

25358

YUZUNCU YIL UNiVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTUSU
TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA
ANABİLİM DALI

GEÇİRİMSİZ BİR ZEMİN ÜZERİNE OTURTULMUŞ TOPRAK BENT
GÖVDESİNDEN SIZMANIN HESAPLANMASINDA KULLANILAN BAZI
EŞİTLİKLERİN UYGULANMA OLANAKLARININ HELE - SHAW VİSKOZ
SIVI ANALOG MODELİ İLE İNCELENMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Adil AKYÜZ

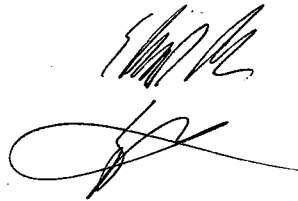
YÜKSEK LİSANS TEZİ

JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Ersoy GEMALMAZ
Başkan

Yardımcı Doç. Dr. S. İsmail İPEK
Üye

Yardımcı Doç. Dr. Mehmet YILMAZ
Üye





Tez Kabul Tarihi

29./09./1992

ÖNSÖZ

Sulama, tarımda her zaman önemli bir yere sahip olmuştur. Birçok yerde arazinin doğal kaynaklarla sulanabilmesi imkânsızdır. Bu sebeple böyle yerlerde su toplama yapılarına ihtiyaç duyulur. Sulama amaçlı yapılan bu yapılar genelde toprak barajlar, göletler ve seddelerden ibarettir.

Su toplama yapılarında sızma önemli bir problemdir. Toprak bent gövdelerinde sızma gövde içerisinden, gövdenin üzerine oturtulduğu zeminden veya bunların her ikisinden meydana gelebilir. Toprak bent gövdelerinden sızmanın hesabı, gerek kaybolan su miktarı, gerek yapının emniyeti yönünden oldukça önemlidir. Toprak bentlerden sızmanın hesabı için birçok yöntem geliştirilmiştir.

Bu çalışmada geçirimsiz zemin üzerine oturtulmuş toprak bent gövdesinden sızmanın hesabında kullanılan eşitliklerin Hele-Shaw Viskoz Sıvı Analog Modeli ile değerlendirilmesi yapılmıştır.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	
ÇİZELGE LİSTESİ	I
ŞEKİL LİSTESİ	II
ÖZ	III
ABSTRACT	IV
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1. Toprak Bentlerden Sızma	3
2.1.1. Dupuit Çözümü	3
2.1.2. Schaffernak ve Van Iterson Çözümü	4
2.1.3. L. Casagrande Çözümü	5
2.1.4. Pavlovsky Çözümü	6
2.1.4.1. Mansapta Su Bulunmaması Durumu	7
2.1.4.2. Mansapta Su Bulunması Durumu	8
2.2. Gözenekli Ortamda Su Hareketi	10
2.3. Darcy Yasası	10
2.4. Model Çalışmalarının Önemi	12
2.5. Modeller ve Analoglar	12
2.5.1. Modeller	13
2.5.1.1. Modellerin Oluşturulma İlkeleri ..	13
2.5.2. Analoglar	14
2.5.3. Analog Çeşitleri	15
2.5.3.1. Viskoz Sıvı Analoglar	15
2.5.3.2. Elektriksel Analoglar	16
2.5.3.3. Gergin Zar Analoglar	17

	<u>Sayfa</u>
2.5.3.4. Kum Tankları	17
2.6 Hele-Shaw Modellerin Kuramsal Esasları	18
2.6.1. Navier-Stokes Denklemleri	21
2.6.2. Ölçeklerin Belirlenmesi	22
3. MATERYAL VE METOT	23
3.1. Model ve Çalışma İlkeleri	23
3.1.1. Model	23
3.2. METOT	27
3.2.1. Viskozitenin Belirlenmesi	27
3.2.2. Değişik Bent Gövdelerinin Seçimi	30
3.2.3. Değişik Yağ Seviyelerinin Seçimi	31
3.2.4. Sistemin Çalıştırılması	31
3.2.5. Viskozite ve Sıcaklık Düzeltmesi	31
3.2.6. Ölçümlerin Yapılması	33
4. DENEME SONUÇLARI	34
4.1. Denemeden Elde Edilen Sonuçlar	34
4.2. Sonuçların Değerlendirilmesi	36
4.2.1. Dupuit Çözümüne Göre Değerlendirme	36
4.2.2. Schaffernak ve Van Iterson Çözümüne Göre Değerlendirme	39
4.2.3. L. Casagrande Çözümüne Göre Değerlen- dirme	41
4.2.4. Pavlovsky Çözümüne Göre Değerlendirme ..	42
5. TARTIŞMA	49
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	51

	<u>Sayfa</u>
7. ÖZET	52
SUMMARY	54
8. TEŞEKKÜR	56
9. YARARLANILAN KAYNAKLAR	57



I

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1. Şevlere göre bent yükseklikleri	30
Çizelge 2. Şevler için seçilen yağ seviyeleri	32
Çizelge 3. Modelden ölçülen debi değerleri	34
Çizelge 4. Dupuit çözümünden hesaplanan debi değerleri ...	37
Çizelge 5. Schaffernak ve Van Iterson çözümünden hesaplanan debi değerleri	40
Çizelge 6. L. Casagrande çözümünden hesaplanan debi değerleri	41
Çizelge 7. Pavlovsky çözümünden hesaplanan debi değerleri	43
Çizelge 8. 22 °C'a göre düzeltilmiş değerler	46
Çizelge 9. Modelle formüller arasında bulunan P ihtimal düzeyleri	50

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.	Dupuit çözümü için kullanılan şekil	3
Şekil 2.	Schaffernak ve Van Iterson çözümü için kullanılan şekil	4
Şekil 3.	L.Casagrande çözümü için kullanılan şekil..	6
Şekil 4.	Pavlovsky çözümü için kullanılan şekil	8
Şekil 5.	Darcy'nin yaptığı deney düzeneği	11
Şekil 6.	Paralel plakalar arasında akış	18
Şekil 7a.	Modelin şematik görünüşü	24
Şekil 7b.	Modelin kesit resmi	25
Şekil 7c.	Model cam plakalarının kesit resmi	26
Şekil 8.	Viskozite ölçüm cihazı	28
Şekil 9.	Viskozite-sıcaklık grafiği	29

ÖZ

Bu araştırmada geçirimsiz zemin üzerine oturtulmuş bir toprak bentten sızmanın hesaplanmasında kullanılan bazı eşitliklerin Hele-Shaw Viskoz Sıvı Analog Modeli ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Viskozitesi belirlenen motor yağı kullanılarak Hele-Shaw Analog modelinde 11 farklı şev için ölçümler yapılmıştır. lm ve formül sonuçlarına korrelasyon ve t testleri uygulanmıştır. İstatistik test sonuçları model ile en uygun değerleri veren eşitliğin Dupuit eşitliği olduğunu göstermiştir.

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the practicality of some equations used in the calculation of seepage from an earth dam placed on an impervious base by using a Hele-Shaw Viscous Fluid Analog Model. Measurements were made with 11 different dam slopes on a Hele-Shaw Analog Model by using oil of known viscosity. The correlation and t tests were made according to measurements and formula results. Statistical test results showed that Dupuit equation was the most appropriate for this seepage case.

1. GİRİŞ

Yeraltı suyu hareketinde analitik çözümlere ek olarak özellikle problemin sınır koşullarının karmaşık olduğu durumlarda, model veya analog çalışmalarına baş vurulur. Gerçekte karşılaşılan durumun belli bir ölçek değişikliği ile laboratuvara aktarılmasıyla bir model oluşturulur ve daha sonra bu model üzerinde yapılan denemelerden elde edilen sonuçlar, modelin hazırlanmasının temelini oluşturan ilkeler ve bu ilkelere dayanılarak çıkarılmış olan eşitlikler uyarınca çözümlenerek, gerçekte karşılaşılan problem hakkında bir yargıya varılır (1).

Prototip gerçekte karşılaşılan durumun basite indirgenmiş şeklidir. Model terimi ile de prototipin belli bir ölçeğe göre boyutları değiştirilmiş benzeri nitelendirilmektedir. Prototip-model ilişkisi benzer iki sistem arasındaki ilişkidir; prototip-analog ilişkisi ise farklı fiziksel sistemler arasındaki ilişkidir (1).

Hele-Shaw Analog Modelleri de prototiple bu tip bir ilişkiye sahiptir; yani gözenekli ortam içerisindeki akışla, birbirine yakın olarak yerleştirilmiş paralel iki plaka arasındaki vizkoz bir sıvının akışı, kısmi diferansiyel denklemlere tâbidir. İlk kez 1897 yılında Hele-Shaw tarafından akım alanı içerisinde yer alan cisimlerin çevresindeki akışın incelenmesi amacıyla geliştirilen bu yöntem daha sonra gözenekli ortam hidroliğinde çok geniş bir uygulama alanı bulmuştur. incelenecek problemin çeşidine göre

Hele-Shaw modellerinin düşey, ya da yatay konumlu olacak biçimde hazırlanmaları mümkündür. Hele-Shaw Analog Modelleri ile iki boyutlu olmak üzere Dren Boru ve Hendeklerine Akış, Toprak Bent Gövdelerden Sızma, Bağlamaların Altından Sızma gibi akış problemleri kolayca incelenebilir.

Toprak bent gövdelerindeki su hareketinin de Hele-Shaw modelleriyle incelenebilmesi mümkündür. Barajlar, toprak bent gövdeleri ve seddeler gibi yapılarda sızma, bazan çok önemli ve önüne geçilemeyecek problemler doğurabilir. Her şeyden önce sızma suretiyle bent gerisinde depolanması öngörülen su kaybolmaktadır. Sızmanın bent gövdesine etkisi birkaç yoldan olabilir. Gövde içinden geçip mansab yüzeyinde meydana çıkan su, mansab topuğunda dolgu malzemesinin akışkan bir hal almasına neden olur ve mansab şevinin zarar görmesine yol açabilir.

Bu çalışmada geçirimsiz bir zemin üzerine oturtulmuş toprak bent gövdesinden sızan su miktarının hesabında kullanılan bazı eşitliklerin, Hele-Shaw Viskoz Sıvı Analog modeli ile değerlendirilmesi yapılmıştır. Modelin doğru çalıştığı düşünülerek, toprak bentlerden sızan su miktarının bulunmasında kullanılan Dupuit Çözümü, Schaffernak ve Van Iterson Çözümü, L.Casagrande Çözümü ve Pavlovsky Çözümü olarak adlandırılan eşitliklerden elde edilen sonuçlarla modelden ölçülen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Toprak Bentlerden Sızma

Geçirimsiz bir zemin üzerindeki toprak bent gövdesinden sızan su miktarının hesaplanmasında kullanılan birçok eşitlik geliştirilmiştir. Geliştirilen bu ifadelerden her biri Dupuit-Forchheimer varsayımlarına dayandırılarak yapılmıştır

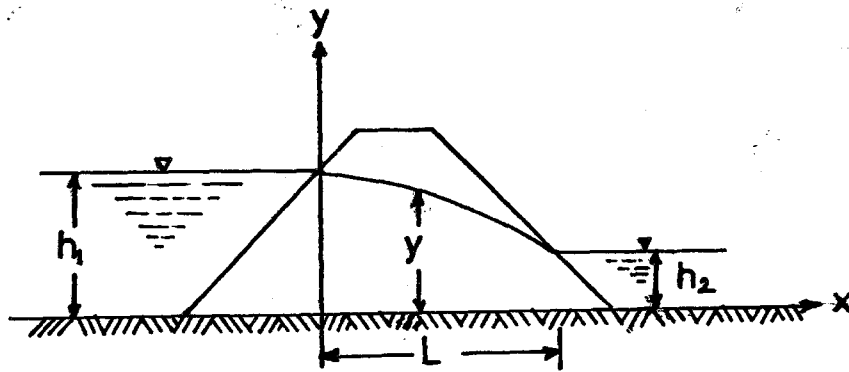
(2). Bu yöntemlerden başlıca dört tanesi şunlardır:

- 1 - Dupuit çözümü,
- 2 - Schaffernak ve Van Iterson çözümü,
- 3 - L. Casagrande çözümü,
- 4 - Pavlovsky çözümü.

2.1.1. Dupuit Çözümü

Şekil 1'deki bendin herhangi bir düşey kesitinden sızmayı bulmak için Darcy yasası uyarınca aşağıdaki eşitlik verilmektedir:

$$q = K (h_1^2 - h_2^2) / 2.L$$



Şekil 1. Dupuit Çözümü için kullanılan şekil

Eşitlikteki simgelerin anlamları şöyledir:

q : birim genişlikten sızarak kaybolan su miktarı ($L^3 T^{-1}$),

K : hidrolik iletkenlik ($L T^{-1}$),

h_1 : membadaki su yükü (L),

h_2 : mansaptaki su yükü (L),

L : sızma boyu (L).

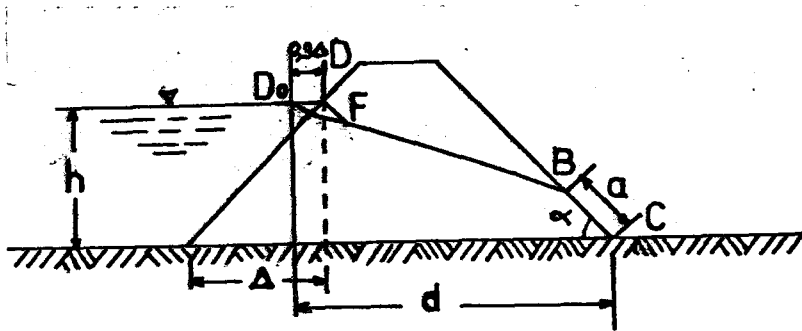
Bu eşitlik serbest yüzeyin parabolik bir biçime sahip olduğunu gösterir. Serbest su yüzeyi genellikle Dupuit Parabolü olarak bilinir (2).

2.1.2. Schaffernak ve Van Iterson Çözümü

Sızma yüzeyinin hesabı için geliştirilen ilk yaklaşık metot olup 1916'da Schaffernak ve Van Iterson tarafından geliştirilmiştir.

Şekil 2'deki gibi mansap su yükü bulunmayan bent gövdesinden birim alandan sızan su miktarının bulunmasında şu eşitlik kullanılmıştır (2):

$$q = k.a.\sin\alpha.\tan\alpha$$



Şekil 2. Schaffernak ve Van Iterson Çözümü için kullanılan şekil

Formüldeki simgelerin anlamları şöyledir:

- q : birim genişlikten sızarak kaybolan su miktarı ($L^3 T^{-1}$),
k : hidrolik iletkenlik ($L T^{-1}$),
a : sızıntı yüzeyinin uzunluğu (L),
 α : mansap tarafındaki açı.

Eşitlikteki a sızıntı yüzeyinin uzunluğu şu eşitlikle hesaplanır;

$$a = \frac{d}{\cos\alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{h^2}{\sin^2\alpha}}$$

eşitlikteki d ise $d = L + 0.3$ 'ya eşittir.

Burada

- d : sızma boyu (L),
h : memba su yükü (L).

2.1.3. L. Casagrande Çözümü

Bu çözümde hidrolik eğimin dy/dx yerine, S serbest yüzey boyunca ölçülen uzunluk olmak üzere, dy/ds 'ye eşit olacağı düşünülerek q şöyle ifade edilmektedir (Şekil 3.):

$$q = K.a.\sin^2\alpha$$

Eşitlikteki simgelerin anlamları şöyledir:

- q : birim genişlikten sızarak kaybolan su miktarı ($L^3 T^{-1}$),
K : hidrolik iletkenlik ($L T^{-1}$),
a : sızıntı yüzeyinin uzunluğu (L),
 α : mansap tarafındaki açı.

Eşitlikteki sızıntı yüzeyinin uzunluğu a, şu şekilde hesaplanır:

$$a = S - \sqrt{S^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$$

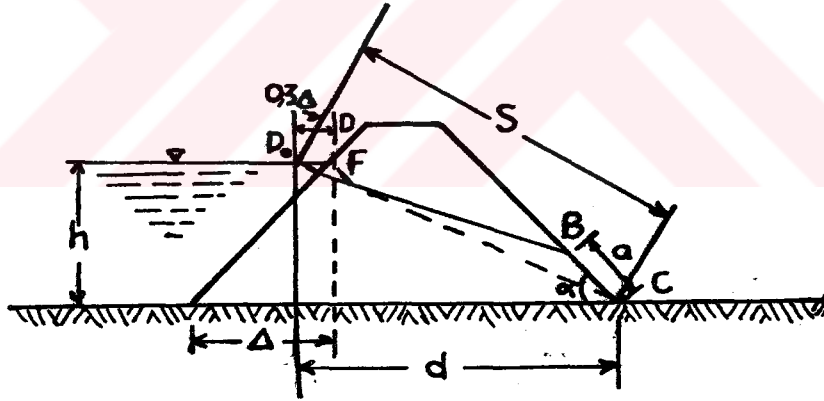
Burada

h : memba su yükü (L).

Serbest yüzey boyunca ölçülen uzunluk olan S 'nin yaklaşık hesabı

$$S = (d^2 + h^2)^{0.5}$$

d sızma boyu ise $d = L + 0.3 \Delta$ 'dir (2).



Şekil 3. L. Casagrande Çözümü için kullanılan şekil

2.1.4. Pavlovsky Çözümü

Pavlovsky geçirimsiz zemin üzerindeki bentlerden sızmanın ölçülmesinde, mansapta su bulunmama durumuna ve mansapta su bulunma durumuna göre ayrı ayrı iki eşitlik çıkarmıştır (Şekil 4.).

2.1.4.1. Mansapta Su Bulunmaması Durumu

Mansapta su bulunmaması durumunda şu eşitlik verilmektedir:

$$q = K. \frac{a_0}{m}$$

Eşitlikteki simgelerin anlamları şöyledir:

q : birim genişlikten sızarak kaybolan su miktarı ($L^3 T^{-1}$),

K : hidrolik iletkenlik ($L T^{-1}$),

m : $\cotg \beta$.

Bu eşitlikteki a_0 için şu eşitlikler yazılmıştır;

$$a_0 = \frac{b}{m_1} + h_d - \sqrt{\left(\frac{b}{m_1} + h_d\right)^2 - h^2}$$

ve

$$a_0 \frac{m}{m_1} = (h_w - h) \ln \frac{h_d}{h_d - h}$$

Eşitliklerdeki simgelerin anlamları şöyledir:

b : kret genişliği (L),

h_d : toprak bentin yüksekliği (L),

h_w : memba su yükü (L),

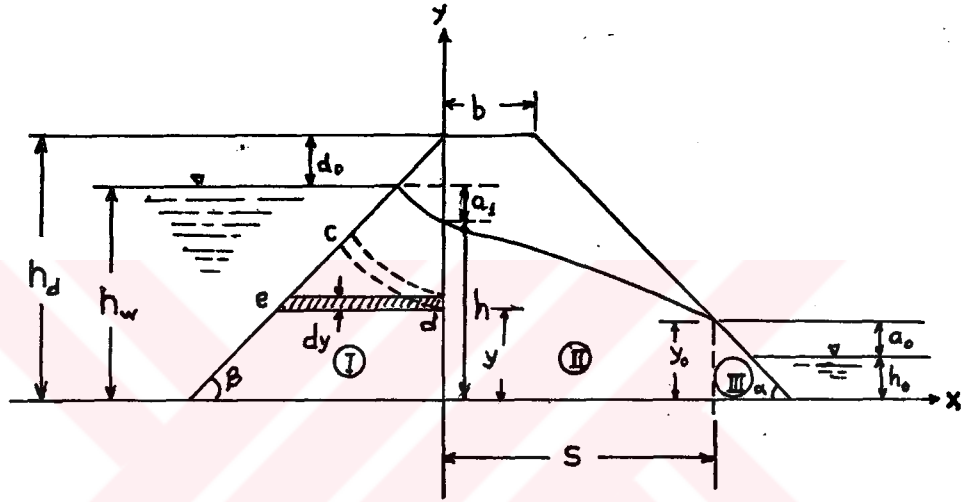
$m_1 = m = \cotg \beta$.

Bu iki eşitlikten a_0 ve h değerlerinin bulunabilmesi için h 'ın keyfi değerlerine göre her iki eşitlikten a_0 değerleri hesaplanır ve daha sonra oluşturulacak grafikteki eğrilerin kesişme noktasına ait a_0 ve h değerleri aranan a_0 ve h değerleridir.

Sızıntı yüzeyi a 'nın değeri ise

$$a = \frac{a_0}{\sin \alpha}$$

olur.



Şekil 4. Pavlovsky Çözümü için kullanılan şekil

2.1.4.2. Mansapta Su Bulunması Durumu

Mansapta su bulunması durumunda;

$$q = K \cdot \frac{h_w - h}{m} \ln \frac{h_d}{h_d - h}$$

eşitliği kullanılır. Eşitlikte kullanılan simgelerin anlamları:

q : birim genişlikten sızarak kaybolan su miktarı ($L^3 T^{-1}$),

K : hidrolik iletkenlik ($L T^{-1}$),

h_w : memba su yükü (L)

hd: toprak bentin yüksekliği (L),

$$m = \cot\beta.$$

Eşitlikteki h için

$$h = \frac{2a_0}{m_1} \cdot \left(1 + \ln \frac{a_0+h_0}{a_0}\right) \cdot \{b+m(h_d-(a_0+h_0))\} + (a_0+h_0)^2 \dots I$$

ve f(a₀) için

$$f(a_0) = \frac{h_w-h}{m} \cdot \ln \frac{h_d}{h_d-h} \cdot \frac{a_0}{m_1} \cdot \left(1 + \ln \frac{a_0+h_0}{a_0}\right) = 0 \dots II$$

eşitlikleri yazılır.

Burada

h₀: mansaptaki su yükü,

b : kret genişliği,

$$m_1 = m = \cot\beta.$$

Eşitlik I'de a₀'ın uygun keyfi değerlerine göre bulunacak değerlerin Eşitlik II de yerlerine konması sonucunda sına-ma-yanılma yoluyla veya a₀'a karşı f(a₀) değerlerinin işlenmesi ile bir grafik oluşturularak çözümü sağlayan a₀ değeri saptanır (2).

2.2. Gözenekli Ortamda Su Hareketi

Bir dolgu barajın gövdesinden ve temelinden sızan su miktarı ve bu suyun oluşturduğu basınç dağılımı gözenekli ortamdaki akım teorisi kullanılarak açıklanabilir.

Gözenekli ortamdaki küçük ve değişken kesitli düzensiz kanallarda yer alan akımın sınır şartları tam olarak belirlenemediğinden teorik olarak incelenmesi çok güçtür (4).

Akışkanlar mekaniğinden bilindiği üzere sıkıştırılamaz sıvıların kararlı akışları için Bernoulli eşitliği;

$$\frac{P}{\gamma_w} + z + \frac{v^2}{2g} = \text{Sabit} = h$$

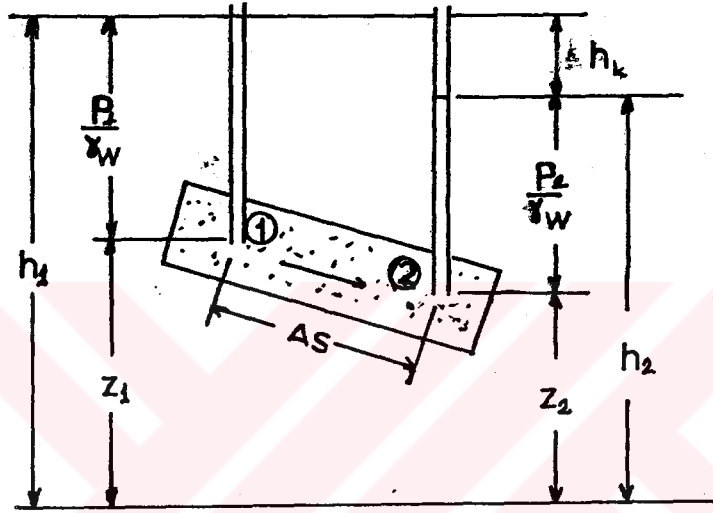
burada P/γ basınç yüksekliği, z konum yüksekliği ve $v^2/2g$ hız yüksekliği, h toplam enerji yüksekliğidir. Zeminlerde akış hızı çok küçük olduğundan $v^2/2g$ hız yüksekliği ihmal edilebilir. Bununla birlikte geometrik yükseklik z ve basınç yüksekliği P/γ önemli olup, her ikisi birlikte toplam basınç yükünü oluştururlar.

2.3. Darcy Yasası

Rasyonel sızma analizi için ilk temel kuram 1856'da Fransız hidrolıkçisi Henry Darcy tarafından geliştirilmiştir. Darcy, kum filtreleri üzerinde yaptığı deneylerin sonuçlarına dayanarak, akış hızının akış yolu boyu ile ters, yük kaybıyla ve K ile gösterilen bir katsayıyla doğru orantılı olduğu sonucuna varmıştır (2,5).

Darcy yasası diye bilinen bu bağıntı gözenekli ortamdaki akım konusundaki bilgilerin temelini teşkil eder. Darcy yasası

Şekil 5'teki gibi bir düzenekte yapılacak deneylerle incelenebilir.



Şekil 5. Darcy'nin yaptığı deney düzeneği

Darcy deneyleri sonunda Q ile yük kaybı, h_k arasında doğru ve Q ile akım yolu arasında ters bir orantı olduğunu tesbit etmiştir. Bu ifade K orantı katsayısı kullanılarak

$$Q = K.A. \frac{h_k}{L}$$

ve basitçe,

$$v = \frac{Q}{A} = K. \frac{h_k}{L} = K.i$$

şeklinde yazılabilir.

Kullanılan K orantı katsayısı, hidrolik iletkenlik diye adlandırılır. Bu değer, birim hidrolik eğim altında zeminin birim alanından geçen akım miktarı olarak tanımlanır.

Hidrolik iletkenlik hız boyutunda (LT^{-1}) olup zeminin porozitesine, sıvının yoğunluk ve viskozitesine bağlıdır. A kum dolu silindirin kesit alanı olduğuna göre Q/A şeklinde tanımlanan hız gerçek hız olmayıp temsili bir hızdır ve Darcy hızı (sızma hızı) veya özgül debi diye adlandırılır.

2.4. Model Çalışmalarının Önemi

Yeraltı suyu akışında birçok problemlerin analitik çözümü zor olmaktadır. Özellikle sınır koşullarının karmaşık olduğu durumlarda model veya analog çalışmalarına baş vurulur.

2.5. Modeller ve Analoglar

Gerçekte karşılaşılan durumun basite indirgenmiş şekli "prototip" diye adlandırılır. "Model" terimi ile de prototipin belli bir ölçeğe göre boyutları değiştirilmiş (genellikle küçültülmüş) benzeri kastedilmiştir (1).

Uygulamada "prototip-model ilişkisi" dendiğinde akla benzer iki sistem arasındaki ilişki gelir. "Prototip-Analog ilişkisi" terimi ile de farklı fiziksel sistemler arasındaki ilişki anımsanmaktadır; örneğin gözenekli ortamda belli koşullar altında elektriğin akışı gibi. Sözü edilen "ilişki" ise, fiziksel açıdan birbirinden tümü ile farklı olan iki olayın tabii oldukları diferansiyel ifadelerin birbirinin benzeri oluşundan kaynaklanmaktadır.

Hele-Shaw Analog Modelleri de prototiple bu tür bir ilişkiye sahiptir; yani gözenekli ortam içerisindeki akışla birbirine yakın olarak yerleştirilmiş paralel iki plaka

arasındaki viskoz bir sıvının akışı aynı kısmi diferansiyel denklemlere tâbidir (2).

Hele-Shaw analogu suyun gözenekli topraklarda iki boyutlu laminar akışını göstermede geniş bir şekilde kullanılmıştır (5).

İncelenecek problemin çeşidine göre Hele-Shaw modellerinin düşey veya yatay konumlu olacak biçimde hazırlanması mümkündür (6).

2.5.1. Modeller

Model ile prototip arasındaki ilişki birtakım "boyutsuz" ifadeler yardımıyla kurulmaktadır. Bu boyutsuz ifadeler ister prototip ister model için olsun aynı "sayısal" değere sahiptir (5). Ele alınan problemin çözümünde izlenen yaklaşım biçimi gözönünde bulundurulmuş değişkenin veya diferansiyel eşitliklerin "boyutsuz kılınması" yöntemidir.

2.5.1.1. Modellerin Oluşturulma İlkeleri

Prototip ile model arasında kurulacak bağlantı için "benzerlik ilkeleri"nden yararlanılır. Prototipin sahip olduğu tüm tepkisel niteliklerin modelde yansıtılabilmesi için gerekli koşullar "benzerlik ilkeleri" diye adlandırılırlar. Çeşitli benzerlik ilkeleri bulunmakla birlikte "geometrik benzerlik", "kinematik benzerlik" ve "dinamik benzerlik" olmak üzere başlıca üç grup altında incelenebilir.

Geometrik Benzerlik :Gözönüne alınan iki sistemde

birbirine karşılık tüm uzunlukların arasındaki oranların aynı olmasının gerektiği geometrik benzerlik olarak adlandırılır.

Kinematik Benzerlik : Her iki sisteme ait akım çizgilerinin ve eş potansiyel çizgilerinin, yani akım ağlarının geometrik bakımdan benzer olması kinematik benzerlik diye nitelendirilir.

Dinamik Benzerlik : Dinamik bakımdan benzer olan sistemlerde her iki sistemin homolog noktalarında, homolog zamanlarda akışkan kütesinin homolog elemanları üzerine etkiyen kuvvetlerin oranlarının aynı olması gerekir. Buna ek olarak geometrik ve kinematik benzerlik de bulunmalıdır.

Burada sözü edilen kuvvetler başlıca yerçekimi, eylemsizlik ve sürtünme olup, basınç ve yüzey gerilimi de bunlara katılabilir; basınç kuvveti diğer kuvvetlerin bir sonucu olduğundan ayrı bir kuvvet olarak düşünülmez.

2.5.2. Analoglar

Analoglar ile prototiplerin fiziksel bakımdan aynı boyutlara sahip olmasının zorunluluğu yoktur. Ancak, bir analogun simgelemekte olduğu prototiple aynı fiziksel boyutlara sahip olması da olağandır; örneğin gözenekli ortam şeklindeki bir prototipin bir kum tankı ile temsil edilmesi gibi. Bununla birlikte böyle bir kum tankı model veya analogdan ziyade uygulamada karşılaşılan sorunun laboratuvar- da bir yinelenme biçimi olarak düşünülebilir. Analog terimi ile asıl kast edilen birbirinden tümüyle farklı fiziksel

kategorilere ait sistemler arasındaki benzeşime dayanan modellerdir (1).

İki sistem (prototip ve analog) arasındaki analoginin asıl nedeni iki sistem için karakteristik eşitliklerin (maddenin ve ısı enerjisinin sakınımı ilkesi, Darcy yasası, Ohm kanununun vs. gibi) sistemlerde gerçekleşmekte olan olayların tâbi olduğu aynı fiziksel ilkeleri temsil etmektedir.

Böylece gözenekli ortamdaki akışı en genel biçimiyle temsil etmekte olan Laplace denklemi ile iletkenler içerisinde elektrik ve ısı akışını simgeleyen denklemlerin yukarıda açıklandığı üzere temelde aynı olan fiziksel ilkelere dayanmaları sayesinde yeraltı suyu akışı ile elektrik ve ısı iletimi arasında analogi kurmak mümkündür (3).

2.5.3. Analog Çeşitleri

Yeraltı suyu akışına ilişkin problemlerin çözümünde yararlanılan analoglar aşağıdaki gibi başlıca dört grup altında incelenebilir:

- 1 - Viskoz sıvı analogları,
- 2 - Elektriksel analoglar,
- 3 - Gergin zar analogları,
- 4 - Kum tankları.

2.5.3.1. Viskoz Sıvı Analogları

Viskoz sıvı analoglarının en yaygın olanı Hele-Shaw ya da paralel plaka modelidir. Bu grupta incelenecek bir diğer

tip ise cam kürecikler modelidir.

Viskoz sıvı analogları, iki boyutlu yeraltı suyu akışına ilişkin problemlerin çözümü için uygun olup, dayandığı ilke gözenekli ortamda doygun akışla ilgili diferansiyel eşitliklerin aralarında dar (genellikle 0,8-3,5 mm kadar) bir açıklık kalacak biçimde paralel olarak yerleştirilmiş iki levha arasında viskoz bir sıvının akışıyla ilgili diferansiyel eşitliklere benzer oluşudur. Söz konusu levhalardan hiç olmazsa birinin saydam olması gerekir. Plakalar arasında akıtılan sıvı da su, yağ, gliserin vs. gibi viskoz bir sıvıdır. Eğer akış bölgesinde hidrolik iletkenlikleri farklı tabakalar veya kısımlar varsa bunlar da modelde daha dar veya geniş aralıklarla temsil edilir. Akım çizgilerinin saptanmasında ise renkli izleyicilerden yararlanılır (1,5).

Cam kürecikler viskoz sıvı yönteminde de yine iki paralel levha arasında, viskoz bir sıvının akıtılması söz konusudur. Levha olarak pleksiglas, viskoz sıvı olarak da gliserin kullanılmaktadır. Yalnız burada levhalar arasına gözenekli ortamı temsil etmek üzere cam kürecikler doldurulmaktadır. Levhalar arasındaki uzaklık 2 cm kadardır. Cam küreciklerin uygun seçimiyle istenilen gözeneklikteki ortam elde edilebilir. Ayrıca, değişik çaptaki küreciklerle de hidrolik iletkenlikleri farklı tabakalar temsil edilebilir (1).

2.5.3.2. Elektriksel Analoglar

Bu yöntemin esası elektrik akımı ile gözenekli ortam içerisindeki akış arasındaki analogidir. Elektriksel analogi

yöntemi toprak içerisindeki akışla ilgili problemlerin deneysel yoldan çözümünü elde etmek amacıyla kullanılmakta olup, iki veya üç boyutlu akış problemlerine uygulanabilmektedir. "Sürekli iletken Ortam", "Parçalı iletken Ortam" ve "İyon Hareketi" analogları olmak üzere başlıca üç tip elektriksel analogtan söz edilebilir (1,5).

Elektriksel analogların dayandığı ilke, homojen sıvıların gözenekli ortam içerisindeki akışlarını belirleyen diferansiyel eşitliklerle, elektriğin bir iletken içerisinde akımını belirleyen diferansiyel eşitliklere benzer oluşudur.

2.5.3.3. Gergin Zar Analogları

Uniform bir biçimde gerilmiş olan bir zarın bir noktasında oluşturulan sehimin etkisi zar boyunca Laplace Denklemi'ne benzer bir eşitlik uyarınca yayılmaktadır. Böylece söz konusu durum ile yeraltı suyu akışı arasında bir analogi kurmak mümkün olmaktadır (1,5).

2.5.3.4. Kum Tankları

Yeraltı suyu akış problemlerinin çözümünde kullanılan ilk modeller kum tanklarıdır. Kum tankları su geçirmez malzemedен yapılmış kutular olup, gözenekli ortamı temsil etmek üzere içlerine kum doldurulmaktadır. Hidrolik iletkenlikleri farklı tabakalar değişik kum katmanları kullanılarak temsil edilebilir (1,5).

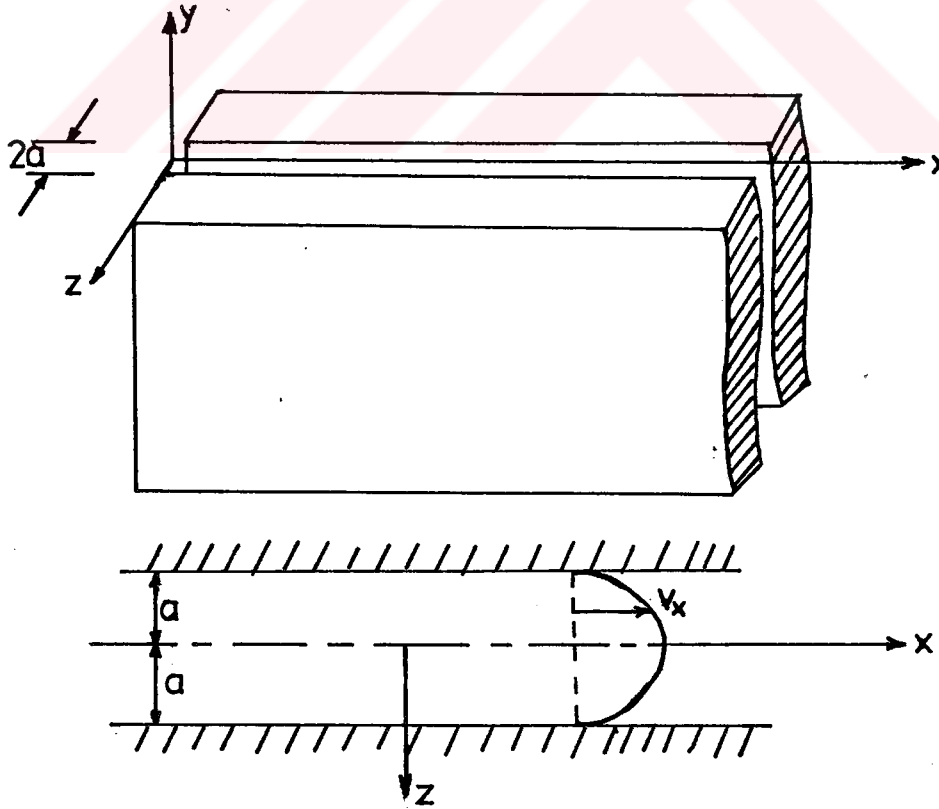
Modelin bir tarafının saydam bir malzemedен yapılma olanağı varsa, "renkli izleyiciler" kullanılarak akım

çizgileri saptanabilir. Denemelerde kullanılan sıvı sudur. Eğer model küçükse kılcal yükselmenin de uygun bir şekilde hesaba katılması gerekmektedir.

2.6. Hele-Shaw Modellerinin Kuramsal Esasları

Hele-Shaw modeli ile elde edilen akım çizgilerinin iki boyutlu potansiyel akımı temsil ettiği matematik esaslardan faydalanılarak ispatlanmıştır (2,7).

Şekil 6'da gösterildiği gibi aralarında $2a$ kadar bir açıklık bulunan paralel konumlu iki plaka arasından bir sıvının akma durumu gözönüne alındığında, akış iki boyutlu olacağından z eksenine doğrultusundaki hız sıfır olacaktır; yani $V_z=0$



Şekil 6. Paralel plakalar arasından akış

Çok yavaş akımlarda veya yüksek viskozite durumlarında viskoz kuvvetler eylemsizlik kuvvetlerine oranla çok büyük olduğundan viskoz kuvvetler yanında hidrodinamik türev terimlerinin ihmal edilmesi mümkündür. Böylece etkiyen kütlelesel kuvvet yalnızca yerçekimi olacak ve bu kuvvetin yönü gözönüne alındığında da $F_x=0$, $F_y=-g$ ve $F_z=0$ yazılabilecektir. Sıvı, plakalar yüzeyine yapışacağından plakalar yüzeyinde hız sıfır olacaktır; dolayısıyla z yönündeki hız gradyanı x ve y yönündeki hız gradyanlarına bakışla çok daha büyük olacağından z yönündeki türevler yanında, $\frac{\partial v_x}{\partial x}$, $\frac{\partial v_x}{\partial y}$, $\frac{\partial v_y}{\partial x}$, $\frac{\partial v_y}{\partial y}$ terimleri ve bunların ikinci türevleri ihmal edilebilir. Böylece x, y ve z yönündeki hızların aşağıdaki şekilde ifadesi mümkündür;

$$-g \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} = 0 \quad (1a)$$

$$-g \frac{\partial h}{\partial y} + v \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (1c)$$

Eşitlik 1c'den z yönünde h'da herhangi bir değişimin söz konusu olmadığı anlaşılmaktadır; yani toplam yük yalnızca x ve y'ye bağlıdır.

Eşitlik 1a ve 1b'nin $z = 0$ için $\frac{\partial v_x}{\partial z} = \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0$ sınır koşullarına göre entegre edilmesiyle aşağıdaki ilişkiler elde edilir;

$$g z \frac{\partial h}{\partial x} = v \frac{\partial v_x}{\partial z} = 0 \quad (2a)$$

$$g z \frac{\partial h}{\partial y} = v \frac{\partial v_y}{\partial z} = 0 \quad (2b)$$

Bu ifadelerin z'ye göre bir kez daha entegre edilmesiyle
($z = \pm a$ için $u = v = 0$ 'dır)

$$v_x = -g \frac{z^2 - a^2}{2v} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3a)$$

$$v_y = -g \frac{z^2 - a^2}{2v} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3b)$$

Bu son iki ifadeden levhalar arasındaki hız dağılımının parabolik olduğu anlaşılmaktadır. Ortalama hız ise (2a'ya bölmek suretiyle)

$$v_x = -\frac{1}{2a} \int_{-a}^a g \frac{z^2 - a^2}{2v} dz \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{a^2 g}{3v} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4a)$$

$$v_y = -\frac{1}{2a} \int_{-a}^a g \frac{z^2 - a^2}{2v} dz \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{a^2 g}{3v} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (4b)$$

Eşitlik 4a ve 4b

$$K_m = \frac{a^2 g}{3v}$$

terimi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir (7);

$$v_x = -K_m \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5a)$$

$$v_y = -K_m \frac{\partial h}{\partial y} \quad (5b)$$

Bu son iki eşitliğin, genel biçimiyle

$$v = -K \frac{dh}{ds}$$

şeklinde gösterilen Darcy Yasası ile karşılaştırılması analogiyi ortaya koyacaktır.

2.6.1. Navier-Stokes Denklemleri

Gözenekli ortamdaki doymun akış Darcy Yasası ve Laplace Denklemi ile ifade edilmektedir. Sözü edilen bu eşitlikler ile paralel konumlu iki plaka arasındaki açıklıktan viskoz bir sıvı akışı arasında aşağıda açıklanacağı biçimde bir analogi vardır (1).

Gerçek akışkanların (viskoz ve sıkışabilen akışkanlar) hareketini belirleyen genel ifade "Navier-Stokes" denklemi olup, şu şekilde yazılmaktadır.

$$\frac{Dv_x}{Dt} = F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 v_x$$

$$\frac{Dv_y}{Dt} = F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v_y$$

$$\frac{Dv_z}{Dt} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 v_z$$

Bu ifadelerdeki terimlerin anlamları şöyledir;

$D()/Dt$: hidrodinamik türev; yani v_x 'x yönündeki hızı göstermek üzere

$$\frac{Dv_x}{Dt} = v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_x}{\partial t}$$

şeklinde;

$F()$: sıvı üzerine birim kütleye düşen dış kuvvet

bileşeni; yani x yönünde

$$F_x = - \frac{\partial}{\partial x} (g H) ; H = h - \frac{p}{\rho g}$$

şeklinde;

ν : kinematik viskozite;

∇^2 : "nabla" kare; yani x yönünde

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}$$

şeklinde ifade edilen "Laplacien Operatörü"nü göstermektedir.

2.6.2. Ölçeklerin Belirlenmesi

Aşağıdaki ifadelerde prototip için "p" alt simgesi, model için "m", model/prototip oranı içinde "r" alt simgeleri kullanılmıştır (1).

Geçirgenlik Oranı

$$K_r = \frac{K_m}{K_p} = \frac{g a^2 / (3 \nu_m)}{K}$$

olur; $\nu = \mu/\rho$ olduğu düşünülerek geçirgenlik oranları için

$$K_r = \frac{\rho_m g a^2}{3 \mu_m K}$$

ifadesi yazılabilir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Model ve Çalışma İlkeleri

3.1.1. Model

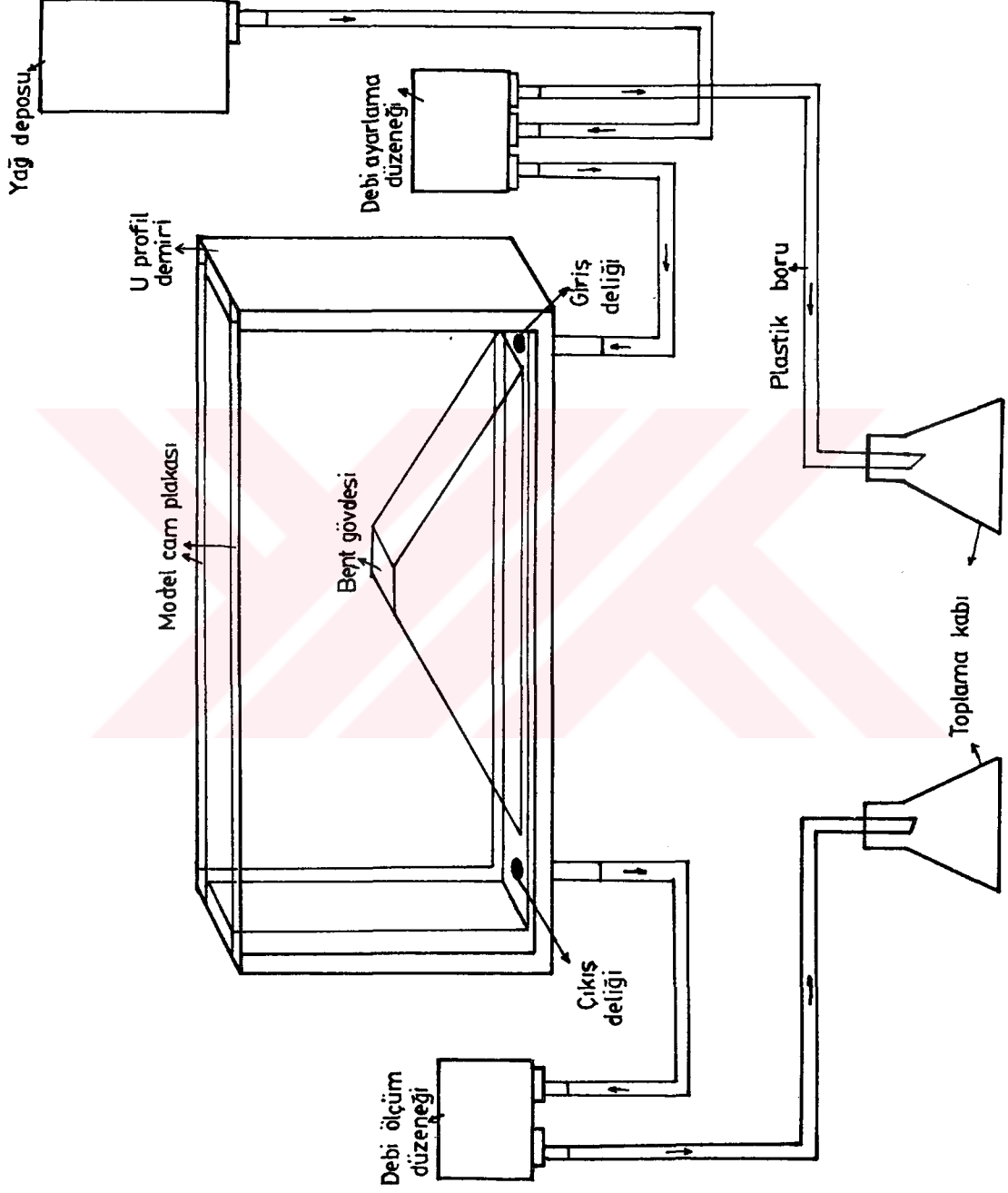
Araştırmada kullanılmak üzere Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü laboratuvarlarında bir Hele-Shaw Viskoz Sıvı Modeli hazırlanmıştır. Modelde iki cam plaka, aralarına camdam yapılan uygun bent gövdelerinin yerleştirilmesine imkân verecek şekilde birbirlerine paralel olarak yerleştirilmiştir.

Cam levhalar Şekil 7a,7b,7c'de gösterildiği gibi düşey konumdadır. Cam levhaların boyları 70 cm, yükseklikleri 50 cm ve kalınlıkları ise 0,8 cm'dir. Cam levhalar arasında 3 cm açıklık kalacak şekilde yerleştirilmiştir.

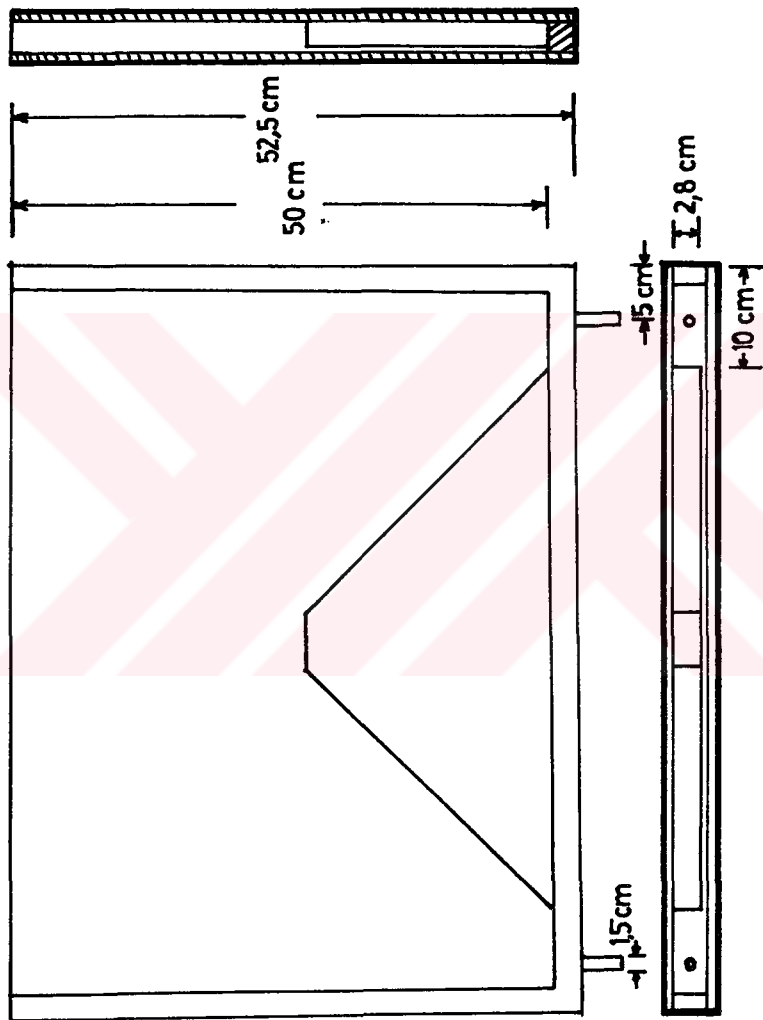
Model U profil demiri üzerine yerleştirilmiştir. Modelde model sıvısı olarak kullanılan motor yağının, modele giriş ve çıkışını sağlamak amacı ile U profil demirinden yapılan çerçevenin altlarına iç çapları 1,3 cm olan ve uç kısımlarından 5 cm içeride iki delik açılmıştır.

Modelde sızdırmazlığı sağlamak için, yağ contalarından ve çekomastikten yararlanılmıştır. Levha halinde olan yağ contaları uygun ölçülerde şeritler halinde kesilerek U profil demirinden yapılan çerçeve ile cam plakalar arasına yerleştirilip çekomastikle yapıştırılarak sızdırmazlık sağlanmıştır.

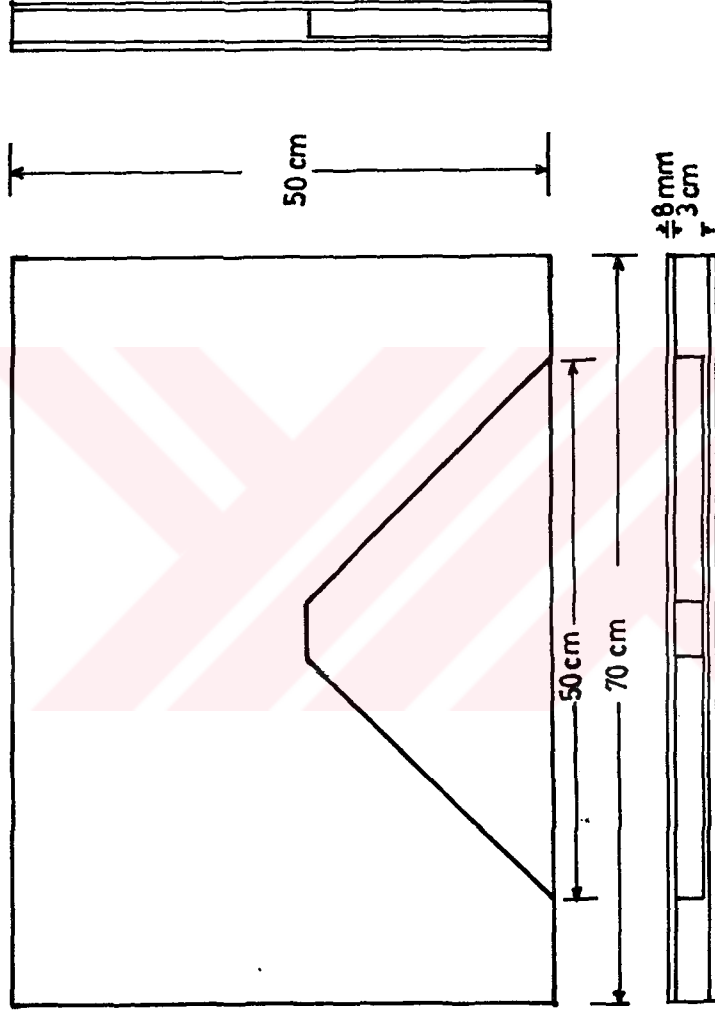
Debi ayarlama ve depo düzenekleri modelin giriş tarafına, debi ölçüm ve toplama düzenekleri de çıkış tarafına yerleştirilmiştir.



Şekil 7a. Modelin şematik görünüşü



Sekil 7b. Modelin kesit resmi



Sekil 7c. Model cam plakalarının kesit resmi

Modelde, değişik şevlerdeki bent gövdelerini temsil etmek üzere camdan yapılan bent gövdeleri kullanılmıştır. Bent gövdeleri cam plaka ile aralarında 2 mm açıklık kalacak şekilde denemelerde modele yerleştirilmiştir.

Depo ile debi ayarlama düzenekleri arasında, debi ayarlama düzeneği ile model arasında ve model ile ölçüm düzeneği arasında yağın taşınması için plastik borular kullanılmıştır. Modelde viskoz sıvı olarak motor yağı (20 °C'de 3,311 cm/sn kinematik viskoziteye sahip) kullanılmıştır.

Depodan gelen yağ önce, modelin giriş kısmındaki yağ seviyesini belli bir değerde tutmaya yarayan seviye ayarlayıcı kaba, oradan da modelin alt kısmında bulunan giriş deliğinden model içine iletilir. Giriş deliğinden modele giren yağ, modelin giriş kısmında, belirlenen yüksekliğe geldikten sonra bent gövdesi ile modelin cam plakası arasındaki açıklığı (2 mm) izleyerek modelin diğer tarafında bulunan çıkış deliğinden belirlenen durumlara göre ölçüm kabına alınır.

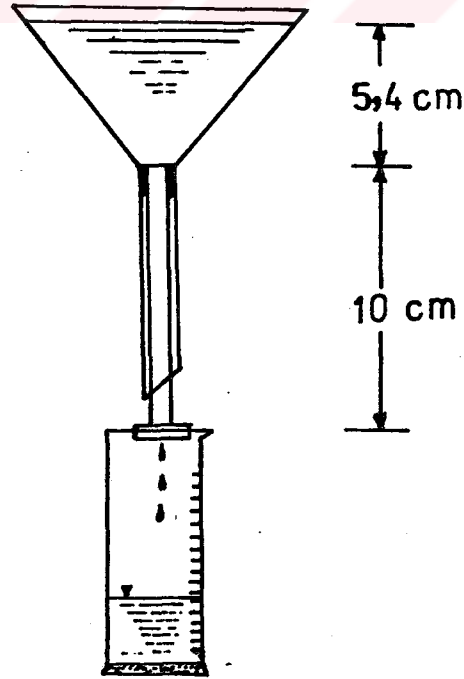
3.2. METOT

3.2.1. Viskozitenin Belirlenmesi

Viskozite, içsel sürtünme sebebi ile sıvıların herhangi bir deformasyona karşı göstermiş oldukları dirençtir (9). Viskozite ölçümü için değişik tipte birçok viskozimetre geliştirilmiş ise de bunların büyük bir çoğunluğu aynı ilkeye göre, yani Poiseuille Yasası'na göre çalışmaktadır (1,10). Buda, belli hacimdeki sıvının boyutları belli kılcal bir

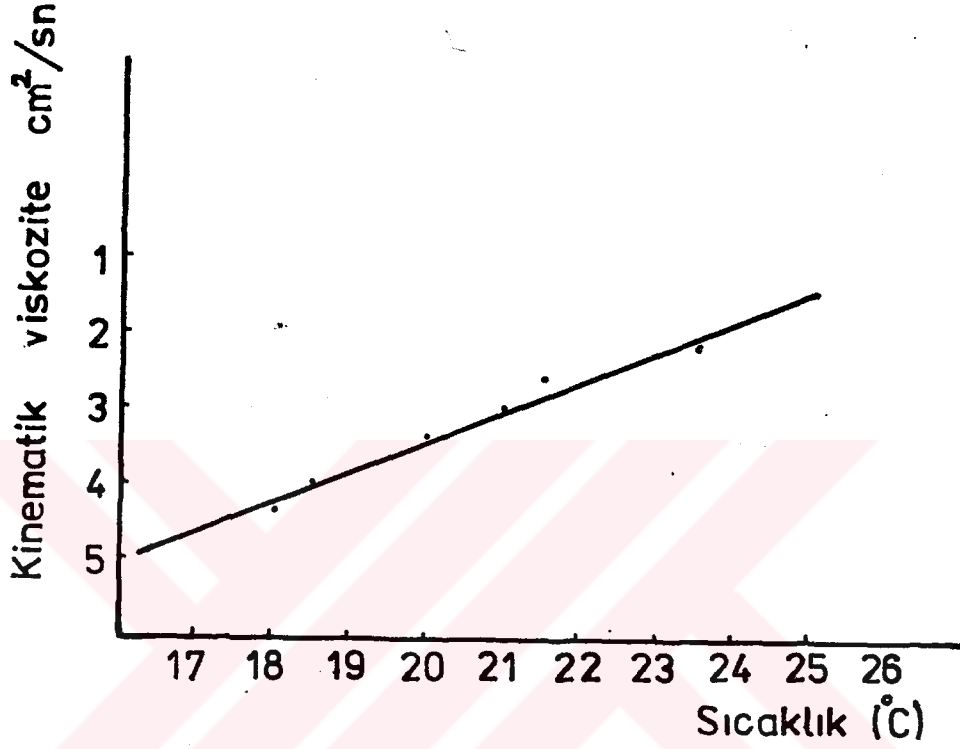
borudan geçmesi için gereken sürenin belirlenmesi esasına göre hazırlanmıştır.

Modelde kullanılan yağın viskozitesinin tayininde Şekil 8 'de görüldüğü gibi hazırlanmış bir düzenek kullanılmıştır. Düzenek bir huninin alt ucuna yerleştirilmiş 2,7 mm iç çapında ve 10 cm uzunluğundaki bir cam boruyla bunun altında yer alan mezürden ibarettir. Kılcal boru huni borusu içerisine çevresinden bir sızma oluşmayacak biçimde lastik conta ile tutturulmuştur. Huni içindeki yağ seviyesi 5,4 cm'de sabit tutularak belli sürelerde kılcal borudan geçen yağ, mezürde toplanarak ölçülmüştür. Ölçüm sırasında cam borunun çıkış kısmında yağı, çekme etkisinden kurtarıp normal akışını sağlamak için bir temas yüzeyi oluşturulmuştur.



Şekil 8. Viskozite ölçüm cihazı

Ölçümler sonucunda Şekil 9'daki viskozite-sıcaklık grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 9. Viskozite-sıcaklık grafiği

Yapılan ölçüm sıcaklıkları ve hesaplanan viskozite değerleri şunlardır;

Sıcaklık (t, °C)	Kinematik viskozite (ν , cm²/sn)
18,0	4,295
18,5	3,961
19,4	3,701
20,0	3,311
21,0	2,977
21,5	2,528
23,5	2,128

Viskozitenin hesaplanmasında aşağıdaki formül kullanılmıştır (1,10).

$$\nu = \frac{i.g.r^2}{8.Q} . A$$

Formüldeki simgelerin anlamları şöyledir;

- ν : modelde kullanılan yağın kinematik viskozitesi
($L^2 T^{-1}$)
- i : hidrolik eğim ($L L^{-1}$)
- g : yerçekim ivmesi ($L T^{-2}$)
- r : kılcal borunun iç yarıçapı (L)
- A : kılcal borunun kesit alanı (L^2)
- Q : belirli zamanda kılcal borudan geçen yağ miktarı
($L^3 T^{-1}$)

3.2.2. Değişik Bent Gövdelerinin Seçimi

Modelde bent gövdesi olarak camdan hazırlanmış değişik bent gövdeleri kullanılmıştır. Bent gövdeleri 11 farklı şev için hazırlanmıştır. Bent gövdelerinde her şev için taban uzunluğu 50 cm ve kret genişliği 5 cm olarak alınmıştır. 50 cm taban uzunluğu ve 5 cm kret genişliğide seçilen şevler için bent yükseklikleri aşağıdaki değerleri almaktadır.

Çizelge 1. Şevlere göre bent yükseklikleri

Memba şevi	Mansap şevi	Bent yüksekliği (ha), cm
1:1	1:1	22,50
1:1,5	1:1,5	18,00
1:2	1:2	11,25
1:1	1:1,5	18,00
1:1,5	1:1	18,00
1:1	1:2	15,00
1:2	1:1	15,00
1:1,5	1:2	12,86
1:2	1:1,5	12,86
1:1,5	1:2,5	11,25
1:2,5	1:1,5	11,25

Bent gövdelerinin hazırlandığı camların kalınlıkları 5 mm'dir.

3.2.3. Değişik Yağ Seviyelerinin Seçimi

Model üzerinde yapılan ölçümlerde her şev için, memba tarafında üç yağ seviyesi ve memba tarafında seçilen her yağ seviyesi için de mansap tarafında üç ayrı yağ seviyesi seçilmiştir. Seçilen her yağ seviyesi için sıcaklık ve debi ölçümleri yapılmıştır.

Değişik şevler için memba ve mansap tarafında ölçüm yapılan yağ seviyeleri Çizelge 2'de verilmiştir.

3.2.4. Sistemin Çalıştırılması

İlk önce depoya viskozitesi daha önceden belirlenmiş motor yağı konulmuştur. Yağ depodan seviye ayarlayıcı kaba, oradan da içerisine bent gövdesi yerleştiren modele gönderilmiştir. Modelde kullanılan cam plaka ile bent gövdelerinin aralarında 2 mm'lik açıklık bırakılmıştır. Bu açıklıktan sızan yağ modelin çıkış kısmında bir mezür yardımıyla ölçülmüştür.

Kılcal aralığın geçirgenlik değeri viskozite ile doğrudan ilgili olduğundan modelin hem girişinde hem de çıkışında sıcaklık ölçümleri yapılmıştır.

3.2.5. Viskozite ve Sıcaklık Düzeltmesi

Ölçümler laboratuvar şartlarında farklı birkaç sıcaklıkta yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda yapılan bu ölçümler daha sonra 22 °C 'taki viskozite değeri esas alınarak düzeltilmiştir. 22 °C 'taki kinematik viskozite 2,72 cm²/sn olarak bulunmuştur.

olarak bulunmuştur.

Çizelge 2. Şevler için seçilen yağ seviyeleri

Şev	Memba tarafındaki yağ seviyesi, (cm)	Mansap tarafındaki yağ seviyeleri, (cm)
1:1	20	0 7 10
	15	0 5 7
	5	0 2 3
1:1,5	14	0 5 7
	10	0 4 7
	5	0 2 3
1:2	10	0 4 7
	7	0 2 4
	5	0 2 3
1:1/1:1,5	15	0 4 7
	10	0 4 7
	5	0 2 3
1:1,5/1:1	15	0 4 7
	10	0 4 7
	5	0 2 3
1:1/1:2	14	0 4 7
	10	0 4 7
	5	0 2 3
1:2/1:1	14	0 4 7
	10	0 4 7
	5	0 2 3
1:1,5/1:2	10	0 4 7
	7	0 2 4
	5	0 2 3
1:2/1:1,5	10	0 4 7
	7	0 2 4
	5	0 2 3
1:1,5/1:2,5	10	0 4 7
	7	0 2 4
	5	0 2 3
1:2,5/1:1,5	10	0 4 7
	7	0 2 4
	5	0 2 3

3.2.6. Ölçümlerin Yapılması

Depodan seviye ayarlayıcı kaba, oradan da modelin alt kısmından model içerisine gönderilen yağ modelin memba tarafında ölçüm yapılacak yüksekliklerde ayarlanmıştır. Memba tarafında her şev için üç farklı yükseklikte ölçüm yapılmıştır. Memba tarafındaki her bir yükseklik için mansap tarafında da üç farklı yükseklik seçilmiştir. Modelde ölçümler için 100 ml ve 50 ml'lik mezürler kullanılmıştır. Ölçümlerde yağ miktarı ile birlikte sıcaklıklar da ölçülmüştür.

Model üzerinde bütün bent gövdelerinde 2 mm açıklıkta yapılan ölçümlerde belirli zamanlardaki boşalım miktarları ölçülmüştür ve q (cm^3/sn) olarak verilmiştir.

4. DENEME SONUÇLARI

4.1. Denemelerden Elde Edilen Sonuçlar

Farklı memba yüklerinde ve her memba yüküne karşılık gelen mansap yüklerinde yapılan ölçümlerden aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

Çizelge 3. Modelden ölçülen debi değerleri.

Şev	Memba yükü (h_1), cm	Mansap yükü (h_2), cm	Modelden ölçülen debi q , (cm^3/sn)	
1:1	20	0	1,4775	
		7	1,2863	
		10	1,2671	
	15	0	0,7469	
		5	0,6519	
		7	0,5919	
	5	0	0,0626	
		2	0,0532	
		3	0,0406	
	1:1,5	14	0	0,7986
			5	0,7180
			7	0,5760
10		0	0,3301	
		4	0,2820	
		7	0,1719	
5		0	0,0699	
		2	0,0587	
		3	0,0443	
1:2		10	0	0,2676
			4	0,2482
			7	0,1472
	7	0	0,1171	
		2	0,1075	
		4	0,0744	
	5	0	0,0540	
		2	0,0449	
		3	0,0343	

1:1/1:1,5	15	0	0,6883
		4	0,6135
		7	0,6200
	10	0	0,2869
		4	0,2364
		7	0,1496
	5	0	0,0633
		2	0,0548
		3	0,0412
1:1,5/1:1	15	0	0,7806
		4	0,6911
		7	0,6224
	10	0	0,2881
		4	0,2630
		7	0,1356
	5	0	0,0675
		2	0,0554
		3	0,0434
1:1/1:2	14	0	0,6873
		4	0,5648
		7	0,4867
	10	0	0,2948
		4	0,2408
		7	0,1476
	5	0	0,0635
		2	0,0511
		3	0,0408
1:2/1:1	14	0	0,8874
		4	0,8099
		7	0,6928
	10	0	0,3423
		4	0,2488
		7	0,1828
	5	0	0,0699
		2	0,0602
		3	0,0447
1:1,5/1:2	10	0	0,3690
		4	0,2775
		7	0,1667
	7	0	0,1427
		2	0,1283
		4	0,0919
	5	0	0,0668
		2	0,0556
		3	0,0424

1:2/1:1,5	10	0	0,3714
		4	0,3075
		7	0,2325
	7	0	0,1592
		2	0,1363
		4	0,0912
	5	0	0,0697
		2	0,0593
		3	0,0469
1:1,5/1:2,5	10	0	0,3579
		4	0,2563
		7	0,1618
	7	0	0,1412
		2	0,1273
		4	0,0906
	5	0	0,0655
		2	0,0549
		3	0,0413
1:2,5/1:1,5	10	0	0,4662
		4	0,3724
		7	0,2338
	7	0	0,1708
		2	0,1557
		4	0,0973
	5	0	0,0753
		2	0,0635
		3	0,0494

4.2. Sonuçların Değerlendirilmesi

Denemede farklı sıcaklıklarda yapılan ölçümler daha sonra 22 °C 'a göre düzeltilmiştir. 22 °C yağ sıcaklığına karşılık gelen viskozite değeri 2,72 cm²/sn olarak viskozite-sıcaklık grafiğinden alınmıştır.

4.2.1. Dupuit Çözümüne Göre Değerlendirme

Memba tarafında seçilen 3 farklı seviye için mansap tarafında seçilmiş 3'er seviyede çözüm yapılmıştır. Yağ sıcaklığının 22 °C 'ta sabitleştirilmesi sebebi ile viskozite

değerinde değişiklik yapılmamıştır. Dolayısıyla eşitlikte bulunan K_m , modelin hidrolik iletkenlik değeri bütün eşitliklerde aynen kullanılmıştır.

$$q = K_m (h_1^2 - h_2^2) / 2.L$$

$$K_m = \frac{g a^2}{3 y}$$

$$K_m = \frac{981 (0,1)^2}{3 \cdot 2,72} = 1,2022 \text{ cm/sn}$$

Çizelge 4. Dupuit çözümünden hesaplanan debi değerleri.

Şev	Memba yükü (h_1), cm	Mansap yükü (h_2), cm	Dupuit çözümünden hesaplanan debi q , (cm^3/sn)
1:1	20	0	1,6029
		7	1,4065
		10	1,2022
	15	0	0,7728
		5	0,6869
		7	0,6045
	5	0	0,0667
		2	0,0561
		3	0,0427
	1:1,5	14	0
5			0,7088
7			0,6093
10		0	0,3434
		4	0,2885
		7	0,1751
5		0	0,0707
		2	0,0594
		3	0,0452
1:2		10	0
	4		0,3366
	7		0,2043
	7	0	0,1636
		2	0,1502
		4	0,1102
	5	0	0,0751
		2	0,0631
		3	0,0481

1:1/1:1,5	15	0	0,7728
		4	0,7178
		7	0,6045
	10	0	0,3006
		4	0,2525
		7	0,1533
	5	0	0,0668
		2	0,0561
		3	0,0427
1:1,5/1:1	15	0	0,9836
		4	0,9136
		7	0,7695
	10	0	0,3434
		4	0,2885
		7	0,1751
	5	0	0,0707
		2	0,0594
		3	0,0453
1:1/1:2	14	0	0,6565
		4	0,6011
		7	0,4909
	10	0	0,6006
		4	0,2525
		7	0,1533
	5	0	0,0668
		2	0,0561
		3	0,0427
1:2/1:1	14	0	1,0711
		4	0,9836
		7	0,8032
	10	0	0,4007
		4	0,3366
		7	0,2044
	5	0	0,0751
		2	0,0631
		3	0,0481
1:1,5/1:2	10	0	0,3435
		4	0,2885
		7	0,1752
	7	0	0,1491
		2	0,1369
		4	0,1004
	5	0	0,0707
		2	0,0594
		3	0,0453

1:2/1:1,5	10	0	0,4007
		4	0,3366
		7	0,2044
	7	0	0,1636
		2	0,1503
		4	0,1102
	5	0	0,0751
		2	0,0631
		3	0,0481
1:1,5/1:2,5	10	0	0,3435
		4	0,2885
		7	0,1752
	7	0	0,1491
		2	0,1370
		4	0,1004
	5	0	0,0707
		2	0,0594
		3	0,0453
1:2,5/1:1,5	10	0	0,4809
		4	0,4039
		7	0,2453
	7	0	0,1813
		2	0,1665
		4	0,1221
	5	0	0,0801
		2	0,0673
		3	0,0513

4.2.2. Schaffernak ve Van Iterson Çözümüne Göre Değerlendirme

Schaffernak ve Van Iterson çözümünde sadece mansap tarafında su yükünün sıfır (0) olduğu durumlar için çözüm mevcuttur. Bu eşitlikten sonuçların elde edilmesinde aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır.

$$q = K_m \cdot a \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha$$

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$$

Çizelge 5. Schaffernak ve Van Iterson Çözümünden hesaplanan debi değerleri.

Şev	Memba yükü (h_1), cm	Mansap yükü (h_2), cm	Schaffernak ve Van Iterson çözümünden hesaplanan debi q , (cm^3/sn)
1:1	20	0	1,1486
	15	0	0,7114
	5	0	0,0648
1:1,5	14	0	0,7401
	10	0	0,3161
	5	0	0,0676
1:2	10	0	0,3646
	7	0	0,1512
	5	0	0,0708
1:1/1:1,5	15	0	0,7517
	10	0	0,2886
	5	0	0,0651
1:1,5/1:1	15	0	0,8317
	10	0	0,3093
	5	0	0,0673
1:1/1:2	14	0	0,6825
	10	0	0,2966
	5	0	0,0654
1:2/1:1	14	0	0,8212
	10	0	0,3406
	5	0	0,0701
1:1,5/1:2	10	0	0,3268
	7	0	0,1420
	5	0	0,0680
1:2/1:1,5	10	0	0,3498
	7	0	0,1491
	5	0	0,0704
1:1,5/1:2,5	10	0	0,3431
	7	0	0,1445
	5	0	0,0685
1:2,5/1:1,5	10	0	0,3920
	7	0	0,1592
	5	0	0,0735

4.2.3. L. Casagrande Çözümüne Göre Değerlendirme

L. Casagrande çözümünde de sadece mansap tarafında su yükünün sıfır (0) olduğu durumlar için çözüm yapılabilmektedir. Çözüm aşağıdaki eşitliğe göre yapılmıştır.

$$q = K_m \cdot a \cdot \sin^2 \alpha$$

$$a = s - \sqrt{s^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$$

Çizelge 6. L.Casagrande çözümünden hesaplanan debi değerleri.

Şev	Memba yükü (h ₁), cm	Mansap yükü (h ₂), cm	L.Casagrande çözümünden hesaplanan debi q, (cm ³ /sn)
1:1	20	0	1,3523
	15	0	0,6865
	5	0	0,0646
1:1,5	14	0	0,7102
	10	0	0,3111
	5	0	0,0674
1:2	10	0	0,3572
	7	0	0,1501
	5	0	0,0706
1:1/1:1,5	15	0	0,7240
	10	0	0,2847
	5	0	0,0649
1:1,5/1:1	15	0	0,7934
	10	0	0,3045
	5	0	0,0671
1:1/1:2	14	0	0,6599
	10	0	0,2925
	5	0	0,0652
1:2/1:1	14	0	0,7795
	10	0	0,3341
	5	0	0,0698

1:1,5/1:2	10	0	0,3214
	7	0	0,1411
	5	0	0,0678
1:2/1:1,5	10	0	0,3430
	7	0	0,1480
	5	0	0,0702
1:1,5/1:2,5	10	0	0,3371
	7	0	0,1435
	5	0	0,0683
1:2,5/1:1,5	10	0	0,3827
	7	0	0,1578
	5	0	0,0732

4.2.4. Pavlovsky Çözümüne Göre Değerlendirme

Pavlovsky çözümünde mansapta su bulunma ve mansapta su bulunmama durumları için ayrı ayrı sonuçlar bulunmuştur.

- Mansapta su bulunmaması durumu için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$q = K_m \frac{a_0}{m}$$

- Mansapta su bulunması durumu için ise aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$q = K_m \cdot \frac{h_w - h}{m} \ln \frac{h_d}{h_d - h}$$

Çizelge 7.Pavlovsky çözümünden hesaplanan debi değerleri

Şev	Memba yükü (h_1), cm	Mansap yükü (h_2), cm	Pavlovsky çözümün- den hesaplanan debi q , (cm^3/sn)
1:1	20	0	1,2126
		7	1,1762
		10	1,0875
	15	0	0,6039
		5	0,5777
		7	0,5359
	5	0	0,0579
		2	0,0512
		3	0,0407
1:1,5	14	0	0,6144
		5	0,5944
		7	0,5558
	10	0	0,2684
		4	0,2488
		7	0,1747
	5	0	0,0596
		2	0,0536
		3	0,0433
1:2	10	0	0,3031
		4	0,2875
		7	0,2143
	7	0	0,1290
		2	0,1252
		4	0,1026
	5	0	0,0616
		2	0,0559
		3	0,0456
1:1/1:1,5	15	0	0,7977
		4	0,7888
		7	0,7587
	10	0	0,3137
		4	0,2867
		7	0,1956
	5	0	0,0719
		2	0,0639
		3	0,0509

1:1,5/1:1	15	0	0,5574
		4	0,5490
		7	0,5080
	10	0	0,2170
		4	0,1992
		7	0,1371
	5	0	0,0495
		2	0,0442
		3	0,0354
1:1/1:2	14	0	0,8745
		4	0,8593
		7	0,7835
	10	0	0,3845
		4	0,3545
		7	0,2468
	5	0	0,0859
		2	0,0765
		3	0,0612
1:2/1:1	14	0	0,4728
		4	0,4661
		7	0,4301
	10	0	0,2060
		4	0,1915
		7	0,1353
	5	0	0,0457
		2	0,0409
		3	0,0330
1:1,5/1:2	10	0	0,3252
		4	0,3043
		7	0,2183
	7	0	0,1439
		2	0,1389
		4	0,1122
	5	0	0,0698
		2	0,0627
		3	0,0506
1:2/1:1,5	10	0	0,2508
		4	0,2355
		7	0,1705
	7	0	0,1107
		2	0,1071
		4	0,0866
	5	0	0,0536
		2	0,0484
		3	0,0391

1:1,5/1:2,5	10	0	0,3906
		4	0,3692
		7	0,2719
	7	0	0,1669
		2	0,1617
		4	0,1338
	5	0	0,0800
		2	0,0722
		3	0,0585
1:2,5/1:1,5	10	0	0,2475
		4	0,2355
		7	0,1767
	7	0	0,1051
		2	0,1021
		4	0,0839
	5	0	0,0502
		2	0,0456
		3	0,0371

Bu dört ayrı eşitliğe göre hesaplanan değerlerle modelden ölçülen değerler Çizelge 8'de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 8. 22 C 'a göre düzeltilmiş model ve formül debi değerleri.

Şev	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	Modelden ölçülen debi (cm ³ /sn)	Formüllerden bulunan debiler (cm ³ /sn)			
				Dupuit	Schaffernak ve Van Iterson	L. Casagrande	Pavlovsky
1:1	20	0	1,4775	1,6029	1,4586	1,3523	1,2126
		7	1,2863	1,4065	-	-	1,1762
		10	1,2671	1,2022	-	-	1,0875
	15	0	0,7469	0,7728	0,7114	0,6865	0,6039
		5	0,6519	0,6869	-	-	0,5777
		7	0,5919	0,6045	-	-	0,5359
	5	0	0,0626	0,0667	0,0648	0,0646	0,0579
		2	0,0532	0,0561	-	-	0,0512
		3	0,0406	0,0427	-	-	0,0407
1:1,5	14	0	0,7986	0,8125	0,7401	0,7102	0,6144
		5	0,7180	0,7088	-	-	0,5944
		7	0,5760	0,6093	-	-	0,5558
	10	0	0,3301	0,3434	0,3161	0,3111	0,2684
		4	0,2820	0,2885	-	-	0,2488
		7	0,1719	0,1751	-	-	0,1747
	5	0	0,0699	0,0707	0,0676	0,0674	0,0596
		2	0,0587	0,0594	-	-	0,0536
		3	0,0443	0,0452	-	-	0,0433
1:2	10	0	0,2676	0,4007	0,3646	0,3572	0,3031
		4	0,2482	0,3366	-	-	0,2875
		7	0,1472	0,2043	-	-	0,2143
	7	0	0,1171	0,1636	0,1512	0,1501	0,1290
		2	0,1075	0,1502	-	-	0,1252
		4	0,0744	0,1102	-	-	0,1026
	5	0	0,0540	0,0751	0,0708	0,0706	0,0616
		2	0,0449	0,0631	-	-	0,0559
		3	0,0343	0,0481	-	-	0,0456
1:1/1:1,5	15	0	0,6883	0,7728	0,7515	0,7240	0,7977
		4	0,6135	0,7178	-	-	0,7888
		7	0,6200	0,6045	-	-	0,7587
	10	0	0,2869	0,3006	0,2886	0,2847	0,3137
		4	0,2364	0,2525	-	-	0,2867
		7	0,1496	0,1533	-	-	0,1956
	5	0	0,0633	0,0668	0,0651	0,0649	0,0719
		2	0,0548	0,0561	-	-	0,0639
		3	0,0412	0,0427	-	-	0,0509

Çizelge 8' in devamı

Şev	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	Modelden ölçülen debi (cm ³ /sn)	Formüllerden bulunan debiler (cm ³ /sn)			
				Dupuit	Schaffernak ve Van Iterson	L. Casagrande	Pavlovsky
1:1,5/1:1	15	0	0,7806	0,9836	0,8317	0,7934	0,5574
		4	0,6911	0,9136	-	-	0,5490
		7	0,6284	0,7695	-	-	0,5080
	10	0	0,2881	0,3434	0,3093	0,3045	0,2170
		4	0,2630	0,2885	-	-	0,1992
		7	0,1356	0,1751	-	-	0,1371
	5	0	0,0675	0,0707	0,0673	0,0671	0,0495
		2	0,0554	0,0594	-	-	0,0442
		3	0,0434	0,0453	-	-	0,0354
1:1/1:2	14	0	0,6873	0,6565	0,6825	0,6599	0,8745
		4	0,5648	0,6011	-	-	0,8593
		7	0,4867	0,4909	-	-	0,7835
	10	0	0,2948	0,3006	0,2966	0,2925	0,3845
		4	0,2408	0,2525	-	-	0,3545
		7	0,1476	0,1533	-	-	0,2468
	5	0	0,0635	0,0668	0,0654	0,0652	0,0859
		2	0,0511	0,0561	-	-	0,0765
		3	0,0408	0,0427	-	-	0,0612
1:2/1:1	14	0	0,8874	1,0711	0,8212	0,7795	0,4728
		4	0,8099	0,9836	-	-	0,4661
		7	0,6928	0,8032	-	-	0,4301
	10	0	0,3423	0,4007	0,3406	0,3341	0,2060
		4	0,2488	0,3366	-	-	0,1915
		7	0,1828	0,2044	-	-	0,1353
	5	0	0,0699	0,0751	0,0701	0,0698	0,0457
		2	0,0602	0,0631	-	-	0,0409
		3	0,0447	0,0481	-	-	0,0330
1:1,5/1:2	10	0	0,3690	0,3435	0,3268	0,3214	0,3252
		4	0,2775	0,2885	-	-	0,3043
		7	0,1667	0,1752	-	-	0,2183
	7	0	0,1427	0,1491	0,1420	0,1411	0,1439
		2	0,1283	0,1369	-	-	0,1389
		4	0,0919	0,1004	-	-	0,1122
	5	0	0,0668	0,0707	0,0680	0,0678	0,0698
		2	0,0556	0,0594	-	-	0,0627
		3	0,0424	0,0453	-	-	0,0506

5. TARTIŞMA

Çizelge 3'ten görülebileceği gibi şevin büyük olmasına bağlı olarak bent gövdesinden sızan su miktarı artmaktadır. Ayrıca memba su yükünün de artmasıyla debi artmıştır.

Çizelge 3'teki model ortalama değerleri ile formüllerden elde edilen değerler arasında korrelasyon ve t testleri yapılmıştır. Korrelasyon katsayılarının bulunmasında SAS istatistik paket programı, t testleri için de MINITAB istatistik paket programı kullanılmıştır. Her şev durumu için ayrı ayrı yapılan korrelasyon işlemlerinden, modelden elde edilen değerler ile formüllerden elde edilen değerler arasında çok yüksek bir ilişki olduğu görülmüştür. Değerlerin tümü üzerinde yapılan korrelasyon işleminden model değerleri ile formül değerleri arasında bulunan korrelasyon katsayısı değerleri ise aşağıdaki gibidir.

	Dupuit	Schaffernak ve Van Iterson	L.Casagrande	Pavlovsky
Model	0,9927	0,9618	0,9618	0,9426

Bulunan korrelasyon katsayılarından modelden elde edilen değerler ile formüllerden elde edilen değerler arasında çok yüksek bir ilişki olduğu görülmektedir. Korrelasyon katsayılarından modelle en çok uygunluğu Dupuit eşitliğinin gösterdiği görülmüştür.

Model değerleri ile ayrı ayrı formüllerden bulunan değerlerin ortalamalarının birbirinden farklı olup olmadığı, ortalamaların farklarının t testleriyle test edilmesiyle

bilirlenmiştir. Yapılan t testleri sonucunda Çizelge 9'daki P ihtimal düzeyleri bulunmuştur.

Çizelge 9. Modelle formüller arasında bulunan P ihtimal düzeyleri.

Şev	Dupuit	Schaffernak ve Van Iterson	L.Casagrande	Pavlovsky
1:1	0,92	0,91	0,97	0,71
1:1,5	0,96	0,88	0,92	0,71
1:2	0,38	0,51	0,51	0,57
1:1/1:1,5	0,86	0,80	0,83	0,65
1:1,5/1:1	0,64	0,79	0,82	0,56
1:1/1:2	0,97	0,78	0,81	0,37
1:2/1:1	0,69	0,88	0,93	0,28
1:1,5/1:2	0,95	0,76	0,76	0,85
1:2/1:1,5	0,88	0,80	0,82	0,39
1:1,5/1:2,5	0,87	0,69	0,70	0,42
1:2,5/1:1,5	0,86	0,86	0,88	0,25

Bütün şevlerde Modelle formüller arasında P ihtimal düzeyleri $P > 0,05$ olduğundan model ortalama değerleri ile formüllerden elde edilen ortalama değerler arasında istatistiki olarak fark olmadığı görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu sonuçlara göre geçirimsiz bir zemin üzerine oturtulmuş toprak bent gövdesinden sızmanın hesaplanmasında 4 eşitlik de kullanılabilir. Bu eşitliklerden Pavlovsky eşitliği modelle en az uygunluğu göstermiştir. Schaffernak ve Van Iterson eşitliği ve L. Casagrande eşitliği mansap tarafında belli yükün olması durumlarında sonuç vermemektedir. Buna karşılık mansap yükünün sıfır (0) olduğu durumlarda modelle yüksek benzerlik göstermişlerdir. Dupuit eşitliği ise modelle en çok benzerliği göstermiştir. Modelin doğru çalıştığını düşündüğümüz için Dupuit eşitliği hesaplama işlemlerinin kolaylığı, mansap tarafında farklı yüklerde sonuç vermesi ve modelle çok yüksek bir uygunluk göstermesi nedeni ile hesaplamalarda rahatlıkla kullanılabilir.

7. ÖZET

Bu araştırmada geçirimsiz zemin üzerine oturtulmuş bir toprak bentten sızmanın hesaplanmasında kullanılan bazı eşitliklerin Hele-Shaw Viskoz Sıvı Analog Modeli ile değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Denemeler için labaratuvarında 70 cm boyunda, 50 cm yksekliginde 0,8 cm kalınliginde ve aralarında 3 cm açıklık bulunan cam plakalarla bir Hele-Shaw Analog Modeli hazırlanmıştır. Model içerisine taban uzunluğu 50 cm olan 11 farklı sev durumu için hazırlanmış bent gövdeleri yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Ölçümler memba tarafındaki 3 farklı seviye için mansap tarafında 3'er seviyede yapılmıştır. Modelden llen değerler viskozite-sıcaklık grafiğinden alınan kinematik viskozite ($\nu=2,72 \text{ cm}^2/\text{sn}$) değeri kullanılarak 22 °C'a göre düzeltilmiştir.

Düzeltilmiş model değerleri ile formül değerleri arasında korrelasyon ve t testleri yapılmıştır. Model değerleri ile Dupuit, Schaffernak-Van Iterson, L. Casagrande ve Pavlovsky zmlerinden elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Model ile Dupuit zm arasında 0,9927, model ile Schaffernak-Van Iterson zm arasında 0,9618, model ile L. Casagrande zm arasında 0,9618 ve model ile Pavlovsky zm arasında 0,9426 korrelasyon katsayıları elde edilmiştir.

Model ve formüllerin ortalama değerleri t testiyle test edilmiştir. t testleri sonucunda bütün şevlerde model

değerleri ile formül değerlerinin karşılaştırılmasında ihtimal düzeyi $P > 0,05$ bulunmuştur.

Yapılan korrelasyon ve t testlerinden model değerleri ile formül değerleri arasında istatistikî olarak fark bulunamamıştır.

Bu sonuçlara göre modelle en uygun değerleri veren eşitlik Dupuit eşitliği olmuştur.

SUMMARY

The purpose of this study is to evaluate the practicability of some equations used in the calculation of seepage from an earth dam placed on an impervious base by using Hele-Shaw Viscous Fluid Analog Model.

For the laboratory experiments an Hele-Shaw Analog Model with 70 cm long, 50 cm height, 0,8 cm thick and 3 cm space between glass plate was prepared. Measurements were made by settling dam bodies prepared for 11 different slope conditions with 50 cm base long in the model. The measurements were made with 3 levels at the downstream side for 3 different levels at the side upstream. The values measured from model were corrected according to 22 °C by using kinematic viscosity ($\nu=2.72 \text{ cm}^2/\text{sn}$) obtained from temperature-viscosity graphic.

Correlation and t tests were conducted between the corrected model values and formula values. Obtained values from solutions of Dupuit, Schaffernak-Van Iterson, L. Casagrande and Pavlovsky were compared with values of model. Correlation coefficient were found as follows respectively : Between model and Dupuit solution 0,9927, model and Schaffernak-Van Iterson solution 0,9618, model and L.Casagrande solution 0,9618 and model and Pavlovsky solution 0,9426.

Average values obtained from model and formula were

tested with t tests. As the result of the comparisons from t test model values and formula values in all slopes, the probability level were found to be $P > 0,05$.

Any statistical difference was not found between the model values and formula values from correlation and t tests.

According to these results Dupuit Equations was the most appropriate formula for formula calculations.



8. TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumun seçiminde ve çalışmalarım sırasında benden her türlü yardımlarını ve değerli bilgilerini esirgemeyen, çalışmalarımı yönlendiren sayın hocam Prof. Dr. Ersan GEMALMAZ' a teşekkürlerimi sunarım.



YARARLANILAN KAYNAKLAR

1. Gemalmaz, E., 1985 "Hele-Shaw Viskoz Sıvı Analog Modellerin Kuramsal Esasları ve Hazırlanma İlkeleri" Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Erzurum (Basılmamıştır).
2. Harr, M. E., 1962 "Groundwater and Seepage" McGraw-Hill Book Company, New York.
3. de Wiest, R. J. M., 1967 "Hydrogeology" John Wiley and Sons, Inc., New York.
4. Ardiçlioğlu, M., 1990 "Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Aslantaş Baraj Gövdesinde Sızma Analizi" (Yüksek Lisans Tezi) Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Adana (Basılmamıştır).
5. Todd, D. K., 1964 "Groundwater Hydrology" John Wiley and Sons, Inc., New York.
6. Bear, J., 1972 "Scales of Viscous Analogy Models for Groundwater Studies" Jour. of the HY, ASCE, Vol. 86, HY2, Proc. Paper 2364, Feb., pp. 11-23.
7. Omay, E., 1967 "Geçirimli Zeminlerdeki Sıvı Akımını Açıklayan Teorilerin Tenkidi ve Drenaj Hendeği Problemi için Çözüm" (Doktora Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi, İstanbul
8. Hathoot, H. M., 1987 "Experimental Evaluation of Seepage From an Array of Triangular Channels" ICID Bulletin July, Vol.36, No.2, pp. 72-78.

9. Topkaya, H., 1978 "Teknik Hidrolik" 'Hidrodinamik ve Hidrostatik' Güven Kitabevi, Ankara.
10. Anapalı, Ö., 1987 "Kararlı Akış Drenaj Eşitliklerinin Uygulanma Olanaklarının Hele-Shaw Viskoz Sıvı Analog Modeli ile İncelenmesi Üzerine Bir Araştırma" (Yüksek Lisans Tezi) Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Erzurum (Basılmamıştır)

