

JEOTERMAL SONDAJLARIN ÖZELLİKLERİ VE KULLANILAN DONANIMLAR

Umran SERPEN

ÖZET

Petrol ve su sondajlarından belirgin bir şekilde farklı olarak jeotermal kuyularda karşılaşılan başlıca sorunlar; sert kayaçlar, düşük formasyon basınçları ve yüksek sıcaklıklardır. Bu çalışmada, ilk olarak jeotermal sondajların petrol sondajlarından daha geniş çaplı olarak delinme nedenleri ve bundan ötürü jeotermal sondajlarda karşılaşılan teknik sorunlar ayrıntılı olarak incelenmiş ve mali sorunlara değinilmiştir. Daha sonra, önce sert kayaçların bu tip kuyularda sebep olduğu sorunlar ve bunların çözümleriyle bu konuda yapılan araştırmalar hakkında bilgi verilirken, bunun yanında yüksek sıcaklığın çamur, çimento ve sondaj donanımları üzerindeki etkisi incelenmiş ve bunlarla ilgili çözümler ve araştırmalar sunulmuştur. Ayrıca, düşük basınç dolayısıyla oluşan sorunların hangi teknikler ve donanımlarla aşıldığı konusunda bilgi sunulmuştur.

1. GİRİŞ

Jeotermal enerji kullanımı geçen yüzyıl başından itibaren başlamış olup, buna paralel olarak, jeotermal kuyular da delinmiştir. Bu bağlamda, jeotermal sondaj teknolojisi gündeme gelmiştir. Başlangıçta, genel olarak petrol endüstrisinde kullanılan sondaj tekniklerinden faydalanılmıştır ve ilk sondajlarda delme tekniği ile kullanılan malzemeler petrol endüstrisindekiyle aynıdır. Jeotermal kuyu delme tekniklerinin gelişimi 1960'lı yılların ortasından itibaren başlamıştır. Başlangıçta, jeotermal kuyu delme tekniklerinin gelişimi, yine petrol sondajlarında karşılaşılan benzer sorunların çözümünden aktarma yoluyla olmuştur. Örneğin, sıcaklığın neden olduğu sorunlar, benzer sıcaklıkların bulunduğu derin petrol kuyularında (4000-6000 m), ya da buhar enjeksiyonu yapılan petrol kuyularında uygulanan tekniklerin jeotermale adaptasyonu ile çözümlenmeye çalışılmıştır. Yine benzer olarak, anormal düşük basınçlı ve çok sert formasyonlarda karşılaşılan problemler petrol sondajlarında da sıkça rastlanan türden olduğu için, benzer çözümler üretilmiştir.

Ülkemizde son 20 yıldır jeotermal enerjinin kullanımı yönünde çalışmalar artmış olup, bunların daha da hızlanacağı gözlenmektedir. Bu gelişime paralel olarak, jeotermal sondajların artması da söz konusudur. Son 40 yıl içinde delinen jeotermal kuyuların büyük bir kısmı, MTA tarafından gerçekleştirilmiştir. MTA'nın 1960'lı yılların ortasından itibaren ve 1980'li yıllara kadar delindiği kuyularda uygulanan teknoloji, çağdaştır. MTA'nın Enstitü'den Genel Md.'lüğe dönüşme sonrası, bedel karşılığı yaptığı sondajlarda ekonomik olma kaygısı sezilmektedir. Ancak, yapılan jeotermal sondajların sağlıklı olanların önemli bir kesiminin, yine MTA tarafından yapıldığı söylenebilir. Birkaçı dışında, özel sektör tarafından yapılan sondajlar için, aynı yargıya varmak zordur. Bu sondajların büyük bir çoğunluğunu yapan şirketler, gerekli makine, donanım ve "know how" 'dan yoksun olarak çalışmakta ve yaptıkları kuyuların önemli bir kısmı kısa dönemde, diğerleri de uzun dönemde sorun yaratmaktadır. Bu nedenle, bazı kuyularda kontrolsüz akışlarla (blow-out) karşılaşılmıştır ve bazılarında yeraltı suyunun kirlendiği belirlenmiştir [1].

Bu makalenin amacı, ülkemiz sondajcılarında jeotermal kuyuların kazılmasında kullanılan makine, donanım, uygulanan pratikler ve gelecekteki gelişmeler hakkında bilgiler sunmaktır.

2. JEOTERMAL KUYU DELMEDE KULLANILAN SONDAJ MAKİNE KAPASİTELERİ

Kendiliğinden akan jeotermal kuyularda üretilen debiler çok büyük olduğundan (Kızıldere KD-16'nın başlangıç üretimi 1000 t/h), petrol kuyularındaki tübing yerine, üretim koruma borularında yapılmaktadır. Kendiliğinden akan kuyularda bu büyük debilere izin verecek üretim koruma borusunun minimum çapı 9^{5/8"} olmaktadır. Genelde, tüm dünyada jeotermal kuyularda 9^{5/8"} çaplı koruma boruları, standart üretim borusu olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, kuyularda kalsit çökmesi olduğu taktirde, bu üretim çapını ve dolayısıyla debisini düşürdüğünden üretim koruma borusu çapı 13^{3/8"} 'e çıkarılarak, çökme dolayısıyla çap daralması oluşumu nedeniyle üretimin kısa zamanda düşmesi önlenmekte ve çökelen kalsitin temizleme periyodlarını uzatmaktadır [2].

Öte yandan, kendiliğinden üretim yapamayan düşük entalpili jeotermal kuyularda, geçirgenliğin ve bununla ilişkili olarak kuyu içi dinamik seviyelerin uygun olması halinde, yüksek debilerde üretim yapmak için kuyuya pompa indirilmesi durumunda, yine büyük çaplı koruma borularına gereksinim vardır.

Kuyu çaplarının daha geniş olmasından dolayı jeotermal kuyuları kazmak için gerekli sondaj makine kapasitesi, aynı derinliğe petrol kuyusu delme için kullanılan büyük olacaktır. Sert kayaçların delinmesi için kullanılacak ağırlık borusu (drill collar..) sayısının fazla olması, sık sık matkap değiştirme için manevra yapma zorunluluğu, zaten çap büyümesi dolayısıyla artmış olan sondaj makinesi kaldırma kapasitesine, ayrıca bir ek güç gereksinimi getirecektir. Öte yandan, geniş çaplı delinecek kuyularda kullanılacak pompa kapasitesi de, yüzeye taşınması gereken kırıntı miktarı arttığı için, yükselecektir. Özet olarak, vinç "drawworks" ve pompa kapasitesi artmış sondaj makinelerinin kullanılması gerekir [3].

3. JEOTERMAL ORTAMLARDAN DOĞAN SORUNLAR VE ÇÖZÜMLERİ

3.1. Magmatik, Volkanik ve Metamorfik Kayaçları Delen Sondaj Matkaplarında Karşılaşılan Sorunlar

Jeotermal sondajlar, jeotermal enerjinin daha yaygın olarak bulunduğu çok sert kayaçları içeren anormal düşük basınçlı ve yüksek sıcaklıklı tektonizma ve volkanizmanın yoğun olduğu sahalarda yapılmaktadır. Karşılaşılan sert kayaçlar, matkapların çok çabuk aşınmasına, sondaj dizisinde oluşan aşırı titreşimler yüzünden yorulma ve kırılmalara, çok daha fazla ağırlık gereksinimi ve dolayısıyla, matkaplar daha büyük yükler altında kalmaktadır. Yüksek sıcaklık, matkapların metalik aksamlarına zarar verirken lastik aksamalarını tamamen tahrip etmektedir. Öte yandan, kuyuya giren korozif akışkanlar da matkap ömrünü iyice azaltmaktadır. Bundan ötürü, delici uçlarda oluşabilecek sorunlar aşağıdaki gibi gruplandırılabilir [3]:

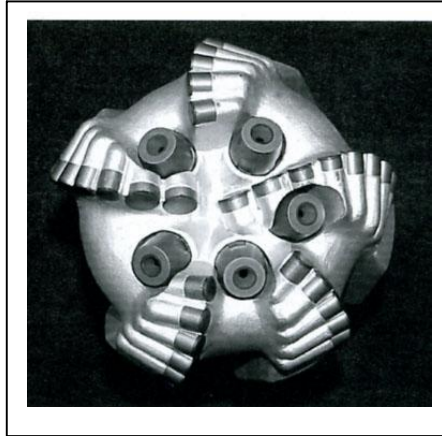
- Formasyonun aşındırıcı olması dolayısıyla matkap çapı azalması,
- Aynı sebepten aşırı diş ve yatak aşınmaları,
- Yüksek sıcaklık dolayısıyla lastik aksamaların kısa zamanda bozularak işlevlerini kaybetmesi,
- Sıcaklığın 200°C üzerinde olması durumunda, karbon çeliklerinin akma mukavemetlerinde azalma dolayısıyla, matkap ömrünün kısılması.

Jeotermal sahalarda karşılaşılan bu tip formasyonların delme açısından tipik karakteristikleri sert aşındırıcı, kırıklı çatlaklı ve sıcak olmalarıdır. Matkap çapının aşınma dolayısıyla azalması sorunu matkap konilerinin dış çeperlerinde "insert" 'lerin kullanılmasıyla, aşırı diş aşınmaları tungsten-karbit dişli matkapların kullanılmasıyla, aşırı yatak aşınması da sürtünmeli tip yatakların (journal bearing) kullanılmasıyla kısmen çözümlenmiştir. Bundan ötürü, tüm bu sorunları önlemek için, sert kayaçlarda yapılan jeotermal sondajlarda sürtünme yataklı (frictional bearing), yatakları kendiliğinden yağlanabilen "insert" tip delici veya kesici uçları "tungsten carbide" 'ten yapılmış matkaplar kullanılmaya başlanmıştır

[3]. Ayrıca, 288°C'a kadar stabil kalabilen lastik aksam "elastomer ve yağ yapılmış olup, bunların 300°C üzerinde de stabil kalmalarını sağlamak üzere çalışmalar yürütülmektedir [4].

Döner konili matkaplar uzun zaman jeotermal sondajlarda kullanılmışlardır, fakat sızdırmazlık elemanları ile yataklar yüksek sıcaklıklarda bozulmaktadır. Bunun yanında, döner konili matkaplar sert formasyonlarda yavaş ilerleme hızları dolayısıyla, bir handikapa sahiptirler. Bu konudaki çözüm, yakın geçmişte teknolojisi geliştirilen "polycrystalline diamond compact", ya da PDC matkaplardır. Son yıllarda kullanılmaya başlanan PDC tip matkaplar jeotermal sahalarındaki sert ve aşındırıcı formasyonlar için en uygun çözüm gibi görünmektedir. Bu matkaplar sürtünme ile çalışan tür olduklarından, döner yatakları yoktur ve bu özellikleri dolayısıyla, sert ve sıcak jeotermal ortamlarda kullanılmaya uygun görünmektedirler. Sert kayalar delici uçlarda aşırı aşınmaya neden olmakta ve aşırı vibrasyon sonucunda oluşan darbeler dolayısıyla da kırılmalar olmaktadır. PDC matkaplar orijinal olarak yumuşak formasyonlarda kullanılmak üzere geliştirilmelerine rağmen, daha sonra sağlanan gelişmelerle sert formasyonlar için de üretilmeye başlanmıştır [5]. Bu matkapların delici uçları TSP olarak adlandırılan ısı stabilitesi olan polikristallerdir (thermally stable polycrystalline). Ancak, sert ve aşındırıcı kayalarda 300°C üzerindeki sıcaklıklarda kesici uçlar çabuk aşınmakta ve 700°C üzerinde yapısal bütünlüklerini tamamen kaybetmektedirler. Yapılan yeni araştırmalarla daha az aşınmaya maruz kalan ve 1200°C'a kadar stabilitelerini koruyan uçlar imal edilmiştir [5].

Öte yandan, Sandia Laboratuvarlarında yapılan çalışmalarda [6] matkap-formasyon ara-yüzeyindeki yük büyüklüğünü azaltmak için, kırıntıların yüksek basınçlı jetlerle temizlenmesi hedeflenmiştir. Çamur jetleri iki mekanizma ile delici uçların kayaca daha etken bir şekilde girmesini sağlamaktadırlar: (1) jetler matkap-formasyon ara-yüzeyini temiz tutarak kayada penetrasyon gerilmesini arttırmakta, (2) kesici uç tarafından yaratılan çatlaklara giren sıvı, hidrolik çatlatma etkisiyle onları büyütmektedir. Yapılan test sondajlarında bu jetlerle ilerleme hızında %30 artış kaydedilmiştir [6]. Şekil 1 bu tür bir PDC matkabı göstermektedir.



Şekil 1. Çamur jetleriyle birlikte bir PDC matkabı.

Granit üzerinde yapılan deneylerde bu matkaplar iyi bir performans göstermişlerdir. Ayrıca, Los Alamos'da 30,000–50,000 psi sıkıştırma mukavemetine sahip aşındırıcı kayalarda kullanılan "stratapax" matkaplar olumlu sonuçlar vermiştir. Yazarın deneyimlerine göre, Guatemala'daki Zunil sahasında granit içinde yapılan sondajlarda çelik dişli matkaplar ancak birkaç metre kazabilmişler ve dişlerini tamamen kaybetmişlerdir; öte yandan, insert matkaplar ise 5-10 m arasında delme yapabilmişlerdir. Bu arada, granit içindeki delme işlemleri sırasında ilerleme hızının son derece düşük olduğunu belirtmek gerekir.

3.2. Yüksek Sıcaklıktan Kaynaklanan Sorunlar ve Çözümler

Jeotermal kuyularda bulunan yüksek sıcaklık dolayısıyla sondaj çamuru, çimentolama işlemi, çimentonun kendisi ve kullanılan koruma boruları etkilenirler. Aşağıda bu etkilerin herbiri ayrı ayrı incelenmektedir.

Jeotermal Kuyularda Çamur

Tatlı su bentonit çamurlarında kullanılan Na-bentonit 175°C sıcaklığının üzerinde buharlaşma ve bentonit yapısındaki değişiklikler (dehidratasyon) nedeniyle, sondaj çamurları jelleşirler. Bu sebeple, sirkülasyon sırasında çamuru soğutmak için bir soğutma kulesi kullanılması ve çamuru kuleden çıkış sıcaklığının en fazla 55-60°C civarında tutulması gerekmektedir. Sirkülasyon sırasında bu sorunun çözülmesine rağmen, herhangi bir problem dolayısıyla duraklamalar olduğunda, yukarıdaki sıcaklığı aşan çamur jelleşmekte ve değiştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, kuyuya amerada gibi ölçme aletlerinin veya kuyu logu enstrümanlarının indirilmesi de bir sorun hale gelmektedir.

Yüksek sıcaklıklarda jel kuvvetini kontrol eden diğer bir faktör de katı madde miktarıdır. Bunun için katı madde miktarı mutlaka %5-6 arasında tutulmalıdır [7]. Bunu sağlamak içinde iyi tasarlanmış bir katı madde ayırıcı sistemine gereksinim vardır. Ayrıca çamura diesel oil ilave etmek, inceltici olarak lignosulfonat ve/veya işlenmiş linyit (carbonox vb.) kullanmak jeli azaltma yönünde etki etmektedir.

Yüksek sıcaklığın sondaj çamurunu jelleştirmesi yüzünden, yüksek entalpili sahalarda yapılan sondajlarda sepiolit bazlı çamurlara yönelinmiştir. Na-bentonit yerine koloidal madde olarak sepiolit kullanılmaktadır. Bu tip çamurlarla 260°C' ye kadar olan sıcaklıklarda problemsiz çalışılabilir. Sepiolit bazlı çamurların bir avantajı da, üretim zonuna kaçan çamurların katılaşmaması dolayısıyla, formasyona verilen hasarın (formation damage) önlenmesidir. Diğer taraftan, bu tip çamurların hazırlanmasında, sepiolitin hidratasyonu zor olduğundan, çamur sistemi karıştırma esnasında daha çok "shear" verebilecek şekilde tasarlanmalıdır [8, 9].

Düşük basınçlı jeotermal sahalarda yapılan sondajlarda çamur sirkülasyon kayıpları büyük bir sorun olduğu için, kullanılan sirkülasyon sıvısının yoğunluğunun düşürülmesi düşünülmüş ve bu amaçla havalandırılmış akışkanlar, hatta uygun yerlerde hava kullanılması öngörülmüştür. Düşük basınçla jeotermal rezervuarlarda sondaj yapabilmek için ya hava, ya da havalandırılmış su kullanılmaktadır. Özellikle kuru buhar sahalarında örneğin, ABD'de Geysers ve İtalya'da Larderello sahalarında uygulama pratiği, havayla sondajdır. Buradaki amaç, çok düşük basınçlı rezervuarlara delinen kuyulardaki kırıntıları yeryüzüne sirkülasyonu sağlayarak çıkarmak ve çamurun yaratabileceği formasyon hasarını önlemektir. Öte yandan, kuru buhar sahalarına göre rezervuar basınçları daha yüksek, ancak, yine de anormal düşük basınçlı jeotermal sahalarda havalandırılmış sirkülasyon akışkanı kullanılır. Amaç, hafifletilen sirkülasyon sıvısının basıncının rezervuar basıncına eşitleyerek, bu sıvının formasyona girerek hasar vermesini önlemektir. Havalandırılmış akışkanla yapılan sondajda, sirkülasyon dengesini sağlamak oldukça güçtür[10]. Bundan ötürü, her boru eklemeye bu sorun ortaya çıkmaktadır. Bu durumu hafifletmek için, "rotary masası" yerine "Top Drive" denilen döndürme sistemi kullanılmaktadır. Son zamanlarda çok popüler hale gelen bu sistem, ayrıca pompa hızından bağımsız ve düzgün bir dönme momenti uyguladığından, oldukça faydalıdır.

Jeotermal Kuyularda Çimentolama

Jeotermal kuyuların çimentolanmasında yüksek sıcaklığın çimento mukavemetini azaltmasını önlemek için, silika unu çimento bileşimine karıştırılmakta ve düşük formasyon basınçları dolayısıyla çimento sirkülasyon kayıplarını elimine etmek için de, hafif çimentolara yönelinmektedir [11].

Jeotermal kuyularda çimentonun en büyük sorunu yüksek sıcaklıklarda çimento mukavemetinin kaybolmasıdır. Bunu önlemek için çimentoya %35 oranında silika unu katılmaktadır. Bilinen çimento bileşimleri yüksek sıcaklıkta mineral dönüşümleri dolayısıyla, çimento özelliğini ve mukavemetlerini yitirirler. Çimentoya katılan silika unu, sıcaklığın yükselmesiyle çimento içinde varolan minerallerle tepkimeye girerek, Tobermorit, Truskotit ve Ksonolit gibi sıcaklığa dayanıklı yeni minerallerin

oluşumunu sağlar [11]. Böylece oluşan yeni bileşim, yüksek sıcaklıklı ortamlarda çimentonun bozulmasına engel olur.

Jeotermal kuyu çimentolamasında ikinci büyük sorun, düşük formasyon basınçlarıdır. Koruma borularının genişmesini ve yeraltı sularının yüzeye ulaşmasını önlemek amacıyla koruma borularının yüzeye kadar tamamen çimentolanması gerektiğinden, koruma borusu ile formasyon arasında iyi bir bağ oluşturması ve en yüksek sıkıştırma mukavemeti sağlaması için kullanılması gereken normal çimento yoğunluğuyla (15-16 lb/gal), bu işlemi başarıyla tamamlamak olanak dışıdır. Başlangıçta, çimento yoğunluğunu düşürmek için katkı maddesi olarak genişmiş perlit katarak çimento yoğunluğunu ancak 12 lb/gal düşürmek mümkün olmuştur. Genleştirilmiş perlit çeşitli oranlarda çimento ile karıştırılarak çimentonun yoğunluğu düşürülebilir. En popüler karışım, perlit ve çimentonun %50-%50 oranlarda karıştırılarak elde edilenidir. Perlit katkısı dolayısıyla çimento mukavemetinde azalma olduğundan, çimento yoğunluğunu düşürmek amacıyla aşağıda bahsedilen değişik çözümler aranmıştır [11]:

- *HSMS*: Katkı maddesi olarak kullanılan minik, yüksek mukavemetli içi boş bilyalardır. Bunlarla 9.5–10 lb/gal ağırlığında çimento yapmak mümkündür. Elde edilen çimentonun geçirgenliği çok düşük, sıkıştırma mukavemeti 1500 psi civarında olup, maliyeti oldukça yüksektir.
- *Köpük Çimento*: Bu tip çimento, bileşime azot gazının karıştırılıp köpük haline getirilmesiyle elde edilmektedir. Bu çimentolarda yoğunluğu 6 lb/gal'a kadar düşürmek mümkün olup, geçirgenliği HSMS' ye göre daha fazla, fakat maliyeti HSMS çimentoya göre daha az ve perlitli çimentoya göre daha fazladır.

Öte yandan, sirkülasyon akışkanı olarak kullanılan suyun bile kaçtığı, bazı anormal düşük basınçlı jeotermal sahalarda koruma borusu çimentolama işlemleri sırasında çimentonun formasyonlara kaçması kaçınılmazdır. Bu nedenle, bir yandan çimentonun yoğunluğu en az 1000 psi'lik sıkıştırma mukavemeti sağlayacak bir seviyeye düşürülürken, operasyonel olarak yapılabilecek diğer bir işlem, kademeli çimentolama uygulamasıdır. Bu işlem, koruma borusu uzunluğuna bağlı olarak iki veya üç kademede gerçekleştirilebilir.

Koruma borusu çimentolamada diğer önemli bir konu, çimentolama sonunda çimento yüzeye gelse bile, donmadan önce yüksek yoğunluğun etkisiyle çimento seviyesinin aşağıya inmesidir. Bazan çimento son anda kaçır ve seviye bilinmeyen bir derinliğe iner. Burada önemli olan olay, boruların yüzeye kadar çimentolanmasıdır. Bu nedenle bazı sondajcılar, yüzeyde itibaren bu kısmı doldururlar. Bu son derece tehlikeli bir yaklaşım olup, yüzey ve üretim koruma boruları arasında kalan bir su kesiminin üretim sırasında sıcaklığın artmasıyla, genişterek üretim koruma borusunu göçertmesi (collapse) muhtemeldir. Uygulanması gereken işlem, iki boru arasında kalan anülüsten birkaç dizi küçük çaplı ($1/2''$, $3/4''$ veya $1''$) borularla çimentonun tavanına inip, oradan itibaren boş kalan kuyuyu çimento ile doldurmaktır.

Jeotermal Kuyularda Koruma Borusu Tasarımı

Bu tip kuyularda, normal koruma borusu tasarımı yapıldıktan sonra, aşağıdaki faktörler göz önüne alınarak yeni bir tasarım yapılır [12]:

- Sıcaklık
- Korozyon
- Çökme Eğilimli Akışkanlar

Tasarımı etkileyen yukarıdaki faktörlerden en önemlileri sıcaklık ve korozyondur. Sıcaklık ısıl genişmeye ve dolayısıyla gerilmelere sebep olur ve gerilme de aşağıdaki gibi hesaplanır [12].

$$S = \beta * E * T$$

β : Isıl genişleme katsayısı, 6.9×10^{-6} psi

T: Sıcaklık farkı, $^{\circ}\text{F}$

E: Elastisite modülü, 30×10^6 psi

Sıcaklık artışı doayısıyla oluşan gerilme, 1°C için 370 psi olarak hesaplanır. Bu durumda ortalama sıcaklıktaki 149°C'lık bir değişme, K-55 cins koruma borusunu akma noktasına (yield point) getirecektir. Düşük dereceli bir çelik cinsi olan K-55, H₂S'in yarattığı hidrojen kırılmalılığı denilen korozyona dayanıklı olduğu için, jeotermal sahalarda yaygın olarak kullanılmakta idi. Fakat, bu cins çeliğin termal gerilmeler açısından kritik durumda olduğu bilinmektedir. Kızıldere'deki R-1 kuyusunda (240°C) 9^{5/8}" K-55 cins koruma borusu bu nedenle kırılmıştır. Bundan ötürü, rezervuar sıcaklığı 250°C'nin üzerinde olan sahalarda hem korozyona dayanıklı, hem de daha iyi mekanik özelliklere sahip olan L-80 cins koruma boruları kullanılmaya başlanmıştır [12].

Eğer daha kaliteli çelik cinsine sahip koruma boruları kullanılmıyorsa, çare koruma borusuna ön-gerilme verilerek, borulardaki oluşabilecek muhtemel hasarın önlenmesidir. Kademeli çimentolama, ısınma sırasında koruma borularının en fazla zarar gören üst kesimlerine ön gerilme verilerek, ısınma sürecinde bu kesimde oluşabilecek aşırı sıkıştırma gerilmesinin bir kısmını telafi edip, koruma borularının akma noktalarının aşılarak çeliğin plastik deformasyona uğramasını engeller.

Jeotermal kuyularda koruma borusu tasarımında dikkate alınması gereken bir husus, üretim koruma borusu göçme basıncının (collapse), yüzey koruma borusu içten patlama (burst) basıncından fazla olmasıdır. Böylece, kazaen anülüslerinde su kalan ve üstü çimento ile doldurulan kuyularda üretim koruma borusunun ısınma sürecinde göçmesi önlenemez. Doğal olarak bu işlem göçmenin önlenmesini garantilemez, fakat hafifletir. Sebebi de, yüzey koruma borusu etrafındaki çimentonun sağladığı desteğin, sayısal olarak ifade edilememesidir.

Jeotermal kuyularda koruma borusu tasarımında dikkate alınması gereken diğer bir husus ta, yüzey koruma borusu ayağındaki üst tabaka basıncının üretim koruma borusu ayağındaki derinliklerde karşılaşılabilecek sıcaklığa karşı gelen doymuşluk basıncından büyük olmasıdır. Aksi takdirde, sondaj sırasında bir kontrolsüz akış (blow-out) olduğunda jeotermal akışkanlar yüzeye kadar ulaşma olanağına kavuşurlar.

4. JEOTERMAL SONDAJLAR İÇİN KULLANILAN DONANIMLAR

Jeotermal kuyuları delmek için kullanılan birkaç donanım aşağıda verilmektedir. Ancak, bu donanımlardan biri dışındakiler (soğutma kulesi) jeotermale özgü olmayıp, diğer sondajlarda da kullanılırlar, fakat jeotermaldeki kullanımları, bu sondajların verimli bir şekilde yapılmasını sağlar.

- *Soğutma Kulesi*: Geleneksel, pervane ile çalışan, tanklardan alınan çamurun kulenin üst tarafından aşağıya bırakıldığı ve kule içindeki engellerin çamurun aşağıya inişini yavaşlattığı, bu arada pervane ile çekilen havanın çamura ters istikamette hareket ederken (yukarıya doğru), çamurun soğumasını sağladığı basit, fakat çok etken ve yararlı bir donanımdır. Bunun için kullanılması gereken soğutma kulesi kapasitesinin ortalama 250 000 Btu/h olması gerekmektedir. Bu miktar da kullanılan debi ile değişebilir. Amaç, çamur sıcaklığının 55-60°C'ta tutulmasıdır. Özellikle, yüksek entalpili sahalarda sondaj yapılırken mutlaka kullanılması gereken bir cihazdır.
- *Top Drive*: Bu donanım da petrol sondajlarında giderek artan bir biçimde kullanılmaktadır. Amaç, manevra zamanını azaltmak ve takım sıkışma hallerinde takımın her durumda dödürülebilmesini sağlamaktır. Jeotermal kuyularda özellikle, havalandırılmış akışkanların (havalandırılmış çamur veya su) kullanılması durumunda, boru ekleme sonrasında sirkülasyonun kolay sağlanmasında önemli bir enstrümandır.

- *Katı Madde Ayırdediciler:* Aslında, düşük katı maddeli çamurlar petrol sondajlarında 1960'lı yıllardan beri popüler olup, yagın bir şekilde kullanılmaktadır. Jeotermal sondajdaki özel durum ise, katı madde miktarının tatlı su-bentonit çamurunun jelleşmesinde önemli bir rol oynaması dolayısıyla, jeotermal sondajlarda sirkülasyon sıvısı içindeki katı maddelerin etken bir şekilde temizlenmesi ve katı madde miktarının %5-6 civarında olmasının gerektiğidir. Bu da çamurda bentonit dışında katı madde olmaması anlamına gelmektedir. Bunu sağlamak için sondaj makinası çamur sisteminin düzenlenerek, tanklardan mutlaka birinin dinlendirme tankı olarak kullanılması ve etken bir kum ayırıcı (desander) ve silt ayırıcı (desilter) düzeneği kurularak katı maddelerin tamamının elimine edilmesidir.

5. JEOTERMAL SONDAJ MALİYETLERİ

Jeotermal sondaj maliyetlerini tahmin etmek öngörülemeyen sorunlar yüzünden çok zordur. Kuyu maliyetleri petrol kuyu maliyetlerinden 2-4 kat daha fazladır. Maliyet artışını etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir :

- Daha büyük çap,
- Sert kayalar dolayısıyla daha fazla matkap harcaması,
- Sıcaklık ve düşük basınç dolayısıyla ek çamur masrafları,
- Sıcaklık ve düşük basınç dolayısıyla ek çimentolama masrafları,
- Daha güçlü sondaj makinesi için ödenen ek masraf.

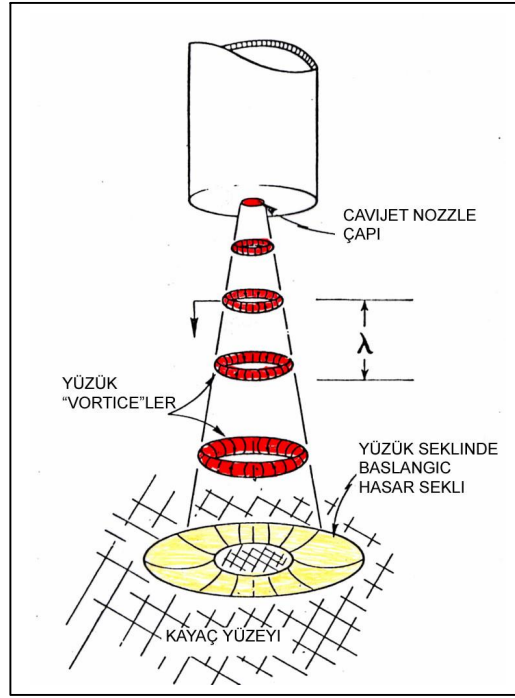
Maalesef, ülkemizde jeotermal kuyu delinmesi talebinde bulunan kurum ve kişiler bunun bilincinde değildirlir. Bu nedenle, düşük maliyetli olması talep edilen sondajlarda yükleniciler uygun olmayan düşük kapasiteli makine ve donanım kullanma yanında, sondaj personeli de uygun olmadığından, düşük maliyetli, fakat ciddi sorunları olan, hatta kuyu denilemeyecek yapılar üretmektedirler.

6. JEOTERMAL SONDAJ TEKNOLOJİSİNDE GELECEKTEKİ GELİŞMELER

Son zamanlarda elmas ve PDC matkaplar da kullanıma girmiştir. Ayrıca hidrolik etkiyle delme verimliliğini arttıran cavijet ve sürekli zincir matkap (continuous chain drill bit) gibi delme aletleri üzerinde araştırmalar devam etmektedir. Yapılan diğer araştırma ise, elektrik enerjisiyle kayaları eriterek ilerleyen bir sistemdir. Sert kayalarda karşılaşılan sondaj borularının kırılması ve aşınması gibi durumları önlemek için de yüksek sıcaklıklarda çalışabilen türbinler imal edilmiştir.

Cavijet

Bu delme cihazı türbülanslı bir jet olup, içinden akan akışkan jetinin aşındırıcı etkisini attırmak için jetin içinde özellikle gaz ve buhar boşlukları yaratılmıştır. Kavitasyon yaratmayan boşlukların aksine, kesme ve delme işlemi kavitasyon kabarcıklarının çökmesinden doğan enerji tarafından yapılır. Bu içe çöken kabarcıklardan gelen basınç çok yüksek olup, aşınma yüzeyindeki bir çok küçük alana yoğunlaştırılmıştır.



Şekil 2. Cavijet'in çalışmasının şekli.

Kayaçlar kırılğan olduklarından, kavitasyondan doğan yerel basınç yükselmeleri erozyon mekanizmasını büyük ölçüde arttıran hızlı çatlamalara sebep olur ve enerjiyi belli yerlere de odaklayarak kayaç yüzeyine verir (Şekil 2). Bu durum, Cavijet'in, nozzle'lerden çıkan, fakat kavitasyon erozyonunu en yükseğe çıkarmayan, aynı basınç ve debide çalışan jet'lere olan avantajıdır. Bu tasarımların amacı, jet içinde veya onun etrafında yaratılan "vortice" merkezinde basınç düşümünü maksimize etmek ve bu yolla akışkan içinde gaz boşluklarını yaratmaktır.

Sürekli Zincir Matkabı

Bu tip matkapların kesme yapıları tungsten-karbit matriks içine oturtulmuş doğal ve sentetik (stratapax) elmaslardan ibarettir. Kesme yapısı sürekli bir zincire bağlanmıştır. Zincirin, manevra yapmadan kesme yüzeyini 15 defa yenileyebilecek uzunluğu vardır [13].

Zinciri kuyu dibinde hareket ettirmek için sirkülasyon sıvısı basıncı kullanılır. Zinciri devretmek için matkap tabandan kaldırılır ve pompalar durdurulur. Basınç düşümü bir yay, piston ve tutucu mekanizmasını harekete geçirir. Yay pistonu iter ve doldurma "reset" pozisyonuna getirir, o da zincirdeki tutucu tarafından yakalanır. Pompaların çalışmasından doğan basınç artışı, piston tutucu ve zinciri yeni delme pozisyonuna getirerek yeni kesme yüzeyleriyle delmeyi sağlar [13].

Zincir matkabı testleri matkabın yapısal bütünlüğünü koruduğunu, bazı hidrolik erozyon ve zincir çevirme problemleri olduğunu göstermiştir. Diğer yandan ise, sert ve aşındırıcı kayaçları delirken ticari elmas matkaplara göre daha üstün ilerleme hızı, matkap ömür performansı göstermiştir [13].

Elektrikle Isıtılan Matkap

Bu tür matkaplar da ısıları çok fazla olan kuru sıcak kayalarda normal matkapların metalurjik özelliklerini kaybettiği düşünülerek Bazalt ve Granit gibi çok sert kayalarda delme işlemi için yapılmıştır. Operasyon karakteristikleri aşağıdaki Çizelge 1'de verilmiştir.

Bu matkabın ucunu 1200-1600°C'a kadar ısıtmak için "pirolitik grafit ısıtıcı" kullanılmaktadır. Direnç kablosu iyi bir elektrik izolasyon maddesi ve aynı zamanda çok iyi ısı ileticisi olan bor nitrit ile sarılmıştır.

Çizelge 1 : Elektrikle Isıtılan Matkapların Çalışma Karakteristikleri [3].

Matkap Çapı	: 2" inç
Kullanılan Güç	: 5 kw
Sirkülasyon Akışkanı	: Hava
Matkaptaki Direnç	: Pirolitik grafit
Sondaj Hızı	: 2-3 ft/h

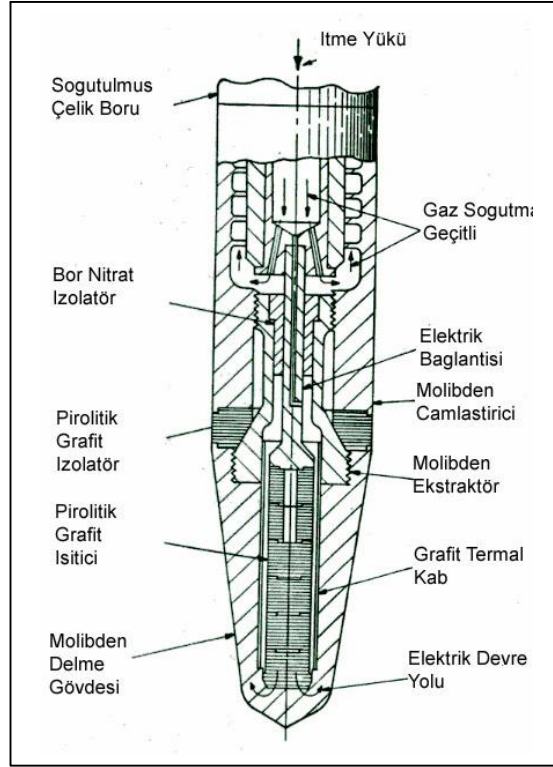
Kayacı eriten iki tür cihaz bulunmaktadır. Bunlarda birincisi "Melting Consolidating Penetrators", kısaca MCP olup, eriyen kısımlardan kurtulmak için yoğunluk konsolidasyonundan yararlanılmaktadır. Kenara itilen atık erimiş kayaç, çok yoğun camsı bir gömlek oluşturur. Bu yöntemle atık madde tamamen elimine edilir. Şekil 3'te bir MCP cihazın kesiti görülmektedir.

İkinci cihaz "Universal Extrusion Penetrators", ya da kısaca UEP olup, delme sırasında aşağıya doğru verilen bir baskı erimiş kayacı matkabın ortasından iç tübe itmekte yüksek hızda gelen hava akımı erimiş kayacı patlamış mısır şeklinde taş yününe dönüştürerek, iç borudan dışarıya çıkarmaktadır. Şekil 4 bir EUP cihazının kesitini göstermektedir.

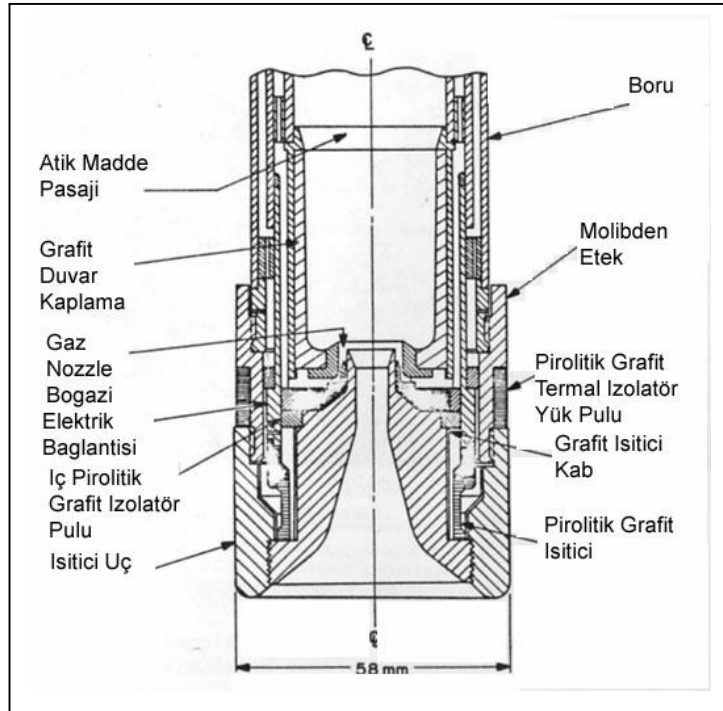
Sondaj dizisi iç içe konsantrik borulardan ibaret olup matkaba elektrik enerjisi iletimi kablolarla yapılmaktadır. Delinen kuyu cidarında camsı bir tabaka oluşarak kuyu stabilitesini sağlamaktadır. Tek dezavantajı çok su geliştiği yerlerde, soğuma nedeniyle kullanılma imkanının olmayışıdır.

Yeni Geliştirilmiş Türbin

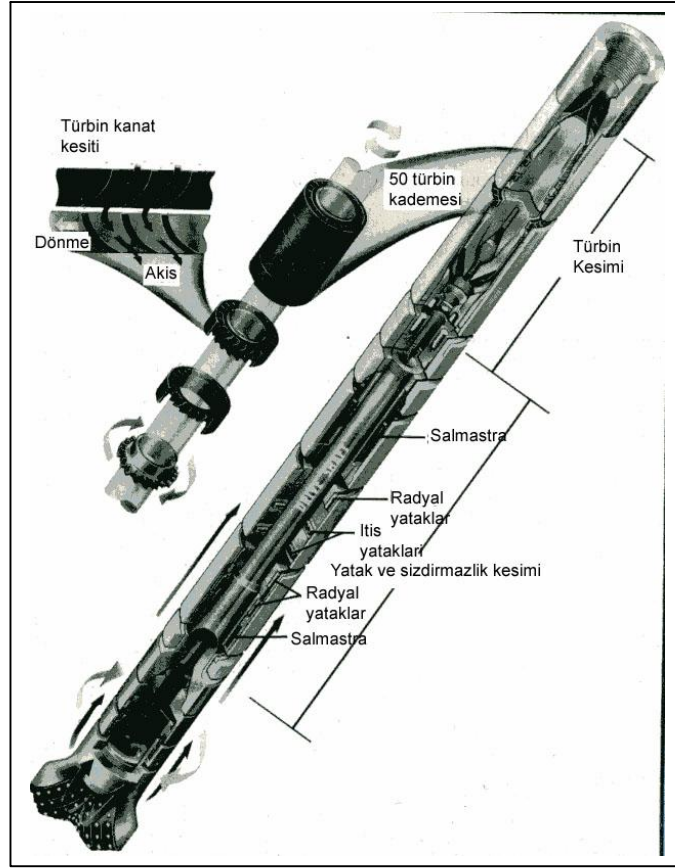
Jeotermal sondajlarda sert ve aşındırıcı kayaların neden olduğu diğer bir sorun da, sondaj dizisindeki aşınmalardır. Bunu önlemenin tek yolu, sondaj dizisini döndürmeden matkaba dönme momentinin iletilmesidir. Bu da ancak matkabın üzerinde kullanılan bir türbin ile mümkündür. Ayrıca, türbin kuyuları saptırmak ve yönlü kuyu delebilmek için çok kullanışlı bir donanımdır. Başlangıçta petrol sondajlarında kullanılan, klasik türbinler lastik aksamlara sahip olduklarından ve bunlar da yüksek sıcaklıklarda bozulduğundan, jeotermal kuyular için uygun değildiler. Ayrıca, türbinler çok hızlı (400-800 d/dak) döndüklerinden, matkaplar da çok çabuk aşınmaktaydı. Jeotermal sondajlar için yapılan yeni bir türbin klasik türbinlerin tüm bu mahzurlarını ortadan kaldırmıştır. Diğer bir deyişle, yeni türbinler lastik aksam taşımamakta ve 150 rpm ile 800 rpm arasındaki dönme hızlarında çalışabilmektedir. Ayrıca, bu gelişmiş türbin klasik türbinlerden 4-5 kat daha fazla tork verebilmekte ve dolayısıyla daha büyük yüklerin matkap üzerine konmasına olanak sağlamaktadır. Bu türbinin çalışma sıcaklığı 500 °F'tir. Yapılan saha deneylerinde, 12^{1/4"} matkapla kullanılan 7^{3/4"}lik bir türbin granodiorit içinde 23 ft/st'lık bir ilerleme hızı elde edilmiştir. Aynı formasyonda rotary sondajla elde edilen ilerleme hızı 10 ft/st'tir [14]. Şekil 5 jeotermal kuyularda kullanılan türbinin iç yapısını göstermektedir.



Şekil 3. MCP delicinin tasarım şeması [14].



Şekil 4. Bir EUP cihazının tasarım şeması [14].



Şekil 5. Jeotermal kuyularda kullanılan türbin [15].

KAYNAKLAR

- [1] Serpen, U., Control of Blown-Out Geothermal Well in Bursa-Çekirge. Proceedings of 13th International Petroleum Congress and Exhibition of Turkey, June 4-6, 2001, pp. 523-530.
- [2] Serpen, U., Jeotermal Enerji Ders Notları. 2000.
- [3] Serpen U., Jeotermal Sondaj Özellikleri. Ankomak Sondaj Sempozyumu, Ankara, Nisan 1990.
- [4] Hendrickson, R.R., Development and Testing of Seals and Lubricants for Geothermal Rock Bits. GRC Transactions Vol. 4, Sept., 1980.
- [5] Bennett, K., Gwilliam, W., Gahan, B., Radke, B., Fracture Resistant TSP Diamond Cutters for Drill Bits. Geothermal Technologies, Vol. 6, Issue 2, July/August 2001, pp.3-5.
- [6] Raymond, D. and Prairie, M., Mudjet-Augmented Diamond Bit Demonstrates Drilling Rate Improvements in Hard-Rock Formations. Geothermal Technologies, Vol. 6, Issue 1, March/April 2001, pp.3-5.
- [7] Weintritt, D.J. and Hughes, R.G., Factors Involved in High-Temperature Drilling Fluids. SPE Reprint Series 6a, 1973 Revision, pp. 231-240.
- [8] Serpen, U., Investigation on Geothermal Drilling Muds with High Temperature Stability. Proceedings WGC2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, 2000.
- [9] Altun, G., Serpen, U., Investigating Improved Rheological and Fluid Loss Performance of Sepiolite Muds under Elevated Temperatures, Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

-
- [10]Dareing, D.W. and Kelsey, J.R., Balanced Pressure Techniques Applied to Geothermal Drilling. GRC Transactions Vol. 5, Oct. 1981, pp. 233-236.
- [11]Serpen, U., "Jeotermal Kuyu Çimentolamasındaki Son Gelişmeler", Türkiye 8. Petrol Kongresi, Ankara, 16-20 Nisan1990.
- [12]Serpen ,U., Yalnız, U., Jeotermal Kuyularda Koruma Borusu Tasarımı. Sondaj Sempozyumu'96, İzmir 21-22 mart 1996, s. 145-153.
- [13]Newsom, M.M., Clair, J.A., Stoler, H.M., Varnado, S.G., Continuous Chain Drill Bit Developments. GRC Transactions, Vol. 2, July, 1978, pp. 495-497.
- [14]Altseimer, J.H., Geothermal Well Technology and Potential Applications of Subterrene Devices-A Status Review, LA-5689-MS, Informal Report, August 1974.
- [15]Maurer, W.C., Geothermal Turbodrill Ready for Oil Field Use. OGJ Report, Oil &Gas Journal, March 9, 1981, pp. 105-108.

ÖZGEÇMİŞ

Umran SERPEN

1945 yılı İzmir doğumludur. 1967 yılında İTÜ Petrol Müh. Böl.'den mezun olduktan sonra 1974 yılına kadar TPAO ve MTA'da petrol ve jeotermal sahalarda çalışmıştır. 1974 yılından 1987 yılına kadar ELECTROCONSULT adlı bir İtalyan mühendislik ve danışmanlık şirketinde El Salvador, Guatemala, Meksika, Nikaragua, Kosta Rika, Arjantin, Şili, Etiyopya, Kenya, Filipinler, Rusya ve İtalya gibi ülkelerin çeşitli jeotermal projelerin çeşitli aşamalarında danışmanlık yapmıştır. 1987 yılından itibaren İTÜ Petrol ve Doğal Gaz Müh. Böl.'de Öğr. Gör. Dr. olarak çalışmaktadır.