

Jeotermal Bir Kuyunun Geri Dönüş Hattındaki Sondaj Akışkanı Sıcaklık Verisinden Formasyon Sıcaklığının Tahmin Edilmesi

Mustafa Hakan ÖZYURTKAN^{1*}, Oğuz Berk EVCİMEN¹

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

*Sorumlu yazar e-posta: ozyurtkan@itu.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3105-2271>
evcimeno@itu.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3396-0556>

Geliş Tarihi: 02.11.2020

Kabul Tarihi: 16.02.2021

Öz

Jeotermal sahalar için formasyon sıcaklığı kuyunun üretkenliğini ve sürdürülebilirliğini belirleyen önemli bir veridir. Bunun için kuyular açıldıktan sonra bazı testler gerçekleştirilmekte ve sonuçlar elde edilmektedir. Bu yaklaşım zaman gerektirmekte ve ekonomik açıdan maliyetleri yukarı çekmektedir. Sondaj sırasında formasyon sıcaklığını tahmin edilebilmesinin ekonomik ve zaman anlamında kazanımları olacaktır. Bu sıcaklık değerlerinin tahmin edilebilmesi için kuyu ve formasyon sıcaklıkları arasındaki bazı ısı transfer mekanizmaları içeren modellerin uygulanması gerekmektedir. Bu çalışma Ege Bölgesindeki bir jeotermal kuyudan alınan sondaj akışkanı sıcaklık verilerinden formasyon sıcaklığının tahmin edilmesini içermektedir. Formasyon sıcaklık modelleri sondaj, kuyu ve formasyon parametreleri eklenerek kullanılmıştır. Modeller ısı iletimi ve taşınımı olan ısı transfer mekanizmaları ile oluşturulmuştur. Formasyon-anülüs ve anülüs-sondaj dizisi arasındaki ısı transferleri birleştirilerek ortalama ısı dengesi denklemi kurulmuştur. Bu denklemler düzenli doğrusal ısı transferi durumu altında çözümlenmiştir. Denklemleri çözmek için analitik yaklaşımlar kullanılmıştır. Anülüs-formasyon ve anülüs-sondaj dizisi arasındaki çözümler için yaklaşımlar farklıdır. Bu çözümlere göre formasyon sıcaklıkları elde edilebilir ve karşılaştırılabilirler. Çalışılan kuyu için hesaplamalar sonucunda yaklaşık 295 °F'lık bir sıcaklık barındırdığı hesaplanmıştır. Daha önce bölge için raporlanmış olan sıcaklık değerlerine çok yakın değerler elde edilmiştir. Oluşturulan model ve hesaplamaların jeotermal kuyularda uygulanabilir olduğu ortaya konmaktadır.

Anahtar kelimeler

Jeotermal;
Sondaj;
Sondaj Akışkanı;
Formasyon Sıcaklığı

Estimation of The Formation Temperature from The Temperature Data of The Drilling Fluid at The Return Line

Abstract

The formation temperature is a key information determining producibility and sustainability of a well for geothermal fields. In order to determine these data, some tests are performed after drilling wells. This approach requires time and may not be cost effective. There may be some gain in terms of time and cost if the formation temperature can be predicted during drilling. So as to estimate the formation temperature, some models covering heat transfer mechanisms between formation and drilled well must be used. This study covers the estimation of the formation temperature from the drilling fluid temperature at the return line of a well from Aegean District. Formation temperature models are used by adding drilling, wellbore and formation parameters. Models are conducted by heat transfer mechanisms which are heat convection and conduction systems. Overall heat balance equation is computed by combining heat transfer between formation-annulus and annulus-drill pipe. Those equations are solved under steady state linear heat transfer conditions. To solve equations analytical approaches are used differently for annulus-formation and annulus-drill pipe sections. According to those solutions, formation temperatures can be obtained and compared. For the well, it was calculated a temperature around 295 °F. Such temperature value are close to the reported values at the region. It can be said that the proposed model and calculations may be used in geothermal wells.

Keywords

Geothermal;
Drilling;
Drilling Fluid;
Formation
Temperature

1. Giriş

Jeotermal enerji yerin ısı anlamına gelen, ülkemizde de hali hazırda özellikle Ege Bölgesinde ciddi yatırımlar yapılmış olan bir enerji çeşididir. Jeotermal enerjinin kullanımı sıcak bir kayaç ve bu kayacın içinde ısı transferi yapılabilecek olan bir akışkanın varlığı mümkündür. Bu akışkan genellikle sıcak su ve buhar olarak kayaçların gözeneklerinde veya çatlaklı yapılarda bulunmaktadır (Manzella *et al.* 2019).

Jeotermal sondaj teknikleri petrol ve doğal gaz için yapılan tekniklerle temel olarak aynıdır. Sıcaklığın etkisinin daha fazla olduğu bu sistemlerde bazı alet ve donanımların kullanımları farklılık göstermekte olup yine sıcaklık nedeniyle farklı uygulamalar da yapılabilmektedir (Watson 2013).

Sondaj sırasında kullanılan akışkana sondaj çamuru denmektedir. Sondaj çamurunun kuyuya gönderilmeden önce ve dönüş hattında sıcaklık, tuzluluk, akmazlık gibi özellikleri kontrol edilir. Bu özelliklere ve çamurun yapısındaki değişimlere göre çamura katkı maddeleri eklenerek istenen özelliklere tekrar ulaşması ve sondaj sırasında etkinliğini sürdürmesi sağlanır. Sondaj akışkanı dönüş hattında etkileşime girdiği formasyon hakkında bilgiler barındırmaktadır. Sondaj kesintileri adı verilen formasyon parçacıkları, formasyonun yapısı, çeşitliliği, kimyası gibi özellikler için bilgi sağlamakta, ayrıca çamurun sıcaklığı da benzer şekilde formasyonların sıcaklıkları hakkında bilgi verebilmektedir (Bourgoyne *et al.* 1986).

Jeotermal sistemlerde formasyon sıcaklığının tahmin edilebilmesi o sistemden üretilebilecek enerji hakkında bilgi vermesi açısından önemlidir. Jeotermal sondajlarda kararsız (transient) ısı transferi verileri kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda formasyon özellikleri ve sondaj parametrelili kullanılarak sürekli olmayan ısı transferi modellenmeye çalışılmıştır. Bunlara ek olarak sondaj borusu özellikleri de modellemeyi etkilemektedir. Bu etkileri hesaplayabilmek için sondaj akışkanının akış rejiminin laminar, türbülans veya geçiş (transition) özellikleri belirlenmelidir (Hasan ve Kabir 1991, Holmes ve Swift 1970).

Holmes vd. modellemenin gerçekleştirilebilmesi için kararlı lineer ısı transferi olduğu kabulü yaparak

analitik çözüm gerçekleştirmiştir. Sondaj matkabı tarafından ortaya çıkacak olan ısı transferi göz önünde bulundurulmamıştır. Bu çözümleme ısı denge denklemlerinin çözülmesine dayanmaktadır. Çözümleme yapılırken kuyu iki parçaya bölünmüştür: formasyon-anüler bölümü ve anüler-sondaj borusu bölümü. Bu çalışmada boru çapı, çamur ve akış özelliklerindeki değişimlerin ısı transferi özelliklerine etkilerini incelenmiştir (Holmes ve Swift 1970).

Hasan vd. modelleme için sabit ısı akısı ve kuyunun silindirik kaynak olarak kabulünün yaparak analitik çözüm gerçekleştirmiştir. Bu kabuller dışında sondaj akışkanının sıkıştırılmaz özellikte olduğu, akış debisinin sabit olduğu varsayımları da yapılmıştır. Bu yaklaşım dikey kuyular için daya uygundur. Sondaj borusundaki radyal sıcaklık gradyeni göz önünde bulundurulmamıştır. Benzer şekilde sondaj akışkanının özelliklerinin sıcaklıkla değişmedi kabulü yapılmıştır. Formasyonun litolojik özellikleri de çözümlemeye göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışmanın sonunda ortaya konan çözümlemenin daha ziyade üretim ve enjeksiyon kuyuları için uygun olduğu belirtilmiştir (Hasan ve Kabir 1991).

Aadnoy vd. Sondaj sırasında sıcaklık değişimlerini incelemişlerdir. Bu çalışma Norveç'te gerçekleşmiş olan bir kazanın açıklanabilmesi için yüksek sıcaklık ve yüksek basınç ortamına göre çözümleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kazada yer altında bir patlama olmuştur. Bu çalışmada, yüksek sıcaklık ve basınç değişimlerinin sondaj akışkanının özelliklerini ciddi biçimde değiştirdiği belirtilmiştir. Benzer şekilde çözümlemeye kararsız ısı akış modellemesi kullanılmıştır. Çalışmada kuyunun statik hali, normal sirkülasyon hali ve ters sirkülasyon hali için modeller kullanılmıştır. Akış hattındaki sıcaklığın, kuyu geometrisi, sondaj borularının yapısal özellikleri ve çamurun özellikleri ile formasyon sıcaklığı ilişkilendirilmiştir (Aadnoy ve Karstad 1997).

Raymond sirkülasyon zamanında çamur ve formasyon sıcaklıklarını tahmin edebilmek için bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında petrol bazlı çamur özellikleri kullanılmıştır. Çözümlemeler zaman, sıcaklığa ve derinliğe bağlı olarak yapılmıştır. Sirkülasyon zamanına göre kararsız, yarı kararlı ve kararlı akış modelleri için hesaplamalar

gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar ısı iletimi göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Çalışmada pek çok farklı kabul bulunmakla beraber sonuç olarak sondaj akışkanı tipi, özellikleri ve akış özellikleri göz önünde bulundurularak formasyon sıcaklığının etkileri incelenmiştir (Raymond 1969). Bu çalışma literatürde belirtilen farklı yaklaşımlar kullanılarak Ege Bölgesi'nde bulunan bir kuyudan alınan veriler ile formasyon sıcaklıklarının sondaj sırasında tahmin edilmesini kapsamaktadır. Daha önce jeotermal kuyular için bu şekilde bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada daha önceki kısımlarda belirtilen Hasan-Kabir ve Holmes metotları uygulanarak gerçek bir kuyu için formasyon sıcaklık tahminleri gerçekleştirilmiştir. Formasyonun metamorfik kayaç olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Her iki metot bünyesinde farklı kabuller vardır. Hasan-Kabir metodu için, öncelikli olarak sondaj akışkanının sıkıştırılmaz olduğu varsayılmıştır. Bununla beraber akış debisi ve jeotermal gradyen sabit olarak alınmıştır. Aksiyel ısı iletimi ve radyal sıcaklık dağılımları ile sondaj boruları ve matkap tarafından oluşturulabilecek ısı ihmal edilmiştir. Formasyonda ve sondaj akışkanında sıcaklık kaynaklı yapısal değişiklikler olmadığı varsayılmıştır. Kuyuyu çevreleyen formasyondan kararsız ısı akışı olduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Holmes metodunda ise, ısı transferi kararlıdır. Benzer şekilde sondaj boruları ve matkap tarafından oluşturulabilecek ısı ihmal edilmiştir. Bununla beraber jeotermal gradyen sabit olarak alınmıştır. Radyal ısı transferi olduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Isı transferi denklemlerinin türetilmeleri çok uzun olduğundan bu kısımda kuyu için türetilmiş sonuç denklemleri ve bu denklemlerin gerçek bir kuyuya uygulanması verilmektedir. Kuyu içi için türetilmiş olan ısı transferi denklemini aşağıda belirtilen denklem 1 ile verilmektedir.

$$m c_p \frac{dT_a}{dx} + 2\pi r_p U_p (T_a - T_p) = 2\pi r_w U_a (T_f - T_a) \quad (1)$$

Bu denklemde m (lb/hr) kütle debisi, c_p (BTU/°F.lb) sondaj akışkanının özgül ısı kapasitesi, T_a (°F) anülüs sıcaklığı, x (ft) matkap derinliği, r_p (ft) sondaj borusunun iç çapı, U_p (BTU/°F.ft².hr) sondaj borusu boyunca olan ısı transfer katsayısı, T_p (°F) sondaj borusu sıcaklığı, r_w (ft) kuyu çapı, U_a (BTU/°F.ft².hr) anülüs boyunca olan ısı transfer katsayısı ve T_f 'de (°F) formasyon sıcaklığıdır.

Benzer şekilde sondaj borusu için türetilmiş olan ısı transferi denklemini aşağıda belirtilen denklem 2 ile verilmektedir.

$$m c_p \frac{dT_p}{dx} = 2\pi r_p U_p (T_a - T_p) \quad (2)$$

Akış olan durumlar dinamik koşullar olarak belirtilmektedir. Dinamik koşullarda akış rejimlerinin belirlenmesi gerekir. Akışkanın akış rejimi ısı transferini etkilemektedir. Akışa açık alandaki çap değişimlerinden dolayı anülüs ve sondaj borusu kısımları için akış rejimi ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Bu sebepten bu kısımlarda sondaj akışkanının akış rejiminin laminer, türbülans veya geçiş (transition) özellikleri belirlenmelidir. Bunun için akışkanın bulunduğu bölüme göre Reynolds sayıları hesaplanmalı ve akış rejimi belirlenmelidir. Reynolds sayıları anülüs ve boru için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kullanılan denklemler sırasıyla boru içi ve kuyu için denklem 3 ve denklem 4'te verilmektedir.

$$N_{R,anülüs} = \frac{928\rho V D_e}{\mu_p} \quad (3)$$

$$N_{R,boru} = \frac{928\rho V D_{boru \text{ iç çapı}}}{\mu_p} \quad (4)$$

Bu denklemlerde ρ (lb/gal) sondaj akışkanı yoğunluğu, V (ft/hr) akışkanın akış hızı, D_e (ft) eşdeğer sondaj borusu çapı, μ_p (cP) sondaj akışkanının plastik viskozitesidir [3].

Akışkanın taşıdığı enerjinin oransal olarak kıyaslanmasını sağlamak amacıyla Prandtl sayısı Denklem 5 ile hesaplanmıştır. $k_{akışkan}$ (BTU/°F.ft.hr) akışkanın termal iletkenliğidir.

$$N_{Prandtl} = \frac{c_p}{\mu_p k_{akışkan}} \quad (5)$$

Anülüs boyunca ısı transferi $h_{anülüs}$ (BTU/°F.ft².hr) Denklem 6 ile verilmektedir.

$$h_{anülüs} = 0.023[N_{Re,anülüs}]^{0.8}[N_{Pr}]^{0.4} \frac{k_{akışkan}}{D_{wb}} \quad (6)$$

Anülüs boyunca olan ısı transfer katsayısı Denklem 7 ile verilmektedir. Denklemde r_{Cl} koruma borusu iç çapı ve r_{Co} koruma borusu dış çapıdır.

$$\frac{1}{U_A} = \left(\frac{1}{h_{anülüs}} \right) + \left(\frac{r_{Cl,4}}{k_{çelik}} \right) \ln \left(\frac{r_{Co,4}}{r_{Cl,4}} \right) + \left(\frac{r_{Cl,4}}{k_{çimento}} \right) \ln \left(\frac{r_{wb,4}}{r_{Co,4}} \right) + \left(\frac{r_{Cl,3}}{k_{çelik}} \right) \ln \left(\frac{r_{Co,3}}{r_{Cl,3}} \right) + \left(\frac{r_{Cl,3}}{k_{çimento}} \right) \ln \left(\frac{r_{wb,3}}{r_{Co,3}} \right) + \dots \quad (7)$$

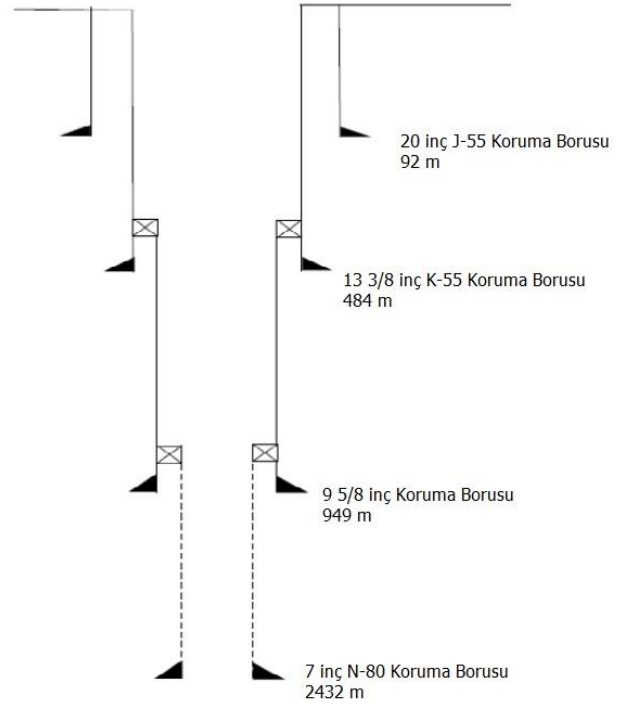
Benzer şekilde sondaj borusu boyunca olan ısı transferi h_{boru} ve ısı transfer katsayısı Denklem 8 ve Denklem 9'da sırasıyla verilmektedir.

$$h_{boru} = 0.023[N_{Re,boru}]^{0.8}[N_{Pr}]^{0.4} \frac{k_{akışkan}}{D_{boru \text{ iç çapı}}} \quad (8)$$

$$U_p = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_p} \right) + \left(\frac{D_{boru, ID}}{k_{çelik}} \right) \ln \left(\frac{D_{boru \text{ dış çap}}}{D_{boru \text{ iç çap}}} \right) + \left(\frac{D_{boru \text{ iç çap}}}{D_{boru \text{ dış çap}} h_{anülüs}} \right)} \quad (9)$$

3. Kuyu içi Analitik Çözümleme

Ege Bölgesindeki gerçek bir jeotermal kuyudan alınan veriler ile dönüş hattındaki sondaj akışkanının sıcaklık değişiminden formasyon sıcaklık tahmini Holmes-Swift ve Hasan-Kabir metotları ile hesaplanmıştır. Kuyunun şeması Şekil 1'de verilmektedir. Formasyon metamorfik kayadır. Kuyunun bütün bölümlerinin sondajı üç konlu matkap ile yapılmıştır. Sondaj akışkanı su bazlı çamurdur.



Şekil 1. Kuyu Şeması.

3.1. Holmes – Swift Metodu

Holmes ve Swift metoduna ait hesaplamalar sırasıyla aşağıda verilmektedir. Hesaplamalarda kullanılan sondaj, sondaj akışkanı, sondaj borusu, formasyon ve kuyu parametreleri sırasıyla Çizelge 1, Çizelge 2 ve Çizelge 3'te verilmektedir.

Çizelge 1. Sondaj borusu parametreleri.

Parametre	
$D_{boru \text{ dış çapı}}$, in	5
$D_{boru \text{ iç çapı}}$, in	4.276
D_{kuyu} , in	8 1/2
H, m	2432
X, m	2091
r_{kuyu} , in	4 1/4
$k_{çelik} \frac{BTU}{F.ft.hr}$	26.19

Çizelge 2. Sondaj ve sondaj akışkanı parametreleri.

Parametre	
Q, gpm	310
ρ , lb/gal	9.2
c_p , BTU/ ^o F.lb	0.964
$T_{Pgiriş}$, ^o F	131

μ_p, cp	14
$k_{\text{çamur}} \frac{\text{BTU}}{^\circ\text{F}\cdot\text{ft}\cdot\text{hr}}$	0.835
$T_{\text{sondaj}}, \text{hr}$	385
$k_{\text{çimento}} \frac{\text{BTU}}{^\circ\text{F}\cdot\text{ft}\cdot\text{hr}}$	0.895

Çizelge 3. Formasyon ve kuyu parametreleri.

Parametre	
$G, ^\circ\text{F}/\text{ft}$	0.0325
$T_{\text{yüzey}}, ^\circ\text{F}$	74
$k_{\text{formasyon}} \frac{\text{BTU}}{^\circ\text{F}\cdot\text{ft}\cdot\text{hr}}$	1.9
$c_{\text{formasyon}} \frac{\text{BTU}}{^\circ\text{F}\cdot\text{lb}}$	0.214
$\rho_{\text{formasyon}}, \text{ppcf}$	171.677

$$D_{\text{eşdeğer}} = 0.816(D_{\text{kuyu}} - D_{\text{boru dış çap}}) = 2.856 \text{ inç} \quad (10)$$

$$\frac{D_{\text{boru dış çap}}}{D_{\text{kuyu}}} = 0.6 > 0.3 \quad (11)$$

$$N_{\text{Reynold, anülüs}} = \frac{928\rho \frac{Q}{2.448(D_{\text{kuyu}}^2 - D_{\text{boru dış çap}}^2)} D_e}{\mu_p} = 4668 \quad (12)$$

Bu hesaplama göre akış rejimi türbülanslı akıştır.

$$N_{\text{Prandtl}} = \frac{c_p}{\mu_p k_{\text{çamur}}} = 0.034 \quad (13)$$

$$h_{\text{anülüs}} = 0.023 [N_{\text{Re, anülüs}}]^{0.8} [N_{\text{Pr}}]^{0.4} \frac{k_{\text{çamur}}}{D_{\text{kuyu}}} = 6.05 \frac{\text{BTU}}{^\circ\text{F}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{hr}} \quad (14)$$

$$U_A = 1.01 \frac{\text{BTU}}{^\circ\text{F}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{hr}} \quad (15)$$

$$N_{\text{Reynold, noru}} = \frac{928\rho V = \frac{Q}{2.448 D_{\text{boru iç çap}}^2} D_{\text{boru iç çap}}}{\mu_p} = 18060 \quad (16)$$

Bu hesaplama göre akış rejimi türbülanslı akıştır.

$$h_{\text{boru}} = 0.023 [N_{\text{Re, boru}}]^{0.8} [N_{\text{Pr}}]^{0.4} \frac{k_{\text{çamur}}}{D_{\text{boru iç çap}}} = 35.5 \frac{\text{BTU}}{^\circ\text{F}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{hr}} \quad (17)$$

$$U_p = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_p}\right) + \left(\frac{D_{\text{boru iç çap}}}{k_{\text{çelik}}}\right) \ln\left(\frac{D_{\text{boru dış çap}}}{D_{\text{boru iç çap}}}\right) + \left(\frac{D_{\text{boru iç çap}}}{D_{\text{boru dış çap}} h_{\text{anülüs}}}\right)} = 5.86 \frac{\text{BTU}}{^\circ\text{F}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{hr}} \quad (18)$$

$$A = \frac{m c_p}{2\pi r_p U_p} = 25166 \quad B = \frac{r_{\text{wb}} U_A}{r_p U_p} = 0.343 \quad (19)$$

$$C_1 = \left(\frac{B}{2A}\right) \left[1 + \left(1 + \frac{4}{B}\right)^{0.5}\right] = 3.107E^{-5} \quad (20)$$

$$C_2 = \left(\frac{B}{2A}\right) \left[1 - \left(1 + \frac{4}{B}\right)^{0.5}\right] = -1.74E^{-5} \quad (21)$$

$$C_3 = 1 + \frac{B}{2} \left[1 + \left(1 + \frac{4}{B}\right)^{0.5}\right] = 1.78 \quad (22)$$

$$C_4 = 1 + \frac{B}{2} \left[1 - \left(1 + \frac{4}{B}\right)^{0.5}\right] = 0.561 \quad (23)$$

H = 2432 m'de;

$$K_2 = \frac{GA - [T_{pi} - T_s + GA] e^{C_1 H (1 - C_3)}}{e^{C_2 H (1 - C_4)} - e^{C_1 H (1 - C_3)}} = 1224.53 \quad (24)$$

$$K_1 = T_{pi} - K_2 - T_s + GA = -349.62 \quad (25)$$

X = 2091 m'de;

$$\frac{dT_a}{dx} = C_1 K_1 C_3 e^{C_1 x} + C_2 K_2 C_4 e^{C_2 x} + G = -0.0021 \quad (26)$$

$$T_p = K_1 e^{C_1 x} + K_2 e^{C_2 x} + Gx + T_s - GA = 132.82 ^\circ\text{F} \quad (27)$$

$$T_a = K_1 C_3 e^{C_1 x} + K_2 C_4 e^{C_2 x} + Gx + T_s = 135.58 ^\circ\text{F} \quad (28)$$

$$T_{\text{formasyon}} = 294.54 ^\circ\text{F}$$

3.2. Hasan-Kabir Metodu

Hasan – Kabir metoduna ait hesaplamalar sırasıyla aşağıda verilmektedir. Hesaplamalarda bir önceki bölümde verilmiş olan parametreler kullanılmıştır.

$$T_D = \frac{\alpha \cdot (t_{\text{sondaj}})}{r_{\text{kuyu}}^2} = 158.73 \quad T_D > 1.5 \quad (29)$$

$$f(T_D) = (0.4063 + 0.5 \ln T_D) \left(1 + \frac{0.6}{T_D}\right) = 2.95 \quad (30)$$

$$A = \frac{m c_p}{2\pi r_{\text{wb}} U_A} \left[1 + \frac{r_{\text{wb}} U_A f(T_D)}{k_{\text{formasyon}}}\right] = 114160.47 \quad (31)$$

$$B = \frac{m c_p}{2\pi r_p U_p} = 25166.4 \quad (32)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{2A} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4A}{B}} \right) = -1.478E^{-5} \quad (33)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{2A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{B}} \right) = 2.354E^{-5} \quad (34)$$

H = 2432 m'de;

$$\theta = \frac{-[(T_{pi}+BG-T_S)\lambda_2 e^{\lambda_2 H} + G]}{\lambda_1 e^{\lambda_1 H} - \lambda_2 e^{\lambda_2 H}} = 1381.14 \quad (35)$$

$$\beta = \frac{(T_{pi}+BG-T_S)\lambda_1 e^{\lambda_1 H} + G}{\lambda_1 e^{\lambda_1 H} - \lambda_2 e^{\lambda_2 H}} = -505.23 \quad (36)$$

X = 2091 m'de;

$$\frac{dT_a}{dx} = \lambda_1(1 + \lambda_1 B)\theta e^{\lambda_1 x} + \lambda_2(1 + \lambda_2 B)\beta e^{\lambda_2 x} + G = -0.0013 \quad (37)$$

$$T_p(x, t) = \theta e^{\lambda_1 x} + \beta e^{\lambda_2 x} + Gx - BG + T_S = 132.18 \text{ } ^\circ F \quad (38)$$

$$T_a(x, t) = (1 + \lambda_1 B)\theta e^{\lambda_1 x} + (1 + \lambda_2 B)\beta e^{\lambda_2 x} + Gx + T_S = 133.96 \text{ } ^\circ F \quad (39)$$

$$T_f = (T_a - T_p)\frac{A}{B} + T_a - A\frac{dT_a}{dx} = 295.97 \text{ } ^\circ F \quad (40)$$

4. Tartışma ve Sonuç

Gerçek kuyudan alınan veriler ile her iki metotla çözümlenmeler gerçekleştirilmiştir. Holmes-Swift metoduna göre formasyon sıcaklığı 294.54 °F olarak bulunmuştur. Hasan-Kabir metoduna göre formasyon sıcaklığı 295.97 °F olarak bulunmuştur. Her iki metottan elde edilen formasyon sıcaklık verileri birbirine çok yakın ve uyumludur. Her iki metotta da çözümlenmeler sondaj akışkanı sıcaklığı verisi en son olarak bu noktada olduğundan 2091 metrede kadar yapılmıştır. Kalan yaklaşık üç yüz metrelik kısımdan dolayı gerçek formasyon sıcaklığının gerçekleştirilmiş olan hesaplamalardan daha da fazla olacağı düşünülmektedir. Bölgede raporlanmış olan çalışmalardan formasyon sıcaklıkları üç yüz fahrenheit derece civarında olduğu görülmektedir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda gerçekleştirilmiş olan hesaplamaların gerçek olası formasyon sıcaklık değerlerine çok yakın olduğu düşünülmektedir. Her bir jeotermal kuyu için her iki metot dâhilinde gerçekleştirilmiş olan kabuller değiştirilerek çözümlenmeler yapılabilir. Bu çalışma bu anlamda

eski bir yöntemin jeotermal kuyular için yapılmış ilk uygulamasıdır. Bu ve bunun gibi çalışmalardan elde edilebilecek veriler ileride gerçekleştirilecek olan sondaj, kuyu değerlendirme ve üretim gibi safhalarda daha etkin veri yorumlamaları yapılmasını sağlayabilir.

5. Kaynaklar

- Aadnoy, B.S., and Karstad, E. 1997. Analysis of Temperature Measurements during Drilling. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA,.
- Bourgoyne Jr, A.T., Chenevert, M.E., Millheim, K.K, and Young Jr, F.S. 1986. Applied Drilling Engineering. Society of Petroleum Engineers Texbook Series, Richardson, TX, USA, 42-75.
- Hasan, A.R., and Kabir, C.S. 1991. Heat Transfer During Two-Phase Flow in Wellbores: Part I – Formation Temperature. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA.
- Holmes, C.S., and Swift, S.C. 1970. Calculation of Circulating Mud Temperatures. SPE-AIME (The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers), Houston, Texas, USA.
- Manzella, A., Allansdottir, A., Peliizzone, A. 2019. Geothermal Energy and Society. 67. Springer International Publishing AG, 87-192.
- Raymond, L.R. 1969. Temperature Distribution in a Circulating Drilling Fluid. SPE-AIME (The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, SPE Symposium on Drilling and Rock Mechanics, Austin, Texas, USA.
- Watson, A. 2013. Geothermal Engineering Fundamentals and Applications. Springer International Publishing, New York, 114-247.

Semboller

a : Termal difüzivite, (sq ft)/hr

c_c: Kilin özgül ısı kapasitesi, BTU/(°F.lb)

c_f : Formasyonun özgül ısı kapasitesi, BTU/(°F.lb)

c_p: Çamurun özgül ısı kapasitesi, BTU/(°F.lb)

D_e: Eşdeğer çap, ft

f(T_D): Boyutsuz sıcaklık fonksiyonu, birimsiz

G: Jeotermal gradyen, °F/ft

H: Kuyu derinliği, ft

$h_{\text{anülüs}}$: Anülüs boyunca ısı transfer sabiti,
BTU/(°F.ft².hr)

h_{boru} : Boru ısı transfer sabiti, BTU/(°F.ft².hr)

$k_{\text{çimento}}$: Çimento termal iletkenliği, BTU/(°F.ft.hr)

$k_{\text{formasyon}}$: Formasyon termal iletkenliği,
BTU/(°F.ft.hr)

$k_{\text{çamur}}$: Çamur termal iletkenliği, BTU/(°F.ft.hr)

$k_{\text{çelik}}$: Çeliğin termal iletkenliği, BTU/(°F.ft.hr)

m: Kütleli akış debisi, lb/hr

μ_p : Çamurun plastik viskozitesi, cp

N_{Prandtl} : Prandtl sayısı

$N_{\text{Reynold,anülüs}}$: Reynold sayısı (anülüs)

$N_{\text{Reynold,boru}}$: Reynold sayısı (boru içi)

T_a : Anülüs sıcaklığı, °F

T_D : Boyutsuz sıcaklık katsayısı, birimsiz

U_a : Anülüs boyunca toplam ısı transfer katsayısı,
BTU/(°F.ft².hr)

U_p : Boru boyunca toplam ısı transfer katsayısı,
BTU/(°F.ft².hr)

x: Matkap derinliği, ft

v: Ortalama akışkan hızı, ft/hr