

SIVININ HAKİM OLDUĞU JEOTERMAL REZERVUARLARDA KUYU BASINÇ VE SICAKLIK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Yıldırım PALABIYIK
Ömer İnanç TÜREYEN
Mustafa ONUR
Melek DENİZ

ÖZET

Bu çalışmada, tek-faz sıvının hakim olduğu jeotermal sistemler için kuyu içinde basınç ve sıcaklık davranışını simüle edebilecek izotermal olmayan bir rezervuar modeli geliştirilmiştir. Model, rezervuar için kütle dengesi ve enerji dengesi denklemlerinin eş zamanlı çözümü esasına dayanmaktadır. Geliştirilen model aynı zamanda kuyu sıcaklığının gerçekçi simülasyonlarını yapabilmek için rezervuardan alt ve üst tabakalara olan ısı kayıplarını da modelleyebilmektedir. Doğrusal olmayan denklem takımları tamamen kapalı bir biçimde Newton yöntemi ile çözülmektedir. Model 2-boyutlu (r - z) silindriktir ve bu sayede kuyu dibi sıcaklık ve basınçlarının gerçekçi tanımlamalarını sağlamaktadır. Bu modelle özellikle çalışmanın ana odak noktası olan sıcaklığın kararsız akış dönemindeki davranışları ve çeşitli formasyon ve kuyu özelliklerinin basınç ve sıcaklık davranışları üzerine duyarlılıkları çalışılmıştır. Bu çalışmada ele alınan sentetik örnekler kuyu dibi sıcaklığının gözeneklilik, zar faktörü ve geçirgenlik gibi diğer parametrelere kıyasla en çok kayaç ısıl iletkenliğine duyarlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Tek-faz sıvı, Jeotermal sistem, Sıcaklık davranışı, Formasyon ve kuyu özellikleri, Duyarlılık.

ABSTRACT

In this study, a non-isothermal reservoir simulator that is capable of rigorously simulating both pressure and temperature behaviors of single-phase liquid-dominated geothermal systems is presented. The model is based on solving the mass and energy balance equations for the reservoir simultaneously. The model is also capable of simulating heat losses from the reservoir to the strata enabling realistic simulations of temperature to be made in the well. All equations are solved in a fully implicit manner using the well-known Newton's method for handling the non-linearity. The model is 2D (r - z) cylindrical and hence provides realistic descriptions of wellbore pressure and temperature behaviors. The transient behaviors of especially temperature, which is the main focus of the study, and various sensitivities of formation and well properties on the pressure and temperature responses have been studied by using the model developed. The synthetic examples considered in this study have shown that the wellbore temperature shows the most significant sensitivity to rock thermal conductivity among the other parameters, such as porosity, skin and permeability, considered for this investigation.

Key Words: Single-phase liquid, Geothermal system, Temperature behavior, Formation and well properties, Sensitivity.

1. GİRİŞ

Sıcaklık ölçümleri kuyu testi uygulamalarında düzenli olarak kaydedilmesine rağmen, rezervuar karakterizasyonunda genellikle ihmal edilmektedir. Ancak, rezervuar karakterizasyonu açısından sıcaklık verisinin araştırılması son zamanlarda birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir. Bu çalışmanın ana amacı, tek-faz sıvının hakim olduğu jeotermal sistemlerdeki rezervuar karakterizasyonu için sıcaklık davranışının (kuyu dibi veya kuyu boyunca gözlem noktalarında) özellikle sabit ve değişken debili üretim ve enjeksiyon durumları için bu çalışma kapsamında geliştirilen izotermal olmayan tek-fazlı simülatör ile araştırılmasıdır.

Jeotermal rezervuar karakterizasyonu için sıcaklık ölçümlerinin kullanımı bir jeotermal sistemin sıcaklık davranışını simüle edebilen ileri bir model kullanımını gerektirir. Jeotermal rezervuarlar lumped (veya tank) parametre modelleri ve sayısal modeller olarak başlıca 2 yaklaşımla modellenmektedir. İlk sunulan lumped parametre modelleri izotermal akış varsayımı yapan modellerdir [1-5]. Daha sonra tek tank kapalı ya da beslenmeli tank modelleri olarak idealleştirilen sıvı hakim bir jeotermal rezervuarın hem basınç hem de sıcaklık davranışını tahmin etmek için izotermal olmayan bir lumped parametre modeli önerilmiştir. Bu model, ortalama rezervuar basınç ve sıcaklık verilerine birlikte tarihsel çakıştırma yapılırsa, rezervuar hacmi ve gözeneklilik gibi rezervuar parametrelerini belirlemenin mümkün olabileceğini göstermiştir [6]. Daha sonra, bu çalışmayı temel alan başka bir çalışmayla çok tanklı izotermal olmayan modeller için geliştirilmiştir [7]. Ancak, tüm bu çalışmalarda, lumped parametre modellemesi kullanıldığı için, basınç ve sıcaklığın çeşitli formasyon ve kuyu özelliklerine (geçirgenlik, gözeneklilik, zar faktörü vb.) olan duyarlılıklarıyla birlikte uzaysal değişimleri modellenemez ve araştırılmaz.

Analitik veya yarı-analitik çözümlere bağlı modellerin çoğu kütle ve ısı dengesi denklemlerindeki kayaç ve akışkan özelliklerinin basınç ve sıcaklıktan bağımsız (sabit) olduğunu varsaymaktadır. Ancak bu varsayımlar altında, kütle denge denklemini ısı akış denkleminde bağımsız bir şekilde analitik veya yarı-analitik olarak çözmek mümkün olmaktadır. Daha önceki analitik çözümler birçok basitleştirme varsayımı altında (kayaç/akışkan özelliklerinin basınç ve sıcaklıktan bağımsız olma, rezervuar içerisinde sabit akışkan hızı vb.) rezervuardaki sıcaklık davranışını tahmin etmek amacıyla birçok problem için verilmiştir [8].

Bu konudaki analitik ve yarı-analitik çözümler üzerine odaklanan güncel çalışmalar mevcuttur [9, 10, 11]. Bunlardan ilki analitik olarak sıcaklık davranışını hesaplamak için karakteristikler yöntemi ("method of characteristics") kullanırken [9], diğer bir tanesi operatör-ayrıştırma yöntemi ("operator-splitting and time stepping") kullanarak basınç ve sıcaklık davranışını modellemiştir [10]. Her iki çözüm de çözümleri değerlendirmek için zaman adımlaması gerektirdiğinden yarı-analitiktir. Sonraki çalışmalarda sunulan analitik yöntemin [10, 11] ilk sunulan modele [9] kıyasla önemli üstünlüğü, sonrakilerin rezervuar içerisinde hem ısı iletimini ("conductive heat transfer") hem de ısı aktarım/taşınımını ("convective heat transfer") dikkate almasıdır [10, 11]. İlk çalışma ise, sadece ısı aktarım/taşınımıyla ısı transferini dikkate almaktadır [9]. Bu çalışmalarda, kuyu içerisindeki üretim bölgesinde yapılacak sıcaklık ölçüm verilerinden kuyu civarındaki zar faktörü bölgesi ile rezervuar geçirgenliği ve gözenekliliği hakkında önemli bilgilere ulaşılabileceği gösterilmiştir [9, 10, 11]. Ayrıca, bu çalışmalardan biriyle sıcaklık verilerinden üretim debisi verisinin de tahmin edilebileceği gösterilmiştir [10]. Ancak, ilk çalışmada belirtildiği gibi, yukarıdaki sonuçlar kuyu içerisindeki sıcaklık ve kuyu içi depolaması etkilerinin ihmal edilebileceği ve debilerin çok yüksek olduğu durumlarda geçerli olabilmektedir. Dolayısıyla, daha doğru sıcaklık çözümlerinin elde edilmesi için daha genel sayısal çözümlerin kullanılmasını önermişlerdir [9].

Bu konu ile ilgili literatürde önemli sayılabilecek sayısal modeller bulunmaktadır [12, 13, 14]. Bunlardan birinde, petrol, su ve kayaç bileşenlerinin olduğu bir sistemin basınç ve sıcaklık davranışını tahmin etmek için kütle ve enerji korunum denklemlerini birleştiren, ancak 1B çevrel (radyal) bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmayla, rezervuar akışkanlarının Joule-Thomson genleşmesi nedeniyle rezervuar içerisindeki izotermal olmayan basınç ve sıcaklık davranışları ortaya konulmuştur [12]. Diğer bir çalışmada ise, 2B (r-z) tabakalı sistemlerde tek-fazlı sıvı akışı durumunda sıcaklık davranışını çalışmak için 2B (r-z) bir simülatör geliştirilmiştir. Çalışmanın en önemli sonucu, tabakalı sistemlerde kuyu civarı hasar bölgesi yarıçapı ve geçirgenliğinin sıcaklık verilerine duyarlı olduğudur [13]. Çalışmada geliştirilen enerji dengesi denklemi Joule-Thomson, termal genleşme vb. etkileri içerecek

kadar genel olmakla beraber, enerji dengesi denkleminde gerekli basıncın zamansal ve konumsal değişimleri, izotermal akış ve az sıkıştırılabilirlikli akışkan akışı varsayımı altında geliştirilmiş kütle dengesi (veya basınç) denkleminde hesaplanmaktadır. Bu tür çözümler fiziksel olarak tam doğru değildir. Çünkü gerçek durumda enerji ve kütle dengesi denklemlerindeki katsayılar hem basınç hem de sıcaklığa bağlı olduğundan (örneğin akışkan yoğunluğu, akmazlığı vs. gibi) bu iki denge denkleminin birbirine bağımlı olarak çözümlenmesi gerekir. Bu varsayım, esasen daha önce bahsedilen iki çalışmadaki [9, 10] yarı-analitik çözümlerde kullanılan varsayımdır. Bu sebeple, bu çözümler izotermal olmayan koşullar altında basınç ve sıcaklığı en genel şekilde modelleyemez. Bir diğer sayısal modelleme çalışmasında, geçirgenlik (hasar bölgesi dışındaki bölgede), gözeneklilik, hasar bölgesi yarıçapı ve geçirgenliği, ölçülmüş sıcaklık ve basınç verilerine karşılaştırma ile belirlenmek üzere gradyan tabanlı en-küçük-kareler yöntemi ile ters çözümleme yapan bir algoritma sunulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen en önemli sonuç, sıcaklık ölçüm verilerinden gürültü düzeyi çok yüksek olmadığı sürece söz konusu parametrelerin sıcaklık verilerinden güvenilir olarak bulunabileceğinin belirtilmesidir [14].

Kararsız sıcaklık verilerinin bilgi içeriğini araştırmaya yönelik bir diğer çalışmada 3B (x-y-z) sisteminden kütle ve enerji dengesi denklemlerinin birlikte sayısal çözümlenmesi üzerine kurulmuş bir "ileri" ("forward") model ile sıcaklık verilerine kümeli Kalman filtresi yöntemi ile karşılaştırma yapılarak rezervuar içerisindeki geçirgenlik ve gözeneklilik dağılımlarının ters ("inverse") çözümlenmesi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen en önemli sonuç, sıcaklık verilerinin geçirgenliğe göre gözeneklilik dağılımı hakkında daha fazla bilgi içerdiğinin iddia edilmesidir [15].

Daha önce de değinildiği gibi, bu çalışmanın amacı tek-faz sıvının hakim olduğu jeotermal bir rezervuar için kuyu dibi veya kuyu boyunca gözlem noktalarında üretim ve enjeksiyon durumları için basınç ve sıcaklık davranışlarını ve duyarlılıkları araştırmaktır. Bu amaçla, yukarıda bahsedilen analitik, yarı-analitik ve bazı sayısal modellerdeki kısıtları kaldıran 2B (r-z) tamamen kapalı olarak bir sayısal model geliştirilmiştir.

Bildiri aşağıdaki şekilde organize edilmiştir: İlk olarak, modelin geliştirilmesi sunulacaktır. Daha sonra ise, modelin iyi bilinen ticari bir simülasyon ile doğrulanması verilecektir. Son olarak, basınç ve sıcaklık davranışları üzerine çeşitli rezervuar ve kuyu özelliklerinin etkilerinin gösterildiği örnekler sunulacaktır.

2. MODELİN GELİŞTİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında geliştirilen sayısal simülasyon en genel şekilde ısı aktarımını/taşımasını ve bitişik tabakalara olan kondüktif ısı kayıplarını sisteme dahil etmek için kütle dengesi, Darcy denklemi ve enerji dengesini dikkate almaktadır. Bitişik tabakalara olan kondüktif ısı kaybı alt ve üst tabakalara sıcaklık gradyanları atayarak modellenmektedir. Model, sıcak suyun üretimi ve/veya düşük sıcaklıklı suyun rezervuara enjeksiyonundan kaynaklanan basınç ve sıcaklık davranışını ve değişken üretim ve enjeksiyon debi tarihçelerini modelleyebilmektedir.

Sayısal modelle rezervuar birçok hücreye bölünerek her bir hücreye kütle ve/veya enerjinin korunumu kanunları uygulanacak ve bu sayede elde edilen denklemler, sayısal bir teknik olan sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülecektir. Doğrusal olmayan kütle ve enerji denge denklemleri tamamen kapalı olarak iyi bilinen Newton-Raphson yöntemi kullanılarak çözülmektedir. Modelle basınç ve sıcaklık davranışları ile basınç ve sıcaklık davranışları üzerine formasyon ve kuyu özelliklerinin duyarlılığı araştırılmaktadır. İlerleyen bölümlerde 2 boyutlu (r-z) sayısal modelinin geliştirilmesinde kullanılan ana denklemler kısaca özetlenmektedir. Kısmi diferansiyel denklemlerin ve sonlu fark denklemlerinin ayrıntılı türetilmesi burada verilmeyecektir. Denklemlerin ayrıntılı türetilmesi, bu bildirinin ilk yazarının doktora tez çalışmasında bulunmaktadır [16].

2.1. Modelin Rezervuar Denklemleri

Kayaç ve sıvı fazları için kütle ve enerji denge denklemleri çözülmektedir. 2B (r-z) koordinat sisteminde kütle korunumunu tanımlayan kısmi diferansiyel denklem aşağıda verilmektedir:

$$\frac{\partial(\rho_w \phi)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho_w r v_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_w v_z) = 0 \quad (1)$$

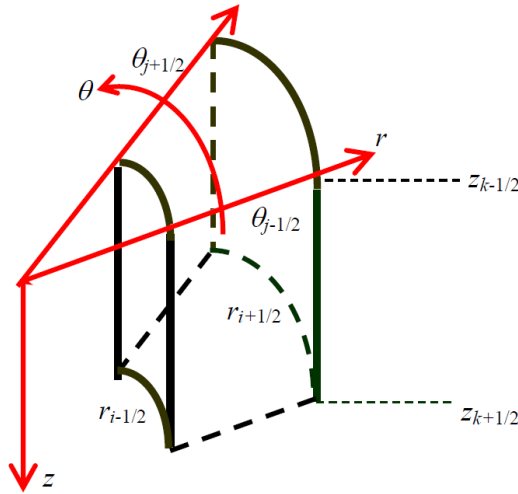
Enerji korunum denklemini tanımlayan kısmi diferansiyel denklem aşağıda verilmektedir [17]:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi \rho_w U_w + (1-\phi) \rho_s C_{p,s} T] = -(\nabla \cdot \rho_w H_w \vec{v}_w) - (\nabla \cdot \tilde{q}) \quad (2)$$

Denklem 2'nin sol tarafındaki terim birim rezervuar hacmi başına iç enerjinin zamansal birikimini tanımlamaktadır. Denklemi 2'nin sağ tarafındaki ilk terim, aktarım/taşıma (konveksiyon) nedeniyle meydana gelen ısı transferini; ikinci terim ise, kondüksiyonla oluşan ısı transferini temsil etmektedir. Denklemlerde kullanılan bütün semboller ve birimleri Terminoloji bölümünde verilmektedir.

Bu modelleme çalışmasında, yerçekimi etkisi ihmal edilmiştir ve katı kayaç ile akışkan fazları arasında yerel ısıl denge olduğu varsayılmıştır. Çünkü ısı hem katı kayaç hem de akışkanda depolanmaktadır.

Denklem 1 ve 2, r_i , θ_j , z_k 'nin i , j , k gridbloğunun geometrik merkezi olduğu ve Şekil 1'de gösterilen gridblok düşünülerek ayrık formda yazılmıştır. Şekil 1'deki gridblok 3B olarak gösterilmesine rağmen, bu çalışmada sadece r ve z yönünde akış göz önüne alınmaktadır.



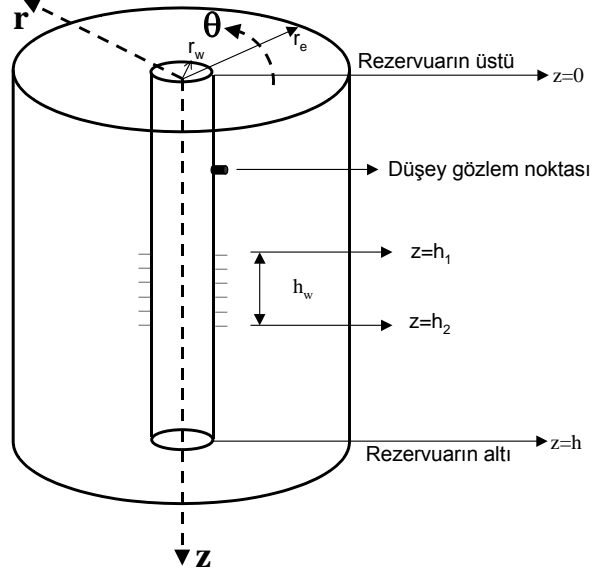
Şekil 1. 3B (r-θ-z) gridblok gösterimi.

2.2. Modelin Kuyu Denklemleri

Kütle ve enerji korunum denklemleri basınç ve sıcaklık için iç sınır (kuyu) koşulları olarak kullanılmaktadır. Örneğin, üretim/enjeksiyon kuyu debisi için iç sınır koşulu denklemi Şekil 2'de gösterilen sistem için aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$V^w \frac{\partial(\rho_w^w)}{\partial t} = (\rho_w^w q_z^w)_{z=0} + q_m^R \quad (3)$$

Burada “w” alt indisi ve “w” üst indisi sırasıyla su ve kuyuyu temsil etmek için kullanılmaktadır. Denklem 3’te, V^w ve q_z^w sırasıyla kuyu hacmi ($z = 0$ ’dan $z = h$ ’a) ve kuyudaki hacimsel debiyi temsil etmektedir ($z = 0$ ’da). q_z^w kuyudan üretim durumunda negatif (-), enjeksiyon durumu için pozitif (+) ve kapama dönemi için $q_z^w = 0$ olarak alınır. Denklem 3’te, q_m^R kaynak terimidir ve rezervuardan kuyuya giren kütleli debiyi temsil eder:



Şekil 2. Tek hücreli kuyu/rezervuar modelinin 3B (r - θ - z) gösterimi.

$$q_m^R = (\rho_w q_{sf})_{r=r_w, h_1 \leq z \leq h_2} = 2\pi \int_{h_1}^{h_2} \left[\rho_w(z, r) \frac{k_r(r, z)}{\mu_w(r, z)} r \frac{\partial p}{\partial r} \right]_{r=r_w, z} dz \quad (4)$$

Eğer z -yönünde konveksiyon ve kondüksiyonla ısı kayıpları ile viskoz yayılma (“viscous dissipation”) nedeniyle enerji kaybı terimi Şekil 2’de gösterilen kuyu modelinde ihmal edilirse, kuyu için enerji korunum denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$V_w^w \frac{d}{dt} (\rho_w^w U_w^w) = (\rho_w H_w q_{sf})_{r=r_w, h_1 \leq z \leq h_2} + (\rho_w^w H_w^w q_z^w)_{0 \leq r \leq r_w, z=0} - 2\pi r_w \hat{U} (T^w - T(r_w^+, z)) \quad (5)$$

Bu çalışmada kuyu kaynak (source or sink) terimi olarak düşünüldüğünden, Denklem 5’in sol tarafındaki terim sifıra yakınsamaktadır. Denklem 5’in sağ tarafındaki son terim, kuyu ve rezervuar arasındaki konvektif ve kondüktif ısı kayıplarını temsil eder ve \hat{U} sistem için toplam ısı transfer katsayısıdır [18]. Bu çalışmada, kuyu ve rezervuar arasındaki konvektif ve kondüktif ısı kayıpları ihmal edilmiştir. Bu durum toplam ısı transfer katsayısı \hat{U} ’nın sıfır olarak varsayıldığı anlamına gelir.

2.3. Dış Sınır ve Başlangıç Koşulları

Sistem denklemlerini tamamlamak için, dış sınır koşullarının da belirlenmesi gerekir. Çalışmadaki formülasyon, hem akışa kapalı (no-flow) hem de sabit basınçlı dış sınır koşulları ile ısı akışına kapalı (no-heat flux) veya sabit sıcaklıklı dış sınır koşullarını modelleyebilecek şekilde geneldir.

Başlangıç koşulları olarak, sabit veya değişken başlangıç basınç (p^0) ve sıcaklık (T^0) dağılımları düşünülebilmektedir.

3. MODELİN DOĞRULANMASI

Bu kısımda, modelin doğrulanması için iyi bilinen rezervuar simülatorü Tough2'ye bağlı ticari bir termal yazılım olan PetraSim ile farklı üretim ve enjeksiyon senaryoları için gerçekleştirilen kıyaslamalar verilmektedir [19, 20]. Burada, geliştirilen model 2B (r - z) sistem için rezervuar dış sınırı ($r = r_e$) kapalı (kütle ve ısı akışına) şekilde kıyaslamalar yapılmıştır. Rezervuardan bitişik tabakalara olan ısı kaybı ($z = 0$ ve $z = h$ 'da) hem doğrulama hem de uygulama (gelecek bölümde tartışılacak) örneklerinde sistem içerisine dahil edilmiştir. Ancak, en azından bu çalışmada göze alınan örnekler için, bitişik tabakalara olan ısı kayıplarının basınç ve sıcaklık davranışları üzerine önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Doğrulama ve uygulama örneklerinde, kuyu kaynak olarak değerlendirildiği için, kuyu hacminin her iki simülator için de çok küçük olduğu varsayılmıştır (geliştirilen model ve PetraSim için).

3.1. Sabit Debide Enjeksiyon Uygulaması

Bu senaryoda, tamamen akışa açık düşey bir kuyuda 1 kg/s'lik sabit kütleli debide 333.15K sıcaklıktaki suyla enjeksiyon yapılmaktadır. Bu örnekte kullanılan diğer ilgili rezervuar parametreleri Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. 2B (r - z) sistem için rezervuar verisi.

Parametre	Değer
N_r	20
N_z	9
P^0 , kPa	10000
T^0 , K	413.15
r_w , m	0.1
r_e , m	1000
h , m	100
ϕ	0.2
k , m ²	1×10^{-13}
c_{s1} , 1/kPa	2.9×10^{-7}
β_{s1} , 1/K	0
$C_{p,s1}$, J/m ³ K	2.65×10^6
λ_t , J/msK	2.92
q_m , kg/s	1

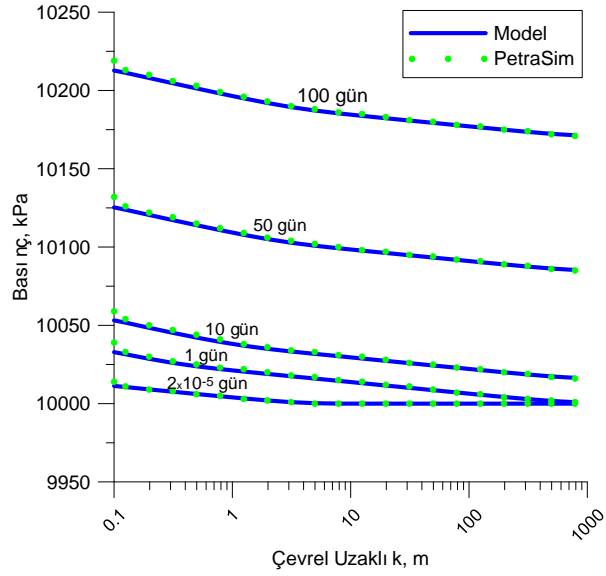
Şekil 3 ve 4 model ve PetraSim için rezervuar içerisinde radyal yönde sırasıyla basınç ve sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Şekillerden görülebildiği gibi, her iki simülatorün hem basınç hem de sıcaklık davranışları bütün zaman dönemlerinde mükemmel bir çakışma sergilemektedir (2×10^{-5} günden 1000 güne kadar).

Şekil 5 ve 6 model ve PetraSim için zamanın fonksiyonu olarak sırasıyla basınç ve sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Şekillerden görülebildiği gibi, her iki simülatorün hem basınç hem de sıcaklık davranışları çok iyi bir çakışma sergilemektedir.

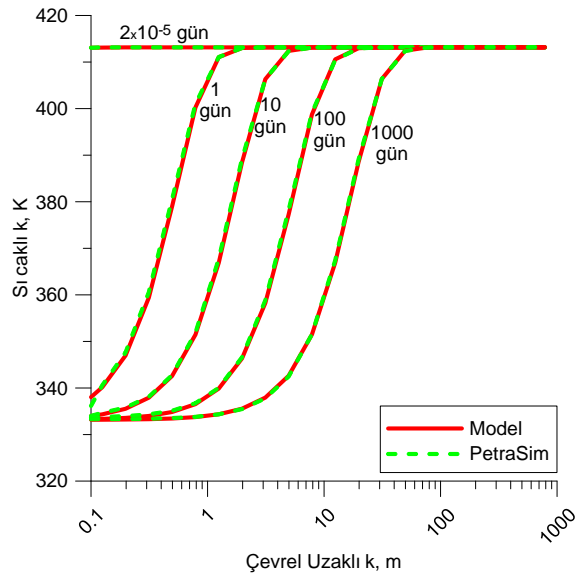
3.2. Sabit Debide Üretim Uygulaması

Bu senaryoda, tamamen akışa açık düşey bir kuyuda 1 kg/s'lik sabit kütleli debide 1000 günlük bir dönem için üretim gerçekleştirilmektedir. Bu örnekte kullanılan diğer ilgili rezervuar parametreleri Tablo 1'deki verilerle aynıdır.

Şekil 7 ve 8 model ve PetraSim için zamanın fonksiyonu olarak sırasıyla basınç ve sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Şekillerden görülebildiği gibi, her iki simülatorün hem basınç hem de sıcaklık davranışları mükemmel bir çakışma sergilemektedir.



Şekil 3. Model ve PetraSim için sabit debide enjeksiyon dönemi boyunca rezervuar içerisinde çevrel (radyal) yöndeki basınç davranışlarının karşılaştırılması.

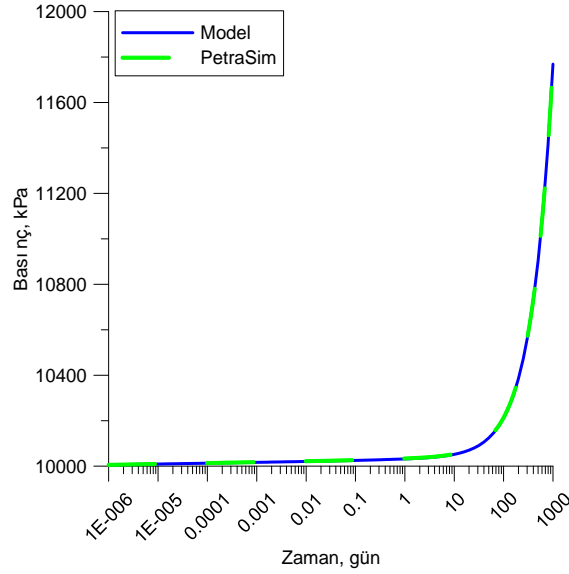


Şekil 4. Model ve PetraSim için sabit debide enjeksiyon dönemi boyunca rezervuar içerisinde çevrel (radyal) yöndeki sıcaklık davranışlarının karşılaştırılması.

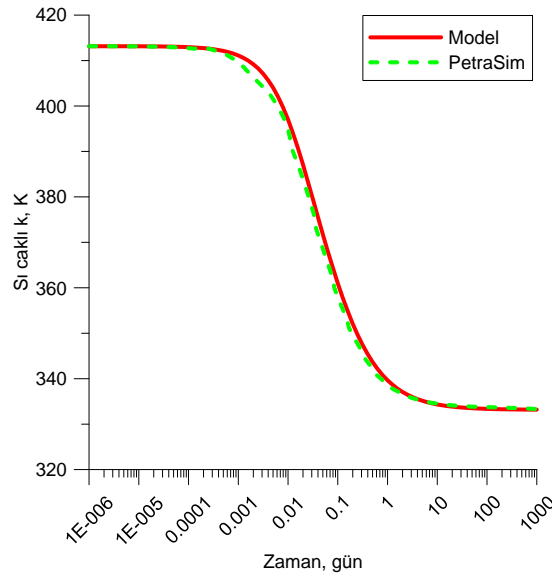
4. MODELLE YAPILAN UYGULAMALAR

Bu bölümde, tek-faz sıvı hakim jeotermal rezervuarların hem basınç hem de sıcaklık davranışlarını tahmin etmek için 2B (r - z) rezervuar sisteminde geliştirilen modelle simüle edilen çeşitli sentetik örnekler sunulmaktadır. Üretim ve enjeksiyon örnekleri kapalı dış sınır koşuluna (kütle ve ısı akışına kapalı) sahip bir sistem için modellenmiştir. Bitişik tabakalara olan ısı kaybı sisteme dahil edilmiştir. Yapılan uygulamaların hiçbirinde, rezervuar anizotrop değildir (yatay ve düşey yöndeki geçirgenlikler aynıdır). Kayaç ısı iletkenliği, gözeneklilik, geçirgenlik ve zar faktörü gibi kayaç parametrelerinin basınç ve sıcaklık davranışlarına duyarlılığı araştırılmıştır. Kuyu tamamlama etkileri (tamamen veya kısmi akışa açık kuyu) de araştırılmıştır. Kısmi akışa açık bir kuyuda basınç ve sıcaklık davranışları

üzerine farklı enjeksiyon sıcaklıklarının etkileri de bu bölümde tartışılmaktadır. Tablo 1'de verilen parametreler aksi belirtilmedikçe uygulama örneklerinde de kullanılmaktadır.



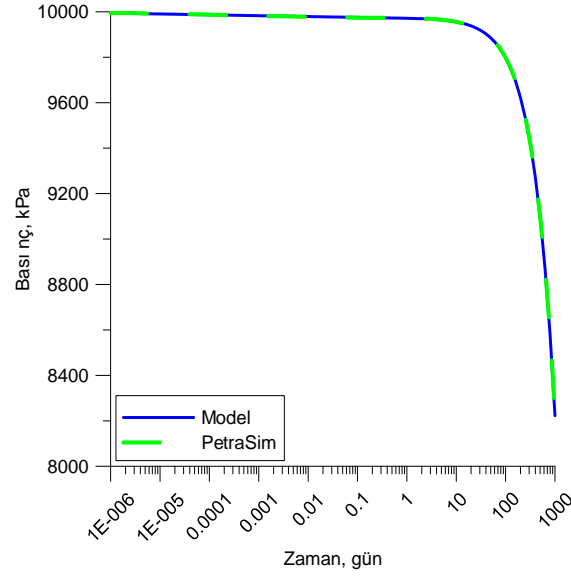
Şekil 5. Model ve PetraSim için sabit debide enjeksiyon dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi basınç davranışlarının karşılaştırılması.



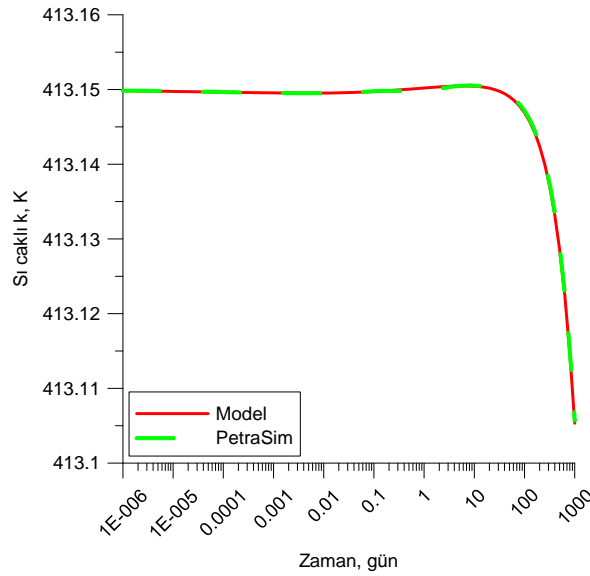
Şekil 6. Model ve PetraSim için sabit debide enjeksiyon dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi sıcaklık davranışlarının karşılaştırılması.

4.1. Basınç ve Sıcaklık Davranışlarının Kayaç Isıl İletkenliğine Duyarlılığı

Bu kısımda, basınç ve sıcaklığın kayaç ısı iletkenliğine duyarlılığı bir enjeksiyon-düşüm durumu için araştırılmaktadır. Şekil 9 bir enjeksiyon-düşüm dönemi boyunca farklı kayaç ısı iletkenliklerine sahip rezervuarlarda tamamen akışa açık bir kuyunun basınç davranışlarını göstermektedir. Bu uygulamada, önce 1 gün boyunca 1 kg/s'lik sabit debide bir enjeksiyon yapılmaktadır; daha sonra kuyu 1 gün boyunca akışa kapatılmaktadır. Şekil 9'a göre, basınç davranışı üzerine kayaç ısı iletkenliğinin etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 7. Model ve PetraSim için sabit debide üretim dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi basınç davranışlarının karşılaştırılması.

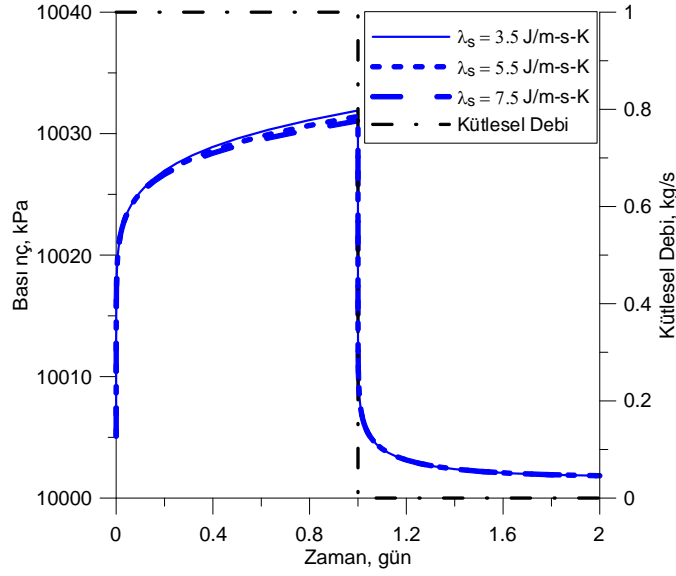


Şekil 8. Model ve PetraSim için sabit debide üretim dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi sıcaklık davranışlarının karşılaştırılması.

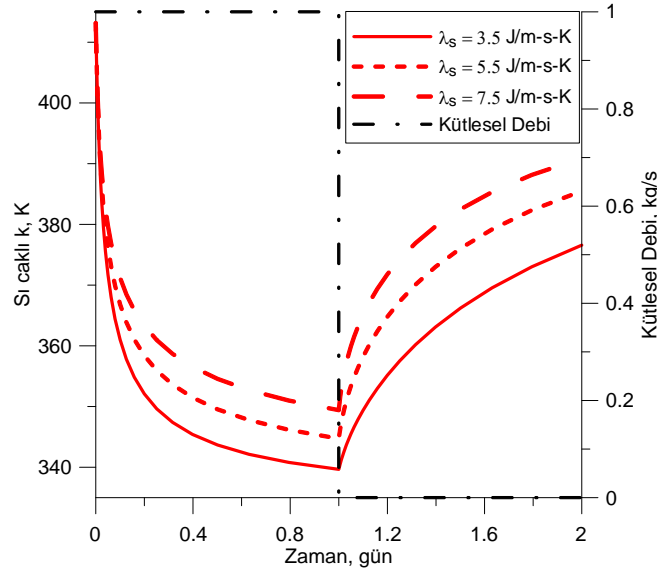
Şekil 10 aynı örnek için sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Basınç davranışının aksine, sıcaklık davranışı hem enjeksiyon hem de düşüm dönemi boyunca kayaç ısı iletkenliğinin değişiminden önemli ölçüde etkilenmektedir. Şekil 10'dan enjeksiyon dönemi boyunca kayaç ısı iletkenliği arttıkça sıcaklık düşümünün azaldığı görülmektedir. Diğer yandan, düşüm kondüksiyonun hakim olduğu bir dönem olduğu için, bütün durumlar için sıcaklık artmaktadır.

4.2. Basınç ve Sıcaklığın Gözenekliliğe Duyarlılığı

Bu kısımda, basınç ve sıcaklığın gözenekliliğe duyarlılığı sabit debide üretim, enjeksiyon-düşüm ve paker-gözlem sondası uygulamaları için araştırılmaktadır.



Şekil 9. Enjeksiyon ve düşüm dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi basınç davranışına kayaç ısı iletkenliğinin etkisi.



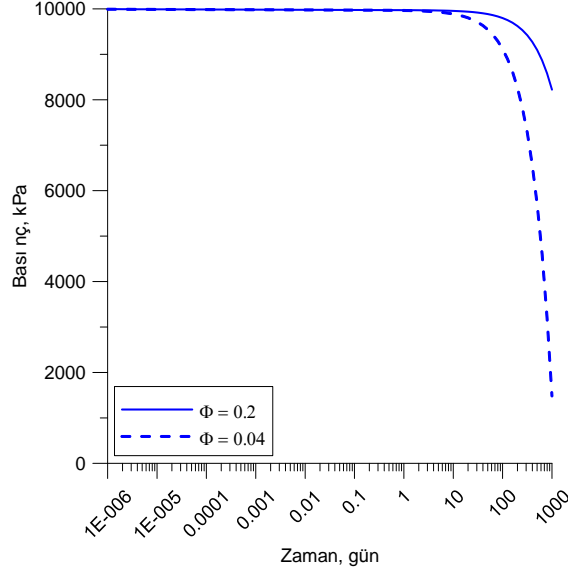
Şekil 10. Enjeksiyon ve düşüm dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi sıcaklık davranışına kayaç ısı iletkenliğinin etkisi.

4.2.1. Sabit Debide Üretim Uygulaması

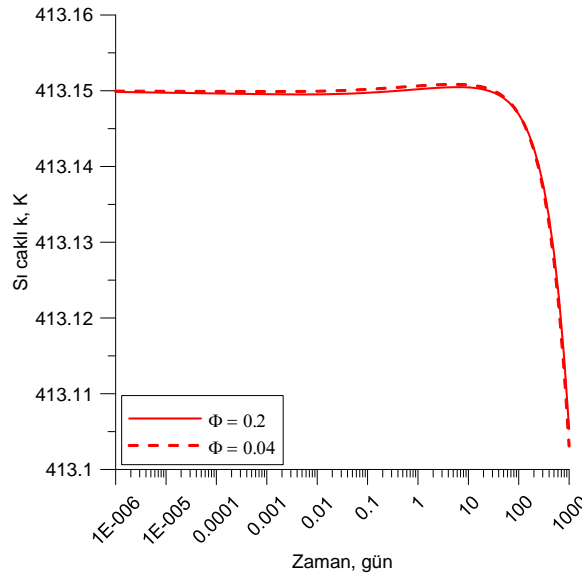
Şekil 11 farklı gözenekliliklere sahip rezervuarlar için tamamen akışa açık düşey bir kuyuda 1 kg/s'lik sabit kütleli debide 1000 günlük bir üretim dönemi için basınç davranışlarını göstermektedir. Şekil 11'e göre, gözeneklilik azaldıkça basınç düşümü de azalmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü, yüksek gözenekliliğe sahip bir rezervuar daha çok akışkan depolamaktadır ve rezervuardan belli bir miktarda üretim yapılmasından kaynaklanan basınç düşümünü daha fazla destekler. Bu sebeple, Şekil 11'den de görüldüğü gibi, düşük gözenekliliğe (0.04) sahip rezervuardaki basınç düşümü yüksek gözenekliliğe (0.2) sahip rezervuardakine oranla çok daha fazladır (özellikle geç zamanlarda).

Şekil 12 aynı örnek için sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Şekil 12'ye göre, basıncın aksine gözeneklilik azaldıkça sıcaklık daha yüksek değerler almaktadır. Bu durum, düşük gözenekli

rezervuarın yüksek gözenekli rezervuardan daha yüksek ısı içeriğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi, bir rezervuardaki ısı içeriğinin çoğu (yaklaşık %90'ı) kayada depolanırken, çok daha azı akışkanda (suda) depolanmaktadır. Ancak, sıcaklık değerlerinin büyüklükleri dikkate alındığında, sabit debide üretim durumu için gözenekliliğin basınca kıyasla sıcaklık üzerinde çok fazla bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.



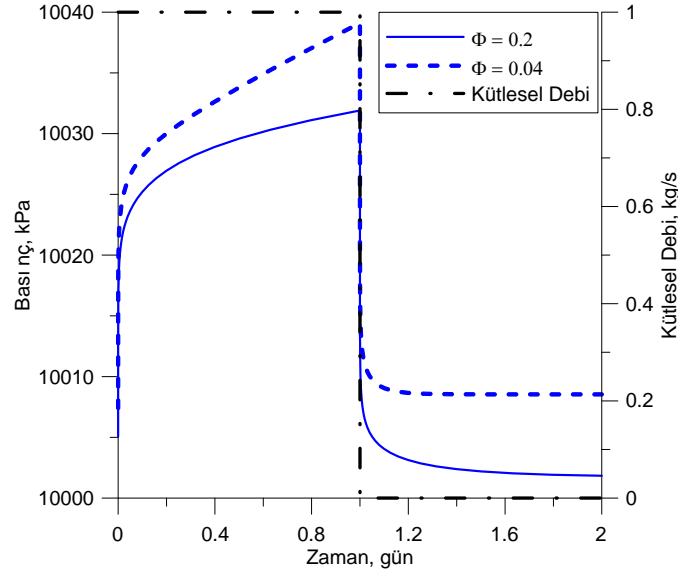
Şekil 11. Sabit debide üretim dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi basınç davranışına gözenekliliğin etkisi.



Şekil 12. Sabit debide üretim dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi sıcaklık davranışına gözenekliliğin etkisi.

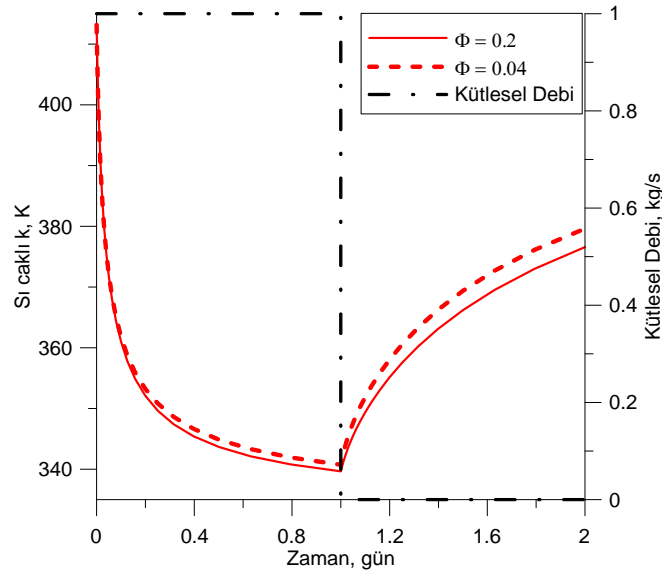
4.2.2. Enjeksiyon-düşüm uygulaması

Şekil 13 farklı gözenekliliklere sahip rezervuarlar için tamamen akışa açık düşey bir kuyuda bir enjeksiyon-düşüm uygulaması için basınç davranışlarını göstermektedir. Bu uygulamada, önce 1 gün boyunca 1 kg/s'lik sabit debide bir enjeksiyon yapılmaktadır; daha sonra kuyu 1 gün boyunca akışa kapatılmaktadır. Beklendiği gibi, basınç düşük gözenekli rezervuarda enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca daha yüksek değerler almaktadır.



Şekil 13. Enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi basınç davranışına gözenekliliğin etkisi.

Şekil 14 aynı örnek için sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca, düşük gözeneklilikli rezervuardaki sıcaklık yüksek gözeneklilikli rezervardan daha yüksek değerlere sahiptir. Özellikle düşüm dönemi boyunca, sıcaklığın gözenekliliğe duyarlılığı söz konusudur. Çünkü, kondüksiyon düşüm dönemi boyunca konveksiyona kıyasla rezervarda hakim olan ısı transfer mekanizmasıdır. Bununla beraber, rezervuarın toplam ısıl iletkenliği $[\lambda_t = \phi\lambda_v + (1-\phi)\lambda_s]$ gözeneklilik değeriyle değişmektedir. Rezervuarın toplam ısıl iletkenliği, azalan gözeneklilikle artmaktadır. Çünkü, kayacın ısıl iletkenliği suyunkinden çok daha büyüktür. Bu durum, rezervuarın toplam ısıl iletkenliğinin artmasına neden olur. Kayacın ısıl iletkenliği, kayaç tipine göre değişmektedir. Bu sebeple, sıcaklığın gözenekliliğe duyarlılığı değişen kayaç tipiyle değişebilir. Buradan, eğer sıcaklık ölçümleri üzerinde çok fazla gürültü etkisi yoksa, sıcaklığın gözenekliliğe olan duyarlılığının özellikle düşüm döneminde önemli olabileceği anlaşılmaktadır.

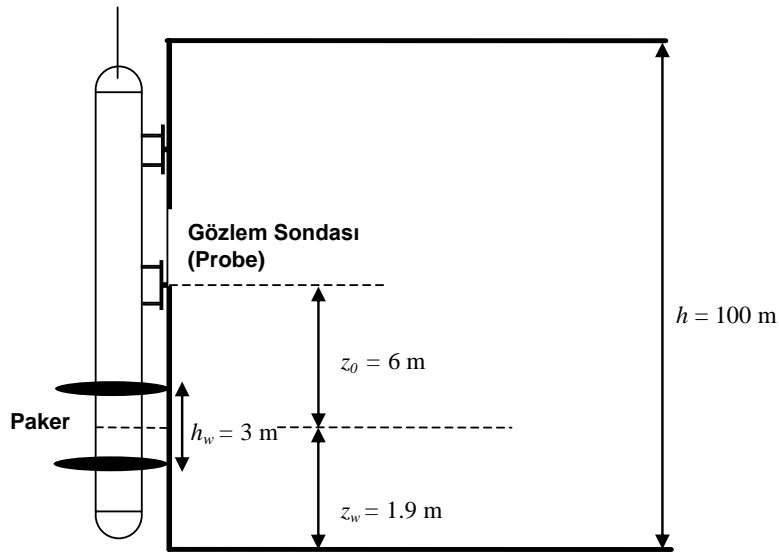


Şekil 14. Enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi sıcaklık davranışına gözenekliliğin etkisi.

4.2.3. Paker-Gözlem Sondası (Packer-Probe) Uygulaması

Burada, Şekil 15'te de şematik olarak gösterildiği gibi, bir kaynaktan gelen sinyal (çift-paker) nedeniyle oluşan kuyu boyunca bir gözlem sondasındaki (probe) basınç ve sıcaklık davranışları araştırılmaktadır. Bu tip testler (gözlem noktası ve çift-paker lokasyonlarındaki basınç ve sıcaklık ölçümlerini elde ederek) endüstride telli (kablolu) formasyon testleri kapsamında düzenli olarak formasyondaki düşey girişimin varlığını, yatay ve düşey yöndeki geçirgenlikleri ve ilk formasyon basıncı ve sıcaklığını belirlemek ve sonunda basınç-hacim-sıcaklık (PVT) analizleri için yerinde akışkan örnekleri elde etmek amacıyla uygulanmaktadır.

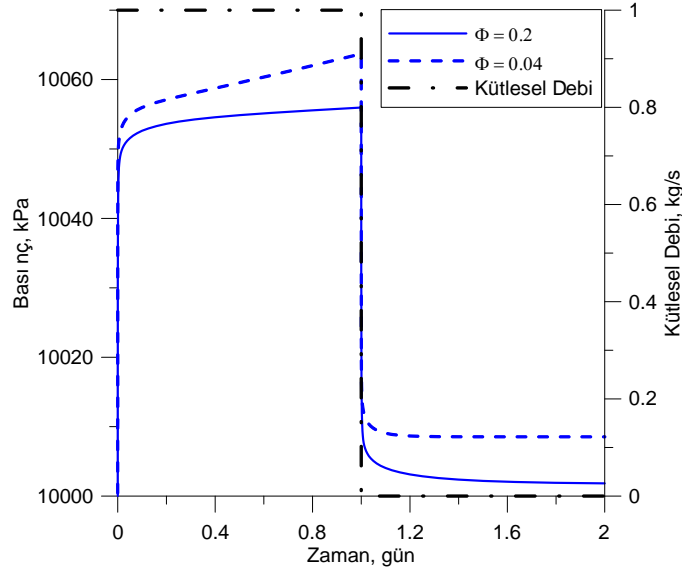
Bu araştırma için, önce 1 günlük enjeksiyon ve bu dönemi izleyen 1 günlük kapama dönemini içeren bir enjeksiyon-düşüm testi uygulanmaktadır. Sistemin basitleştirilmiş şematik gösterimi, Şekil 15'te sunulmaktadır. Kuyunun akışa açık alanı, rezervuarın tabanına oldukça yakındır. Bildirideki diğer örneklere benzer olarak, yatay ve düşey yöndeki geçirgenliklerin bu uygulama için de aynı olduğu varsayılmıştır. Çift-paker basınç ve sıcaklık davranışları burada gösterilmemiştir.



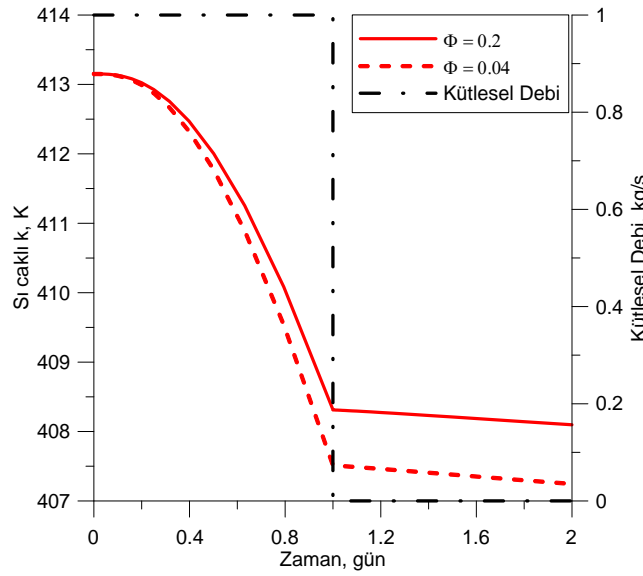
Şekil 15. Düşey bir kuyudaki bir paker-gözlem sondası uygulaması için telli (kablolu) formasyon test cihazındaki gözlem sondası yapılandırmasının şematik gösterimi.

Şekil 16, enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca önemli ölçüde farklı gözenekliliklere sahip rezervuarlar için gözlem noktasındaki basınç davranışlarını göstermektedir. Yatay ve düşey yöndeki geçirgenlikler aynı varsayıldığı için, düşük gözeneklilikli rezervuardaki basınç hem yatay hem de düşey yönde daha çok difüzyon (yayınrlık) göstermektedir.

Şekil 17, aynı örnek için sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Erken zamanlarda, kısmi akışa açık kuyu etkisi özellikle akışa açık olan bölgede kuyuya yakın civarda ani bir soğuma yaratır. Gözlem noktası, kısmi kuyu tamamlama etkisi nedeniyle erken zamanlarda bu soğuma etkisini hissetmez. Gözlem noktasındaki sıcaklık düşümü, enjeksiyon dönemi boyunca akışa açık bölgedekinden çok daha yavaştır. Bu sebeple, gözlem noktasındaki sıcaklık, akışa açık bölgedekinin aksine enjeksiyon sıcaklığına ulaşmaz. Diğer yandan, gözlem noktasındaki sıcaklık düşüm dönemi boyunca enjeksiyon dönemindeki kadar olmasa da düşmeye devam eder. Çünkü, gözlem noktasının hemen altındaki soğuk cephe çevresindeki sıcak bölgeye oranla gözlem noktasına daha yakın olduğundan gözlem noktasını belli bir miktarda bir müddet daha soğutmaya devam eder. Yüksek gözenekliliğe sahip rezervuardaki sıcaklık düşümü, düşük gözenekliliğe sahip rezervuardakine oranla daha azdır. Bu durum, enjeksiyon sabit debide yapıldığı için gözeneklilik düşük olduğunda, enjekte edilen soğuk akışkanın daha geniş bir alana yayılmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 17'de de görüldüğü gibi, gözlem noktası sıcaklığı enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca belli bir oranda gözenekliliğe duyarlıdır.



Şekil 16. Enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca zamanın fonksiyonu olarak gözlem sondasındaki basınç davranışına gözenekliliğin etkisi.

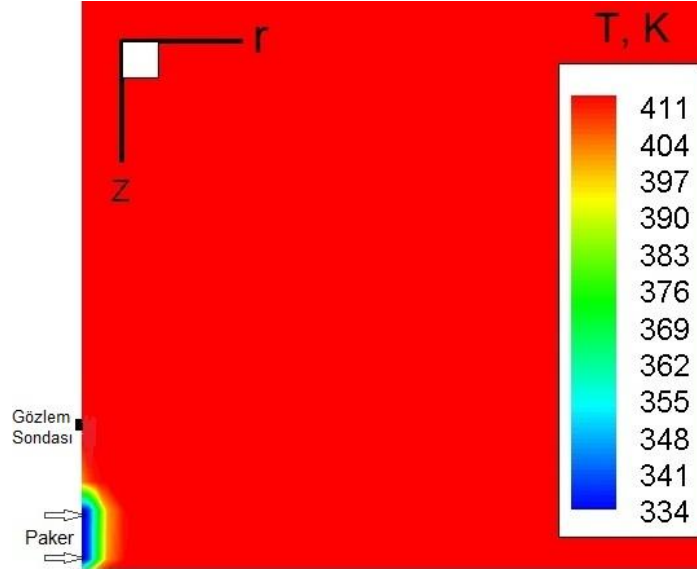


Şekil 17. Enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca zamanın fonksiyonu olarak gözlem sondasındaki sıcaklık davranışına gözenekliliğin etkisi.

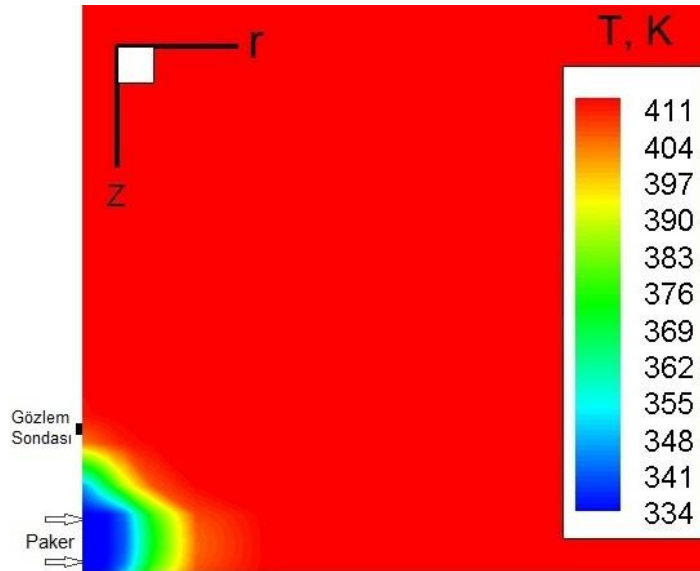
Şekil 18-21 farklı zaman adımlarında (0.03162 gün, 0.5012 gün, 1 gün and 2 gün) düşük gözeneklilikli (0.04) rezervuar için 2B ($r-z$) sıcaklık haritalarını göstermektedir. Şekillerden açıkça görülmektedir ki, bu sıcaklık haritaları da yukarıda açıklanan sıcaklık davranışlarını doğrulamaktadır.

4.3. Basınç ve Sıcaklığın Zar Faktörüne Duyarlılığı

Bu kısımda, bir enjeksiyon-düşüm uygulaması için basınç ve sıcaklığın zar faktörüne duyarlılığı araştırılmaktadır. Kuyuya yakın civarda formasyondaki hasar nedeniyle oluşan zar faktörünü modellemek için iyi bilinen Hawkins denklemi (Denklem 6) kullanılmaktadır.



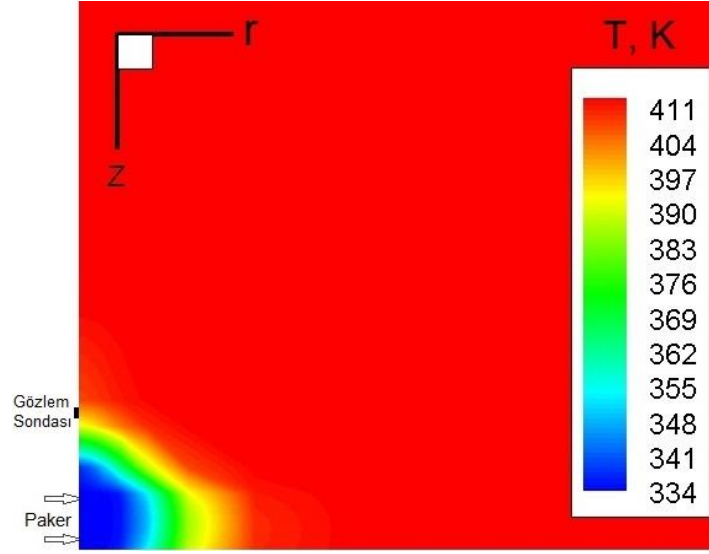
Şekil 18. 0.03162 günlük enjeksiyon dönemi sonunda düşük gözeneklilikli (0.04) rezervuar için 2B (r-z) sıcaklık haritası.



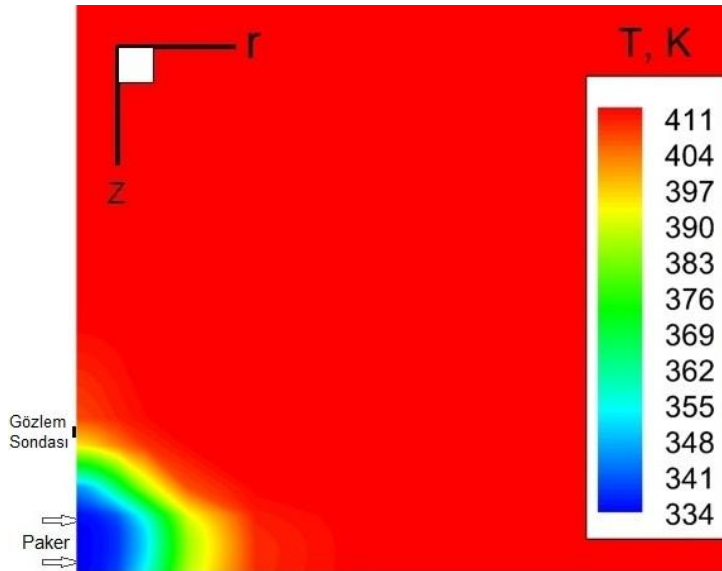
Şekil 19. 0.5012 günlük enjeksiyon dönemi sonunda düşük gözeneklilikli (0.04) rezervuar için 2B (r-z) sıcaklık haritası.

$$S = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) \quad (6)$$

Denklem 6'da k_s hasar bölgesindeki geçirgenliği ve r_s hasar bölgesi yarıçapını temsil etmektedir. Kuyuya yakın civardaki hasar bölgesini (zar etkisini) modellemek için kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 20. 1 günlük enjeksiyon dönemi sonunda düşük gözeneklilikli (0.04) rezervuar için 2B (r - z) sıcaklık haritası.



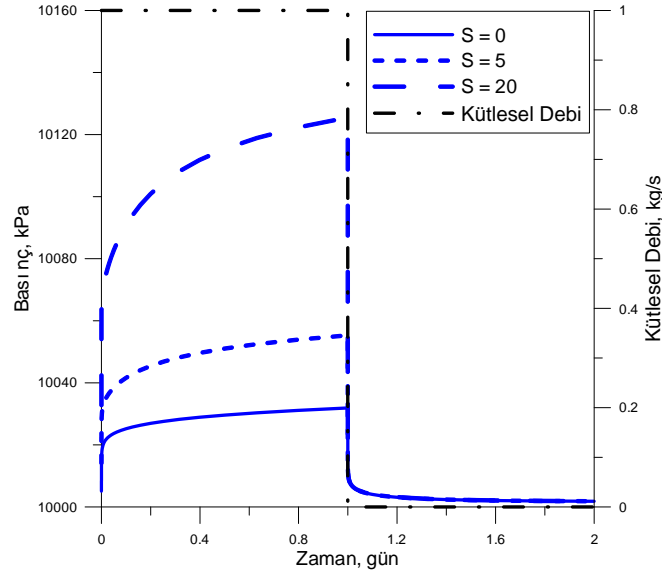
Şekil 21. 2 günün sonunda (düşüm döneminin sonunda) düşük gözeneklilikli (0.04) rezervuar için 2B (r - z) sıcaklık haritası.

Tablo 2. Kuyuya yakın civardaki hasar bölgesini (zar etkisini) modellemek için kullanılan parametreler.

Parametre	Değer		
	0	5	20
S	0	5	20
r_w , m	0.1	0.1	0.1
r_s , m	0.1512	0.1512	0.1512
k , m^2	1×10^{-13}	1×10^{-13}	1×10^{-13}
k_s , m^2	1×10^{-13}	7.5×10^{-15}	2×10^{-15}

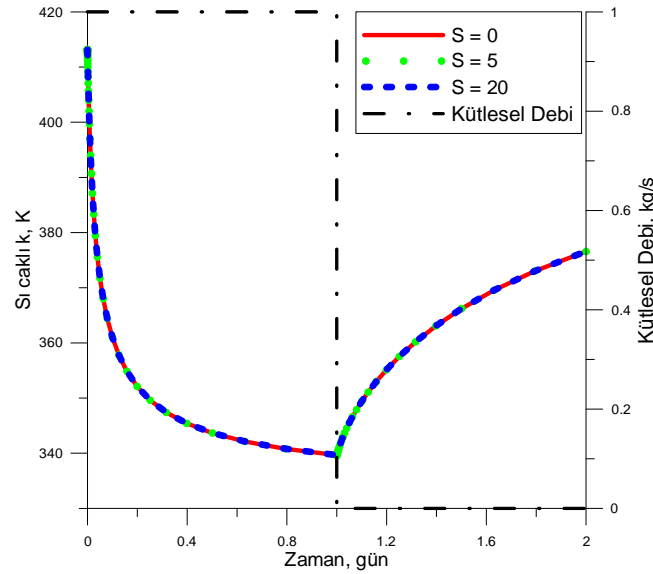
Şekil 22 farklı zar faktörlerine sahip rezervuarlar için tamamen akışa açık düşey bir kuyuda bir enjeksiyon-düşüm uygulaması için basınç davranışlarını göstermektedir. Artan zar faktörü kuyu dibi basıncını arttırmaktadır. Çünkü akış kuyudan rezervuara gerçekleşmektedir. Artan zar etkisi nedeniyle akışa karşı bir direnç oluşur ve bu direnç enjeksiyon dönemi boyunca kuyuya yakın civarda ek bir

basınç artışı yaratır. Bu beklenen bir durumdur. Bütün uygulamalar (farklı zar faktörlerine sahip) düşüm döneminde ilk rezervuar basıncına yaklaşarak benzer basınç düşümleri sergilemektedir. Çünkü geç zaman düşüm dönemi basınç verisi, zar faktöründen bağımsızdır.



Şekil 22. Enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi basınç davranışına zar faktörünün etkisi.

Şekil 23 aynı örnek için sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Sıcaklığın hem sabit debide enjeksiyon hem de düşüm dönemleri boyunca zar faktörüne duyarlı olmadığı gözlenmektedir. Bu davranış, enjeksiyon sabit debide yapıldığı için beklenen bir sonuçtur. Zar faktörü ne olursa olsun, debi sabit olduğu için aynı miktarda akışkan (dolayısıyla aynı miktarda ısı) rezervuara girmektedir. Burada gösterilmemesine rağmen, sabit kuyu dibi basıncında değişen zar faktörleri için sıcaklık davranışlarının değiştiği de gözlenmiştir. Bu durum, basitçe enjeksiyon debisinin sabit kuyu dibi basıncında değişken olmasıyla açıklanabilir. Bu durumda, farklı zar faktörüne sahip rezervuarların içerisine farklı miktarda akışkan (dolayısıyla farklı miktarda ısı) girmektedir.



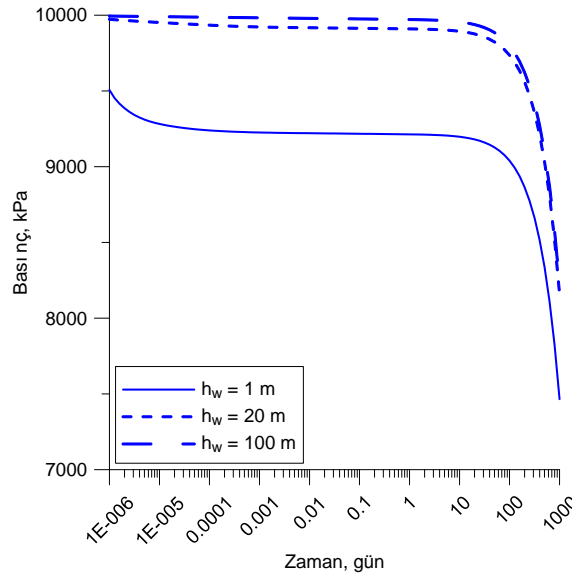
Şekil 23. Enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi sıcaklık davranışına zar faktörünün etkisi.

4.4. Basınç ve Sıcaklık Davranışına Kısmi Akışa Açık Aralığın Etkisi

Bu kısımda, basınç ve sıcaklığa kısmi akışa açık aralığın etkisi sabit debide üretim ve enjeksiyon-düşüm uygulamaları için araştırılmaktadır. Bu uygulamalarda, akışa açık aralığın uzunluklarının z-yönünde rezervuarın ortasında olduğu düşünülmektedir.

4.4.1. Sabit Debide Üretim Uygulaması

Şekil 24, sabit debide üretim uygulaması için tamamen akışa açık ($h_w = h = 100$ m) düşey bir kuyunun basınç davranışıyla kısmi akışa açık ($h_w = 1$ m and $h_w = 20$ m) kuyuların basınç davranışlarının karşılaştırılmasını sunmaktadır. Bu örneklerde, akışa açık aralığın uzunluğu azaldıkça akışa açık alan çok daha dar olduğundan çok daha yüksek basınç düşümleri oluşmaktadır [özellikle en düşük aralığa sahip örnek ($h_w = 1$ m) için]. Erken zamanlarda, kısmi akışa açık aralığın etkisiyle çok ani basınç düşümleri gözlenir. Kısmi akışa açık bölge ek bir zar etkisi (sanal) yaratır ve bu da Şekil 24'te de görüldüğü gibi, akışa açık aralığın en düşük olduğu (h_w) örnek için çok daha yüksek basınç düşümünüyle sonuçlanır.



Şekil 24. Sabit debide üretim dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi basınç davranışına kısmi akışa açık aralığın etkisi.

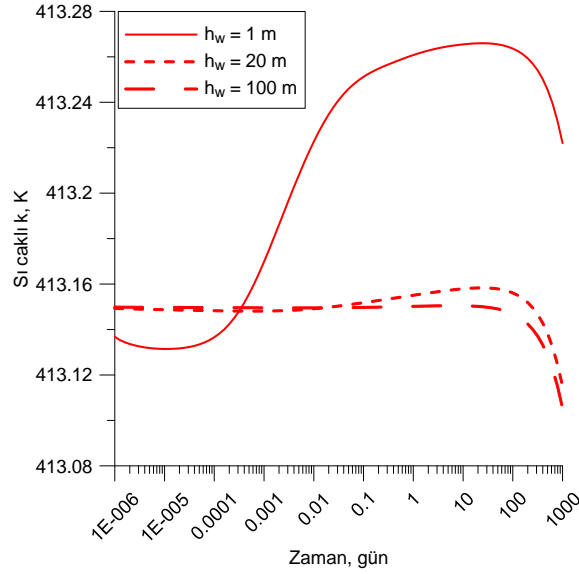
Şekil 25'te sıcaklık davranışlarında değişimler gözlenmektedir. Bu değişimler, çoğunlukla Joule-Thomson ve genişleme etkilerinin birleşimiyle oluşan etkilerden dolayı meydana gelmektedir. Ancak, sıcaklıktaki bu değişimlerin bugünkü sıcaklık ölçerlerle kolaylıkla tesbit edilemeyecek kadar düşük olduğuna dikkat edilmelidir.

4.4.2. Enjeksiyon-Düşüm Uygulaması

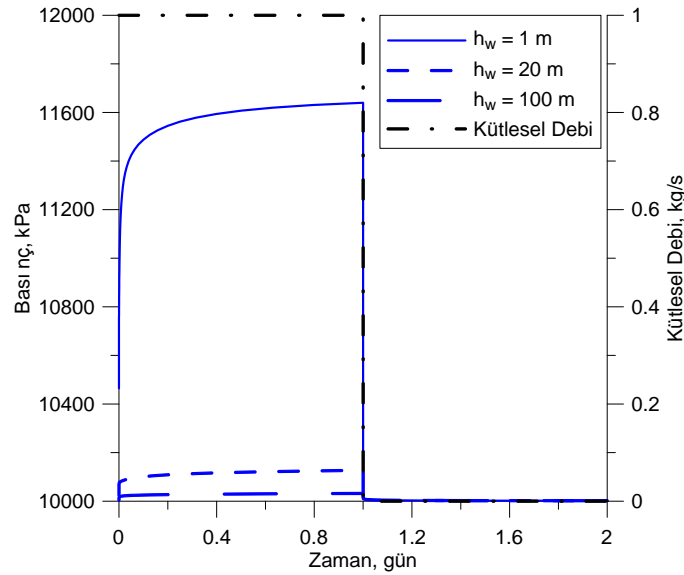
Şekil 26, enjeksiyon-düşüm uygulaması için tamamen akışa açık ($h_w = h = 100$ m) düşey bir kuyunun basınç davranışıyla kısmi akışa açık ($h_w = 1$ m and $h_w = 20$ m) kuyuların basınç davranışlarının karşılaştırılmasını sunmaktadır. Şekil 26'ya göre, akışa açık aralığın uzunluğu azaldıkça kuyu dibi basınçları artmaktadır. Bu beklenen bir davranıştır. Çünkü, kısmi akışa açık aralık akmaya karşı bir direnç yaratır ve bu sebeple, sabit debide enjeksiyon dönemi boyunca basınç artar. Bütün uygulamalar düşüm döneminde ilk rezervuar basıncına yaklaşarak benzer basınç düşümleri sergilemektedir.

Şekil 27, aynı örnek için sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Bu noktada, sıcaklığın rezervuar kalınlığının tam ortasında ölçüldüğüne dikkat edilmelidir. Bütün örnekler için debi sabittir ve aynıdır. Ancak, kısmi akışa açık aralığın uzunluğu arttıkça, ölçüm aletinin yerleştirildiği noktadan daha az

akışkanın geçeceğine dikkat edilmelidir. Bu durum, o bölgede daha az soğuma olması anlamına gelir. Kapama döneminden sonra sıcaklık davranışlarındaki farklılıklar enjeksiyon boyunca yaratılan soğuk su ile istila edilmiş bölge (cool invaded zone) nedeniyledir.



Şekil 25: Sabit debide üretim dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi sıcaklık davranışına kısmi akışa açık aralığın etkisi.

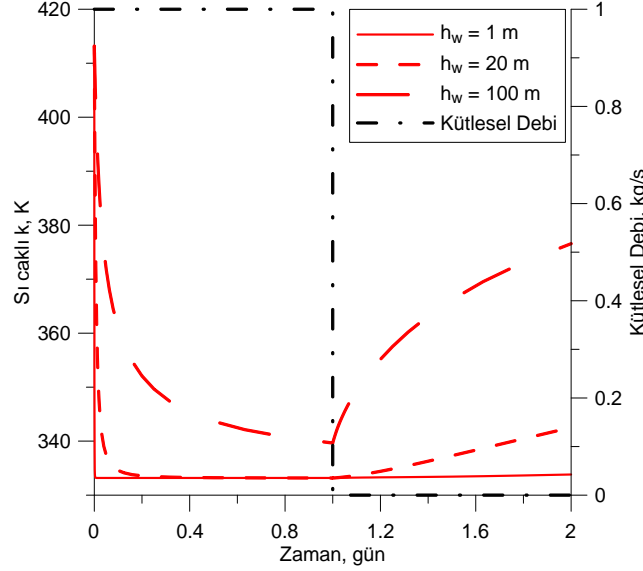


Şekil 26. Enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi basınç davranışına kısmi akışa açık aralığın etkisi.

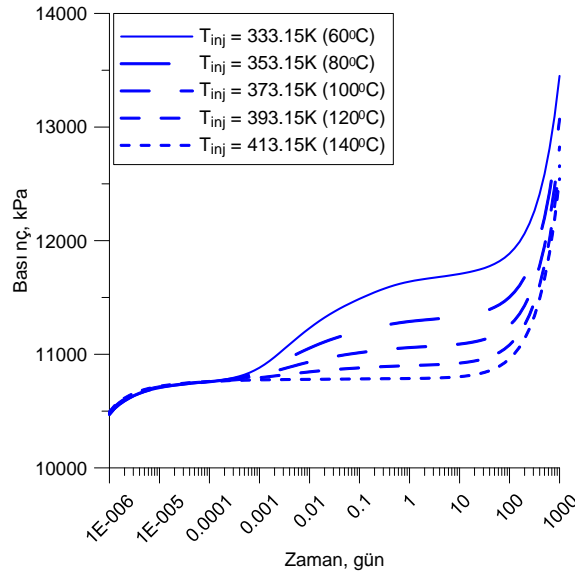
4.5. Basınç ve Sıcaklık Davranışına Farklı Enjeksiyon Sıcaklıklarının Etkisi

Bu kısımda, kısmi akışa açık düşey bir kuyu için sabit debide enjeksiyon dönemi boyunca basınç ve sıcaklık davranışlarına farklı enjeksiyon sıcaklıklarının etkisi araştırılmaktadır. Bu uygulamada, kısmi akışa açık aralığın ($h_w = 1$ m) z-yönünde rezervuarın ortasında olduğu düşünülmektedir. Sabit debide enjeksiyon 5 farklı sıcaklıkta (333.15K , 353.15K, 373.15K, 393.15K ve 413.15K) uygulanmaktadır. Şekil 28 kısmi akışa açık düşey bir kuyu için sabit debide enjeksiyon dönemi boyunca kuyu dibi basınç davranışlarına farklı enjeksiyon sıcaklıklarının etkisini göstermektedir. Şekil 28'de de görüldüğü gibi,

basınç davranışları azalan enjeksiyon sıcaklıklarıyla değişmektedir. Bu durum, soğuk enjeksiyon suyunun sıcak rezervuar suyundan daha yüksek viskoziteye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 28 incelendiğinde, rezervuarda karışan suyun (soğuk enjeksiyon ve sıcak rezervuar suyunun karışımı) viskozite değişimi soğuk suyun enjeksiyonuyla yaratılan daha yüksek basınç artışlarından da anlaşılabilir.

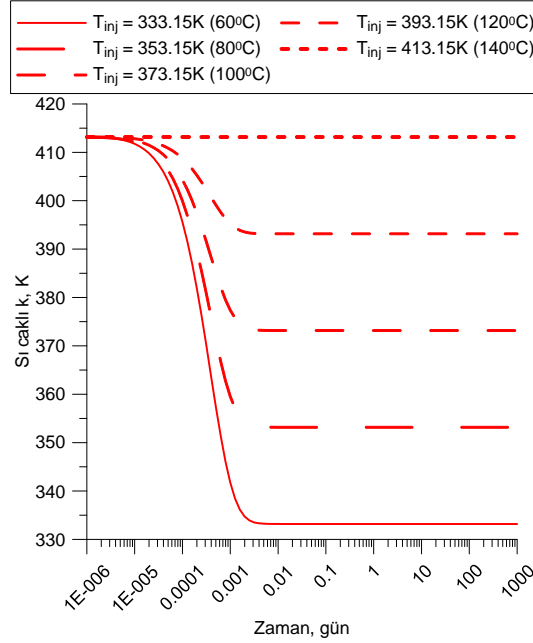


Şekil 27. Enjeksiyon-düşüm dönemleri boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi sıcaklık davranışına kısmi akışa açık aralığın etkisi.



Şekil 28: Sabit debide enjeksiyon dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi basınç davranışına farklı enjeksiyon sıcaklığının etkisi.

Şekil 29 aynı örnek için sıcaklık davranışlarını göstermektedir. Şekil 29'a göre, beklendiği gibi azalan enjeksiyon sıcaklıklarıyla kuyu dibi sıcaklıkları daha hızlı bir şekilde azalarak enjeksiyon sıcaklıklarına ulaşmaktadır.



Şekil 29: Sabit debide enjeksiyon dönemi boyunca zamanın fonksiyonu olarak kuyu dibi sıcaklık davranışına farklı enjeksiyon sıcaklığının etkisi.

4.6. Basınç ve Sıcaklığın Geçirgenliğe Duyarlılığı

Yapılan birçok enjeksiyon uygulamasında, basınç geçirgenliğe duyarlıyken, geçirgenlik değişiminin sıcaklık üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. Ancak, bu araştırmaların sabit debide yapıldığına dikkat edilmelidir. Öte yandan, zar faktörü etkisine benzer şekilde, sabit kuyu dibi basıncında, sıcaklığın geçirgenliğe duyarlı olduğu gözlenmiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, tek-faz sıvı hakim jeotermal rezervuarların basınç ve sıcaklık davranışlarını en genel şekilde modelleyen 2B (r - z) izotermal olmayan bir simülatör geliştirilmiş ve ticari bir rezervuar simülatörü ile doğrulanmıştır.

Tamamen akışa açık düşey bir kuyu için yapılan bir enjeksiyon-düşüm uygulamasında, sıcaklığın özellikle düşüm dönemi boyunca kayaç ısı iletkenliğine önemli ölçüde duyarlılığı olduğu gözlenmiştir.

Tamamen ve kısmi akışa açık düşey kuyular için yapılan enjeksiyon-düşüm uygulamalarında, sıcaklığın özellikle düşüm dönemi boyunca gözenekliliğe belli bir oranda duyarlılığı olduğu gözlenmiştir.

Tamamen akışa açık düşey bir kuyu için yapılan bir enjeksiyon-düşüm uygulamasında, bu araştırmanın sabit debide yapılması nedeniyle sıcaklığın zar faktörüne duyarlı olmadığı gözlenmiştir.

Kısmi akışa açık düşey bir kuyu için yapılan enjeksiyon uygulamasında, farklı sıcaklıktaki enjeksiyon suyunun rezervuardaki sıcak suyla karışımından oluşan viskozite değişimleri nedeniyle kuyuya yakın civardaki basınç davranışı üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

Yapılan birçok enjeksiyon uygulamasında, basıncın geçirgenliğe önemli ölçüde duyarlı olduğu; ancak, araştırmalar sabit debide yapıldığı için geçirgenliğin sıcaklık üzerine önemli bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

TERMİNOLOJİ

c	:İzotermal sıkıştırılabilirlik, kPa^{-1}
C	:Özgül ısı kapasitesi, J/kg-K
h	:Rezervuar kalınlığı, m
h_1	:Akışa açık aralığın üst sınırı, m
h_2	:Akışa açık aralığın alt sınırı, m
h_w	:Akışa açık aralığın uzunluğu, m
H	:Özgül entalpi, J/kg
N	:Toplam gridblok sayısı
k	:Geçirgenlik, m^2
k_s	:Hasar bölgesinin geçirgenliği, m^2
p	:Basınç, kPa
q_m^R	:Rezervuardan kuyuya olan kütleli akış debisini temsil eden kaynak terimi, kg/s
q_z^w	:Hacimsel akış debisi, m^3/s
\tilde{q}	:Fourier'in ısı iletim terimi, $\text{J/m}^2\text{s}$
r	:Çevrel (radyal) uzaklık, m
r_e	:Rezervuar yarıçapı, m
r_s	:Hasar bölgesinin yarıçapı, m
r_w	:Kuyu yarıçapı, m
S	:Zar faktörü
t	:Zaman, s
T	:Sıcaklık, K
U	:Özgül iç enerji, J/kg
v	:Hız, m/s
V	:Hacim, m^3
z	:Düşey uzaklık, m
z_0	:Akışa açık aralığın ortasından gözlem noktasına olan düşey uzaklık
z_w	:Formasyon alt sınırından akışa açık aralığın ortasına olan düşey uzaklık
β	:İzobarik ısı genleşme katsayısı, K^{-1}
∇	:Gradyan operatörü
θ	:Açısal yön
λ	:Isıl iletkenlik, J/m-s-K
μ	:Viskozite, kPa-s
ρ	:Yoğunluk, kg/m^3
ϕ	:Gözeneklilik

Alt İndisler

i	:Çevrel yöndeki gridblok indisi
inj	:Enjeksiyon
j	:Teta yönündeki gridblok indisi
k	:Düşey yöndeki gridblok indisi
r	:Çevrel yön
s	:Katı kayaç fazı
sf	:Kuyu cidarı
t	:Toplam sistem
w	:Su
z	:Düşey yön

Üst İndisler

O	:Başlangıç koşulu
n	:Zaman adımı
w	:Kuyu

KAYNAKLAR

- [1] GRANT, M.A., DONALDSON, I.G. ve BIXLEY, P.F., “Geothermal Reservoir Engineering”, Academic Press, New York, 1982.
- [2] AXELSSON, G., “Simulation of Pressure Response Data from Geothermal Reservoirs by Lumped Parameter Models”, Proceedings, 14th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 1989.
- [3] ALKAN, H. ve SATMAN, A., “A New Lumped Parameter Model for Geothermal Reservoirs in The Presence Of Carbon Dioxide”, Geothermics, 19, 5, 469-479, 1990.
- [4] SARAK, H., ONUR, M. ve SATMAN, A., “Lumped-Parameter Models for Low Temperature Geothermal Reservoirs and Their Application”, Geothermics, 34, 728-755, 2005
- [5] TUREYEN, O.I., SARAK, H. ve ONUR, M., “Assessing Uncertainty in Future Pressure Changes Predicted by Lumped-Parameter Models: A Field Application”, Proceedings, 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 2007.
- [6] ONUR, M., SARAK, H., TUREYEN, O.I., CINAR, M. ve SATMAN, A. “A New Non-Isothermal Lumped Parameter Model for Low Temperature, Liquid Dominated Geothermal Reservoirs and its Applications”, Proceedings, 33rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 2008.
- [7] TUREYEN, O.I., ONUR, M. ve SARAK, H., “A Generalized Non-Isothermal Lumped Parameter Model for Liquid Dominated Geothermal Reservoirs”, Proceedings, 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA, 2009.
- [8] ATKINSON, P.G. ve RAMEY, H.J.Jr., “Problems of Heat Transfer in Porous Media”, the SPE 52nd Annual Fall Technical Conference and Exhibition, SPE paper no 6792, Denver, Colorado, 1972.
- [9] RAMAZANOV, A.SH., VALIULLIN, R.A., SADRETDINOV A.A., SHAKO, V.V., PIMENOV, V.P., FEDOROV, V.N. ve BELOV, K.V., “Thermal Modeling for Characterization of Near Wellbore Zone and Zonal Allocation”, the 2010 SPE Russian Oil & Gas Technical Conference and Exhibition, SPE paper no 136256, Moscow, Russia, 2010.
- [10] DURU, O.O. ve HORNE, R.N., “Modelling Reservoir Temperature Transients and Reservoir-Parameter Estimation Constrained to the Model”, SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 13, 6, 873-883, 2010a.
- [11] DURU, O.O. ve HORNE, R.N., “Combined Temperature and Pressure Data Interpretation: Applications to Characterization of Near-Wellbore Reservoir Structures”, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE paper no 146614, Denver, Colorado, USA, 2011.
- [12] APP, J.F., “Nonisothermal and Productivity Behavior of High Pressure Reservoirs”, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, 2008.
- [13] SUI, W., ZHU, D., HILL, A.D. ve EHLIG-ECONOMIDES, C., “Model for Transient Temperature and Pressure Behavior in Commingled Vertical Wells”, SPE Russian Oil & Gas Technical Conference and Exhibition, SPE paper no 115200, Moscow, Russia, 2008a.
- [14] SUI, W., ZHU, D., HILL, A.D. ve EHLIG-ECONOMIDES, C., “Determining Multilayer Formation Properties from Transient Temperature and Pressure Measurements”, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE paper no 116270, Denver, Colorado, USA, 2008b.
- [15] DURU, O.O. ve HORNE, R.N., “Joint Inversion of Temperature and Pressure Measurements for Estimation of Permeability and Porosity Fields”, the 2010 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE paper no 134290, Florence, Italy, 2010b.
- [16] PALABIYIK, Y., “Modeling of Wellbore Pressure and Temperature Behaviors for Single-Phase Water Geothermal Reservoirs”, ITU Graduate School of Science Engineering and Technology, PhD (Tez Aralık 2012’de teslim edildi), 2013.
- [17] BIRD, R.B., STEWART, W.E., ve LIGHTFOOT, E.L., “Transport Phenomena”, John Wiley & Sons Inc., New York, 1960.
- [18] RAMEY, H.J.Jr., “Wellbore Heat Transmission”, Journal of Petroleum Technology, 14, 4, 427-435, 1962.
- [19] PRUESS, K., OLDENBURG, C. ve MORIDIS, G., “Tough2 User’s Guide Version 2.0”, Report 476, LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA, 1999.
- [20] PETRASIM, “User Manual, Version 5”, Thunderhead Engineering Consultants, Rockware Inc., Manhattan, USA, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Yıldıray PALABIYIK

1979 yılı Kırklareli-Lüleburgaz doğumludur. 2001 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği'nde yüksek lisansını tamamlayarak Yüksek Petrol ve Doğal Gaz Mühendisi ünvanını almıştır. Halen 2006 yılında başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği programındaki doktora programına devam etmektedir. Ayrıca, 2005 yılından beri İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. Jeotermal Rezervuar Modellemesi, Jeokimya ve Kuyu Testleri konularında çalışmaktadır.

Ömer İnanç TÜREYEN

İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nden 1997 yılında lisans ve 2000 yılında yüksek lisans unvanlarını aldı. 2005 yılında Stanford Üniversitesi'nde doktorasını tamamladıktan sonra aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde Yardımcı Doçent Dr. olarak göreve başladı. Halen aynı bölümde öğretim üyeliği görevine devam etmektedir. İlgili alanları arasında rezervuar karakterizasyonu ve simülasyonu konuları yer almaktadır. Ömer İnanç Türeyen'in Petrol Mühendisleri Odasına ve Society of Petroleum Engineers kuruluşuna üyelikleri bulunmaktadır.

Mustafa Onur

1982 yılında ODTÜ Petrol Mühendisliği Bölümünden Lisans derecesini, Tulsa Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümünden Haziran 1986'da Master ve Haziran 1989'da Doktora derecelerini aldı. Kasım 1989'dan beri İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. 1992'de Doçent ve 1999 yılında İTÜ'de profesör oldu. Şuan İTÜ'den izinli olarak Malezya'daki Univerciti Teknoloji PETRONAS Petrol Mühendisliği Bölümünde Schlumberger Kürsüsü Profesörü olarak görev yapan Mustafa Onur, 2005-2011 yılları arasında İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölüm Başkanlığı, 1995-1997 yılları arasında Suudi Arabistan King Saud Üniversitesi ve 2003 yılında Tulsa Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümlerinde de ziyaretçi profesör olarak görev yaptı. İlgili alanları arasında rezervuar ve üretim mühendisliği problemleri, kararsız kuyu basınç testi tasarım, analiz ve modellemeleri, telli formasyon testleri, sayısal petrol, doğal gaz ve jeotermal rezervuar simülasyonu, jeotermal rezervuar mühendisliği, jeostatistiksel yöntemlerle rezervuar tanımlaması, otomatik olarak geçmiş, statik ve üretim verilerine çakıştırma ve doğrusal olmayan parametre tahmini yer almaktadır. SPE'nin önemli dergilerinden SPE Journal'ın yayın yönetmenliğini yapan Mustafa Onur, Petrol Mühendisleri Odası (Türkiye) ve Society of Petroleum Engineers (SPE) üyesidir.

Melek DENİZ

1983 yılı Kayseri doğumludur. 2007 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nü bitirmiştir. 2007-2008 yılları arasında Binagadi Oil Company'de rezervuar mühendisi olarak çalışmıştır. 2011 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği'nde yüksek lisansını tamamlayarak Yüksek Petrol ve Doğal Gaz Mühendisi ünvanını almıştır. Halen 2012 yılında başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği programındaki doktora programına devam etmektedir. Ayrıca, 2010 yılından beri İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır. Rezervuar Karakterizasyonu ve Optimizasyonu ile Doğrusal Olmayan Parametre Tahmini konularında çalışmaktadır.