

JEOTERMAL SONDAJLARDA HAVALI AKIŞKAN TEKNİKLERİ VE ÖRNEK BİR PROBLEM

Bülent TOKA*

GİRİŞ

Sondajlarda matkabin kestiği kırıntıları yeryüzüne taşımak ve kuyu içerisinde hidrostatik dengeyi sağlamak için kullanılan çamur (bentonit+su karışımı) teknolojisinin yerine havalı akışkan uygulama teknikleri son yıllarda jeotermal kuyularda geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Kuru hava ile ilk jeotermal sondaj 1970'lerde ABD-Kaliforniya geysers jeotermal sahasında yapılmıştır. Hava akışkanlı (hava+ formasyon akışkanı, hava+köpük gibi) jeotermal sondajlara ise 1982 yılında Kenya'da başlanmış ve Etopya, Japonya, Meksika, İzlanda, Yeni Zelanda, Endonezya, Filipinler gibi ülkelerde de hava akışkanlı jeotermal sondajlar yapılmıştır (Birkisson ve Hole, 2007).

Ülkemizde bugüne kadar jeotermal sondajlarda hava akışkanlı sondaj tekniği uygulanmamıştır. 1963 yılından bu yana 500'ye yakın jeotermal sondaj yapan MTA Genel Müdürlüğü'nün her geçen gün daha derinlere inen ve derinlikle birlikte karmaşık yapı gösteren jeotermal sahalarda havalı akışkan uygulamalarına başlamasında ülkemizdeki jeotermal gelişim açısından fayda bulunmaktadır. Ayrıca kızgın kuru kaya, kızgın ıslak kaya veya kızgın çatlaklı kaya anlamına gelen geliştirilmiş jeotermal sistemlerden (enhanced geothermal systems - EGS) enerji üretimine yönelik araştırma çalışmaları son yıllarda dünyada hızlı bir artış göstermektedir. 21. yüzyılın önemli bir enerji kaynağı olarak gösterilen EGS'ler daha derin ve daha az geçirgen rezervuara sahip olduğundan bu sahalarda hava akışkanlı sondaj uygulamalarının önemi artmaktadır.

HAVA AKIŞKANLI SONDAJ TEKNİKLERİ

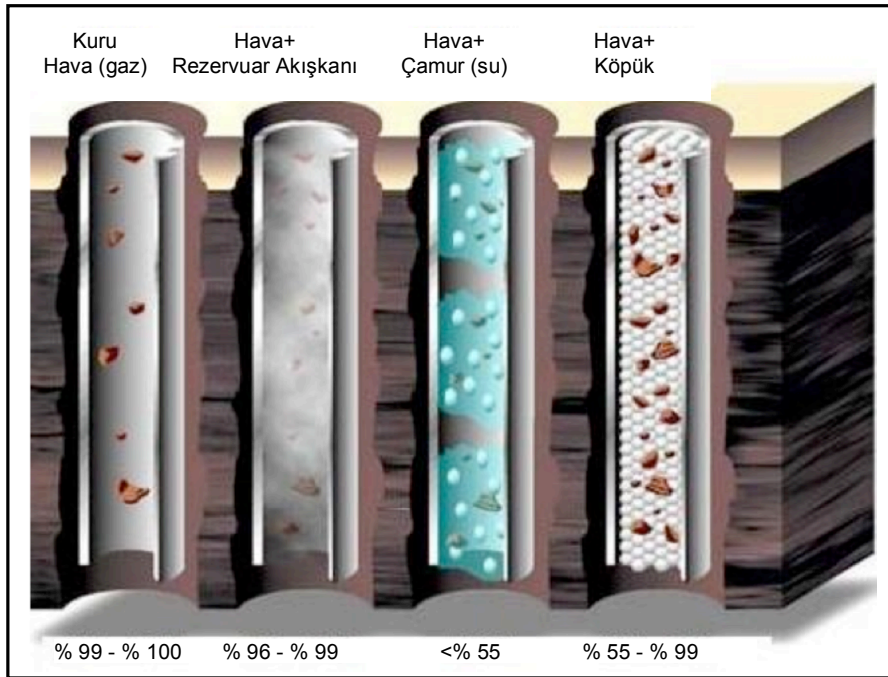
Jeotermal kuyularda da havalı akışkan tekniği uygulamasının ana amaçları sondaj çalışmalarında karşılaşılan problemlerinin üstesinden gelmek, ilerleme hızını artırmak ve rezervuarın kirlenmesini önlemektir. Bu yöntemle İsviçre'de yapılan derin jeotermal sondajda 4 kat daha fazla ilerleme hızına ulaşılmıştır (Bjelm, 2006).

Bu tekniğin çamurlu sondajlara göre tercih edilmesinin en önemli sebepleri; (i) sirkülasyon kaybının en aza inmesi, (ii) sert formasyonlarda oldukça iyi ilerleme performansı göstererek sondaj maliyetini azaltması, (iii) suya olan gereksinimin azalması, (iv) rezervuarda meydana gelen deformasyonun azalması nedeniyle rezervuardan üretilen akışkan miktarının artması ve rezervuarda hızlı termal kazanım, (v) basınç farklılığından dolayı takım dizisinin formasyona yapışmasının önlenmesi gibi daha az kuyu problemleridir. Buna karşın bu sistemin dezavantajları; (i) ekipmanların (kompresör ve basınç artırıcı-booster) yüksek maliyeti ve yüksek yakıt tüketimi, (ii) kompresörün gürültülü çalışması ve sirkülasyon

* MTA Genel Müdürlüğü, Sondaj Dairesi, Ankara

havasının atmosfere bırakılması sırasında açığa çıkan gürültü, (iii) sıcak akışkanın yüzeye deşarjı, (iv) korozyon, (v) sondaj sırasında formasyon akışkanının iki faza dönüşümü (kaynaması), (vi) kuyu dibi sıcaklığının matkabın ömrünü kısaltması (vii) operasyonun karmaşık yapısı. Fakat iyi planlama ve mühendislik çalışmalarıyla elde edilen avantajların pozitif etkisi ve gelişen teknolojilerle (örnek, hava deşarj hatlarına susturucuların yerleştirilmesi, yüksek sıcaklıklara dayanıklı matkapların kullanılması gibi), bu dezavantajların üstesinden kolaylıkla gelinebilmektedir.

Sondaj sırasında anülüsteki akışkan basıncını azaltan ve muhtemel üretim zonlarındaki formasyon basıncını dengeleyen bu teknik dört farklı şekilde uygulanmaktadır. Bunlar (i) hava (veya gaz), (ii) hava+rezervuar akışkanı (mist), (iii) hava+çamur (veya su) ve (iv) hava+köpük sistemidir. Bu tekniklerin uygulanması için gerekli hava oranları şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1- Havalı akışkan sisteminde uygulanan dört farklı tekniğin içerdiği hava oranlarını yüzdesi (Nas ve Toralde, 2010).

Hava/gaz sondaj işleminde, formasyonun kuru olduğu diğer bir deyişle formasyondan akışkan gelmediği durumlarda uygulanan bir tekniktir. Matkabın kesmiş olduğu kırıntıları yukarı taşımak için kuyu içerisinde sıkıştırılmış havanın sirkülasyonu yapılır. Bu sondaj işleminde kuyuyu temizlemek için sıkıştırılmış hava anülüste dakikada en az 3000 ft'lik (≈ 915 m) bir hıza sahip olmalıdır. Kuru havalı sondaj için gerekli hava miktarının ve güç ünitelerinin hesabı bu makalenin sonunda bir örnekle verilmiştir.

Hava+rezervuar akışkan sondajında sıkıştırılmış hava içerisine formasyon akışkanı karışmaktadır. Matkabın kesmiş olduğu kırıntılar ıslaktır. Buna karşın kuyu içerisinde sirkülasyon yapan ana faz havadır. Arazide elde edilen deneyimler hava+rezervuar akışkan ile yapılacak sondajda gerekli olan hava debisinin, hava ile yapılan sondajlar için gerekli olan

hava debisinden, %30-40 daha fazla olması gerektiğini göstermektedir. Derin kuyularda hava+rezervuar akışkanı ile sondaj yapıldığında gerekli olan basınç havalı sondaja göre daha fazla olacağından bir booster'a (basıncı yükselten kompresör) gereksinim olacaktır.

Köpük sondajı işleminde köpük, su veya çamur ile birlikte havanın içerisine eklenir. Köpük, su ile birlikte kullanılırsa foam drilling (köpüklü sondaj), çamur ile birlikte kullanılırsa stiff foam (katı köpük) diye adlandırılır. Bu sondaj tekniğinde sirkülasyon sıvısı olarak çok fazla miktarda suya gereksinim duyulabilir. Hava, kuyudaki sirkülasyon sıvısı içerisinde sıkıştırılmış hava kabarcıkları şeklinde görünür.

Hava+çamur (veya su) sondajında, çamur veya su ana sirkülasyon sıvısıdır ve hava köpüksüz olarak ortama eklenir. Hava+çamur (veya su) sondajında ana faktör çamurun jel kuvvetini kontrol etmektir. Kontrol işlemi, havanın çamur içerisinden kaçmasının engellenmesi ve çamurdan ayrılma işleminin separatörde gerçekleşmesidir. Şayet hava anülüste çamurdan ayrılırsa, çamurun yavaş hareketinden dolayı kuyu cidarındaki formasyon aşınacaktır. Ayrıca havanın çamurdan ayrılma işlemi pompadan önce separatörlerde gerçekleştirilmezse pompa arızaları oluşacaktır.

Hava+çamur sondajında başlangıçta çamur sirkülasyonu yapılırken hava debisi yavaş yavaş artırılır. Sondaja başlanırken formasyondaki akışkanın geliş yapmasını (blowout) önlemek için kuyu içindeki çamurun hava ile aniden boşaltılmasından kaçınılmalıdır. Kullanılacak maksimum hava debisine çamurun ikinci defa sirkülasyonunda ulaşılmalıdır. Manevra sırasında kuyu çamur ile doldurulmalıdır.

Havalı sondaj ekipmanlarının en önemli iki ana ekipmanı kompresör ve booster'dır. Kompresörler sondaj veya booster için düşük basınçlı hava üretirler (100-300 psig). Tüm kompresörler, sıkıştırılan havanın soğutulması sistemine sahiptirler ve belli bir limite kadar havayı soğuturlar (150-190 °F veya 66-88 °C). Kullanılacak kompresörün sayısı açılacak kuyunun karakteristik özelliklerine, kuyu ve tij çapına ve sondaj yapılacak yerin yükseltisine bağlıdır.

GEREKLİ HAVA HACMİNİN, KOMPRESÖR VE BOOSTER GÜCÜNÜN HESAPLANMASI

Havalı sondaj için gerekli hava/gaz hacmi miktarı R. R. Angel tarafından saha çalışmalarıyla hesaplanmıştır (Çizelge 1). Bu çalışmada gerekli hava hacminin belirlenmesinde, kuyu çapı, tij çapı, ilerleme hızı ve gaz gravitesinin etkisi göz önüne alınmıştır. Fakat enjekte edilen veya üretilen suyun etkisi göz önüne alınmamıştır. Aynı zamanda kesilen kırıntıların tümünün moleküler çapta toz halinde küçüldüğünü kabul etmiştir. Angel, havanın kaldırma kapasitesinin havanın yoğunluğu ile arttığını ve minimum 3000 ft/dak'lık (915 m/d) anülüs hızının kırıntıları kaldırmada yeterli olduğunu ortaya koymuştur. Fakat uygulamalarda optimum anülüs hızının 5000 ft/dak (1524 m/d) olması tavsiye edilmektedir. Bu çalışma, havalı sondajın planlanmasında yeterli bir sonuç vermektedir. Gerçekte havalı sondajlarda gerekli olan debi kompresörün çalıştığı yüksekliğe bağlıdır. Çizelge 2 kompresörün çalıştığı rakıma göre havanın basıncı, sıcaklığı ve yoğunluğunu göstermektedir. Sondaj güç ünitelerinin çalışacağı yükseltiye bağlı olarak gerekli hava miktarı çizelge 3'de verilen formüllerden hesaplanmaktadır. Ayrıca çizelge 3'de kuru hava ile yapılacak sondajlar için gerekli kompresör ve booster'ın güçlerini hesaplamak için gerekli formüller de verilmiştir. Bu çalışmada sondajcılıkta evrensel olarak kullanılan birimler (örnek, inç, feet, °F gibi) hesaplamalarda kullanılmıştır.

Çizelge 1- Minimum anülüs hızı (3000 ft/dak'lık standart hava hızı) oluşturmak için gerekli hava debisini hesaplama yöntemi

Kuyu çapı İnç	DP çapı İnç	Debi (Q ₀) sft ³ /dk	Hava için N değeri İlerleme hızı (ft/saat)				Debi (Q ₀) sft ³ /dk	Gaz (0.6 lb/ft ³) için N değeri İlerleme hızı (ft/saat)			
			0	30	60	90		0	30	60	90
17 ½	6 3/8	4209	82.2	131	177	221	5434	66.3	128	186	240
	5 ½	4428	79.8	126	171	213	5716	61.8	119	174	226
	4 ½	4588	78.0	123	166	207	5924	58.0	113	165	215
15	6 5/8	2905	71.7	112	151	188	3751	64.2	118	167	214
	5 ½	3124	68.7	107	143	178	4033	58.6	108	154	197
	4 ½	3285	66.0	103	137	171	4241	54.0	100	144	185
12 ¼	6 5/8	1700	62.3	97.8	130	160	2194	63.0	112	155	194
	5 ½	1918	58.0	89.5	119	146	2477	56.3	97.7	137	172
	4 ½	2079	55.3	83.6	111	136	2684	50.8	88.2	124	157
11	6 5/8	1237	60.6	94.5	124	151	1597	64.5	112	152	188
	5 ½	1456	54.8	83.8	110	135	1880	55.5	95.4	131	163
	4 ½	1616	50.6	76.9	101	124	2087	50.0	84.4	116	146
9 7/8	5 ½	1079	53.0	80.3	104	126	1393	56.4	94.7	128	157
	5	1163	50.3	75.5	98.7	120	1502	52.3	87.7	119	147
	4 ½	1240	47.8	71.7	93.3	114	1600	48.8	81.6	111	138
9	5	898	49.1	73.0	94.4	113	1160	53.0	87.1	116	141
	4 ½	975	46.1	68.1	88.5	107	1258	49.0	80.3	108	132
	3 ½	1103	41.5	61.0	79.0	95.5	1424	42.0	68.9	93.0	115
8 ¾	5	827	49.0	72.7	93.2	112	1068	53.5	87.0	115	140
	4 ½	903	46.0	67.8	87.3	105	1166	49.1	80.0	107	130
	3 ½	1032	40.8	60.0	77.3	93.7	1332	41.8	68.3	92.0	114
7 7/8	4 ½	670	44.7	65.0	82.7	99.3	865	50.1	78.8	104	125
	3 ½	798	39.2	56.7	72.5	86.9	1031	41.6	66.3	87.8	107
7 3/8	3 ½	676	38.5	55.0	69.8	83.2	873	41.6	65.3	85.5	104
6 ¾	3 ½	535	37.3	52.8	66.1	78.0	690	41.5	63.8	82.3	99.0
6 ¼	3 ½	430	37.0	51.5	63.6	74.7	555	42.0	63.1	80.0	94.7
	2 7/8	494	32.8	46.0	57.3	67.7	638	37.0	55.1	71.4	85.4
4 ¾	2 7/8	229	31.6	41.3	49.5	56.5	296	37.0	51.3	62.6	72.2
	2 3/8	271	27.8	37.2	44.8	51.6	350	32.3	45.6	56.3	65.5

Çizelge 2- Kompresörün çalıştığı rakıma göre havanın basıncı, sıcaklığı ve yoğunluğu

Rakım feet	Basınç, psi	Sıcaklık, °F	Yoğunluk, lb/ft ³
0	14.696	59.00	0.0765
2000	13.662	51.87	0.0721
4000	12.685	44.74	0.0679
6000	11.769	37.60	0.0639
8000	10.911	30.47	0.0601
10000	10.108	23.36	0.0565

Çizelge 3- Havalı sondaj hesaplamalarında kullanılan formüller (Lyons ve diğerleri, 2001).

Minimum hava debisinin hesabı	$Q_r = \left[Q_0 + N * \left(\frac{H}{1000} \right) * \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_i} \right) \right] \quad [1]$
Anülüs basıncının hesabı Anülüs basıncı, lb/ft ² abs	$P_b = \sqrt{\left[(P_s^2 + b * Tav^2) * e^{\frac{2*a*H}{Tav}} - b * Tav^2 \right]} \quad [2]$ $Tav = \frac{T_{in} + T_{hd}}{2} \quad [3]$ $a = \frac{S * Q_r + C_2 * K * D_h^2}{53,3 * Q_r} \quad [4]$ $b = \frac{C_3 * Q_r^2}{(D_h - D_n)^{1,333} * (D_h^2 - D_n^2)^2} \quad [5]$
Matkapdaki basınç kaybı nozul ile kesme yüzeyi arasındaki mesafe, λn (inç)	$\lambda n = 0,58 * d_b \quad [6]$
nozul çapı, d _n (inç)	$d_n = \frac{\lambda n}{14} \quad [7]$
nozul alanı, A _n (ft ²)	$A_n = Na * \frac{\pi}{4} * \left(\frac{d_n^2}{12^2} \right) \quad [8]$
Akışkanın ağırlık oranı, G (lb/sn)	$G = \frac{Q_r * \gamma_i}{60} \quad [9]$
Matkap nozullarında basınç kaybı, Pa lb/ft ² abs	$G = \sqrt{\left(\frac{S * g * k}{R} \right) * \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} * \frac{(A_n * Pa)}{\sqrt{Tav}} \quad [10]$
Matkap üzerindeki hava yoğunluğu, lb/ft ³	$\gamma_a = \frac{Pa}{R * Tav} \quad [11]$
Nozullarda oluşan hız V _n , ft/sn	$\frac{V_n^2}{2 * g} = \frac{Pa}{\gamma_a} * \left[\frac{k}{k-1} \right] * \left[1 - \left(\frac{P_b}{Pa} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad [12]$
Nozuldan çıkan havanın sıcaklığı T _n , °R, (V _n >> V _a)	$V_n^2 - V_a^2 = 2 * Cp * (T_a - T_n) \quad [13]$
Enjeksiyon basıncı hesabı	$P_i = \sqrt{\frac{Pa^2 + b' * Tav^2 * \left(e^{\frac{2*a'*h}{Tav}} - 1 \right)}{e^{\frac{2*a'*h}{Tav}}}} \quad [14]$ $a' = \frac{S}{53,3} \quad [15]$ $b' = C_3 * \frac{Q_r^2}{D_n^{5,333}} \quad [16]$
Kompresör ve boosterların güç hesabı	
Teorik olarak kompresör (booster) gücü, HP	$W_s = n_s * \frac{k}{k-1} * \frac{P_i * Q_{in}}{229 * e_v} * \left[\frac{P_{out}}{P_i}^{\frac{k-1}{n_s * k}} - 1 \right] \quad [17]$
Kompresör (booster) için gerçek güç, HP	$W_r = \frac{W_s}{e_m} \quad [18]$
Kompresör motorunun çalıştığı rakıma göre gücü, HP	$W_{in} = \frac{W_r}{(1 - e_h)} \quad [19]$
Kompresördeki basınç düşümü	$r_t = \left[\frac{P_{out}}{P_{in}} \right] \quad [20]$
Kompresörün her kademesi için basınç düşümü	$r_s = (r_t)^{1/N_s} \quad [21]$
Her kademe için sıcaklık değişimi	$T_i = T_{(i-1)} * [P_i / P_{(i-1)}]^{k-1/k} \quad [22]$
Her kademe için havanın yoğunluğunun değişimi	$\gamma_i = \frac{P_i * 144}{53,3 * T_i} \quad [23]$

Yukarıdaki formüllerde istenen C₁, C₂ ve C₃ değerleri kompresörün çalıştığı rakıma göre çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 4- Kompresörün çalıştığı rakıma göre C₁, C₂ ve C₃ değerleri

Rakım (feet)	C ₁	C ₂	C ₃
0	6.610	28.83	1.628*10 ⁻⁶
2000	5.873	30.59	1.446*10 ⁻⁶
4000	5.207	32.48	1.282*10 ⁻⁶
6000	4.612	34.52	1.136*10 ⁻⁶
8000	4.080	36.70	1.005*10 ⁻⁶
10000	3.605	39.04	0.8878*10 ⁻⁶

- Q_r kuyu temizliği için gerekli minimum hava hacmi, ft³ /dak.
- H kuyu derinliği, ft.
- γ_o deniz seviyesine göre hava yoğunluğu, lb/ft³ (Çizelge 3)
- γ_i rakıma göre hava yoğunluğu, lb/ft³, (Çizelge 3)
- Q₀ teçhiz borusu ve tij çapına bağlı olarak akışkanın hava veya gaz olmasına göre çizelge 2'den bulunur
- N teçhiz borusu ve tij çapına bağlı olarak akışkanın hava veya gaz olmasına göre çizelge 2'den bulunur
- P_b anülüsteki kuyu dibi basıncı, (lb/ft², abs)
- P_s anülüs çıkışındaki atmosferik basınç, (lb/ft², abs)
- T_{in} kompresöre giren havanın sıcaklığı, (°R)
- T_{hd} kuyu dibi sıcaklığı, (°R)
- T_{av} kuyu derinliği boyunca kuyu içinin ortalama sıcaklığı, (°R).
- K matkap ilerleme hızı, (ft/saat)
- D_h kuyu çapı, (ft)
- D_p tij dış çapı, (ft)
- λn nozul ile kesme yüzeyi arasındaki mesafe, (inç)
- d_b matkap çapı, (inç)
- d_n nozul çapı, (inç)

S	gazın spesifik gravitesi, (hava için 1)
An	nozul alanı, (ft ²)
Na	matkaptaki nozul sayısı
G	akışkanın ağırlık oranı, (lb/sn)
Pa	matkap nozullarında basınç kaybı, (lb/ft ² abs)
R	gaz sabiti (53,3 ft-lb/lb-°R)
g	yerçekimi ivmesi (32,2 ft/sn ²)
Ta	nozulların üzerindeki hava sıcaklığı, °R
ya	matkap üzerindeki hava yoğunluğu
Vn	nozullarda oluşan hız, (ft/sn)
Tn	nozuldan çıkan havanın sıcaklığı, °R
C _p	havanın spesifik sıcaklığı (6000 ft ² /sec ² -°R)
D _{id}	drill pipe iç çapı, ft
P _i	kompresörden çıkan havanın basıncı psi
k	spesifik ısı oranı olarak açıklanan gaz sabiti, (hava için k= 1.4)
n _s	iç soğutma kademe sayısı (genelde 1, 2 veya 3)
P _{in}	kompresöre veya booster'a giren havanın basıncı, (psia)
P _{out}	kompresörden veya booster'dan çıkan havanın basıncı (psia)
Q _{in}	bir kompresörün ürettiği hava hacmi, (lb/ft ³)
e _v	volumetrik verim (kompresör için 1, booster için 0,7)
e _m	mekanik verim (0.8)
e _h	rakıma bağlı olarak kompresör motorundaki performans düşümü (Şekil 1)

SONUÇLAR

21. yüzyılın enerji kaynağı olarak gösterilen yer ısısından enerji üretimine yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları dünyada olduğu gibi ülkemizde de hızla artmaktadır. Artan jeotermal enerji araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucu sondaj çalışmaları daha derinlere indikçe sondaj problemleri de artmaktadır. Ortaya çıkan bu problemlerin bazılarını ortadan kaldırmak için 1982 yılından beri birçok sahada hava akışkanlı sondaj teknikleri uygulanmaktadır. Ülkemizde de jeotermal sondajlar konusunda en deneyimli kurum olan ve 500 adete yakın jeotermal sondaj yapan MTA Genel Müdürlüğü'nün hava akışkanlı sondaj uygulamalarına yönelik çalışmalara bir an önce başlamasında fayda görülmektedir.

ÖRNEK PROBLEM - HAVA HACMİ, KOMPRESÖR VE BOOSTER GÜCÜNÜN HESAPLANMASI

Kuyu derinliği=	10000 ft
Kuyu (matkap) çapı=	8 1/2" (0.7083 ft)
Techiz borusu çapı ve derinliği=	9 7/8" (0,8229 ft) - 6000 ft
DP dış çapı=	4 1/2" (0,3750 ft)
DP iç çapı=	3,826" (0,3188 ft)
DC dış çapı=	6 1/2" (0,5417 ft)
DC dış çapı=	2 1/2" (0,2083 ft)
Kuyu dibi sıcaklığı=	250 °C - 482°F - 941,7 °R
İlerleme hızı=	60 ft/saat
Rakım =	6000 ft

1. Gerekli hava hacminin hesaplanması

Açılacak jeotermal kuyunun 6.000 ft derinliğe kadar 9 7/8" teçiz borusu ile teçiz edileceğini ve bu metreden sonra 8 1/2" matkap - 6 3/4" DC - 4 1/2" DP'den oluşan takım dizisi ve ortalama 60 ft/saat matkap ilerleme hızı (K) ile ve 10.000 ft derinliğe (H) kadar ilerleme yapılacağını planlayalım.

Kuyunun en geniş yeri olan teçiz borusu (9 7/8") ile DP arasındaki hava hızının minimum 3000 ft/dak olması için gerekli hava miktarının hesabı;

Çizelge 2'den $Q_0=1240$ ve $N=93,3$, Çizelge 3'den deniz seviyesindeki hava yoğunluğu(γ_0)=0,0765 ve 6.000 ft yükseklikteki hava yoğunluğu (γ_i)=0,0639 olarak bulunur.

$$Q_r = \left[1240 + 93,3 * \left(\frac{10000}{1000} \right) \right] * \left(\frac{0,0765}{0,0639} \right) = 2601,5 \text{ ft}^3/\text{dk} \quad [1]$$

Bu sondaj için 1500 ft³/dak.'lık iki adet kompresör kullanıldığını farz edersek toplam debi; $Q_r = 3000 \text{ ft}^3/\text{dk}$ olacaktır.

Her bir kompresörün üreteceği hava miktarı $Q_{in} = 1500 \text{ ft}^3/\text{dk}$

2. Anülüste oluşan basıncın hesaplanması

10.000 ft derinlikte kuyu dibinde oluşan basınç

Çizelge 3'de enjekte edilen havanın sıcaklığı, $T_s = 37,6 \text{ °F}$ (497,3 °R)

Çizelge 2'de $P_s = 11,769 * 144 = 1694,7 \text{ lb}/\text{ft}^2 \text{ abs}$

$$P_b = \sqrt{\left[(1694,7^2 + 339,118 * 719,5^2) * e^{\frac{2 * 0,0253 * 10000}{719,5}} - 339,118 * 719,5^2 \right]} =$$

$$P_b = 13584,35 \text{ lb}/\text{ft}^2 \text{ abs} \quad [2]$$

$$P_b = \frac{13584,35}{144} = 94,3 \text{ psi}$$

$$T_{av} = \frac{497,3 + 941,7}{2} = 719,5 \text{ }^\circ\text{R} \quad [3]$$

$$a = \frac{1 \cdot 3000 + 34,52 \cdot 60 \cdot 0,7083^2}{53,3 \cdot 3000} = 0,0253 \quad [4]$$

$$b = \frac{1,136 \cdot 10^{-6} \cdot 3000^2}{(0,7083 - 0,375)^{1,333} \cdot (0,7083^2 - 0,375^2)^2} = 339,118 \quad [5]$$

3. Nozullarda oluşan basıncın hesabı

Maksimum kuyu dibi temizliği için;

Nozul ile kesme yüzeyi arasındaki mesafe,

$$\lambda_n = 0,58 \cdot 8,5 = 4,93 \text{ inç} \quad [6]$$

Nozul çapı,

Bu sondaj için 11'lik nozel kullanılması uygun olacaktır.

Üç konlu matkap kullandığımızı varsayarsak nozel sayısı 3 olacaktır

Nozul alanı,

Akışkanın ağırlık oranı,

Matkap nozullarında basınç kaybı

Matkap üzerindeki hava yoğunluğu,

Nozullarda çıkan akışkan hızı

Nozuldan çıkan havanın sıcaklığı ($V_n \gg V_a$)

4. Enjeksiyon basıncının hesabı

Hesaplanan matkap üzerindeki basınç P_a , enjeksiyon basıncı olarak kullanılabilir. Fakat sondaj dizisi içindeki hava kolonunun oluşturduğu basınç, matkap üzerine uygulanan basıncın artmasına neden olur. Bu nedenle kompresörün veya boosterın uygulayacağı enjeksiyon basıncı P_i ,

Kompresörün uygulayacağı enjeksiyon basıncı P_i ,

$$P_i = \sqrt{\frac{83327,40^2 + 4540,72 \cdot 719,5^2 \cdot \left(e^{\frac{2 \cdot 0,01876 \cdot 10000}{719,5}} - 1 \right)}{e^{\frac{2 \cdot 0,01876 \cdot 10000}{719,5}}}}$$

$$P_i = 494,81 \text{ psia}$$

$$P_i = 71253,16 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \text{ abs}} \quad [14]$$

$$a' = \frac{1}{53,3} = 0,01876 \quad [15]$$

$$b' = 1,136 * 10^{-6} * \frac{3000^2}{0,3188^{5,333}} = 4540,72 \quad [16]$$

5. Kompresör ve booster'ın güç hesabı

Bu örnekte 3000 ft³/dak'lık debi için Q_{in}=1500 ft³/dak'lık iki kompresör kullanıldığı farz edilmiştir.

Pgiriş=11.679 psia (6000 feet rakıma göre Tablo e-2'den bulunan değer)

Tgiriş= 37.6 °R (6000 feet rakıma göre Tablo e-2'den bulunan değer)

Pi=395,85 psia (üç adet nozul kullanıldığında enjekte edilmesi hesaplanan basınç değeri)

Maksimum kompresörün üretebileceği basınç:300 psig (kompresör katoloğundan)

Kompresörden çıkan ve boostera giren havanın sıcaklığı 160 °F (620 °R) ise

Kompresör kademe sayısı (n_s)=3

Üç kademeli kompresörlerde toplam basınç yükselimi oranı

$$r_t = \left[\frac{300 + 11,769}{11,769} \right] = 26,2906 \quad [20]$$

her kademe için düşüm oranı

$$r_s = (26,2906)^{1/3} = 2,981 \quad [21]$$

Kompresörün her kademesi için basınç, sıcaklık ve debi değişimi

Atmosfer şartlarında P₁= 11.769 psi, T₁= 37.6 °F (497.3 °R), Q_{in}=1500 ft³/dak

Buradan havanın yoğunluğunu

$$\gamma_1 = \frac{11,769 * 144}{53,3 * 497,3} = 0,06393 \text{ lb/ft}^3 \quad [23]$$

1. kademe sonrası 2. kademe başlangıcı

$$\left[\frac{P_2}{P_1} \right] = 2,981 \Rightarrow P_2 = 11,769 * 2,981 = 35,083 \text{ psia}$$

$T_2 = 497,3$ °R (kompresörde sıkıştırılan havanın sıcaklığının giriş sıcaklığına soğutulduğunu varsayarsak)

$$\gamma_2 = \frac{P_2 * 144}{53.3 * T_2} = \frac{35,083 * 144}{53.3 * 497,3} = 0,1906 \text{ lb/ft}^3$$

1. kademe sonrası 3. kademe başlangıcı

$$\left[\frac{P_3}{P_2} \right] = 2,981 \quad \Rightarrow \quad P_3 = 35,083 * 2,981 = 104,585 \text{ psia}$$

$T_3 = 497,3$ °R (sıcaklığın giriş sıcaklığına soğutulduğunu varsayarsak)

$$\gamma_3 = \frac{P_3 * 144}{53.3 * T_3} = \frac{104,585 * 144}{53.3 * 497,3} = 0,5681 \text{ lb/ft}^3$$

1. kademe sonrası ve soğutmadan önceki durum

$$\left[\frac{P_4}{P_3} \right] = 2,981 \quad \Rightarrow \quad P_4 = 104,585 * 2,981 = 311,769 \text{ psia}$$

$$T_4 = T_3 * [P_4 / P_3]^{k-1/k} = 497,3 * [311,769 / 104,585]^{1,4-1/1,4} = 679,43 \text{ °R} \quad [22]$$

$$\gamma_4 = \frac{P_4 * 144}{53.3 * T_4} = \frac{311,769 * 144}{53.3 * 679,42} = 1,240 \text{ lb/ft}^3$$

Booster girmeden önce 219.7 °F (679,4 °R) sıcaklıktaki hava 160 °F (619,7 °R)'a kadar soğutulur ve bu durum basıncı düşürür. Bu durumda booster girmeden önceki havanın durumu;

$$T_4' = 619,7 \text{ °R}$$

$$\frac{P_4}{T_4} = \frac{P_4'}{T_4'} \quad \Rightarrow \quad P_4' = 619,7 * \frac{311,769}{679,4} = 284,32 \text{ psia}$$

$$\gamma_4' = \frac{P_4' * 144}{53.3 * T_4'} = \frac{284,315 * 144}{53.3 * 619,7} = 1,240 \text{ lb/ft}^3$$

$$Q_4' = Q_{in} * \frac{\gamma_1}{\gamma}$$

Her kompresörün için gerekli teorik güç

$$W_s = 3 * \frac{1,4}{1,4-1} * \frac{11,769 * 1500}{229 * 1} * \left[\frac{311,769^{\frac{1,4-1}{3 * 1,4}}}{11,769} - 1 \right] = 296,5 \text{ HP} \quad [17]$$

Kompresör için gerekli olan gerçek motor giriş gücü

$$W_r = \frac{296,5}{0,8} = 370,6 \text{ HP} \quad [18]$$

Seçilen kompresörün motorunun gücü 600 HP ve 6000 feet yükseklikte çalıştığında 296.46 HP gücü karşılayıp karşılamayacağını Şekil 4'den kontrol edilir. Bu kompresör için aspirated input motor kullanıldığı farz edilirse şekilden 6000 feet yükseklikte motordaki güç düşüm oranı $E_n = \%22$ (Şekil 1) bulunur. Buna göre;

$$W_{in} = \frac{370,6}{(1-0,22)} = 475,1 \text{ HP} \quad [19]$$

6000 ft yükseklikte 97/8" üretim borusu ve 8 1/2" çapında 10000 ft sondaj yapmak için 475,1 HP daha güçlü bir kompresör motoruna gereksinim vardır.

İki kademeli booster kullanıldığında gerekli gücün hesaplanması

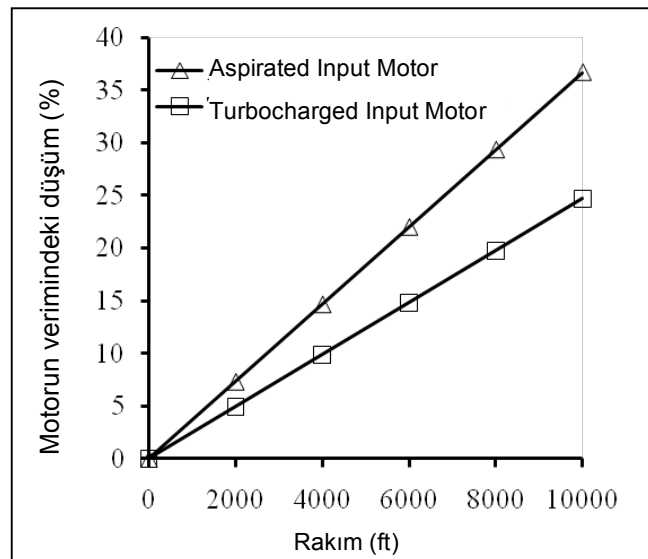
2 adet kompresör kullanıldığına göre boostera giren sıkıştırılmış hava debisi, sıcaklığı, basıncı ve yoğunluğu

$$T_4' = 619,7 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$P_4' = 284,32 \text{ psia}$$

$$\gamma_4' = 1,240 \text{ lb/ft}^3$$

$$Q_4' = 77,36 * 2 = 154,72 \text{ ft}^3/\text{dak}$$



Şekil 2- Kompresörlerin çalışacağı rakıma göre motorlardaki güç düşümü.

Booster boyunca basınç yükselme oranı bilinmiyor. Çünkü soğutmadan sonra boostera giriş durumu hakkında veri yoktur. Buna karşın booster soğutmasından sonraki durum biliniyor. Bu değerler;

$$T_6' = 619,7 \text{ °R}$$

$$P_6' = 494,81 \text{ psia}$$

İki kademeli booster için basınç yükselme oranı

$$r_t = (P_6/P_4)$$

$$r_s = (r_t)^{1/2} = (P_6/P_4)^{1/2} = (P_6/284,32)^{1/2}$$

1. kademedan sonra 2. kademedan önce durum

$$\left[\frac{P_5}{P_4}\right] = r_s \Rightarrow P_5 = 284,32 * \left(\frac{P_6}{284,32}\right)^{1/2}$$

$$T_5 = 619,7 \text{ °R}$$

1. kademedan sonra soğutmadan önce durum

$$\frac{T_6}{T_5} = \left(\frac{P_6}{P_5}\right)^{k-1/k} \Rightarrow T_6 = 619,7 * \left(\frac{P_6}{284,32 * \left(\frac{P_6}{284,32}\right)^{1/2}}\right)^{0,2857}$$

Soğutmadan sonraki durum

$$\left(\frac{P_6'}{T_6'}\right) = \left(\frac{P_6}{T_6}\right) \Rightarrow \frac{494,81}{619,7} = \frac{P_6}{619,7 * \left(\frac{P_6}{284,32 * \left(\frac{P_6}{284,32}\right)^{1/2}}\right)^{0,2857}}$$

$$(P_6)^{0,85715} = 220,897 \Rightarrow P_6 = (220,897)^{1,1667} = 542,80 \text{ psia}$$

Basınç yükselme oranı

$$r_t = \left[\frac{542,80}{284,32}\right] = 1,909$$

$$r_s = (1,909)^{1/2} = 1,382$$

1. kademeden sonra 2. kademeden önce durum

$$P_5 = 284,32 * (1,382) = 392,84 \text{ psia}$$

$$T_5 = 619,7 \text{ °R}$$

1. kademeden sonra soğutmadan önce durum

$$P_6 = 392,85 * (1,382) = 542,80 \text{ psia}$$

$$T_6 = 619,7 * \left(\frac{542,80}{392,84} \right)^{1,4-1/1,4} = 679,67 \text{ °R}$$

$$\gamma_6 = \frac{P_6 * 144}{53,3 * T_6} = \frac{542,80 * 144}{53,3 * 679,67} = 2,157 \text{ lb/ft}^3$$

Soğutmadan sonraki durum

$$T_6' = 619,70 \text{ °R}$$

$$P_6' = 494,81 \text{ psia}$$

$$\gamma_6' = \frac{P_6' * 144}{53,3 * T_6'} = \frac{494,81 * 144}{53,3 * 619,7} = 2,157 \text{ lb/ft}^3$$

Booster için gerekli teorik güç

$$W_s = 2 * \frac{1,4}{1,4-1} * \frac{284,315 * 154,72}{229 * 0,7} * \left[\frac{542,80^{\frac{1,4-1}{2 * 1,4}}}{284,32} - 1 \right] = 185,92 \text{ HP}$$

Booster için gerekli olan gerçek motor giriş gücü

$$W_r = \frac{195,92}{0,8} = 232,40 \text{ HP}$$

Bu Booster için aspirated input motor kullanıldığı farz edilirse şekil 1'den 6000 feet yükseklikte motordaki güç düşüm oranı %14,8 bulunur. Buna göre;

$$W_{in} = \frac{232,40}{(1-0,148)} = 272,77 \text{ HP}$$

Sadece hava ile sondaj yapıldığında bu örnekteki sondaj için 272,77 HP güçten daha büyük güce sahip booster kullanılması gerekmektedir.

DEĞİNİLEN BELGELER

Birkisson, S. F. ve Hole H., 2007. *Aerated Fluids for Drilling of Geothermal Wells*, Proceedings European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany, 30 May – 1 June 2007.

Bjelm, L., 2006. Under Balanced Drilling and Possible Well Bore Damage in Low Temperature Geothermal Environments, Proceedings, Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 30-February 1, 2006.

Lyons W. C., Guo B. ve Seidel A. F.,2001. Air ve Gas Drilling Manual, The McGraw-Hill Companies, Inc, USA.

Nas, S. ve Toralde, J. S. S., 2010. *Geothermal Aerated Fluids Drilling Operations in Asia Pacific*, Proceeding World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia 25-29 April 2010.
