

622.276.435
0419

MAG-688
1996-1551

MAG 688

622.276.435

Q 41c.

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU
MÜHENDİSLİK ARAŞTIRMA GRUBU

PROJE NO : 688

ÇATLAKLI JEOTERMAL SİSTEMLERDE
İZLEYİCİ ENJEKSİYONU : MODEL ÇALIŞMASI

TÜRKİYE
BİLİMSEL VE TEKNİK
ARAŞTIRMA GRUBU
KÜTÜPHANE

Proje Yürütucusu : Doç.Dr. Ender OKANDAN
ODTÜ, Petrol Mühendisliği Bölümü

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumunun
Desteği ile ODTÜ Mühendislik Fakültesi, Petrol Mühendis-
liği Bölümünde Yapılmıştır.

Haziran 1987

ANKARA

17624

Bağış, Mart 1990

ÖNSÖZ

Jeotermal kaynakların enerji üretimi için kullanılmalarında, sahaların rezervuar mühendisliği açısından değerlendirilme-leri, kaynağın ömrü, enerji üretim potansiyeli ve uzun süreli performans tahmininin yapılması hayatı öneme sahiptir. Bir sahanın enerji üretim potansiyelide sıcak su veya buhar debisine doğrudan bağlıdır.

Son yıllarda jeotermal sahalarda uygulanan "reenjeksiyon" un atık suyun atılmasıının yanı sıra rezervuar basıncının ve rezervuar akışkan hacminin istenen seviyede tutulması için etkin olduğunu göstermiştir. Fakat bazı uygulamalarda bunun aksine rezervuar üretimliliğinde düşmelere de rastlanmıştır.

İzleyici testlerinin, başarılı "reenjeksiyon" projeleri için rezervuar mühendislerince vazgeçilmez bir veri kaynağı olduğu kabul edilmektedir. Bir enjeksiyon kuyusundan basılan izleyici solusyonunun çevre kuyularдан üretilmesindeki davranışın değerlendirilmesi ile rezervuardaki çatlak ağı hakkında bilgi sahibi olunması mümkündür.

Bu çalışmada laboratuvara homojen çatlak ağı oluşturarak yapılan bir modelde, KI olarak seçilen izleyici enjeksiyonu ve üretim gerçekleştirilmiştir.

İzleyici solusyonunun üretim ucundaki konsantrasyon değişimi kullanılarak blok boyutları, çatlak eni hesaplanmış ve model verileri ile karşılaştırılmıştır.

Benzer deneyler homojen poroz bir modelde gerçekleştirilmiş ve çatlaklı sistemle farklılıklarını ortaya konmuştur.

Her iki modelde yapılan basınç düşümü testleri ile gene rezervuar parametreleri hesaplanmış ve akış mekanizması incelenmiştir.

ABSTRACT

Jeotermal kaynakların rezervuar karakterizasyonu, hem sahanın geliştirilmesi hemde reenjeksiyonun uygulama stratejisi için önemlidir. Bu amaç için izleyici enjeksiyonu ve basınç davranış yorumunun yerinde belirlenmesinin önemli bir metod olduğu kabul edilmektedir.

Bu çalışmada laboratuvara yapılan bir modelde, hem izleyici enjeksiyonu hemde basınç davranışları ile rezervuar özelliklerinin yorumu amaçlanmıştır.

Gözeneksiz 10x10x10 cm boyutu olan mermer bloklarla yapılan ve 100°C'a ısıtılan çatlaklı modelde, izleyicinin tercih ettiği ana bir çatlak boyunca hareket ederek üretim ucuna ulaşlığı gözlenmiştir. Basınç davranışısı ise sonsuz gözenekli ortam modeline göre yorumlanmış ve rezervuar hacminin etkisi uzun zaman üretimi ile kendini göstermiştir.

Gözenekli kırılmış kalkerden yapılmış model ise düşük Peclet katsayısı ile yüksek dispersiyon özelliği göstermiştir.

İş transfer hesaplamaları ise mermer bloklarından olan işi transferi nedeniyle soğuk su düzleminin hareketini engellediğini göstermiştir.

ABSTRACT

Reservoir characterization is an important aspect of geothermal reservoir development and reinjection as a means of supplementing recharge water to the system.

In situ determination by tracer testing and pressure testing are proven to be valuable procedures.

This research was aimed at performing a laboratory model test both for tracer injection and pressure responses.

Fractured model created by non-porous marble blocks 10x10x10 cm in dimension heated to 100°C gave a characteristics tracer breakthrough profile though fractures, indicating tracer solution had a main fracture flow path. However pressure responses indicated infinite acting porous media flow behavior which was affected by the finite reservoir volume at larger times.

The study on porous medium model showed low Peclet number with high degree of dispersion characteristics for porous media flow.

Heat transfer calculations indicated that conduction from solid matrix had retarded cold water front and as cold reinjection water had longer residence time in contact with blocks, least danger of cold thermal breakthrough at the producing end was achieved.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

Önsöz	1
Abstrakt	11
Abstract	111
İçindekiler	IV
Şekiller	V
GİRİŞ	1
TEORİ	3
Gözenekli, Çatlaklı Ortamda	3
İzleyici Madde Hareketi	
Çatlaklı ve Homojen Ortamda Basınc	6
Davranışı	
DENEY ŞARTLARI VE PROSEDÜR	8
Rezervuar Modeli	8
İzleyici Madde	11
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	14
İzleyici Testleri	14
Tek Çatlak İçinde Izleyici Davranışı	22
Homojen Ortamda Izleyici Davranışı	22
SONUÇ	32
KAYNAKLAR	33

ŞEKİLLER

- Şekil 1. Deney Düzeneği
- Şekil 2. Mermer Blokların Modeldeki Düzeni
- Şekil 3. İzleyicinin Üretim Ucundaki Konsantrasyonunun Değişimi
 $H_i/H_p = 0.75/0.25$
- Şekil 4. İzleyicinin Üretim Ucundaki Konsantrasyonunun Değişimi
 $H_i/H_p = 0.25/0.75$
- Şekil 5. İzleyicinin Üretim Ucundaki Konsantrasyonunun Değişimi
 $H_i/H_p = 0.75/0.75$
- Şekil 6. İzleyicinin Üretim Ucundaki Konsantrasyonunun Değişimi
 $H_i/H_p = 0.25/0.25$
- Şekil 7. Tek Çatlak Boyunca İzleyici Davranışı
- Şekil 8. Soğuk Su Geri Basımı Sırasında Oluşan Sıcaklık Farkları
 $H_i/H_p = 0.75/0.25$
- Şekil 9. Homojen Sistemde İzleyici Davranışı
 $H_i/H_p = 0.3/0.3$
- Şekil 10. Homojen Sistemde İzleyici Davranışı
 $H_i/H_p = 0.3/0.8$
- Şekil 11. Çatlaklı Sistem Basınç Düşümü Testi Log-Log Grafiği
- Şekil 12. Homojen Sistem Basınç Düşümü Testi Log-Log Grafiği
- Şekil 13. Çatlaklı Sistem Basınç Düşümü Testi Konvansiyonel
Yarı-Logaritmik Analiz Grafiği
- Şekil 14. Homojen Sistem Basınç Düşümü Testi Konvansiyonel
Yarı-Logaritmik Analiz Grafiği
- Şekil 15. Çatlaklı ve Homojen Sistem Interferans Testi
- Şekil 16. Çatlaklı Sistem Soğuk Su ile Basınç Düşümü Testi
Log-Log Grafiği

GİRİŞ

Jeotermal enerji kaynaklarının, enerji üretimi için kullanılmaları, rezervuar mühendisliği açısından bu kaynakların değerlendirilmelerini ve takip edilmelerini gerekli kılmaktadır.

Bu açıdan bakıldığından en önemli soru, kaynağın istenen debide üretimi sağlayıp sağlıyamayacağı ve doğal olarak zamanla gözlenecek basınç düşümünü, dolayısıyla enerji üretimindeki düşüşü azaltmak, ısı üretim verimini yükseltmek için nasıl önlemler alınabileceğidir.

Dünyada bazı sahalarda uygulanıp olumlu etkileri görülen yöntem, üretilen ve kullanımdan sonra atılan suyun rezervuara geri basımıdır. Bunun, suni olarak sahadaki baslenme suyunu arttırması ile basıncı yükseltici ve verimi artırıcı etkisi olacağı düşünülür. Bazı uygulamalarda⁽¹⁾ bu gözlenmiş fakat bazılarda ise geri basılan soğuk suyun çatlaklardan süratle hareket ederek üretim kuyularına ulaştığı ve kuyuların üretim entalpilerini düşürdüğü bir başka deyişle soğumaya neden olduğu görülmüştür⁽²⁾.

Bu sebeple geri basımın projelendirilmesi ve uygulanması oldukça kritik bir konu olmaktadır. Uygulamayı yapabilmek için rezervuarın iyi tanımlanması, kuyular arası iletişimın belirlenmesi ve suyun hareketini sağlayan çatlakların, geometrisinin ve boyutlarının tahmin edilmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak geri basım debisi ve sahada geri basım kuyularının yerinin saptanması mümkün olmaktadır.

Rezervuarın kayaç özelliklerini, sahada alınan karotların analizlerinden, kuyu loglarından ve kuyu testlerinden tesbit etmek mümkündür. Fakat kuyular arası akışı belirleyen özellikleri,

ancak iki kuyu arasında yapılacak etkileşim basınc testi (interference test), kuyu basınc yükselim veya düşüm testi ve soğuk suyun hareket yollarını ve mekanizmasını belirleyen izleyici testleri ile saptamak mümkün olmaktadır.

Bu proje çalışmasında çatlaklı bir jeotermal rezervuar modelinde izleyici enjeksiyonu ve üretim profillerinden rezervuar parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Aynı modelde yapılan interferans ve basınc düşüm testlerinin yorumlarından benzer parametreler hesaplanmış ve her iki metodun sonuçları mukayese edilmiştir.

Poroz ortam davranışının çatlaklı sistemlerden olan farklılığı ise bir poroz ve homojen rezervuar modelinde yapılan benzer test sonuçları ile ortaya konulmuştur.

TEORİ

GÖZENEKLİ, ÇATLAKLI ORTAMDA İZLEYİCİ MADDE HAREKETİ

Gözenekli ortamda suyun ve içinde erimiş izleyici maddenin hareketi konveksiyon ve dispersiyona bağlıdır. Konveksiyon suyun hacimsel hareketine, dispersiyon ise gözeneklerin karmaşık yapısına bağlı olarak gelişir. İzleyici madde aynı olayların etkisiyle su molekülleriyle birlikte hareket eder. Farklı olan olay, hareket sırasında bu maddelerin sorpsiyon ve kimyasal reaksiyonlara maruz kalabilmeleridir.

Suyun gözenekli ortamındaki konveksiyon ve dispersiyon hareketine etki eden parametreleri bilmek önemli olmakla beraber ölçülme-leri mümkün değildir. Ancak dolaylı olarak rezervuara enjekte edilecek "ideal" bir izleyicinin davranışından tahmin yapılabilmesi söz konusudur.

Gözenekli ortamda kütle transferine etki eden faktörler

- 1- Konveksiyon
- 2- Hidrodinamik difüzyon
- 3- Moleküler difüzyon
- 4- Adsorptiyon ve dezorpsiyon
- 5- Kimyasal reaksiyon olarak belirlenebilir.

Matematiksel olarak tek boyutlu ortam için maddenin konsantrasyonundaki değişimi yazacak olursak

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} - U_C C \right) + D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - R \quad (1)$$

c : konsantrasyon
 x : koordinat
 t : zaman
 D : dispersiyon katsayısı
 D_m : Difüzyon katsayısı
 R : Kimyasal reaksiyon ile kayıp
 U : hız

Kimyasal bir reaksiyonun olmaması, $R = 0$, ve matriksin geçirgenliğinin bulunmaması $D_m = 0$ koşullarını sağlamaktadır. Tek boyutlu bir akışta boyuna dispersiyon, enine dispersiyondan fazla olduğu varsayımda doğru bir yaklaşım olmaktadır. Buna göre denklemimiz ⁽³⁾

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \alpha_L U \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - U \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2)$$

Burada α_L , boyuna dispersiyon katsayısıdır.

Aşağıdaki boyutsuz parametrelerin tanımı ile

$$x_R = \frac{x}{\alpha_L}$$

$$t_R = \frac{Ut}{x}$$

$$C_R = C / C_0$$

denklemimiz.

$$\frac{1}{x_R} \frac{\partial c}{\partial t_R} = \frac{\partial^2 C_R}{\partial x_R^2} - \frac{\partial C_R}{\partial x_R} \quad (3)$$

İzleyici maddenin tara olarak enjekte edilmesi halinde sınır koşulları

$$C(x, 0) = (M/w) \zeta(x)$$

$\zeta(x)$ = dirac fonksiyonu

$$\zeta_m(x) = 1/m \quad \zeta_m(x) = 0 \quad x > m$$

$$C(+\infty, t) = 0$$

olarak belirlenir ve kısmi differansiyal denklemin analitik çözümü

$$C_R(t_R, P_e) = \frac{K}{\sqrt{t_R}} \cdot \exp \left(- \frac{P_e}{4t_R} (1 - t_R)^2 \right) \quad (4)$$

burada

$$K = (t_{R_{max}})^{\frac{1}{2}} \exp \left(- \frac{P_e}{4t_{R_{max}}} (1 - t_{R_{max}})^2 \right)$$

ve

$$t_{R_{max}} = (1 + P_e^{-2})^{\frac{1}{2}} - P_e^{-1}$$

$$P_e = \text{Peclet sayısı}$$

Bu analitik çözüm kullanılarak üretim ucundan üretilenecek izleyici konsantrasyon profili zamanla değişimini bulmak mümkündür. Bu çalışmada deneylerle elde edilen konsantrasyon profili ile de rezervuardaki akış sırasında geçerli olan hidrodispersiv parametreler, analitik model yardımıyla hesaplanmıştır.

ÇATLAKLI VE HOMOJEN ORTAMDA BASINÇ DAVRANISI

Rezervuarlarda yerinde ölçüm yapılamadığı durumlarda akış ve gözenekli ortamın parametreleri kuyularda uygulanan basınç testlerinin yorumu ile tahmin edilebilmektedir.

Petrol ve yeraltı suyu ile ilgili literatürde basınç testlerini yorumu üzerine çok fazla yayın bulunmaktadır. Fakat bunlardan Theis (1935) in çalışması ilk önder çalışmalar arasında dır^(4,5).

Üretim veya enjeksiyon kuyularında yapılan basınç analizleri kuyu koşullarını belirlemek için yararlıdır. Basınç analizi nin amaçları arasında i) kuyu şartlarının belirlenmesi ii) kuyunun drenaj bölgesindeki ortalama geçirgenlik iii) ortalama formasyon basıncı iv) akış bölgesinin büyüklüğü, şekil ve gözenekliliği v) kuyuya besleyen rezervuarın homojen veya çatlaklı olup olmadığını tayini bulunmaktadır.

Petrol literatüründe kuyu testlerine temel teşkil edecek ilk yayınlar Horner ve Millers Dyes Hutchuson'a aittir. Diffusive denkleminin sonsuz ortam için olan çözümü

$$P_{wf} = P + \frac{q\mu B}{4\pi kh} E_i \left(- \frac{\phi \mu c r_w^2}{4kt} \right) \quad (5)$$

olarak ifade edilir.

Kuyuda t zamanı süresince q debi ile üretim yapılıyor, ve $\frac{4kt}{\phi \mu c r_w^2} > 100$ durumu sağlanıyorsa, saha birimleri kullanılarak

$$P_{wf} = P_i - \frac{162.6 q \mu B}{kh} (\log \frac{kt}{\phi \mu c r_w} - 3.23 + 087s) \quad (6)$$

elde ederiz. Bu denkleme göre kuyunun sabit q debisinde üretim yaptığı ve t zamanında ölçülen P_{wf} , $\log t$ ye göre çizilecek olursa yarı logaritmik bir düz çizgi elde edilecektir. Bu çizginin eğimi $m = \frac{162.6 q B}{kh}$ dir.

Buradan da kuyu çevresinin transmisivitesi kh ; veya permeabilitesi k , hesaplanabilmektedir.

Log-log olarak çizilen basınç verileri rezervuarın özelliklerini ve akış mekanizmasını daha belirgin ortaya koymakta ve "type curve" analizini mümkün kılmaktadır.

Catlaklı bir ortam için "çifte gözenek modeli" kullanılarak çıkarılan denklemler, Warren and Root, Barenblatt ve deSwann'ın çalışmalarında incelenmiştir. Bu çalışmalarında belirtildiği gibi semi-logaritmik bir grafikte, "çifte gözenek" veya catlaklı rezervuarlar birbirine paralel iki düz çizgi ile özellik göstermektedir. Birinci düz çizgi çatlaklardan üretimi, aradaki geçiş döneminde matrikten çatlağa olan akışı ve ikinci paralel çizgi ise sistemin homojen bir sistem gibi davranışını ortaya koyduğu dönem olarak belirlenmektedir.

Bu grafiklerde çizginin eğiminden çatlakların kh değeri, ortamın "storativite" sini hesaplamak mümkün olmaktadır.

Jeotermal sistemlerde, soğuk suyun geri basımı sırasında bazı termal farklılıklar enjeksiyon veya üretim kuyularındaki basınç davranışını etkilemeye ve verilerin analizi ile soğuk su düzlemine olan uzaklık tahmin edilebilmektedir. Bu tahminin doğru olabilmesi ise basınç ölçümünün hassas ve uzun süreli olması yanı sıra iki ayrı zonda belirgin k/μ ve ϕc farklılarının oluşması gerekmektedir.

Bu araştırma projesi, laboratuvara yapılmış bir çatlaklı ve homojen jeotermal rezervuar modelinde izleyici madde basımı ile üretim konsantrasyon profillerinden ve üretim-enjeksiyon noktalarında alınan basınç düşümü ve interferans verilerinden rezervuar parametrelerinin tahminini içermektedir.

DENEY SARTLARI VE PROSEDÜR

Laboratuvar deney düzeneği enjeksiyon sistemi, 3 boyutlu rezervuar modeli ve üretim sistemi olarak üç ana kısımdan oluşmaktadır. (Şekil 1)

REZERVUAR MODELİ

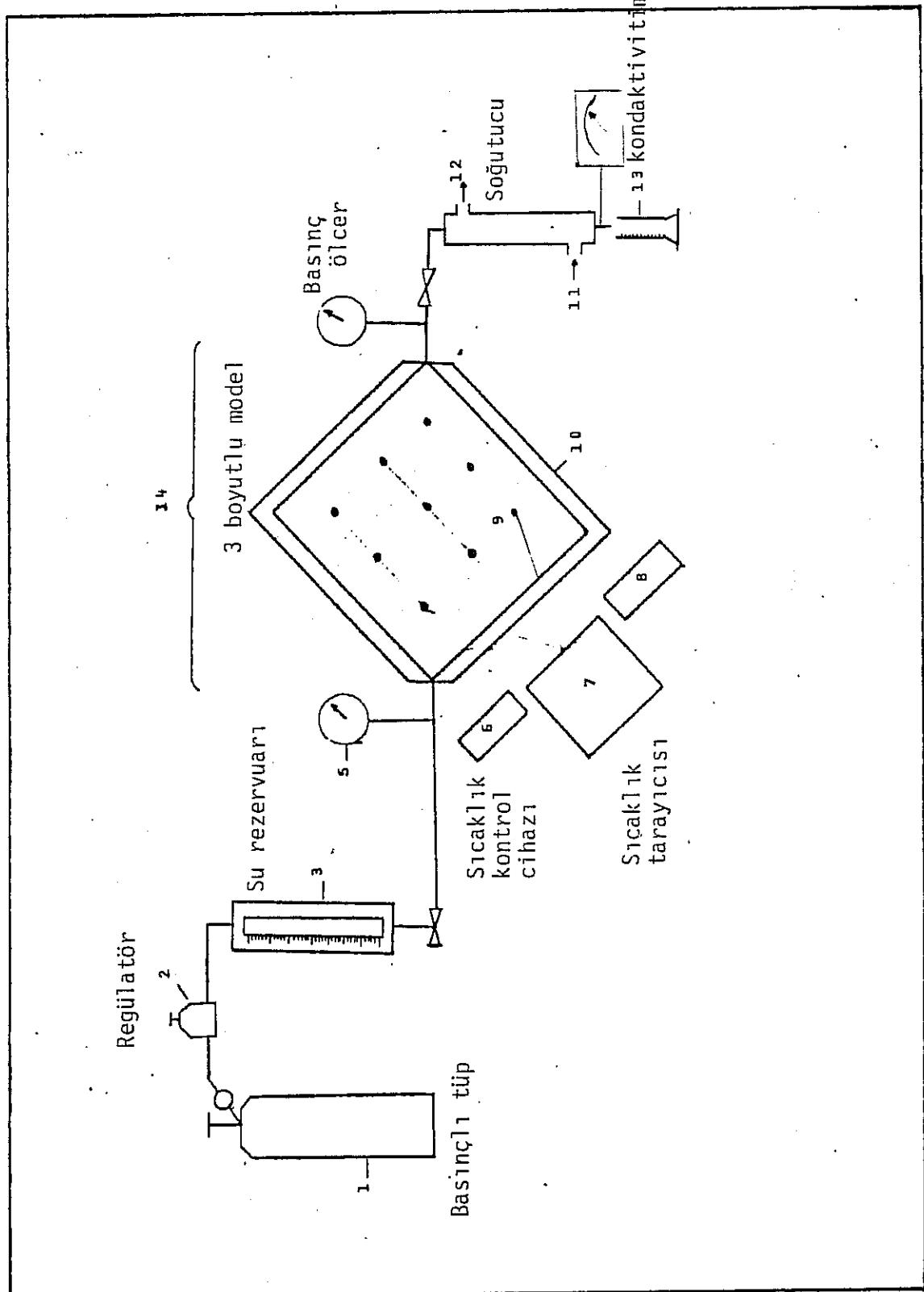
Rezervuar modeli olarak çatlaklı sistem için mermer seçilmiş ve Şekil 2. de boyutları ve sekilleri verilen bloklar halinde kesilmiş, simetrik olarak yerleştirilmiştir. İki enjeksiyon, iki üretim ucunda olmak üzere dörtlü kombinasyon ile su enjeksiyonu ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu noktaların derinliği; enjeksiyon ucu için

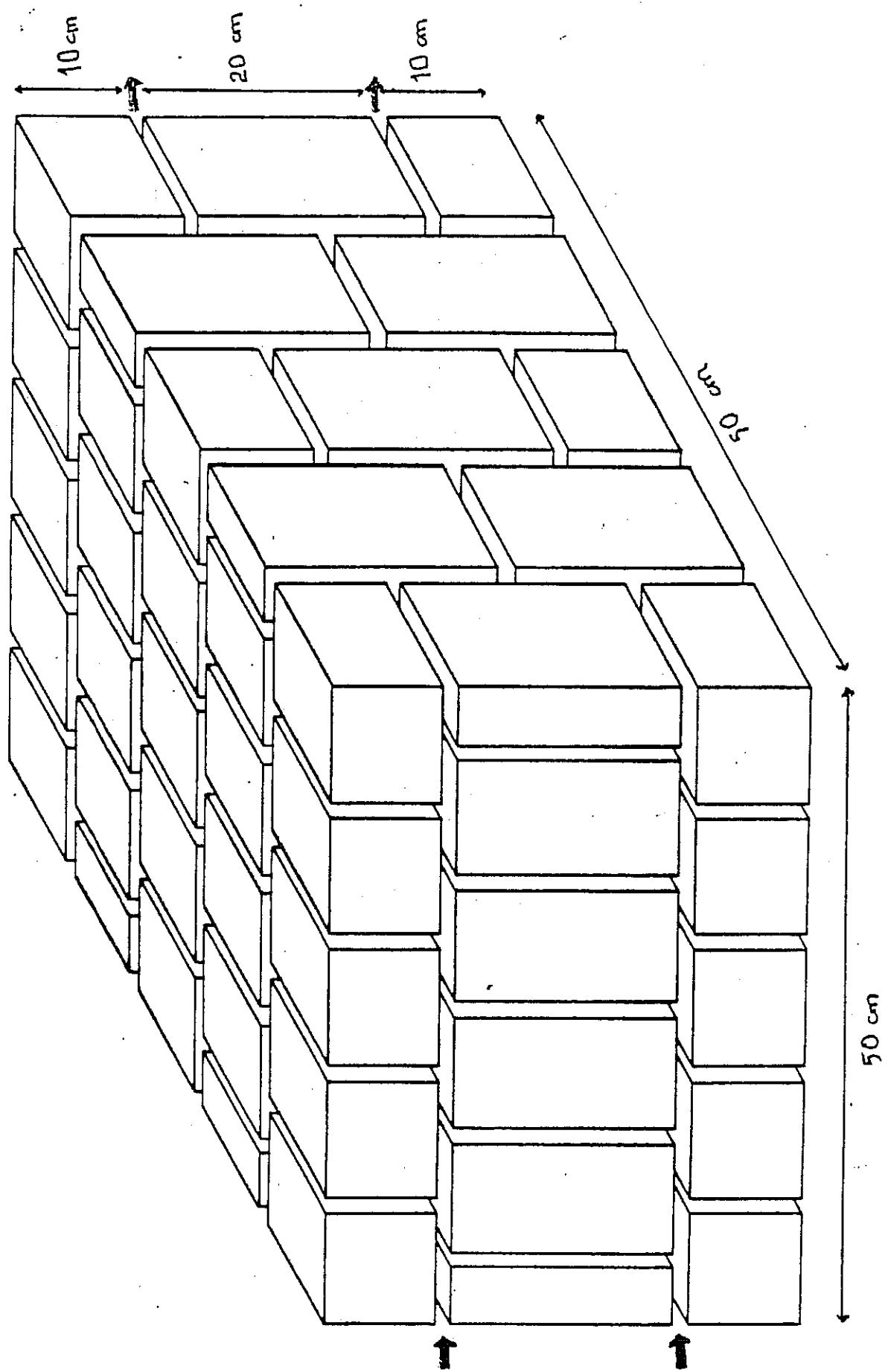
$$h_i = \frac{\text{enjeksiyon ucunun modelin tabanına olan dik uzaklığı}}{\text{model kalınlığı}}$$

ürtim ucu için

$$h_i/h_p = \frac{\text{ürtim noktasının modelin tabanına olan dik uzaklığı}}{\text{model kalınlığı}}$$

olarak tanımlanmıştır. Tablo ve şeillerde h_i/h_p şeklinde verilmiştir.





Homojen model ise tane boyutu ortalama 1 cm. olan kalkerlerin paketlenmesi ile oluşturulmuştur. Enjeksiyon ve üretim kombinasyonları bir önceki modelde olduğu gibi yapılmıştır.

Her iki rezervuar model de alttan ısıtmayı sağlamak üzere ısıticılar ve sıcaklık ölçümü yapmak üzere model içinde 35 noktada yerleştirilmiş ısılçiftler ve bunlardan otomatik tarama yapmak üzere elektronik tarayıcı ile donatılmış olup deneyler sırasında süratli ve doğru ölçümler için kullanılmıştır. Isı kaybını önlemek üzere modeller izocam kaplı bir ayrı ceket haznesi içine yerleştirilmiştir.

Basınç ölçümleri basınç manometreleri ve elektronik basınç transduseri ile kısa zaman aralıklarında değerler alınarak yapılmıştır.

Üretim ve enjeksiyon debileri ise Cole-Palmer FM102-05ST akış ölçüleri ile ölçülmüştür. Üretim ucunda, soğutucu çıkışında alınan suyun ise kondaktivitesi devamlı ölçülmüştür.

İZLEYİCİ MADDE

Jeotermal saha uygulamalarında ve laboratuvar deneylerinde izleyici olarak test edilmiş maddeler arasında KI, adsorpsiyonun az olması reaktif olmaması ve yüksek sıcaklıkta bozulmaması nedeniyle tercih edildiği görülmektedir.

Gözenekli ortamda akış sırasında çatlaklar içinde dispersiyon ve adsorpsiyon nedeniyle üretim ucuna ulaşamayacak izleyici madde gözönünde tutularak enjeksiyon suyundaki konsantrasyon 4000 ppm olarak saptanmış ve 2000 cc lik tapa halinde basılması öngörülmüştür.

Üretim ucundaki konsantrasyon değişimleri suyun kondaktivitesi ölçülerek saptanmıştır. Önceden yapılan kalibrasyonlarla çıkarılan kalibrasyon eğrileri kullanılarak konsantrasyonlar zamanın fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

Bu ölçüm yöntemi, kolorimetrik yöntemle yapılan konsantrasyon ölçümü ile mukayese edilmiş ve farklılık görülmemiştir. Akış sırasında alınan ve kondaktivite ölçümleri, toplanmış numunelerde yapılan ölçümle de mukayese edilmiştir.

Akış sırasında sürekli alınan ölçümlerin heterojen yapıyı daha belirgin gösterdiği ve akış mekanizmasını ortaya koymada daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

DENEY PROSEDÜRÜ

Rezervuar modelinin 5850 cc olan gözenek hacmi %4 lük bir gözeneklilik yaratmıştır. Bu hacim su ile doldurulmuş ve 35 kPa'a basınclandırılmıştır. Model etrafında bulunan ısıticilarla sistemin sıcaklığı 110°C a çıkarılmıştır. Suyun genleşmesi nedeniyle de sisteme basınç deneylerde 102 kPa - 122 kPa arasına yükselmiştir. Bu şartlarda sisteme tek faz, su fazı bulunmaktadır. Üretim süresinde sistemin tek fazda kalmasına imkan verecek basınç düşümleri sağlanmıştır.

Basınc Testleri: 4 farklı enjeksiyon ve üretim portlarında 8 ayrı deney yapılmıştır. h / h_p 0.75/0.25 ve 0.75/0.75 de 3 deney h / h_p 0.25/0.25 ile 0.25/0.75 de 5 deney olmak üzere izleyici madde enjeksiyonundan önce ve sonra gerçekleştirilmistiir. (Tablo 1) Aynı prosedür homojen modelde de uygulanmıştır.

Sistem deney şartları için hazırlanıktan sonra basınc düşüm testi sabit debide üretim yapılarak gerçekleştirilmiş bunu takiben interferans ve daha sonra bir basınc düşüm testi yapılarak bir set deney bitirilmiştir. Bundan sonra farklı derinliklerden üretim ve enjeksiyon şartlarında aynı deneyler tekrarlanmıştır.

İzleyici Testleri : Sistem ısıtılp deney şartları hazırlanıktan sonra 4000 ppm KI solusyonu istenilen derinlikten sabit debide, 40 cc/dak, basılmağa başlanmış ve model içinde sıcaklık dağılımları her baş dakikada bir alınmıştır. Üretim ucunda soğutucu sistemin çıkışına bağlanan kondaktivite hücresi ile devamlı ölçümler alınmış ve üretim numuneleri Ölçekli mezürlerde toplanmıştır. 2000 cc KI solusyonu basıldıktan sonra düz su enjeksiyonuna devam edilmiş ve ortalama 8000 cc ek su basıldıktan sonra deneyler durdurulmuştur.

Aynı prosedür homojen sistem içinde uygulanmıştır. 10x10 cm. lik bir çatlak yüzeyinde izleyici davranışında ayrıca kurulan bir ufak modelde incelenmiş ve izleyicinin üretim profili çıkarılmıştır.

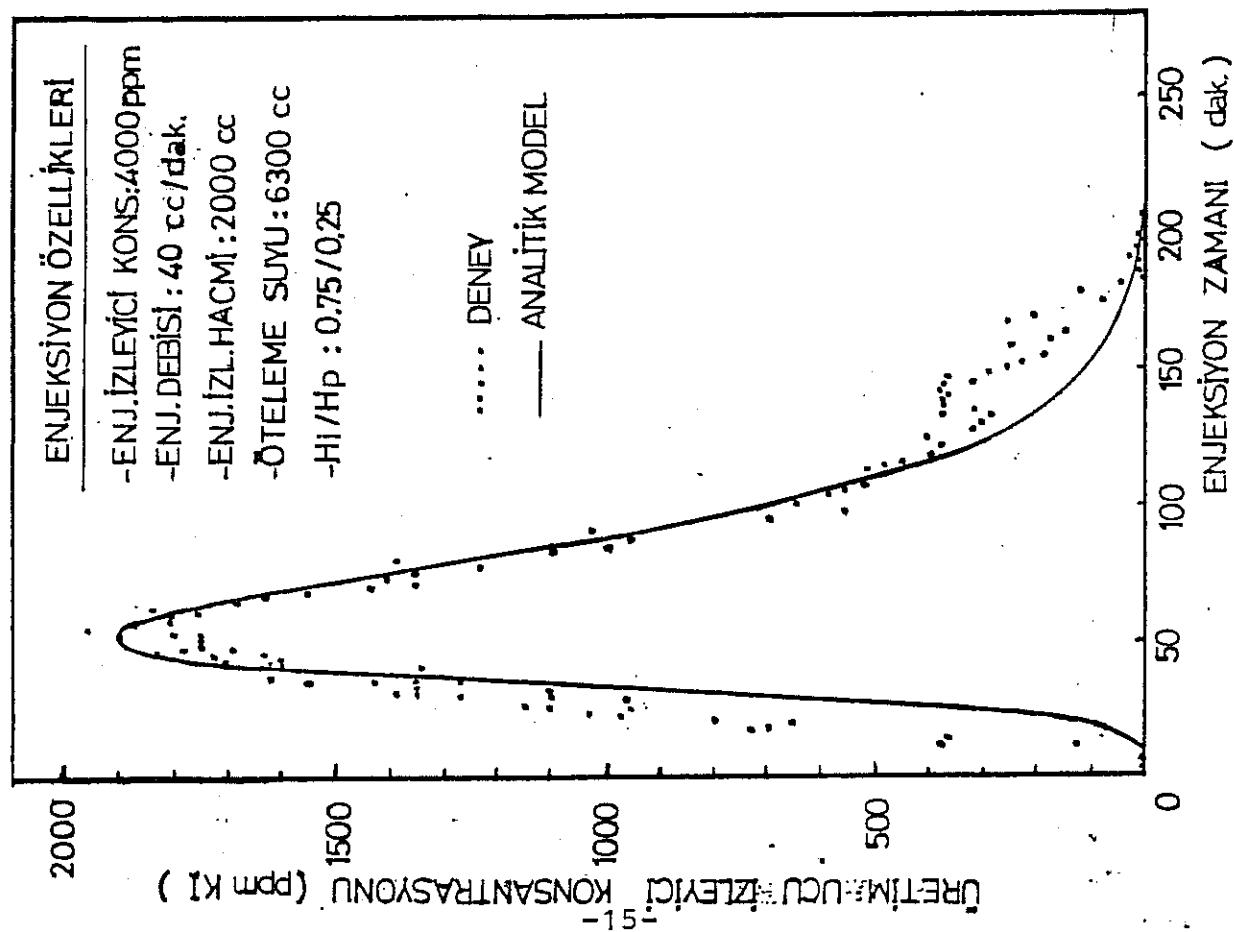
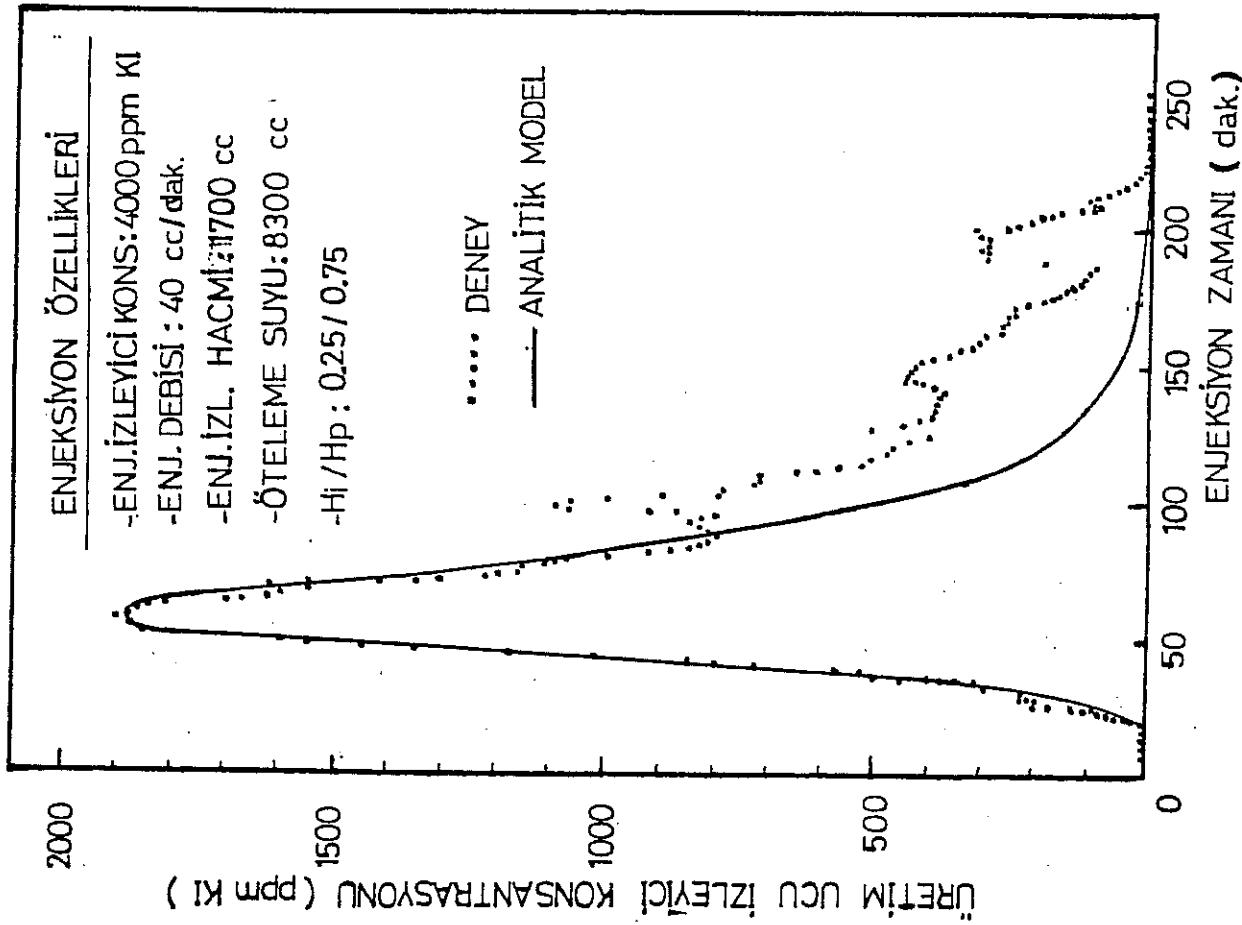
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İZLEYİCİ TESTLERİ

İzleyici üretim profilleri Şekil 3, 4, 5 ve 6 da farklı h_i ; h_p kombinasyonları için verilmiştir. Deney sonuçlarından analitik model kullanılarak en iyi uyumu veren Peclet sayısı ve τ , taşınım zamanı bulunmuştur. (Tablo 2.)

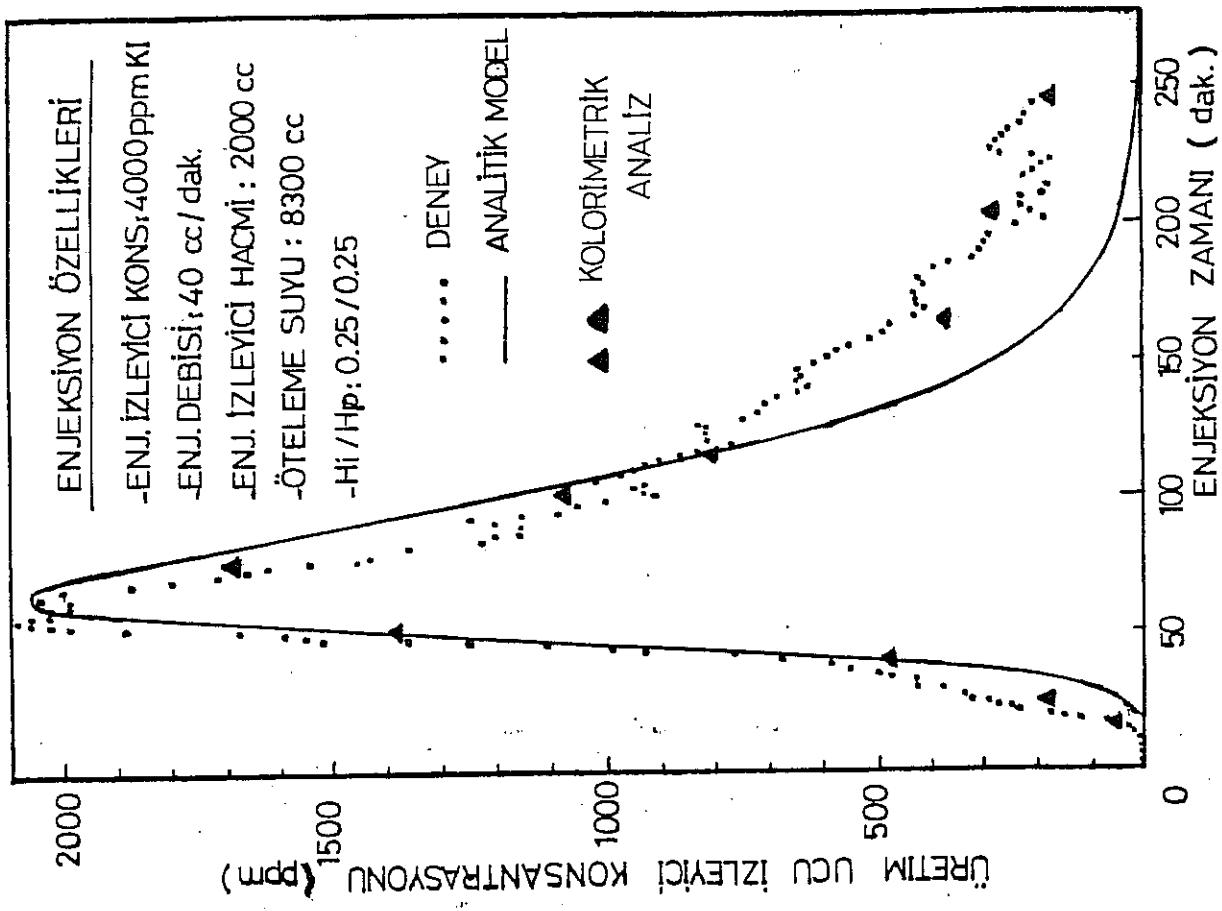
Tablo 2. Analitik Model ve deney sonuçları ile bulunan Taşınım Parametreleri

h_i/h_p	0.75/0.25	0.25/0.75	0.75/0.75	0.25/0.25	Tek catlak
taşınım zamanı τ , dak	60	62	87	77.5	6
Peclet sayısı	10.5	19.5	37.5	15.0	15
İlk varış zamanı dak, tfa	10	20	6	9	1.5
Akış hızı cm/dak	1.42	1.37	0.98	1.1	1.33
Dispersiyon katsayısi, D_L , cm^2/dak	11.5	6.0	22.2	6.2	2.4
Dispersivite α_L , cm	8.1	4.4	22.7	5.7	1.7

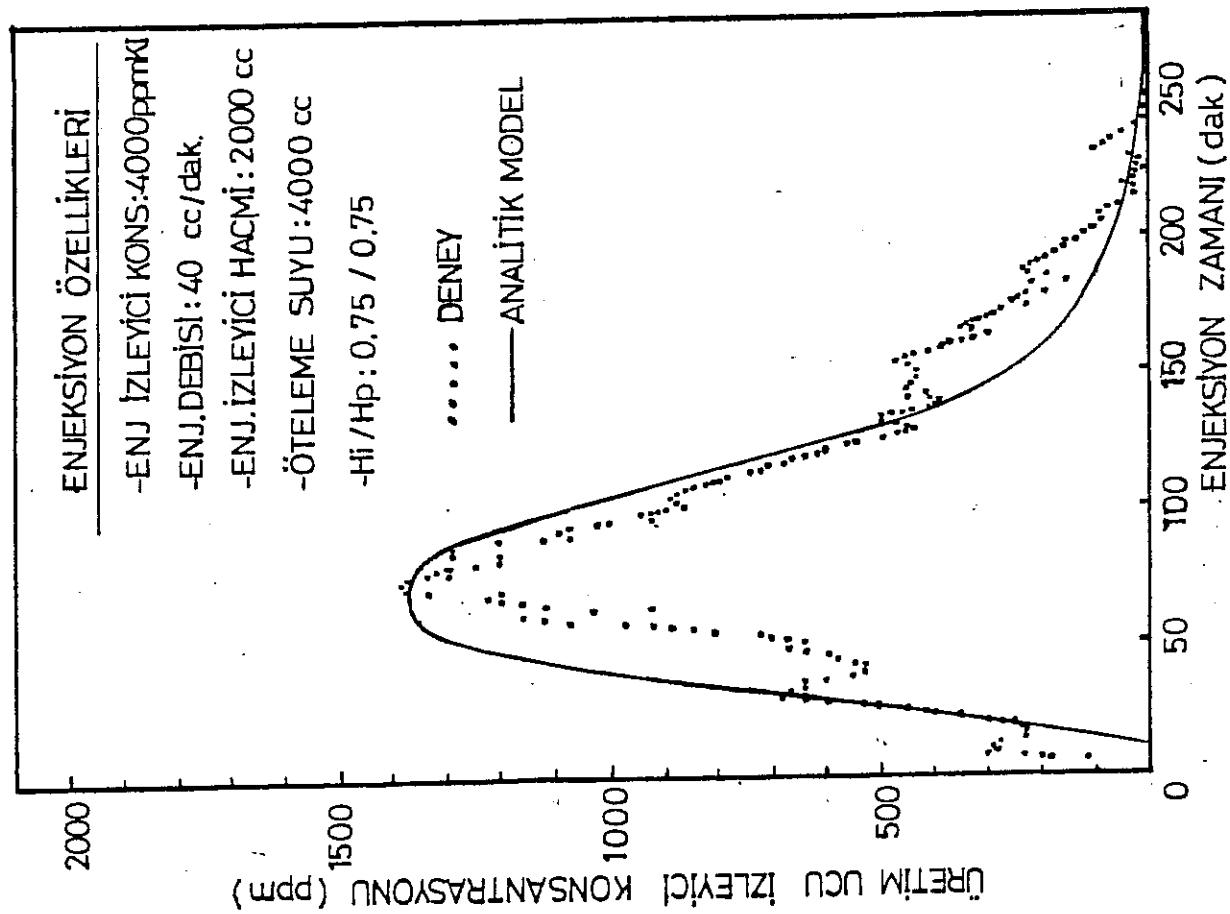


Sekil 3.

Sekil 4.



Sekil 6.



Sekil 5.

Taşınım Parametrelerinin Tesbiti :

Soğuk ve sıcak suyun karışma olayının bir göstergesi olabilecek bu katsayı Bear'ın tanımladığı

$$D_L = \frac{1}{2} L \sigma^2 V_B$$

eşitliği ile bulunabilir. Akışın dominant olduğu yolda

$$D_L = \alpha_L \cdot V_B$$

olarak taminlanmakta ve V_B sistemdeki ortalama akış hızını, α_L dispersivite sayısını göstermektedir ve

$$\alpha_L = \frac{D}{v} = \frac{L}{P_e}$$

eşitliğinden bulunmaktadır. Burada L enjeksiyon ve üretim ucu arasındaki model boyudur. Bu nedenle tanımlanan taşınım parameteleri zahiri değerlerdir.

Akışın tercih edildiği yoldaki hız ise

$$v_{ff} = \frac{L}{t_{fA}}$$

eşitliğinden hesaplanmakta ve t_{fA} , izleyicinin üretim ucundan ilk izlendiği anı göstermektedir. Hesaplanan v_{ff} ; akış yolunun ortalama geçirgenliğini, çatlak genişliğini ve boyunu hesaplamak için kullanılmıştır.

Buna göre

$$v_{ff} = \frac{k_e}{\mu} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$$

$$k_f = k_e / \phi_f$$

ϕ_f = çatlakların porozitesi

k_f = çatlakların permeabilitesi

Çatlak genişliği, b, Reiss tarafından verilen ve küp bloklar etrafında olan yatay ve dikey akış için sunulan model eşitlikleri kullanılarak bulunmuştur. Buna göre b mikron ve k_e darcy olarak

$$b = [5.55 \times 10^{-4} k_e]^{1/2}$$

Çatlak boyu a, cm olarak

$$a = \frac{1}{100} \cdot \frac{3b}{\phi_f}$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Jeotermal sistemlerde çatlakların mevcudiyeti soğuk suyun geri basımı sırasında üretim ucuna süratle harekete neden olduğu için kritik bir sonuc yaratmaktadır. Bu nedenle yukarıda tahmin yapılan parametrelerle soğuk suyun üretim ucuna ulaşma zamanı aşağıda verilen eşitlikten tahmin edilebilmektedir.

$$t_{Bt} = \left(\frac{\phi_f}{3} \right) \left(\frac{hL^2}{b.a.v_{ff}} \right) \left(\frac{V_a}{V_T} \right)$$

burada V_a/V_T ise

$$\frac{V_a}{V_T} = \frac{(1 - \phi_f) \rho_r C_r + \phi_f \rho_w C_w}{\phi_f \rho_w C_w}$$

enjeksiyon kuyusu civarında ötelenen hacimin soğuyan rezervuar hacimine olan oranı olarak tanımlanmaktadır.

Soğuma yüzeyinin hızı ise

$$v_{tf} = L/t_{BT}$$

olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3 farklı deneyler için hesaplanan çatlaklı sistem parametrelerini vermektedir.

Tablo 3. Çatlaklı Modelde Akış Parametreleri

h/h_p	0.75/0.25	0.25/0.85	0.75/0.75	0.25/0.25
v_{ff} (cm/dak)	8.5	4.25	14.2	9.4
k_f (darcy)	30.5	15.3	50.8	33.8
b (mm)	0.116	0.082	0.15	0.122
a (cm)	8.7	6.2	11.3	9.2
t_{BT} (dak)	13.5×10^4	27.8×10^4	12.3×10^4	15.7×10^4
v_{tf} (cm/dak)	6.3×10^{-4}	3×10^{-4}	6.9×10^{-4}	5.4×10^{-4}

Model içine konan mermer blokların boyutlarının $10 \times 10 \times 10$ cm olduğu düşünülecek olursa tabloda verilen "a" değerlerinin kabul edilebilir limitler içinde olduğu görülür. 20°C daki soğuk suyun ise sistemi soğutarak üretim ucuna ulaşması ortalama 100 günde olabilecektir. Buda tabii mermer blokların stokladığı ısı ener-

jisinin, kondaksiyon ile soğuk suyu ısıtması sonucu oluşan bir durumdur.

Tablo 2 ve 3'de verilen sonuçlar farklı üretim-enjeksiyon derinlikleri enjeksiyon suyunun farklı akış yollarından hareket ettiğini göstermektedir. Soğuk suyla sıcak suyun en fazla karışması $h_i/h_p : 0.75/0.75$ şartlarında oluşmuştur. Buda soğuk suyun yukarıdan basılması halinde yoğunluk fazla ve gravitenin etkisiyle daha fazla karışmaya neden olduğunu göstermektedir.

İsı kaynağına yakın (derin moktadan) yerden yapılan geri basım en düşük dispersiyon katsayısını vermiştir. Sistemde soğuk suyun uzun süre taşınıp ısınmasına imkan veren kombinasyonun tercih edileceği görülmektedir. Buda ayrıca hesaplanan etken ısı transfer katsayısı ile de görülmektedir.

Isıtılan düzlemlerdeki ısı ve kütle transfer olayını korele eden Sieder ve Tate tarafından sunulan

$$Nu = 1.86 [Re_L \cdot Pr \cdot \frac{D}{L}]^{1/3} \left[\frac{\mu_b}{\mu_s} \right]^{0.14}$$

eşitliği kullanılmıştır. Bu denklemde

$$Nu = \frac{h_m \cdot L}{k_w}$$

D = hidrolik çap

h_m = ısı transfer katsayısı

k_w = termal kondaktivite

L = sistemin boyu

$$R_{e_L} = \frac{vL}{\mu}$$

$$P_r = \frac{C_p \mu}{k_w l}$$

Peclet sayısının $P_e = R_{e_L} \cdot P_r$ olduğunu düşünerek

$$h_m = 1.86 \frac{k_w}{L} [P_e \cdot \frac{D}{L}]^{1/3}$$

olarak bulunur. $\mu_b / \mu_s \approx 1$ olarak alınmıştır.

Bu korelasyonla hesaplanan h_m değerleri Tablo 4 de verilmiştir. 110°C da mermerin k_w değeri $0.637 \text{ w/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak alınmıştır.

Tablo 4. Isı Transfer Katsayıları

h / h_p	P_e	D (cm)	$h_m (\text{w/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})$
0.75/0.75	10.5	0.229	0.43
0.25/0.75	19.5	0.162	0.47
0.75/0.75	3.75	0.296	0.33
0.25/0.25	15.0	0.241	0.49

h_m değerlerindende görüldüğü gibi ısı kaynağına en yakın noktadan yapılan basım, ısı transferi açısından en tercih edilen durumdur. Buda geri basım suyunun, rezervuarda uzun yol katetmesini sağlayacak şekilde enjeksiyonun derine yapılması sonucu, üretim ucuna çok geç ulaşacağını göstermektedir.

TEK ÇATLAK İÇİNDE İZLEYİCİ MADDE DAVRANIŞI

Ayrıca hazırlanan 10x10x3 cm boyutunda iki mermere bloğu, 0.05 cm kalınlığında telle çatlak açığı yaratılarak izleyici enjeksiyonu için hazırlanmış ve model 90°C a ısıtılmıştır.

4000 ppm KI solusyonu 1.33 cc/dak hızda ve 5 cc (1 gözenek hacmi) hacimde basılmıştır. Arkasından 25 cc su ile ötelenmiştir. Şekil 7'de verilen konsantrasyon profiline analitik model $P_e = 15$ ve taşınım zamanı $\tau = 6$ dak. en uyumlu sonucu vermiştir.

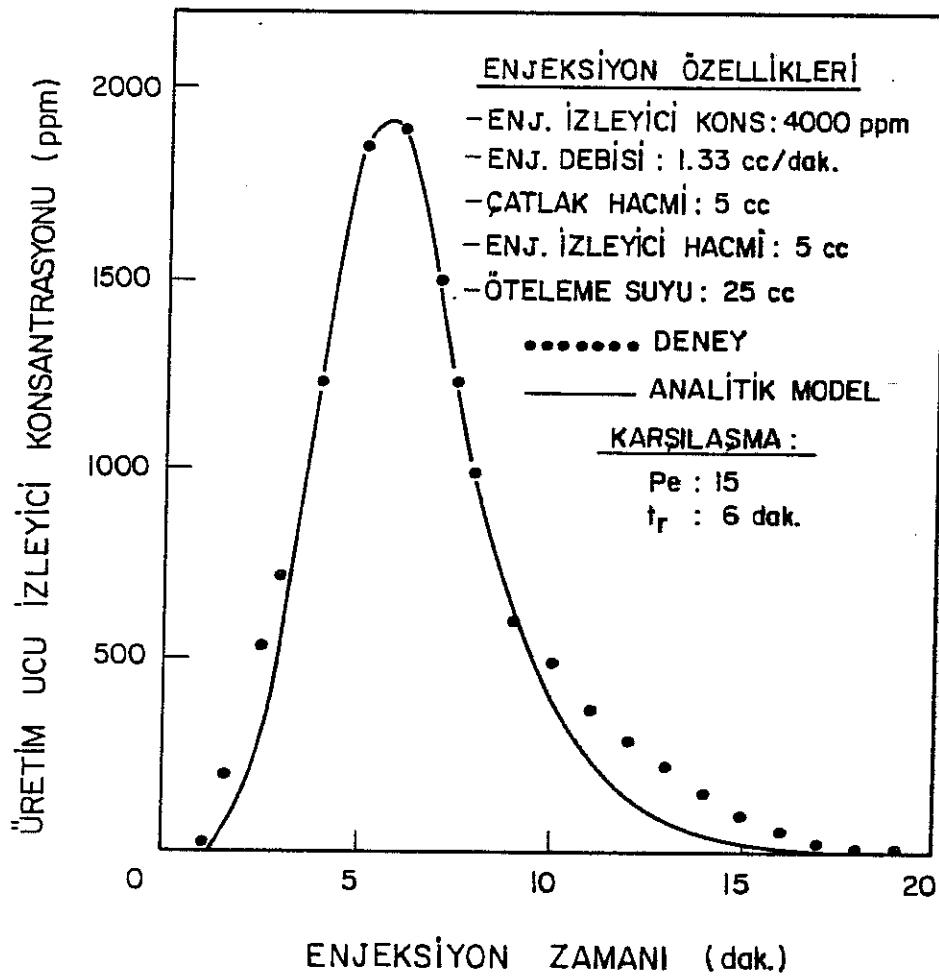
Rezervuar modelinde ve tek çatlakta yapılan deneylerde Peçlet sayısının birden çok büyük olması taşınımda konveksiyonun dispersiyona oranla daha etkin olduğunu göstermektedir.

Rezervuar modelinde geri basım sırasında oluşan sıcaklık değişimlerinden örnek Şekil 8 de verilmiştir.

HOMOJEN ORTAMDA İZLEYİCİ ENJEKSİYONU

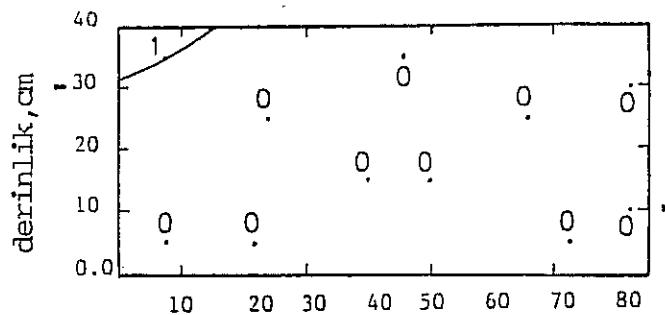
Çatlaklı rezervuar modelinde yapılan deneylere benzer şartlarda izleyici enjeksiyon homojen modelde de yapılmıştır. Deney sonuçları ve uygun analitik modelden elde edilen parametreler Şekil 9 ve 10'da verilmektedir.

Gözenekli ortamdan beklenen davranış görülmektedir. Karışma daha fazla olmuş ve izleyici poroz ortamda daha fazla yayılmıştır.

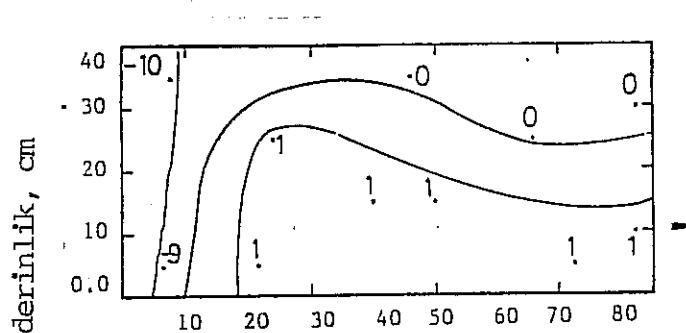


Şekil 7. Tek Çatlık Boyunca İzleyici Davranışı

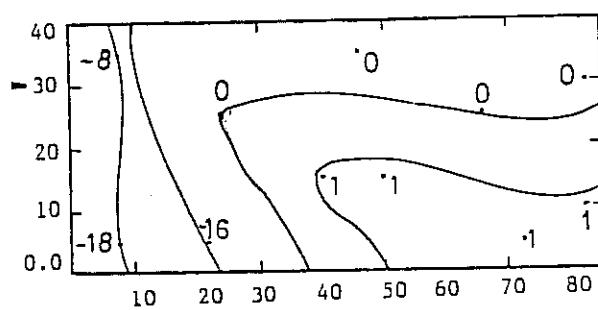
Capraz Uzaklık



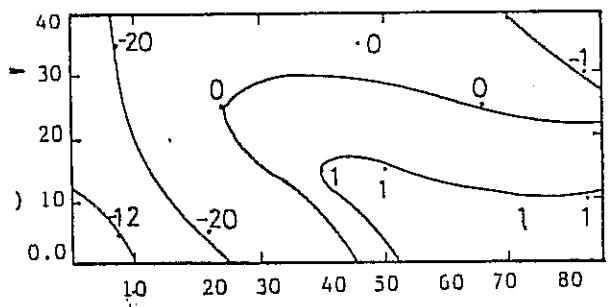
a) 5 dak. enjeksiyon



b) 40 dak. enjeksiyon

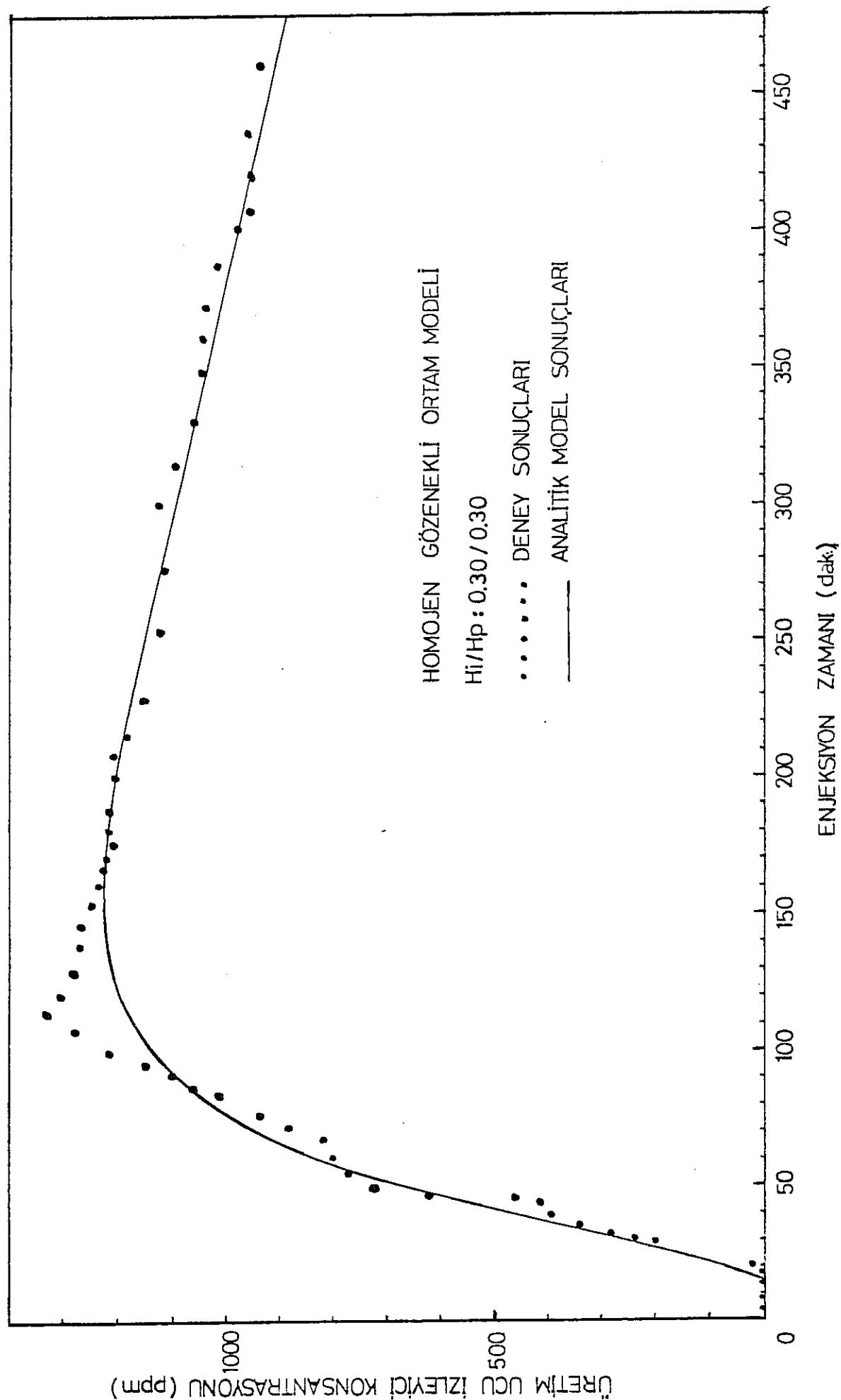


c) 90 dak. enjeksiyon

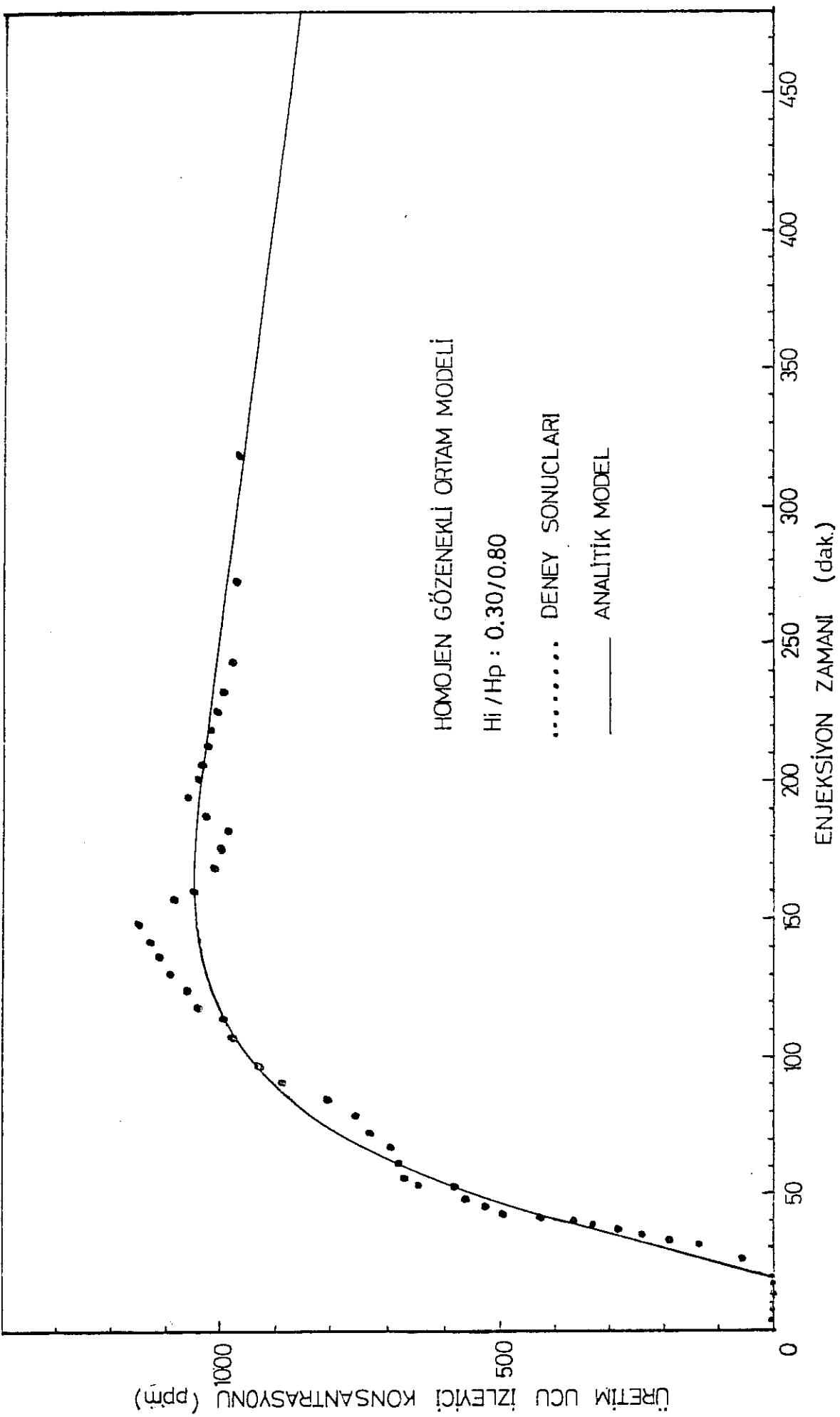


d) 110 dak. enjeksiyon

Şekil 8. Soğuk su geri basımı sırasında oluşan sıcaklık farkları $hi/hp : 0.75/0.25$



Sekil 9. Homojen Sisteme izleyici davranış
 $h_i/h_p : 0.3/0.3$



Sekil 10. Homojen Sistende İzleyici davranışları
 $hi/h_p : 0.3 / 0.8$

Basınç testlerinin yarı logaritmik ve logaritmik analizinden modellerin farklı h_i/h_p şartlarında ; $\frac{kh}{\mu}$, kh ve $\phi c_t h$ değerleri hesaplanmıştır (Tablo 6,7).

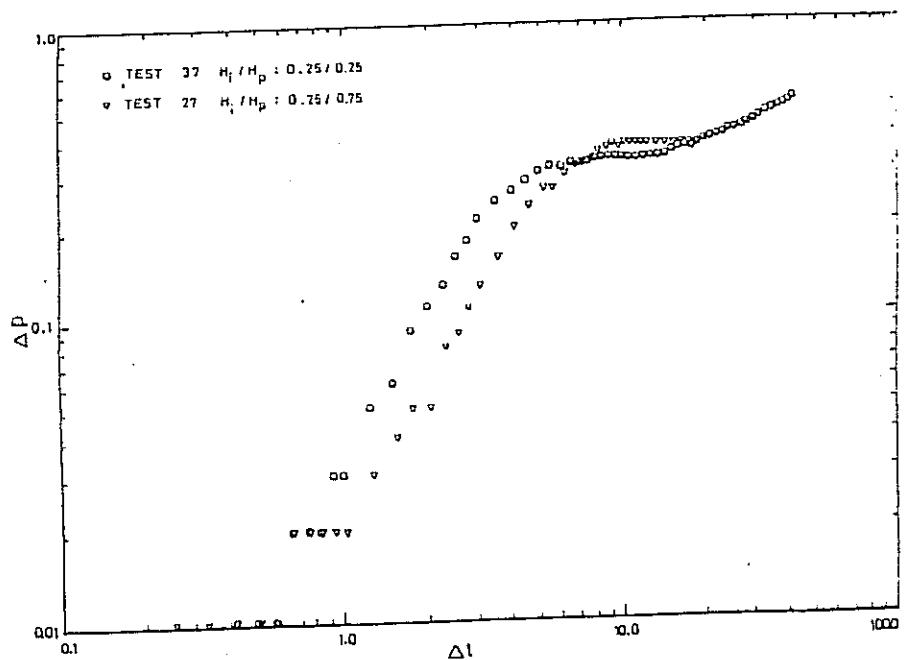
TABLO 6. ÇATLAKLI SİSTEM, BASINÇ DOŞUMU TESTLERİ, KONVANSİYONEL YARI-LOGARİTMİK ANALİZ SONUCLARI

H_i/H_T	H_p/H_T	Test No.	$\frac{kh}{\mu} \times 10^{-12}, \frac{m^3}{Pa.s}$	$kh \times 10^{-15}, m^3$	$\phi c_t h \times 10^{-9}, Pa^{-1}$	$\frac{k}{\phi \mu c_t} \times 10^{-3}, m^2/s$
0.25	0.25	37	4.6	1.25	3.1	1.48
		39	3.3	0.91	2.2	1.50
0.25	0.75	27	2.8	0.76	1.8	2.15

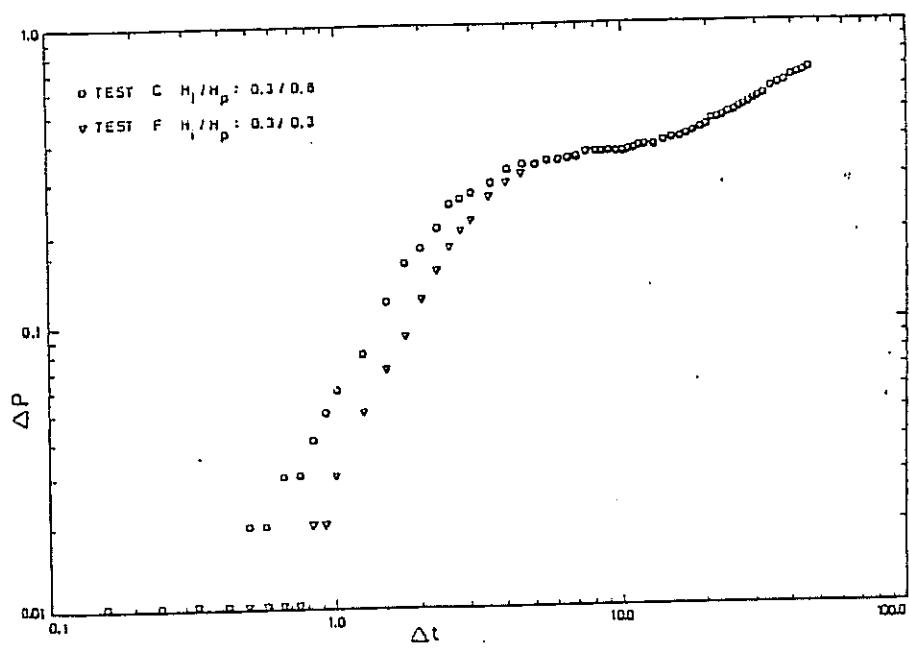
TABLO 7. HOMOJEN-GÜZENEKLİ SİSTEM KONVANSİYONEL YARI-LOGARİTMİK VE "TYPE CURVE" ANALİZ SONUCLARI

H_i/H_T	H_p/H_T	Test	$\frac{kh}{\mu} \times 10^{-12}, \frac{m^3}{Pa.s}$	$kh \times 10^{-15}, m^3$	$\phi c_t h \times 10^{-9}, m/Pa$	$\frac{k}{\phi \mu c_t} \times 10^{-3}, \frac{m^2}{s}$	$\frac{kh}{\mu} \times 10^{-12}, \frac{m^3}{Pa.s}$	$kh \times 10^{-15}, m^3$	$(\phi c_t h) \times 10^{-9}, m/Pa$	$\frac{k}{\phi \mu c_t} \times 10^{-3}, \frac{m^2}{s}$
0.3	0.8	A	2.70	7.36	2.92	0.92	> 0.98	> 2.67	> 16.1	> 0.06
		C	2.77	7.57	4.00	0.69	> 1.65	> 4.50	> 6.8	> 0.24
0.3	0.3	D	2.87	7.85	3.12	0.92	> 1.59	> 4.33	> 8.7	> 0.18
		F	2.43	6.64	2.30	1.05	> 1.25	> 3.41	> 8.8	> 0.14

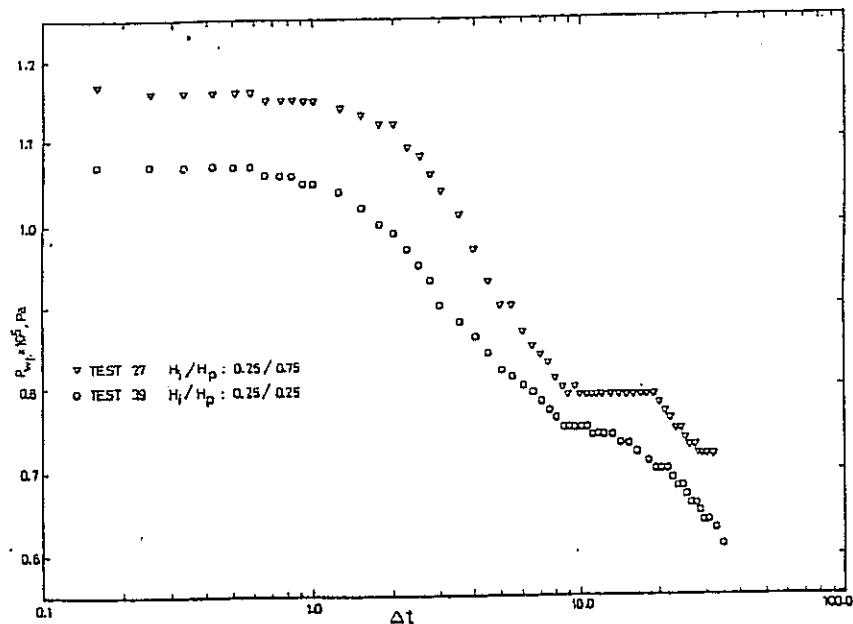
Bu deneylerin grafikleri ise Şekil 11-16 da verilmiştir.



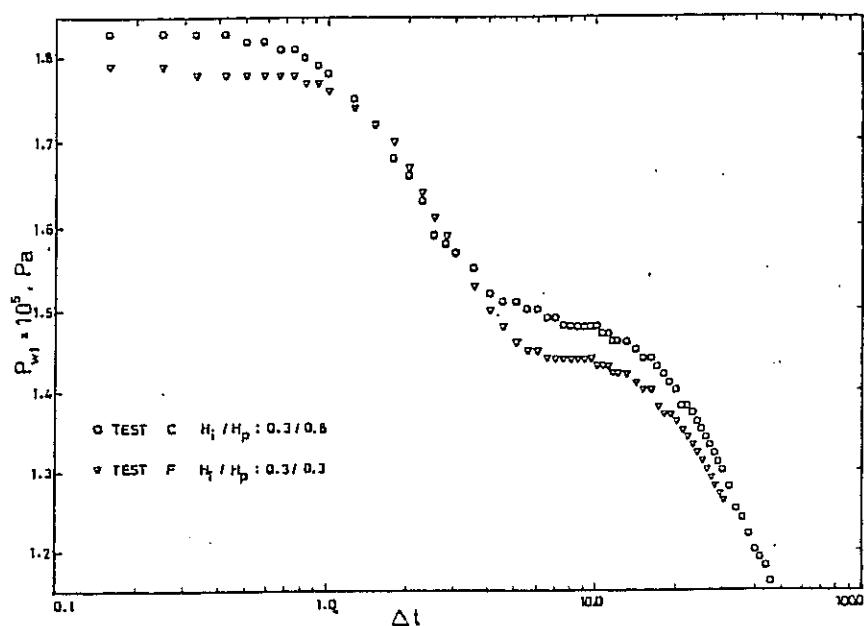
Şekil 11. Çatıaklı Sistem Basınç Düşümü Testi Log-Log Grafiği



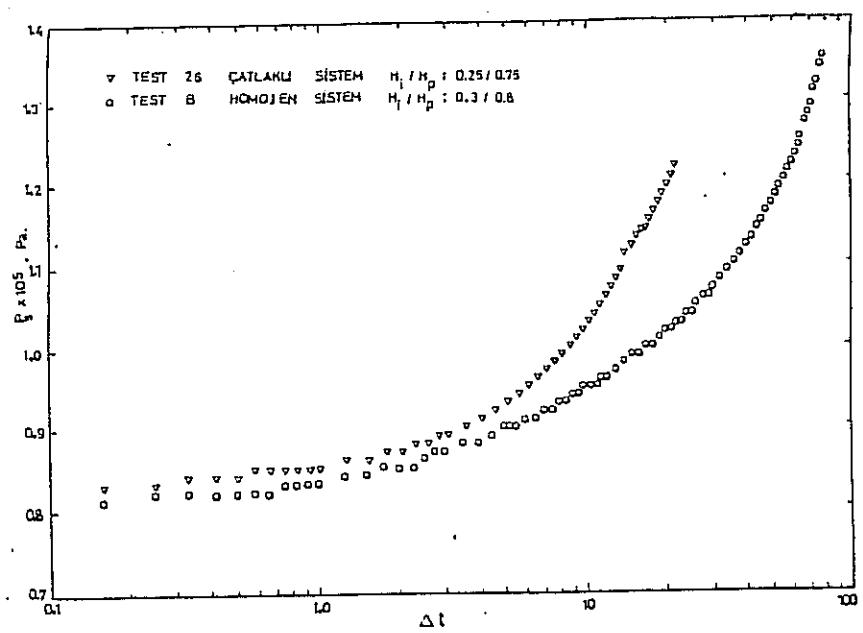
Şekil 12. Homojen Sistem Basınç Düşümü Testi Log-Log Grafiği



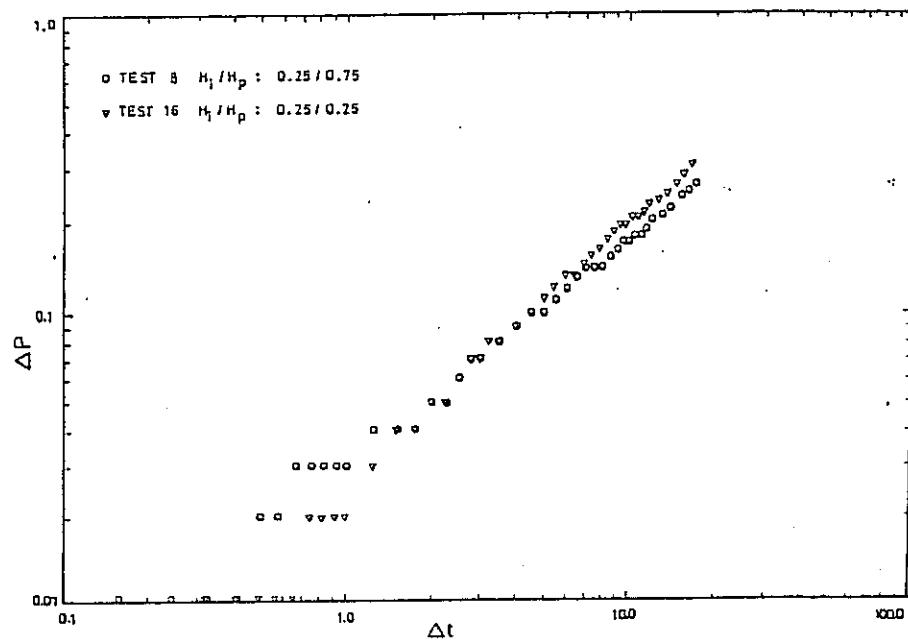
Şekil 13. Çatıaklı Sistem Basınç Düşümü Testi Konvansiyonel
Yarı-Logaritmik Analiz Grafiği



Şekil 14. Homojen Sistem Basınç Düşümü Testi Konvansiyonel
Yarı-Logaritmik Analiz Grafiği



Şekil 15. Çatıaklı ve Homojen Sistem Interferans Testi



Şekil 16. Çatıaklı Sistem Soğuk Su ile Basınç Düşümü Testi
Log-Log Grafiği

Log-log eğrilerinden Δt büyük değerlerde görülen ΔP 'deki artışın modelin sonlu hacminden gelen bir etki olduğu P_{wf} 'e karşı Δt grafiğindeki davranışından belirlenmiştir. Sistem önce sonsuz bir rezervuar olarak davranmakta, rezervuar limitleri hissedilmeğe başladığı andan itibaren yan-kararlı akış rejiminde akış sürdürmektedir. Bir başka deyisle $\frac{dP_{wf}}{dt}$ sabit olmaktadır.

Bu davranış homojen model için beklenen bir sonuç olmasına rağmen çatlaklı rezervuar modelinde beklenmemiştir. Deneyler soğuk sistemde tekrarlanmış ve aynı etki görülmüştür.

Basınç deneyleri ; çatlaklı ağı olan rezervuarlarda ve matriksin geçirgen olmadığı durumlarda da sonsuz rezervuar gibi davranışabileceklerini göstermektedir.

Interferans testlerinden, soğuk suyun modelde katettiği mesafeyi tahmin etmek mümkün olmamıştır. Buna sebep, enjeksiyon suyunun süratle ısınarak hareket etmesi ve aykırı $\frac{k}{\mu}$ değerlerinin akış sırasında oluşarak bir soğuk akış düzlemi oluşturamamasıdır.

SONUÇ

Laboratuvara yapılmış ve jeotermal rezervuarları simule eden iki ayrı modelde yapılan izleyici enjeksiyonu ve basınc testleri ile rezervuar modellerinin akış parametreleri ve ısı taşınım parametrelerinin tahmini yapılmış ve bilinen model değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel sonunda izleyici taşınım modeli olarak kullanılan analitik model ile deney sonuçlarının belli bir uyumu sağlanmış ve kütte taşınım parametrelerinden çatlakların geçirgenliği, çatlak genişliği değerleri hesaplanmıştır.

Basınc testlerinden rezervuar modelinin ortalama geçirgenlik ve storativite değerleri saptanabilmiştir. Geri basım suyunun tercih ettiği akış yollarının özelliklerini tahmin etmek mümkün olmamıştır.

Homojen rezervuarı simule eden modelde gözenekli ortamın özellikleri belirgin olarak saptanmış ve izleyici transfer modelinden gene istenen parametreler elde edilmiştir.

Her iki modelde de uygulanan deney şartlarında konveksiyonun, dispersiyona oranla daha etkin bir mekanizma olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Horne, R.N., "Effects of Water Injection into Fractured Geothermal Reservoirs : Summary of Experience Worldwide", Stanford Geothermal Program, SGP-TR-S7, USA, Haziran 1982.
2. Nakamura, H., "Development and Utilization of Geothermal Energy in Japan", GRC Transactions, cilt 5, 33, 1981.
3. Sauty, J.P., "An Analysis of Hydrodispersive Transfer in Aquifers", Water Resources Research, 1980, 16-1, 145-158.
4. Matthews, C.S., Russell, D.G., "Pressure Buildup and Flow Tests in Wells", SPE Monograph Series, 1.
5. Earlougher, R.C., "Advances in Well Test Analysis", SPE Monograph Series 5.