

تخمین فشار ته‌سازندی در حین عملیات حفاری توسط تخمین گر تطبیقی

مهدي ايمانان نجف آبادي، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اتوماسیون و ابزار دقیق، دانشگاه صنعت نفت

چکیده

در سال‌های اخیر، کاربرد تخمین و پایش در بسیاری از زمینه‌های صنعت حفاری مورد توجه محققین قرار گرفته است. یکی از اهداف مهم پایش و کنترل چاه، جلوگیری از ورود ناخواسته سیال سازندی به حفره چاه می‌باشد که در صورت عدم کنترل به موقع، منجر به فوران چاه خواهد شد. بنابراین، پایش و تخمین فشار ته‌چاهی در حین حفاری از الزامات این عملیات تلقی می‌شود. در این مقاله با بررسی و امکان‌سنجی تکنیک‌های متفاوت تخمین، امکان پایش فشار ته‌چاهی در حین عملیات حفاری در چاه‌های نفتی با در نظر گرفتن مسائل کلیدی و حساس عملیاتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین توانایی‌های روش جدید (تخمین گر تطبیقی) با روش مرسوم مقایسه و مزیت‌های آن بررسی شده است. بدین منظور با استفاده از داده‌های عملیاتی در دسترس از چاه‌های مورد مطالعه نتایج حاصل از سیستم پایشی طراحی شده در محیط شبیه‌ساز پیاده‌سازی و عملکرد به‌دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی | تخمین، عملیات حفاری، کنترل فشار ته‌چاهی، قوانین تطبیقی

مقدمه

قوانین لیاپونوف در مهندسی اتوماسیون و کنترل قابل پیاده‌سازی است. در این مقاله پس از به‌دست آوردن روابط ریاضی مورد نیاز جهت تخمین فشار ته‌سازندی، نتایج شبیه‌سازی به دست آمده توسط تخمین گر تطبیقی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد [۵].

۱- طراحی مشاهده‌گر و تخمین گر تطبیقی

برای تخمین فشار ته‌سازندی توسط یک تخمین گر تطبیقی، نیازمند یک مدل ریاضی دینامیک از چاه در حال حفاری می‌باشیم. سپس با استفاده از مدل ریاضی تهیه شده، قوانین لیاپونوف را اعمال نموده و قوانین تطبیقی جهت مشاهده‌گر مورد نظر خود را به‌دست می‌آوریم.

۱-۱- مدل ریاضی برای حالت دینامیک چاه

یکی از مدل‌های ریاضی غیرخطی که در سال‌های اخیر برای حالت دینامیک چاه مورد استفاده قرار گرفته است، مدل کاسا [۱] می‌باشد. در این مدل، چاه در حال حفاری به صورت هم‌دما در نظر گرفته شده و سیال حفاری نیز تنها به صورت فاز مایع می‌باشد.

مطابق شکل ۱، سیال حفاری توسط پمپ گل و از طریق رشته حفاری به درون چاه فرستاده می‌شود و پس از عبور از مته حفاری و فضای حلقوی به شیر خروجی^۴ می‌رسد. مدل ریاضی ارائه شده، فضای چاه را به دو قسمت رشته حفاری و فضای حلقوی Annulus مطابق شکل ۱ تقسیم‌بندی می‌کند. در این قسمت فقط

سیستم گردش گل حفاری به علت اهمیتی که در حین عملیات حفاری دارد به عنوان قلب این سیستم شناخته می‌شود. یکی از وظایف گل حفاری، اعمال فشار هیدرواستاتیکی به ته چاه جهت ممانعت از ورود سیال از سازند به درون چاه در حین عملیات حفاری می‌باشد. به عبارت دیگر اعمال فشار هیدرواستاتیکی مناسب توسط سیال حفاری مانع از نشت سیال سازند^۱ و به دنبال آن فوران چاه می‌شود. اعمال فشار هیدرواستاتیکی مناسب در ته چاه نیازمند پایش مداوم فشار ته‌چاهی است. این پایش توسط حسگرهای فشاری که بر سر مته حفاری نصب گردیده‌اند صورت می‌پذیرد و فشار اندازه‌گیری شده توسط گل در حال گردش، به سطح چاه ارسال می‌شود. گل‌شناس دکل حفاری متناسب با فشار ته‌سازندی چاه‌های آن منطقه و عمق مورد نظر، وزن گل حفاری را تنظیم کرده تا فشار مناسب را بر سر مته حفاری اعمال نماید. در بعضی مواقع، از قبیل عملیات لوله‌گذاری^۲ که سیستم گردش گل کاملاً متوقف بوده و لوله‌های حفاری به سطح انتقال داده می‌شوند، عملاً هیچگونه حسگرگی جهت اندازه‌گیری فشار ته‌سازندی وجود ندارد. در این مقطع که امکان پایش فشار ته‌چاهی وجود ندارد، سیال می‌تواند از سازند وارد چاه شده و پدیده نشت سیال سازند رخ دهد. بنابراین با توجه به حساسیت موضوع و امکان وقوع فوران چاه در حین لوله‌گذاری، ارائه راه حلی جهت مشاهده و پایش فشار ته‌سازندی در تمامی مراحل حفاری حتی زمان لوله‌گذاری احساس می‌شود. استفاده از تخمین گر تطبیقی جهت تخمین فشار ته‌سازندی در حین عملیات حفاری گزینه مناسبی برای حل مشکل ذکر شده می‌باشد. این تخمین گر توسط



p_d : چگالی گل حفاری موجود در لوله حفاری
 F_a : ضریب اصطکاک بین گل حفاری و فضای حلقوی
 F_d : ضریب اصطکاک بین گل حفاری و لوله حفاری

۲-۱- مشاهده گر غیر خطی برای تخمین فشار ته‌سازندی

هدف از معادله شماره ۴ تخمین دبی گل حفاری در سر مته و پایش پیوسته فشار ته‌سازندی می‌باشد. طبق این معادله فشار ته‌سازندی به صورت غیر مستقیم از رابطه‌ای که با دبی گل حفاری در سر مته حفاری (q_{bit})، فشار گل ورودی به داخل چاه حفاری از طریق لوله حفاری (P_p) و فشار گل خروجی از چاه حفاری از طریق فضای حلقوی (P_c) دارد، محاسبه می‌شود. بنابراین q_{bit} به عنوان خروجی غیر قابل اندازه‌گیری سیستم در نظر گرفته شده و تخمین گر تطبیقی بر روی این خروجی پیاده‌سازی می‌گردد.

$$y = x_3 = q_{bit} \quad (5)$$

از تغییر متغیر زیر استفاده می‌شود.

$$\xi_1 = x_3 + l_1 x_1 \quad (6)$$

l_1 : به عنوان ماتریس بهره تخمین گر که ماتریسی مثبت معین می‌باشد.
 با تبدیل معادله ۶ به شکل تخمینی $\hat{\xi}_1$ و سپس به دست آوردن معادله خطا و مشتق خطا استخراج روابط را ادامه می‌دهیم.

$$\hat{\xi}_1 = \hat{x}_3 + l_1 x_1 \quad (7)$$

$$e = \tilde{\xi}_1 = \xi_1 - \hat{\xi}_1 = x_3 + l_1 x_1 - \hat{x}_3 - l_1 x_1 = \tilde{x}_3 \quad (8)$$

$$\dot{e} = \dot{\tilde{x}}_3 = \dot{\xi}_1 - \dot{\hat{\xi}}_1 \quad (9)$$

پس از جایگزینی معادلات ۱ و ۳ در معادله ۹:

$$\dot{e} = \dot{\tilde{x}}_3 = -l_1 \tilde{x}_3 - \theta_1 (x_3^2 - \hat{x}_3^2) + \tilde{\theta}^T \phi \quad (10)$$

$$\phi(\hat{x}_3, v_3) = \begin{bmatrix} -\hat{x}_3^2 \\ v_2 \end{bmatrix} \text{ و } \tilde{\theta} = \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_1 \\ \tilde{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

با نوشتن قاعده لیاپونف به معادلات زیر می‌رسیم.

$$U(\tilde{x}_3, \tilde{\theta}) = \frac{1}{2} \tilde{x}_3^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \quad (12)$$

$$\dot{U}(\tilde{x}_3, \tilde{\theta}) = \frac{1}{2} \dot{\tilde{x}}_3^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \quad (13)$$

با جایگذاری معادله ۱۰ در ۱۳، معادله ۱۴ حاصل می‌شود.

$$\dot{U} = -l_1 \tilde{x}_3^2 - \theta_1 (x_3^2 - \hat{x}_3^2) \tilde{x}_3 + \tilde{\theta}^T \left(\tilde{x}_3 \phi + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \right) \quad (14)$$

با در نظر گرفتن قوانین زیر و Γ به عنوان ماتریس مثبت بهره:

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\tilde{x}_3 \Gamma \phi \quad (15)$$

معادلات نهایی به دست آمده در مدل ارائه می‌شود (روابط ۱ تا ۴). جهت دریافت جزئیات و روش به دست آوردن معادلات به مرجع [۱] مراجعه شود.

$$\dot{x}_1 = a_1 (u_1 - x_3) \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = b_1 (x_3 + u_2 - v_1) \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = a_2 x_1 - a_2 x_2 - \theta_1 x_3^2 + \theta_2 v_2 \quad (3)$$

$$P_{bit} = x_2 + M_a \dot{x}_3 + F_a x_3^2 + \rho_a g v_2 \quad (4)$$

پارامترها و علائم موجود در مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$b_1 = \frac{\beta_a}{v_a}, a_2 = \frac{1}{M}, a_1 = \frac{\beta_d}{v_d}, x_3 = q_{bit}, x_2 = P_c,$$

$$x_1 = P_p, u_1 = q_{pump}, u_2 = q_{choke},$$

$$v_1 = \dot{v}_a, v_2 = h_{bit}, \theta_1 = \frac{F_d + F_a}{M}, \theta_2 = \frac{\rho_d - \rho_a}{M} g$$

P_p : فشار گل ورودی به داخل چاه از طریق لوله حفاری

P_c : فشار گل خروجی از چاه از طریق فضای حلقوی

M : جرم معادل برای گل حفاری موجود در چاه

β_a : بالک ماجولوس گل حفاری موجود در فضای حلقوی (پارامتری فیزیکی)

β_d : بالک ماجولوس گل حفاری موجود در لوله حفاری (پارامتری فیزیکی)

v_a : حجم گل حفاری موجود در فضای حلقوی

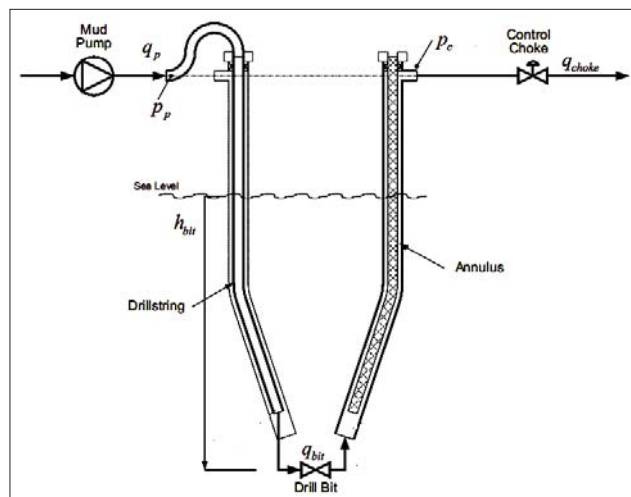
v_d : حجم گل حفاری موجود در لوله حفاری

q_{pump} : دبی گل حفاری ورودی به چاه

q_{bit} : دبی گل حفاری در سر مته حفاری (دبی ته‌چاهی)

h_{bit} : عمق مته حفاری از سطح زمین

p_a : چگالی گل حفاری موجود در فضای حلقوی



شکل ۱ | نمایش کلی از چاه در حال حفاری



$$\eta = \frac{-\Gamma}{l_1} \int \phi dx_3 \quad (28)$$

به صورت خلاصه قوانین تطبیقی حاصل را در زیر بیان می‌کنیم:

$$\phi = \begin{bmatrix} -\hat{x}_3^2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\eta = \Gamma \begin{bmatrix} \frac{\hat{x}_3^3}{3l_1 a_1} \\ -v_2 \hat{x}_3 \\ l_1 a_1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \hat{x}_3} = \Gamma \begin{bmatrix} \frac{\hat{x}_3^2}{l_1 a_1} \\ -v_2 \\ l_1 a_1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial v_2} = \Gamma \begin{bmatrix} 0 \\ -\hat{x}_3 \\ l_1 a_1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

۲- شبیه سازی مشاهده گر در محیط MATLAB

در این قسمت شبیه سازی تخمین گر به دست آمده در قسمت ۱ بر اساس داده‌های موجود در مراجع [۴] و [۵] از یک چاه واقعی در محیط MATLAB® و Simulink® انجام شده و خروجی و پارامترهای تخمین زده شده با مقادیر واقعی مقایسه می‌شوند. در چاه مورد نظر مقدار فشار ته سازندی در لحظه $t=3600s$ به مدت حدود ۱۰ دقیقه به علت عملیات لوله گذاری قابل اندازه گیری نخواهد بود (شکل ۲) و در این بازه زمانی حسگرهای فشاری

واحد	مقدار	پارامتر
m^3	۴۲	v_d
bar	۱۴۰۰۰	β_d
$\frac{kg}{m^3}$	۰/۰۱۲۱	ρ_d
$\frac{bar.s^2}{m^6}$	۰/۱۶	F_d
$\frac{kg}{m^3}$	۰/۰۱۲۱	ρ_a
$\frac{bar.s^2}{m^6}$	۰/۰۰۳	F_a
m	۱۸۲۵	h_{bit}
	$\begin{bmatrix} 0 & 10^{-9} \\ 10^{-9} & 0 \end{bmatrix}$	Γ
	10^{-2}	l_1

$$f(x_3, \hat{x}_3) = (x_3^2 - \hat{x}_3^2) \tilde{x}_3 \quad (16)$$

$$x_3 - \hat{x}_3 = 0 \Rightarrow f = 0$$

$$x_3 - \hat{x}_3 \neq 0 \Rightarrow f > 0$$

قسمت سوم معادله ۱۴ که عبارت $\tilde{\theta}^T (\tilde{x}_3 \phi + \Gamma^{-1} \tilde{\theta})$ می‌باشد با شرط ۱۵ حذف می‌شود و قسمت دوم معادله ۱۴ که عبارت $\theta_1 (x_3^2 - \hat{x}_3^2) \tilde{x}_3$ می‌باشد با شرط ۱۶ حذف و یا مثبت می‌شود. در نهایت با در نظر گرفتن l_1 که یک ماتریس مثبت تحت عنوان ماتریس بهره تخمین گر می‌باشد معادله ۱۴ به رابطه ۱۷ تبدیل می‌شود:

$$\dot{U} \leq -l_1 \tilde{x}_3^2 \quad (17)$$

به دلیل غیر قابل اندازه گیری بودن متغیر \tilde{x}_3 ، از متغیر جدید σ استفاده می‌کنیم:

$$\sigma = \theta + \eta(\hat{x}_3, v_2) \quad (18)$$

$$\dot{\sigma} = \dot{\theta} + \frac{\partial \eta}{\partial \hat{x}_3} \dot{\hat{x}}_3 + \frac{\partial \eta}{\partial v_2} \dot{v}_2 \quad (19)$$

با قرار دادن معادله ۱ و مشتق معادله ۷ در معادله ۱۹:

$$\dot{\sigma} = -l_1 \frac{\partial \eta}{\partial \hat{x}_3} (u_1 - \hat{x}_3) + \frac{\partial \eta}{\partial \hat{x}_3} \dot{\xi}_1 + \frac{\partial \eta}{\partial v_2} \dot{v}_2 \quad (20)$$

با توجه به اینکه v_2 یک سیگنال اغتشاش قابل اندازه گیری معلوم x_3 یک متغیر حالت و خروجی غیر قابل اندازه گیری نامعلوم می‌باشد:

$$\dot{\sigma} = -l_1 \frac{\partial \eta}{\partial \hat{x}_3} (u_1 - \hat{x}_3) + \frac{\partial \eta}{\partial \hat{x}_3} \dot{\xi}_1 + \frac{\partial \eta}{\partial v_2} \dot{v}_2 \quad (21)$$

با تبدیل معادله ۱۸ به صورت تخمین پارامتر θ ، خواهیم داشت:

$$\hat{\theta} = \hat{\sigma} - \eta(\hat{x}_3, v_2) \quad (22)$$

$$\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta} = \sigma - \eta - (\hat{\sigma} - \eta) \quad (23)$$

$$\tilde{\theta} = \tilde{\sigma} \quad (24)$$

$$\tilde{\theta} = \tilde{\sigma} \quad (25)$$

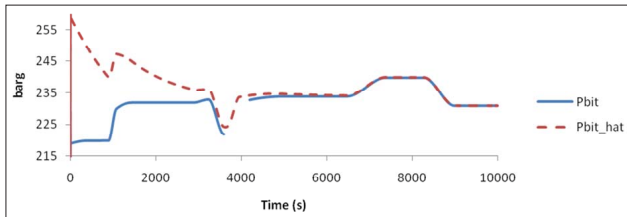
از طرفی داریم:

$$\dot{\tilde{\sigma}} = \dot{\sigma} - \dot{\hat{\sigma}} \quad (26)$$

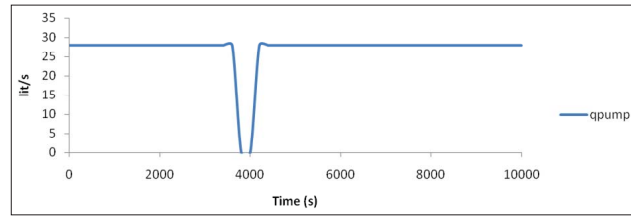
با قرار دادن معادلات ۲۰ و ۲۱ در معادله ۲۶ و جایگزینی نتایج آن به همراه معادله ۱۵ در معادله ۲۵ رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$-l_1 \frac{\partial \eta}{\partial \hat{x}_3} = \Gamma \phi \quad (27)$$

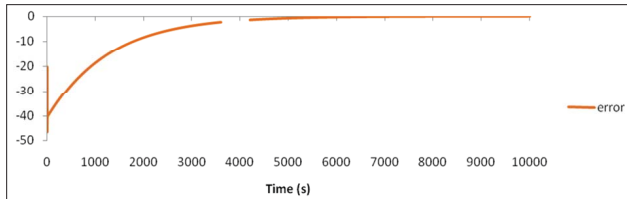
پس از انتگرال گیری از رابطه ۲۷:



شکل ۳ | فشار گل حفاری ته‌سازندی، ۱ - اندازه‌گیری شده از حسگرهای فشاری سر مته حفاری (Pbit) ۲ - تخمین فشار ته‌سازندی توسط تخمین‌گر تطبیقی (Pbit_hat)



شکل ۴ | دبی گل حفاری ورودی به چاه از طریق پمپ گل



شکل ۵ | خطای حاصل از اختلاف فشار اندازه‌گیری شده توسط حسگر و فشار تخمینی (error = Pbit - Pbit_hat)

صورت اطلاع از این تغییر ناگهانی فشار، می‌توان اقدامات لازم جهت کنترل نشست و خنثی نمودن آن را به عمل آورد. طبق نتایج به دست آمده، می‌توان از این تخمین‌گر به علت عملکرد سریع آن در همگرایی مقدار تخمینی به مقدار واقعی (اندازه‌گیری شده از حسگر فشاری)، در سیستم‌های واقعی و دکل‌های حفاری استفاده نمود و این روش گامی مؤثر در هوشمندسازی عملیات حفاری می‌باشد.

سپاسگزاری

در پایان از زحمات جناب آقای مهندس سجاد فرقانی که اینجانب را در تهیه این مقاله یاری نمودند و همچنین زحمات فراوان استاد گرامی جناب آقای دکتر سلحشور تشکر و قدردانی می‌نمایم.

همان‌گونه که در قسمت مقدمه توضیح داده شد غیر فعال هستند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، در زمان $t = 3600$ s به مدت ۱۰ دقیقه عملیات پمپاژ گل حفاری به چاه به علت عملیات لوله‌گذاری متوقف می‌شود و به دنبال آن لوله‌های حفاری و حسگر فشاری به سطح انتقال پیدا می‌کنند. در طی این مدت، فشار ته‌سازندی توسط تخمین‌گر تطبیقی محاسبه شده است. با توجه به شکل ۳ مقدار فشار ته‌سازندی اندازه‌گیری شده از حسگر فشاری (Pbit) پس از گذشت حدود ۱ ساعت و ۱۰ دقیقه با فشار تخمین‌گر تطبیقی (Pbit_hat) برابر می‌شود و خطای حاصل از اختلاف بین تخمین‌گر و حسگر فشاری طبق شکل ۴ به سمت صفر میل می‌کند.

نتیجه‌گیری

همان‌طور که در مقدمه این مقاله اشاره شد، یکی از مشکلات موجود در حین عملیات لوله‌گذاری، عدم امکان پایش و مشاهده فشار ته‌سازندی به علت بالا کشیدن لوله و مته حفاری و حسگر فشاری موجود بر سر مته جهت اضافه نمودن لوله حفاری جدید می‌باشد. لذا به منظور فراهم آوردن امکان پایش فشار ته‌سازندی در تمام مدت عملیات حفاری به کارگیری تخمین‌گر تطبیقی ضروری است. یکی از اهداف پایش فشار ته‌سازندی، اطلاع از وقوع پدیده نشستی سیال مخزن به داخل چاه و پیش‌بینی امکان وقوع فوران چاه می‌باشد. در

پانویس‌ها

¹ mahdiimanian@gmail.com

² Kick

³ Pipe Connection

⁴ Control Choke Valve

منابع

- [1] G.O. Kasa, "A Simple Dynamic Model of Drilling", Technical Report, Statoil, Norway, 2007
- [2] H.K. Khalil, Nonlinear Systems, Englewood Cliffs, Nj, 2002
- [3] E. Jahnshahi, K. Salahshoor, R. Kharrat, "A Modified Distributed Delay Model for Void Wave Dynamics in Gas Lift Oil Wells", JPST, 2007
- [4] J. Zhou, O.N. Stames, O.M. Aamo, G.O. Kasa "Pressure Regulation with Kick Attenuation in a Managed Pressure Drilling System," in Proceeding of the 48th IEEE Conference in Decision and Control, Shanghai, P.R. China, December 16-18, 2010
- [5] G. Nygaard, "Multivariable Process Control in High Temperature and High Pressure Environment Using Non-Intrusive Multi Sensor Data Fusion", Phd Thesis, NTNU, 2006
- [6] D. Hargreaves, S. Jardine, and B. Jeffryes, "Early kick detection for deepwater drilling: New probabilistic methods applied in the field," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2001.
- [7] H. Santos, E. Catak, J. Kinder, and P. Sonnemann, "Kick detection and control in oil-based mud: Real well-test results using micro ux control equipment," in SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings, vol. 1. Society of Petroleum Engineers (SPE), Richardson, TX 75083-3836, United States, 2007, pp. 429-438.
- [8] C. L. Helio Santos and S. Shayegi, "Micro-ux control: the next generation in drilling process for ultra-deepwater," in SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, ser. SPE8113, Port-of-Spain, Trinidad, West Indies, April 2003.
- [9] M. Doria and C. Morooka, "Kick detection in oil-based drilling rigs," in SPE/IADC 39004. IADC/SPE Drilling Conference, Amsterdam, August, 1997.
- [10] J.J. Azar and G.R. Samuel, Drilling Engineering. Penwell Corporation, 2007.