

Jeotermal kuyu testleri

İlker ATMACA¹

1. Giriş

Jeotermal enerji dünyanın içerisinde bulunan elde edilebilir ve işletilebilir doğal sıcaklıktır. Bu enerji kaynağının yenilenebilir ve temiz olduğu ispatlanmıştır. Dünya üzerindeki en fazla mevcut olan enerji kaynağıdır ve nesiller boyunca insanlığın enerji ihtiyacının tümünü sağlayacak potansiyeli vardır. Jeotermal enerji üretimi çok zorlayıcı, yüksek risk ve yüksek ön yatırımı gerektirir. Bu enerjinin elde edildiği jeotermal kaynaklar ise genelde petrol ve yeraltı su kaynaklarından daha kompleks ve karmaşık bir yaklaşım gerektirir. Bu nedenle jeotermal rezervuar mühendisliği disiplini ortaya çıkmıştır.

Jeotermal rezervuar mühendisliği, jeotermal sistemlerdeki sıvı akışı ve enerji transferi ile ilgilenen bilimsel disiplindir. Jeotermal rezervuar mühendisliğinin ana amacı, genellikle 20 ile 30 yıllık bir aralıkta tanımlanmış bir proje ömrüne sahip bir alan ile desteklenebilecek kaynak gücü ve elektrik/termik güç santrali büyüklüğünü belirlemektir. Rezervuar mühendisliğinin veri ihtiyacını karşılayan unsurlardan biri, belki en önemlisi, jeotermal kuyu testleridir.

Kuyu testi, rezervuar ve kuyu özellikleri üzerine veri ve bilgi toplamak için kuyularda yapılan bir akışkan akım testidir. Kuyu testleri rezervuarın işletilmesinden önce ve/veya belli bir üretim dönemi sonrasında, rezervuar özelliklerinin değişip değişmediği ve ne kadar değiştiğini görmek için yapılır.

Daha detaya inmek gerekirse bu testler ile amaçlanan rezervuar ve kuyu hakkındaki tüm fiziki ve kimyasal verilere ulaşılarak kısa, orta ve uzun dönemde üretimin, reenjeksiyonun rezervuar üzerindeki etkilerinin gözlenmesi ve uzun vadeli bir üretim stratejisinin belirlenmesidir.

Bir çok kuyu testi eğer bilimsel bir kaygı taşıyorsa, kuyunun üretim ve enjeksiyon kapasitesi konularına odaklanmakta ve o şekilde planlanmaktadır. Aslında rezervuarın anlaşılması ile ilgili diğer kayda değer bilgiler; kuyunun tamamen kapalı olduğu ve kademeli olarak sondaj sürecinin etkisinden kurtulduğu, sadece delmenin tamamlanması ile kuyunun deşarj edilmesi arasındaki kısa sürede elde edilebilir. Bu süre uzadığı takdirde, derindeki sıcak rezervuar ve üsteki diğer akiferler arasındaki ilişkiyi anlamada ve sayısal modellemenin

oluşturulmasında; gerçek formasyon sıcaklığı gibi bilgiler kaybolmakta veya kuyuyu akışa almak ve üretim kapasitesini belirlemek için yapılan eylemlerle engellenmektedir.

Kuyu testlerinden elde edilmek istenen en önemli rezervuar ve akışkan özellikleri şöyle sıralanabilir;

- Akışkanın faz durumu (basınç, sıcaklık/entalpi)
- Rezervuarın faz durumu (sıvı baskın, buhar baskın)
- Rezervuar geçirgenliği
- Akışkan kimyası (tuzluluk, katyon ve izotopik oranlar)
- Yoğunlaştırılmayan gaz içeriği

Bağlı kuyu nitelikleri aşağıdakileri içerir;

- Kuyudaki besleme bölgelerinin yeri
- Besleme bölgesi geçirgenliği/üretim karakteristiği
- Kuyu yakını geçirgenlikteki değişimler (zar faktörü)
- Kuyunun fiziki durumu (muhafaza borusu, liner ve çiplak kuyu)

2. Sondaj Sırasında Yapılan Testler (Ölçümler)

2.1. Sıcaklık Ölçümleri

Sondaj akışkanı olarak kullanılan çamurun sıcaklığı kuyu ağzında sürekli olarak ölçülür ve gözlenecek ısı artışlarına göre sıcak bir zona girildiği tespit edilebilir. Termometre ile alınan ölçüler, giriş ve çıkış çamur sıcaklığı olarak kayıt edilir. Ölçüm yapılan bölümde sadece kondüksiyon yoluyla ısı transferi olmalıdır. Sirkülasyon zamanı ile ısınma için bekleme süreleri eşit tutulmaya çalışılmalıdır (15-20 saat). Sıcaklık yükselme testi esnasında kuyudaki çamur seviyesi de kontrol edilmeli ve kuyuda basıncın sabit kaldığı gözlenmelidir. Yüksek basınçlı formasyonlarda, kuyu içine sızacak formasyon akışkanları kondüksiyonu bozacağından alınan sıcaklık verilerini de geçersiz kılacaktır.

2.2. Çamur Kayıpları/Artışları

Çamur kaçakları ve kaçak miktarı üretim zonu hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlar. Çamur kayıpları veya artışlarının iyi takip edilmesi gereklidir. Kaçak veya gelişin hangi metrelerde olduğunun ve debi miktarının gözlenmesi, kırıklı, çatlaklı, geçirgen bir zona girildiğinin belirlenmesi ve önlem alınması açısından önemlidir.

¹ Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Sondaj Dairesi Başkanlığı, Ankara.

Sondaj esnasında oluşacak herhangi bir kaçak (veya geliş), gerçek formasyon basıncını ölçmek için çok önemli bir fırsat yaratır. Çamur kaçağı kuyu ile rezervuar arasında bir bağlantı kurulduğunun göstergesidir. Kaçağın olduğu derinlik biliniyorsa, sirkülasyon kesilerek kuyudaki çamur yoğunluğu ve kuyudaki çamurun statik seviyesinden, formasyon basıncı hesaplanabilir. Ya da bu basınç kuyuya indirilecek bir basınç aleti ile belirlenebilir.

3. Kuyu Tamamlama Testleri

Testler kuyuda yapıma sıralarına göre anlatılmaktadır.

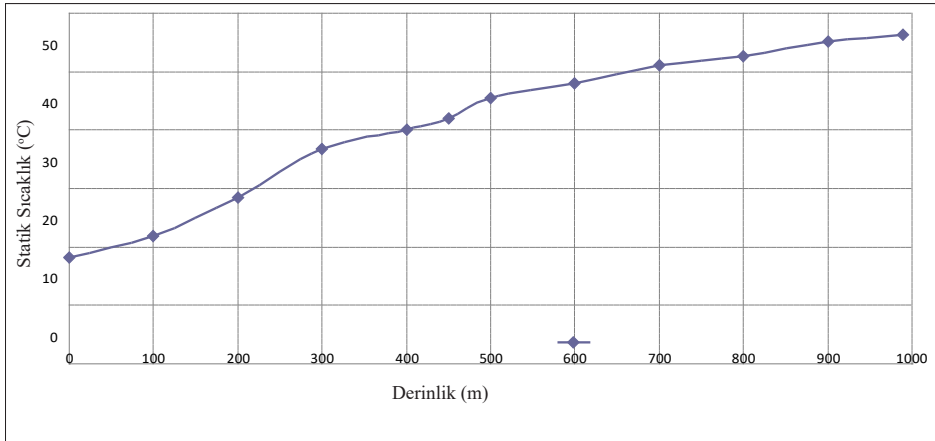
3.1. Statik Sıcaklık ve Basınç Testleri

Kuyuda sondaj çalışması bitirildikten sonra, mevcut sondaj çamuru uzaklaştırılır. Kuyu başı vanası kapatılır, kuyu ısınmaya bırakılır. En az 24 saat beklenildikten sonra Amerada ile statik sıcaklık ve basınç testi yapılır. Test cihazı kuyu ağzından başlayarak sabit aralıkla belirli kuyu derinliklerinde

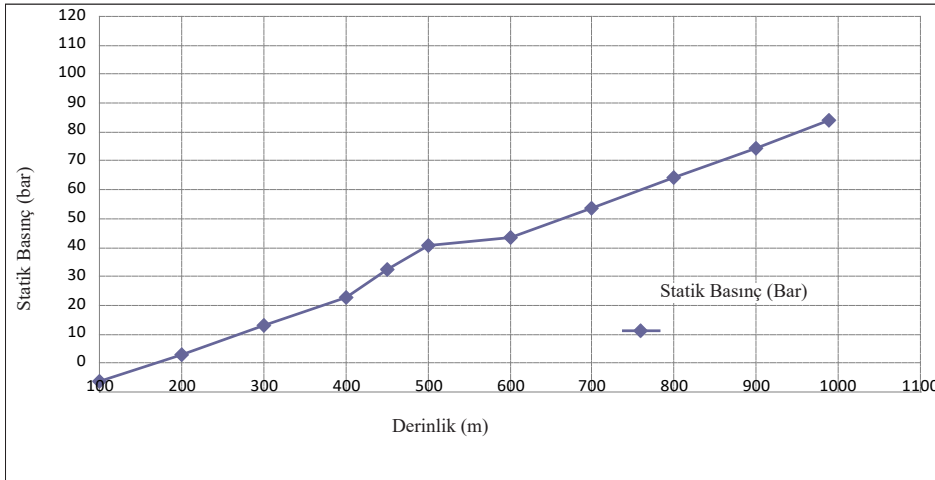
kuyu boyunca ölçüler alacak şekilde kuyu tabanına kadar indirilir. Gerekli görülürse bu ölçüler kuyu boyunca ve belli zaman aralıkları ile tekrarlanır (12, 24, 72 saat gibi) (Şekil 1, Şekil 2).

3.2. Su Kaybı Testi

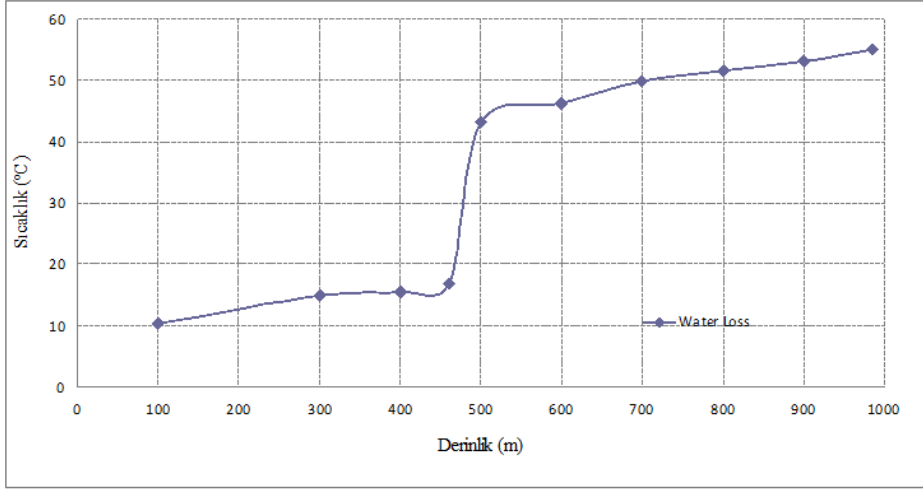
Statik ölçülerin bitirilmesinden sonra kuyu üretime açılmadan önce kuyudaki besleme zonlarının belirlenmesi amacıyla yapılır. Sondaj sırasındaki çamur kaçaqları tek başına yanıltıcı olabilmektedir. Kuyuya, sabit ve düşük debide ve kuyu hacmi kadar soğuk su basılarak kuyunun soğuması sağlanır. Daha sonra su basma işlemi kesilmeden test cihazı kuyu içine indirilmeye başlanır. Test cihazı, kuyu ağzından başlayarak sabit aralıkla belirli kuyu derinliklerinde, kuyu boyunca ölçüler alacak şekilde kuyu tabanına kadar indirilir. Su kaybı testinde sabit debide kuyuya soğuk su basılırken alınan sıcaklık ve/veya akış profillerinden, suyun rezervuara gittiği veya rezervuardan kuyuya akışın olduğu seviyeler belirlenir (Şekil 3). Suyun en çok kaçtığı kısımlarda maksimum soğuma olacaktır. Kuyuda birden



Şekil 1- EMA-2013/12 kuyusu statik sıcaklık grafiği (MTA, 2013a).



Şekil 2- EMA-2013/12 kuyusu statik basınç grafiği (MTA, 2013a).



Şekil 3- EMA-2013/12 kuyusu su kaybı (water loss) grafiği (MTA, 2013a).

fazla üretim seviyesi olması ve pompa debisinin düşük kalması durumunda bazı seviyeler aktif hale geçemeyebilir. Bu durumlarda değişik debilerde birden fazla su kaybı testi yapmak gerekebilir. Su kaybı testleri ile belirlenen seviye, diğer testler ile beraber değerlendirilerek kararsız basınç testlerinde bekleme seviyesi olarak ve asitleme gibi operasyonlarda asit basma seviyesi olarak kullanılmaktadır.

3.3. Enjeksiyon Testi

Kuyuya sabit debide su basılması sırasında kuyu içinde oluşan basınç değişiminin değerlendirildiği testtir. Enjeksiyon testleri, su kaybı testinden sonra yapılmakta olup testte; çamur pompaları ve tankları kullanılır. Test sırasında basılan su temiz, debiler sabit ve işlem kesintisiz yürütülecek şekilde hazırlanmalıdır. Basılacak suyun temini ve kuyu başında depolanması, su basmakta kullanılacak pompanın debi ve basınç kapasitesi, testin süresini ve enjeksiyon debisini belirleyen önemli faktörlerdir. Test esnasında kuyu içi basınç bilgileri ile beraber kuyu başı basınçları veya su basma debisi bilgileri de toplanmalıdır. Bu testte, basınç elementi su basılmaya başlamadan önce su kaybı testinde belirlenen ana geçirgen seviyesine indirilir. Mevcut basıncı ölçecek kadar bekledikten sonra sabit debide su basılmaya başlanır. Su basma sırasında kaydedilen basınç değerleri uygun tekniklerle yorumlanarak rezervuar parametreleri hesaplanır. Pompalar ve su miktarları uygun olursa enjeksiyon testleri tek debili ve çok debili olarak yapılabilir.

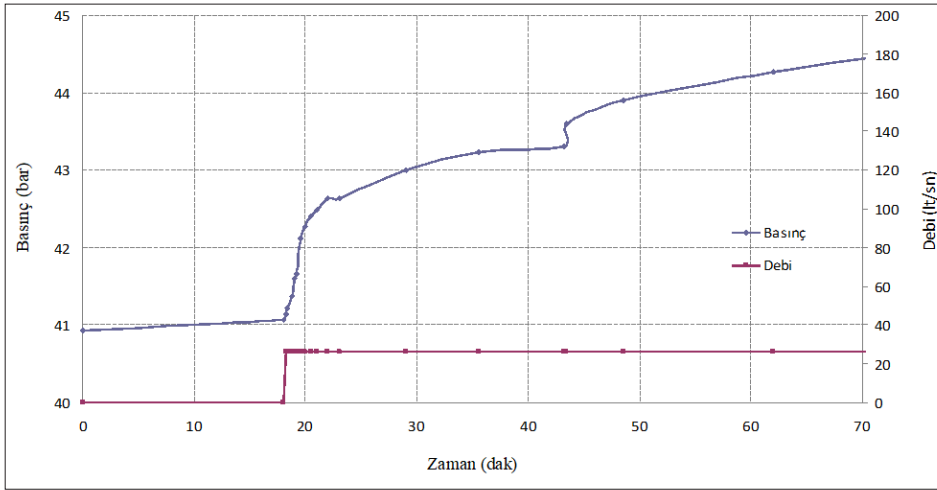
-Tek debili enjeksiyon testi: Kuyu başı vanası kapalı iken, basınç elementi su kaybı testi ile belirlenen beslenme zonuna indirilir. Kuyuya sabit tek bir debide su basmaya başlanır. Bu sırada kuyu başı vanası gözlenmelidir. Kuyu başı basınçları, pompa

stroku ve debi sürekli takip edilmeli ve kayıt altına alınmalıdır. Bu testte rezervuar basıncının yükselmesi hedeflenmektedir. Bu test sırasında, geçirgenliğin düşük olduğu kuyularda kısa sürede rezervuar basıncı yükselecek ve kuyu başı vanasında da yükseliş kendini gösterecektir. Bu test esnasında kuyu başı basınçları çok dikkatli takip edilmelidir. Aşırı yükselme gözlemlendiği durumlarda testin durdurulması gerekebilir. Geçirgenliğin yüksek olduğu sahalarda basınç yükselimi küçük değerlerde kalır hatta hiç yükselme olmaz. Asitleme planlanan kuyular için bu basınç değişimi önem arz etmektedir. Geçirgenliğin düşük olduğu kuyularda asit basımı daha zor olmakta veya hiç asit basılamamaktadır (Şekil 4, Şekil 5).

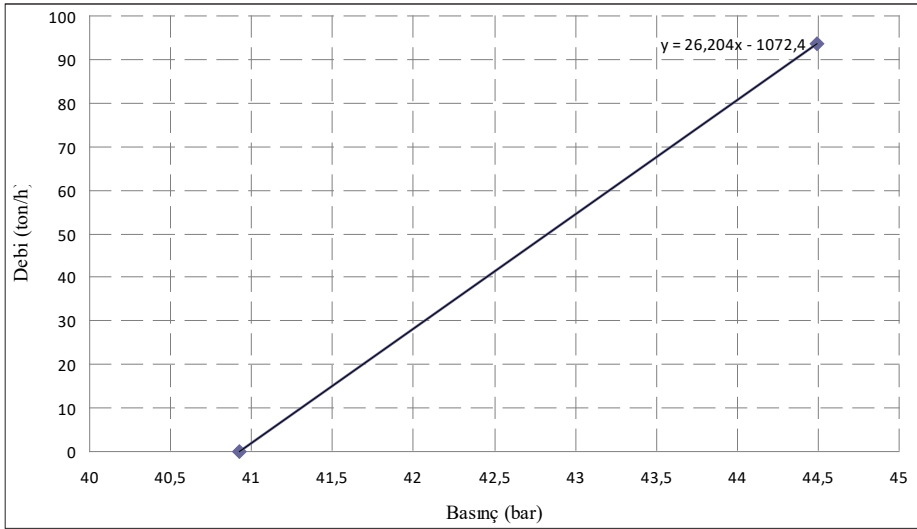
-Çok debili enjeksiyon testi: Tek debili enjeksiyon testinin devamında yapılan bu testle, kuyuya değişik yükselen kademeli debilerde su basılarak rezervuarın su alma kapasitesi belirlenir. Bu testte de kuyu başı basınçları, pompa stroku ve debi sürekli takip edilmeli ve kayıt altına alınmalıdır. Test sırasında, pompa stroku istenilen debiyi karşılamalı, pompa durdurulmamalı, strok sabit kalmalı, strokun aşırı değişimi engellenmelidir. Her kademe için kararlı akış ve kuyu başı basıncı gözlenen kadar diğer debi hızına geçilmemelidir. Bu test ile elde edilen değer, enjektivite endeksidir (Şekil 6).

3.4. Fall off Testi

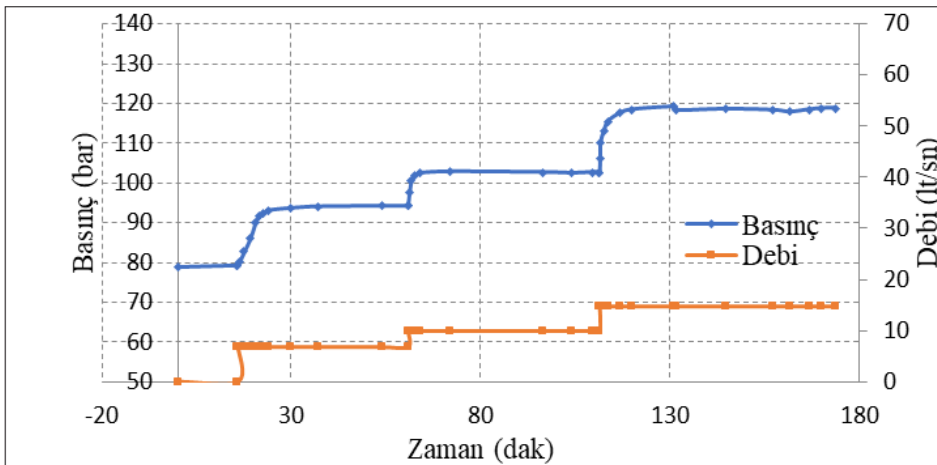
Enjeksiyon testlerinin sonunda, pompa durdurulduğunda, test esnasında bir sorun oluştuğunda, kuyuya su basma kesildiğinde kuyu içinde oluşan basınç değişiminin izlendiği bir kuyu tamamlama testidir. Enjeksiyon testi süresince debiyi sabit tutmaktaki güçlükler ve debideki küçük değişimlerin kuyu dibi basıncını etkilemesi gibi sorunlar bu testte oluşmamaktadır. Bu testte basınç



Şekil 4- EMA-2013/12 kuyusu tek debili enjeksiyon grafiği (MTA, 2013a).



Şekil 5- EMA-2013/12 kuyusu tek debili enjeksiyon indeksi grafiği (MTA, 2013a).



Şekil 6- AKG-2013/5 kuyusu asitleme sonrası çok debili enjeksiyon grafiği (MTA, 2013b).

aleti su basılırken ana geçirgen seviyeye indirilir ve kısa beklemeden sonra su basma işlemi sonlandırılır. Enjeksiyon sırasında rezervuarda oluşan basınç yükseliminin enjeksiyonun kesilmesinden sonraki düşüşü kaydedilir. Bu bekleme esnasında kaydedilen basınç değerleri kullanılarak rezervuar parametreleri belirlenir.

4. Kuyu Üretime Alındığında Yapılan Testler

4.1. Dinamik Sıcaklık ve Basınç Testleri

Dinamik sıcaklık ve basınç testi, kuyu üretime alındıktan ve kuyunun ısınması/dengeye gelmesi için birkaç gün bekledikten sonra, kuyu başında gerekli düzenlemeler sağlanarak Amerada ile yapılır. Test cihazı, kuyu ağzından başlayarak sabit aralıklarla belirli kuyu derinliklerinde, kuyu boyunca ölçüler alacak şekilde kuyu tabanına kadar indirilir. Gerekli görülürse bu ölçüler tüm kuyu boyunca ve belli zaman aralıkları ile tekrarlanır (12, 24, 72 saat gibi).

4.2. Üretim Sırasında Yapılan Kararsız Basınç Testleri (Pressure Transient Tests)

-*Basınç Düşüm Testi (Pressure Draw-Down Test)*: Test cihazı Amerada vinci yardımıyla besleme zonu seviyesine indirilir ve kısa bir süre bekletilerek rezervuar basıncı belirlenir. Daha önceden üretime kapatılan kuyu üretime açılır. Rezervuar basıncındaki düşüş zamana karşı kaydedilir. Böylece sabit debide

üretim yapılması ile rezervuarda oluşan basınç düşüşleri tespit edilir. Çeşitli yöntemler kullanılarak rezerv ve kuyu parametreleri hesaplanır (Şekil 7).

-*Basınç Yükselim Testi (Pressure Build-Up Test)*: Basınç düşüm testinin tersine, sabit debide üretim yapan kuyunun üretimini durdurularak kuyu dibinde oluşan basınç yükselmesinin değerlendirildiği testtir. Bu testte basınç düşüm testi gibi test cihazı üretim seviyesine (besleme zonu) Amerada vinci yardımıyla indirilir, kuyu başı kapatılıp üretim durdurulur. Kuyudaki basınç yükselimleri zamana karşı kaydedilir. Rezerv ve kuyu parametrelerine ek olarak bu test ile "Verimlilik Endeksi" (Productivity Index) (PI) hesaplanır (Şekil 8).

Zamana karşı ölçülen basınç değerleri ile çizilen log-to-log ve semi-log bir grafik ve fonksiyonun eğim değeri ile;

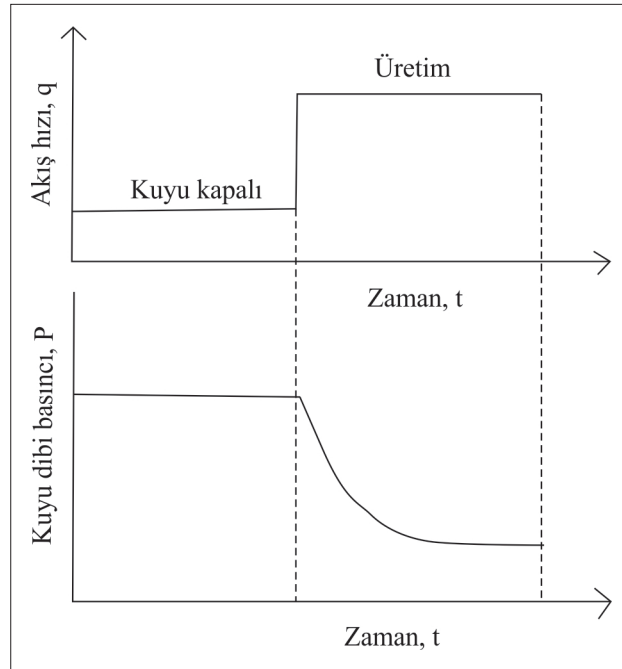
-Geçirgenlik-kalınlık (kh) değeri

-Zar faktörü

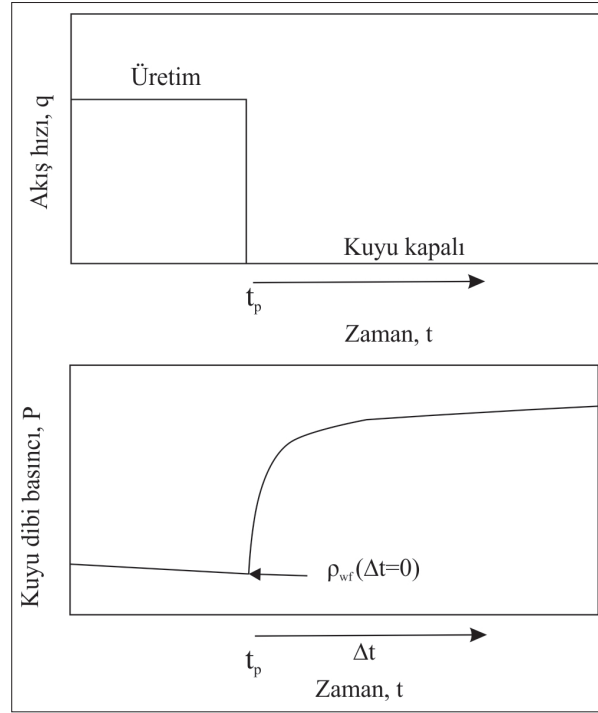
-Rezervuar basıncı, bulunabilir.

Prodüktivite Endeksi, PI değeri basınç yükselim testinin hemen öncesindeki kuyunun üretim hızının test öncesi ve test sonu rezervuar basınçları farkına bölümü ile bulunur.

PI (Prodüktivite Endeksi)= Üretim hızı (ton/saat)/ Δ Basınç (kg/cm²) (1)



Şekil 7- Basınç düşüm testi grafiği.

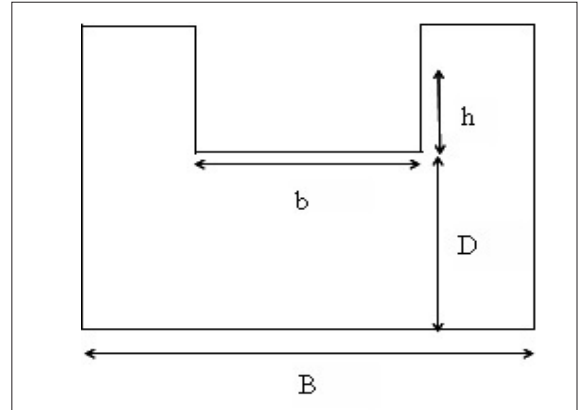


Şekil 8- Basınç yükselme testi grafiği.

4.3. Susturucu (Silencer) Savak ile Yapılan Üretim Testi

Bu yöntemde açık hava şartlarında su-buhar karışımı su ve buharı ayırmak için bir susturucuya (silencer) boşatılır. Buhar kısmı susturucunun yukarı kısmından havaya salınırken, su kısmı susturucunun alt kısmına bağlı savağa yönlendirilir (Şekil 9). Suyun miktarı aşağıda verilen savak formülü ile hesaplanır. Kuyunun toplam üretimi, susturucudaki suyun buharlaşma miktarının savaktaki miktara eklenmesi ile bulunur.

Savakların ön yüzleri çeşitli şekillerde olabilir, yüksek üretimli kuyular için genelde dikdörtgen yüzeyler kullanılmaktadır. Aşağıda verilen formül yaygın bir örnektir.



Şekil 9- Savak ön yüzü.

Buharlaşma miktarını hesaplamak için buhar tabloları kullanılır. Rezervuarın (kuyu dibi) sıcaklığı,

$$M_w = 60 * \rho_w * h^{1,5} * \left(107,1 + \left(\frac{0,177}{h} \right) + \left(1 \frac{4,2 * h}{D} \right) - \left(\frac{25,7 * \sqrt{(B-b)+h}}{D * B} \right) + 2,04 * \sqrt{\frac{B}{D}} \right) \quad (2)$$

M_w = Savak Akış hızı, (ton/saat)

ρ_w = Savak Akış Yoğunluğu (gr/cm³)

b, h, D, ve B aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

kuyu başı (üretim esnasındaki) sıcaklıklar bilinmelidir. Buhar oranı, rezervuar sıcaklığındaki sıvı halin entalpisi ile kuyu başındaki sıvı halin entalpisinin farkının kuyu başındaki karışım (sıvı+buhar) halin entalpisine bölünmesi ile bulunur.

Buhar oranı

$$X = \frac{(H_{rez-sıvı} - H_{kbaşı-sıvı})}{H_{kbaşı-sıvı+buhar}} \quad (3)$$

X = Buhar oranı

$H_{rez-sıvı}$ = Akışkanın kuyu tabanındaki bilinen sıcaklıktaki sıvı hal entalpi değeri, (kcal/kg)

$H_{kbaşı-sıvı}$ = Akışkanın kuyu başında ölçülen sıcaklıktaki sıvı hal entalpi değeri, (kcal/kg)

$H_{kbaşı-sıvı+buhar}$ = Akışkanın kuyu başında ölç. sıcaklıktaki sıvı+buhar hal entalpi değeri, (kcal/kg)

$$S_w = M_w * \left(\frac{X}{(1-X)} \right) \quad (4)$$

S_w = Buhar Üretim Miktarı, (ton/saat)

M_w = Savak Üretim Miktarı, (ton/saat)

X = Buhar oranı

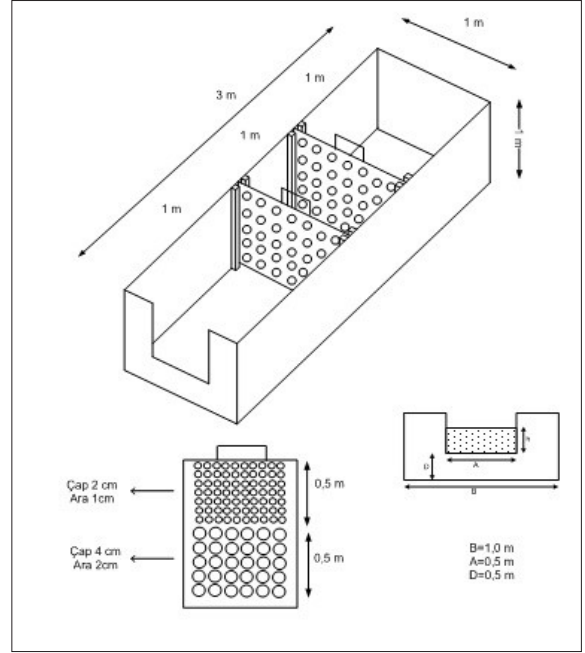
$$T_w = M_w + S_w \quad (5)$$

T_w = Toplam Üretim Miktarı, (ton/saat)

S_w = Buhar Üretim Miktarı, (ton/saat)

M_w = Savak Üretim Miktarı, (ton/saat)

Savaktaki üretim miktarı belirlendikten sonra yukarıda verilen formüller yardımıyla toplam üretim miktarı hesaplanabilir (Şekil 10).



Şekil 10- Savak çizimi.

Sonuç

Kuyuların hemen bitiminde yapılan jeotermal kuyu testleri kuyu kapasitesini ve enerji üretimini belirlemekte kullanılabilecek verilerin tamamına yakını sağlar. Uzun vadeli çalışmalarda ise kuyudaki sıcaklık-basınç değişimlerini takip etmenin en güvenilir ve verimli yolu kuyu gözlem testleridir. Verimli ve sürdürülebilir bir jeotermal enerji sistemi oluşturmak isteniyorsa kuyu testleri ihmal edilmemeli ve enerji üretimi boyunca etkin bir araç olarak kullanılmalıdır.

Değinilen Belgeler

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (2013a). Eskişehir-Merkez-Ağapınar EMA-2013/12 Kuyu Tamamlama Test Raporu, Sondaj Dairesi Başkanlığı Arşivi, Ankara (yayımlanmamış).

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (2013b). Ankara-Kızılcahamam-Gümele AKG-2013/5 Kuyu Tamamlama Test Raporu, Sondaj Dairesi Başkanlığı Arşivi, Ankara (yayımlanmamış).