini ölçer. Her boyanın kendine özgü uyarılma ve yayılma dalga boyu (λ) değeri vardır. Örneğin: rodamin-WT floresan boyasının uyarılma dalga boyu 558 nm ve yayılma dalga boyu 583 nm, uranın'ın ise uyarılma dalga boyu 492 nm ve yayılma dalga boyu 513 nm'dir. Bu özellikten yararlanılarak suda bulunan boya şiddeti/yoğunluğu fluorometre aleti ile kolayca ölçülebilmektedir. Tüm boyalar görünür ışık bölgesinde (380-760 nm) dalga boyuna sahip ışık yayarlar (Şekil 1). Bu yüzden rodamin-WT floresan boyası suda kırmızı, uranın ise yeşil renk vermektedir. İzleme deneylerinde en çok kullanılan bazı boyalarla ilgili bilgiler Çizelge 4'de verilmiştir.

Filtreli fluorometre aleti 6 temel bileşenden oluşur (Şekil 2). Değişik boyaların (rodamin-WT, uranın, eosin vb.) ölçümünde, alet üzerinde yer alan birincil (bk. Şekil 2, "2.Birincil filtre") ve ikincil (bk. Şekil 2, "4.İkincil filtre") filtrelerin değiştirilmesi ile boyaya özgü uyarılma ve yayılma dalga boyları ayarlanabilmektedir.

4.3 Bazı Hesaplamalar

Boya tipine göre belirli bir dalga boyunda yansıtılan ışığın şiddeti suda bulunan boyanın miktarı ile doğru orantılıdır. Eğer, standart çözeltiler (derişim değeri bilenen çözeltiler) hazırlanarak bu çözeltilere ait boya derişimi-boya şiddeti grafiği çizilirse su örneğindeki boya derişimi de belirlenebilir. Şekil 3'te değişik boya derişimlerine (0,0001 mg/L, 0,001 mg/L, 0,01 mg/L, 0,1 mg/L vb.) sahip standartlar hazırlanarak fluorometrede değişik ölçeklerde okunarak boya derişimine karşılık boya şiddeti

grafığı hazırlanmıştır. Örnek olarak: izleme deneyi sonucu fluorometrede x3 ölçeğinde okunan 20 boya şiddeti değerine karşılık gelen boya derişimi bu grafik kullanılarak 0,0025 mg/L olarak bulunur.

Bu grafik oluşturulurken istenen standart derişimde boya hazırlamak için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir.

$$C_n = C_i \frac{W_d}{V_w + V_d} = C_i S_g \frac{V_d}{V_w + V_d} \quad (10)$$

Burada:

C_n : yeni boya derişimi ($\mu\text{g/L}$),

C_i : ilksel boya derişimi ($\mu\text{g/L}$),

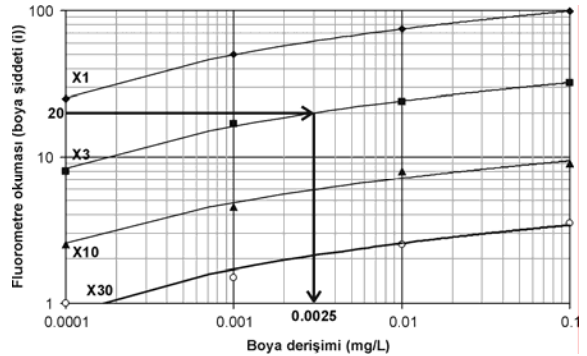
V_w : eklenen seyreltici (saf su) hacmi (mL),

V_d : eklenen boya çözeltisi hacmi (mL),

W_d : ilksel çözelti kütlesi (g),

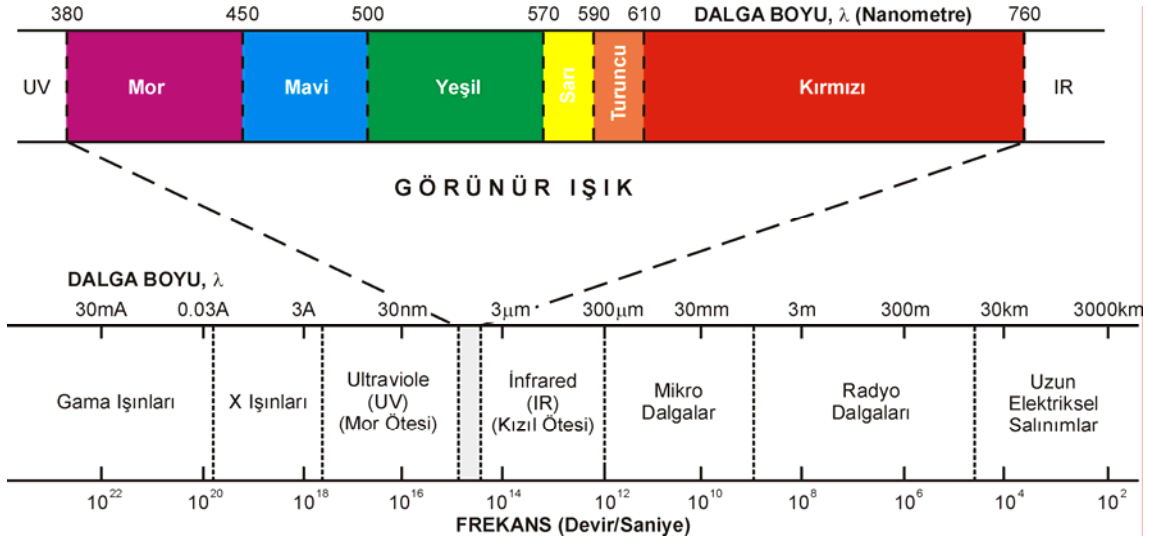
S_g : ilksel boya çözeltisinin yoğunluğudur (% 20'lik rodamin-WT için=1,19 g/cm³, uranın için=1,53 g/cm³).

Her yeni standart hazırlandığında elde edilen yeni boya derişimi (C_n) bir sonraki seyreltme işlemi için ilksel boya derişimi (C_i) olmaktadır ve böylelikle istenilen derişime kadar standart hazırlamak mümkün olabilmektedir.



Şekil 3 - Değişik boya derişimlerine karşılık gelen fluorometre okumaları

İzleme deneyi çalışmalarında izleyici derişim değerleri, debi vb. gibi parametreler zamana karşı ölçülürse nicel (sayısal) değerlendirmeler de yapmak mümkündür. Eğer izleme deneyi sırasında debi miktarı da ölçülürse verilen izleyicinin ne kadarının örnekleme noktalarından geri alındığı belirlenebilir. Böylece izleyici verilen nokta ile gözlenen nokta arasındaki ilişki daha net ortaya konabilir.

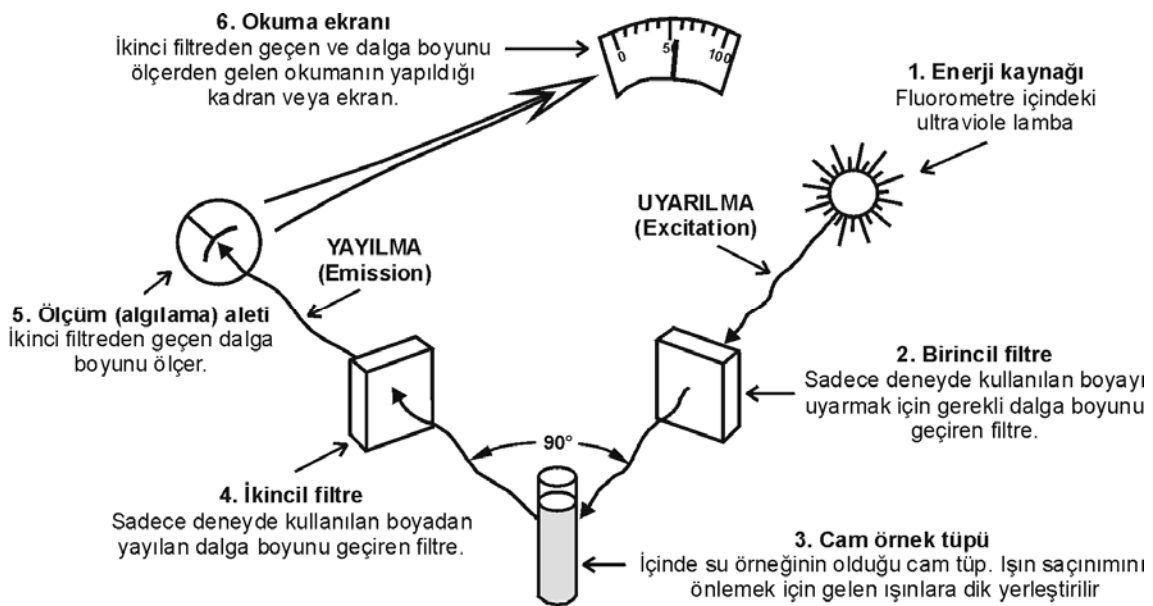


Şekil 1 - Görünür spektrumun genişletilmiş haliyle elektromanyetik spektrum [Wilson vd., 1986]
(1 nm=1 nanometre=10⁻⁹ m, 1 µm=1 mikrometre=10⁻⁶ m, 1Å=1 Angstrom=10⁻¹⁰ m)

Çizelge 4 - Bazı floresan boyalara ait bilgiler [Behrens, 1986: Ghergut vd., 2005]

Boya Adı	En çok uyarılma dalga boyu, λ (nm)	En çok yayılma dalga boyu, λ (nm)	Belirleme sınırı (µg/L)	Sedimanda tutulma	Renk indeksi	CAS No. ⁽¹⁾
Uranin	492	513	0,002	Çok düşük	Acid Yellow 73	518-47-8
Rodamin-WT	558	583	0,006	Orta	Acid Red 388	37299-86-8
Rodamin-B	555	582	0,006	Orta	Basic Violet 10	81-88-9
Sülfo Rodamin-G	535	555	0,005	Orta	Acid Red 50	5873-16-5
Sülfo Rodamin-B	560	584	0,007	Orta	Acid Red 52	3520-42-1
Eosin	515	535	0,010	Düşük	Acid Red 87	17372-87-1

⁽¹⁾ CAS No (Chemical Abstracts Service Registry Number): kimyasal bileşikler, polimerler, biyolojik dizinler, karışımlar ve alaşımlar için kullanılan tek tanımlayıcı sayılardır.



Şekil 2 - Filtreli fluorometrelerin temel bileşenleri [Wilson vd., 1986]

Eğer sisteme (yüzey veya yeraltısuyuna) verilen izleyicinin tamamı gözlem noktasından sağlanırsa bu iki nokta arasında % 100 ilişki vardır denebilir. Ama bazı nedenlerden (izleyicinin sedimanda tutulması, izleyicinin değişik akım yollarını kullanarak örnekleme noktasına gelmemesi vb.) dolayı birçok çalışmada % 100 izleyici geri kazanımı (tracer recovery) mümkün olmaz. İzleyici geri kazanımının ne kadar olduğu aşağıdaki eşitlik [Gaspar, 1987] veya zaman-izleyici derişim grafiği altında kalan alan hesaplanarak bulunabilir.

$$M = \int_0^{\infty} Q(t)C(t)dt \quad (11)$$

Burada:

M: gözlem/ölçüm noktalarından geri kazanılan izleyici miktarı,
Q: debi,
C: t zamanındaki izleyici derişimidir.

Eğer debi (Q) sabit ise eşitlik 11 aşağıdaki gibi olur.

$$M = Q \int_0^{\infty} C(t) dt \quad (12)$$

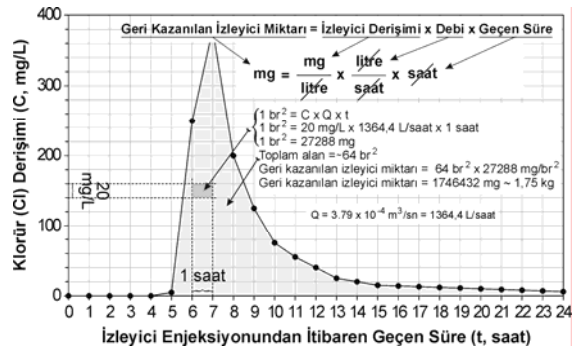
İzleme deneyinde kullanılan boyanın geri kazanımına bir örnek aşağıda sunulmuştur. verilmiştir.

Örnek: Aşağıda tuz (NaCl) ile gerçekleştirilmiş olan bir izleme deneyinde ölçülmüş zaman, debi ve klorür değerleri verilmiştir (Çizelge 5). Deney sonucu zamana karşı ölçülen izleyici derişim değerleri grafiği Şekil 4'de sunulmuştur. Deneyde 10 kg tuz (NaCl) kullanılmıştır (bu miktarın yaklaşık 3,64 kg'ı klorür (Cl)'dür). Deney sonunda gözlem noktasında geri kazanılan izleyici miktarı ve yüzde hesabı aşağıda verilmiştir. Geri kazanılan izleyici miktarı Eşitlik 11'de verilen formül ile hesaplanmıştır.

Çizelge 5'de en altta verilen toplam değerlerden de anlaşılacağı üzere izleme deneyi sonucunda $M = 1,75 \times 10^6$ mg = 1,75 kg izleyici (Cl) gözlem noktasında belirlenmiştir. İzleme deneyi başında, izleyici olarak enjeksiyon noktasından sisteme verilen 3,64 kg Cl'ün ancak % 48'i olan 1,75 kg Cl geri kazanılmıştır. % 52'lik (1,89 kg) kısım ya sistemdeki malzeme (kil, silt vb.) tarafından tutulmuş ya da değişik yeraltısuyu akım yolu ile diğer yönlere gitmiş şeklinde yorumlanabilir.

Çizelge 5 - Zaman, debi ve izleyici derişim değerleri

Örn. No	Zaman t (saat)	Zaman Aralığı dt (s)	Debi Q (m ³ /s)	Cl Derişimi C (mg/m ³)	CxQ (mg/s)	CxQxd t (mg)
1	0,00	0	3,79x10 ⁻⁴	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰
2	1,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰
3	2,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰
4	3,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰
5	4,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰	0,00x10 ⁰
6	5,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	5,00x10 ³	1,89x10 ⁰	6,82x10 ³
7	6,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	2,50x10 ⁵	9,46x10 ¹	3,41x10 ⁵
8	7,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	3,80x10 ⁵	1,44x10 ²	5,18x10 ⁵
9	8,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	2,00x10 ⁵	7,57x10 ¹	2,73x10 ⁵
10	9,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	1,25x10 ⁵	4,73x10 ¹	1,71x10 ⁵
11	10,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	7,50x10 ⁴	2,84x10 ¹	1,02x10 ⁵
12	11,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	5,50x10 ⁴	2,08x10 ¹	7,50x10 ⁴
13	12,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	4,00x10 ⁴	1,51x10 ¹	5,46x10 ⁴
14	13,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	2,50x10 ⁴	9,46x10 ⁰	3,41x10 ⁴
15	14,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	2,00x10 ⁴	7,57x10 ⁰	2,73x10 ⁴
16	15,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	1,50x10 ⁴	5,68x10 ⁰	2,05x10 ⁴
17	16,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	1,40x10 ⁴	5,30x10 ⁰	1,91x10 ⁴
18	17,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	1,30x10 ⁴	4,92x10 ⁰	1,77x10 ⁴
19	18,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	1,20x10 ⁴	4,54x10 ⁰	1,64x10 ⁴
20	19,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	1,10x10 ⁴	4,16x10 ⁰	1,50x10 ⁴
21	20,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	1,00x10 ⁴	3,79x10 ⁰	1,36x10 ⁴
22	21,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	9,00x10 ³	3,41x10 ⁰	1,23x10 ⁴
23	22,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	8,00x10 ³	3,03x10 ⁰	1,09x10 ⁴
24	23,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	7,00x10 ³	2,65x10 ⁰	9,55x10 ³
25	24,00	3600	3,79x10 ⁻⁴	6,00x10 ³	2,27x10 ⁰	8,19x10 ³
Toplam:					4,85x10 ²	1,75x10 ⁶



Şekil 4 - Zamana karşı ölçülen izleyici derişim değerleri

5 İZLEME DENEYİNE BİR ÖRNEK

Bir göletten olan su kaçağının nedeninin belirlenmesi amacıyla boya izleme deneyi yapılmıştır. İzleme deneyinin amacı: memba tarafında yer alan kil blanketin işlevini yerine getirip getirmediğinin ve gölet gövdesinden bir su kaçağının olup olmadığının belirlenmesidir. Deneyde izleyici olarak Na-fluoresein (Uranin) boyası kullanılmıştır. Yaklaşık 8 kg uranın suda çözünerek gölet gövdesi ile suyun birleştiği noktadan gölet suyuna verilmiştir (Foto 1).

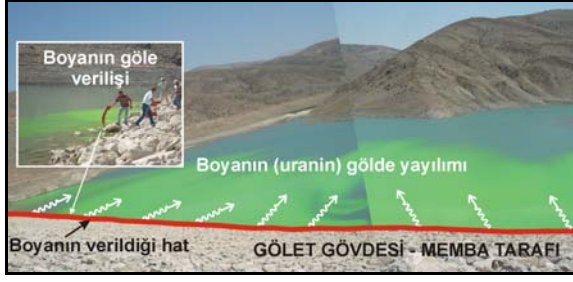


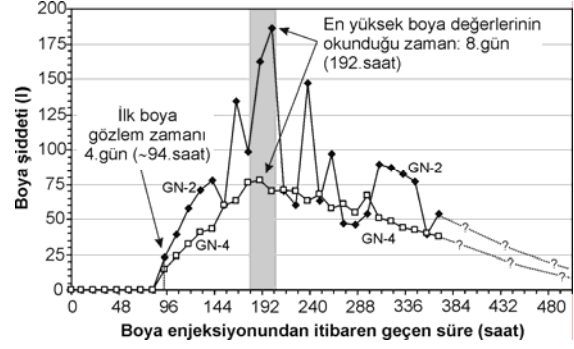
Foto 1 - Gövde ile gölet suyunun birleştiği noktalardan verilen boyanın gölde yayılımı

Gölet suyuna boya enjeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra gölet gövdesinin mansap tarafında belirlenen 4 noktada (gövde üstü kuyusu (GN-1), topuk dreni (GN-2), kaynak (GN-4) ve sol sahil mansap kuyusu (GN-3)) su örnekleme işlemine başlanmıştır (Foto 2).



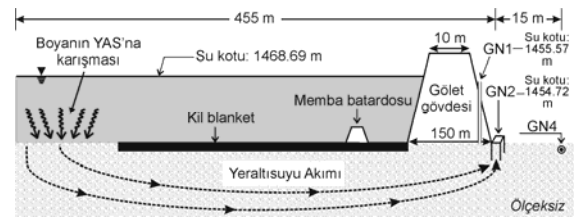
Foto 2 - Boya izleme deneyinde kullanılan gözlem noktaları

Su örnekleme periyodu ilk 2 gün için sık aralıklı tutulmuş ve 15, 30, 60, 120 dakikada bir yapılmıştır. İkinci günün sonunda ise örnekleme zaman aralığı düzenli olarak arttırılmış ve deney sonuna kadar 12 saat'te bir olacak şekilde örnekleme periyodu seçilmiştir. İzleme deneyi çalışmaları sonrası elde edilen zaman-boya şiddeti (yoğunluğu) grafiği Şekil 5'de verilmiştir. İzleme deneyinin başlangıcından itibaren yaklaşık 4 gün (~94 saat) sonra GN-2 (topuk dreni) ve GN-4 (kaynak) numaralı gözlem noktalarına boyanın ulaştığı belirlenmiştir. Gövde üzerinde yer alan GN-1 ve göletin mansap tarafında sol sahilde yer alan GN-3 gözlem kuyularında ise tüm analizler süresince (~15 gün boyunca) boyaya rastlanmamıştır.



Şekil 5 - İzleme deneyine ait zaman-boya şiddeti grafiği

Göletin memba tarafına en yakın (~45-50 m) olan GN-1 ve GN-3 gözlem noktalarında boyaya rastlanmaması, gölet gövdesinden bir su kaçağı olmadığına işaret etmektedir. Boyanın tüm göl alanına dağılması sonucu, boyanın kil blanketin sonlarına doğru olan bölgeden yeraltısuyuna ulaştığı düşünülmektedir. Bu düşüncenin sebebi, topuk drenajının bulunduğu noktadaki GN-2 numaralı gözlem noktasına boyanın oldukça geç sayılabilecek zamanda (~4 gün) ulaşmasıdır. Yukarıdaki yoruma benzer olarak, gövdede herhangi bir su kaçağı/sızıntısı olması durumunda GN-2 numaralı gözlem noktasına 4 günden daha kısa zamanda boya geliş gözlenmeliydi. Bu nedenle, GN-2 ve GN-4 numaralı gözlem noktalarında boyanın 4 gün sonunda gözlenmesi, bu boyanın daha uzak noktalardan yeraltısuyu sistemine girdiği şeklinde yorumlanabilir ve kil blanketin geçirimsiz olduğu varsayımından hareketle, boyanın yeraltısuyu sistemine kil blanketin daha gerilerinden girdiği düşünülebilir (Şekil 6).



Şekil 6 - Yeraltısuyu hareketinin şematik kesitte gösterimi

Boyanın yeraltısuyu sistemine kil blanketin daha gerilerinden girdiği varsayımı ve elde edilen veriler ışığında yeraltısuyu akım hızı (V, m/gün) ve akifer ortamının hidrolik iletkenlik (K, m/s) değerleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Hesaplanan bu parametreler Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 6 - Boya izleme deneyinde kullanılan veriler ve hesaplama sonuçları

	Gözlem Noktaları →	GN-2	GN-4
I	Boya enjeksiyon noktasına olan uzaklık (X, m)	455	470
II	Boyanın ilk geliş zamanı (t, gün)	3,91	3,91
III	Yeraltısuyu akım hızı (V=X/t, m/gün) [I/II]	116,4	120,2
IV	Göletteki su kotu (h _{gölet} , m)	1468,69	1468,69
V	Kuyudaki su kotu (h _{kuyu} , m)	1455,57	1454,72
VI	Hidrolik eğim (i, boyutsuz) [(IV-V)/I]	0,029	0,029
VII	Hidrolik iletkenlik (K, m/gün) [III/VI]	4014	4145
VIII	Hidrolik iletkenlik (K, m/s) [VII/86400]	4,65*10 ⁻²	4,80*10 ⁻²

- Ortalama yeraltısuyu akım hızı (V) : 118,3 m/gün
- Ortalama hidrolik iletkenlik (K) : 4,73*10⁻² m/s

Açıklama: Çizelgedeki III, VI ve VII. sıradaki değerler eşitlik 13 ' de verilen denklemlerle hesaplanmıştır.

Yeraltısuyu akım hızı (V) ve akifer ortamının hidrolik iletkenlik (K) değerleri aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır:

$$V=X/t \rightarrow Q=A*K*i \rightarrow Q/A=V=K*i \quad (13)$$

Burada:

V : yeraltısuyu akım hızı (m/gün),

X : boya enjeksiyon noktası ile boya gözlem noktası arasındaki mesafe (m),

t : boyanın ilk gözlemlendiği zaman (gün),

Q : debi (m³/gün),

A : yeraltısuyu akımına dik birim kesit alanı (m²),

i : hidrolik eğim (boyutsuz) (i=dh/L, dh: iki su kotu arasındaki fark, L: iki su kotu arasındaki yatay mesafe),

K : hidrolik iletkenliktir (m/gün).

GN-2 ve GN-4 numaralı gözlem noktaları ve boyanın ilk geliş zamanı (3,91 gün) baz alınarak yapılan hesaplamalar sonucu ortalama yeraltısuyu akım hızı (V) 118,3 m/gün ve ortalama hidrolik iletkenlik (K) 4,73*10⁻² m/s olarak bulunmuştur. Bu değerler boyanın ilk tespit edildiği zamana (t=3,91 gün) göre hesaplanan değerler olup, en büyük yeraltısuyu hızını ve hidrolik iletkenlik değerini ifade etmektedir. En fazla boyanın geldiği 8.gün (Şekil 5) yeraltısuyunun ortalama akım hızı olduğu varsayılırsa, bu durumda da ortalama yeraltısuyu akım hızı (V) 57,9 m/gün ve ortalama hidrolik iletkenlik (K) değeri ise 2,31*10⁻² m/s olmaktadır.

Yukarıda en kısa (3,91 gün) ve ortalama (8 gün) boya geliş zamanı kullanılarak yapılan

hesaplamalar ~10⁻² m/s'lik bir hidrolik iletkenlik (K) değerine sahip bir akiferi işaret etmektedir. Bu büyüklükte bir hidrolik iletkenlik (K) değerine sahip akifer birimi [Bear, 1988] tarafından "geçirimli, iyi boylanmış çakıllı, iyi akifer" olarak tanımlanmaktadır.

6 GENEL DEĞERLENDİRME

Genel Müdürlüğümüz bünyesindeki tüm bölgelerimizde Daire Başkanlığımız tarafından gerçekleştirilen izleme deneyi çalışmaları hidrolojik ve hidrojeolojik incelemelerin birçok aşamasında kullanılmaktadır. İzleme çalışmalarının ilk ve en önemli basamağı: ön incelemenin yapılması ve bu ön inceleme sonucu izleme deneyinin planlanmasıdır. İzleme deneyine başlamadan önce ön incelemeyle, deneyin gerçekleştirileceği alanın jeolojik ve hidrojeolojik yapısının çok iyi irdelenmesi, alandaki genel yeraltısuyu akım yönünün, suların memba ve mansap ilişkilerinin bir kavramsal modelle mümkün olduğu kadar ortaya konması gerekmektedir. Bu işlemlerin yapılmasıyla izleme deneyi sorunsuz olarak gerçekleştirilebilmekte ve deney sonunda daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir.

7 KAYNAKLAR

- [1] Aley, T. and Fletcher, M.W., 1976, "The Water Tracers Cookbook: Missouri", Speleology, Vol. 16, Mo. 3, p. 1-32.
- [2] Bear, J., 1988, Dynamics of Fluids in Porous Media, Courier Dover Publications, 784 p.
- [3] Behrens, H., 1986, "Water Tracer Chemistry - A Factor Determining Performance and Analytics of Tracers", In: Proc. SUWT (Symposium on Underground Water

- Tracing), Inst. Geol. Min. Explor., p. 121-133, Athens.
- [4] Browne, E. and Firestone, R.B., 1999, Table of Isotopes, 8th Edition, Published by Wiley and Sons, 1056 p., New York.
- [5] Cook, P.G. and Herczeg, A.L. (Editors), 1999, Environmental Tracers in Subsurface Hydrology, Published by Kluwer Academic Publishers, 529 p., USA.
- [6] Cox, M.H., Mendez, G.O., Kratzer, C.R. and Reichard, E.G., 2003, "Evaluation of Tracer Tests Completed in 1999 and 2000 on the Upper Santa Clara River, Los Angeles and Ventura Counties, California", U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 03-4277, Sacramento, California, USA.
- [7] Çelik, M. ve Ünsal, N., 1996, "Girdev Gölü-Kazanpınarı Kaynağı Arasındaki (Antalya) Allohton Birimlerde Yeraltı Suyu Dolaşımının İncelemesi", Türkiye Jeoloji Bülteni, Cilt: 39, Sayı: 1, 69-74.
- [8] Fischer, H.B., 1979, Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, 483 p., New York, USA.
- [9] Ford, D.C., and Williams, P.W., 1989, Karst Geomorphology and Hydrology, Published by Unwin Hyman Ltd., 601 p., London, UK.
- [10] Gaspar, E., 1987, "Modern Trends in Tracer Hydrology", Vol. II, Boca Raton, Fla.: CRC Press. 137 p.
- [11] Ghergut, I., Sauter, M., Lodemann, M. and McDermott, C.I., 2005, "The Dual-Tracer Push-Pull Method for Characterizing Geothermal Reservoirs", Geophysical Research Abstracts, Vol. 7, Abstract No: 10225,
- [12] IAEA (International Atomic Energy Agency), 1983, Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology, Technical Reports Series, No. 91, 452 p., Vienna, Austria.
- [13] Kilpatrick, F.A. and Cobb, E.D., 1985, Measurement of Discharge Using Tracers, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States, Geological Survey, Book 3, Chapter A16, Printed by U.S. Government Printing Office, Denver, Colorado, USA. 52 p.
- [14] Kilpatrick, F.A. and Wilson, J.F., 1989, Measurement of Time of Travel in Streams By Dye Tracing, Chapter A9, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Printed by U.S. Government Printing Office, Denver, Colorado, USA.
- [15] Kilpatrick, F.A., 1970, "Dosage Requirements for Slug Injection of Rhodamine-Ba and WT Dyes in Geological Survey Research", U.S. Geological Survey Professional Paper, 700-B, p. 250-253, USA.
- [16] Mazor, E., 1976, "The Ram Crater Lake - A Note on The Revival of a 2000 Year Old Groundwater Tracing Experiment", In: Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology, IAEA, p. 179-181, Vienna, Austria.
- [17] Milanovic, P., 1981, Karst Hydrogeology, Water Resources Publications, 434 p., Colorado, USA.
- [18] Stepinac, A., 1969, Examples of Determination of Void Volume in Karst Formations, Proceedings Book "Karst Hydrology and Water Resources", WRP, Colorado, USA:
- [19] USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1988, Application of Dye-Tracing Techniques for Determining Solute-Transport Characteristics of Ground Water in Karst Terranes, Prepared By USEPA Ground-Water Protection Branch-Region IV, 117 p., Atlanta, Georgia, USA.
- [20] USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2003, "Tracer-Test Planning Using The Efficient Hydrologic Tracer-Test Design (EHTD) Program", National Center for Environmental Assessment, Washington, DC, EPA/600/R-03/034 (Available from: National Technical Information Service: <http://www.epa.gov/ncea>), 175 p., USA.
- [21] Wilson, J.F., Cobb, E.D. and Kilpatrick, F.A., 1986, Techniques of Water-Resources Investigations of the USGS, Chapter A12: Fluorometric Procedures For Dye Tracing, Book 3: Applications of Hydraulics, Department of The Interior, 33 p., Denver, USA.
- [22] Worthington, S.R.H. and Smart, C.C., 2003, "Empirical Determination of Tracer Mass For Sink to Spring Tests in Karst", Published in "Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts on Karst", Editor: B.F. Beck, Geotechnical Special Publication No. 122, American Society of Civil Engineers, p. 287-295, Huntsville, Alabama, USA.
- [23] Yotsukura, N. and Cobb, E.D., 1972, Transverse Diffusion of Solutes in Natural Streams, U.S. Geological Survey Professional Paper 582-C, 19 p., USA.

OPERASYONEL MODAL ANALİZ YÖNTEMİ KULLANILARAK BERKE BARAJI'NIN DEPREM PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Alemdar BAYRAKTAR

Prof. Dr., Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, TÜRKİYE
alemdar@ktu.edu.tr

Barış SEVİM

Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, TÜRKİYE
bsevim18@hotmail.com

Ahmet Can ALTUNIŞIK

Arş. Gör., Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, TÜRKİYE
ahmetcan8284@hotmail.com

(Bildirinin geliş tarihi: 11.02.2010, Bildirinin kabul tarihi: 01.03.2010)

ÖZET

Bu çalışmada, Berke Barajı'nın deprem performansının Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Örnek olarak seçilen Berke Barajı'nın baraj-rezervuar-temel etkileşimini içeren üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturularak, uygun malzeme özellikleri ve sınır şartları için modal analizleri gerçekleştirilmiş ve barajın doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları belirlenmiştir. Analizlerde, sıvı davranışı Lagrange yaklaşımı kullanılarak temsil edilmiştir. Analitik olarak belirlenen dinamik karakteristikleri deneysel olarak da elde etmek için Berke Barajı üzerinde çevresel titreşim testleri uygulanmış, barajın doğal frekansları, mod şekilleri ve sönüm oranları Operasyonel Modal Analiz Yöntemi ile belirlenmiştir. Dört gün boyunca, baraj kretinden ve kretin altındaki ikinci galeriden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde, 17 kanallı veri toplama ünitesi ve hassas sismik ivmeölçerler kullanılmıştır. Analitik ve deneysel olarak belirlenen dinamik karakteristikler arasındaki farklılıklar barajın sonlu eleman modelinin deneysel ölçüm sonuçlarına göre iyileştirilmesiyle minimum düzeye indirilmiştir. Berke Barajı'nın yapısal performansı sonlu eleman model iyileştirmesinden önceki ve sonraki durumlar için belirlenmiştir. Yapısal performansın belirlenebilmesi için zaman tanım alanında gerçekleştirilen lineer deprem analizlerinde yer hareketi olarak 1998 yılında meydana gelen Adana-Ceyhan depremi kullanılmıştır. Adana-Ceyhan depremi baraja yakın bir bölgede meydana geldiği için yapısal davranışı daha iyi yansıtacağı düşünülmüştür. Barajın deprem performansının gerçekçi bir biçimde belirlenebilmesi için, depremin en büyük ivme değerine sahip C2T4998A/CYH-EW bileşeni baraja memba-mansap doğrultusunda uygulanmıştır. Yapılan analizlerden, sonlu eleman model iyileştirmesinin barajın deprem performansını önemli derecede etkilediği, hem başlangıç hem de iyileştirilmiş sonlu eleman modellerinin lineer olmayan analizlerinin yapılmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Berke Barajı, Dinamik Karakteristik, Lagrange Yaklaşımı, Operasyonel Modal Analiz, Sonlu Eleman Model İyileştirmesi, Deprem Performansı, Kemer Baraj

DETERMINATION OF EARTHQUAKE PERFORMANCE OF BERKE ARCH DAM USING OPERATIONAL MODAL ANALYSIS

ABSTRACT

In this study, it is aimed to determine the earthquake performance of Berke Dam using Operational Modal Analysis. 3D finite element model of Berke Dam was constituted considering dam-reservoir-foundation interaction, and dynamic characteristics of the dam were obtained analytically. In the

analytical modeling, reservoir behavior was represented using Lagrangian approach. Ambient vibration tests were conducted on the Berke Arch dam, and its natural frequencies, mode shapes and damping ratios were obtained experimentally using Operational Modal Analysis Method. The tests were continued along the four days on crest and second gallery of the dam. In the modal testing, data acquisition system with 17 channels and sensitivity seismic accelerometers were used as test equipments. When dynamic characteristics were examined, it was observed that there were some differences between analytical and experimental results. So, 3D finite element model of the dam was updated according to the experimental results to minimize the differences. The structural performance of the dam was determined for initial and updated finite element models. In the linear time history analyses, Adana-Ceyhan earthquake in 1998 was selected as a ground motion which was occurred near the dam region. The C2T4998A/CYH-EW component of the ground motion was applied to the arch dam on the stream direction. It was stated from the study that the finite element model updating procedure affect the earthquake behavior of the dam significantly. In addition, the nonlinear analyses of Berke Dam must be done for both initial and updated finite element models.

Keywords: Arch Dam, Dynamic Characteristic, Finite Element Model Updating, Lagrangian Approach, Operational Modal Analysis, Earthquake Performance

1 GİRİŞ

Beton kemer barajlar, enerji elde etmek amacıyla yapılan tek veya çift eğriliğe sahip barajlardır. Tek eğrilikli barajlar planda, çift eğrilikli barajlar ise hem planda hem de düşey kesit boyunca eğriliğe sahiptir. Kemer barajlar, ağırlık barajlara kıyasla daha az beton kullanılarak inşa edilen narin kesitli yapılardır. Bu barajlar, üzerlerine gelen su basıncını kemer ve konsol davranışları sayesinde vadi yamaçlarına aktarırlar. Dolayısıyla, vadi yamaçlarının bu basıncı taşıyabilecek sağlamlıkta olması gerekmektedir. Bu bakımdan kemer barajlar, kret uzunluğu baraj yüksekliğinin altı, en çok on katını geçmeyen vadilere inşa edilebilirler [13].

Kemer barajlar, sıvı-yapı etkileşimine maruz yapı grubuna girmektedir. Bu tür yapılarda deprem gibi dinamik bir etki esnasında sıvı ortamda hidrodinamik basınçlar, yapı ortamında hidrodinamik basınçlardan dolayı ilave yükler meydana gelir. Kemer barajların bu ilave yükleri taşıyamayıp hasar görmesi telafisi olmayan sonuçlara neden olabilir. Özellikle aktif deprem kuşağı bölgesinde yer alan Ülkemizdeki barajlardan birinin veya bir kaçının yıkılması halinde çok büyük can ve mal kayıpları oluşabilir. Bu tür sorunlarla karşılaşmamak için, kemer barajların deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Kemer barajlar gibi önemli mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki davranışı, dinamik karakteristikler olarak adlandırılan doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranlarına bağlı olarak belirlenmektedir. Dinamik karakteristikler analitik veya deneysel yöntemlerle tespit edilmektedir. Analitik yöntemde, yapının sonlu eleman modeli

oluşturmakta, uygun malzeme özellikleri ve sınır şartları belirlenmekte, son olarak da serbest titreşim analizleri yapılarak yapının doğal frekansları ve mod şekilleri elde edilmektedir. Fakat elde edilen dinamik karakteristiklerin yapıların mevcut durumlarını tam olarak yansıtmadığı birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda vurgulanmıştır [10, 11, 15, 16]. Dolayısıyla analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin, yapının deprem davranışının belirlenmesinde kullanılması, doğru olmayan analiz sonuçlarını da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin doğruluğunu kontrol etmek için deneysel yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Deneysel yöntemler doğrudan yapı üzerine uygulanmakta ve elde edilen dinamik karakteristikler yapının o andaki mevcut durumunu yansıtmaktadır.

Günümüzde kemer barajlar gibi büyük hacimli ve önemli mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için Operasyonel Modal Analiz Yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde, yapı üzerinde çeşitli noktalara hassas ivmeölçerler yerleştirilmekte, ivmeölçerlerden gelen titreşim sinyalleri veri toplama ünitesi yardımıyla toplanmaktadır. Toplanan sinyaller hem yapıdan hem de çevreden gelen sinyalleri içerdiğinden filtreleme teknikleri kullanılarak ayrıştırılmakta, yapıya ait sinyaller işlenerek çeşitli eğri uydurma denklemleri yardımıyla dinamik karakteristikler belirlenmektedir.

Operasyonel Modal Analiz yöntemiyle belirlenen deneysel dinamik karakteristikler analitik olarak elde edilenlerle karşılaştırıldığında büyük oranda farklılıklar oluşmuyorsa (\leq % 5-10), analitik dinamik

karakteristiklerin yapının mevcut durumu yansıttığı kabul edilir ve deprem, rüzgâr vb. gibi yükleme koşulları altında ileri dinamik analizleri gerçekleştirilir. Eğer bu oran farkı büyükse ($\geq \% 5-10$), analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin yapının mevcut durumu yansıtmadığı kabul edilir. Bu durumda analitik ve deneysel dinamik karakteristikleri istenen sınırlar içerisinde birbirine yaklaştırmak için, yapının sonlu eleman modelinde yapılan kabuller, malzeme özellikleri ve sınır şartları gözden geçirilerek yapının mevcut davranışını yansıtacak en uygun koşullar belirlenir. Bu işleme Sonlu Eleman Model İyileştirilmesi adı verilir [4, 7, 8]. Sonlu eleman modeli iyileştirilen yapının analizleri gerçekleştirilerek dinamik davranışı belirlenir.

Kemer barajların yapısal performansı, öncelikle zaman tanım alanında lineer analiz ile belirlenmektedir. Lineer analizlerle çeşitli bileşenlerin elastik karakteristikleri dikkate alınarak gerilmeler hesap edilmektedir. Elde edilen gerilmeler kullanılarak yapı sisteminin yapısal performansına karşılık gelen olası hasar seviyeleri belirlenmektedir.

Bu çalışmada, Berke Barajı'nın deprem performansı Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla, Berke Barajı'nın dinamik karakteristikleri analitik ve deneysel olarak elde edilmiştir. Deneysel ve analitik olarak belirlenen dinamik karakteristiklerin birbirinden farklı olduğu görülünce, analitik model deneysel sonuçlara göre iyileştirilmiştir. Berke Barajı'nın deprem performansı sonlu eleman model iyileştirmesinden önceki ve sonraki durumlar için belirlenmiştir.

2 FORMÜLASYON

2.1 Lagrange Yaklaşımı

Bu çalışmada, Berke Barajının, baraj-rezervuar-temel etkileşimini içeren sonlu eleman modeli Lagrange yaklaşımı ile temsil edilmiştir. Lagrange yaklaşımında [20], hem baraj hem de su modelinin düğüm noktalarındaki serbestlikler yer değiştirmeler cinsinden ifade edilmektedir. Dolayısıyla, baraj ve rezervuar arasındaki etkileşimi temsil etmek için özel arayüzey denklemlerine gerek yoktur, çünkü arayüzeydeki düğüm noktalarında uygunluk ve denge denklemleri doğrudan sağlanmaktadır. Ayrıca bu yaklaşımda, oluşturulan denklemler hem simetrik hem de daha küçük bant genişliğine sahiptir. Lagrange yaklaşımı, lineer elastik, sıkışabilir, dönmesi kısıtlanmış, viskoz olmayan ve küçük yer değiştirmeler yapan bir sıvı eleman için

geçerlidir. Lagrange yaklaşımı kullanılarak bir sıvı sisteminin sönümsüz hale ait dinamik hareket denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [1, 20].

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}}_s + \mathbf{K}_s \mathbf{U}_s = \mathbf{R}_s \quad (1)$$

Burada; \mathbf{M}_s , \mathbf{K}_s , \mathbf{R}_s sırasıyla, sıvı sisteminin kütle matrisini, rijitlik matrisini ve dış yük vektörünü; \mathbf{U}_s ve $\ddot{\mathbf{U}}_s$ sırasıyla yapı sisteminin yer değiştirme ve ivme vektörünü göstermektedir. Bağıntı (1) yapı sistemininkiyle benzer formdadır. Ancak, sıvı-yapı sisteminin ortak hareket denklemleri, her iki denkleme ait denklemlerin ara yüzey şartı dikkate alınarak birleştirilmesinden elde edilmektedir. Bu sebeple, ortak sistemin ara yüzey şartını belirlemek gerekir. Sıvının viskoz olmadığı kabul edildiğinden ortak sistemin ara yüzeyinde, ara yüzeye normal yer değiştirmeler sürekli, teğet yer değiştirmeler süresiz olmaktadır. Ortak sistemin ara yüzeyinde yapı kısmının pozitif yüzeye ve sıvı kısmının negatif yüzeye sahip olduğu kabul edilirse ara yüzey şartı;

$$\mathbf{U}_n^- = \mathbf{U}_n^+ \quad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; \mathbf{U}_n ara yüzey normali doğrultusundaki yer değiştirmeyi göstermektedir.

Sıvı-yapı sisteminin yer hareketi etkisindeki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi, Bağıntı (2) ifadesindeki ara yüzey şartı göz önüne alınarak,

$$\mathbf{M}_c \ddot{\mathbf{U}}_c + \mathbf{C}_c \dot{\mathbf{U}}_c + \mathbf{K}_c \mathbf{U}_c = -\mathbf{M}_c \mathbf{a}_g \quad (3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; \mathbf{M}_c , \mathbf{C}_c ve \mathbf{K}_c sırasıyla ortak sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisini; \mathbf{U}_c , $\dot{\mathbf{U}}_c$ ve $\ddot{\mathbf{U}}_c$ sırasıyla ortak sistemin rölatif yer değiştirme, hız ve ivme vektörünü göstermektedir.

Bağıntı (3) ile verilen sıvı-yapı sisteminin hareket denklemi, simetrik sistem matrislerine sahip normal bir yapı sisteminin hareket denklemleriyle aynı formdadır. Bu sebeple, normal bir yapı sisteminin analizinde kullanılan çözüm yöntemleri, Lagrange yaklaşımına dayalı sıvı-yapı sisteminin analizi için de kullanılabilir.

2.2 Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi

Deneyisel olarak elde edilen dinamik karakteristiklerin belirlenmesinde Operasyonel Modal Analiz Yöntemi'nin bir alt yöntemi olan Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma Yöntemi kullanılmıştır. Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayırıştırma (GFOA) yöntemi kullanımı kolay olan Frekans Ortamında Ayırıştırma (FOA) yönteminin geliştirilmiş halidir. Bu yöntemde modlar, davranışın spektral yoğunluk fonksiyonundan hesaplanan tekil değer ayırıştırma grafiklerindeki piklerin seçilmesiyle elde edilir. FOA yöntemi Hızlı Fourier Dönüşümü'nden (HFD) tek bir frekans hattının kullanımına dayalı olduğundan, belirlenen doğal frekansın kesinliği HFD'nin çözünürlüğüne bağlıdır ve FOA yönteminde yapının sönüm oranları belirlenemez. Diğer taraftan GFOA yönteminde belirlenen doğal frekansların ve mod şekillerinin kesinliği artırılmakta ayrıca, sönüm oranları elde edilebilmektedir [8].

GFOA yönteminde, bir titreşim pikinin etrafında tanımlanan tek serbestlik dereceli Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonu, Ters Ayrık Fourier Dönüşümü kullanılarak zaman ortamına geri dönüştürülebilir.

Doğal frekans zamana bağlı sıfır geçiş sayısı belirlenmesiyle, sönüm ise tek serbestlik dereceli normalize edilmiş oto korelasyon fonksiyonunun logaritmik azalışıyla elde edilir [8]. GFOA yönteminde etki ve tepki arasındaki ilişki;

$$[G_{yy}(j\omega)] = [H(j\omega)]^* [G_{xx}(j\omega)] [H(j\omega)]^T \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir [5]. Burada; $G_{xx}(j\omega)$ etki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk (GSY) fonksiyonunu, $G_{yy}(j\omega)$ tepki sinyalinin Güç Spektral Yoğunluk fonksiyonunu ve $H(j\omega)$ frekans davranış fonksiyonunu göstermektedir. Bağlantı (4)'teki * ve T sırasıyla ifadelerin kompleks eşleniğini ve transpozisini göstermektedir. Denklem (4)'ün çözümü literatürde detaylı bir şekilde bulunmaktadır [5].

2.3 Kemer Barajlar için Yapısal Performans Kriterleri

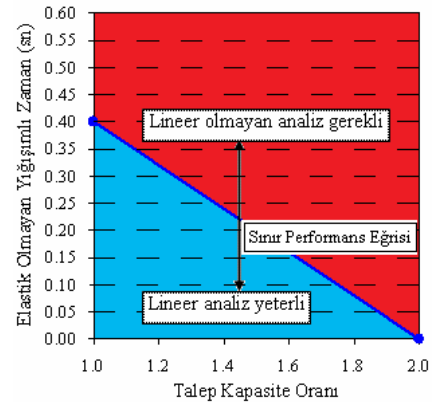
Bir yapı sisteminin yapısal performansı, öncelikle zaman tanım alanında gerçekleştirilen lineer analizler ile belirlenmektedir. Lineer analizlerle çeşitli bileşenlerin elastik karakteristikleri dikkate alınarak deformasyonlar ve gerilmeler hesaplanmaktadır. Elde edilen bu verilerden

faydalanılarak yapı sisteminin yapısal performansına karşılık gelen olası hasar seviyeleri belirlenmektedir. Yapısal performans için kullanılan hasar terimi; yapıda kullanılan betonun çatlaması, birleşim noktalarının açılması ve donatıdaki akma ile ilişkilidir [13].

Normal şartlarda, maksimum tasarım depremine göre boyutlandırılmış, düzgün geometriye, rijitlik ve kütle dağılımına sahip yapı sistemleri için lineer analizler yeterli olmaktadır. Fakat bu özelliklerin bir arada bulunması zor olan asma köprüler, kuleler ve beton barajlar gibi büyük yapı sistemlerinde elastik yöntemlere dayalı yapılan lineer analizler yeterli olmayabilmektedir. Bu sebeple, yapı sistemlerinin lineer analizlerinin hangi ölçüde yeterli olduğu performans eğrisinden elde edilen hasar seviyelerine göre tespit edilmesi gerekmektedir. Kemer barajlar için performans eğrisi Şekil 1'de verilmektedir.

Şekil 1'de görülen talep-kapasite oranı (TKO); lineer analiz sonucunda yapıda elde edilen çekme gerilmelerinin baraj betonunun mevcut çekme gerilmelerine oranı olarak tanımlanmaktadır. Elastik olmayan yığışımli zaman ise beton çekme gerilmesini aşan her zaman adımının yığışımli toplamı olarak tanımlanmaktadır.

Burada, TKO'nun 1'den küçük olduğu durum için baraj davranışının elastik bölge içerisinde kaldığı ve hasar görmediği düşünülmektedir. TKO'nun 1 ve 2 olması durumuna göre elde edilen performans eğrisinde; eğri altında kalan alan, lineer analiz zamanı davranışını belirlemede yeterli olduğunu, eğri üzerinde kalan alan ise lineer analizin yeterli olmadığını ve yapı davranışını belirleyebilmek için lineer olmayan analizlerin yapılması gerektiğini belirtmektedir [13].



Şekil 1 - Kemer barajlar için performans eğrisi

3 SAYISAL UYGULAMA

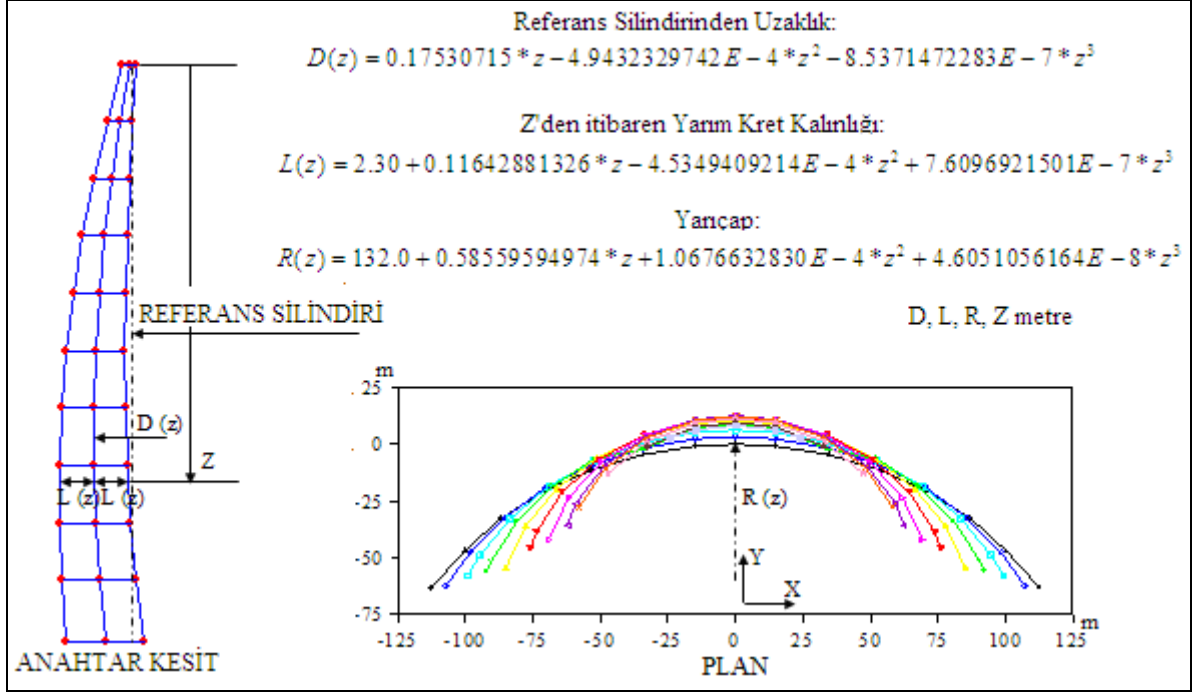
Bu çalışmada sayısal uyulama olarak Berke Barajı seçilmiştir. Berke Barajı, Ülke'mizdeki mevcut altı kemer barajdan biridir. Berke Barajı ve HES tesisleri Osmaniye ilinin Düziçi ilçesine 20 km mesafede, Ceyhan Nehri üzerine kurulmuştur. Baraj yerinin Osmaniye'ye uzaklığı 50 km, Adana'ya ise 140 km'dir. 1996 yılında yapımına başlanan baraj 2002 yılında işletmeye açılmıştır. Ülke'mizdeki en büyük kemer baraj olma özelliğine sahip Berke Barajı yapımı tamamlandığında Dünya'daki en büyük on altıncı kemer baraj olup 201 m yüksekliğine ve 270 m kret uzunluğuna sahiptir. Berke Barajı dar-V tipi bir vadi üzerine yerleşmiş olup, çift eğrilikli bir kemer barajdır (Şekil 2). Projesi

Fransız bir firma tarafından hazırlanan barajın inşası Türk firmalar tarafından gerçekleştirilmiştir. Baraj gövdesinin inşasında yaklaşık $745 \times 10^3 \text{ m}^3$ beton kullanılmıştır. Baraj Ceyhan Nehri üzerine inşa edilmiş olup yaklaşık $427 \times 10^6 \text{ m}^3$ göl hacmine ve 20 km rezervuar uzunluğuna sahiptir. Elektrik santralinden yılda ortalama 1700 GWh enerji üretilen baraj, DSİ 6. Bölge Müdürlüğü (Adana) tarafından işletilmektedir [6].

Berke Barajı'nın, kret uzunluğunun baraj yüksekliğine oranı 1,34 olup, baraj genişliği krette 4,3 m, tabanda 27,12 m'dir. Berke Barajı'nın geometrik özellikleri Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 2 - Berke Barajı'na ait bazı fotoğraflar



Şekil 3 - Berke Barajı'nın geometrik özellikleri

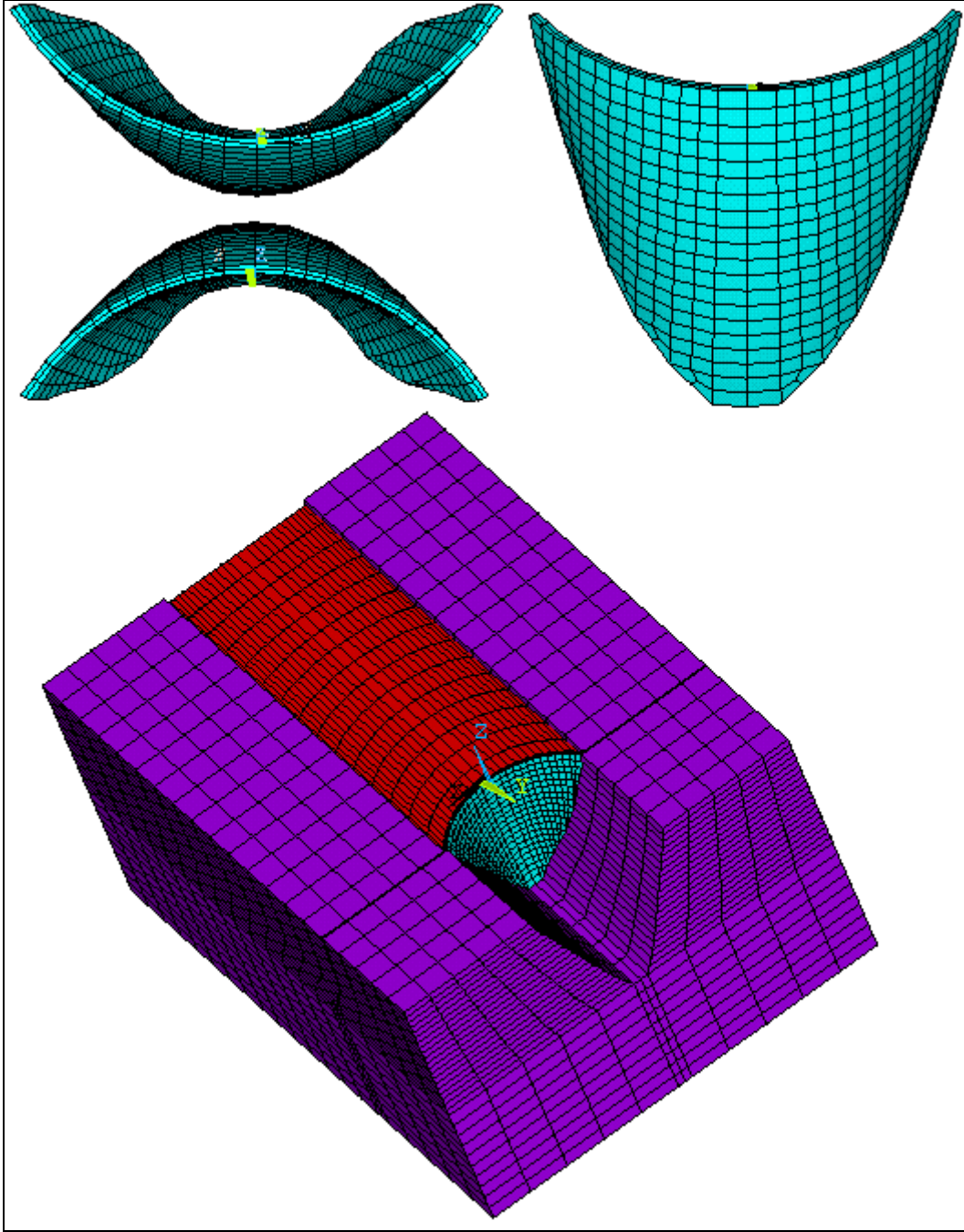
3.1 Analitik Dinamik Karakteristikler

Berke Barajı'nın dinamik karakteristiklerini analitik olarak belirlemek için barajın üç boyutlu sonlu eleman modeli (SEM) ANSYS [2] programında oluşturulmuştur. Baraj davranışının gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesi için sonlu eleman modeli baraj-rezervuar-temel etkileşimini içerecek şekilde genişletilmiştir. Berke Barajı'nın sonlu eleman modelinde rezervuar uzunluğu baraj yüksekliğinin üç katı kadar dikkate alınmıştır. Ayrıca deneysel ölçümler sırasında su seviyesi baraj kretinden 10 m aşağıda olduğundan rezervuar yüksekliği 191 m olarak dikkate alınmıştır. Temel memba yönünde rezervuar uzunluğu kadar, diğer yönlerde baraj yüksekliği kadar uzatılmıştır. Temel modeli kütle kabul edilerek sadece temel esnekliği dikkate alındığından, doğal frekans ve deformasyon etkilerinin ihmal edilebilmesi, temelin ancak bu kadar mesafe uzatılmasıyla mümkün olmaktadır [19]. Barajın sonlu eleman modelini

oluşturmak için kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir. Berke Barajı'nın sonlu eleman modelinde, gövde için 760 adet SOLID45 elemanı, temel için 7000 adet SOLID45 elemanı ve rezervuar için 5700 adet FLUID80 elemanı kullanılmıştır. Hem SOLID45 hem de FLUID80 elemanı sekiz düğüm noktasına sahip olup, her düğüm noktası x, y ve z ekseninde yer değiştirme serbestliğine sahiptir. Berke Barajı'nın, baraj-rezervuar-temel etkileşimi içeren üç boyutlu sonlu eleman modeli Şekil 4'te verilmektedir. Sonlu eleman modelinde temel dış sınırları ankastre olarak mesnetlenmiş, rezervuar ile baraj ve temel arasındaki etkileşim 0,001 m uzunluğuna sahip bağlantı elemanları kullanılarak sağlanmıştır. Bağlantı elemanlarının görevi, sıvı-yapı ara yüzelerindeki düğüm noktalarının yüzey normaline doğrultusundaki yer değiştirmelerini eşitlemektir. Rezervuarın mansap yüzünde yatay yer değiştirmeler engellenmiş, düşey yer değiştirmeler serbest bırakılmıştır.

Çizelge 1 - Berke Barajı'nın malzeme özellikleri

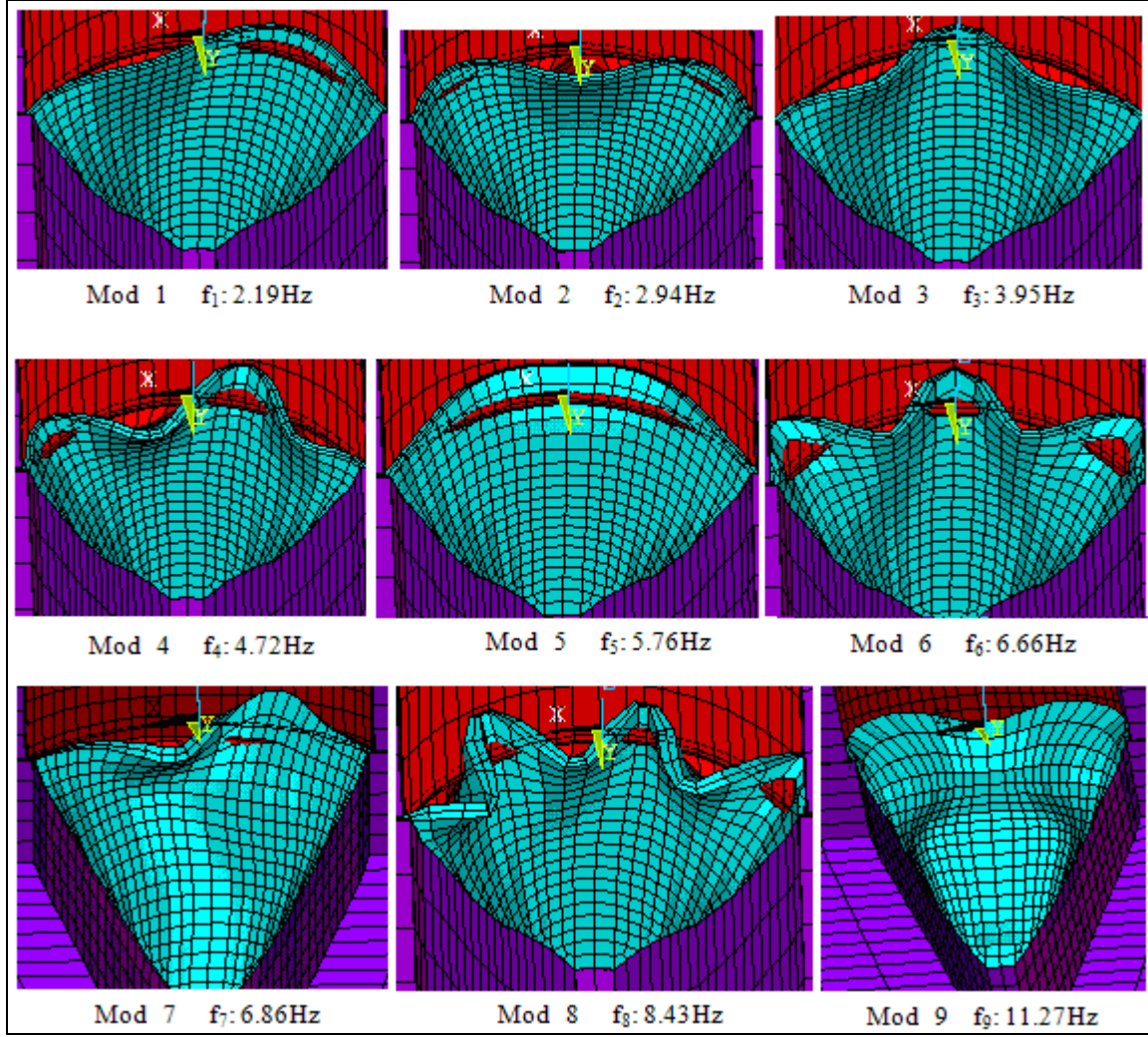
	ANSYS Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri		
		Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)
Baraj	SOLID45	3,25 x 10 ¹⁰	0,15	2500
Temel	SOLID45	3,25 x 10 ¹⁰	0,15	-
Rezervuar	FLUID80	2,070 x 10 ⁹	-	1000



Şekil 4 - Berke Barajı'nın üç boyutlu sonlu eleman modeli

Berke Barajı'nın ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen analitik modal analizlerinden elde edilen ilk dokuz doğal frekans değeri ve mod şekli Şekil 5'te verilmektedir. Şekil 5'ten görüldüğü gibi ilk dokuz doğal frekans (2,19-11,27) Hz arasında

elde edilmiştir. Birinci, dördüncü ve sekizinci modlar anti-simetrik, ikinci, üçüncü ve altıncı modlar simetrik, beşinci, yedinci ve dokuzuncu modlar düşey eğilme modları olarak elde edilmiştir.



Şekil 5 - Berke Barajı'nın doğal frekans değerleri ve mod şekilleri

3.2 Deneysel Dinamik Karakteristikler

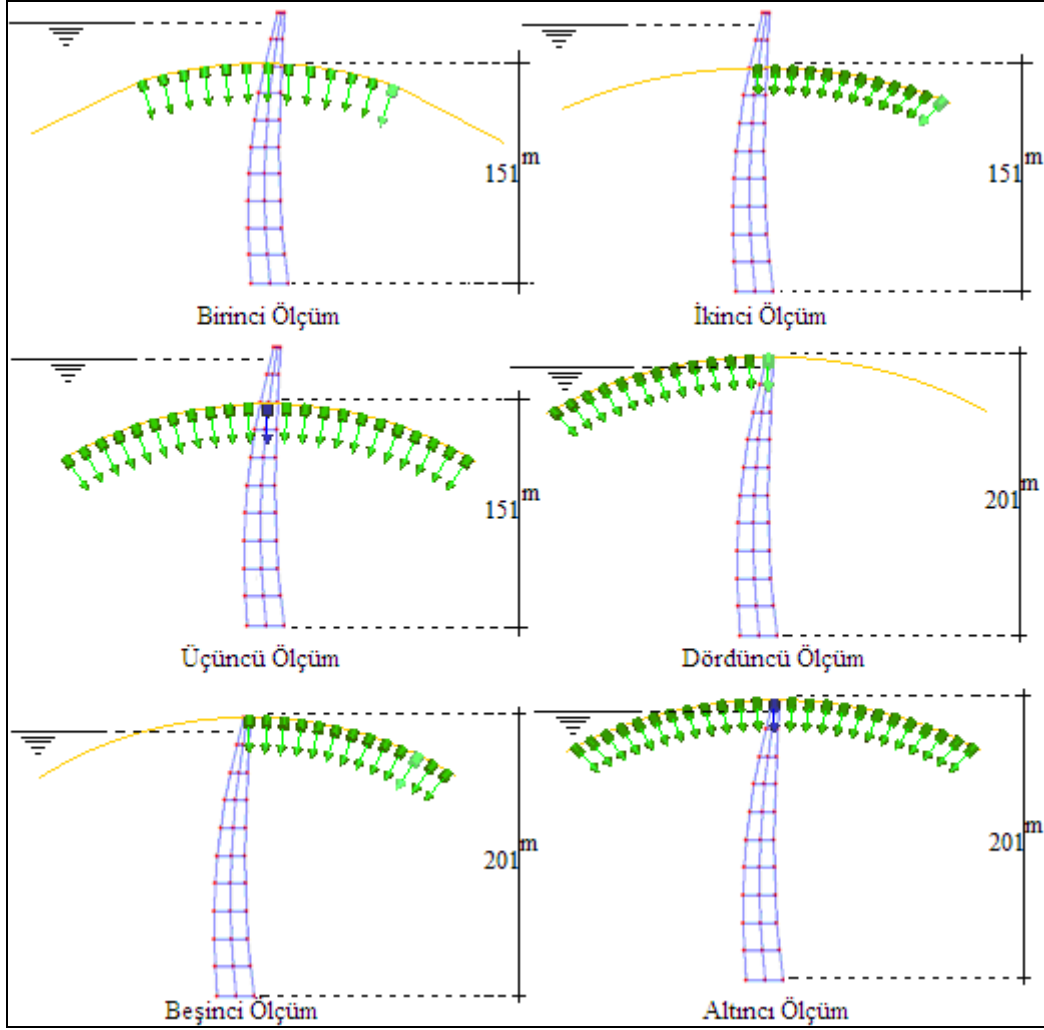
Berke Barajı'nın dinamik karakteristiklerini deneysel olarak belirlemek için baraja çevresel titreşim testleri uygulanmıştır. Testlerde B&K 8340 tipi tek eksenli, 10 V/g hassasiyetine sahip ivmeölçerler kullanılmıştır. İvmeölçerlerden gelen sinyaller B&K 3560 tipi 17 kanallı veri toplama ünitesinde toplanarak PULSE [14] yazılımında aktarılmıştır. Dinamik karakteristikleri belirlemek için sinyaller OMA [12] yazılımına transfer edilerek işlenmiştir.

Berke Barajı'nda gerçekleştirilen çevresel titreşim testlerinde, doğal titreşim olarak rüzgar ve su basıncı etkilerinden yararlanılmıştır. Berke Barajı'na 24-28 Mayıs 2009 tarihleri arasında dört gün boyunca altı farklı çevresel titreşim testi uygulanmıştır. Testlerin üçü kret üzerinde, diğer üçü kret seviyesinin 50 m aşağısındaki ikinci galeride gerçekleştirilmiştir. Her bir test için ivmeölçerler baraja memba-mansap doğrultusunda gövdeye dik olarak yerleştirilmiştir (Şekil 6). İvmeölçer sayısı ve

veri toplama ünitesindeki kanal sayısı sınırlı olduğu için her bir testte sadece 13 ivmeölçer kullanılabilmiştir. Şekil 6'dan görüldüğü üzere, birinci testte ivmeölçerler galeriye, anahtar kesitin sağında ve solunda olmak üzere simetrik; ikinci testte ivmeölçerler galeriye, anahtar kesit ile sol yamaç arasına; dördüncü testte ivmeölçerler krete, anahtar kesit ile sağ yamaç arasına; beşinci testte ivmeölçerler krete, anahtar kesit ile sol yamaç arasına yerleştirilmiştir. Şekil 6'dan görüldüğü üzere, üçüncü ve altıncı testlerde, ölçümler sırasıyla galeriden ve kretten bütün uzunluk boyunca alınmıştır. Fakat üçüncü ve altıncı testlerde ölçülmek istenen mesafe uzun olduğu ve ivmeölçer sayısı yetersiz olduğu için testler referanslı olarak iki adımda gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda 12 ivmeölçer anahtar kesit ile sol yamaç arasına, ikinci adımda 12 ivmeölçer anahtar kesit ile sağ yamaç arasına yerleştirilmiştir. Her bir adımda alınan ölçümleri birleştirmek için anahtar kesit üzerine bir referans ivmeölçeri yerleştirilmiştir. Her bir

adım için 10 dakika boyunca ölçüm alınarak sinyaller toplanmıştır. Ölçümler, sonlu eleman analizlerinden elde edilen doğal frekanslar

dikkate alınarak 0-12,5 Hz arası gerçekleştirilmiştir. Ölçümlere ait bazı fotoğraflar Şekil 7'de verilmektedir.



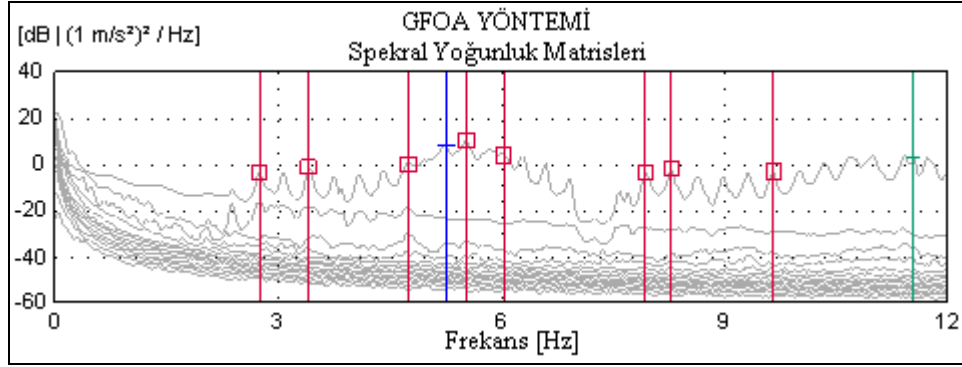
Şekil 6 - Her bir ölçüm için ivmeölçer yerleşim planı



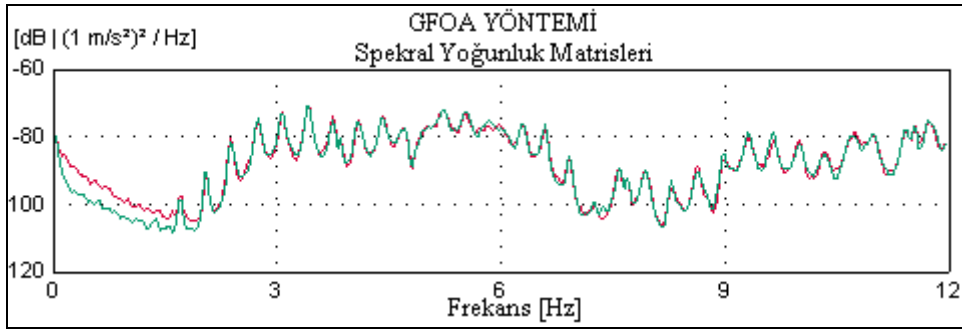
Şekil 7 - Ölçümlere ait bazı fotoğraflar

Yapılan ölçümlerden elde edilen dinamik karakteristikler birbirine çok yakındır. Bu nedenle sadece altıncı ölçümden elde edilen sonuçlar bu çalışmada sunulmaktadır. Altıncı ölçümden, Geliştirilmiş Frekans Ortamında Ayrıştırma Yöntemini ile elde edilen spektral yoğunluk fonksiyonlarının tekil değerleri ve ortalamaları sırasıyla Şekil 8 (a ve b)'de verilmektedir. Altıncı ölçümden elde edilen doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları Şekil 9'da verilmektedir.

Şekil 9'dan görüldüğü üzere, Berke Barajı'nın deneysel doğal frekansları (2,75-9,66) Hz arasında elde edilmiştir. Barajın, birinci, dördüncü ve sekizinci modları anti-simetrik, ikinci, üçüncü ve altıncı modları simetrik eğilme modları olarak elde edilmiştir. Barajın düşey eksen boyunca ivmeölçer yerleştirilmediği için düşey eğilme modları elde edilememiştir.

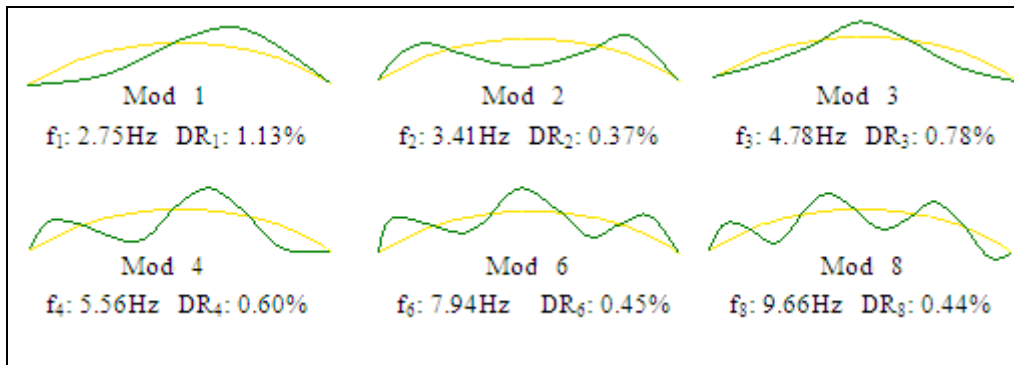


a) Spektral Yoğunluk Matrislerinin tekil değerleri



b) Spektral Yoğunluk Matrislerinin tekil ortalamaları

Şekil 8 - Altıncı ölçümden elde edilen Spektral Yoğunluk Matrisleri



Şekil 9 - Altıncı ölçümden elde edilen doğal frekans değerleri, mod şekilleri ve sönüm oranları

3.3 Sonlu Eleman Model İyileştirmesi

Şekil 5 ve Şekil 9 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde analitik ve deneysel olarak elde edilen mod şekillerinin uyum içerisinde olduğu, doğal frekanslar arasında bazı farklılıklar olduğu, deneysel frekansların analitiklerden biraz daha büyük olduğu görülmektedir. Doğal frekanslar arasındaki bu farklılıkları

giderebilmek için Berke Barajı'nın sonlu eleman modelinin deneysel sonuçlara göre iyileştirilmesi gerekmektedir. Sonlu eleman model iyileştirmesi, analizlerde kullanılan malzeme özellikleri veya sınır şartları gibi doğruluğu tam olarak belirlenemeyen parametreler değiştirilerek yapılmaktadır. Sonlu eleman model iyileştirmesinde bilinmesi

gereken en önemli özelliklerden biri, doğruluğu hakkında kesine yakın bir bilgi sahibi olduğumuz parametreleri iyileştirmede kullanmamaktır. Yani iyileştirme, belirsiz olan parametrelerin kabul edilebilir sınırlar içerisinde değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu çalışmada, Berke Barajı'nın sonlu eleman modelinde uygulanan sınır şartları literatürle uyumlu seçilmiştir [6, 18]. Dolayısıyla iyileştirmede malzeme özellikleri kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinde ise değişken parametre olarak en belirsiz özellik olan elastisite modülü ve betonun kütle yoğunluğu seçilmiştir. Barajın ve temel elastisite modülleri sırasıyla yaklaşık % 15 ve % 23 artırılarak Berke Barajı'nın sonlu

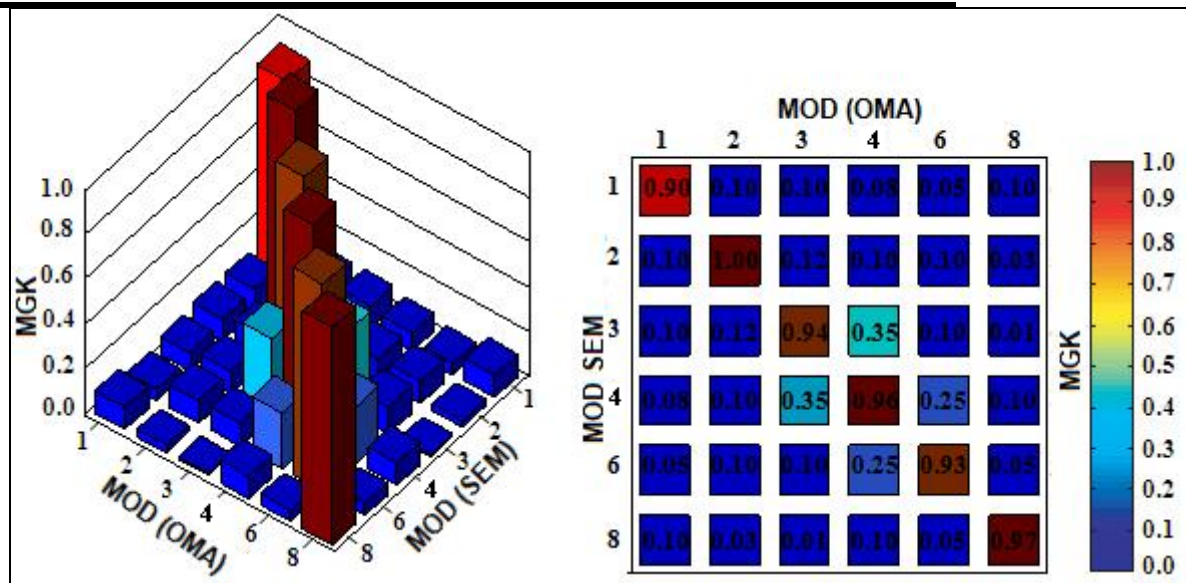
eleman modeli iyileştirilmiştir. Berke Barajı'nın sonlu eleman model iyileştirmesinde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 2'de verilmektedir. Berke Barajı'nın iyileştirmeden önceki ve sonraki analitik ve deneysel frekansları Çizelge 3'te karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Çizelge 3'te görüldüğü gibi, iyileştirilmiş analitik ve deneysel frekanslar arasındaki fark % 2-3 civarındadır. İyileştirilmiş analitik ve deneysel mod şekilleri arasındaki uyumu görebilmek için çizilen Modal Güvence Kriteri grafiği Şekil 10'da verilmektedir. Şekil 10'dan anlaşıldığı üzere, analitik ve deneysel mod şekilleri arasında çok iyi bir uyum bulunmaktadır.

Çizelge 2 - Berke Barajı'nın iyileştirilmiş malzeme özellikleri

	ANSYS Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri		
		Elastisite Modülü (N/m ²)	Poisson Oranı	Kütle Yoğunluğu (kg/m ³)
Baraj	SOLID45	3,75 x 10 ¹⁰	0,15	2400
Temel	SOLID45	4,00 x 10 ¹⁰	0,15	-
Rezervuar	FLUID80	2,07 x 10 ⁹	-	1000

Çizelge 3 - Berke Barajı'nın analitik ve deneysel doğal frekansları

Modlar (Hz)	Başlangıç Analitik (ANSYS)	Fark (%)	Deneysel Ölçüm 6 (OMA)	Fark (%)	İyileştirilmiş Analitik (ANSYS)
1	2,19	20	2,75	7,2	2,55
2	2,94	14	3,41	0	3,41
3	3,95	17	4,78	1,7	4,70
4	4,72	15	5,56	1,4	5,48
5	5,76	6.3	6,03	1,3	6,07
6	6,66	16	7,94	3,4	7,67
7	6,86	19	8,28	3,1	8,19
8	8,43	13	9,66	1,1	9,77

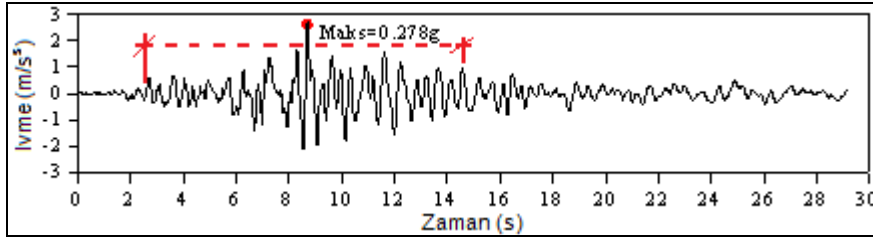


Şekil 10 - Analitik ve deneysel modlara ait Modal Güvence Kriteri

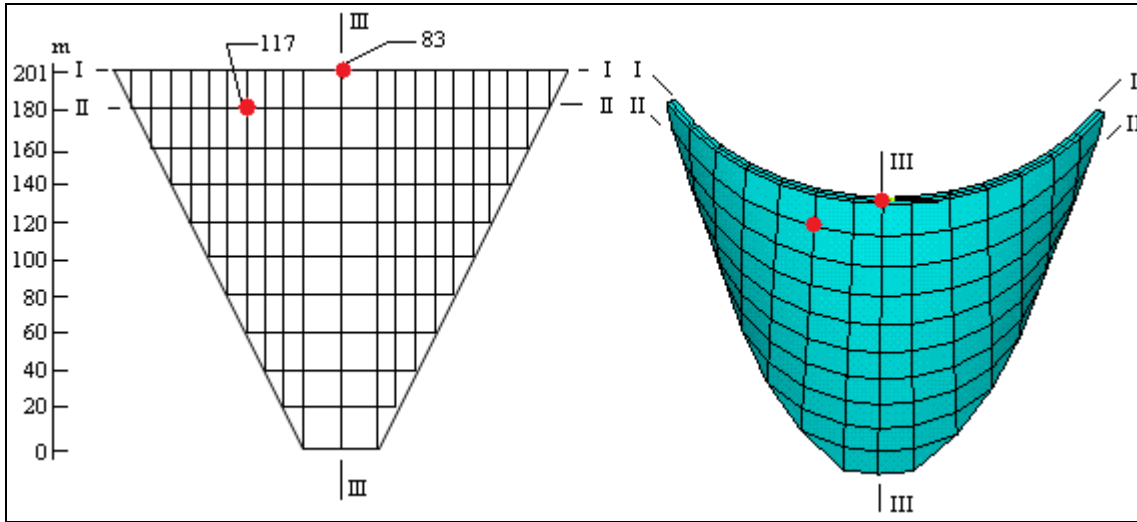
3.4 Yapısal Performans

Bu çalışmada, Berke Barajı'nın yapısal performansını belirlemek için zaman tanım alanında lineer analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem analizleri, sonlu eleman model iyileştirmesinin etkisini görmek için hem iyileştirmeden önceki sonlu eleman modeli hem de iyileştirilmiş sonlu eleman modeli için yapılmıştır. Deprem analizlerinde yer hareketi olarak 1998 yılında meydana gelen Adana-Ceyhan depreminin C2T4998A/CYH-EW [17] bileşeni baraja memba mansap doğrultusunda uygulanmıştır. Yer hareketi, baraja çok yakın bir bölgede meydana geldiği için tercih edilmiştir. Adana-Ceyhan depreminin ait C2T4998A/CYH-EW bileşeni Şekil 11'de verilmektedir.

Barajın zaman tanım alanında lineer analizlerinde, eleman matrisleri Gauss sayısal integrasyon tekniği kullanılarak hesaplanmıştır [3], dinamik hareket denkleminin çözümünde ise Newmark Yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde Rayleigh sönüm katsayıları iyileştirilmiş modelde % 1,13 sönüm oranı, başlangıç modelinde ise % 5 sönüm oranı için hesaplanarak dikkate alınmıştır. Analizler çok uzun zaman aldığı ve bilgisayar hafızası kapladığı için, analizlerde işlem kolaylığı açısından yer hareketinin etkin olan 12 s'si dikkate alınmıştır (Şekil 11). Analizlerden, Berke Barajı'na ait yer değiştirmeler ve gerilmeler elde edilmiştir. Bu sonuçların elde edildiği kesitler ve düğüm noktaları Şekil 12'de verilmektedir.



Şekil 11 - 1998 Adana-Ceyhan depreminin C2T4998A/CYH-EW bileşeni

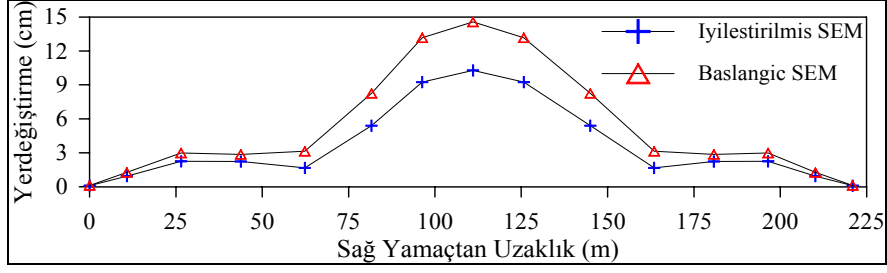


Şekil 12 - Berke Barajı'nın iki ve üç boyutlu görünüşleri

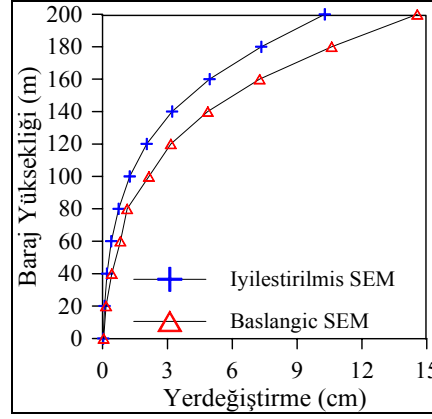
3.4.1 Yer değiştirmeler

Berke Barajı'nın, I-I ve III-III kesitleri boyunca elde edilen memba-mansap doğrultusundaki yer değiştirmeleri sırasıyla Şekil 13 (a ve b)'de verilmektedir. Şekil 13'ten görüldüğü üzere, başlangıç modeli için elde edilen yer değiştirmeler daha büyük olmakla birlikte, her iki durum için de en büyük yer değiştirmeler anahtar kesit ile kretin kesiştiği 83 no'lu düğüm noktasında oluşmaktadır.

Berke Barajı'nın, 83 no'lu düğüm noktasında memba-mansap doğrultusunda oluşan yer değiştirmelerin zamanla değişimi sırasıyla Şekil 14 (a ve b)'de verilmektedir. Şekil 14'ten görüldüğü üzere, başlangıç modeli için elde edilen yer değiştirmeler, iyileştirilmiş model için elde edilenlerden daha büyük olmaktadır.

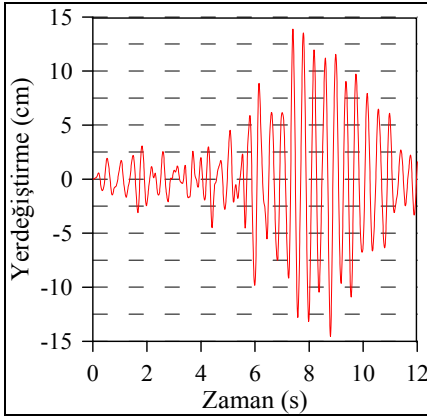


a) I-I kesitindeki yer değiştirmeler

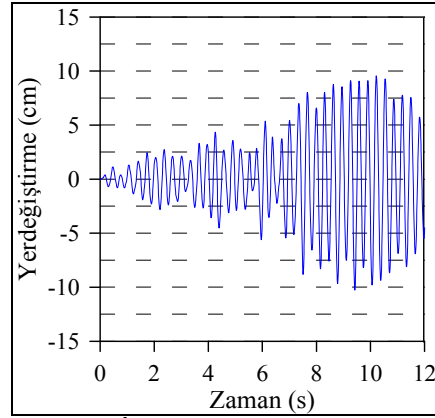


b) III-III kesitindeki yer değiştirmeler

Şekil 13– Berke Barajı'nın a) I-I ve b) III-III kesitinde elde edilen yatay yer değiştirmeler



a) Başlangıç SEM



b) İyileştirilmiş SEM

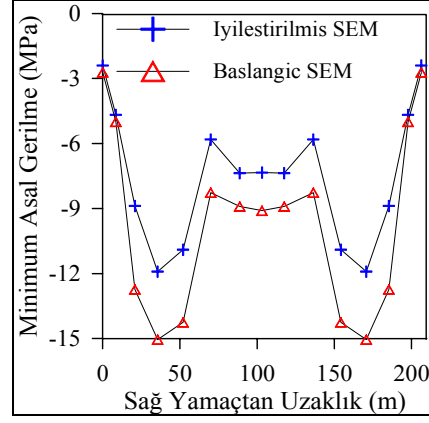
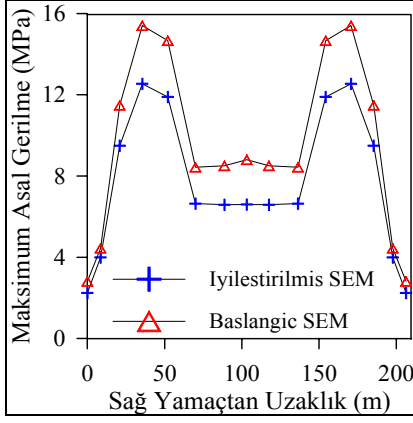
Şekil 14 - 83 no'lu düğüm noktasında elde edilen yatay yer değiştirmelerin zamanla değişimi

3.4.2 Gerilmeler

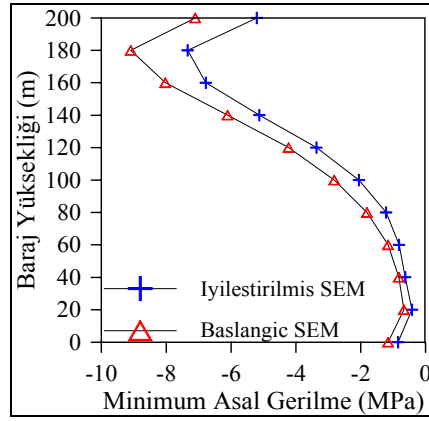
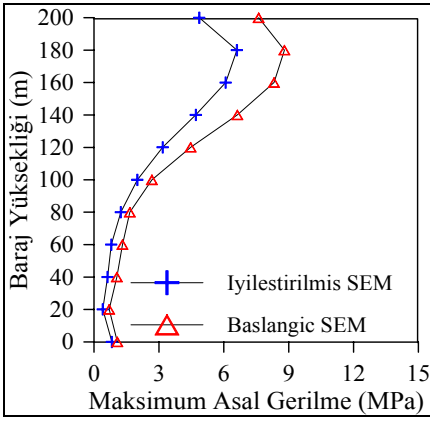
Berke Barajı'nın, II-II ve III-III kesitleri boyunca elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmeler sırasıyla Şekil 15 (a ve b)'de verilmektedir. Şekil 15 a'dan görüldüğü üzere, maksimum ve minimum gerilmeler yamaçlardan baraj gövdesine doğru ilk 40 m'lik mesafede hızla artmakta; 40 m'den sonra anahtar kesite kadar biraz azalmaktadır. Şekil 15 b)'den görüldüğü üzere, maksimum ve minimum asal gerilmeler baraj yüksekliği boyunca genellikle artmakta, 180 m mesafesinde en büyük değeri almakta ve

krette ise biraz azalmaktadır. Şekil 15 (a-b) incelendiğinde başlangıç modeli için elde edilen asal gerilmeler, iyileştirilmiş modelden elde edilenlerden daha büyük olduğu görülmektedir.

Berke Barajı'nın, 117 no'lu düğüm noktasında elde edilen minimum ve maksimum asal gerilmelerin zamanla değişimi Şekil 16 (a-d)'de verilmektedir. Şekil 16'dan görüldüğü üzere, başlangıç modeli için elde edilen gerilmeler, iyileştirilmiş model için elde edilenlerden daha büyük olmaktadır.

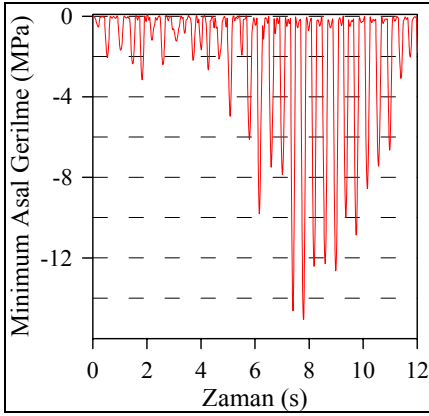


a) II-II kesitindeki asal gerilmeler

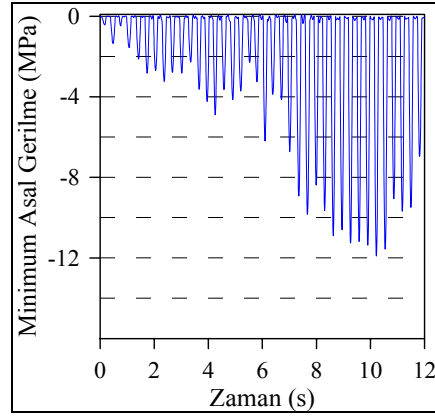


b) III-III kesitindeki asal gerilmeler

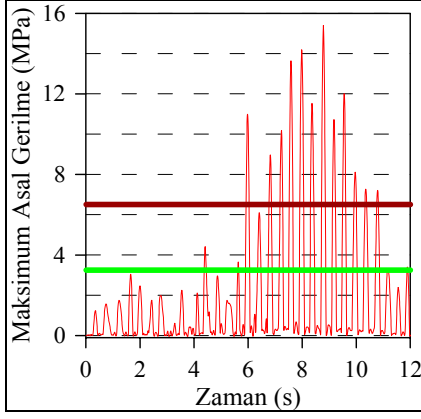
Şekil 15 - Berke Barajı'nın a) II-II ve b) III-III kesitinde elde edilen maksimum ve minimum gerilmeler



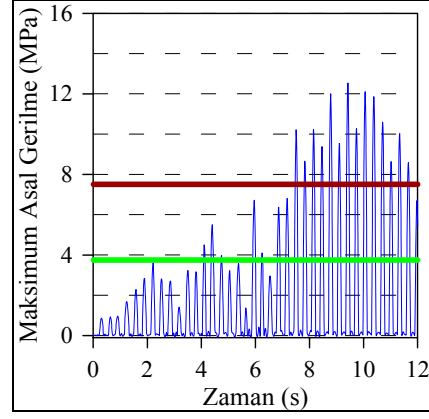
a) Başlangıç SEM



b) İyileştirilmiş SEM



c) Başlangıç SEM

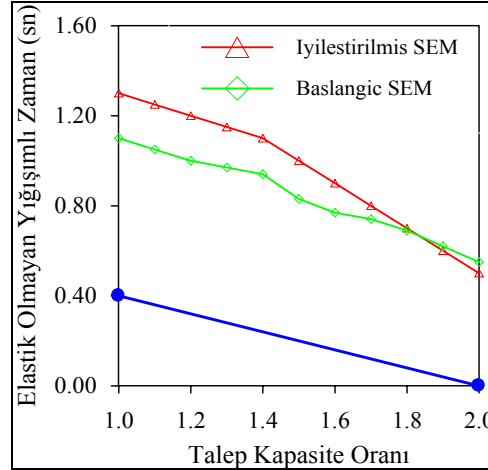


d) İyileştirilmiş SEM

Şekil 16 - Berke Barajı'nın 117 no'lu düğüm noktasında elde edilen maksimum ve minimum asal gerilmelerin zamanla değişimi

Şekil 16 (c ve d)'de çizilen maksimum asal gerilmeler performans eğrisinin hesabında kullanılmaktadır. Berke Barajı'nın yapısal performansının belirlenmesinde kullanılan, betonun çekme gerilme dayanımı iyileştirilmiş model için 3,75 MPa, başlangıç modeli için ise 3,25 MPa seçilmiştir. Berke Barajı'nın seçilen çekme dayanımlarına bağlı olarak elde edilen performans eğrileri iyileştirilmiş ve başlangıç sonlu eleman modelleri için Şekil 17'de

verilmektedir. Şekil 17'den görüldüğü gibi iyileştirilmiş model için elde edilen yığışlımlı zaman, başlangıç modeli için elde edilen yığışlımlı zamandan daha fazladır. Ayrıca, hem iyileştirilmiş hem de başlangıç modeli için elde edilen performans eğrileri sınır performans eğrisini çok üstündedir. Bu durumda her iki model için de lineer olmayan analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 17- Berke Barajı'nın başlangıç ve iyileştirilmiş sonlu eleman modelleri için performans eğrisi

4 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Osmaniye'de bulunan Türkiye'nin mevcut en büyük kemer barajı olan Berke Barajı'nın yapısal performansı Operasyonel Modal Analiz Yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada, Berke Barajı'nın dinamik karakteristikleri hem analitik hem de deneysel olarak belirlenmiştir. Analitik modeli deneysel sonuçlara göre iyileştirilen Berke Barajı'nın yapısal performansı 1998 yılında meydana gelen Adana-Ceyhan deprem kaydı

kullanılarak hem iyileştirilmiş hem de başlangıç sonlu eleman modelleri için analizler gerçekleştirilerek incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır.

- Analitik ve deneysel olarak elde edilen ilk sekiz doğal frekans değeri 2-12 Hz arasında elde edilmiştir. Elde edilen frekanslar birbirleriyle karşılaştırıldığında yaklaşık % 15 civarında farklılıklar bulunmuştur.

- Analitik modal analizde, mod şekilleri simetrik, anti-simetrik ve düşey eğilme modları olarak elde edilmiştir. Operasyonel Modal Analiz’de ise düşey eksen boyunca ivmeölçer yerleştirilmediği için simetrik ve anti-simetrik eğilme modları elde edilmiştir. Ayrıca analitik ve deneysel mod şekilleri birbiriyle uyumludur.
- Deneysel olarak elde edilen sönüm oranları % 0,37-1,13 arasında elde edilmiştir. Bu değerler literatürde kemer barajlar için sunulan sönüm oranları ile uyum içerisindedir.
- Analitik sonuçları deneysel sonuçlara yaklaştırmak için, Berke Barajı’nın sonlu eleman modeli malzeme özellikleri kullanılarak iyileştirilmiştir. İyileştirilen modelden elde edilen frekanslar ile deneysel frekanslar arasındaki fark % 2-3’e kadar azalmıştır. Ayrıca, analitik ve deneysel mod şekilleri arasındaki uyumu gösteren Modal Güvence Kriteri 1’e yakın elde edilmiştir.
- Berke Barajı için gerçekleştirilen deprem analizlerinde, maksimum yer değiştirmeler başlangıç ve iyileştirilmiş modeller için sırasıyla 14,6 cm ve 10,3 cm olarak elde edilmiştir. Bu yer değiştirmeler anahtar kesiti ile kretin kesiştiği 83 no’lu düğüm noktasında oluşmuştur. Ayrıca yer değiştirmeler baraj yüksekliği boyunca artmakta, yamaçlara doğru ise azalmaktadır.
- Berke Barajı için gerçekleştirilen deprem analizlerinde, minimum (basınç) asal gerilmeler başlangıç ve iyileştirilmiş modeller için sırasıyla 15,1 MPa ve 11,9 MPa olarak elde edilmiştir. En büyük gerilmeler kretin 20 m aşağısında ve yamaçlardan 40 m uzaklıkta elde edilmiştir.
- Berke Barajı için gerçekleştirilen deprem analizlerinde, maksimum (çekme) asal gerilmeler başlangıç ve iyileştirilmiş modeller için sırasıyla 15,4 MPa ve 12,5 MPa olarak elde edilmiştir.
- Başlangıç modeli için elde edilen asal gerilmeler, iyileştirilmiş model için elde edilenlerden genelde daha büyüktür. Ayrıca her iki durum için elde edilen davranışlar birbirinden farklı olmaktadır. Yani sonlu eleman model iyileştirmesi baraj davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.
- Başlangıç ve iyileştirilmiş modeller için çizilen performans eğrilerinin her ikisi de sınır performans eğrisinin üzerinde elde edilmiştir. Dolayısıyla Berke Barajı’nın deprem davranışının lineer olmayan analizlerle belirlenmesi önerilmektedir.

5 TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 106M038 no’lu TÜBİTAK ve 2005.112.001.1 no’lu Karadeniz Teknik

Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca, Berke Barajı’nda gerçekleştirilen çalışmalar sırasında, teknik ve lojistik destek sağlayan DSİ 6. Bölge Müdür Yardımcısı Dr. Bülent SELEK’e, Barajlar ve HES Dairesi Şube Müdürü İsmail KAYA’ya; EÜAŞ Adana ve Yöresi HES İşletme Müdürü Nevzat ERDEM’e, Berke Barajı Elektrik Santrali sorumlusu M. Sadi ANKIN’a ve Berke Barajı Düziçi çalışanlarına teşekkür ederiz.

6 KAYNAKLAR

- [1] Akköse, M., 2004. Lagrange Yaklaşımı ile Kemer Baraj-Su-Zemin Sistemlerinin Malzeme Bakımından Lineer ve Lineer Olmayan Dinamik Analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
- [2] ANSYS, 2008. Swanson Analysis System, USA.
- [3] Bathe, K.J., 1986. Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- [4] Bayraktar, A., Altunışık, A.C., Sevim, B. ve Türker, T., 2007. “Modal Testing and Finite Element Model Calibration of an Arch Type Steel Footbridge”, Steel and Composite Structures, 7, 6, 487-502.
- [5] Brincker, R., Zhang, L. ve Andersen, P. 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition, 18th International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA, 4062(2),625-630.
- [6] DSİ, 2009. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye.
- [7] El-Borgi, S., Smaoui, H., Cherif, F., Bahlous, S. ve Ghrairi, A., 2004. “Modal Identification and Finite Element Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge”, Emirates Journal for Engineering Research, 9, 2, 29-34.
- [8] Jacobsen, N.J., Andersen, P. ve Brincker R. 2006. Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis, Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise & Vibration Engineering, Leuven, Belgium.
- [9] Jaishi, B. ve Ren, W.X., 2005. “Structural Finite Element Model Updating using Ambient Vibration Test Results”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131, 4, 617-628.
- [10] Law, S.S., Li, X.Y. ve Lu, Z.R., 2006. “Structural Damage Detection from Wavelet Coefficient Sensitivity with

- Model Errors", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 132, 1077-1087.
- [11] Morin, P.B., Le'ger, P. ve Tinawi, R., 2002. "Seismic Behavior of Post-Tensioned Gravity Dams: Shake Table Experiments and Numerical Simulations", Journal of Structural Engineering, ASCE, 128, 140-252.
- [12] OMA, 2006. Operational Modal Analysis, Release 4.0. Structural Vibration Solution A/S, Denmark.
- [13] Öziş, Ü., 1993. Su Yapıları, Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh-Mim. Fak., Yayın No: 45, İzmir, Türkiye.
- [14] PULSE, 2006. Analyzers and Solutions, Release 11.2. Bruel and Kjaer, Sound and Vibration Measurement A/S, Denmark.
- [15] Reynolds, P., Pavic, A. ve Prichard, S., 2002. Dynamic Analysis and Testing of a High Performance Floor Structure, International Conference on Structural Dynamic Modeling-Test, Analysis, Correlation and Validation, Maderia Island, Portugal.
- [16] Sasaki, T., Kanenawa, K. ve Yamaguchi, Y., 2004. Simple Estimating Method of Damages of Concrete Gravity Dam Based on Linear Dynamic Analysis, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- [17] Url-1. <http://angora.deprem.gov.tr/ftpt.htm>. 2009.
- [18] USACE, 1994. Arch Dam Design, Engineering and Design, USA.
- [19] USACE, 2003. Time-History Dynamic Analysis of Concrete Hydraulic Structures, Engineering and Design, USA.
- [20] Wilson, E.L. ve Khalvati, M., 1983. "Finite Elements for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems", International Journal for Numerical Methods in Engineering, 19, 1657-1668.

DEMİRKÖPRÜ BARAJI AYLIK BUHARLAŞMA YÜKSEKLİKLERİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE TAHMİN EDİLMESİ

Umut OKKAN
Arş. Gör., İnş. Yük. Müh., Bayburt Üni. Müh. Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bayburt
uokkan@bayburt.edu.tr

H. Yıldırım DALKILIÇ
Arş. Gör., Dr. Müh., Dokuz Eylül Üni., Müh. Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir
yildirim.dalkilic@deu.edu.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 21.12.2009, Bildirinin kabul tarihi: 16.03.2010)

ÖZET

Sunulan çalışmada, adımsal regresyon yöntemi ve ileri beslemeli geri yayımlı Levenberg- Marquardt algoritmali yapay sinir ağı kullanılarak, Gediz Havzası'nda bulunan Demirköprü barajı aylık buharlaşma modelleri hazırlanmış, sonuçlar ölçülmüş tava buharlaşmaları ile karşılaştırılarak modeller sınanmıştır. Modellemede kullanılacak en iyi performans gösteren parametrelerin ise aylık minimum - ortalama sıcaklık ve aylık ortalama rölatif nem parametreleri olduğu görülmüştür. Analiz sonucu, yöntemlerin yaklaşık sonuçlar verdiği görülmüş ancak yapay sinir ağı algoritması performansı adımsal regresyon yöntemine göre daha başarılı bulunmuştur. Ayrıca hazırlanan modelin iklim değişikliği öngörülerini doğrultusunda ve senaryo bazlı çalışmalarda da rahatlıkla kullanılabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Buharlaşma modelleri, yapay sinir ağları, Demirköprü Barajı, iklim değişikliği

PREDICTION OF DEMIRKOPRU DAM'S MONTHLY EVAPORATION BY USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

In the study presented, stepwise regression method and feed forward back-propagation neural network model with Levenberg-Marquardt algorithm have been used to model monthly evaporation for Demirköprü Dam in Gediz Basin and the results were compared with observed evaporimeter values. The parameters which have high performance, were determined as monthly minimum and monthly mean temperature and monthly mean relative humidity. After analysis, it was noticed that the results of each model are approximately similar but neural network algorithm is more successful than stepwise regression method. In addition to that, model can be used effectively in the climate change forecasts and in the different studies based on scenarios.

Keywords: Evaporation models, artificial neural networks, Demirköprü dam, climate change

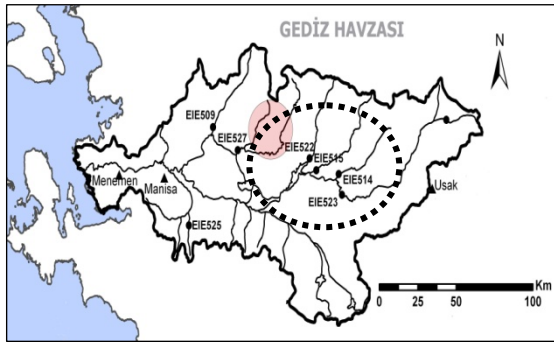
1 GİRİŞ

IPCC'nin 4. Değerlendirme Raporunda belirtildiği üzere, kıta, bölge ve okyanus havzaları ölçeğinde, iklimde pek çok uzun süreli değişiklik gözlenmiştir. Ortalama yüzey sıcaklıkları, buz ve kar örtüsü, yağış miktarları, okyanus tuzluluğu, rüzgâr tipleri ile kuraklık, şiddetli yağış ve sıcak dalgaları gibi uç

olaylardaki yaygın değişiklikler bunlardan en önemlileridir [9]. Sözü edilen bu parametrelerden en anlamlı eğilim yapısına sahip parametrenin ise yüzey sıcaklıkları olduğu kaçınılmaz bir gerçektir. Gerek dünya çapında gerek ülkemiz yüzey sıcaklıklarında gözlenen değişimlere paralel olarak artış gösteren açık su yüzeyi buharlaşmaları ve

azalan akarsu akımlarındaki düşüşler bunu kanıtlar niteliktedir. Bu gerekçelerden hareketle hazırlanan çalışmada iklim değişikliğinin buharlaşmalara olan etkileri vurgulanmak istenmiş ve geliştirilen bir buharlaşma modeli yardımıyla aylık su yüzeyi buharlaşma yüksekliklerinin meteorolojik faktörlerle ilişkisi irdelenmiştir.

Özellikle son yıllarda buharlaşma miktarlarının artması nedeniyle havza su potansiyellerindeki olumsuz değişimler baraj haznelerinin performanslarını da önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin tarımsal sulamada ve elektrik üretiminde Ege Bölgesi'nin can damarlarından biri olan Demirköprü Barajı, kuraklık nedeniyle performans sorunları yaşamaktadır. Sınırları daha önce Köprübaşı ilçesine bağlı Borlu beldesine kadar uzanan baraj gölünün 2007 yılındaki görüntüsü, barajın en kötü dönemlerini yaşadığını kanıtlar niteliktedir. Şekil 1'de Demirköprü baraj gölünün havza üzerindeki bir görünümü verilmiştir.



Şekil 1. Demirköprü Baraj gölü ve Gediz Havzası üzerindeki konumu

Ancak mevcut enerjiye, kütle - enerji transfer mekanizmasına, gölün derinliğine ve yüzey alanına bağlı olarak değişen buharlaşmalar, aynı zamanda, güneş radyasyonu, sıcaklık, rüzgâr hızı, rölatif nem, atmosfer basıncı ve çevresel koşullar gibi birçok faktörden de etkilenmektedir [1]. Bu sebeple buharlaşmaların yeterli ve mümkün oldukça az parametre ile matematiksel olarak modellenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir. Bu kapsamda geliştirilmiş ampirik yöntemler olsa da meteorolojik verilerdeki yetersizliklerden ötürü çoğu zaman bu yöntemler kendi aralarında da çelişebilmektedir.

Bu sebepten ötürü hazırlanan çalışmada, adimsal regresyon yöntemi ile Demirköprü barajı aylık buharlaşma modelinde kullanılacak optimum tahminleyici parametreler belirlenmiş, belirlenen parametreler MATLAB ortamında geliştirilen ileri beslemeli geri yayımlı

Levenberg - Marquardt yapay sinir ağı (YSA) modelinin de girdileri olarak ele alınmıştır.

Gerek adimsal regresyon gerek YSA sonuçları ölçülmüş tava buharlaşmaları ile karşılaştırılarak en iyi model yapısı belirlenmiştir. Modeller 1965-1993 döneminde 05-003 DSI Demirköprü istasyonunda gözlenmiş A sınıfı tava buharlaşmalarıyla kurulmuş; tahminleyici parametreler ise istasyona en yakın, 1965-2008 döneminde ölçülmüş yeterli gözlemi bulunan 17792 DMI Salihli istasyonundan derlenmiştir. Belirlenen buharlaşma modeli yardımıyla 1993 sonrası Demirköprü baraj gölü tava buharlaşmaları türetilerek iklim değişikliğinden kaynaklanan değişimler de vurgulanmıştır.

2 YÖNTEM

2.1 Genel

Su yüzeyinden aylık buharlaşma miktarı doğrudan buharlaşma leğeni ya da evaporimetre denen çeşitli tiplerde metal kaplarla, Bowen oranına bağlı enerji dengesi yöntemleri ile ya da Meyer gibi hidro-meteorolojik verilere bağlı olarak belirlenmiş ampirik yöntemlerle hesaplanabilmektedir [2]. Ancak bu ampirik bağıntılar problemin karmaşıklığı ve belirsizliği yüzünden kendi aralarında da çelişebilmekte ve bazı durumlarda meteorolojik verilerin yetersizliğinden dolayı uygulama alanı bulamamaktadır. Bu sebeple istasyon ölçeğinde ölçülmüş parametreler ile buharlaşma yükseklikleri arasında kurulan tekli-çoklu regresyon teknikleri de yaygın kullanım alanı bulmuştur.

Bunun yanı sıra son dönemlerde çok değişkenli ve doğrusal olmayan doğa olaylarının modellenmesinde yapay sinir ağları sıklıkla kullanılmaya başlanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Temelde insan beyninin çalışma sistemine dayanan yapay sinir ağlarını, bir sistemin girdilerini çıktılara dönüştüren bir kara kutu modeli olarak görmek mümkündür. Bu açıdan, yapay sinir ağlarının diğer modellere kıyasla ön plana çıkan en temel özelliği bilgiye dayalı olarak karar verebilme özelliğinin olması ve eldeki bilgiler ile olayları öğrenerek sonraki olaylar hakkında karar verebilmesidir [12].

Çalışmada, sözü edilen yöntemlerden adimsal regresyon ve ileri beslemeli geri yayımlı Levenberg - Marquardt yapay sinir ağı modellerine ait detaylar aşağıda verilmektedir.

2.2 Adımsal Regresyon

İki değişken arasındaki bağıntının en basit matematiksel ifadesi doğrusal regresyon olarak bilinmektedir [10]. Bağımsız değişken sayısının birden fazla olduğu durumlarda (x_1, x_2, \dots, x_n gibi) ise çoklu regresyon adı verilen teknikler kullanılmakta ve denklemin genel yapısı da; $Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_nx_n$ şeklini almaktadır [8]. Denklemlerdeki a (sabit değer), b_1, b_2, \dots, b_n parametreleri ise en küçük kareler yaklaşımı ile hesaplanabilmektedir.

Kullanılan buharlaşma modelinde, aylık ortalama, en düşük, en yüksek sıcaklık değerleri, aylık ortalama rüzgâr hızı ile aylık ortalama rölatif nem olmak üzere birden fazla bağımsız değişken kullanılmıştır. Bu nedenle çalışmada, hem gerçekten tek başına açıklayıcı olan etkenleri ayırt edebilmek hem de yeterli sayıda değişken kullanarak en iyi buharlaşma kestirimlerini sağlamak amacıyla **adımsal regresyon** tekniğine başvurulmuştur.

Gerçekten de eğer az sayıda bağımsız değişkenin kullanımıyla, bağımlı değişkeni, çok yüksek bir doğrulukla kestirebilme olanağı varsa, anlamlı bile olsalar diğer değişkenleri kullanmaya kalkışmak gereksiz görülmektedir.

Bu kapsamda iki farklı yöntem kullanılabilir; Bunlardan ilki **İleri doğru seçim** yöntemi olup modelde önce bağımlı değişken ile en yüksek korelasyonu veren tek bir bağımsız değişken alınarak başlanır. Buna eklenebilecek, ikinci güçlü değişken yeni modelin kestirim gücünü anlamlı olarak arttırmıyorsa tek değişkenli model yeterlidir. Değilse ekleme işlemi devam etmektedir. Yani işlem her seferinde kestirim düzeyinin anlamlı olarak artması koşulu ile birden fazla değişkenin bulunduğu ancak genellikle tüm değişkenlere kadar uzamayan bir modelle sonlanır [15]. Bu yöntemin tersi ise **Geriye doğru eleme** yöntemidir. Bunda önce tüm değişkenler modele eklenir ve en düşük korelasyonu veren değişken modelden çıkarılarak yeniden model incelenir. Eğer yeni modelin kestirimi eskiye göre anlamlı olarak artış göstermiş ise sırası gelen güçsüz değişken elenerek işlem sürdürülür. Çalışmada İleri doğru seçim yöntemi seçilmiş ve bu işlemler için tarafımızca MATLAB ortamında hazırlanan kodlar kullanılmıştır.

2.3 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları, sinir sisteminin özelliklerinden olan öğrenme yolu ile bilgi üretebilme, tanımlama ve tahmin etme gibi yetenekleri gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen, insan beynini taklit eden bilgisayar

sistemleridir [13]. Yapay sinir ağları biyolojik sinir sistemlerinde olduğu gibi hücrelerin bir araya gelmesiyle oluşturulmakta ve genel olarak hücreler 3 katman halinde tanımlanmaktadır. Yapay sinir ağları kapsamında geliştirilmiş tek katmanlı algılayıcılar [14] ve perseptron adı verilen algılayıcı modelleri [3] de kullanım alanı bulmakta ancak uygulamaların genelinde hatayı geriye yayma algoritmalarını kullanan ileri beslemeli, **geri yayımlı çok katmanlı algılayıcılar** tercih edilmektedir.

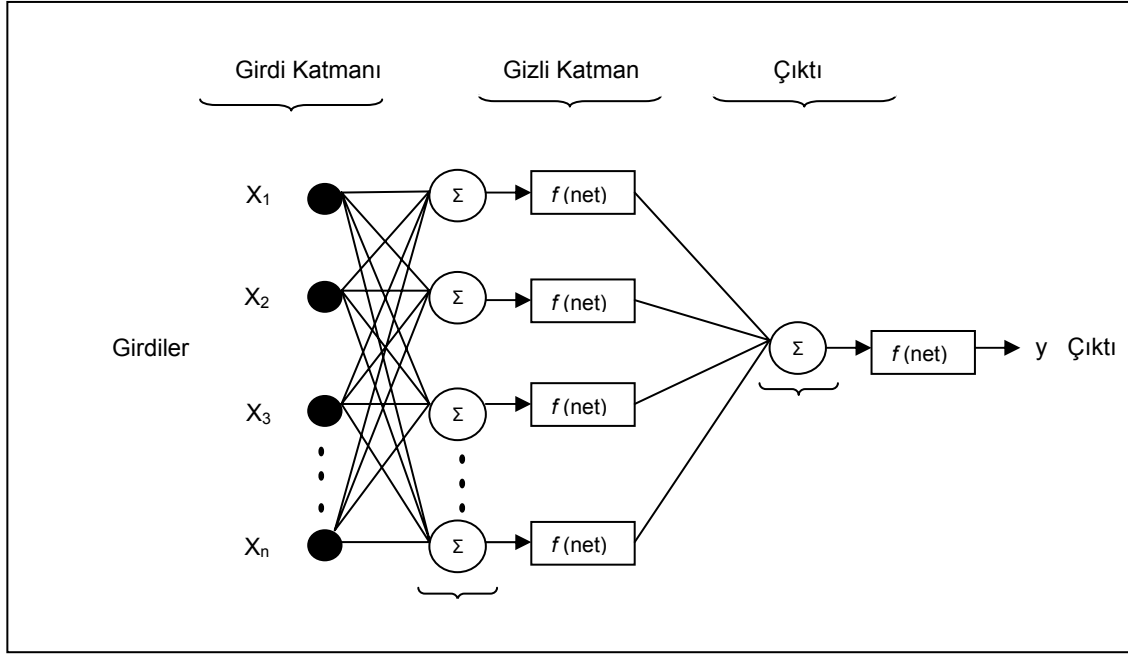
Çok katmanlı yapay sinir ağları, girdi - ara katman (gizli katman) - çıktı katmanı olarak tanımlanan, birbirine paralel olarak bağlı çalışan yapay sinir hücrelerinden meydana gelmektedir. İlk katman giriş katmanı; son katman ise çıkış katmanıdır. Aradaki diğer katmanlar ise gizli katman ya da ara katman olarak adlandırılırlar (Şekil 2). Bir ağda birden fazla ara katman olabilmektedir. Bir yapay sinir ağında kaç tane ara katman kullanılacağı ve her bir ara katmanda kaç sinir hücresi olacağı ise bugüne kadar belirlenememiştir. Probleme göre değişen bu duruma deneme - yanılma yoluyla çözüm getirilebilmektedir [13].

Yapay sinir ağlarındaki bu hücrelere proses eleman da denilmekte; girdiler, ağırlıklar, net fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar olmak üzere 5 temel grupta incelenmektedir [12, 5].

Ağın girdi ve çıktı tabakasında probleme ait veriler bulunmaktadır. Girdi ve çıktı tabakalarındaki hücre sayıları problemde tanımlanan bilgilere bağlı değişkenlik göstermektedir. Girdi tabakasındaki bilgilerin sistem içindeki etkinlikleri ve önemi ise ağırlıklarla sağlanmaktadır. Bilgi, bu ağırlıklarda saklanmakta olup; ağın zekâsı ve öğrenme performansı ağırlık değerlerinin doğru belirlenmesine bağlı olmaktadır. Ağırlıklı girdilerin toplamı, minimumu, maksimumu veya çarpımları olarak bulunan net fonksiyonu ile ise girdilerin bu hücre üzerindeki etkileri ifade edilmektedir. Yapılan modelleme çalışmalarının genelinde ağırlıklı girdilerin toplamı olarak bulunan toplam net fonksiyonu kullanılmaktadır [12, 13, 7].

Toplam net fonksiyonu Bağıntı 1'de gösterilmiştir.

$$\text{net} = \sum_{K=1}^N w_{KJ} x_K + b_J \quad (1)$$



Şekil 2 - Çok tabakalı ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı

Burada;

- X_k : ağıın girdileri,
- w_{kj} :K.proses elemanını J.proses elemanına bağlayan bağlantının ağırlık değerini,
- b_j :J.proses elemanına bağlanan eşik değer elemanının ağırlığını,
- N : veri adedini göstermektedir.

Hücrelere gelen bu net girdiler ise bir aktivasyon fonksiyonu yardımıyla çıktı şeklinde çıktılara dönüştürülür ya da diğer ara proses elemanlarına bağlanır (Şekil 2). Aktivasyon fonksiyonu doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (non-linear) şekilde olabilmektedir. Uygulamalarda genellikle sigmoid adı verilen aktivasyon fonksiyonu kullanılmasıyla beraber, hiperbolik tanjant fonksiyonu da kullanım alanı bulmuştur [12, 11].

Sigmoid fonksiyonu kullanılması halinde proses eleman çıktısı,

$$f(\text{net}) = \frac{1}{1 + e^{-\text{net}}} \quad (2)$$

şeklinde olmaktadır. Hazırlanan çalışmada da aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır.

Yapay sinir ağlarının mimarisi kadar ağıın eğitilmesinde, yani ağıın öğrenmesinde kullanılacak yöntem de çok önemli olmakta ve bu aşamada ağıın girdilere karşılık üretilmesi

gereken çıktıları öğrenmesi amaçlanmaktadır [11]. Çıktı ile beklenen değerler arasındaki fark hata olarak adlandırılmakta; ağı bu hatayı kabul edilebilir sınırlar arasına indirebilmek için işlemi tekrarlamaktadır. Böylece başlangıçta rastgele atanan ağıın ağırlıkları hata istenen sınırlara ulaşıncaya kadar güncellenmektedir. Buna çok tabakalı yapay sinir ağı modellerinde en küçük kareler ortalaması yöntemine dayalı genelleştirilmiş delta öğrenme kuralı da denmekte; ağıın performansı bu fonksiyona göre belirlenmektedir (Bağıntı 3).

$$e(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \sum_{j \in C} [d_j(n) - y_j(n)]^2 \quad (3)$$

Burada N eğitim kümesindeki toplam veri sayısını, C ağıın çıkış katmanındaki bütün sinir hücrelerini içeren kümeyi, d_j istenen değeri, y_j ağıın çıkışını göstermektedir.

Bu kapsamda, belirlenen performans fonksiyonunu en küçükleyecek öğrenme algoritmaları geliştirilmiş ve uygulamalarda kullanılmıştır. Momentum terimli geriye yayılım algoritması, radyal tabanlı algoritmalar, genelleştirilmiş regresyon algoritmaları gibi ağlar bunlardan sadece bazılarıdır. Hazırlanan çalışmada ise öğrenme algoritması olarak, ileri beslemeli geri yayımlı eğitime algoritmasının gelişmiş bir türü olan **Levenberg-Marquardt** algoritmasından yararlanılmıştır.

Levenberg - Marquardt algoritmasında, Hessian matrisi adı verilerin bir matrisin yaklaşık değeri kullanılır. Bu çözüm Bağını 4 yardımıyla yapılabilmektedir [7].

$$H(n) = J^T(n)J(n) + \mu I \quad (4)$$

Bağını (4)'teki μ , Marquardt parametresini, I ise birim matrisi simgelemektedir. Buradaki J matrisi ise, Jakoben matris olarak adlandırılır ve ağ hatalarının ($e(n)$) ağırlıklara göre birinci türevlerinden elde edilmektedir [7, 6, 4].

$$J(n) = \frac{\partial e(n)}{\partial W(n-1)} \quad (5)$$

Ağın hatasının geri yayılması ($g(n)$) ise Jakoben matrisin transpozu ve hata vektörünün çarpımı şeklinde ($J^T(n).e(n)$) çözümlenmekte ve ağın ağırlıkları Bağını 6'da gösterildiği gibi güncellenmektedir [4].

$$W(n+1) = W(n) - [J^T(n)J(n) + \mu I]^{-1}g(n) \quad (6)$$

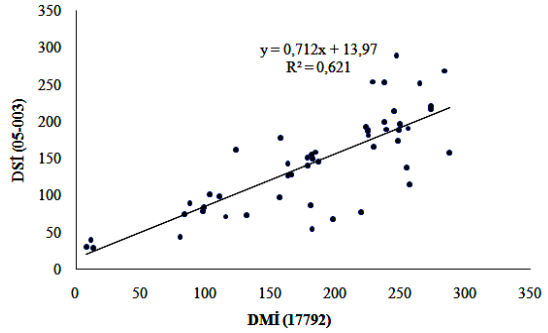
3 UYGULAMA

Demirköprü Barajı, Manisa ilinde, Gediz Nehri üzerinde, sulama, taşkın kontrolü ve enerji üretimi amacıyla 1954 - 1960 yılları arasında inşa edilmiş bir barajdır. Toprak gövde dolgu tipi olan barajın akarsu yatağından yüksekliği 74.00 m'dir. 69 MW güç kapasitesindeki HES (hidroelektrik santrali) yılda 193 GWh elektrik enerjisi üretimi sağlamakta, baraj 99.220 hektarlık bir alana sulama hizmeti vermektedir.

Hazırlanan çalışmada, Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından işletilen Gediz Havzası'nda, Manisa ili sınırlarında bulunan 290 m rakımındaki Demirköprü istasyonu (05-003) aylık tava buharlaşma verileri ve Devlet Meteoroloji İşleri (DMİ) tarafından işletilen yine Gediz Havzası'nda, Manisa ili sınırlarında bulunan 111 m rakımındaki Salihli istasyonu (17792) aylık ortalama, en düşük ve en yüksek sıcaklık verileri ile aylık ortalama rölatif nem verileri kullanılarak Demirköprü baraj gölü aylık buharlaşma yükseklikleri modellenmiştir.

Çalışma kapsamında verilerinden yararlanılan Salihli ve Demirköprü istasyonlarında buharlaşma ölçümleri yapılmış olmasına karşın Demirköprü istasyonunun 1993 yılı sonrası kapatılması nedeniyle buharlaşma ölçümleri bulunmamaktadır. Bu sebeple Salihli-Demirköprü istasyonları buharlaşma ölçümleri

arasındaki korelasyon-regresyon ilişkilerine bakılmış, bu ilişkiler Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. DSİ 05-003 ve DMİ 17792 buharlaşma ilişkisi

Yapılan korelasyon-regresyon ilişkisi incelendiğinde ilişkinin oldukça zayıf olduğu görülmektedir. DSİ 05-003 istasyonunda, 1993'ten günümüze kadar oluşabilecek buharlaşmaların tahmininin ve geleceğe yönelik çıkarımların yapılması aşamasında bu ilişkinin kullanılmasının yeterli olmayacağı düşünülmüştür.

Gerek bu ilişkinin yetersizliğinden gerekse DSİ 05-003 istasyonunda sıcaklık ve nem gibi ölçümlerinin yapılmamış olmasından dolayı, istasyona en yakın ve yeterli ölçümü bulunan DMİ 17792 istasyonu sıcaklık, rüzgâr hızı ve nem verileri kullanılmıştır.

Çalışmada öncelikle Yöntem bölümünde detayları anlatılan adımsal regresyon modelleri oluşturularak en kararlı model tahminleyicileri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle tüm bağımsız değişkenlerle regresyon bağıntısı kurulmuştur. Burada kullanılan değişkenler, aylık ortalama sıcaklık (T_{ort}), aylık en düşük sıcaklık (T_{min}), aylık en yüksek sıcaklık (T_{max}), aylık ortalama rüzgâr hızı (W_{ort}) ve aylık ortalama rölatif nem (R_{ort}) parametreleridir.

Modellerde az sayıda açıklayıcı değişken ile R^2 değeri en yüksek, hata kareler ortalaması düşük olan yapılar aranmıştır. Bağımlı değişkenle en yüksek korelasyonu veren " T_{ort} " değişkeni ile başlanmış (Model 1), daha sonra birinci bağımsız değişkenle birlikte bağımlı değişkendeki varyansa en büyük katkıyı getiren ikinci bağımsız değişken olan " R_{ort} " ile analize devam edilmiş (Model 2) ve bu işlemler modele " T_{min} " değişkeninin de dâhil edilmesiyle bitirilmiştir (Model 3). MATLAB ortamında hazırlanan kod vasıtasıyla yapılan bu işlemlerde T_{max} ve W_{ort} değişkeni modelden otomatik olarak atılmıştır. En başarılı regresyon

modeli olan **Model 3** ve diğer iki model yapısı aşağıda özetlenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1 - Adımsal regresyon sonuçları

Model No	Model Yapısı
1	$-88.4 + 12.2 T_{ort}$
2	$136.5 + 8.7 T_{ort} - 2.7 R_{ort}$
3	$205.6 + 5.1 T_{ort} - 3.1 R_{ort} + 3.6 T_{min}$

Bağımlı değişkene en yüksek korelasyonu veren bu tahminleyici parametreler (T_{ort} , R_{ort} , T_{min}) aynı zamanda Yapay Sinir Ağı (YSA) modelinin de girdileri olarak kullanılmıştır (4. Model). Kıyaslama açısından, modeller veri setlerinin %50'si ile kurulmuş (Ocak 1965-Haziran 1979), geri kalan %50'si (Temmuz 1979- Aralık 1993) ile test edilmiştir. Bu aşamada yöntem bölümünde detayları anlatılan Levenberg - Marquardt eğitme fonksiyonu ve logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Logaritmik sigmoid aktivasyon fonksiyonunun özelliğinden dolayı bütün girdi ve çıktı değerleri 0.1 - 0.9 arasında Bağlantı 7 kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Eğitim bittikten sonra ölçeklenen veriler ters işlem ile orijinal değerlere dönüştürülmüştür.

$$z_i = 0.1 + \frac{0.8 (x_i - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} \quad (7)$$

Ağın eğitiminde, gizli tabakadaki hücre sayısı, başlangıç Marquardt parametresi ve ağın iterasyon sayısı deneme yanılma yoluyla, hata kareler ortalaması minimum (HKO), tanım aralığı 0-1 arasında değişen ve istatistikte uyum iyiliğinin bir ölçütü olan determinasyon katsayısı (R^2) maksimum olacak şekilde belirlenmiştir. Çeşitli denemelerden sonra eğitim ve test seti performansını en yüksek yapan gizli katman sayısı 1, gizli katmandaki hücre sayısı "3", başlangıç Marquardt parametresi " μ " ise 0.006 olarak belirlenmiştir. Ağın eğitimi aşamasındaki yapılan iterasyon sayısı ise "60" olarak belirlenmiştir.

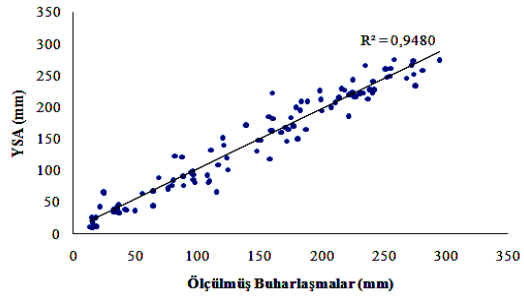
Çalışma sonucu, hazırlanan YSA modeli (Model 4) performansının adımsal regresyon modellerinden daha başarılı olduğu görülmektedir. Modellere ait eğitim ve test performansları Çizelge 2 ve Çizelge 3'te sunulmuştur. Şekil 5 ve 6 'da ise en başarılı (YSA) modelin (4. Model) eğitim ve test dönemlerine ait saçılım diyagramları gösterilmiştir.

Çizelge 2 - Model performanslarının karşılaştırılması

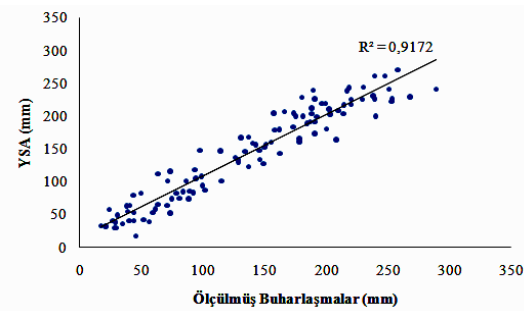
Model No	R^2 Eğitim	R^2 Test
1	0.9017	0.8465
2	0.9247	0.8836
3	0.9292	0.8906
4	0.9480	0.9172

Çizelge 3 - Modellere ait ortalama hataların karşılaştırılması (mm)

Model No	Ort. Hata Eğitim (mm)	Ort. Hata Test (mm)
1	25.76	34.87
2	22.54	27.60
3	21.86	26.32
4	18.73	21.85



Şekil 5 - Eğitim aşamasında yapay sinir ağı tahminleri - Ölçülmüş değerler ilişkisi



Şekil 6 - Test aşamasında yapay sinir ağı tahminleri - Ölçülmüş değerler ilişkisi

4 SONUÇLAR

Çalışmada, Demirköprü baraj gölü aylık buharlaşma modelleri sunulmuştur. Modeller, eğitim ve test aşamalarındaki determinasyon katsayılarının büyüklüğüne göre sınanmış; her iki aşamada da YSA modeli daha başarılı bulunmuştur. Modeller 1965-1993 döneminde 05-003 DSI Demirköprü istasyonunda

gözlenmiş A sınıfı tava buharlaşmalarıyla kurulmuş; tahminleyici parametreler ise istasyona en yakın, 1965-2008 döneminde ölçülmüş yeterli gözlemi bulunan 17792 DMI Salihli istasyonundan derlenmiştir. Belirlenen buharlaşma modeli yardımıyla 1993 sonrası Demirköprü baraj gölü tava buharlaşmaları türetilerek iklim değişikliğinden kaynaklanan değişimler aşağıda vurgulanmıştır (Çizelge 4).

YSA modeli oluşturulduktan sonra 05-003 DSI Demirköprü istasyonunda 1965-1993 döneminde buharlaşmaların ölçülmediği aylar için veriler YSA modeli ile tamamlanmış, tamamlanan veri seti kullanılarak oluşturduğumuz YSA modeli çalıştırılmış, 1994-2008 yılları buharlaşma değerleri tahmin edilmiştir.

Çizelge 4 - Buharlaşmalardaki değişimler ve uzun dönem istatistikleri

	Ortalama (mm/yıl)	Standart Sapma (mm/yıl)
1965-1993	1381,5	225,3
1994-2008	1461,4	118,0
Değişim (%)	5,8	-47,6

Çizelge incelendiğinde yıllık toplam buharlaşma yüksekliklerinin ortalamalar açısından arttığı rahatlıkla görülebilmektedir. Bununla birlikte, modelin iklim değişikliği öngörülerini doğrultusunda, sıcaklıktaki artış ve yağıştaki azalmaya bağlı olarak özellikle buharlaşma ölçümünün olmadığı ya da eksik olduğu bölgelerde; bu öngörülere göre buharlaşmanın bilinen parametrelere bağlı olarak hesaplanabilmesi, iklim değişikliği etkilerinin senaryo bazlı irdelenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan çalışmanın bu amaca yönelik bir katkı sağlayacağı, belirlenen parametrelere bağlı kalınarak sağlıklı bir modelleme yapılabileceği düşünülmektedir.

5 TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmanın hazırlanması aşamasında gerek veri temini gerekse fikir aşamasında yardımlarını esirgemeyen DSİ İl Bölge Müdürlüğü Planlama Şube Müdürü Aslı SİLAY'a ve diğer tüm çalışanlarına; ayrıca yine veri temini aşamasında katkılarını esirgemeyen DMI Genel Müdürlüğü çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirler.

6 KAYNAKLAR

[1] Abtew, W.(2001), "Evaporation Estimation for Lake Okeechobee in South Florida", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 127(3), p.140-147.

- [2] Bayazit, M., Avcı, İ., Şen, Z.,(2001). "Hidroloji Uygulamaları". ITU İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, s.36-37.
- [3] Block, H. D. (1962). "The perceptron: A model for brain functioning". Reviews of Modern Physics, 34:p.123-135.
- [4] Bolat, S., Kalenderli, Ö. (2003). "Levenberg-Marquardt Algoritması Kullanılan Yapay Sinir Ağı ile Elektrot Biçim Optimizasyonu" International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks.
- [5] Cıgızoğlu, H.K., (2001). "Yapay sinir ağları ve zaman serileri analizinde kullanımı". III. Ulusal Hidroloji Kongresi, s.579-586, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [6] Cong Chen T., D. Jian Han, F. T. K. Au, L. G. Than (2003), "Acceleration of Levenberg-Marquardt training of neural networks with variable decay rate," IEEE Trans. on Neural Net., vol. 3, no. 6, p. 1873-1878.
- [7] Hagan M. T. and Menhaj M. B.(1994), "Training feed forward network with the Marquardt algorithm," IEEE Trans. on Neural Net., vol. 5, no. 6,p.989-993.
- [8] Hocking, R. R. (1976). "The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression". Biometrics, p.32.
- [9] IPCC, (2007). "Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Summary for Policy Makers.
- [10] Lindley, D.V. (1987). "Regression and correlation analysis". New Palgrave: A Dictionary of Economics, 4, p.120-23.
- [11] Mandic D. P. ,Chambers J. A. (2001). "Recurrent Neural Networks for Prediction - Learning Algorithms, Architectures and Stability", John Wiley & Sons Ltd.
- [12] Öztemel, E., (2003). "Yapay Sinir Ağları". Papatya Yayıncılık. İstanbul.
- [13] Skapura, D. M. (1996). "Building Neural Networks", Addison-Wesley, New York.
- [14] Widrow, B. and Stearns S. D. (1985), "Adaptive Signal Processing", Prentice-Hall.
- [15] Wilkinson, L. and Dallal, G.E. (1981) "Tests of significance in forward selection regression with an F-to enter stopping rule." Technometrics. 23. p.377-380.

TÜNEL DELME MAKİNELERİ VE PERFORMANS ANALİZLERİ ÖRNEK ÇALIŞMA: ERMENEK (KARAMAN) ENERJİ TÜNELİ

Ayhan KOÇBAY

Dr., Jeoloji Yük. Müh., DSİ Jeoteknik Hizmetler ve YAS Dairesi Başkanlığı 06100 Yücetepe ANKARA
akocbay@dsi.gov.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 18.02.2010, Bildirinin kabul tarihi: 22.03.2010)

ÖZET

Tüneller makinesiz el ile yapılan kazı, del-patlat yöntemi ve/veya tünel delme makineleri kullanılarak açılmaktadır. Tünel delme makinelerinden özellikle tam cepheli "Tünel Delme Makineleri (Tunnel Boring Machine-TBM)" ile yapılan kazılar, hızlı ve ekonomik olması nedeniyle son yıllarda ulaşım, sulama, enerji vb amaçlı projelerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Tünel delme makinelerinden en iyi verimin alınabilmesi için makine, arazideki jeolojik ve jeoteknik şartlara göre tasarlanmalıdır.

Bu çalışmada DSİ tarafından halen yapımı devam eden Ermenek Barajı ve HES (Karaman) inşaatı kapsamında yapılan enerji tüneli kazısı ele alınmıştır. Kazı çapı 6,60 m, nihai çapı 5,60 m ve toplam uzunluğu 8553,00 m olan enerji tünelinin 8028,00 m'lik kısmı TBM ile açılmıştır. Tünelde kireçtaşı, ofiyolit ve filiş birimlerini kesilmiştir. Bu birimlerin jeolojik (litolojik yapı, mineral içeriği, dokanaklar arası ilişki ve ayrışma durumu) ve jeomekanik özellikleri (yoğunluk, suya doygunluk, süreksizlik, gözeneklilik, mukavemet ve gerilme değerleri) yapılan jeoteknik çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. TBM'in kazı öncesi hesaplanan teorik ve kazı sırasındaki gerçek verimliliği (performansı ve ilerleme hızı) güzergah boyunca değişen zemin koşullarında incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ermenek, Tünel delme makinesi (TBM), performans analizi, Q_{TBM}

TUNNEL BORING MACHINES AND PERFORMANCE ANALYSES KEY STUDY: ERMENEK (KARAMAN TURKEY) POWER TUNNEL

ABSTRACT

Excavations by full face "Tunnel Boring Machines (TBM)" are extensively used at transportation, watering and energy projects in recent years, due to their high progressive speed and cost advantages. Each TBM is designed for specific geological and geotechnical conditions at study area in order to get the maximum performance.

In this study, power tunnel excavation works, is selected as a case study under the ongoing Ermenek Dam and HEPP (Karaman) construction, which is supervised by State Hydraulic Works (DSI). 8028,00 m's of 8553,00 m long tunnel is being excavated by a TBM, which has excavation diameter of 6,60 m and 5,60 m of inner diameter. The tunnel alignment cuts the limestone, ophiolite and phylis series. Geological (lithology, mineral content, contact boundary interactions and alteration conditions) and the geomechanical properties (density, water saturation, discontinuity, porosity, compression and tension strength values) of these units were identified after the geotechnical investigations. Theoretical and the real performances (progressive speed) of TBM was analyzed along the varying soil conditions

Keywords: Ermenek, Tunnel Boring Machines (TBM), performance analyses, Q_{TBM}

1 TÜNEL DELME MAKİNELERİNİN GELİŞİMİ VE ÇEŞİTLERİ

İnsanoğlu var olduğu süreden beri kazı işleri ile uğraşmıştır. Yapılan arkeolojik çalışmalar binlerce yıl önce dahi insanların çeşitli amaçlar için zemini ve kayaları kazdığını ortaya koymuştur. Buna rağmen kazı mekaniğinin anlaşılmasına başlanması ancak 60-70 yıl öncesine dayanmaktadır.

Kazının makinelerle yapılması ise biraz daha eskidir [Bilgin, 1989]. Kazı mekaniği oldukça yeni bir bilim dalıdır ve gelişimini kömür madenciliğine borçludur. Su yapıları ile ilgili tünel kazıları tarihsel olarak çok daha önce yapılmış olmasına rağmen mekanize olarak yapılan ilk kazılar 19. yüzyılda yer altı kömür üretimi ile başlamıştır. 1850 yıllarında kesici uçların basınçlı hava ile kullanılmaya başlaması ve 1900'dan sonra elektrik enerjisinin yeraltına inmesi ile de gelişim kazanmıştır.

ABD de 1910 ile 1920 yılları arasında malzeme alanında ki gelişmeler, özellikle yeni darbeli delicilerin yapılmasında ve modern kazı makinelerinin tasarımlarının temellerinin atılmasında etkili olmuştur. Kömür madenciliğinin dışında inşaat sektöründeki ilk modern gelişme 1884 yılında Albay Beaumont'un Manş denizinin altından geçecek 2,14 m çapında ki bir tünel için tasarımı yaptığı tam cepheli bir tünel delme makinesi ile başlamıştır [Robbins, 1976]. Daha sonra ise 1955 yılında ilk serbest dönen kesikli tünel delme makineleri Goodman

Manufacturing Company tarafından imal edilmiş ve ABD deki Oahe barajı tünellerinde başarı ile kullanılmıştır [Bilgin, 1989].

Tünel delme makineleri ile ilgili olarak değişik özellikler ve amaçlar dikkate alınarak yapılmış çeşitli sınıflamalar mevcuttur. Bu çalışmada öncelikle, amaca yönelik olarak çok geniş bir sınıflama yapılmış ve makine özellikleri kısaca anlatılmıştır. Daha sonra ise, Türkiye'de bir enerji projesinde ilk defa kullanılan tünel delme makinesinin Q_{TBM} yöntemi ile yapılan performans analiz sonuçları verilmiştir.

1.1 Kısmi Cepheli Tünel Delme Makineleri

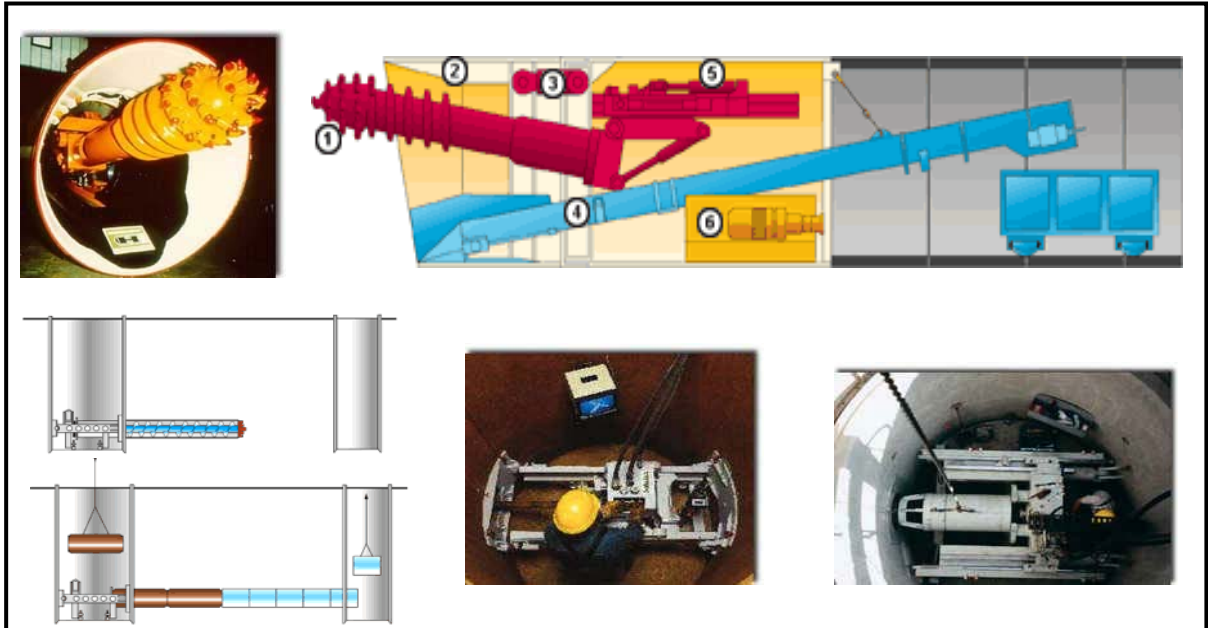
Bunlar genel olarak daha çok yumuşak ve orta sert özellikli zeminlerde ve özellikle madencilik sektöründe kullanılırlar. Ayrıca son yıllarda kısa mesafeli boru yerleştirme sistemleri içerisinde de kullanılmaya başlamışlardır. Burgulu ve kollu olma üzere başlıca iki tipleri mevcuttur.

1.1.1 Burgulu kazıcılar

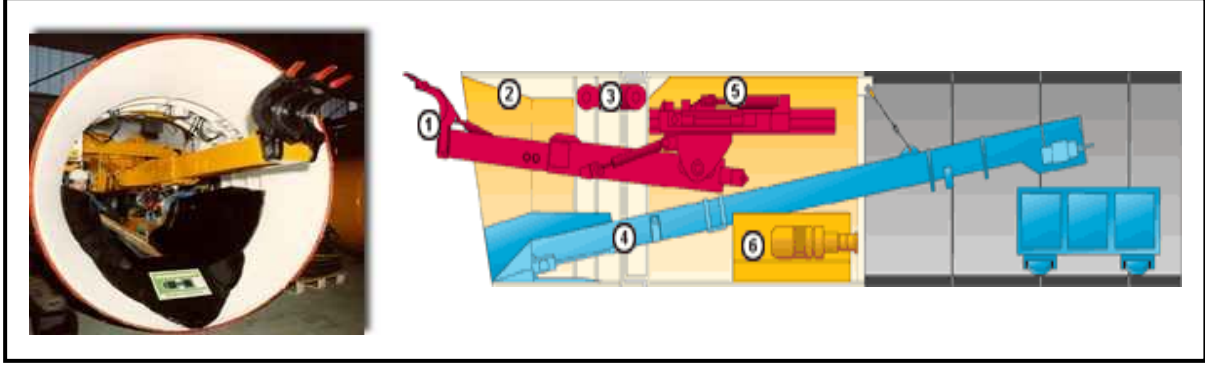
Burgulu kazıcılar kazılacak yüzey boyunca değişik yönlerde hareket ederek malzemenin kazılmasını sağlar. Daha çok yumuşak formasyonlarda kullanılır (Şekil 1).

1.1.2 Kollu kazıcılar

Kollu kazıcılar kazılacak yüzey boyunca değişik yönlerde hareket ederek malzemenin kazılmasını sağlar. Daha çok yumuşak formasyonlarda kullanılır (Şekil 2).



Şekil 1 - Burgulu kazıcılar



Şekil 2 - Kollu kazıcılar

1.2 Tam Cepheli Tünel Delme Makineleri (TBM)

Tünel delme makineleri günümüzde başta şehir içi raylı sistemler (metro) ve hidroelektrik santral (HES) projeleri olmak üzere uzun bir güzergah boyunca sürekli ve yüksek performans gerektiren tünel açma işlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Açılacak olan tünelin çapına, deleceği zeminin jeolojik ve jeoteknik özelliklerine göre tasarlanan TBM'ler, her proje için özel olarak üretilir [Fruguglietti vd, 2000, Koçbay vd, 2004 ve Koçbay, 2007].

Derivasyon ve enerji tünelleri, genellikle baraj gövdesinin yanal olarak dayandığı sağlam kayalar içinde açılır. Dolayısıyla tünel açma işleminde kayanın, kazı sırasında oluşan ikincil gerilmelerden en az derecede etkilenmesi ve bu sayede minimum tahkimat gereksinimleri ile donatılması istenmektedir. TBM ile tünel açma yöntemi ise sahip olduğu kazı performansı ve eş zamanlı tahkimat desteği sayesinde klasik del-patlat ve küçük çaplı mekanik kazıcıların kullanıldığı konvansiyonel tünel açma yöntemlerine nazaran daha ekonomik ve verimlidir. Günümüzde proje için uygun TBM seçimi, toplam proje maliyetleri üzerinde

doğrudan belirleyici bir durum almıştır [Alber vd, 2000]. Son yıllarda tünel kazısı için seçilen TBM'in projenin bütünü üzerindeki ekonomik etkileri uluslararası çalışmalarda da ön plana çıktıkça, fizibilite çalışmaları sırasında TBM performansının "öngörülebilirliği" üzerine de çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Temel olarak TBM'in verimi zeminin jeoteknik özelliklerinden etkilenmekle birlikte makine tasarımının da bu konuda önemli rol oynadığı bilinmektedir [Nielsen vd, 1993].

1.2.1 Küçük çaplı tünel makineleri

Tünel makineleri değişik özelliklerine göre sınıflandırılmışlardır. Bunlardan biriside çapsal büyüklüktür. Genel olarak çapı 3,00 m'den küçük olan makineler küçük çaplı olarak kabul edilmektedir. Daha çok sulama ve alt yapı çalışmalarında kullanılırlar.

1.2.1.1 Kuru ve az nemli zeminler için

Bu tip zeminlerde kullanılacak makinelerde kafa kısmı, kesicilerin adedi ve konumu zeminin özelliğine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Genellikle kesme ve itme gücünde bir problem yaşanmaz (Şekil 3).



Şekil 3 - Kuru ve az nemli zeminlerde kullanılan makineler

1.2.1.2 Balçık zeminler için

Bu tip zeminlerde kullanılacak makinelerde kafa kısmının zemin içerisinde sıkışmasını önlemek, üstteki malzemenin akışını engellemek için gelen suyun drenajını sağlayan ve basıncı dengeleyen sistemler yer alır. Kesici sayısı oldukça azdır (Şekil 4).

1.2.2 Büyük çaplı tünel makineleri

Genel olarak çapı 3,00 m'den büyük olan makineler büyük çaplı olarak kabul edilmektedir. Hemen her türlü zemin şartında kullanılabilen bu makinelerde istenilen

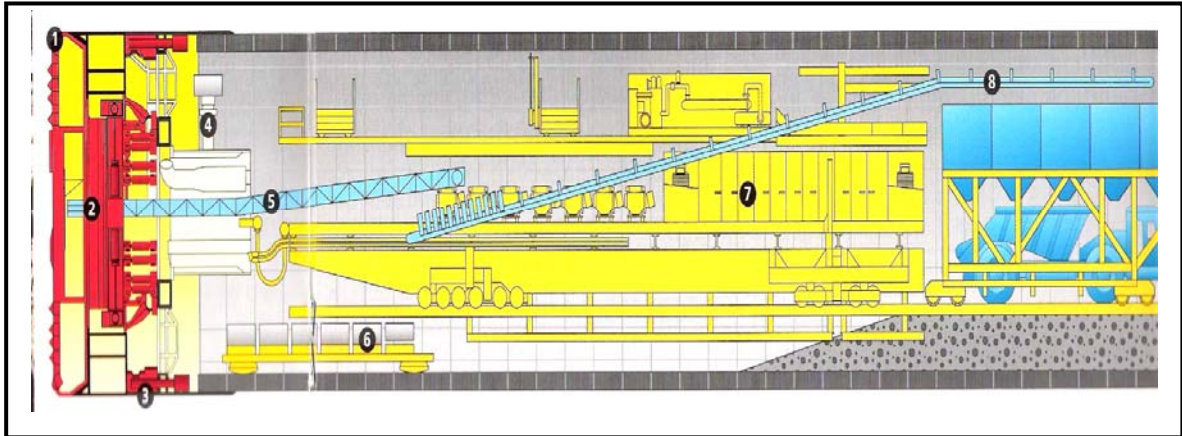
başarının elde edilebilmesi için zeminin jeolojik ve jeoteknik özellikleri çok iyi belirlenmelidir.

1.2.2.1 Kalkansız

Bu makinelerde sadece öndeki kesici kafa kısmının üzerinde bir koruyucu bölüm vardır (Şekil 5). Diğer bölümleri ise açıktır. Kafa kısmının arkasında yer alan yanlara yaslanıp ilerlemeyi sağlayan ve gripper adı verilen ekipmanın tipine göre tek veya çift tutuculu olarak adlandırılırlar (Şekil 6). Daha çok sağlam kendini tutma süresi yüksek olan zeminlerde kullanılır ve tünel kazısı tamamlandıktan sonra iç kaplama yapılır.



Şekil 4 - Balçık zeminlerde kullanılan makineler

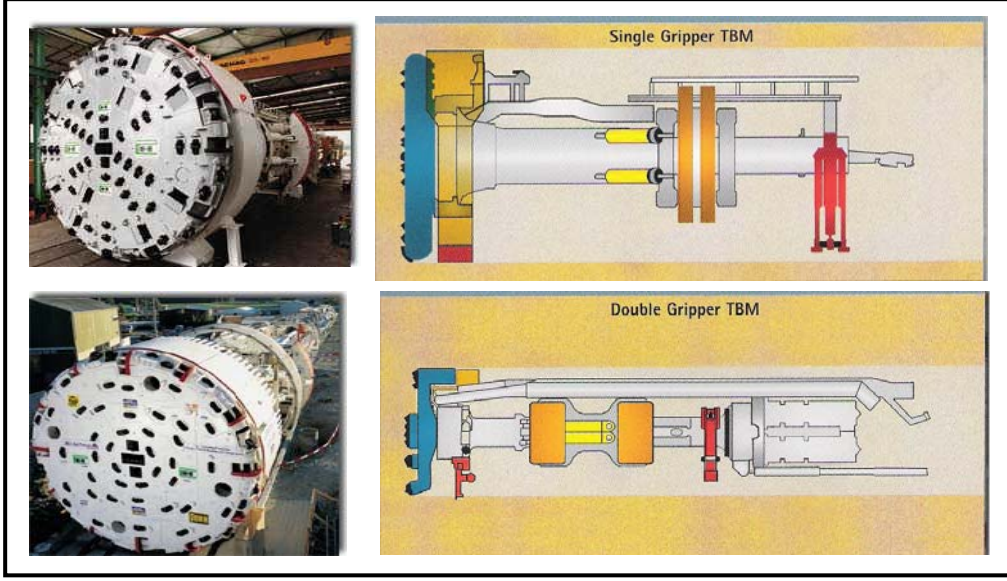


Şekil 5 - Kalkansız tünel delme makinesi şematik görünümü

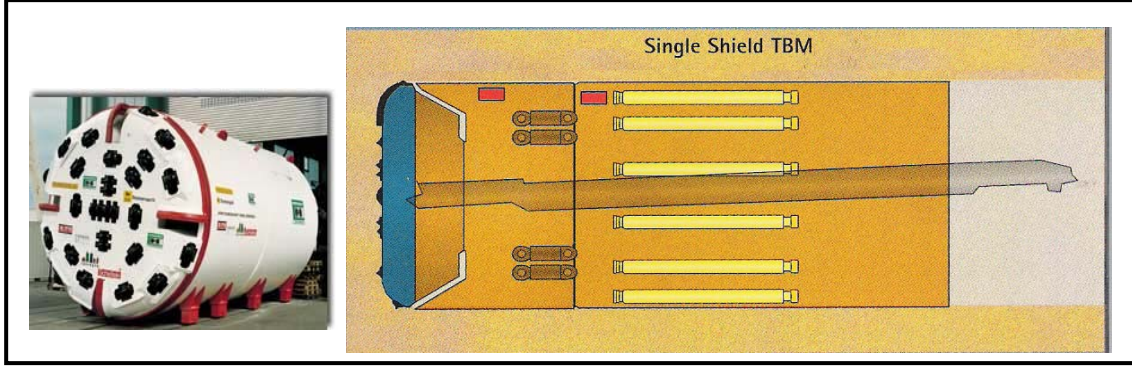
1.2.2.2 Kalkanlı (Shield)

Bu makinelerde öndeki kesici kafa kısmının üzerinde ve arkasındaki kısımda koruyucu bölüm vardır. Diğer bölümleri ise açıktır. Kafa kısmının arkasında yer alan bu koruyucu

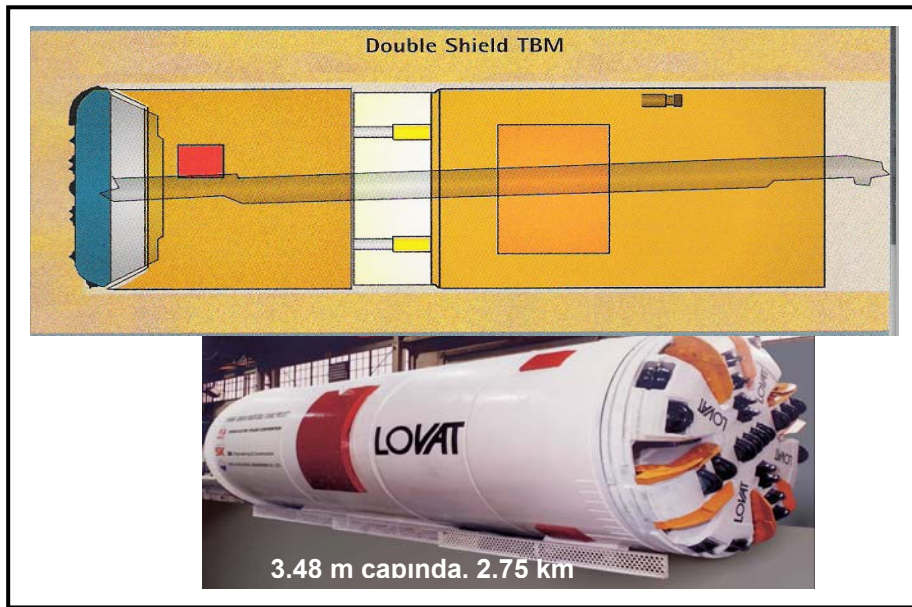
bölümün tipine göre tek kalkanlı veya çift kalkanlı olarak adlandırılırlar (Şekil 7 ve 8). Daha çok sağlam kendini tutma süresi az olan zayıf zeminlerde kullanılır ve tünel kazısına paralel olarak iç kaplama yapılır.



Şekil 6 - Tek ve çift tutuculu kalkansız tünel delme makinesi şematik görünümü



Şekil 7- Tek kalkanlı (single shield) tünel delme makinesi

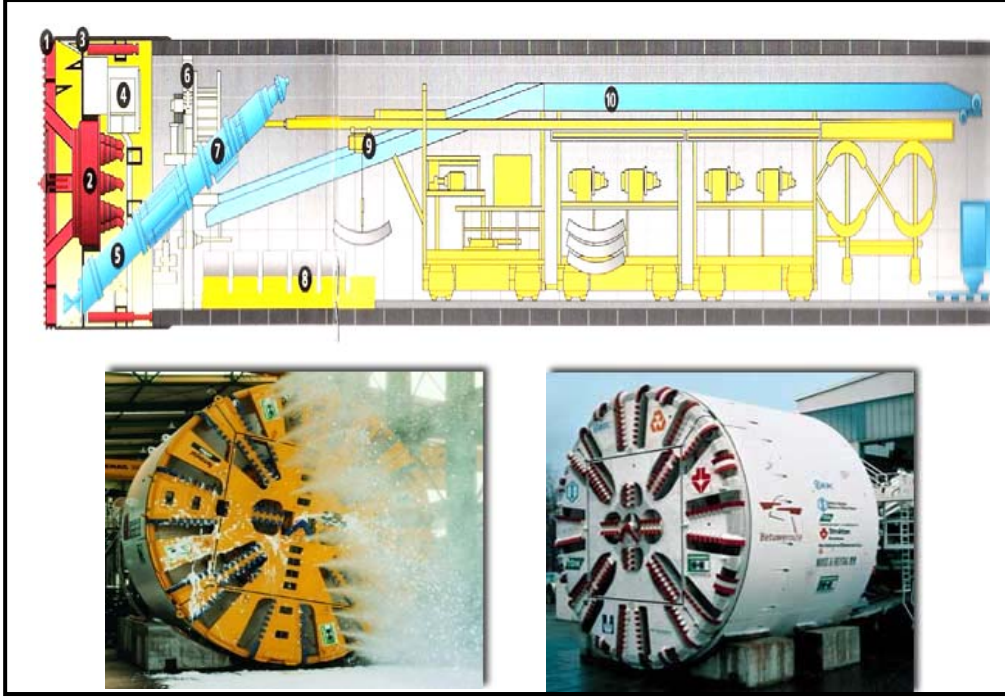


Şekil 8 - Çift kalkanlı (double shield) tünel delme makinesi

c) Zemin basınç dengeleyicili (Earth pressure balance-EPB)

Zayıf zeminlerde kullanılan zemin basınç dengeleyici tipte olan makinelerde kalkanlı makineler grubunda yer alırlar (Şekil 9). Bu makinelerde ön bölümde yer alan bir sistem ile

kimyasal madde yada bentonit türü malzemeler kullanılarak bir piston sistemi ile zeminden gelen basınç ile makinenin uygulayacağı basınç dengelenir.

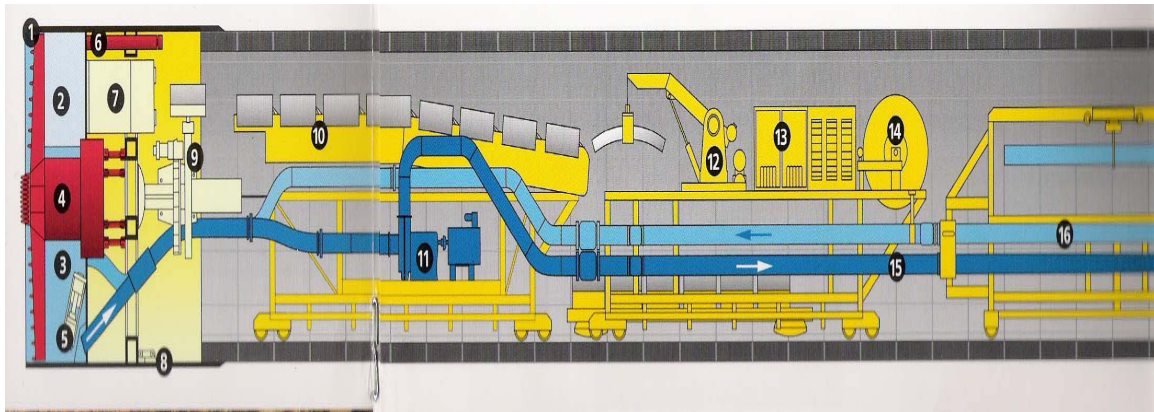


Şekil 9 - Zemin basınç dengeleyici tünel delme makinesi

d) Karışık tip (Mix shield)

Bu tip makineler farklı zemin koşullarının olduğu durumlarda kullanılır. Sağlam kendini tutabilen zeminlerde normal tek kalkanlı makineler gibi çalışırken, akıcı zeminlerde

zemin basınç dengeleyici vb sistem devreye girer. Dolayısıyla oldukça farklı özellikler sahip olup en pahalı makine grubunda yer alırlar, (Şekil 10).



Şekil 10 - Karışık tip tünel delme makinesi

1.3 Tam cepheli tünel delme makineleri avantaj ve dezavantajları

<u>Avantajları</u>	<u>Dezavantajları</u>
<ul style="list-style-type: none">- Yüksek ilerleme hızı- Kazı ve tahkimatta devamlılık- Aşırı sökülme az- Desteklemenin az olması- Pasada üniformalığın sağlanabilmesi- Pasa naklinde hız ve kolaylık- Yüksek iş güvenliği- Otomatik işletme ve uzaktan kumanda imkanı	<ul style="list-style-type: none">- İlk yatırım maliyetinin yüksek olması- Sabit dairesel geometri- Farklı jeolojik durumlarda kısıtlı esneklik- Sert ve aşındırıcı kayalarda keski masrafı- Mobilizasyonun uzun süreli olması- Ekipman temini- Güç temini- Tecrübeli ekip temini

2 PERFORMANS ANALİZ MODELLERİ

Mekanik kazı teknolojisinin kullanıldığı yeraltı kazı (tünel, galeri vb.) projelerinde, bu makinelerin ilerleme hızı ve kayaçların mühendislik özellikleri arasındaki ilişkilerin bilinmesi projenin zamanında tamamlanması ve doğru kazı ekipmanının seçiminde önemlidir. Mekanik kazı yöntemi kullanılarak açılan tünel projelerinin en önemli parametrelerinden biri kazı makinesinin ilerleme hızıdır.

Eğer TBM özellikleri (güç, bastırma ve döndürme kuvveti vb) ve kayaç mühendislik özelliklerinin (tek eksenli basınç dayanımı, çekme dayanımı, kırılma değeri, kayaç kütlelerinin çatlak açıklık ve oryantasyonu vb.) fonksiyonu olarak, makinenin ilerleme hızı tahmin edilebilirse, bir tünel projesinin ne kadarlık bir süreç içerisinde tamamlanabileceği kestirilebilir. TBM ilerleme hızının kestirimi amacıyla, dünyada farklı kayaç türleri göz önünde bulundurularak, TBM özellikleri veya kayaç parametreleri kullanılarak performans modelleri geliştirilmiştir [Yağız vd, 2008].

Q_{TBM} , Colorado School of Mines (CSM) ve NTNU (Norwegian Institute of Technology) performans modelleri en iyi bilinen ve en sık kullanılan performans tahmin ve analiz modelleridir.

[Barton, 1999] tarafından 145 adet TBM kazısı temel alınarak ortaya konan ve aynı araştırmacı tarafından [Barton, 2003] geliştirilen Q_{TBM} yönteminde, zeminin jeomekanik özellikleri ile makine parametrelerini bir arada kullanarak, TBM'in tünel güzergahı boyunca tek seferdeki (vardiyada) kazı verimliliği (teorik ilerleme hızı) m/saat cinsinden tahmin edilebilmektedir.

1970'li yılların sonunda oluşturulmaya başlanan ve halen gelişimi devam eden CSM modeli TBM döner kafasında yer alan her bir disk keskinin temas ettiği kayacı kesmesi için harcayabileceği yükü hesap etmek temeline dayanır. Buradan yola çıkarak, bir kayacın kesilebilmesi için gerekli olan toplam bastırma, döndürme kuvvetleri ve güç, TBM döner kafasında yer alan keski sayısı göz önüne alınarak hesap edilir. Modelin genel olarak özetlersek; bu modelin toplam disk keski yükünü hesap eden esas formülü, kayaçların tek eksenli basınç ve Brazilyan çekme dayanımı, disk keski yükü, kesme derinliği disk keski yarıçapı, disk keski-kayaç yüzeyi teması kalınlığı (tip width) ve kayaç-disk keski temas açısının fonksiyonudur. Sonuç itibarıyla, CSM modelinde TBM'in kaya kütesine uygulayabileceği basma, döndürme kuvveti, kesme derinliği ve güç esas alınarak, tünel boyunca TBM in göstereceği performans, m/saat veya mm/devir cinsinden yarı teorik ve görgül olarak tahmin edilir.

1980'lerden itibaren oluşturulmaya başlanan ve gelişimi devam eden NTNU modeli Avrupa'da yaygın kullanılan görgül bir modeldir. Modelin temeli Oskandinav (Norveç, İsveç) ülkelerinde TBM kullanılarak açılan tünellerden elde edilen saha ve laboratuvar verilerine dayanır. NTNU modelinde, kayaç kütle parametreleri ve TBM özelliklerine ait veriler kullanılarak, güç ve özellikleri bilinen bir TBM ile bir tünelin ne kadarlık bir zaman içinde delinebileceği hesap edilebilir. Modelde kullanılan kayaç kırılma, aşınma ve delinebilirlik parametreleri (S20, DRI, Siever's J, AV, AVS vb) sadece NTNU modelinde Norveç standartları kullanılarak yapılan kayaç deney yöntemleridir. Performans analizinde kullanılan başlıca deneyler Çizelge 1'de verilmiştir.

Tünel güzergahlarında ki jeolojik birimlerin yatay ve düşey yöndeki değişikliklerinin ve jeoteknik özelliklerinin sık aralıklarla yapılacak çalışmalarla detaylı olarak belirlenmesi, kazı

makine tipinin doğru seçilmesini sağlayacaktır. Böylece kazı veriminin artırılması sağlanmış olacak, zaman ve ekonomik kayıplar en aza indirilebilecektir.

Çizelge 1 - TBM performans analizinde kullanılan kayaç deneylerinin standartları [Yağız vd, 2008]

Kayaç Deneyleri	ISRM Standartları	ASTM Standartları	Diğer Standartlar
İnce Kesit Analizi	ISRM (1978)	-	-
Sertlik	-----	-----	-----
Schmidt Çekici	ISRM (1978)	ASTM D5873-00	-
Seiver's J-değeri	-	-	NTNU
Kırılganlık	-----	-----	-----
Uç Bastırma	-	-	CSM
S ₂₀ -Değeri	-	-	NTNU
Dayanım	-----	-----	-----
Tek Eksenli Basınç	ISRM (1979)	ASTM D2938-95	-
Brazilyan Çekme	ISRM (1978)	ASTM D3967-95	-
Nokta Yük İndeksi	ISRM (1985)	ASTM D5731-95	-
Üç Eksenli Basınç	ISRM (1983)	ASTM D4406-93	-
Aşınma	-----	-----	-----
Cherchar İndeksi	-	-	CSM
AV-AVS Değerleri	-	-	NTNU
Fiziksel Özellikler	-----	-----	-----
Elastisite Modülü	ISRM (1979a)	ASTM D3148-96	-
Sonic Hız	ISRM (1978d)	ASTM D2845-95	-
Yoğunluk	ISRM (1979b)	-	-
Gözeneklilik	ISRM (1979b)	-	-
Kesme Deneyleri	-----	-----	-----
Doğrusal Kesme	-	-	CSM
Dönerek Kesme	-	-	CSM

3 ÖRNEK ÇALIŞMA: ERMENEK (KARAMAN) ENERJİ TÜNELİ (KARAMAN)

Bu çalışmada DSİ tarafından ihale edilen ve inşaatı BM Mühendislik İnşaat ve A.Ş., Alpine-Mayreder, Pöyry, VA TECH, Alstom Power ve Voith Siemens firmalar grubu tarafından yürütülmekte olan Ermenek Barajı ve HES inşaatı (Karaman) kapsamında yer alan Ermenek enerji tüneli kazısı ele alınmıştır. Kazı çapı 6,60 m, nihai çapı 5,60 m ve toplam uzunluğu 8553,00 m olan enerji tünelinin 8028,00 m'lik kısmı TBM ile açılmıştır.

Tünel kazısına tünel çıkış ağzından Ağustos 2003 tarihinde başlanmış ve Mart 2005 tarihinde bitirilmiştir. TBM kazısının performansının ölçülmesinde proje kayıtlarından alınan veriler kullanılmıştır. Ayrıca elde edilen değerler teorik verilerle denetlenmiştir.

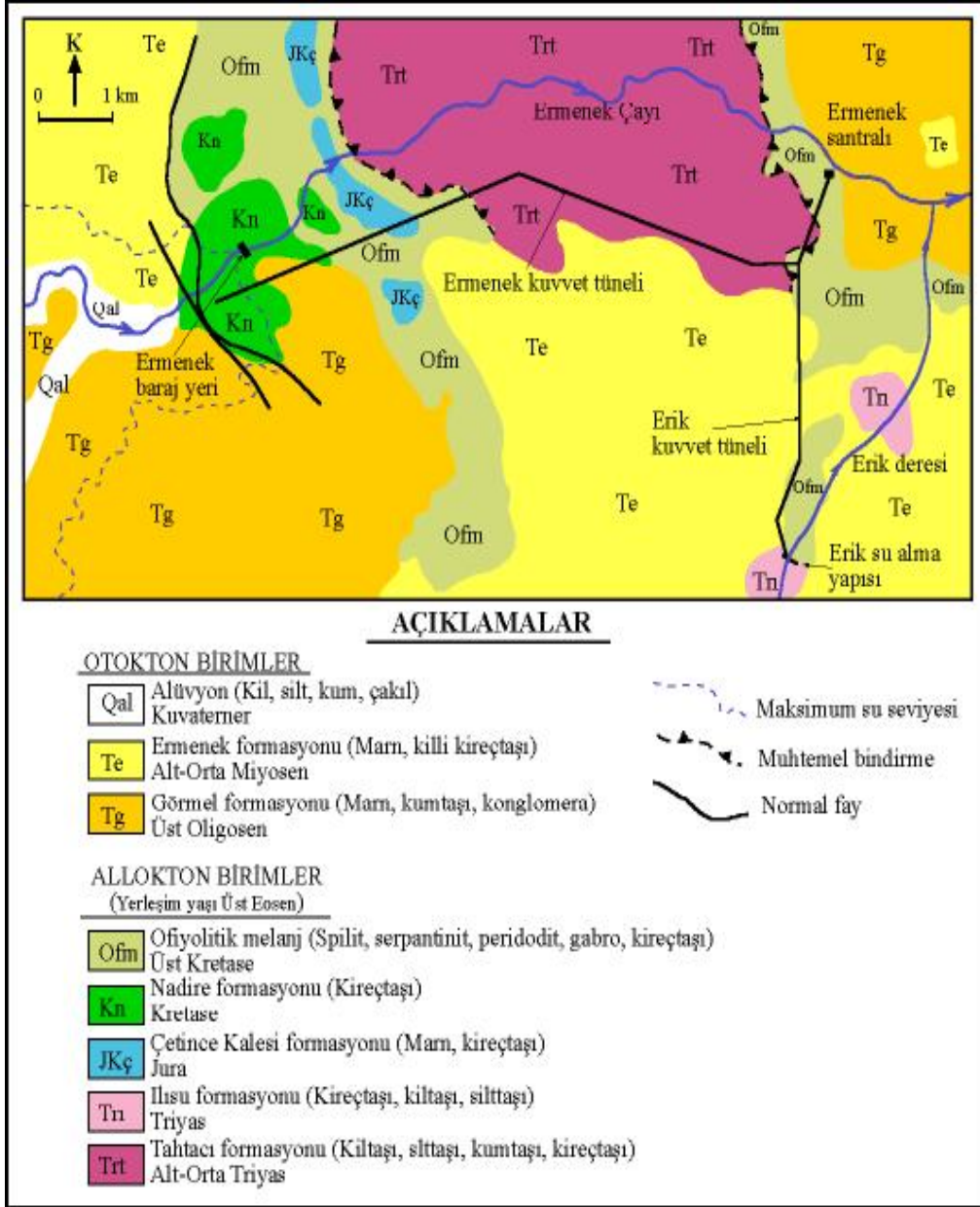
3.1 Jeoloji

İnceleme alanında yaşlıdan gence doğru kilitaşı, siltaşı, kumtaşı ve kireçtaşıdan oluşan Alt-Orta Triyas yaşlı Tahtacı formasyonu,

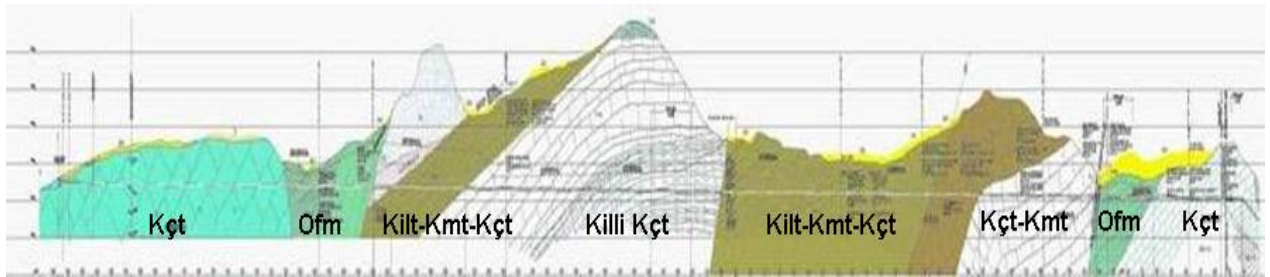
kireçtaşı, kilitaşı ve siltaşıdan oluşan Triyas yaşlı İlisu formasyonu, marn ve kireçtaşıdan oluşan Jura yaşlı Çetince Kalesi formasyonu, kireçtaşıdan oluşan Kretase yaşlı Nadire formasyonu, spilit, serpantin, radyolarit ve kireçtaşı bloklarından oluşan Üst Kretase yaşlı ofiyolitik melanj, marn, kumtaşı ve konglomeradan oluşan Üst Oligosen yaşlı Görmel formasyonu, marn ve killi kireçtaşıdan oluşan Alt-Orta Miyosen yaşlı Ermenek formasyonu ve Kuvaterner yaşlı yamaç molozu ile alüvyon yer almaktadır (EİEİ, 1999'dan değiştirilerek alınmıştır, Şekil 11).

Enerji tüneli güzergahındaki kazı çalışmalarında, farklı jeolojik ve jeoteknik özelliklere sahip kireçtaşı, ofiyolitik melanj, kireçtaşı-kumtaşı ardalanması, kilitaşı-kumtaşı-kireçtaşı ardalanması ve kilitaşı-killi kireçtaşı ardalanmasından oluşan beş farklı birim gözlenmiştir (Şekil 12).

Bu birimlerde yapılan sondajlardan ve alınan numunelerin incelenmesinden elde edilen jeoteknik veriler Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 11 - Ermenek barajı proje yerleşimi ve bölgenin jeoloji haritası



Şekil 12 - Ermenek enerji tünel güzergahının jeoloji kesiti.

Çizelge 2 - Enerji tüneline geçilen birimlerin ortalama jeomekanik özellikleri

Kaya tipi	Kireçtaşı	Ofiyolit (kilitaşı, kumtaşı, serpantin)	Kireçtaşı-kumtaşı	Kilitaşı-kumtaşı-kireçtaşı	Killi kireçtaşı-kilitaşı
Bölüm uzunluğu (m)	2275	911	1195	2293	1354
Birim hacim ağırlık (kN/m ³)	26,50	26,00	26,50	26,00	26,00
Tek eksenli basınç day. (MPa)	120	10	70	40	80
Kohezyon (kPa)	350	100	300	120	300
İçsel sürtünme açısı (°)	40	15	32	15	35
Gözeneklilik (%)	2	1,21	1,1	0,80	1,1
Q Değeri (Barton, 1974)	18	0,01	16	5	8
Q Değerine göre kaya sınıfı	İyi	Çok zayıf	İyi	Orta	Orta

3.2 TBM kazısı

Tünel delme makineleri günümüzde başta şehir içi raylı sistemler (metro) ve hidroelektrik santral (HES) projeleri olmak üzere uzun bir güzergah boyunca sürekli ve yüksek performans gerektiren tünel açma işlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Açılacak olan tüneline çapına, delegeği zeminin jeolojik ve jeoteknik özelliklerine göre tasarlanan TBM'ler, her proje için özel olarak üretilir (Fruguglietti vd, 2000).

Derivasyon ve enerji tünelleri, genellikle baraj gövdesinin yanal olarak dayandığı sağlam kayalar içinde açılır. Dolayısıyla tünel açma işleminde kayanın, kazı sırasında oluşan ikincil gerilmelerden en az derecede etkilenmesi ve bu sayede minimum tahkimat gereksinimleri ile donatılması istenmektedir.

TBM ile tünel açma yöntemi ise sahip olduğu kazı performansı ve eşzamanlı tahkimat desteği sayesinde klasik del-patlat ve küçük çaplı mekanik kazıcıların kullanıldığı konvansiyonel tünel açma yöntemlerine nazaran daha ekonomik ve verimlidir.

Günümüzde proje için uygun TBM seçimi, toplam proje maliyetleri üzerinde doğrudan belirleyici bir durum almıştır (Alber vd, 2000). Bu projede geçilecek jeolojik birimlerin jeoteknik özelliklerine ve açılacak tüneline boyutlarına bağlı olarak Çizelge 3'te özellikleri belirtilen TBM seçilmiş ve kullanılmıştır.

Enerji tüneline 8028 m lik bölümü TBM ile, girişteki yaklaşık 525,00 m lik bölümü ise klasik yöntemlerden del-patlat ile açılmıştır. TBM ile açılan bölüm için günlük 18 saatlik çalışma

süresine göre hazırlanan kazı verimliliği Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3 - Ermenek enerji tüneline kullanılan TBM'in genel teknik özellikleri

Model	WIRTH TB 665 E
Çap	6700 mm
Kesici adedi	52
En yüksek kesici çapı	432 mm
Güç	1800 kW
Devir	8,1 d/min
Dönme momenti (%95)	2020 kNm
İtici gücü	9660 kN
Silindir sayısı	4
Silindir çapı	400 mm
Çalışma basıncı	28000 kPa (280 bar)
Taşıma bandı uzunluğu	18,2 m

Çizelge 4 - Ermenek Barajı enerji tünelineki TBM ilerleme sonuçları

Aylar		Toplam aylık ilerleme (m)	Çalışılan gün sayısı	Günlük ortalama ilerleme (m)	Litoloji
1	Ağustos 2003	208,00	15	13,87	Kireçtaşı
2	Eylül 2003	438,00	22	19,91	Kireçtaşı
3	Ekim 2003	150,00	27	5,56	Kireçtaşı ve Ofiyolit (kıltaşı, kumtaşı, serpantin)
4	Kasım 2003	88,00	21	4,19	Ofiyolit (kıltaşı, kumtaşı, serpantin) ve Kireçtaşı-kumtaşı
5	Aralık 2003	497,00	20	24,85	Kireçtaşı-kumtaşı
6	Ocak 2004	275,00	12	22,92	Kireçtaşı-kumtaşı
7	Şubat 2004	681,00	21	32,43	Kireçtaşı-kumtaşı ve Kıltaşı-kumtaşı-kireçtaşı
8	Mart 2004	392,00	26	15,08	Kıltaşı-kumtaşı-kireçtaşı
9	Nisan 2004	1004,00	26	38,62	Kumtaşı-kireçtaşı
10	Mayıs 2004	738,00	24	30,75	Kumtaşı-kireçtaşı
11	Haziran 2004	647,00	24	26,96	Killi kireçtaşı-kıltaşı
12	Temmuz 2004	230,00	24	9,58	Kıltaşı-kumtaşı-kireçtaşı
13	Ağustos 2004	306,00	25	12,24	Kıltaşı-kumtaşı-kireçtaşı
14	Eylül 2004	247,00	16	15,44	Kıltaşı-kumtaşı-kireçtaşı
15	Ekim 2004	-	-	-	-
16	Kasım 2004	167,00	17	9,82	Kıltaşı-kumtaşı-kireçtaşı ve Kireçtaşı
17	Aralık 2004	222,00	26	8,54	Kireçtaşı ve Ofiyolit (kıltaşı, kumtaşı, serpantin)
18	Ocak 2005	178,00	19	9,37	Ofiyolit (kıltaşı, kumtaşı, serpantin)
19	Şubat 2005	695,00	26	26,73	Ofiyolit (kıltaşı, kumtaşı, serpantin) ve Kireçtaşı
20	Mart 2005	865,00	19	45,53	Kireçtaşı

Bu çizelgedeki değerler dikkate alındığında çalışılan toplam 390 gün için günlük ortalama net ilerleme 20,59 m olarak hesaplanmaktadır.

Son yıllarda tünel kazısı için seçilen TBM'in projenin bütünü üzerindeki ekonomik etkileri uluslararası çalışmalarda da ön plana çıktıkça, fizibilite çalışmaları sırasında TBM performansının "öngörülebirliliği" üzerine de çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Temel olarak TBM'in verimi zeminin jeoteknik özelliklerinden etkilenmekle birlikte makine tasarımının da bu konuda önemli rol oynadığı bilinmektedir (Nielsen vd, 1993).

Bu noktadan hareketle geliştirilen çalışmalar genelde daha çok kaya kütle değerlendirme kriterleri üzerine yoğunlaşmış ve sonuçta mühendislik jeolojisi özellikleri dikkate alınarak yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir.

Bu yaklaşımların en çok kullanılanlardan birisi Barton (1999) tarafından 145 adet TBM kazısı temel alınarak geliştirilen Q_{TBM} yöntemidir. Bu yöntemde, zeminin jeomekanik özellikleri ile makine parametrelerini bir arada kullanarak, TBM'in tünel güzergahı boyunca tek seferdeki (vardiyada) kazı verimliliği (teorik ilerleme hızı) m/saat cinsinden tahmin edilebilmektedir.

Yöntemde kullanılan temel formüller aşağıda, Ermenek enerji tüneli için yapılan

hesaplamalar Çizelge 5'te verilmiştir.

$$Q_{TBM} = Q * (\text{SIGMA} / F^{10} / 20^9) * (20 / \text{CLI}) * (q / 20) * (\sigma\theta / 5)$$

$$\text{SIGMA} = 5 * \gamma * (Q \sigma_c / 100)^{1/3}$$

$$\text{PR} = 5 (Q_{TBM})^{-0.2} \quad (Q_{TBM} > 1 \text{ için bu formül, } Q_{TBM} < 1 \text{ için abaklar kullanılır.})$$

Q	: Kaya kütle değeri
SIGMA	: Kaya dayanım değeri
F	: Kesici disklere binen ortalama yük,
CLI	: Disklerin sanayi ömür indeksi,
q	: Kayanın kuvars içeriği (%)
σ_c	: Kayanın tek eksenli basınç dayanımı
$\sigma\theta$: Tünel aynasındaki kayanın dayanım değeri
PR	: Teorik ilerleme hızı (m/saat)

Çizelge 5 - Ermenek enerji tüneline ki birimler için hesaplanan Q_{TBM} değerleri

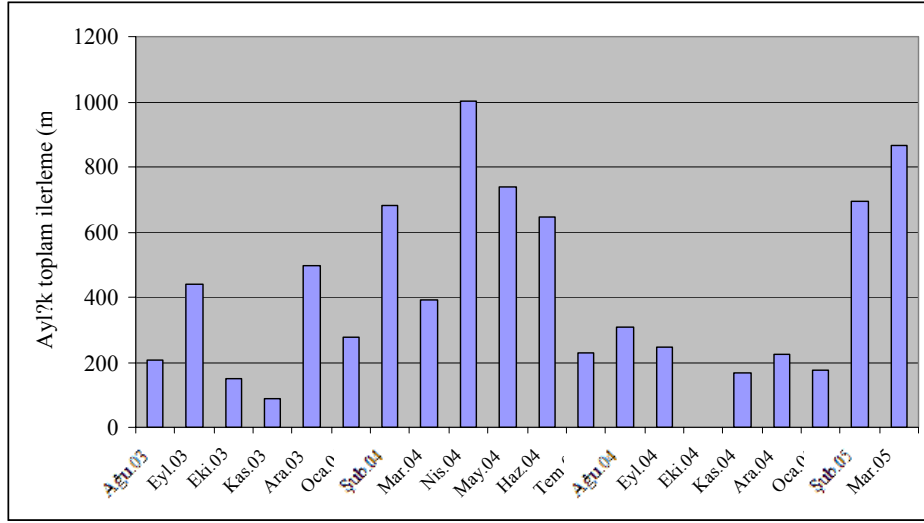
Performans Kriterleri	Kireçtaşı	Ofiyolit (serpantin, kireçtaşı, kumtaşı)	Kireçtaşı-kumtaşı	Kiltaşı-kumtaşı-kireçtaşı	Killi kireçtaşı-kiltaşı
Kaya kütle değeri (Q)	18	0,01	16	5	8
Kesici disklerin sanayi ömür indeksi (CLI)	90	50	60	50	70
Kuvars oranı (%) (q)	5	20	10	25	5
Tünel aynasındaki tahmini dayanım ($\sigma\theta$)	120	10	70	40	80
TBM Performans indeksi (Q_{TBM})	128,63	< 1	974,26	288,00	194,26
Teorik ilerleme hızı (m/saat) (PR)	1,89	0,20	1,26	1,61	1,74
Teorik ilerleme hızı (m/gün)	34,02	3,60	22,68	28,98	31,32

Ofiyolitik melanjin çok zayıf dayanımlı bölümlerinde Q değeri 1'den küçük çıktığı için teorik ilerleme hızı formül ile değil yöntemde önerilen abak ile hesaplanmıştır. Q_{TBM} yöntemi ile her bir birim için hesaplanan teorik ilerleme hızlarının ortalaması 1,34 m/saat'dir. Buna göre günlük ortalama 18 saat çalışma için yapılması gereken ilerleme 24,12 m çıkmaktadır. Uygulamada gerçekleşen ilerleme hızı ise ortalama 20,59 m/gün'dür.

Kazının ilk aşamalarında, TBM'in kurulumu ve tam performansla işletmeye alınması için geçen zamandan ötürü meydana gelen teknik gecikmelerin bu farkta payı vardır. Gerek jeolojik gerekse mekanik nedenlerden ötürü meydana gelen söz konusu teorik ve fiili performans farkları TBM kazılarında % 70 seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Buradaki fark ise % 15 civarında olup oldukça iyi bir performans elde edildiğini göstermektedir.

Şekil 13'te görüldüğü gibi, TBM'in aylık ilerleme hızı Ekim 2003, Kasım 2003, Kasım 2004, Aralık 2004 ve Ocak 2005 döneminde beklenenin altında gerçekleşmiştir. Bazı aylarda ise ilerleme hızı ortalamasının üstünde gerçekleşmiştir.

Şekil 12'de verilen jeolojik kesit ve şekil 13'te verilen aylık ilerleme performansları karşılaştırıldığında; TBM'in kurulum, tamir ve yapılan mekanik değişiklikler sırasında kaybettiği zaman dışında performansını doğrudan etkileyen özelliğin litoloji ve jeolojik yapı (karstik boşluk, fay, yeraltı suyu vb) olduğu daha iyi anlaşılmaktadır. Çünkü aylık ilerleme performansındaki düşüş ofiyolitik melanj, kiltaşı ve gevşek kumtaşı kesilen dönemlere karşılık gelmektedir. Diğer tarihlerde ise sert ve orta sert kireçtaşında ilerlenmiştir. Bu da birimlerin jeoteknik özelliklerinin önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 13 - Ermenek enerji tüneli aylık ilerleme miktarları

4 SONUÇLAR

Tüneller makinesiz el ile yapılan kazı, del-patlat yöntemi ve/veya tünel delme makineleri kullanılarak açılmaktadır. Tünel delme makinelerinden özellikle tam cepheli "Tünel Delme Makineleri (TBM)" ile yapılan kazılar, hızlı ve ekonomik olması nedeniyle son yıllarda ulaşım, sulama, enerji ve bunun gibi amaçlı projelerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Tünel delme makinelerinden en iyi verimin alınabilmesi için makine, arazideki jeolojik ve jeoteknik şartlara göre tasarlanmalıdır.

Dolayısıyla kazısının performansı makinenin teknik özellikleri ile birlikte kayanın jeolojik ve jeoteknik özelliklerine doğrudan bağlıdır. Düşük dayanımlı zeminlerde ve yetersiz güç/keski sistemleri söz konusu olduğunda TBM kazıları verimliliklerini kaybederler.

Tünel güzergahlarındaki jeolojik birimlerin yatay ve düşey yöndeki değişikliklerinin ve jeoteknik özelliklerinin sık aralıklarla yapılacak çalışmalarla detaylı olarak belirlenmesi, kazı makine tipinin doğru seçilmesini sağlayacaktır. Böylece kazı veriminin artırılması sağlanmış olacak, zaman ve ekonomik kayıplar en aza indirilebilecektir.

Örnek çalışmada Ermenek barajı enerji tüneli TBM kazısında gerçekleşen performans kayıtları, Q_{TBM} metodu ile önceden tahmin edilen ilerleme değerleri ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Günlük ortalama 18 saatlik çalışma süresi için; uygulamadaki ortalama hız 20,59 m/gün, teorik ortalama hız ise 24,12 m/gün'dür. Bu değerler

arasındaki yaklaşık % 15 lik fark bu tür büyük projeler için önemsenmeyecek düzeydedir.

Tünel kazısı sırasında zayıf dayanım özelliklerine sahip ayrışmış ve karstik özellik kazanmış kireçtaşı ile çok zayıf jeoteknik özelliklere sahip ofiyolitik melanja ait birimlerde ilerleme hızlarında düşüş olmuştur ve ancak günde 3-5 m ilerleme hızı elde edilebilmiştir.

Ancak kireçtaşı gibi sert ve dayanımlı kaya türlerinde ise günlük 65 m ye kadar ilerlemeler sağlanmıştır. Dolayısıyla daha çok sert birimler geçileceği öngörülerek seçilen TBM'in, düşük dayanımlı zeminlerde verimliliği azalmıştır.

Bazı aylarda (örneğin, Ekim-Kasım) TBM performansında beklenenin dışında gözlenen anomali, tünel güzergahının jeoteknik özelliklerinde meydana gelen ani ve lokal değişiklikten kaynaklanmıştır.

Birimlerin jeoteknik özelliklerinin seçilen makinenin özellikleri ile uyumlu olması, ayrıca Q_{TBM} formülünde kullanılan ortalama değerlerle uyum içinde olması sonucu teorik ve uygulamadaki kazı performansı projede ilerleme sağlandıkça ideale yakın sonuçlar vermektedir.

5 KATKI BELİRTME

DSİ 4. Bölge Müdürlüğü ve Ermenek Barajı ve HES Kontrol Şube Müdürlüğü çalışanlarına, BM Mühendislik İnşaat ve A.Ş.'ne, Alpine-Mayreder'e ve Pöyry'e veri teminindeki yardımları için Dr. N. Barton'a ise yapılan hesaplamaları kontrol edip görüş bildirdiği için Yazar teşekkür eder.

6 KAYNAKLAR

- [1] Alber, M., 2000. "Advance rates of hard rock TBMs and their effects on project economics", Tunneling and Underground Space Technology, Volume 15, No 1.
- [2] Barton, N.,1999. TBM performance estimation in rock using Q_{TBM} , Tunneling Int., Milan.
- [3] Barton, N., and Abrahao, R., 2003. "Employing the Q_{TBM} prognosis model", Tunnel and Tunnelling International, December, 20-23.
- [4] Bilgin, N., 1989. İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [5] Fruguglietti, A., Guglielmetti, V., Grasso, P., Grasso, G., Carrieri, G. and S. Xu, 2000. Selection of the right TBM to excavate weathered rocks and soils, Technical Note.
- [6] Koçbay, A., Acır, Ö. ve Kılıç, R., 2004. "Tünel Delme Makinelerinin (TBM) Değişen Zemin Koşullarındaki Verimlilikleri Örnek Çalışma: Ermenek Barajı (Karaman), 57. Türkiye Jeoloji Kurultayı", 8-12 Mart 2004, MTA Kültür Sitesi, s. 172, Ankara.
- [7] Koçbay, A., 2007. "Jeoteknik Koşulların Tünel Delme Makinesi (TBM) Performansına Etkisi - Örnek Çalışma: Ermenek Barajı ve HES (Karaman)", 2. Ulaşımında Yer altı Kazıları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s.93-99, İstanbul.
- [8] Nielsen, B and Özdemir, L.,1993. "Hard rock tunnel boring prediction and field performance", Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings.
- [9] Robbins, J. R., 1976. "Mechanized Tunnelling Progress and Expectation", Tunneling 76 Symposium, pp. 1-10, London
- [10] Yağız, S., Özdemir, L. Ve Rostami, J., 2008. "Kaya Kütlelerinde Mekanik Kazılar İçin Önerilen Laboratuvar Deneyleri", IX. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, İzmir, Türkiye

Not: Makalenin hazırlanmasında yukarıdaki kaynakların haricinde başlıca;

<http://www.civenv.unimelb.edu.au>,

http://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_boring_machine,

<http://mining.mines.edu/research/emi/> ve

<http://www.penatrade.com>

adreslerinde yer alan fotoğraf ve şekillerden de yararlanılmıştır.

SU DAĞITIM ŞEBEKELERİNİN TASARIMINDA HESAP ÇİZELGELERİNİN KULLANIMI

Birol KAYA

Yrd. Doç. Dr., Dokuz Eylül Üni., Müh. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Hidrolik Anabilim Dalı, İzmir
birol.kaya@deu.edu.tr

Umut OKKAN

Araş. Gör. İnş. Yük. Müh., Bayburt Üni., Müh. Fak., İnşaat Müh. Böl., Hidrolik Anabilim Dalı, Bayburt
uokkan@bayburt.edu.tr

(Bildirinin geliş tarihi: 18.01.2010, Bildirinin kabul tarihi: 29.03.2010)

ÖZET

Hesap çizelgesi programlarının gelişmesiyle birlikte, bu programlarının değişik alanlardaki tasarım problemlerinde kullanılması da yaygınlaşmaya başlamıştır. Su dağıtım şebekelerinin hesabında kararlı akım durumu için, süreklilik ve enerji denklemlerinin Q, H veya ΔQ cinsinden düzenlenmesiyle elde edilen doğrusal olmayan denklem takımının çözülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, iteratif hesap gerektiren bu çözümün, bilgisayar programı yazmadan sadece hesap çizelgesi programının hücrelerine denklemlerin yazılmasıyla, hazne, pompa, vana gibi elemanlara sahip bir şebekenin tasarımı anlatılmaktadır. Ayrıca 2 örnek çözülerek, elde edilen sonuçlar, WaterCAD® programı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Su dağıtım şebekeleri, kararlı akım, hesap çizelgesi, pompa-vana-hazne

USING SPREADSHEETS TO PLANNING OF WATER DISTRIBUTION NETWORKS

ABSTRACT

With the development of spreadsheet programs, these programs gradually become widespread in the design problems and its different areas. The design of pipe network systems is based on iterative solutions of Q, H or ΔQ expressions of the continuity and work-energy equations. There are too many enhanced software for solution of pipe network systems. In this study, the calculations of steady flow in network were described and easily (almost never programming code was used) programmed into spread-sheet. In application, related examples (pump, vane, reservoir problems) was solved by using spreadsheet, the results were compared with WaterCAD® program. And the same outcomes were attained.

Keywords: Water distribution networks, steady-flow, spreadsheet, pump-vane-reservoir

1 GİRİŞ

Son yıllarda hesap çizelgesi programlarının gelişmesiyle birlikte, karmaşık hesapların yapılması da mümkün hale gelmiştir. Matematiksel simülasyonlar için hesap çizelgesi programlarının kullanılması, mühendislik eğitiminden önce, iş ve finans alanlarında sıklıkla kullanılmaktaydı. Daha sonraları mühendislik alanındaki uygulamalarda da kullanılan bu programlar günümüzde de giderek yaygınlaşmaktadır [1].

Özellikle ısı transferi problemlerinin çözümüne yönelik olarak hesap çizelgesi uygulamaları yapılmış [2, 3, 4], farklı alanlardaki uygulamaları da sürmüştür. Halawa (2001) pompalar ve ısı değiştiriciler gibi basit mühendislik sistemlerinin simülasyonu için hesap çizelgesi kullanımını tanıtmaktadır [5]. Fraser ve Thorpe (1996) tarafından ise ideal akışkanlarda iki boyutlu ısı aktarımı problemi çözümlenmiştir [6].

Su dağıtım şebekelerinin boyutlandırılması için, Huddleston vd (2004) çalışmalarında, bir hazneden beslenen sistemin hesap çizelgesi kullanılarak boyutlandırılmasını vermektedirler [7]. Okkan ve Kaya (2008) tarafından ise sistemin pompa içermesi durumunda çözümünü yapabilen bir hesap çizelgesi uygulaması verilmektedir [8].

Boyutlandırma sırasında, bazı verilerin değiştirilerek, sistemin farklı koşullar altındaki davranışının test edilmesi yani hesapların defalarca tekrarlanması gerekliliği düşünüldüğünde, kullanımı kolay bir program gerekli olmaktadır. Hesap çizelgesi programlarında ilgili hücrelerdeki verilerin değiştirilmesiyle yeni hesap sonuçları hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir. Bazı karmaşık hesaplarda küçük program parçacıkları (makro) da, uygulamaya eklenebilmektedir.

Bu çalışmada, hazne, pompa ve vana elemanlarını içeren bir su dağıtım sisteminin, hesap çizelgesi programı yardımıyla boyutlandırılması anlatılmaktadır. Herhangi bir makro yazmadan sadece programın çözücü (Solver) özelliğinden yararlanılmıştır.

2 SU DAĞITIM SİSTEMLERİ

Su dağıtım sistemlerinin analizinde farklı denklem takımları yazılarak çözüm yapılabilmektedir. Bunlardan ilki 'Q denklemleri' olarak bilinen denklem takımıdır. Bu yöntem sistemde bilinmeyen olarak debileri dikkate alıp doğrudan debileri hesaplamayı sağlamaktadır. Yöntem gereği olarak N adet boru veya N adet bilinmeyen söz konusu olmakta; düğümlerdeki debiler için süreklilik denklemleri ve her bir kapalı gözdeki kayıplarının toplamının sıfır olduğu ifadeleri yazılarak denklem takımı oluşturulmaktadır. Bir diğer denklem takımı, bilinmeyen olarak H enerji seviyelerinin alınması ile oluşturulan ve 'H denklemleri' olarak anılan denklem takımıdır. Burada düğümlerdeki H değerleri bilinmediği için M adet düğüm varsa M adet bilinmeyen söz konusu olacak ve M adet denklemden oluşan sistemin çözülmesi gerekecektir. Bu denklemlerin çözümü için iteratif çözüm gerekmektedir. Başlangıçta seçilen debilerin (Q_0) ΔQ düzeltme debisiyle düzeltilmesini ($Q=Q_0+\Delta Q$) ifade edip denklemleri ΔQ bilinmeyen düzeltme debileri cinsinden de yazmak mümkündür. Bu durumda ise göz sayısı kadar ΔQ düzeltme debisi / bilinmeyen ve göz sayısı kadar denklemden oluşan denklem takımının çözülmesi gerekmektedir. Sistemin çözümü için Q, H veya ΔQ denklem takımlarından birinin oluşturmak gerekmektedir. Bilinmeyen sayısı

ΔQ yönteminde daha az olduğu ve daha az denklem yazmak gerektiği için bu çalışmadaki çözümde ΔQ denklem takımı yazılarak çözüm yapılmıştır.

3 ΔQ DENKLEMLERİ

Her bir göz için, gözü oluşturan borular boyunca enerji denklemi yazıldığında

$$\sum h_{k,j} = \sum K_i Q_{in} \quad (1)$$

olmaktadır. Burada j göz numarası, i: j. gözü oluşturan boru numaralarını göstermektedir. K değeri ise seçilen yük kaybı bağıntısının bilinen terimlerini içermektedir. Örneğin Manning-Strickler bağıntısının kullanılması durumunda

$$K = n^2 / (D/4)^{(4/3)} \quad (2)$$

şeklinde olmaktadır. Q cinsinden yazılan denklemlerde, Q_i : i.borudaki debi, Q_{0i} : i. boru için süreklilik koşulunu sağlayacak şekilde başlangıçta seçilen debi değeri ve ΔQ_j : i. borunun ait olduğu gözde için düzeltme debisi olmak üzere

$$Q_i = Q_{0i} + \Delta Q_j \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Bir gözü oluşturan boruların herhangi birinde ΔQ kadar debi değişimi söz konusu olduğunda, süreklilik gereğince diğer borularda da akım yönüne bağlı olarak $+\Delta Q$ veya $-\Delta Q$ kadar bir değişim söz konusu olacaktır. Dolayısıyla bilinmeyen sayısı göz adedi kadar olacaktır. M adet göze sahip bir sistemde M bilinmeyenli M denklemde ΔQ düzeltme debileri hesaplanıp ilgili denklemde debiler düzeltilmekte ve düzeltilen debi değerleri yeni Q_{0i} (başlangıç debileri) olarak alınıp yeniden ΔQ düzeltme debileri bulunmaktadır. ΔQ değerleri ~ 0 olarak elde edilene kadar hesaplar yinelenmektedir.

4 HESAP ÇİZELGESİ PROGRAMI

Hesap çizelgesi programları, doğrusal ya da doğrusal olmayan denklem takımlarının istenilen hassasiyetle iteratif çözümlerini yapabilmektedir. Bu amaçla oluşturulan denklem takımı hücrelere yazılarak, denklemdeki bilinmeyenlerin başlangıç değerleri bir başka hücre grubunda tanımlanmakta ve verilen kısıtlara bağlı olarak denklem takımını sağlayan değerler elde edilebilmektedir.

Geliştirilen hesap çizelgesi uygulaması, bilinmeyen sayısının Q ve H denklemlerine göre az olması nedeniyle seçilen ΔQ yöntemini kullanarak iteratif çözüm yapmaktadır. Yük kayıplarının hesabında Manning bağıntısı

kullanılmıştır. ΔQ denklemleri çözüm itibari ile non-linear olmakta ve sayısal çözüm yöntemleri veya bilgisayar yardımı ile çözüme gidilebilmektedir. Denklemlerin sayısı şebekedeki göz adedi ya da yazılacak enerji bağıntı sayısına eşit olacağından, H denklemlerinin yarısı kadar olmaktadır.

Hazırlanan programda öncelikle boru karakteristikleri tanımlanması gerekmektedir. Çap, Uzunluk değerleri, eğer varsa vana katsayıları, pompa olup olmadığı ve pompa varsa karakteristik eğri değerleri girilmelidir. Boru ve donanım özellikleri 'Boru karakteristikleri' isimli bir sayfada tanımlanmaktadır. Sistemde pompa bulunuyorsa, karakteristik eğriyi tanımlayan 3 noktaya ait Q ve H değerlerinin girilmesiyle, pompa karakteristik eğrisi denklemi,

$$A Q^2 + B Q + C - h_p = 0 \quad (4)$$

şeklinde 2.derece denklem olarak kabul edilerek, A, B ve C değerleri hesaplanmaktadır. Vana kayıp katsayıları ve

pompa karakteristik eğrisi değerleride aynı sayfada tanımlanmaktadır (Şekil 1)

Boru karakteristikleri sayfasında, boruya ait özellikler (varsa vana ve pompa bilgileri de) girildikten sonra, "Başlangıç debileri ve yönleri" sayfasından borulardaki başlangıçta tahmin edilen akım yönleri ve debi değerleri girilmektedir. "Çöz" sayfasında ΔQ denklemleri bulunmaktadır. ΔQ denklemleri hesap hücrelerine yazılmıştır ve bu sayfada hesap çizelgesi programının "Çözücü" (Solver) özelliğinden yararlanılarak, ΔQ değerleri ~0 olana kadar iteratif hesap yapılması sağlanmaktadır. "Çözücü"nün çalıştırılmasıyla birlikte, elde edilen hesap sonuçları, "hesap debileri" sayfasına kaydedilmektedir.

Geliştirilen hesap çizelgesi uygulaması, en fazla 100 boru ve 15 göz için hesap yapacak şekilde yazılmışsa da, hücrelerin kopyalanmasıyla boru sayısı ve göz adedinin üst sınırı istenildiği kadar arttırılabilmektedir.

i	L m	D m	K _f	n	vana katsayısı	pompa varsa "1" yoksa "0" değeri yazınız. Çözücüye çalıştırınız	point1		point 2		point 3	
							Q	Hp	Q	Hp	Q	Hp
1	300	0,25	719,2484	0,012		0						
2	300	0,25	719,2484	0,012		0						
3	300	0,25	719,2484	0,012		0						
4	300	0,25	719,2484	0,012		0						
5	300	0,25	719,2484	0,012		0						
6	300	0,25	719,2484	0,012		0						
7	300	0,25	719,2484	0,012		0						
8	300	0,25	719,2484	0,012		0						
9	300	0,25	719,2484	0,012		0						
10	300	0,25	719,2484	0,012		0						
11	300	0,25	719,2484	0,012		0						
12	300	0,25	719,2484	0,012		0						
13	300	0,25	719,2484	0,012		0						
14	138,38	0,25	331,7653	0,012		1	1,5	11	2,5	10,4	3,5	9,5
15	161,85	0,25	388,0345	0,012		0						

Şekil 1 - Boru vana ve pompa karakteristiklerinin tanımlanması

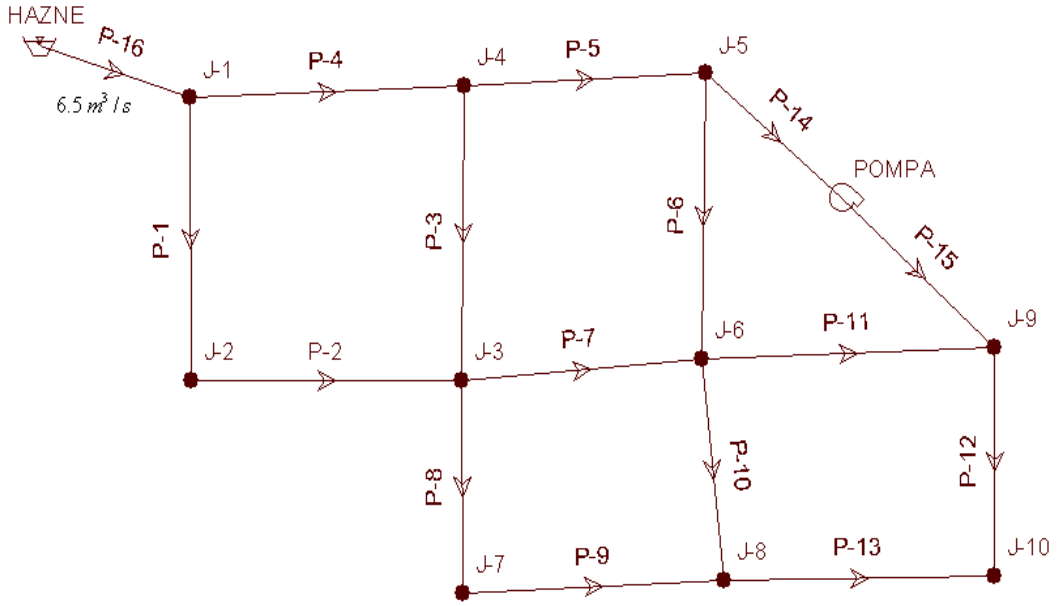
5 SAYISAL UYGULAMA

5.1 Uygulama Örneği 1

Şekil 2'de verilen örnekte, 5 göz ve 16 borudan oluşan pompalı bir boru şebekesi görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere sisteme Hazneden P-16 borusu ile 6.5 m³/s debi iletilmektedir. J-10 düğüm noktasından 2 m³/s, diğer tüm düğüm noktalarından ise 0.5 m³/s çekim olmaktadır. Şekil 1'de görülen boru - donanım özellikleri, örneğe ait verileri içermektedir. 14 nolu boru üzerindeki pompaya ait karakteristik eğrinin denkleminin A, B ve C katsayılarını hesaplamak için Q ve H değerlerinin girilmesi (Şekil 3) yeterli olmaktadır. Şekil 1'deki şebeke için ilk seçilen

akım yönleri ve debi değerleri Şekil 3'de görüldüğü gibi "başlangıç debileri ve yönleri" sayfasından girilmiştir.

Tüm verilerin girilmesinden sonra, çözümü yapabilmek için "Çöz" sayfasında hesap çizelgesi programının "Çözücü (Solver)" özelliği çalıştırılmalıdır. Hesap çizelgesi programının menüsünden Çözücü'nün çalıştırılmasıyla denklemlerin çözümü gerçekleştirilmekte ve hesap sonuçları Şekil 4'de görüldüğü gibi "hesap debileri" sayfasına kaydedilmektedir. "Çözücü" ile sağlanan iteratif hesaplar sonucunda elde edilen ΔQ düzeltme debisi sonuç değerleri "Çöz" sayfasında görülebilmektedir.



Şekil 2 - 5 göz ve 16 borudan oluşan pompalı boru şebekesi

Boru No	Başlangıç Debileri	1	2	3	4	5
1	2,5	-1				
2	2	-1				
3	1,5	1	-1			
4	3,5	1				
5	1,5		1			
6	0,5		1	-1		
7	1,5		-1		1	
8	1,5				-1	
9	1				-1	
10	0,5				1	-1
11	1			-1		1
12	1					1
13	1					-1
14	0,5			1		
15	0,5			1		

Şekil 3 - Başlangıç debilerinin ve yönleri

Boru No	Debi (m³/s)
1	2,6943
2	2,1943
3	1,0710
4	3,3057
5	1,7347
6	0,4224
7	1,4285
8	1,3368
9	0,8368
10	0,6682
11	0,6828
12	0,9951
13	1,0049
14	0,8123
15	0,8123

Şekil 4 - Hesap debileri

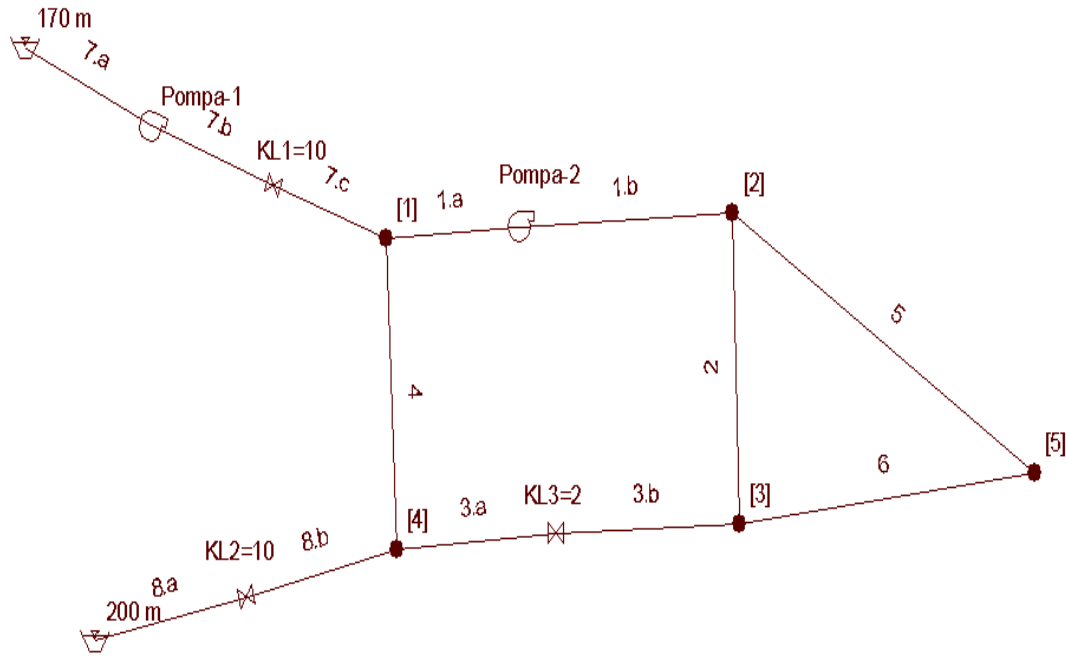
Şekil 2'de verilen şebekede ayrıca WaterCad yazılımı ile de çözülmüştür. WaterCad programı ile yapılan çözüm ile hesap çizelgesi kullanılarak yapılan çözümün aynı sonuçları verdiği görülmektedir. Hesap çizelgesi programında, veri sayfalarında istenilen verilerin değiştirilmesiyle, şebekenin farklı verileri için davranışını hızlı bir şekilde incelemek mümkün olabilmektedir.

5.2 Uygulama Örneği 2

2.Örnek için seçilen şebekede Şekil 6'da görülmektedir. Bu örnekte, şebekede 2 adet

hazne, 2 adet pompa ve 3 adet vana bulunmaktadır. Şekil 8'de görüldüğü gibi, herhangi bir boru üzerinde vana olması durumunda vana kayıp katsayısı, pompa olması durumunda pompa olup olmadığı bilgisi (0 ya da 1) ve karakteristik eğri için 3'er adet Q ve H değerleri girilmiştir.

Bu örnekte, şebekede borularında debiler için ilk değerler, süreklilik koşulunu sağlayacak şekilde Şekil 8'de verildiği gibi seçilmiştir. Şebekenin çözülmesiyle elde edilen sonuçlar Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 6 - Uygulama Örneği 2

i	L m	D m	K _i	n	vana katsayısı	pompa varsa "1" yoksa "0" değeri yazınız yazınız.	point1		point 2		point 3	
							Q	Hp	Q	Hp	Q	Hp
1	500	0,2	7000,6033	0,016		1	0,06	4	0,09	3,8	0,12	3,5
2	300	0,2	4200,362	0,016		0						
3	500	0,2	7000,6033	0,016	2	0						
4	300	0,2	4200,362	0,016		0						
5	600	0,2	8400,7239	0,016		0						
6	500	0,2	7000,6033	0,016		0						
7	300	0,25	1278,6637	0,016	-10	1	0,025	12	0,04	10,5	0,055	8
8	300	0,25	1278,6637	0,016	10	0						

Şekil 7 - Uygulama örneği 2'ye ait boru ve donanım bilgileri

Boru No	Başlangıç Debileri	1	2	3
1	0,08	1		
2	0,05	-1	1	
3	0,15	-1		
4	0,05	1		-1
5	0,05		1	
6	0,05		-1	
7	0,06			1
8	0,2			-1

Şekil 8 - Uygulama örneği 2'ye ait başlangıç debileri ve yönleri

Boru No	Debi (m ³ /s)
1	0,1142
2	0,0130
3	0,1158
4	0,0441
5	0,0473
6	0,0527
7	0,1001
8	0,1599

Şekil 9 - Uygulama örneği 2'ye ait hesap debileri

6 SONUÇLAR

Su dağıtım şebekelerinin çözümünde, yazılan denklemler doğrusal olmayan türden bir denklem takımını oluşturmaktadır. Dolayısıyla, çözümde bilgisayar kullanılması kaçınılmaz olmaktadır. Ancak, hesap çizelgesi programlarının özelliklerinin gelişmiş olması nedeniyle, bu doğrusal olmayan denklem takımlarının çözümünde, herhangi bir program koduna gerek kalmamakta, sadece hücrelere denklemin yazılması yeterli olmaktadır.

Su dağıtım şebekelerinin çözümü için hazırlanan yazılımların son derece pahalı olması, bunun yanında hesap çizelgesi programı ile şebekenin tanımlanması ve verilerin girilmesinin oldukça kolay olması, geliştirilen uygulamanın tercih edilmesine neden olabilecektir. İstenilen verinin değiştirilmesiyle farklı koşullar altında sistemin davranışı kolaylıkla test edilebilmekte, kullanıcı en iyi çözümü sağlayacak şekilde bir tasarım yapabilmektedir.

Geliştirilen uygulama, paket yazılımlarda olduğu gibi bir grafik ara yüzüne sahip değildir ve çizim modülleri içermemektedir. Bu durum uygulamanın dezavantajını oluşturmaktadır.

7 KAYNAKLAR

- [1] Tabor, G., (2004) "Teaching computational fluid dynamics using spreadsheets", International Journal of Mechanical Engineering Education, Volume 32 Issue 1, January 2004, pp 31-53
- [2] Kharab A. (1997) "Use of multiple sheets for the solution of a three-dimensional transient heat conduction problem", Comput Math. Appl.1997;34(1):71-9
- [3] Mokheimer, E.M.A., Antar, M.A., (2000) "On the use of spreadsheets in heat conduction analysis", Int.J. Mech. Enging. Educ., 28 (2000), 113-139.
- [4] Antar, M.A., Mokheimer, E.M., (2002) "Spreadsheet modelling of transient three-dimensional heat conduction with various standard boundary conditions", Int. J. Mech. Enging. Educ., 30 (2002), 17-34.
- [5] Halawa, E.E.H., (2001) "Simulation worksheet (lks) for development of steady-state simulation system of equations", Int. J. Mech. Enging. Educ., 29 (2001), 1-9.
- [6] Fraser, C.J., Thorpe, J.R., (1996) "Spreadsheet applications for modelling and analysis", Int. J. Mech. Enging. Educ., 24 (1996), 124-136.
- [7] Huddleston , D.H., Alarcon, V.J., Chen, W. (2004) "Water Distribution Network Analysis Using Excel", ASCE, Journal of

Hydraulic Engineering, Vol.130, No. 10, October 1, 2004, 1033-1035.

- [8] Okkan, U., Kaya, B. (2008), "Design of Pipeline Systems with Pump Use of Spreadsheets", Creating The Future 5th ARCHENG - 2008 International Architecture and Engineering Symposium, TRNC., November 2008, p.,7-11

SAVAKLARDA KRET ŞEKLİNİN DEBİ KATSAYISINA ETKİSİ

M. Emin EMİROĞLU
Doç. Dr., Fırat Üni., Müh. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, 23119, Elazığ
memiroglu@firat.edu.tr

Nihat KAYA
Yrd. Doç. Dr., Fırat Üni., Müh. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, 23119, Elazığ
nkaya@firat.edu.tr

Yusuf DOĞAN
Öğretim Gör., Tunceli Üni., Meslek Yüksek Okulu, 62000, Tunceli
yusufdogan14@hotmail.com

(Bildirinin geliş tarihi: 02.03.2010, Bildirinin kabul tarihi: 06.04.2010)

ÖZET

Savaklar uzun yıllardır hidrolik mühendisleri tarafından; debi ölçmek, enerji sönmölemek, su almak, akım derinliğini ve su seviyesini düzenlemek ve diğer birçok amaçlar için kullanılan en eski hidrolik yapılarıdır. Savak çeşitlerinin ve şekillerinin tanımı çok benzer olmasına karşın, hidrolik davranışları birbirinden oldukça farklıdır. Bu çalışmada, ince kenarlı savaklarda kret şeklinin debi katsayısına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Dört farklı kret şekli için deneyler yürütölmüştür. Kret şeklinin ve yüksekliğinin debi katsayısı üzerinde önemli etkisi olduğu görölmüştür. Sonuç olarak test edilen kret şekilleri arasında, ¼ yuvarlatılmış kret şekli için en büyük debi katsayısı değerleri elde edilmiştir. Böylece, debi katsayısı için eşitlikler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Savak, Kret şekli, Debi katsayısı, Debi, Açık kanal

THE EFFECT OF SHAPE OF CREST ON DISCHARGE COEFFICIENT IN WEIRS

ABSTRACT

Weirs are among the oldest and simplest hydraulic structures that have been used for centuries by hydraulic engineers for flow measurement, energy dissipation, flow diversion, regulation of flow depth and water surface, flood passage, and other means. Although the definition of many different kinds of weirs is very simple and similar, the application and hydraulic behavior of each is quite different. This paper presents the results of a laboratory study about the effect of the shape of crest on the discharge coefficient of the thin-plate weir. The experiments were conducted for four different shape of crest. It is demonstrated that, the height, thickness, and shape of the crest have a significant influence on the discharge coefficient. Furthermore, it is found that the ¼ round crest shape are observed to have the highest discharge coefficient values among all shapes tested. Consequently, empirical equations are obtained for predicting the discharge coefficient. Hence, equations for the discharge coefficient are introduced.

Keywords: Weir, Crest shape, Discharge coefficient, Discharge, Open channel

1 GİRİŞ

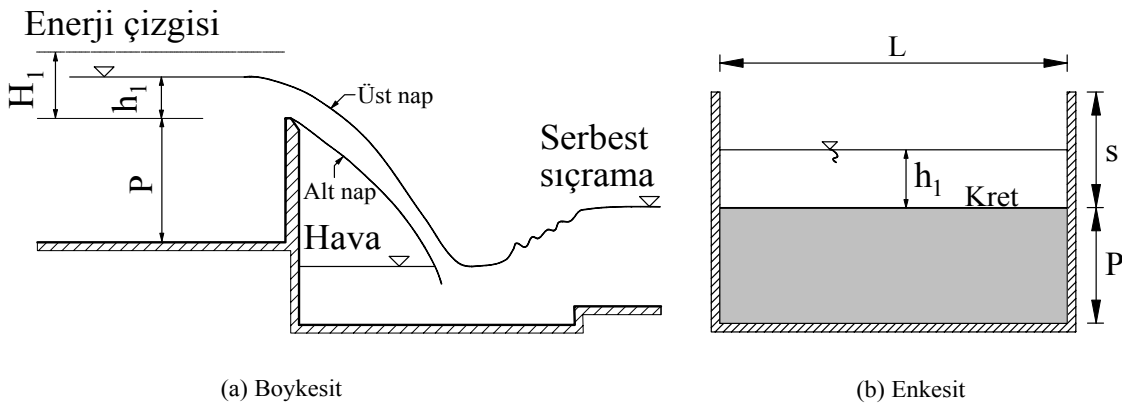
Savaklar, debi ölçmek amacıyla kullanılan en eski hidrolik yapılardan biridir. Suyun debisini ölçmek amacıyla açık bir kanal eksenine dik

olarak yerleştirilmiş ve üzerinden su akıtan hidrolik yapılar savak olarak isimlendirilmektedir. Bu hidrolik yapılar; sulama, yağmur suyu ve atıksu sistemlerinde de yaygın

olarak kullanılmaktadır. Ayrıca savaklar, suların havalandırılması ve oksijen transferi işlemlerinde de kullanılmaktadır.

Savaklar genel olarak ince (keskin) kenarlı savaklar, kalın kenarlı savaklar ve labirent savaklar olmak üzere üç ana grupta toplanabilir. İnce kenarlı savaklar; dikdörtgen, üçgen, trapez (Cipolletti) ve yarım-daire şekilli olarak tasarlanabilmektedir. Sütro savağı gibi bazı özel savak tipleri de mevcuttur (French, 1986). Yine benzer şekilde, kalın kenarlı savaklar da farklı tiplerde inşa edilmektedir. Ayrıca savaklar ya yanal daralmalı ya da yanal daralmasız olarak

inşa edilmektedir. Yanal daralmasız savaklar normal karşıdan alışı dolusavaklar gibi giriş kısmında herhangi bir daralma söz konusu değildir (Şekil 1). Savaklar, farklı kret şekillerine sahip olabilirler. Yanal daralmalı savaklarda ise kanalın her iki kısmında da aynı oranda daralma söz konusudur. Her iki tip de, hem yanal daralmalı ve hem de yanal daralmasız, hidrolik ve çevre mühendisliğinde yaygın kullanım alanına sahiptirler. Dikkat etmek gerekir ki, savak tipi ve şekli savak üzerindeki akımın hidrolik karakteristikleri üzerinde önemli rol oynar.



Şekil 1 - Yanal daralmasız dikdörtgen savak

Yanal daralmasız savaklar için Eşitlik (1) yaygın olarak kullanılmaktadır (Henderson, 1966),

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot H_1^{3/2} \cdot \sqrt{2g} \cdot L \quad (1)$$

burada Q debiyi (m^3/s), C_d debi katsayısını (boyutsuz), H_1 kret üzerindeki toplam yükü (m), g yerçekim ivmesini (m/s^2) ve L ise kret uzunluğunu (m) ifade etmektedir. Eşitlik (1)'deki toplam yük H_1 ,

$$H_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (2)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada h_1 nap yükünü (m) ve v_1 ise ortalama akım hızını (m/s) göstermektedir.

Savaklar akım doğrultusuna dik olacak şekilde yerleştirildikleri gibi, kırık doğrular veya daire şeklinde ve akış doğrultusu ile bir açı teşkil edecek şekilde de yerleştirilebilirler (Kumcu, 1997). Kret şekli debi deşarj kapasitesini etkileyen önemli parametrelerdendir. Kret şeklinin debi deşarj kapasitesi üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından ifade edilmesine

rağmen, tam olarak açıklanmış değildir (Amanian 1987; Waldron 1994; Tullis ve diğ. 1995; USBR 2001). Tullis ve diğ. (1995), labirent savakların tasarım ilkeleri ile ilgili yaptıkları çalışmalarında kret şeklinin debi katsayısı üzerinde önemli etkisinin olduğunu vurgulamıştır. Söz konusu araştırmacılar, debi kapasitesinin ise; toplam yükün, etkili kret uzunluğunun ve kret katsayısının bir fonksiyonu olduğunu ifade etmişlerdir. Amanian (1987), yüksek lisans tez çalışmasında labirent savakların tasarım performansı üzerine yaptığı çalışmada savak yüksekliğinin, kalınlığının ve şeklinin debi katsayısı üzerinde önemli etkilerinin olduğunu belirtmiştir. Waldron 1994'te yüksek lisans tezinde bu konunun önemini vurgulamış ve labirent savaklar üzerinde bir dizi deneyler yürütmüştür.

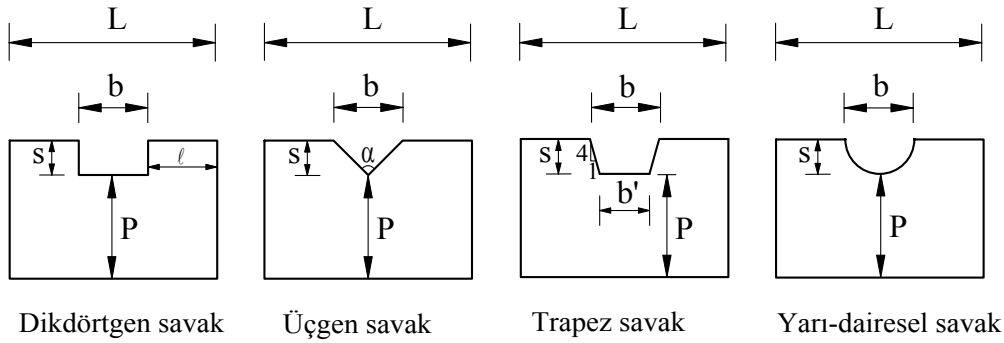
Bu çalışmada yanal daralmasız savaklarda; keskin kenarlı, $\frac{1}{2}$ yuvarlatılmış, $\frac{1}{4}$ yuvarlatılmış ve düz kret şekilleri oluşturulmuş ve kret şeklinin debi katsayısı üzerindeki etkiyi belirlemek amacıyla bir dizi deneyler yürütülmüştür. Savaklar hidrolik ve çevre mühendisliğinde birçok alanda kullanıldığı için,

farklı kret şekillerine sahip savakların debi katsayısının ve hidrolik karakteristiklerinin araştırılması bu konudaki boşluğu dolduracağı beklenmektedir. Ayrıca bu çalışmada, savak çeşitleri konusunda özet bilgiler sunulmuştur.

2 SAVAK ÇEŞİTLERİ

2.1 İnce Kenarlı Savaklar

İnce kenarlı savaklar farklı tiplerde inşa edilmektedir (Şekil 2). Özellikle 90° ince kenarlı üçgen savak debi ölçmek için en çok kullanılan savak tipidir. Literatürde keskin kenarlı savaklar



Şekil 2 - İnce kenarlı savaklar

Yanal daralmalı dikdörtgen savaklar için, 1883 yılında Francis Eşitlik (3)'ü önermiştir (USBR, 2001).

$$Q = 1,83(L - 0,2h)h^{3/2} \quad (3)$$

burada Q savaklanan debi (m³/s), L suyun aktığı açıklığın genişliği (m) ve h nap yükünü (m) ifade etmektedir.

Yanal daralmalı savaklarda H/P < 5 için Rehbock (1929) Eşitlik (4)'ü vermiştir. Yanal daralmalı savaklarda H/P > 20 için Henderson (1966) Eşitlik (5)'i önermiştir.

$$C_d = 0,611 + 0,08 \frac{H_1}{P} \quad (4)$$

$$C_d = 1,06 \left(1 + \frac{P}{H_1} \right)^{3/2} \quad (5)$$

Şişman ve diğ. (2009) dikdörtgen kesitli keskin kenarlı savaklarda debi ölçümü konulu çalışmalarında, tam açıklıklı savaktan başlayarak dar açıklıklı savağa kadar bir dizi deneyler yürütmüşlerdir. Keskin kenarlı dikdörtgen savaklar, hem tam açıklıklı ve hem de dar açıklıklı, üzerinden dökülen debi için Eşitlik (7)'yi önermişlerdir. Araştırmacılar yanal

daralmalı savaklar için debi katsayısını aşağıdaki boyutsuz parametrelere bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

in için birçok debi katsayısı formülü bulunmaktadır. Bunlardan en kapsamlı çalışma Kindsvater ve Carter (1957) tarafından yapılmıştır. Kindsvater ve Carter (1957) tarafından tanımlanan debi denkleminde savak genişliği ve savak üstündeki su yüksekliği belli bir düzeltme yapılarak kullanılmıştır. Araştırmacılar, b/B ve h/P'ye bağlı bir debi katsayısı önermişlerdir. Yanal daralmalı ve yanal daralmalı savaklar üzerinden savaklanan debi için birkaç eşitlik aşağıda özetle verilmiştir.

daralmalı savaklar için debi katsayısını aşağıdaki boyutsuz parametrelere bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

$$C_d = f \left(Re, We, \frac{h_1}{b}, \frac{b}{L}, \frac{h_1}{P} \right) \quad (6)$$

$$Q = \left[-0,001 + 0,254 \left(\frac{b}{L} \right) + 0,366 \left(\frac{b}{L} \right)^2 - 1,631 \left(\frac{b}{L} \right)^3 \right] h_1 + \left[0,015 + 3,212 \left(\frac{b}{L} \right) - 8,068 \left(\frac{b}{L} \right)^2 + 39,609 \left(\frac{b}{L} \right)^3 \right] h_1^2 \quad (7)$$

burada Q savaktan dökülen debiyi, Re Reynolds sayısını ve We Weber sayısını göstermektedir. Diğer simgeler Şekil 2'de gösterilmiştir.

Tokyay ve Turhan (2009) keskin kenarlı savaklarda debi katsayısı için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. 5 < H₁/P < 20 aralığı için yanal daralmalı savaklar için debi katsayısını veren eşitliği elde etmek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Sunulan eşitlik H₁/P'ye bağlıdır. Araştırmacılar; savak üzerindeki birim debinin q, savak yüksekliği P, savak üzerindeki su yükü H₁, akışkanın yoğunluğu ρ, dinamik viskozitesi μ, yüzeysel gerilme σ ve yerçekim

ivmesi g parametrelerine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

$$q = f_1(P, H_1, \rho, \mu, \sigma, g) \quad (8)$$

$$\frac{q}{h_1 \sqrt{gh_1}} = f_2\left(\frac{P}{H_1}, Re, We\right) \quad (9)$$

$$C_d = f_3\left(\frac{P}{H_1}, Re, We\right) \quad (10)$$

burada Re Reynolds sayısı, We ise Weber sayısıdır. Akışkanlar mekaniğinde genel olarak Reynolds sayısı büyüdükçe akım Reynolds sayısından bağımsız olur. Weber sayısı ise savak üzerindeki su yükünün çok küçük olduğu durumlarda önemli olur (Tokyay ve Turhan, 2009).

Tullis ve diğ. (1995) yanal daralması ince kenarlı $\frac{1}{4}$ yuvarlatılmış kret şekilli savakların debi katsayısı için Eşitlik (11)'i önermişlerdir.

$$C_d = 0,49 + 1,46(H_1/P) - 2,56(H_1/P)^2 + 1,44(H_1/P)^3 \quad (11)$$

burada P kret yüksekliği (m) ve H_1 ise kret üzerindeki toplam yükü (m) ifade etmektedir. Araştırmacılar bu eşitliğin $H_1/P < 0,7$ için geçerli olduğunu belirtmişlerdir. Dikkat etmek gerekir ki, $H_1/P > 0,7$ değerlerinde debi katsayısı için yanlış değerler vermektedir. Bu nedenle, araştırmacılar tarafından da ifade edildiği gibi bu eşitlik $H_1/P > 0,7$ için kullanılmalıdır.

Yanal daralması keskin kenarlı savaklar için Eşitlik (12)'de verilen formül de kullanılmaktadır (Jiwani ve Lucas, 2002). Eşitlik (12); $P > 0,06$ m, $h_1 > 0,01$ m ve $h_1 < 0,8P$ durumları için geçerlidir.

$$C_d = 0,605 + \frac{1}{1000h_1} + 0,08 \frac{h_1}{P} \quad (12)$$

Küçük debilerin ölçülmesinde, üçgen savakların kullanılması daha hassas sonuçlar vermektedir. Suyun üzerinde aktığı taban açısına göre çeşitli üçgen şekilli savaklar kullanılabilir. Bu açı 30° , 45° , 60° ve 90° olabilmektedir. Ölçülecek debi ne kadar az ise, o oranda taban açısı küçük olan bir savak tercih edilmektedir. Eşitlik (13) Gourley ve Crimp (1915) tarafından önerilmiştir. Yaygın olarak kullanılan sade ve gerçeğe yakın değerler veren bir formüldür. 90° taban açılı ince kenarlı savak için $tg(\alpha/2)$ ifadesi 1'e eşit olduğundan, formül daha da sade hale gelmektedir.

$$Q = 1,32 tg \frac{\alpha}{2} h^{2,47} \quad (13)$$

burada; Q savaktan geçen suyun debisi (m^3/s), h savak üzerindeki su yüksekliği (m) ve α keskin kenarlı üçgen savağın taban açısını ($^\circ$) ifade etmektedir.

2.2 Kalın Kenarlı Savaklar

Kalın kenarlı savaklar, keskin kenarlı savaklar gibi farklı tiplerde inşa edilebilmektedir (Şekil 3). Kalın kenarlı savaklarda L_w mesafesi için aşağıdaki ifade kullanılmaktadır (French 1985).

$$0,08 \leq \frac{H_1}{L_w} \leq 0,50 \quad (14)$$

burada $H_1 = h_1 + v_1^2/2g$ ve L_w ise kalın kenarlı savak uzunluğunu göstermektedir (Şekil 3).

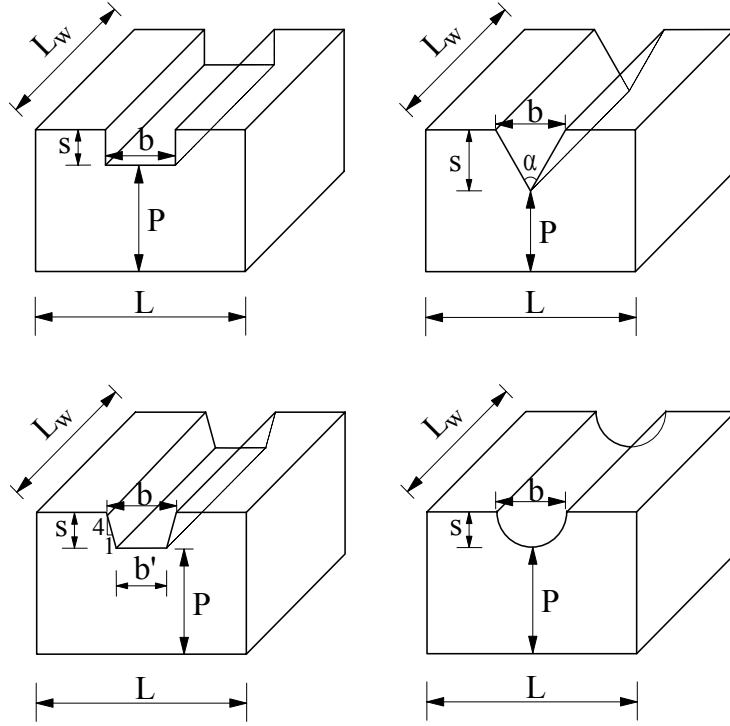
Membra ucu yuvarlatılmış dikdörtgen kalın kenarlı savaklar için, deney sonuçlarına dayanarak elde edilmiş Eşitlik (15) mevcuttur (Streeter and Wylie, 1983).

$$Q = 1,67 b h^{3/2} \quad (15)$$

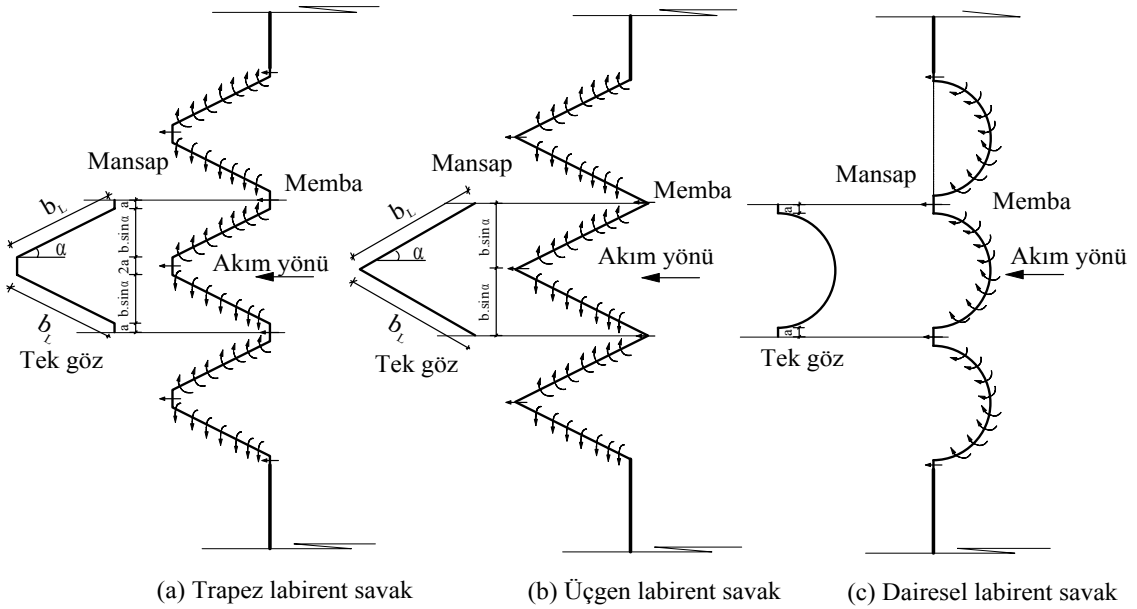
burada Q savaklanan debi (m^3/s), b savak genişliği (m) ve h ise nap yükünü (m) ifade etmektedir.

2.3 Labirent Savaklar

Labirent dolusavaklar ile dolusavak kretinin etkili uzunluğu artırılarak belirli bir göl seviyesinde savaklanabilen debinin artırılması veya sabit bir debinin daha küçük kret su yükleri ile geçirilmesi sağlanarak, rezervuar su seviyesinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Bu savaklar; özellikle taşkın debisinin oluşturacağı rezervuar su seviyesi için membadaki alanın kısıtlı olduğu veya topografyanın dolusavak genişliğini sınırlandırdığı koşullarda avantajlar sağlayan bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Labirent savaklar trapez, üçgen ve dairesel şekilli olarak inşa edilebilmektedir (Şekil 4). En çok tercih edilen tip trapez şekilli tiptir. Labirent savaklar üzerinden geçen akımın debisini bulmak için Eşitlik (1) kullanılmaktadır. Eşitlik (1)'deki L mesafesi yerine toplam kret uzunluğu alınmalıdır. Debi katsayısı eşitlikleri, Tullis ve diğ. (1995) tarafından sunulmuştur. Bu eşitlikler trapez şekilli, ince kenarlı ve $\frac{1}{4}$ yuvarlatılmış kret şekli için geçerlidir. Araştırmacılar, debi katsayısı formülünü H_1/P 'ye bağlı olarak vermişlerdir.



Şekil 3 – Kalın kenarlı savaklar



(a) Trapezit labirent savak

(b) Üçgen labirent savak

(c) Dairesel labirent savak

Şekil 4 - Labirent savaklar

3 SAVAKLAR İLE İLGİLİ BAZI TASARIM KRİTERLERİ

Savakların tasarımı ile ilgili bazı kriterler aşağıda özet olarak verilmiştir.

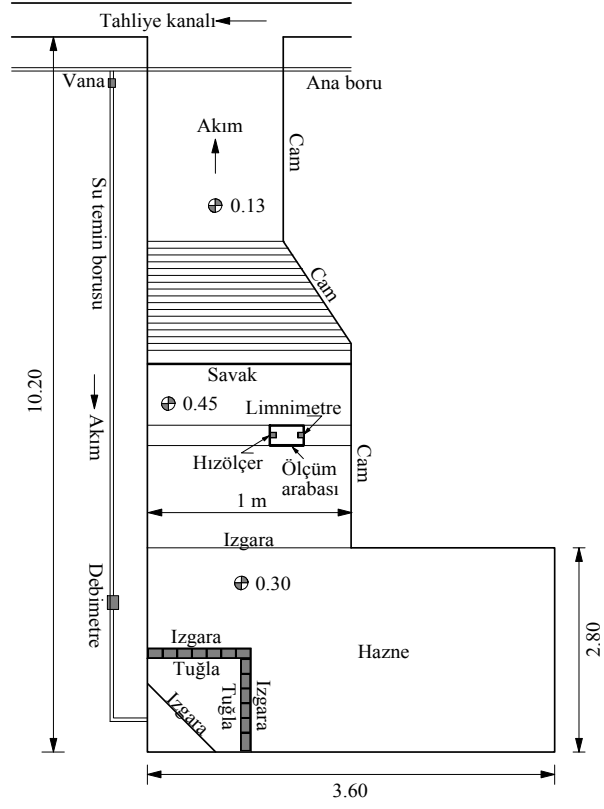
- Savak yapısının memba yüzü düşey, pürüzsüz ve kanal akışıyla dik konumda olmalıdır.
- Savağın kenarları düşey veya açılı bir düzlemde birleşebilir.
- Tüm savak tabakasının kalınlığı aynı olmalıdır.
- Nap, sadece kretin memba yüzeyinde kenarlarına dokunmalı, mansap yüzüne yapışmamalı ve serbest nap teşkil edilmelidir.
- Maksimum mansap su yüksekliği, kret yüksekliğinin altında olmalıdır. Serbest nap oluşumu için, savak kreti ile mansap su seviyesi arasındaki kot farkı en az 6 cm olmalıdır (USBR, 2001). French (1985) bu mesafeyi 5 cm olarak vermiştir.
- İnce kenarlı savaklarda; laboratuvar ortamında minimum nap yükü 2 cm olmalıdır. Coleman ve Smith (1923) minimum nap yükünün savak kreti üzerindeki yüzey gerilme nedeniyle 19 mm'den az olmamasını önermiştir. Nap yükü ile ilgili olarak $7 \leq h \leq 60 \text{ cm}$ ifadesi de verilmektedir (French 1985). Buradaki h nap yüküdür. Eğer nap yükü çok küçük olursa kullanılan debi katsayısı formülü Weber sayısını da içermelidir.
- Yanal daralmalı savaklarda; savaktan suyun aktığı iç kısım ile yan duvar arasındaki kısmın yatay uzunluğu ' ℓ ' ile gösterilirse, $\ell \geq 3h$ eşitliği dikkate alınmalıdır (Şekil 1). Savak imal edilirken metal plakanın eninin ve boyunun hesabında, taban ve yanlardan betonun içine girecek 5-6 cm'lik kısım göz önüne alınmalıdır (USBR, 2001).
- Nap yükü savak kretinden itibaren $3 \sim 4h_{max}$ kadar ileriden ölçülmelidir (French 1985). Burada h_{max} savak üzerinden akıtılacak maksimum nap yükünü ifade etmektedir. USBR (2001), nap yükünün 2 m ileriden ölçülmesinin yeterli olacağını belirtmiştir.
- Kret kalınlığı yapısal analize göre belirlenmektedir. Bir başka ifadeyle duvar kalınlığı; hidrostatik kuvvetlere, buz yüküne ve savağın yerleştirildiği yerin özel koşullarına bağlıdır. Ekonomi ve mukavemet için, mansap tarafta gerekli olan et kalınlık artırılabilir. Bu mansapta et kalınlığının artırılması, debi katsayısına herhangi bir etkisi olmamaktadır. İnce kenarlı savaklarda kret kalınlığı, kret yüksekliğinin 6'da biri olarak alınabilir.

- Eğer savak havalandırma veya oksijen transferi amacı ile kullanılacaksa, mansap havuzu derinliği, eni ve boyu önem kazanır. Mansap havuzuna giren su jetinin akım içerisine soktuğu hava kabarcıklarının ulaştığı maksimum derinliğe penetrasyon derinliği denmektedir. Mansap havuzu derinliği, penetrasyon derinliğinden daha büyük olmalıdır. Ayrıca, üçgen ve labirent savakların mansap havuzu su yüzeyindeki jet genişliği yay şeklinde açılmaktadır. Aksine dikdörtgen savaklarda jet genişliği küçük olmaktadır. Mansap havuzunun genişliği belirlenirken bu durum tasarımıda göz önüne alınmalıdır. Emiroğlu (2010), mansap havuzunun optimum boyutlandırılması ile ilgili eşitlikler sunmuştur.

4 DENEY DÜZENEGİ VE DENEYLER

Deneyle, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Laboratuvarında yürütülmüştür. Dene düzeneginin şematik gösterimi Şekil 5'te verilmiştir. Sistem için debi, ana hazneye bağlı 25 cm çaplı ana borudan alınmıştır. Su önce $1.00 \times 2.80 \times 3.60 = 10.08 \text{ m}^3$ hacimli bir hazneye alınmıştır. Hazne girişinde enerji sönümleme amacıyla ızgaralar ve tuğlalar yerleştirilmiştir. Su, haznedden sonra 1.00 m. genişliğinde ve 0.80 m yüksekliğindeki yaklaşım kanalına verilmiştir. Bu kanalın uzunluğu 3.0 m'dir. Deneylede savağın yerleştirildiği kısımda mansap kotu memba kotuna göre daha düşük tutulmuştur. Hazırlanan savaklar yaklaşım kanalının sonuna yerleştirilmiştir. Kararlı akım koşullarını temin etmek amacıyla gerekli yerlerde tuğla ve ızgaralar kullanılmıştır. Deneyle kararlı akım ve serbest savaklanma durumları için gerçekleştirilmiştir. Seviye ölçümleri dijital limnometre ile $\pm 0,01 \text{ mm}$ hassasiyetle ölçülmüştür. Seviye ölçümleri, membaya doğru nap yükünün beş katı kadar ileri bir mesafede alınmıştır. Şekil 6'da ölçüm arabası üzerine yerleştirilmiş limnometre görülmektedir. Ölçüm arabası x ve y doğrultularında hareket edebilmektedir. Hız ölçümleri ise akustik hızölçer yardımı ile ölçülmüştür.

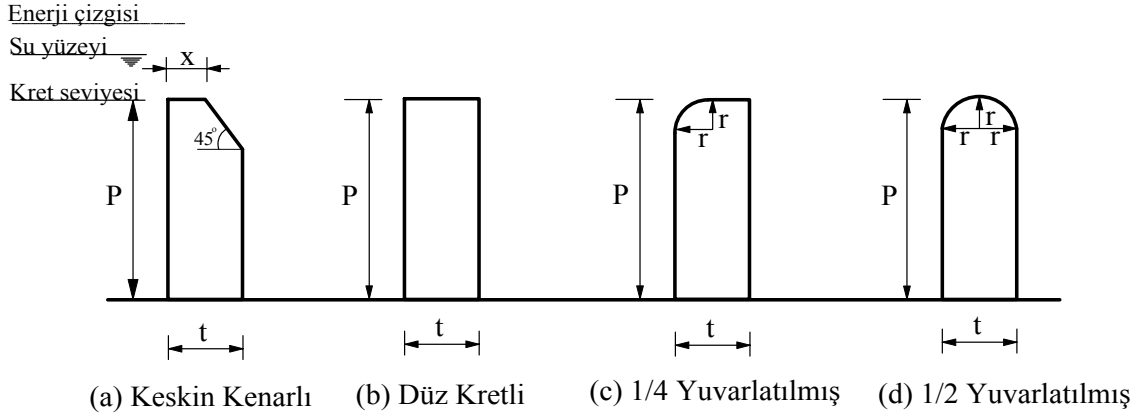
Kret şeklinin debi katsayısı üzerine etkisini belirlemek amacıyla dört farklı kret şekli dikkate alınmıştır. Bunlar; (1) keskin kenarlı, (2) düz kretli, (3) $\frac{1}{2}$ yuvarlatılmış ve (4) $\frac{1}{4}$ yuvarlatılmış tiplerdir (Şekil 7). Bu savaklar ahşap malzemeden imal edilmiş ve boyanmıştır.



Şekil 5 - Deney düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 6 - Deney düzeneğinden görünüm



Şekil 7 Test edilen kret şekilleri

Savak boyutları belirlenirken aşağıdaki eşitliklerden yararlanılmıştır. Bu eşitlikler Tullis ve diğ. (1995) tarafından önerilmiş ve labirent savaklar için kullanılmıştır. Bu çalışmada da bu eşitlikler kullanılmıştır.

$$r = P / 12 \quad (15)$$

$$t = P / 6 \quad (16)$$

$$x = t - r \quad (17)$$

burada, r kret eğrilik yarıçapı (cm), P kret (veya savak) yüksekliği (cm), t savak kalınlığı (cm) ve x keskin kenarlı savağın kretteki düz mesafeyi (cm) göstermektedir.

Bu çalışmada; deney değişkenleri ile ilgili bilgiler Çizelge 1'de özetlenmiştir. Boyanmış ahşap savaklar, deney seti üzerine akıma dik olarak yerleştirilmiş ve gerekli geçirimsizlik temin edilmiştir. Çizelge 1'de görüldüğü gibi savak uzunluğu 100 cm ve kret uzunlukları ise 10, 15 ve 20 cm olarak alınmıştır.

İlk olarak 10 cm kret yükseklikli savak, sete yerleştirilmiş ve nap yüksekliği 25 mm'den başlanıp nap yüksekliği 5 mm artırılarak 100 mm nap yüksekliğine kadar çıkılarak deneyler yapılmıştır. Coleman and Smith (1923) kret üzerindeki yüzey gerilmeleri nedeniyle, minimum nap kalınlığının 19 mm olarak alınmasını önermişlerdir. Böylece, Weber sayısı ihmal edilebilir. Bu nedenle, ölçek etkilerinden kurtulmak için, minimum nap kalınlığı 25 mm olarak alınmıştır. Bu savakta yaklaşık olarak debi, 8,5–80 L/s arasında değişmektedir. Savak yükseklikleri 10 cm. olan test edilen tüm savaklar için aynı şartlar altında deneyler yapılmıştır. Savak yüksekliği 15 ve 20 cm olan deney serilerinde maksimum nap yükü ise 150 mm alınmıştır. Savak yüksekliği 15 ve 20 cm olan deney serilerinde debi yaklaşık olarak 8,5–150 L/s arasında alınmıştır.

Çizelge 1 - Deney değişkenleri

Değişken (1)	Değer (2)
Kret uzunluğu, L (cm)	100
Kret yüksekliği, P (cm)	10, 15, 20
Savak kalınlığı, t (cm)	1,67, 2,50, 3,33
Kret eğrilik yarıçapı, r (cm)	0,83, 1,25, 1,67
Keskin kenarlı savakta kretteki düz mesafe, x (cm)	0,84, 1,25, 1,66
Savaklanan debi, Q (L/s)	8.71-136,34
Nap kalınlığı, h_1 (cm)	2,23-15,00
H_1/P	0,15-1,12
Kinetik enerji düzeltme faktörü, α	1,0
Deney sayısı	192

Seçilen nap yükseklikleri dijital limnometre ile ayarlandıktan sonra sisteme su, vananın açılmasıyla verilmiştir. İstenen nap yükü vana yardımı ile ayarlanmış ve doğru olarak ayarlanabilmesi için yeterli bir süre beklenmiştir. Bu nap yüküne karşılık gelen debi, iletim hattı üzerindeki Siemens marka bir elektromagnetik debimetre ile okunmuştur. Sonra ADV hızölçer ile akımın ortalama hızı ölçülmüştür. Bütün deney serileri bu şekilde yürütülmüştür.

5 DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Kret şeklinin debi katsayısına etkisini belirlemek amacıyla, yapılan deneylerden elde edilen veriler Çizelge 2'de verilmiştir. Nap yükü dijital limnometre ile milimetre birimi ile ölçülmüş, fakat gerekli birim dönüşümleri yapılarak Eşitlik (4) ile debi katsayısı hesaplanırken, debi m^3/s olarak dikkate alınmıştır. Şekil 8'den Şekil 15'e kadar olan grafiklerde H_1/P 'nin C_d ile değişimi incelenmiştir. Yukarıda da ifade edildiği gibi debi katsayısı Reynolds sayısı, Weber sayısı ve

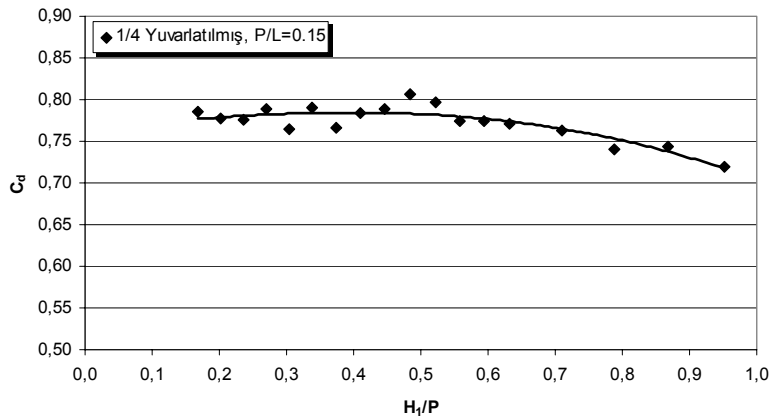
H_1/P 'nin bir fonksiyonudur. Tokyay ve Turhan (2009)'nın da ifade ettiği Reynolds sayısı ve Weber sayısı yukarıda ifade edilen nedenlerden dolayı ihmal edilmektedir. Böylece debi katsayısı sadece H_1/P 'nin bir fonksiyonu olmaktadır. Bu nedenle grafikler, H_1/P ile C_d arasında çizilmiştir.

Çizelge 2'de görüldüğü gibi nap yükünün artmasıyla debi katsayısında azalma olduğu

görülmüştür. Hesaplanan debi katsayısı ile H_1/P arasındaki grafik Şekil 8'de verilmiştir. Uydurulan eğilim çizgisinin 3. dereceden polinom olduğu gözlenmiştir. H_1/P 'nin artması ile debi katsayısı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Nap yükünün artması ile deşarj miktarının azaldığı birçok araştırmacı tarafından da ifade edilmiştir (Tullis vd. 1995; Kumcu, 1997).

Çizelge 2 – 1/4 yuvarlatılmış kret şekli ($P/L=15/100=0,15$, $t=2,50$, $r=1,25$)

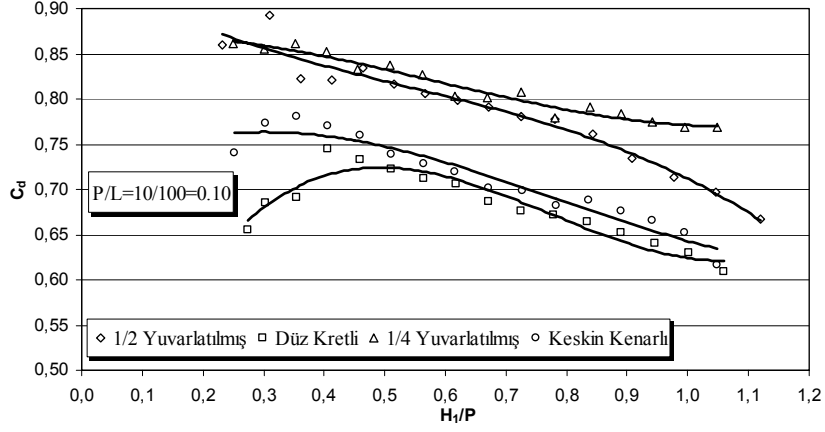
h_1 (cm)	v_1 (cm/s)	Q (L/s)	$v_1^2 / 2g$ (cm)	H_1 (cm)	C_d (-)	h_1/P (-)	H_1/P (-)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
2,5	5,91	9,27	0,017802	2,517802	0,785758	0,166667	0,167853
3,0	6,91	12,88	0,024336	3,024336	0,777777	0,200000	0,201622
3,5	7,91	15,22	0,031890	3,531890	0,776508	0,233333	0,235459
4,0	8,91	18,91	0,040463	4,040463	0,788473	0,266667	0,269364
4,5	9,91	21,91	0,050055	4,550055	0,764468	0,300000	0,303337
5,0	12,16	26,66	0,075365	5,075365	0,789589	0,333333	0,338358
5,5	14,4	30,03	0,105688	5,605688	0,766220	0,366667	0,373713
6,0	16,65	35,2	0,141296	6,141296	0,783239	0,400000	0,40942
6,5	19,56	40,31	0,195002	6,695002	0,788004	0,433333	0,446333
7,0	22,46	46,60	0,257111	7,257111	0,807202	0,466667	0,483807
7,5	25,37	51,50	0,328051	7,828051	0,796285	0,500000	0,52187
8,0	27,12	55,36	0,374870	8,374870	0,773519	0,533333	0,558325
8,5	28,85	60,97	0,424221	8,924221	0,774466	0,566667	0,594948
9,0	30,61	66,40	0,477560	9,477560	0,770664	0,600000	0,631837
10,0	35,42	78,11	0,639438	10,63944	0,762203	0,666667	0,709296
11,0	40,23	88,99	0,824900	11,82490	0,741117	0,733333	0,788327
12,0	45,05	103,40	1,034405	13,03440	0,744090	0,800000	0,86896
13,0	49,86	114,40	1,267084	14,26708	0,718894	0,866667	0,951139
14,0	54,67	129,01	1,523348	15,52335	0,714311	0,933333	1,03489
14,5	57,08	132,20	1,660615	16,16061	0,689107	0,966667	1,077374



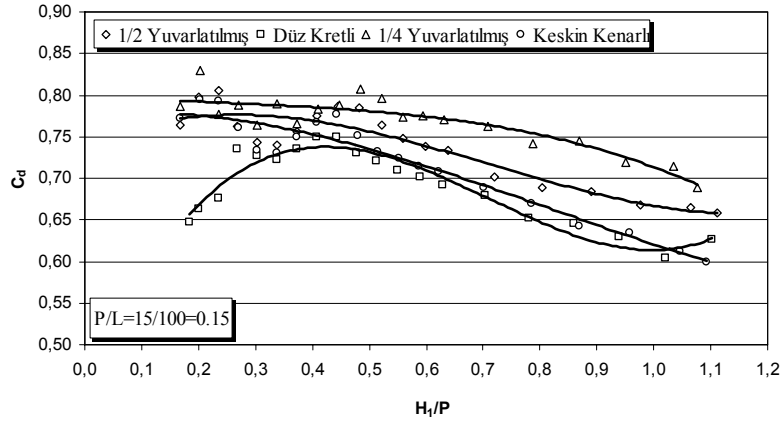
Şekil 8 - $P/L = 15/100 = 0,15$ ve 1/4 Yuvarlatılmış kret şekli için C_d-H_1/P değişimi

Şekil 9(a-c)'da H_1/P 'nin artmasıyla debi katsayısında bir azalma gözlenmiş ve dört farklı kret şekli incelendiğinde $1/4$ Yuvarlatılmış kret şekli daha büyük debi katsayısı değerlerine sahip olduğu görülmüştür. H_1/P 'nin küçük değerlerinde $1/4$ ile $1/2$ yuvarlatılmış kret şekilli savaklar birbirlerine yakın sonuçlar verdiği ve

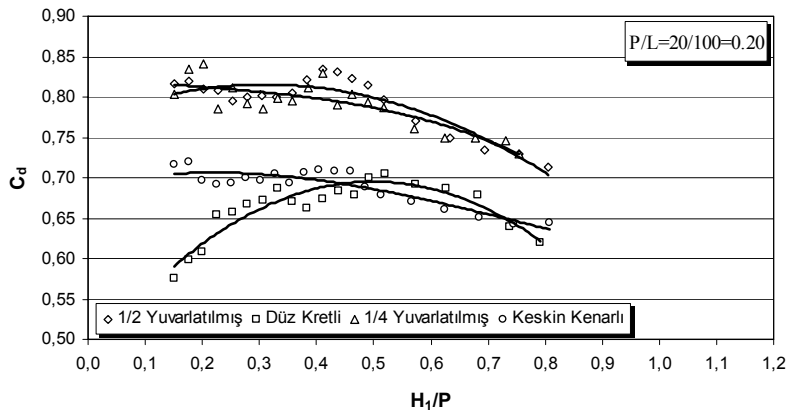
düz kretli savak ise daha küçük debi katsayısı değerine sahip olduğu görülmektedir. Keskin kenarlı ile düz kretli savakların debi katsayısı değerleri H_1/P 'nin 0,50'den büyük değerlerinde birbirlerine yakın olduğu görülmüştür.



(a)



(b)



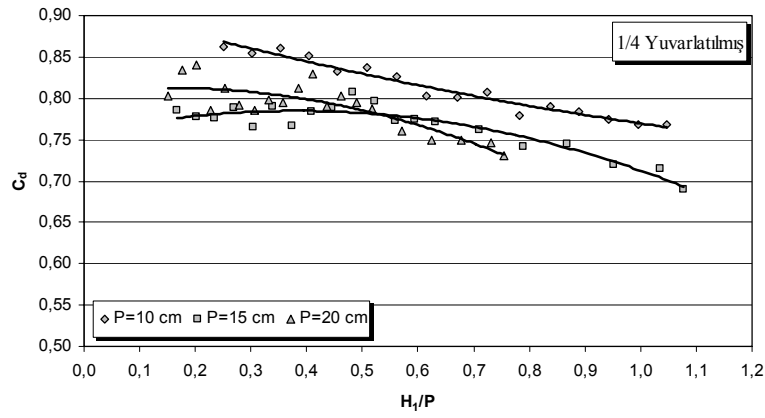
(c)

Şekil 9. Farklı kret şekli için C_d-H_1/P değişimi, (a) $P/L = 0,10$, (b) $P/L = 0,15$, (c) $P/L = 0,20$

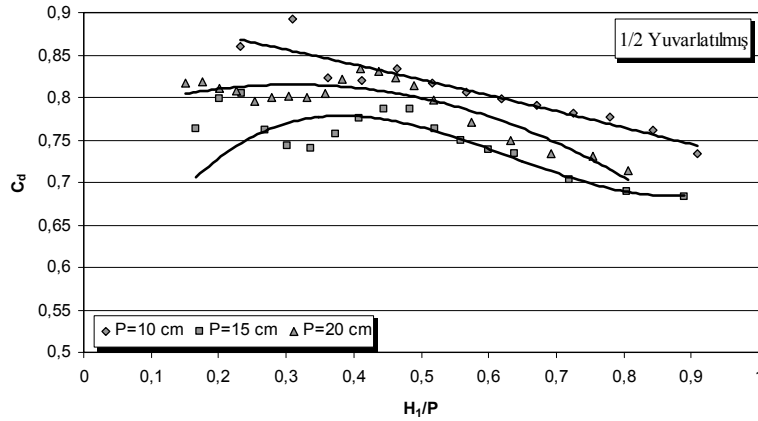
Şekil 10(a-d), farklı kret şekilleri için kret yüksekliğinin debi katsayısı üzerindeki etkiyi görmek amacıyla çizilmiştir. Şekil 10a, ¼ yuvarlatılmış kret şekli için C_d ile H_1/P arasında çizilmiştir. Söz konusu şekilden de görüldüğü gibi çoğunlukla kret yüksekliğinin artması debi katsayısının azalmasına neden olmuştur. Bu durum diğer test edilen kret şekillerinde de gözlenmiştir (Şekil 10b-d).

Çizelge 3'te büyük debi katsayısına sahip ¼ yuvarlatılmış şekilli savak ile diğer savaklar arasında bir kıyaslama yapılmıştır. Çizelge 3'teki yüzde değerler "(¼ yuvarlatılmış kret şekilli savağın debi katsayısı – Düz kret şekline sahip savağın debi katsayısı) / (¼ yuvarlatılmış

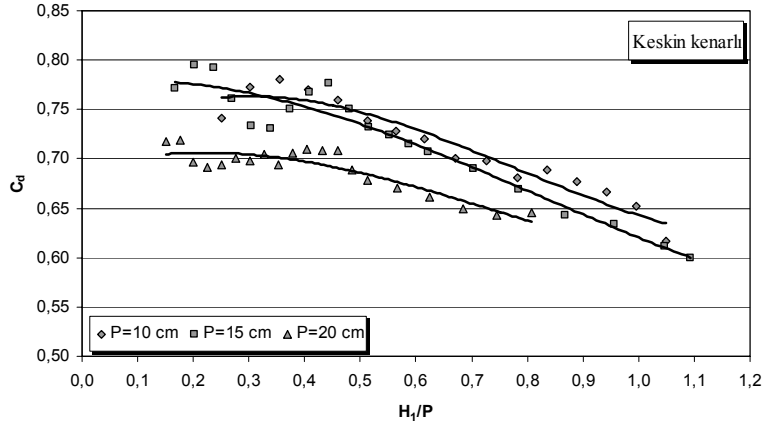
kret şekilli savağın debi katsayısı" ifadesiyle hesaplanmıştır. Burada, $P/L=0,10$ için yaklaşık olarak düz kretli savaktan % 16,34, ½ yuvarlatılmıştan % 3,12 ve keskin kenarlı savaktan ise % 12,47 daha fazla su savakladığı hesaplanmıştır. $P/L=0,15$ için yaklaşık olarak düz kretli savaktan % 10,17, ½ yuvarlatılmıştan % 3,95 ve keskin kenarlı savaktan ise % 6,68 daha fazla su geçirdiği hesaplanmıştır. $P/L=0,20$ için yaklaşık olarak düz kretli savaktan % 10,17, keskin kenarlı savaktan ise % 12,72 daha fazla su geçirdiği hesaplanmıştır ve ½ yuvarlatılmış savaktan ise % 0,56 daha az su savakladığı hesaplanmıştır.



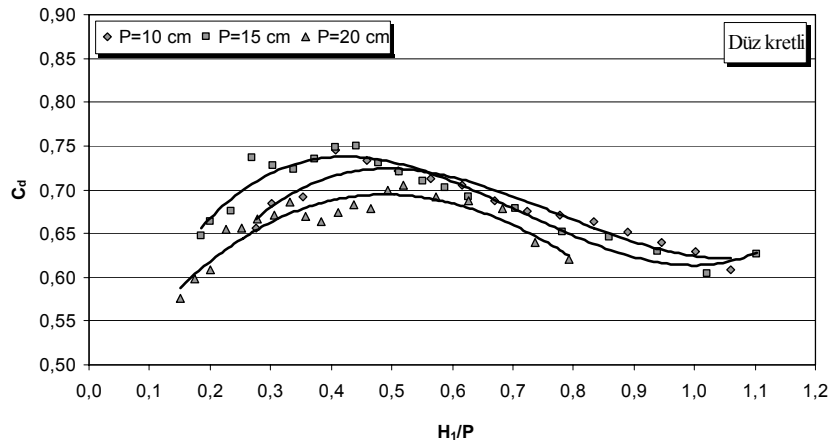
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 10. Kret yükseklikleriyle birlikte H_1/P ile C_d 'nin değişimi; (a) $1/4$ yuvarlatılmış, (b) $1/2$ yuvarlatılmış, (c) Keskin kenarlı, (d) Düz kretli

Çizelge 3. Farklı savak yüksekliklerindeki kret şekillerinin $1/4$ yuvarlatılmış kret şekli ile karşılaştırılması

	Düz Kretli (%)	Keskin Kenarlı (%)	$1/2$ Yuvarlatılmış (%)
$P/L=0,10$	16,34	12,47	2,82
$P/L=0,15$	10,17	6,68	3,95
$P/L=0,20$	16,21	12,72	0,56

Farklı kret şekillerine sahip yanıl daralmazı doğrusal savakların Eşitlik (1)'deki debi katsayısı eşitliğini elde etmek için *Statistica* istatistik yazılımı kullanılmıştır. Eşitlikler elde edilirken bu çalışmada 10, 15 ve 20 cm için

yapılan tüm deney verileri kullanılmıştır. Elde edilen eşitlikler aşağıda verilmiştir. Bu eşitlikler $H_1/P < 1$ için geçerlidir.

$$C_d = 0,363 + 2,047(H_1/P) - 4,015(H_1/P)^2 + 3,031(H_1/P)^3 - 0,802(H_1/P)^4 \quad (18)$$

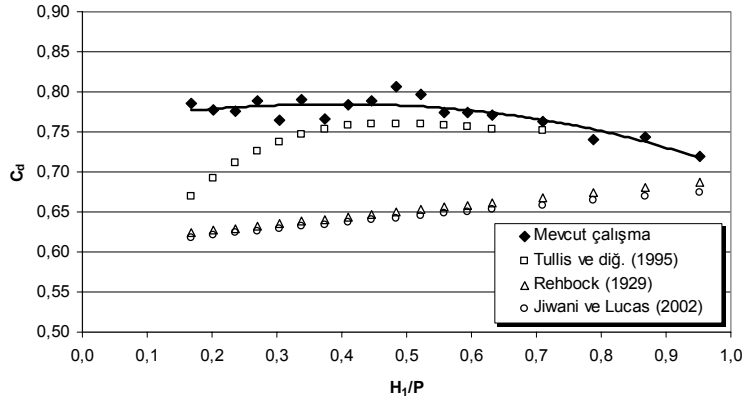
$$C_d = 0,701 + 0,198(H_1/P) - 0,044(H_1/P)^2 - 0,658(H_1/P)^3 + 0,439(H_1/P)^4 \quad (19)$$

$$C_d = 0,763 + 0,324(H_1/P) - 0,667(H_1/P)^2 + 0,255(H_1/P)^3 + 0,012(H_1/P)^4 \quad (20)$$

$$C_d = 0,772 + 0,227(H_1/P) - 0,560(H_1/P)^2 + 0,338(H_1/P)^3 - 0,067(H_1/P)^4 \quad (21)$$

Eşitlik (18) düz kretli, Eşitlik (19) keskin kenarlı, Eşitlik (20) ½ yuvarlatılmış, Eşitlik (21) ¼ yuvarlatılmış ince kenarlı savaklara aittir. Bu

eşitliklerin korelasyon katsayıları sırasıyla 0,74, 0,81, 0,84 ve 0,87'dir.



Şekil 11. Mevcut çalışma verileri ile Tullis ve diğ. (1995), Rehbock (1929) ve Jiwani ve Lucas (2002)'in eşitlikleri ile karşılaştırılması

6 SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı kret şekillerine sahip yanar daralması doğrusal savakların debi katsayısını belirlemek amacıyla bir dizi deneyler yürütülmüştür. Elde edilen veriler kullanılarak, her bir kret şekli için debi katsayısını veren eşitlikler elde edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Yapılan bu çalışma ile, savak kret şeklinin debi katsayısına etki eden önemli bir parametre olduğu görülmüştür.
- Bütün savak tiplerinde savak yüksekliğinin artmasıyla debi katsayısının azaldığı görülmüştür.
- H_1/P oranlarının artmasıyla test edilen savak tiplerinin hepsinde, debi katsayısının azaldığı gözlenmiştir.
- Test edilen savak kret şekillerinde; ¼ yuvarlatılmış kret şekline sahip doğrusal savak tipi daha büyük debi katsayısı değerlerine sahip olduğu görülmüştür.
- En düşük debi katsayısına sahip olan savak, düz kretli savak tipi olduğu sonucuna varılmıştır.
- Kullanılan savak tipleri arasında debi katsayısı açısından büyükten küçüğe doğru bir sıralama yapılırsa, ¼ yuvarlatılmış, ½ yuvarlatılmış, keskin kenarlı ve düz kretli savaklar şeklinde bir sıralama olmaktadır.

7 KAYNAKLAR

- [1] Amanian, N., 1987. Performance and Design of Labyrinth Spillway. MSc Thesis, Utah State University, Logan, Utah.
- [2] Coleman, G. S. and Smith, D. 1923. The Discharging Capacity of Side Weirs. Proc. of the ICE, London, 6, 288-304.
- [3] Emiroglu, M. E. 2010. Estimating Flow Characteristics of Different Weir Types and Optimum Dimensions of Downstream Receiving Pool. Journal of Hydrology and Hydromechanics, in Press.
- [4] French, R. H. 1986. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- [5] Gourley, H. J. F. and Crimp, B. S. 1915. The flow of water over sharp-edged notches and weirs (Including Appendix). Minutes of the Proceedings, Volume 200, Issue 1915, pp. 388-408.
- [6] Henderson, F. M. 1966. Open Channel Flow. Macmillan Co., New York.
- [7] Jiwani, R. and Lucas, S. 2002. Methods of Flow Measurement for Water and wastewater. 3rd Edition, NIVUS GmbH, Im Tale 2, D' 75031 Eppingen, www.nivus.de.
- [8] Kindsvater, C. E. and Carter, R. W. 1957. Discharge Characteristics of Rectangular Thin-Plate Weirs. J. Hydraulics Div., Vol. 83, No. HY6, Paper No. 1453, pp. 1-36.
- [9] Kumcu, Ş. Y. 1997. Hydraulic Characteristics of Sharp-Crested Weirs with Application to Labyrinth Spillways. Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

- [10] Rehbock, T. 1929. Discouusion of "Precise Measurements", by K. B. Turner. Trans., ASCE, 93, 1143-1162.
- [11] Şişman, H. Ç., Altan-Sakarya A. B. ve Aydın, İ. 2009. Dikdörtgen Kesitli Keskin Kenarlı savaklarla Debi Ölçümü. IV. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 06-10 Temmuz 2009, İstanbul, 27-35.
- [12] Streeter, V. L. and Wylie, E. B. 1983. Fluid Mechanics. McGraw-Hill, Singapore.
- [13] Tokyay, N. D. ve Turhan, Z. G. 2009. Küçük Savak Yükseklikleri için Dikdörtgen Keskin Kenarlı Savaklarda Debi Katsayısı. IV. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 06-10 Temmuz 2009, İstanbul, 71-76.
- [14] Tullis, J.P., Amanian, N. and Waldron, D., 1995. Design of Labyrinth Spillway. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No.3., pp. 247-255.
- [15] USBR, 2001. Water Measurement Manual. 3rd Edition, Water Resources Research Laboratory, Bureau of Reclamation, U. S. Department of the Interior.
- [16] Waldron, D.R. 1994. Design of Labyrinth Weirs. MSc Thesis, Utah State University, Logan, Utah.