

JEOTERMAL REZERVUARLARDA YENİLENEBİLİRLİK VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK

Abdurrahman SATMAN

ÖZET

Birçok jeotermal saha genelde üretime başlamadan önce yeryüzüne ulaşan doğal akışkan ve ısı debisinden (yenilenebilir kapasite) daha yüksek akışkan ve ısı debisiyle üretilerek işletilir. Sahanın yenilenebilir kapasiteden daha yüksek kapasitede sürekli olarak işletilmesi mümkün değildir ve saha işletimi sürdürülebilir olmaktan çıkar. Ancak belirli bir süre üretimden sonra işletim durdurulursa, doğal akışkan ve ısı girişi jeotermal sistemi yeniler ve saha tekrar üretime hazır hale gelir. Bu şekilde (üretim ve daha sonra kapatma) periyodik bir yöntemle, jeotermal sistemler yenilenebilir ve sürdürülebilir olarak işletilebilir.

Bu bildiriye yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik konusu incelenmektedir. Bir jeotermal saha belirli bir süre üretilikten sonra işletme durdurulursa, rezervuarın orijinal durumuna gelmesi durumu değerlendirilmektedir. Genelde Türkiye koşulları için geçerli düşük sıcaklıklı ve sıvı fazdan oluşan bir sistemin basınç ve sıcaklık davranışı modellenmekte ve bildiriye tartışılmaktadır. Çalışmada belirli bir üretim periyodu sonrasındaki kapanma döneminde sıcaklık değişiminin özellikleri vurgulanmaktadır. Orijinal duruma dönüş için gerekli zaman, bildiriye tartışıldığı gibi, birçok faktöre bağlıdır. Üretim süresi en önemli faktördür. Ancak doğal beslenme ve tekrar-basma (reinjeksiyon) koşulları da orijinal duruma dönüş davranışını etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler: Jeotermal rezervuar, Yenilenebilirlik, Sürdürülebilirlik.

ABSTRACT

Most geothermal fields are exploited at a rate faster than the energy is replaced by the pre-production flow. Thus fields cannot be produced at a rate corresponding to the installed capacity of their heating facilities or power plants on a continuous basis, forever. In this sense they are not sustainable. However if after a time the field is shut-in the natural energy flow will slowly replenish the geothermal system and it will again be available for production. Therefore when operated on a periodic basis, with production followed by recovery, geothermal systems are renewable and sustainable.

This paper addresses renewability and sustainability concept. The parameters affecting the time that a geothermal field takes to fully recover to its original state after shut-down at some production time are discussed.

An approach to model the temperature behavior of a relatively low-temperature single liquid-phase geothermal reservoir as mostly seen in Turkey is discussed here. The pressure and temperature behavior of geothermal systems are investigated. Emphasis is given to understand the characteristics of temperature recovery following some production period. The time to reach a recovery depends on many factors as discussed in the paper. Primarily it depends on the production period. However, the natural recharge and reinjection conditions considerably affect the recovery.

Key Words: Geothermal reservoir, Renewability, Sustainability.

1. GİRİŞ

Jeotermal kaynakların sürdürülebilir kullanımı gittikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Sürdürülebilirlik; bir jeotermal projeyi, proje ömrü boyunca ekonomik olarak ticari kapasitede kullanma kabiliyeti olarak tanımlanır ve bu tür bir işletme sırasında oluşan (basınç düşümü ve/veya soğuma gibi) kaynak azalımını tekrar-basma (reenjeksiyon) ve/veya yeni kuyular delme gibi karşı uygulamalarla giderme/önleme adımlarını içerir [1]. Yenilenebilirlik ise işletim sırasında herhangi bir kaynak azalımı olmaksızın projenin kapasitede kullanım kabiliyeti olarak tanımlanır. Dolayısıyla yenilenebilir kapasite sürdürülebilir kapasiteden düşüktür. Bir saha için yenilenebilir kapasite sisteme doğal olarak iletim ve taşınımıyla giren beslenmeye eşdeğer olan ısı güç kapasitesine karşılık gelir. Sürdürülebilir kapasite ise doğal ısı beslenmesine ek olarak sistemde depolanmış ısının daha fazla üretiminden kaynaklanan ve tekrar-basma ve yeni kuyu delme uygulamalarıyla gerçekleştirilen bir kapasitedir. Yenilenebilirlik jeotermal kaynağın doğal yapısına dayanan bir tanım olurken, sürdürülebilirlik ise kaynağın nasıl kullanıldığını ve ne kadarının üretildiğine yönelik bir tanımdır. Sanyal tarafından yapılan ve ticari olarak işletilen jeotermal sahaları kapsayan bir çalışmada, sahalar için sürdürülebilir kapasitenin yenilenebilir kapasiteden 5–45 kat (ortalama 10 kat) daha büyük olduğu gösterilmektedir [1].

Bu tür, yenilenebilir kapasiteden daha yüksek olan sürdürülebilir kapasitede işletilen sahalarda, sürdürülebilirlik zaman sınırlı olup, sonsuza kadar sürmez. Kaynağın hızlı üretimi sürdürülebilirlik özelliğini ortadan kaldırabilir ve (sahada basınç düşmesi, kuyu içi seviyelerindeki düşüş ve pompaların kullanılmaz hale gelmesi, üretilen sıcaklığın düşmesi gibi nedenlerle) işletim sürdürülebilir olmaktan çıkar. İşletimde amaç, proje ömrünce sürdürülebilir özelliğin kalmasıdır.

Jeotermal sahalarda doğal beslenme hem üretim ve hem de kapanma döneminde etkilidir. Bu nedenle, herhangi bir saha belirli bir üretim döneminden sonra üretim durdurulursa, doğal enerji girişi jeotermal sistemi beslemeye devam eder ve sistem yenilenir ve tekrar üretilebilir duruma gelir. Dolayısıyla üretim dönemi ve onu izleyen kapanma dönemi şeklinde periyodik bir işletme yöntemi ile jeotermal sistemler yenilenebilir ve sürdürülebilir olurlar.

Yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik konusunda yapılmış literatür çalışmaları Satman tarafından verilmektedir [2,3].

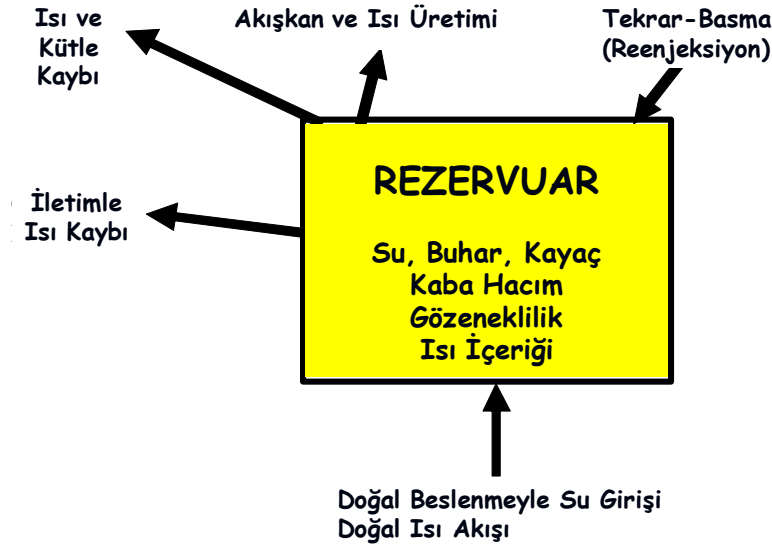
Bu bildiride yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik konusu incelenmekte, saha sonuçları irdelenerek, jeotermal sahanın işletilmesini etkileyen parametreler ve özellikle sahada üretim durdurulduktan sonra sahanın orijinal duruma gelmesi için gerekli süre ve bu süreyi etkileyen parametreler vurgulanmaktadır.

2. REZERVUARIN ÜRETİM DÖNEMİ VE KAPANMA DÖNEMİ BASINÇ VE SICAKLIK DAVRANIŞLARI

Bu çalışmada incelenen jeotermal rezervuar modelinin basit bir şeması Şekil 1'de verilmektedir. Rezervuarın kaba hacmi V olup, rezervuar akışkan (su, su buharı) içermektedir. Rezervuardan akışkan ve ısı üretimi yapılmaktadır. Rezervuara su girişi doğal beslenme ve tekrar-basma ile gerçekleşirken, ısı girişi ise doğal beslenme ve tekrar-basma uygulamasında ısı taşınımı ile ve sisteme alttan iletimle olmaktadır.

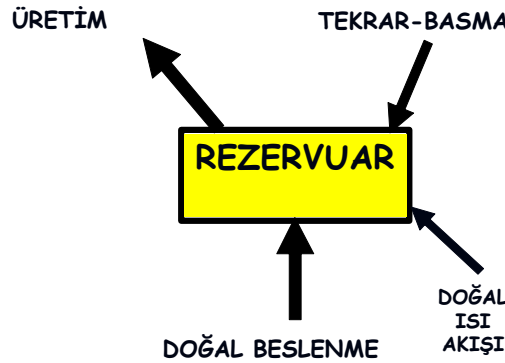
Rezervuarın üretimi sırasında, rezervuara alttan iletimle giren ısı ve rezervuardan iletimle olan ısı kaybı genelde ihmal edilebilecek düzeydedirler. Ancak, rezervuarda üretim durdurulduğunda sisteme iletimle ısı girişi önem kazanır ve sistemde enerji artışı esas itibarıyla bu ısı iletiminden kaynaklanır.

Sistemin üretim dönemi göz önüne alındığında, sistemi etkileyen akışkan ve ısı geçişi bileşenleri üretim, tekrar-basma ve doğal beslenmedir. İletimle olan ısı girişi ve ısı kaybı ihmal edilirse, sistemin şeması Şekil 2'de verilmektedir. Rezervuardan akışkan ve ısı üretilmesinden dolayı sistemde basınç



Şekil 1. Rezervuar Modeli.

ve sıcaklık azalır. Tekrar-basma uygulamasıyla rezervuar basıncının korunması amaçlanırken, rezervardakinden daha düşük sıcaklıkta su enjeksiyonu nedeniyle rezervuarda soğuma olur ve sıcaklığı azalır. Rezervuara doğal beslenme ve tekrar-basma uygulamasıyla su girişi rezervuar basıncının korunmasına yardımcı olur. Ancak doğal beslenmeyle giren suyun sıcaklığına bağlı olarak, rezervuar sıcaklığı azalabilir veya artabilir. Tekrar-basma uygulaması, basılan suyun sıcaklığı üretilen sıcaklıktan düşük olduğundan dolayı, rezervuarı soğutur ve rezervuar sıcaklığını düşürür.



Şekil 2. Üretim, Tekrar-Basma ve Doğal Beslenmenin Gözönüne Alındığı Rezervuar Modeli.

Sahadan üretim durdurulduğunda rezervuarın ortalama basıncı ve sıcaklığı orijinal basınç ve sıcaklık değerlerinden daha düşük düzeylerde olur. Saha kapatıldığında, basınç ve sıcaklığın orijinal değerlere artmasına neden olan farklı mekanizmalar vardır.

Basınç artışı doğal beslenme suyunun rezervuara girişinden dolayıdır. Saha işletilmiyor olmasına rağmen, rezervuar basıncı doğal beslenme kaynağı basıncından düşük olduğu için, sisteme doğal beslenme suyu girişi devam eder ve rezervuar basıncı artar. Doğal beslenmenin yeterli olması durumunda, rezervuar basıncının orijinal basınca ulaşması belirli bir sürede gerçekleşir. Bu süre, doğal beslenmenin güçlü olup olmamasına bağlıdır.

Saha kapatıldığında sıcaklık artışı iki nedenle olur; sisteme doğal beslenmeyle giren suyun taşınımından kaynaklanan ısı ve alttan giren iletim ısısı. Üretim durdurulduktan sonra rezervuarın yenilenebilir özelliğini sağlayan belirleyici mekanizma, rezervuara iletimle giren doğal ısı akışıdır. İletimle ısı girişi rezervuarın sıcaklığını artırır. Uzun dönemde rezervuarın orijinal sıcaklığa ulaşmasında etkili olan parametre, iletimle ısı girişidir. Isı iletiminin özelliklerine bağlı olarak, orijinal

sıcaklığa ulaşma süresi değişir. Orijinal sıcaklığa ulaşma süresi, orijinal basınca ulaşma süresinden genelde daha uzundur.

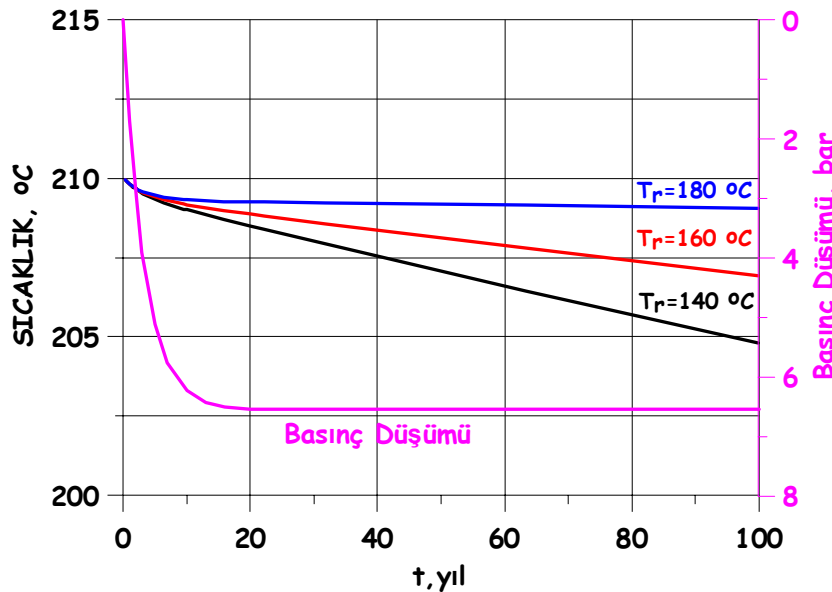
Rezervuarda üretim sırasında ve saha üretime kapatıldıktan sonraki dönem içinde oluşan basınç ve sıcaklık davranışlarını belirlemede kullanılan kütle ve enerji denklemleri burada verilmemektedir. Ancak, basınç ve sıcaklık davranışını etkileyen parametreler tartışılmaktadır. Aşağıda tartışılmakta olan davranışların geçerli olduğu rezervuar için rezervuar kaba hacmi $12 \times 10^9 \text{ m}^3$, rezervuarın orijinal (ilk) sıcaklığı $210 \text{ }^\circ\text{C}$, rezervuardan üretim debisi 270 kg/s ve doğal ısı akışı $30 \times 10^6 \text{ J/s}$ varsayılmaktadır. Diğer modelleme ayrıntıları ve sistem ve rezervuar verileri Kaynak [2] ve [3]'te sunulmaktadır ve burada tekrarlanmamaktadır.

2.1. Üretim Dönemi Sıcaklık ve Basınç Davranışları

Jeotermal sistemlerin enerji üretim potansiyeli, üretimde oluşan basınç düşümü ve rezervardaki mevcut enerji içeriği ile belirlenir. Doğal beslenmenin gücüne bağlı olarak, üretim zamanı içinde rezervuar basıncı yavaş veya hızlı, fakat kesinlikle, azalır. Doğal beslenmenin yetersiz olması durumunda basınç hızla azalır. Dolayısıyla sistemden üretim potansiyeli, rezervuarın enerji içeriğinden dolayı değil, rezervuarın su içeriğinden dolayı sınırlanır. Jeotermal sistemin büyüklüğü, rezervuarın geçirgenliği ve doğal beslenmenin gücü, basınç düşümünü belirleyen parametrelerdir. Rezervuarda basınç düşümünü etkileyen bir başka parametre de sürdürülebilir jeotermal işletiminin olmazsa olmaz parçası olan tekrar-basma uygulamasıdır. Tekrar-basma uygulamasıyla yüzeydeki artık sudan kurtulma, basınç düşümünü azaltma ve ayrıca rezervuar kayacından daha fazla enerji üretimi sağlanır. Jeotermal sahanın başarılı işletilmesindeki amaç mümkün olduğu kadar uzun üretim dönemi içinde basınç düşümünü korumak ve sınırlamaktır.

2.1.1. Doğal Beslenme Sıcaklığının Etkisi

Tekrar-basma uygulamasının olmadığı varsayılan bir jeotermal sistem için doğal beslenmeyle rezervuara giren suyun sıcaklığının basınç ve sıcaklık davranışına etkisi Şekil 3'te gösterilmektedir. 100 yıllık üretim dönemi sonunda oluşan basınç düşümü 6.55 bar 'dır. Doğal beslenme ile su girişinin güçlü olduğu bu açık sistem için, doğal beslenmeyle giren suyun sıcaklığı (T_r) olarak 140 , 160 ve $180 \text{ }^\circ\text{C}$ alınmıştır. Rezervuarda basınç düşümü sıcaklık düşümüne göre çok daha hızlı gerçekleşir. Doğal beslenme sıcaklığı basınç davranışını etkilemezken, sıcaklık düşümünü etkiler. Üretim sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta beslenme ile su girişi olduğundan, rezervuarda soğuma olur. Soğumanın büyüklüğü doğal beslenme sıcaklığına bağlıdır. Daha düşük sıcaklıkta su girişi, daha çok soğuma yaratır ve sıcaklık düşümü de fazla olur.



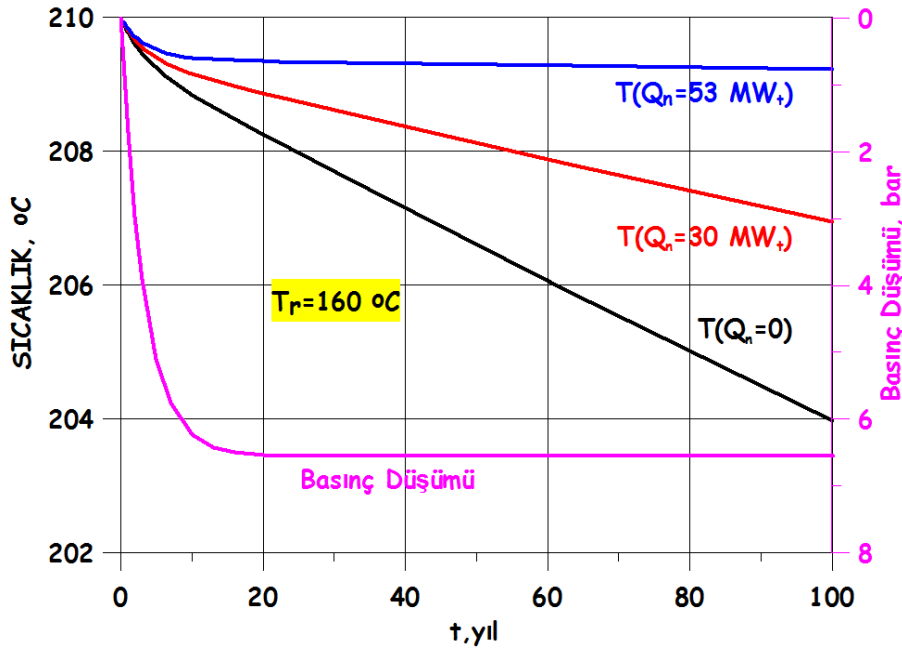
Şekil 3. Doğal Beslenme Sıcaklığının Rezervuarın Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi [2].

2.1.2. Doğal Isı Akışının Etkisi

Doğal ısı akışı (Q_n) sistemi üretim öncesinde besleyen net enerji girişi olarak tanımlanmaktadır [4]. Sanyal [1] ise bu terimi “Yenilenebilir Kapasite” olarak adlandırmaktadır. Rezervuarı taşınım ve iletimle besleyen ısı debisidir ve yeryüzünde ısıl anomalinin gerçekleştiği alandaki toplam ısı çıkışına eşdeğerdir. İdeal koşullarda, üretim öncesi dönemde yeryüzünde ısıl anomalinin olduğu alanda iletimle ısı kaybı ve yeryüzüne doğal çıkışlarla ulaşan taşınım ile ısı çıkışı değerlerinden yararlanarak tahmin edilir.

Şekil 4’te, tekrar-basma uygulamasının olmadığı varsayılan bir açık sistemde, doğal ısı akışının rezervuarın basınç ve sıcaklık davranışına etkisi gösterilmektedir. Doğal beslenmeyle giren suyun sıcaklığı $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, doğal ısı akışı için karşılaştırma amacıyla üç farklı değer (0, 30 ve 53 MW_t) alınmıştır.

Üç farklı doğal ısı akışı durumu için de doğal beslenme ile su girişi aynı kaldığı için, Şekil 4’te verilen basınç düşümü üç durum için de aynıdır. Rezervuardaki soğumanın büyüklüğü rezervuara giren doğal ısı akışına bağlıdır. Doğal ısı akışı artarsa rezervuar sıcaklığındaki düşüm azalmaktadır.

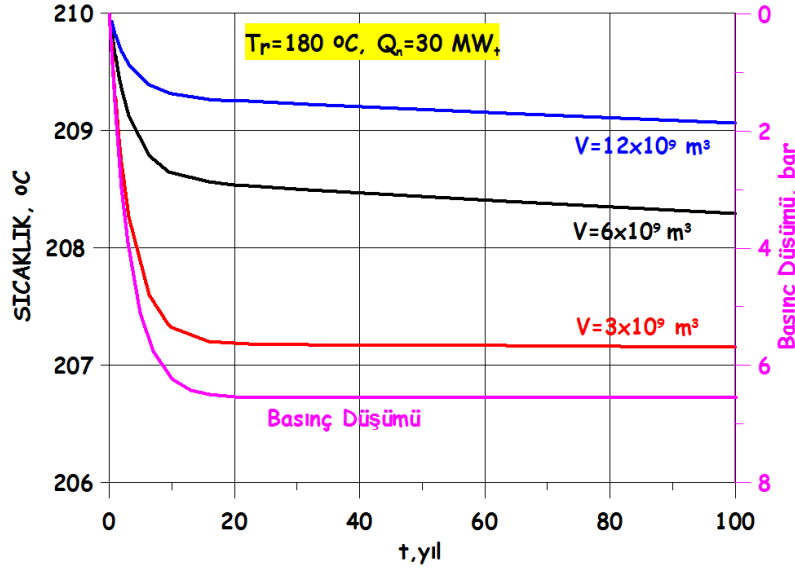


Şekil 4. Doğal Isı Akışının Rezervuarın Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi [2].

2.1.3. Rezervuar Hacminin Etkisi

Rezervuar hacminin basınç ve sıcaklık davranışına etkisi Şekil 5’te gösterilmektedir. Doğal beslenmeyle giren su sıcaklığı $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan bir açık sistem varsayılmaktadır. Rezervuar kaba hacmi 12×10^9 , 6×10^9 ve $3 \times 10^9\text{ m}^3$ olan üç ayrı sistem için basınç ve sıcaklık değişimi Şekil 5’te karşılaştırma amacıyla birlikte verilmektedir. Üretim ve doğal beslenmeyle su girişinin olduğu, tekrar-basma uygulamasız bir açık sistem göz önüne alınmaktadır.

Tekrar-basma uygulamasının olmadığı sistemlerde eğer doğal beslenmeyle giriş güçlü ise (açık sistem) basınç davranışı rezervuar hacminden etkilenmez. Fakat rezervuardaki soğuma rezervuar hacmine bağlıdır ve rezervuar hacmi arttıkça rezervuarın sıcaklık düşümü azalır.

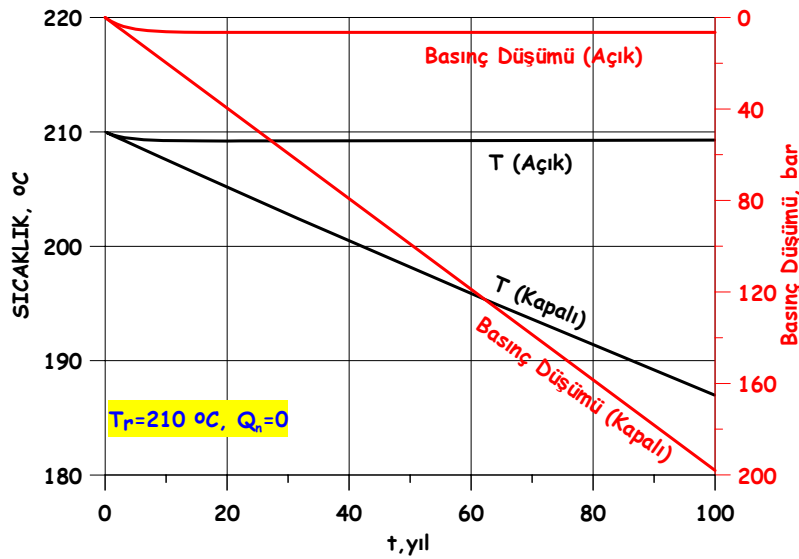


Şekil 5. Rezervuar Hacminin Rezervuarın Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi [2].

2.1.4. Dış Sınır Koşulunun Etkisi

Açık sistem dış sınırın doğal su beslenmesine uygun olduğu sistemi ve kapalı sistem ise dış sınırın akışkan akışına kapalı olduğu ve rezervuara doğal beslenmeyle akışkan girişinin olmadığı sistemi temsil etmektedir. Şekil 6'da üretim ve doğal beslenmenin olduğu ve fakat tekrar-basma uygulamasının olmadığı bir açık sistem modellenmektedir. Doğal beslenmeyle giren suyun sıcaklığı 210 °C ve doğal ısı akışı 0 MW_t varsayılmaktadır.

Şekil 6, dış sınır koşulunun rezervuar basınç ve sıcaklık davranışında etkisini göstermektedir. Beklendiği gibi, doğal beslenmenin olmadığı kapalı sistemde basınç düşümü açık sistemdeki basınç düşümüne göre çok daha yüksektir. Rezervuardaki soğuma da aynı şekilde dış sınır koşuluna bağlıdır. Açık sistemde üretilen ısı ile doğal beslenmeyle giren ısı arasındaki fark rezervuardaki sıcaklık düşümünü belirlemektedir. Doğal beslenmeyle ısı girişinin olduğu açık sistemde sıcaklık düşümü, kapalı sistemdekine göre daha az olur.



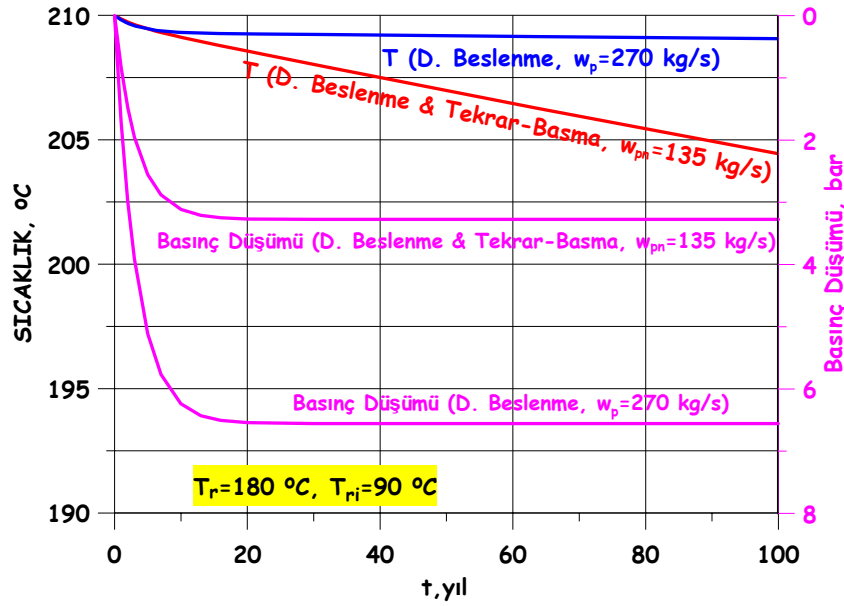
Şekil 6. Rezervuar Dış Sınır Koşulunun Rezervuarın Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi [2].

2.1.5. Tekrar-Basmanın Etkisi

Rezervuarın sürdürülebilir işletiminde tekrar-basma uygulaması gereklidir. Rezervuarda toplam ısı içeriği rezervuarın sıcaklığına, kayaç ve akışkan ısı özelliklerine ve gözenekliliğe bağlıdır. Toplam ısı içeriği, kayaç ısı içeriği ve akışkan ısı içeriği toplamıdır. Su ile dolu bir jeotermal sistem için suyun içerdiği ısının toplam ısı içeriğine oranını etkileyen en önemli parametre gözenekliliktir. Örneğin gözenekliliği %5 olan ve doğal beslenmenin olmadığı varsayılan bir rezervuardan tüm su üretilse bile toplam ısının ancak %7'si üretilmiş olacaktır [5]. Rezervuardan ısı üretiminin artırılması için kayaçtaki ısının üretilmesi önem taşımaktadır. Kayaçtaki ısının üretilmesi ise üretilen suyun ısısı alındıktan sonra kalan düşük sıcaklıklı suyun rezervuara basılması, basılan soğuk suyun rezervuarda sıcak kayaçla temas ettikten sonra ısınması ve sıcaklığı artan suyun ek su ve ısı kaynağı olarak üretilmesiyle mümkündür.

Şekil 7'de tekrar-basmanın rezervuarın basınç ve sıcaklık davranışına etkisi gösterilmektedir. Şekil 7'de incelenen açık sistem iki ayrı durumda varsayılmaktadır. Birinci durumda rezervuarda üretim ve doğal beslenme ile su girişi göz önüne alınmakta, tekrar-basma uygulanmakta, üretim debisi 270 kg/s varsayılmaktadır. İkinci durumda ise üretim debisi aynı (270 kg/s) tutulurken, üretilen suyun yarısının (135 kg/s) rezervuara tekrar-basıldığı düşünülmektedir. İki durum için de, doğal beslenmeyle giren suyun sıcaklığı 180 °C ve basılan suyun sıcaklığı 90 °C alınmıştır.

Şekil 7'de verilen iki ayrı açık sistem için basınç davranışlarının karşılaştırılması, tekrar-basmanın rezervuar basıncını korumadaki olumlu özelliğini açıkça göstermektedir. Tekrar-basma durumunda basınç düşümü %50 oranında azalmaktadır. Ancak, tekrar-basma rezervuarın soğumasına neden olur. Söz konusu soğuma niceliği, basılan suyun sıcaklığına ve miktarına bağlıdır. Enjeksiyon sıcaklığı düşük olursa rezervuar sıcaklık düşümü artar.



Şekil 7. Tekrar-Basmanın Rezervuarın Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi [2].

2.2. Kapanma Dönemi Sıcaklık ve Basınç Davranışları

Rezervuar üretime kapatıldığında basınç ve sıcaklık artmaya başlar. Kapanma anındaki basınç ve sıcaklık değerlerinden orijinal basınç ve sıcaklık değerlerine artış hızları farklıdır. Genel olarak, kapanma döneminde orijinal basınca dönüş süresi, üretimdeki basınç düşümü için geçen süreye yakın olarak gerçekleşir. Fakat orijinal sıcaklık değerine varış süresi, basınç için geçerli süreden çok daha uzundur. Sistem içinde kütle değişimi etkileri enerji değişimi etkilerine göre daha kısa sürede olur.

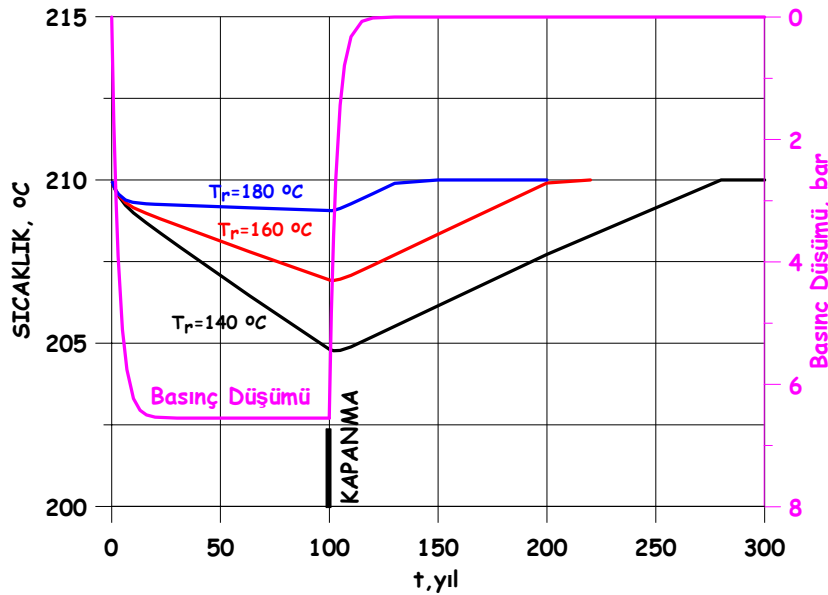
Rezervuar kapatıldığı andan itibaren, rezervuar basıncı düşük olduğundan dolayı, doğal beslenmeyle rezervuara su girişi sürer. Beslenmeyle giren suyun sıcaklığı kapanma anındaki rezervuar sıcaklığından yüksek ise giren suyun etkisi rezervuarı ısıtma, tersi ise soğutma yönünde olur. Eğer doğal beslenme etkisi ihmal edilirse, kapanma döneminde rezervuarı ısıtan mekanizma, yenilenebilir kapasite olarak ta tanımlanan doğal ısı akışı (Q_n)'dir.

Özetlemek gerekirse, kapanma döneminde rezervuara taşınım ile ısı girişi doğal beslenmeyle su girişi nedeniyle, rezervuara iletimle ısı girişi ise doğal ısı akışıyla olur. Taşınım ile ısı girişi, kapanma döneminin başlangıcında etkili olurken, iletimle ısı girişi rezervuar sıcaklığı orijinal sıcaklığa ulaşana kadar sürer.

2.2.1. Doğal Beslenme ile Giren Su Sıcaklığının Kapanma Dönemi Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi

Üretim dönemi davranışı Şekil 3'te verilen rezervuar için 100 yıllık üretim dönemi sonrasındaki kapanma dönemi basınç ve sıcaklık davranışı Şekil 8'de gösterilmektedir. Üretimle orijinal basınçtan itibaren basınç hızla düşerken, kapanma döneminde basıncın orijinal basınca ulaşması da hızlı olur. Sıcaklık değişimi ile basınç değişimi karşılaştırıldığında, üretim döneminde basınç düşümüne göre daha yavaş bir sıcaklık düşümü ve kapanma döneminde de basınç artışına göre daha yavaş bir sıcaklık artışı olur.

Şekil 8'de, doğal beslenme ile giren su sıcaklığının kapanma dönemindeki sıcaklık değişimine etkisi gösterilmektedir. Doğal beslenme ile giren su sıcaklığı artıkça, orijinal sıcaklığa varış süresi daha kısa olur. Bir başka deyişle, üretim döneminde daha düşük sıcaklıkta su girişi daha fazla soğuma yaratır ve rezervuarda daha yüksek sıcaklık düşümü gerçekleşir. Dolayısıyla, daha düşük sıcaklıkta su girişi durumunda orijinal sıcaklığa varış süresi de daha büyük olacaktır.

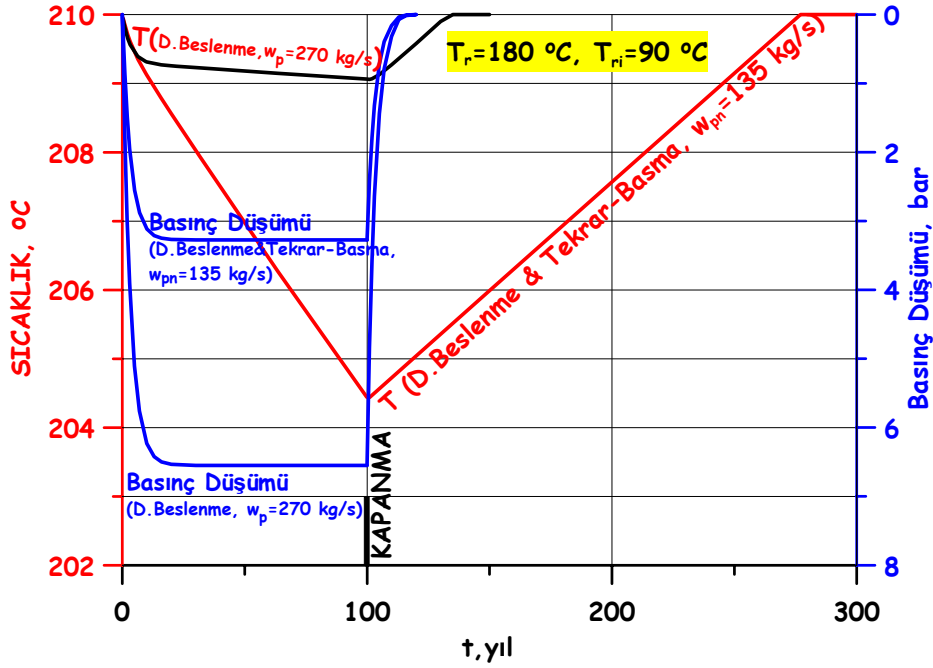


Şekil 8. Doğal Beslenme ile Giren Su Sıcaklığının Kapanma Dönemi Rezervuarın Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi [2].

2.2.2. Tekrar-Basmanın Kapanma Dönemi Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi

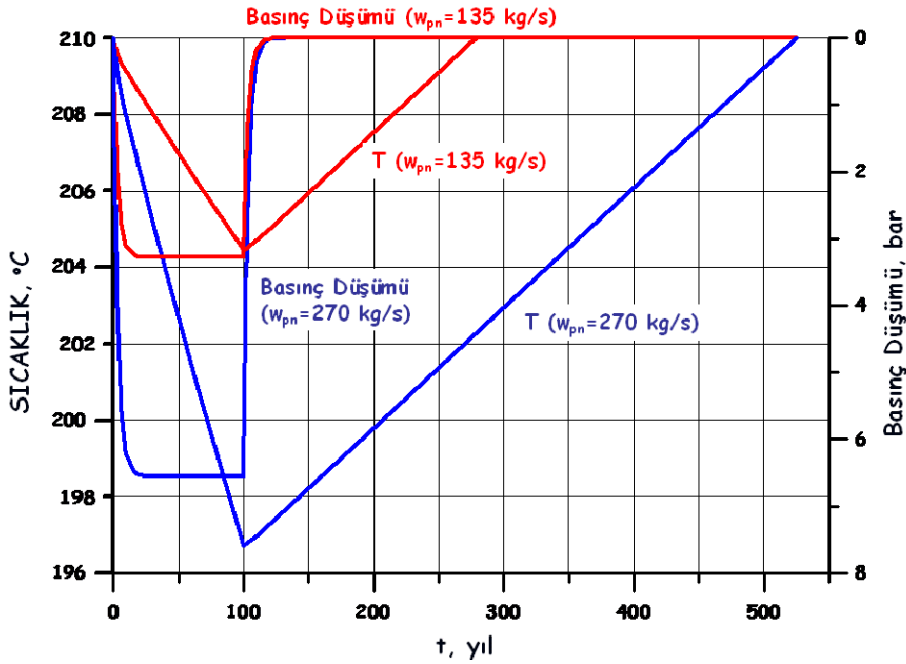
Şekil 7'de üretim dönemi basınç ve sıcaklık davranışı verilen sistemi alalım. Doğal beslenme su giriş sıcaklığı 180 °C ve tekrar-basma sıcaklığı 90 °C'dir. Üretim ve kapanma dönemini birlikte gösteren Şekil 9'da tekrar-basmanın basınç düşümünü azaltmadaki ve rezervuar basıncını korumadaki olumlu etkisi görülmektedir. Tekrar-basma uygulamasında, uygulamanın olmaması durumuna göre basınç düşümü daha azdır. Ancak, tekrar-basma rezervuarın soğumasına neden olur. Rezervuarın soğumasını belirleyen parametreler basılan suyun sıcaklığı ve debisidir. Daha düşük basma sıcaklığı

üretim döneminde daha yüksek sıcaklık düşümü oluştururken kapanma döneminde orijinal sıcaklığa ulaşma süresi de daha uzun olur.



Şekil 9. Tekrar-Basmanın Kapanma Dönemi Rezervuarın Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi [2].

Tekrar-basma debisinin basınç ve sıcaklık davranışına etkisi ise Şekil 10'da gösterilmektedir. Karşılaştırma amacıyla, üretim debisi 540 kg/s ve tekrar-basma debisi 270 kg/s olan durum ile üretim debisi 270 kg/s ve tekrar-basma debisi 135 kg/s olan diğer bir durum için geçerli basınç ve sıcaklık davranışları birlikte verilmektedir. Her iki durumda da üretilen debinin yarısı rezervuara basılmaktadır.



Şekil 10. Net Üretim Debisinin Kapanma Dönemi Rezervuarın Basınç ve Sıcaklık Davranışına Etkisi [2].

Şekil 10'da açıkça görüldüğü gibi, üretim döneminde basınç düşümünü belirleyen parametre, rezervuardan üretim debisi ile tekrar-basma yoluyla rezervuara verilen debi arasındaki fark olan rezervuardan net üretim miktarıdır. Net üretim miktarı arttıkça üretimde basınç düşümü daha fazla olmaktadır. Doğal beslenmenin güçlü olduğu bu iki açık sistem için de kapanma döneminde basıncın orijinal basınca ulaşma süresi kısadır. Fakat kapanma döneminde orijinal sıcaklığa ulaşma süresi orijinal basınca ulaşma süresinden daha uzundur. Ayrıca, net üretim miktarı ve tekrar-basma debisi yüksek olan sistem ($w_{pn}=270$ kg/s) için üretim döneminde sıcaklık düşümü daha yüksek olduğu gibi, kapanma döneminde orijinal sıcaklığa ulaşma süreci de daha uzun olur.

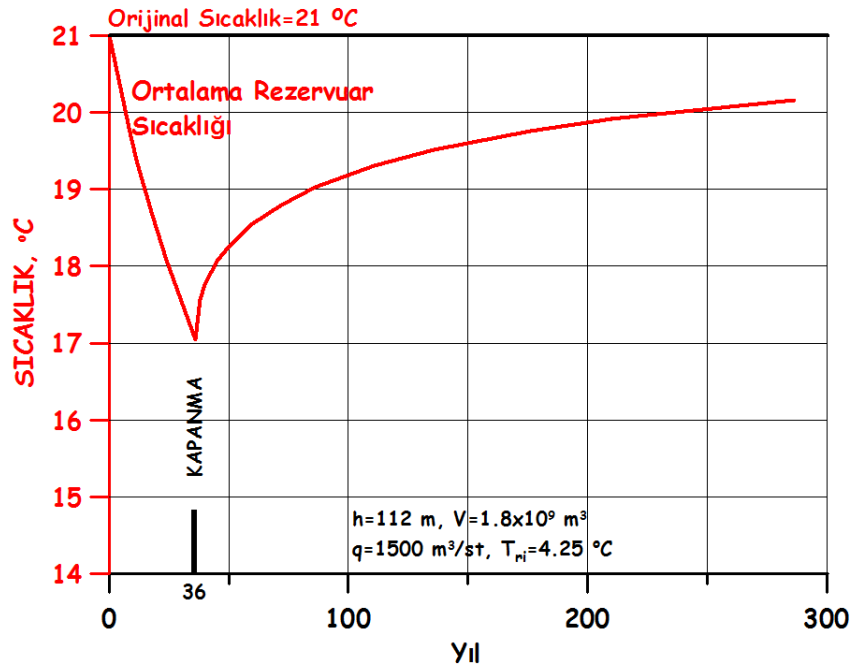
2.3. Üretim-Kapatma Periyotlu İşletimde Yenilenebilirlik ve Sürdürülebilirlik

Jeotermal sahalar, belirli bir süre üretimden sonra işletim durdurulursa, doğal akışkan ve ısı girişi jeotermal sistemi yeniler ve saha tekrar üretime hazır hale gelir. Eğer sistem kapalı ise, bir başka deyişle jeotermal sisteme doğal beslenme ile su girişi yoksa bu tür bir sistem kapalı bir sistemdir. Kapalı sistemlerde doğal beslenme ile su girişi olmadığı için taşınım ile ısı girişide yoktur. Ancak doğal ısı akışı (yenilenebilir kapasite) etkisi vardır ve kapanma döneminde sistemin yenilenebilir özelliği doğal ısı akışı ile gerçekleşir.

Yeraltında özellikle geçirgenliği akışkan akışına uygun sedimanter formasyonlarda bir kuyu çiftinden yararlanarak, enjeksiyon kuyusundan soğuk su basılır ve üretim kuyusundan sıcak su üretilerek, bir yapay jeotermal rezervuar yaratılır ve ısı üretilebilir. Üretim ve enjeksiyon debileri aynıdır. Bu tür sistemlere kuyu-çifti sistemleri (doublet) denmektedir.

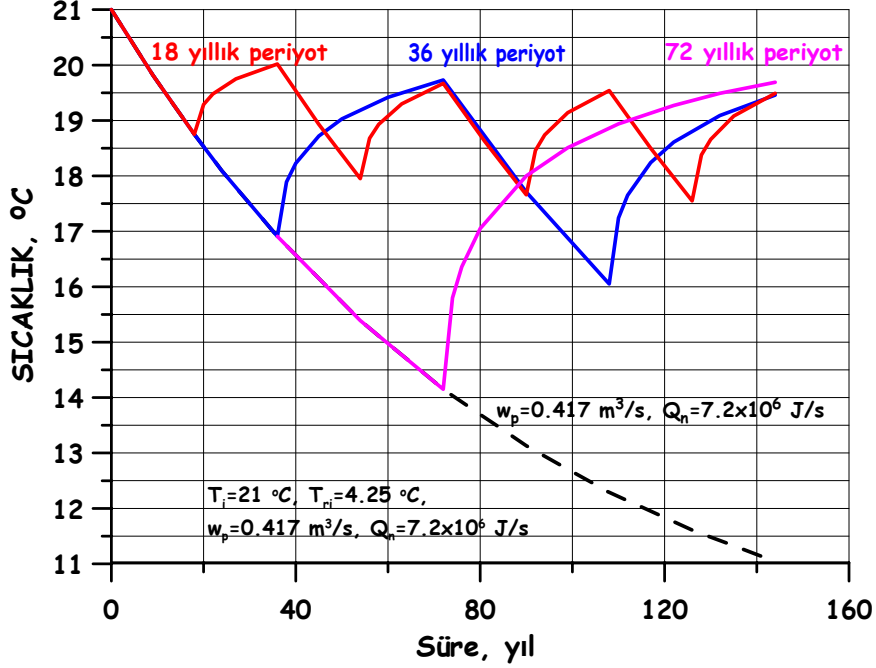
Ayrıntıları Kaynak 3'te verilen bir kuyu çifti saha uygulaması için, sahanın 36 yıllık üretiminden sonra kapatılması durumunda oluşan sıcaklık davranışı ve sahanın yenilenme davranışı Şekil 11'de gösterilmektedir. Rezervuarın hacmi 1.8×10^9 m³, formasyon kalınlığı 112 m, üretim ve enjeksiyon debisi 1500 m³/st olup, rezervuardan üretilen su ısı alınıldıktan sonra 4.25 °C sıcaklıkta rezervuara basılmaktadır.

Şekil 11'de görüldüğü gibi, 250 yıllık kapanma dönemi sonunda orijinal rezervuar sıcaklığına dönüş %80 oranında gerçekleşmektedir veya bir başka deyişle, rezervuar %80 oranında yenilenmektedir.



Şekil 11. Kuyu Çifti (Doublet) Uygulamasında 36 Yıllık Üretim Dönemi Sonrasında Kapanma Döneminde Oluşan Sıcaklık Davranışı [3].

18, 36 ve 72 yıllık üretim-kapanma periyotları durumunda sıcaklık davranışı için yapılan modelleme sonuçları Şekil 12'de verilmektedir. Üç farklı periyot için geçerli sıcaklık davranışlarının karşılaştırılmasından, daha kısa periyotlu işletmeler için sıcaklıkların daha yüksek düzeyde kaldığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, kısa periyotlu işletmeler daha fazla enerji üretimi sağlamaktadır ve sürdürülebilir işletimde tercih edilmelidirler.



Şekil 12. Kuyu Çifti (Doublet) Uygulamasında 18, 36 Ve 72 Yıllık Üretim Dönemi Sonrasında Kapanma Dönemlerinden Oluşan Periyotlar İçin Sıcaklık Davranışı [3].

SONUÇ

Bu bildiriye, genelde sınının etken olduğu düşük sıcaklıklı jeotermal sistemler için üretim ve kapanma dönemlerinde oluşan basınç ve sıcaklık davranışları incelenmekte, yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik konusu değerlendirilmektedir. Jeotermal projelerin sürdürülebilir işletiminde sınırlayıcı faktörler basınç düşümü ve/veya sıcaklık düşümüdür. Dolayısıyla proje sürdürülebilirliği, işletim sırasındaki basınç ve sıcaklık davranışlarıyla belirlenmektedir.

Basınç ve sıcaklık davranışları sistemin bileşenleri tarafından kontrol edilmektedir. Üretim döneminde basınç ve sıcaklık düşümünde etkili olan bileşenler arasında:

1. Üretim debisi,
2. Doğal beslenmeyle giren su sıcaklığı ve gücü (sistemin açık veya kapalı olması),
3. Tekrar-basma sıcaklığı ve debisi,
4. Doğal ısı akışı (yenilenebilir kapasite),
5. Rezervuar ve sistem özellikleri (kaba hacim, gözeneklilik, ısıl özellikler, vb.)
6. başlıcalarıdır. Kapanma döneminde ise basınç ve sıcaklığın orijinal değerlere ulaşmasını belirleyen davranışı etkileyen bileşenler ise aşağıda sıralanmaktadır:
7. Doğal ısı akışı (yenilenebilir kapasite)
8. Doğal beslenmeyle giren su sıcaklığı ve gücü.

Kapanma döneminde sıcaklığın orijinal sıcaklığa ulaşması için gereken süre basıncın orijinal basınca ulaşması için gerekli süreden uzundur. Sıcaklığın orijinal sıcaklığa ulaşması için gerekli süre birincil

olarak doğal ısı akışına (yenilenebilir kapasiteye) bağlıdır. Üretim dönemi süresi, doğal beslenmeyle giren suyun sıcaklığı, tekrar-basma uygulamasında basılan suyun sıcaklığı ve debisi de üretim dönemi sonundaki sıcaklık düşümünü belirleyen parametreler olduklarından dolayı, kapanma döneminde orijinal sıcaklığa ulaşma süresini etkilemektedirler.

Jeotermal sistemlerin, üretim-kapanma dönemlerini kapsayan periyotlar şeklinde işletilmesi sözkonusu olduğunda, kısa periyotlu işletmelerde rezervuar sıcaklığı daha yüksek düzeyde kalmakta ve dolayısıyla daha fazla enerji üretilmektedir. Bu özellik, projelerin sürdürülebilir işletiminde dikkate alınmalıdır.

Jeotermal projelerin sürdürülebilir işletiminin tasarımında, bu bildiride tartışılan modelleme çalışmalarının ve basınç ve sıcaklık davranışlarının önemi belirgindir.

KAYNAKLAR

- [1] SANYAL, S.K., “Sustainability and Renewability of Geothermal Power Capacity”, World Geothermal Congress, Antalya, 24-29 Nisan, 2005.
- [2] SATMAN, A., “Sustainability of a Geothermal Reservoir”, World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 Nisan, 2010.
- [3] SATMAN, A., “Sustainability of Geothermal Doublets”, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, 31 Ocak-2 Şubat, 2011.
- [4] O’SULLIVAN, M., ve MANNINGTON, W., “Renewability of the Wairakei-Tauhara Geothermal Resource”, World Geothermal Congress, Antalya, 24-29 Nisan, 2005.
- [5] RAMEY, H.J., Jr. (Editor), Reservoir Engineering Assessment of Jeotermal Systems, Department of Petroleum Engineering, Stanford University, California, 1981.

ÖZGEÇMİŞ

Abdurrahman SATMAN

İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Petrol Mühendisliği Bölümü’nden Y. Mühendis olarak mezun olduktan sonra ABD’deki Stanford Üniversitesi Petrol Mühendisliği Bölümü’nden Master ve Doktora derecelerini aldı. Aynı üniversitede Yardımcı Profesör ve Doktora Sonrası Araştırmacı olarak çalıştıktan sonra Türkiye’ye döndü. Temmuz 1980’den itibaren de İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü’nde çalışmaktadır. Eylül 1985 ve Eylül 1987 tarihleri arasında Suudi Arabistan’daki KFUPM Research Institute’te araştırmalar yaptı. Mayıs 2005-Ocak 2009 arasında İTÜ Enerji Enstitüsü Müdürü olarak görev yaptı. Halen, öğretim üyeliği yanısıra Enerji Enstitüsü Konvansiyonel Enerji Anabilim Dalı başkanlığı görevini de yürütmektedir.

İlgi alanları arasında; petrol, doğalgaz, jeotermal ve enerji mühendisliğinin değişik konuları yer almaktadır. Yurtiçi ve yurtdışında bilimsel dergilerde yayınlanmış veya bilimsel toplantılarda sunulmuş 200’e yakın çalışması ve ikisini kendisinin tek yazar olarak yazdığı 3 kitabı vardır. İTÜ Dergisi’nde (Mühendislik) ve Journal of Petroleum Exploration and Production Technology dergisinde editör olarak görev yapmaktadır.

Petrol Mühendisleri Odası (Türkiye) ve Society of Petroleum Engineers (ABD) üyesi olup, İngilizce bilmektedir.