

## بررسی پتانسیل وقوع خودمهاری چاه به عنوان یکی از روش های کنترل فوران در حفاری در چاه های آب های عمیق

محمد صباح<sup>۱</sup>، محمد جواد عامری<sup>۲\*</sup>، علیرضا یونسی<sup>۳</sup>

۱- دانشجو دکتری، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.178078.1089

### واژگان کلیدی

کیک، ناپایداری دیواره چاه، خود مهاری، فوران، دریای خزر

### چکیده

کیک به ورود سیالات مخزن به داخل چاه گفته می شود که مشکلات زیادی را حین عملیات حفاری به وجود می آورد. در سازندهای پرفشار با مقاومت استحکامی کم، احتمال وقوع خودمهاری چاه با مکانیزم پلزدگی<sup>۱</sup> بیشتر خواهد بود. شرایط فروتعدالی<sup>۲</sup> که حین وقوع کیک به وجود می آید، باعث ناپایداری دیواره چاه شده و ریزش دیواره چاه ممکن است باعث به وجود آمدن پدیده خودمهاری<sup>۳</sup> و در نتیجه منجر به کنترل کیک گردد. در این پژوهش پتانسیل وقوع خودمهاری طبیعی و توانایی آن برای جلوگیری از وقوع فوران، در یکی از چاه های آب های عمیق در دریای خزر مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور از چند سری شبیه سازی های عددی نیمه کوپل برای ارزیابی پروفایل فشار دیواره چاه و ناپایداری دیواره به عنوان تابعی از زمان در شرایط کیک استفاده شده است. شبیه سازی های انجام شده در یک سناریوی خاص از فوران نشان می دهد که قطعات سنگ جدا شده از دیواره چاه در طول وقوع کیک، در درون سیال سازند در حال حرکت، معلق می ماند، به گونه ای که احتمال پلاگ شدن چاه و وقوع خود مهاری از طریق تجمع خرده های حفاری در درون چاه کم خواهد بود. از طرف دیگر ورود خرده سنگ های حاصل از ریزش دیواره چاه به داخل چاه باعث افزایش سریع غلظت مواد جامد موجود در درون سیال می شود. به طوری که پس از گذشت زمان مشخصی از وقوع کیک، این غلظت به یک حد بحرانی رسیده و پلزدگی مانع از گسترش کیک و تبدیل آن به فوران می شود.

### ۱. پیش گفتار

فوران چاه ورود ناگهانی، کنترل نشده و پیوسته سیال مخزن (نفت یا گاز) به داخل چاه در طول حفاری می باشد. خطاهای تصمیم گیری انسانی و یا نقص فنی موجود در تجهیزات موجب ایجاد فوران می شود [۱]. این فوران تا زمانی ادامه می یابد که توسط روش های طبیعی یا مکانیکی متوقف شود [۲]. به صورت مکانیکی فوران چاه را می توان به پنج روش کنترل کرد. بستن شیر فوران گیر، پمپ کردن سیمان، نصب تجهیزات نو، پمپ کردن گل و حفر چاه های تخلیه از جمله این روش ها هستند. همچنین از عوامل طبیعی کنترل فوران

می توان به پل زدگی، تخلیه، ریزش چاه و رخنه کردن آب به درون چاه اشاره کرد. به غیر از پلزدگی، سایر روش ها، روش های قابل اعتماد و مناسبی جهت وقوع خودمهاری چاه در زمان قابل قبولی در چاه های عمیق دریایی نیستند. عملیات کنترل چاه را می توان به سه بخش اولیه، ثانویه و ثالثیه تقسیم کرد. زمانی که کیک ایجاد شده توسط روش های اولیه و ثانویه کنترل نشود، ناگزیر از روش ثالثیه برای کنترل فوران استفاده می شود [۳]. خودمهاری از جمله روش های ثالثیه برای کنترل چاه محسوب می شود که دیواره چاه به درون چاه ریزش کرده و مسیر جریان سیال سازند را مسدود می کند و پلزدگی

<sup>1</sup> Bridging

<sup>2</sup> Underbalanced

<sup>3</sup> Self-killing

شده است. میزان پل‌زدگی طبیعی در چاه‌های عمیق دریایی را از طریق ریزش چاه ارزیابی کرده‌اند. نتایج آنان نشان داد که عمقی که در آن، ریزش دیواره اتفاق می‌افتد و احتمال وقوع پل‌زدگی طبیعی بالاست، ارتباط مستقیمی با عمق آب و اندازه تنش افقی حداکثر دارد [۱۰]. باید خاطر نشان کرد که در این مطالعه از روش ساده شده‌ای برای شبیه‌سازی استفاده شده و آنالیز حجم ریزش و انتقال خرده‌سنگ‌ها در نظر گرفته نشده بود. ویلسونو همکاران از یک سری روش‌های آنالیز نیمه عددی برای بررسی وقوع پل‌زدگی طبیعی در سناریوهای مختلف کیک استفاده کردند. آنها آنالیزهای خود را بر پایه توسعه کیک، ریزش دیواره، انتقال خرده‌ها و بررسی وقوع پل‌زدگی خرده‌ها قرار دادند. بررسی‌های آنان نشان داد که احتمال وقوع خودمهاری کیک و پل‌زدگی طبیعی در عمق‌های پایین و زمانی که لوله حفاری در قسمت حفره باز قرار دارد، بیشتر است [۱۱] و [۵].

در این مطالعه از روش‌های ارائه شده توسط ویلسون و همکاران و با به‌کاربردن شبیه‌سازی‌های عددی، به بررسی پتانسیل پل‌زدگی طبیعی در یکی از چاه‌های دریایی خزر پرداخته شده است. استراتژی ارائه شده به مهندسين کمک می‌کند تا پروفایل فشار گذرا، پایداری دیواره و نرخ ورود سیال به چاه را تحت شرایط مختلف فوران به دست آورده و یک نقشه جامع کنترل فوران ترسیم کنند.

## ۲. آنالیز توسعه کیک

شبیه‌سازی کیک اولین مرحله برای آنالیز پل‌زدگی طبیعی است. زمانیکه فشار سازند بیشتر از فشار هیدرواستاتیک سیال حفاری درون چاه باشد، گاز وارد چاه شده و با سیال حفاری ترکیب می‌شود. حین وقوع کیک گازی، چاه به سه قسمت: سازند پرفشار گازی، جریان سیال دوفازی و جریان سیال تک فاز تقسیم می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مطالعه برای بدست آوردن پروفایل فشار قسمت‌های مختلف چاه و ویژگی‌های جریان به عنوان تابعی از زمان، از یک شبیه‌ساز کیک در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. برای مدل کردن سیال ورودی از سازند، معادله داری برای جریان شعاعی استفاده شده است:

$$q_g = \frac{kh(p_r^2 - p_w^2)}{1424\mu_g Z T \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (1)$$

طبیعی درون چاه اتفاق می‌افتد. در طی این فرآیند، فوران بدون هیچ دخالت انسانی، تحت کنترل خواهد بود [۴]. کاهش فشار در داخل چاه در طول وقوع کیک عامل اصلی آغاز خودمهاری است. کاهش فشار درون چاه باعث تغییر در تمرکز تنش اطراف دیواره چاه می‌شود که خود عاملی بر ایجاد شکست برشی در سازند می‌شود. در سازندهای سست مقدار خرده‌سنگ‌های حاصل از شکست برشی بر روی دیواره چاه به حدی است که توانایی پلاگ کردن چاه را خواهند داشت. لذا وقوع پل‌زدگی طبیعی و خودمهاری در سازندهای سست محتمل‌تر است [۵]. به‌طور کلی دو مکانیزم در مورد نحوه وقوع خودمهاری طبیعی وجود دارد [۶]. در مکانیزم اول، اگر دیواره چاه تغییرات فشار ایجاد شده توسط جریان سیال سازند را تحمل نکند، سنگ‌های اطراف دیواره چاه به درون چاه ریزش کرده و جریان سیال را متوقف خواهد کرد [۷]. در مکانیزم دوم، مهم‌ترین عامل برای کنترل کیک، حجم خرده‌های ایجاد شده حین وقوع کیک است. اگر غلظت مواد جامد به حد بحرانی برسد، گرانروی موثر سیال به بی‌نهایت رسیده و جریان متوقف می‌شود [۸].

فلک بیان کرده است که در چاه‌های عمیق دریایی که سازند مقاومت استحکامی پایینی دارد، پل‌زدگی درون چاه ریسک وقوع کیک طولانی مدت را کاهش می‌دهد. آدامز و کوهمن تایید کردند که پل‌زدگی طبیعی در سازند، توانایی جلوگیری از تعداد زیادی کیک را داشته است [۶]. مطالعات آماری اسکیل و همکاران در چاه‌های حفار شده در تگزاس طی سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۶ نشان داده است که اکثر فوران‌ها در سازندهای کم عمق رخ داده‌اند و توسط ریزش دیواره چاه و پل‌زدگی در سازندهای سست و در بخش حفره‌باز مهار شده‌اند [۲]. تجربیاتی که از فوران‌های سازندهای عمیق دریایی به دست آمده، این سوال را مطرح می‌کند که آیا روش پل‌زدگی طبیعی، مکانیزم قابل‌انکایی برای محدود کردن زمان فوران در سازندهای عمیق دریایی است یا نه. برای مثال، داده‌های مربوط به فوران ۳۵ چاه در خلیج مکزیک که در عمق کم اتفاق افتاده‌اند، جریان آب توسط پل‌زدگی طبیعی کنترل نشده و فوران ادامه داشته است [۹]. بنابراین بررسی پتانسیل وقوع پل‌زدگی طبیعی برای خودمهاری چاه، در کنار سایر مکانیزم‌های کنترل فوران، امری ضروری است. در مقالات ارائه شده، مطالعات اندکی در زمینه آنالیز خودمهاری چاه انجام

افت فشار هیدرواستاتیکی و اصطکاکی برای جریان دو فازی به ترتیب از دو معادله (۴) و (۵) قابل محاسبه هستند [۱۴]:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_H = \rho_m \left(\frac{1}{144}\right) \quad (4)$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \left(\frac{1}{144}\right) \frac{f V_m^2 \rho_m}{2g d_H} \quad (5)$$

در معادله (۵)،  $d_H$  قطر هیدرولیکی،  $V_m$  سرعت مخلوط و  $f$  ضریب اصطکاک است. برای جریان های آرام، ضریب اصطکاک از معادله ارائه شده توسط پویزوله محاسبه می شود:

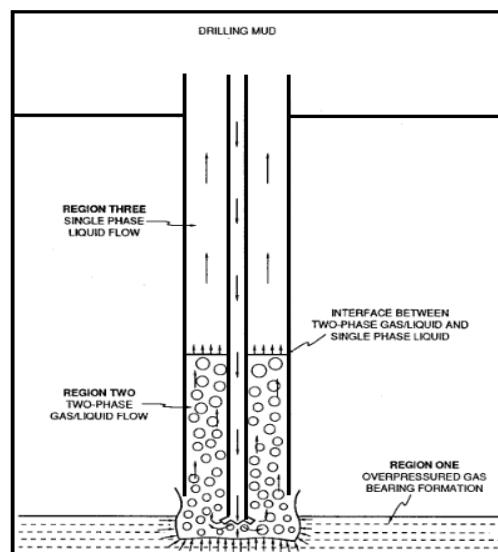
$$f = \frac{16}{R_e} \quad (6)$$

برای جریان آشفته از رابطه ارائه شده توسط زیگرانگ و سیلوستر برای محاسبه ضریب اصطکاک استفاده می شود [۱۵]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/d_H}{3.7} \frac{5.02}{R_e} \log \left( \frac{\varepsilon/d_H}{3.7} + \frac{12}{R_e} \right) \right) \quad (7)$$

در معادله (۷)،  $f$  ضریب اصطکاک،  $d_H$  قطر هیدرولیک چاه،  $\varepsilon$  زبری دیواره و  $R_e$  عدد رینولدز می باشد. برای بدست آوردن پروفایل فشار چاه، لازم است که افت فشار مربوط به قسمت جریان تک فاز حین توسعه کیک نیز محاسبه شود. در مرحله بعدی، برای بدست آوردن فشار چاه و ویژگی های جریان دوفازی، باید قسمت های مختلف چاه باهم کوپل شوند. با دانستن فشار اولیه مخزن و فشار درون چاه، با استفاده از معادله دارسی، دبی اولیه گاز محاسبه می شود. میزان دبی ثابت در نظر گرفته شده و طول قسمتی که جریان دوفازی در آن وجود دارد، ۱۰۰ فوت در نظر گرفته شده است. سپس افت فشار کلی که از مجموع افت فشار اصطکاکی و هیدرواستاتیکی بدست می آید، برای دو قسمت تک فاز و دو فازی محاسبه می شود. از آنجایی که فشار سطح، فشار اتمسفر است، مجموع افت فشار ناحیه تک فاز، دوفاز و فشار اتمسفر برابر با فشار جریان ته چاه خواهد بود. بنابراین دبی جدید با جایگذاری فشار ته چاه در معادله دارسی به دست خواهد آمد. با تغییر دادن شرایط مرزی می توان کیک را برای سناریوهای مختلف شبیه سازی کرد.

در معادله فوق  $q_g$  دبی گاز،  $r_w$  شعاع چاه،  $r_e$  شعاع مخزن،  $p_w$  فشار چاه،  $p_r$  فشار مخزن،  $k$  تراوایی،  $h$  ارتفاع مخزن،  $Z$  ضریب انحراف گاز و  $\mu_g$  گرانیوی گاز است. برای مدل سازی قسمت جریان دوفازی از مدل مکانیکی حسن و کبیر استفاده شده است [۱۲]. این مدل نسبت حجمی گاز را برای ۵ نوع جریان شامل جریان حبایی، جریان لخته ای، جریان حبایی پراکنده، جریان کف آلود و جریان حلقوی محاسبه می کند.



شکل ۱. قسمت های مختلف چاه در طول وقوع کیک گازی

در این مدل از معادله (۲) برای محاسبه نسبت حجمی گاز استفاده شده است [۱۳]:

$$f_g = \frac{V_{sg}}{C_o V_m + V_{\infty}} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $V_{sg}$  سرعت ظاهری گاز،  $V_m$  سرعت مخلوط و  $V_{\infty}$  سرعت لغزشی گاز می باشد. همچنین  $C_o$  یک ثابت وابسته به نوع رژیم جریان است که مقادیر  $C_o$  برای جریان های حبایی، لخته ای و حبایی پراکنده، ۱.۲، برای جریان کف آلود ۱.۱۵ و برای جریان حلقوی ۱ است [۱۴]. افت فشار اصطکاکی و هیدرواستاتیکی به شدت به چگالی مخلوط وابسته هستند. چگالی مخلوط از معادله (۳) محاسبه می شود:

$$\rho_g = f_g \rho_g + (1 - f_g) \rho_l \quad (3)$$

که در معادله (۳)  $\rho_g$  چگالی گاز و  $\rho_l$  چگالی مایع است.

### ۳. مدل مکانیکی زمین

ساخت مدل مکانیکی زمین اولین مرحله برای بررسی پایداری دیواره چاه است. در این مدل، از داده های چاه مجاور برای بدست آوردن ویژگی های الاستومکانیکی سنگ و شرایط تنش های برجا استفاده می شود [۱۶]. این فرآیند شامل ساخت لاگ خواص الاستیک با استفاده از معادلات فیزیکی، ویژگی های استحکامی با استفاده از روابط موجود و در نهایت مقادیر تنش های برجا در میدان می شود [۱۷].

#### ۳.۱. خواص الاستیک

از لاگ سونیک برای بدست آوردن خواص الاستیک سنگ که شامل مودول یانگ و نسبت پواسون است، استفاده می شود [۱۸]. برای تخمین زدن خواص الاستیک می توان از روابط فیزیکی که تابعی از زمان عبور امواج برشی و فشاری هستند، استفاده کرد:

$$E_{dyn} = 1.34 \times 10^{10} \times \left[ \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \right] \left[ \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_c^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2} \right] \quad (8)$$

$$\nu_{dyn} = \frac{1}{2} \frac{\left( \frac{\Delta t_s^2}{\Delta t_c^2} \right)^2 - 2}{\left( \frac{\Delta t_s^2}{\Delta t_c^2} \right)^2 - 1} \quad (9)$$

$\Delta t_s$  زمان عبور موج برشی،  $\Delta t_c$  زمان عبور موج فشاری و  $\rho$  چگالی سنگ است.

#### ۳.۲. پارامترهای استحکامی

یکی از پارامترهایی که در آنالیز پایداری دیواره چاه ضروری است، مقاومت فشاری تک محوره سنگ است. این پارامتر از انجام تست های تک محوره بر روی مغزه هایی که از عمق های مختلف گرفته شده اند، محاسبه می شود [۱۷]. علاوه بر این می توان از روابط تجربی فراوانی که برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره برای سنگ های مختلف وجود دارد، استفاده کرد. اکثر اوقات این روابط نتایج دقیقی ارائه نمی کنند و این نتایج باید با استفاده از داده های آنالیز مغزه کالیبره شوند. پارامتر استحکامی بعدی، زاویه اصطکاک داخلی است که یک خاصیت سنگ بوده و نشان دهنده حساسیت سنگ به فشار محدودکننده است.

### ۳.۳. تنش های برجا

تنش روباره در عمق معین، ناشی از فشار حاصل از وزن لایه های فوقانی است:

$$\sigma_v = \rho gh \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $\rho$  چگالی متوسط سنگ لایه های فوقانی،  $h$  عمق عمودی و  $g$  شتاب گرانش است. برای بدست آوردن تنش های افقی، از مدل کرنش افقی پیروالاستیک استفاده می شود. روابط این مدل به صورت زیر است:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - aP_0) + aP_0 \quad (11)$$

$$+ \frac{E_{sta}}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)$$

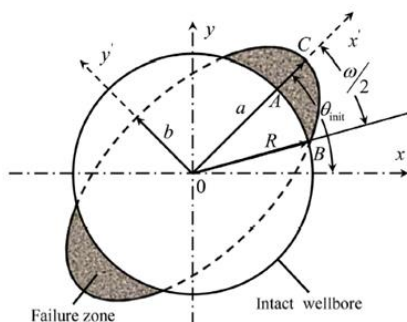
$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - aP_0) + aP_0 \quad (12)$$

$$+ \frac{E_{sta}}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x)$$

$\nu$  نسبت پواسون،  $a$  ثابت الاستیک بایوت،  $P_p$  فشارمنفذی،  $E_{sta}$  مودول یانگ استاتیک،  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_y$  کرنش های موجود در سازند هستند.

### ۴. آنالیز حجم فروریختگی

تعیین میزان سنگ تولید شده در اثر فروریختن سازند حین کیک، یک امر ضروری برای آنالیز مکانیزم های پلزدگی طبیعی است. بدین منظور، تنش های القایی در اطراف دیواره چاه را در یک معیار شکست مناسب قرار داده و زاویه ریزش، شعاع ریزش و سطح ریزش در سازند حین وقوع کیک محاسبه می شود. زاویه ریزش، شعاع ریزش و سطح ریزش در شکل ۲ نشان داده شده اند:



شکل ۲. وقوع شکست برشی در دیواره چاه و نواحی مختلف ریزش

در شکل فوق  $\omega$  زاویه ریزش،  $A$  شعاع ریزش و نواحی

محاسبه می‌شوند [۲۱]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_r - \sigma_p & \sigma_{r\theta} & \sigma_{rz} \\ \sigma_{\theta r} & \sigma_\theta - \sigma_p & \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{zr} & \sigma_{z\theta} & \sigma_z - \sigma_p \end{bmatrix} \quad (۱۹)$$

$$\sigma_p^3 - I_1 \sigma_p^2 - I_2 \sigma_p - I_3 = 0 \quad (۲۰)$$

که  $I_1, I_2$  و  $I_3$  متغیرهای تنش هستند که از روابط (۲۱-۲۳) بدست می‌آیند:

$$I_1 = \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_{zz} \quad (۲۱)$$

$$I_2 = \sigma_r \sigma_\theta + \sigma_r \sigma_{zz} + \sigma_\theta \sigma_{zz} - \sigma_{r\theta}^2 - \sigma_{\theta z}^2 - \sigma_{zr}^2 \quad (۲۲)$$

$$I_3 = \sigma_r \sigma_\theta \sigma_z + 2\sigma_{r\theta} \sigma_{\theta z} \sigma_{zr} - \sigma_r \sigma_{\theta z}^2 - \sigma_{r\theta}^2 - \sigma_{\theta z}^2 - \sigma_{zr}^2 \quad (۲۳)$$

معادله (۲۰) دارای سه جواب است که جواب های آن سه تنش اصلی ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) هستند. در این مطالعه برای بررسی پایداری دیواره از معیار شکست موهر-کلمب استفاده شده است:

$$F = c \cos \varphi (\sigma_{m,2} - P_o) - \tau_{max} \quad (۲۴)$$

$F$  تابع شکست،  $\sigma_{m,2}$  تنش عمودی متوسط و  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی است.  $C$  ضریب انسجام سنگ است که وابسته به مقاومت فشاری تک محوره و  $\varphi$  است:

$$c = \frac{(1 - \sin \varphi) UCS}{2 \cos \varphi} \quad (۲۵)$$

شکست برشی زمانی اتفاق می‌افتد که  $F < 0$  باشد. برای محاسبه زاویه ریزش با گذشت زمان، در نرم افزار متلب از حلقه تکرار استفاده شده است. در این حلقه، برای زوایای مختلف، تنش های اصلی محاسبه شده و در معیار شکست قرار داده شده‌اند و مقادیر مختلف ضریب شکست محاسبه شده است. زوایایی که در آن مقدار ضریب شکست منفی است، به عنوان زاویه ریزش در نظر گرفته شده اند. روش محاسبه شعاع ریزش همانند زاویه ریزش است. گسترش سطح شکست در هر عمق از معادله (۲۶) بدست می‌آید:

$$A = \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta) d\theta - (\theta_2 - \theta_1) r_w \quad (۲۶)$$

که در معادله (۲۶)،  $A$  سطح ریزش و  $r_w$  شعاع چاه است.  $\theta_1$

خاکستری ناحیه ریزش می باشد. تنش های القایی در اطراف یک چاه انحرافی با استفاده از معادلات (۱۳-۱۸) بدست می‌آیند [۱۹]:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left( 1 - \frac{R_w^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left( 1 + \frac{3R_w^4}{r^4} - \frac{4R_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + \tau_{xy} \left( 1 + \frac{3R_w^4}{r^4} - \frac{4R_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta + P_w \frac{R_w^2}{r^2} \quad (۱۳)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left( 1 + \frac{R_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left( 1 + \frac{3R_w^4}{r^4} - \frac{4R_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta - \tau_{xy} \left( 1 + \frac{3R_w^4}{r^4} - \frac{4R_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta - P_w \frac{R_w^2}{r^2} \quad (۱۴)$$

$$\sigma_z = \sigma_z - \nu [2(\sigma_x - \sigma_y) \frac{R_w^2}{r^2} \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \frac{R_w^2}{r^2} \sin 2\theta] \quad (۱۵)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \left( 1 - 3 \frac{R_w^4}{r^4} + 2 \frac{R_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta + \left( 1 - 3 \frac{R_w^4}{r^4} + 2 \frac{R_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad (۱۶)$$

$$\tau_{z\theta} = (-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta) \left( 1 + \frac{R_w^2}{r^2} \right) \quad (۱۷)$$

$$\tau_{rz} = (\tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta) \left( 1 - \frac{R_w^2}{r^2} \right) \quad (۱۸)$$

این معادلات برای آنالیز پایداری دیواره چاه در شرایط الاستیک خطی هستند [۲۰]. در معادلات بالا  $r$  نشان دهنده فاصله از دیواره چاه،  $\theta$  زاویه ای است که نسبت به قسمت بالای چاه اندازه گرفته می‌شود و  $R_w$  شعاع چاه است. در معادلات (۱۳) و (۱۴) با فشار بدست آمده از شبیه سازی های کیک جایگزین شده است. در چاه انحرافی تنش های شعاعی، محوری و مماسی برابر با تنش های اصلی نیستند و قبل از قراردادن در معیار شکست باید مقادیر آن ها را محاسبه کرد [۲۰]. تنش های اصلی با استفاده از درمینان ماتریس زیر

میل می‌کند و جریان سیال متوقف می‌شود  $/\lambda$ . غلظت بحرانی ذرات کروی شکل،  $0.64$  است. برای ذرات غیر کروی این مقدار کمتر است [۸].

برای ذرات جامد زاویه‌دار غلظت بحرانی  $0.5$  در نظر گرفته می‌شود [۲۳]. یک ضریب گرانروی برای تعیین تغییرات گرانروی سیال در غلظت‌های خاصی از غلظت مواد جامد استفاده می‌شود. این ضریب با استفاده از معادله (۲۹) که برای غلظت‌های بالا ارائه شده است، به دست می‌آید [۱۱]:

$$n = 1 + \frac{9}{8} \phi_c \left( \frac{\left(\frac{\phi}{\phi_c}\right)^{\frac{1}{3}}}{1 - \left(\frac{\phi}{\phi_c}\right)^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (29)$$

در معادله (۲۹)،  $\phi_c$  غلظت بحرانی مواد جامد و  $\phi$  غلظت مواد جامد درون سیال است.

#### ۷. مطالعه موردی

در این قسمت، پل‌زدگی طبیعی به عنوان یک مکانیزم مهار چاه در یکی از چاه‌های گاز میعانی در دریای خزر بررسی می‌شود. برای این کار از یک آنالیز جامع که در بردارنده‌ی شبیه‌ساز کیک، پایداری دیواره چاه، انتقال ذرات جامد و پل‌زدگی ذرات جامد می‌شود، استفاده شده است تا وقوع این پدیده طبیعی امکان‌سنجی شود.

سناریوها و حالات مختلفی برای وقوع کیک وجود دارند. بسته به شرایط کیک، نتایج پل‌زدگی طبیعی متفاوت خواهد بود. یکی از شرایط وقوع کیک که محتمل‌تر از شرایط دیگر است، حفاری یک لایه پرفشار با وزن گل پایین است. در این مطالعه نیز از این سناریو برای آنالیز پل‌زدگی طبیعی استفاده شده است. در این مطالعه، فرض بر این است که فشار هیدرواستاتیک سیال حفاری،  $1.72$  مگاپاسکال بیشتر از فشار منفذی حین حفاری در عمق  $4780$  تا  $6500$  متر است (این عمق، عمق حفار می‌باشد). در عمق  $6500$  متر، مته حفاری وارد لایه گازی پرفشار شده و سیال سازند به طور کنترل نشده وارد چاه می‌شود. اختلاف فشار لایه پرفشار و فشار هیدرواستاتیک سیال درون چاه،  $1.72$  مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. دیگر پارامترهای مرتبط در این سناریو مانند: گرادیان دما، خواص رئولوژیک گل حفاری، ویژگی‌های پتروفیزیکی سازند گازی و گرانروی مخصوص گاز، از داده‌های موجود میدان استخراج شده‌اند. تمامی داده‌های استفاده شده در مورد سناریوی کیک در جدول ۱ آورده شده‌اند. در این

و  $\theta_2$  زوایایی در اطراف دیواره هستند که نشان دهنده مرز زاویه ریزش هستند و از قسمت بالای چاه اندازه گرفته می‌شوند.  $f(\theta)$  یک تابع درجه ۴ است که زاویه اطراف چاه را به شعاع ریزش مربوط می‌کند:

$$r = f(\theta) = a\theta^4 + b\theta^3 + c\theta^2 + d\theta + e \quad (27)$$

در معادله (۲۷)  $a.b.c.d.e$  ثوابتی هستند که از برازش کردن نمودار بدست می‌آیند. با دانستن سطح ریزش در هر عمق، میزان خرده سنگ ریخته شده به درون چاه از دیواره در هر عمق به دست می‌آید. تمامی مراحل محاسبه حجم خرده سنگ‌های تولید شده در پیوست در شکل الف نمایش داده شده است.

#### ۵. آنالیز انتقال مواد جامد

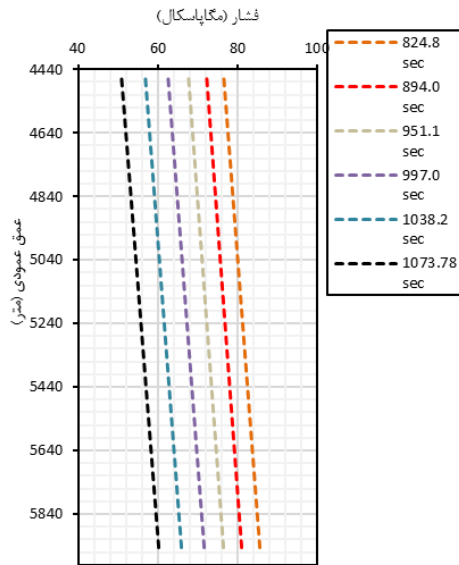
حجم سنگ ریخته شده به درون چاه ممکن است به میزانی زیاد باشد که بتواند چاه را مسدود کند. اما اگر سرعت سیال درون چاه به میزانی باشد که بتواند این حجم از سنگ را به سطح منتقل کند، خودمهاری چاه اتفاق نخواهد افتاد. لذا نیاز است که حجم انتقال مواد جامد به سطح حین وقوع کیک محاسبه شود. از روش عددی ارائه شده توسط چن می‌توان سرعت ته نشینی مواد جامد را به صورت زیر محاسبه کرد [۱۱]:

$$V_s^2 + 4.458 \times e^{5.030\omega} \left( \frac{u_e}{d \times \rho_f} \right) V_s - 19.449 \times e^{5.030\omega} \times d \times \left( \frac{\rho_b}{\rho_f} - 1 \right) = 0 \quad (28)$$

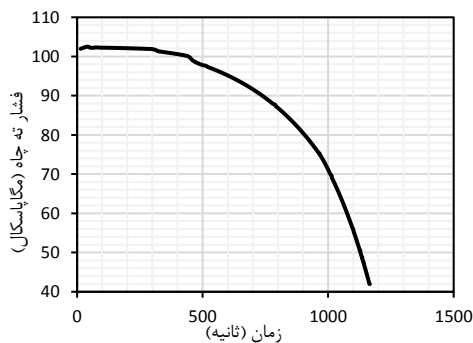
در معادله بالا،  $\omega$  میزان گردش‌دهی ذرات،  $u_e$  گرانروی موثر سیال،  $d$  قطر معادل ذرات،  $\rho_f$  چگالی سیال و  $\rho_b$  چگالی ذره است. از آنجایی که چگالی موثر و گرانروی موثر سیال دوفازی حین وقوع کیک تغییر می‌کنند، میزان ته‌نشینی ذرات و سرعت انتقال ذرات در طول زمان متغیر خواهند بود.

#### ۶. آنالیز پل‌زدگی ذرات

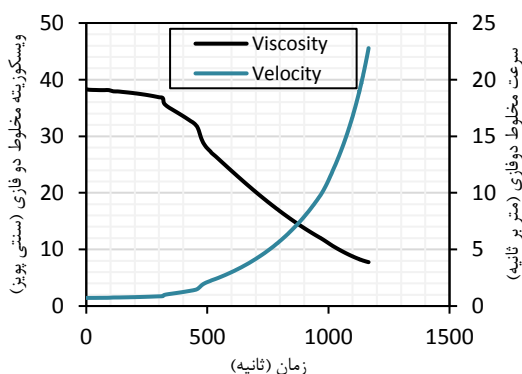
غلظت بالای ذرات جامد درون سیال سازند می‌تواند باعث بالا رفتن شدید گرانروی موثر سیال شود که این امر می‌تواند باعث کاهش سرعت سیال و حتی توقف جریان شود. تاثیر ذرات جامد معلق درون سیال بر گرانروی سیال توسط انیشتین مطالعه شد [۲۲]. فرانکل و آکریوس این مطالعه را گسترش داده و به این نتیجه رسیدند که اگر غلظت مواد جامد از مقدار بحرانی بیشتر شود، گرانروی مؤثر سیال به بی‌نهایت



شکل ۳. تغییرات فشار در قسمت حفره باز چاه بر حسب زمان در طول توسعه کیک



شکل ۴. تغییرات فشار در ته چاه بر حسب زمان در طول توسعه کیک



شکل ۵. تغییرات گرانیوی و سرعت جریان دو فازی در طول توسعه کیک

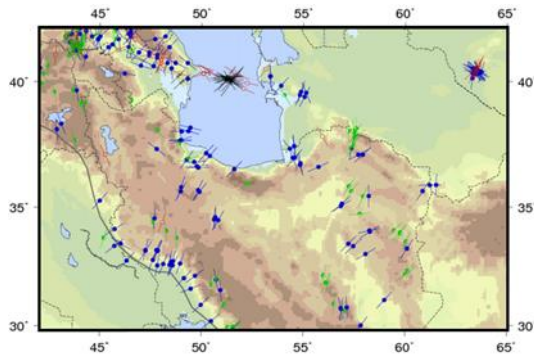
مطالعه تمرکز اصلی بر روی قسمت حفره باز انتهایی چاه است که لیتولوژی سازند، شیلی می‌باشد. اما لایه های نفوذپذیرنازک ماسه سنگی نیز در این میان وجود دارند. با در نظرگرفتن این سناریو و پارامترهای مرتبط با کیک، کیک گازی با استفاده از روش ارائه شده در قسمت ۲ شبیه سازی شده است. شکل ۳ تغییرات فشار در قسمت حفره باز، حین توسعه کیک را نشان می‌دهد. با حرکت سیال دوفازی به سمت سطح، فشار درون چاه به شدت کاهش می‌یابد. این افت فشار به قدری است که یک شکست برشی در سازند به وجود می‌آید. تغییرات فشار ته چاه در شکل ۴ نشان داده شده است.

#### جدول ۱. مشخصات چاه مورد مطالعه منبع

عمق آب	۵۲۷ متر
فاصله سطح دکل تا سطح آب	۲۲.۶ متر
عمق حفار	۶۵۰۰ متر
عمق عمودی	۵۹۳۷ متر
عمق انحراف چاه	۲۴۷۷ متر
اندازه رشته حفاری	۰.۱۲۷ متر
فشار سازند گازی	۱۰.۲ مگاپاسکال
چگالی سیال حفاری	$۱.۷۳ \left(\frac{gr}{cm^3}\right)$
خواص رئولوژیکی سیال حفاری	$\theta_{600} = ۶۵,$ $\theta_{300} = ۳۴$
وزن مخصوص گاز سازند	۰.۶۱
دمای سازند گازی	۳۹۳ کلوین
تراوایی سازند	۵۲ میلی داریسی
شعاع سازند گازی	۳۰.۴ متر
ضخامت سازند گازی	۳۰.۴۸ متر
زاویه چاه	۲۸ درجه
عمق حفار لوله جداری ۱۰ اینچ	۴۷۸۰ متر
قطر چاه در قسمت حفره باز	۰.۲۱۵۹۸ متر
طول چاه در قسمت حفره باز	۱۷۱۹ متر
چگالی متوسط سازند	$۲.۵۴ \left(\frac{gr}{cm^3}\right)$

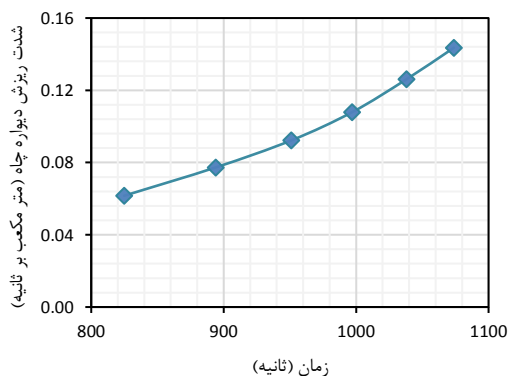
همان طور که در شکل ۴ می‌توان دید، در طول ۱۱۶۵ ثانیه، فشار جریان ته چاه از ۱۰.۲ مگاپاسکال به ۴.۲ مگاپاسکال کاهش پیدا می‌کند. قابل ذکر است که اگر جریان دوفازی توسط مکانیزم‌های طبیعی و یا مکانیکی کنترل نشود، این جریان به سطح رسیده و پس از ۱۱۶۵ ثانیه فوران اتفاق خواهد افتاد. در شکل ۵ تغییرات سرعت و گرانیوی سیال دوفازی با زمان، نشان داده شده است.

مقادیر تنش‌های اصلی افقی، از روابط (۱۲ و ۱۱) تخمین زده می‌شوند و از تست نشتی<sup>۱</sup> برای کالیبره کردن تنش اصلی کمینه استفاده می‌شود. شکل د در پیوست، پروفایل تنش‌های برجا و مقاوت فشاری تک محوره را نشان می‌دهد. ستون اول نمایانگر تغییرات چگالی بر حسب عمق است. ستون دوم پروفایل تنش‌های برجا را نشان می‌دهد که داده‌های تست نشتی با دایره‌های سیاه در کنار آن نشان داده شده‌اند. ستون سوم پروفایل مقاوت فشاری تک محوره را نشان می‌دهد. از نقشه تنش‌های برجا منطقه برای تعیین جهت تنش‌های افقی استفاده شده است شکل (۶). طبق این نقشه، آزمون تنش نرمال حداکثر،  $N32W$  می‌باشد.



شکل ۶. نقشه تنش‌های برجا [27]

پس از تعیین ویژگی‌های الاستومکانیکی سنگ و شرایط تنش‌های برجا در اطراف چاه مورد مطالعه، پایداری دیواره چاه در قسمت حفره باز حین وقوع کیک بررسی شده است.



شکل ۷. تغییرات شدت ریزش دیواره چاه در طول توسعه کیک

با گسترش کیک، سرعت جریان دوفازی افزایش می‌یابد. این درحالی است که گرانیوی مؤثر به دلیل افزایش نسبت حجمی گاز، کاهش پیدا می‌کند. تغییرات ناگهانی سرعت جریان دوفازی به دلیل تغییر نوع جریان، حین گسترش کیک است. در مرحله بعدی، خواص مکانیکی سنگ مانند تنش‌های برجا افقی بیشینه و کمینه، در قسمت حفره باز تعیین می‌شوند. خواص الاستیک دینامیکی توسط معادلات (۸ و ۹) محاسبه می‌شوند. از روش تجربی ارائه شده توسط نور و ونگ برای تبدیل ضریب یانگ دینامیک به مودول یانگ استاتیک استفاده شده است [۲۴]. در بیشتر موارد این رابطه تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی که بر روی مغزه‌ها انجام شده است، دارد [۲۵]:

$$E_{sta} = 0.41E_{dyn} - 1.06 \quad (30)$$

برای محاسبه نسبت پواسون استاتیک، از رابطه (۳۱) استفاده می‌شود:

$$V_{sta} = 0.7V_{dyn} \quad (31)$$

شکل ب در پیوست پارامترهای الاستیک بدست آمده از لاگ‌های سونیک را در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد. ستون اول زمان عبور امواج برشی و فشاری را نشان می‌دهد. ستون دوم نشان دهنده نسبت های پواسون استاتیک و دینامیک است. ستون آخر مودول یانگ استاتیک و دینامیک را نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً هم اشاره شد، جنس لایه‌ها از نوع شیل به همراه لایه‌های نازک ماسه‌ای است. لذا از رابطه ارائه شده توسط پلامب می‌توان زاویه اصطکاک داخلی را محاسبه کرد [۲۶]:

$$\varphi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{shale}) + 62.5(1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (32)$$

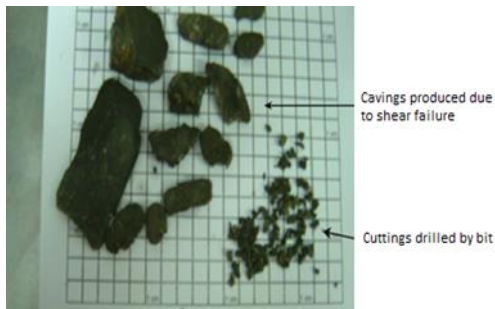
در رابطه (۳۲)،  $\varphi$  زاویه اصطکاک داخلی،  $NPHI$  تخلخل لاگ نوترون و  $V_{shale}$  حجم شیل است. مقادیر  $V_{shale}$  از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (33)$$

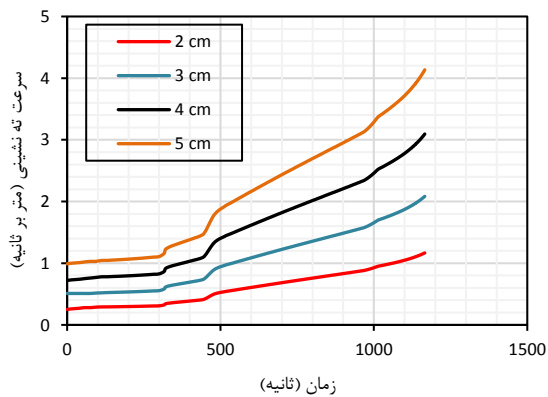
داده‌های تخلخل نوترون، گاما و زاویه داخلی تخمین زده شده، در پیوست در شکل ج نشان داده شده‌اند. همچنین

<sup>1</sup> Leak-off test





شکل ۹. اندازه متوسط خرده سنگ های ریخته شده به داخل چاه در اثر شکست برشی در طول حفاری [۱۱]

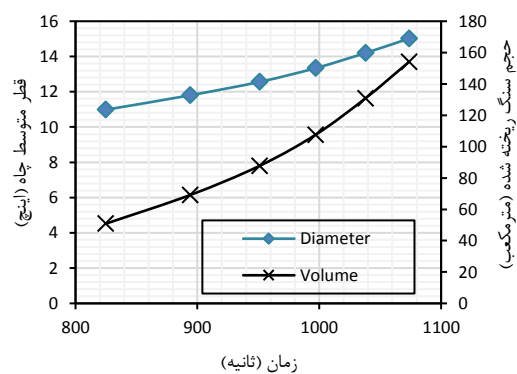


شکل ۱۰. تغییرات سرعت ته نشینی ذرات جامد در داخل جریان دو فازی

در این معادله  $v_m$  سرعت جریان دوفاز و  $v_s$  سرعت ته نشینی خرده ها است. اگر مقدار  $v_t$  منفی شود، بدین معنی است که جریان دوفاز قادر به انتقال خرده ها به سطح نبوده و خرده ها درون چاه ته نشین می شوند. در مقابل اگر  $v_t$  مثبت باشد، بدین معنی است که جریان دوفازی قادر به انتقال خرده ها به سطح بوده و خودمهاری از طریق ته نشینی، اتفاق نخواهد افتاد. شکل ۱۱ تغییرات سرعت انتقال خرده ها با زمان را نشان می دهد.

همان طور که مشخص است، جریان دوفاز خرده سنگ ها را حین کیک، به سطح انتقال داده و چاه نتوانسته است که خود را از طریق ته نشینی خرده ها مهار کند. در طرف مقابل، اگر فرض کنیم که تمامی خرده هایی که درون چاه ریزش می کنند، درون چاه ته نشین شوند، زمانی که فشار روباره حاصل از ته نشینی ذرات، با فشار لایه گازی برابر شود، چاه مسدود خواهد شد. شکل ۱۲ میزان فشار روباره ای که

شکل ۷ نشان دهنده این است که شدت ریزش دیواره حین وقوع کیک، متفاوت است و با بالا آمدن سیال دوفازی به سمت سطح، شدت آن افزایش می یابد. این امر برای آنالیز پل زدگی طبیعی، حیاتی به شمار می آید. شکل ۸ حجم خرده سنگ های تولید شده در اثر ریزش دیواره و قطر متوسط چاه را با گذشت زمان نشان می دهد. پس از گذشت ۸۲۴ ثانیه از وقوع کیک، قطر متوسط چاه ۱۱ اینچ می باشد. این مقدار با گذشت زمان افزایش پیدا کرده و پس از ۲۴۹ ثانیه، در ثانیه ۱۰۷۳، به ۱۵ اینچ می رسد.



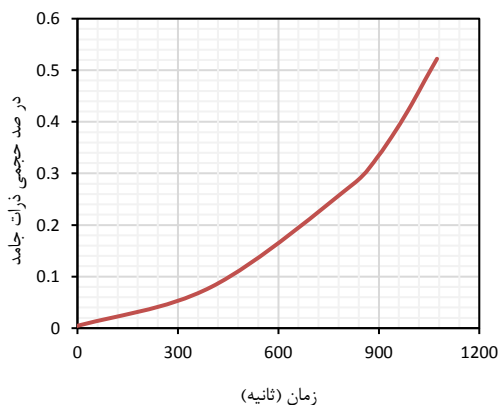
شکل ۸. مقدار حجم سنگ ریخته شده به داخل چاه و تغییرات قطر متوسط چاه بر حسب زمان

حجم خرده سنگی که به داخل چاه ریزش میکنند، از الگوی مشابهی پیروی کرده و از ۵۰.۸۲ متر مکعب در ثانیه ۸۲۴ به ۱۵۴.۳ متر مکعب در ثانیه ۱۰۷۳ می رسد. مکانیزم اول برای پل زدگی طبیعی، پلاگ کردن چاه از طریق ته نشینی خرده سنگ ها درون چاه است. از معادله (۲۸)، برای تعیین سرعت ته نشینی خرده ها در بخش سیال دوفازی استفاده می شود. ابعاد خرده های حفاری که از ریزش دیواره به وجود آمده اند، به دلیل پایین بودن هیدرواستاتیک گل، در اندازه های ارائه شده در شکل ۹ در نظر گرفته شده اند. ابعاد متوسط خرده سنگ ها، ۱\*۳\*۳ سانتی متر مکعب در نظر گرفته شده اند.

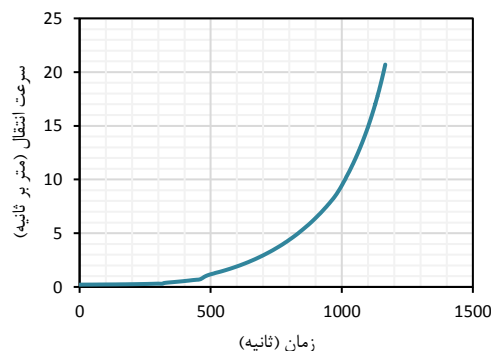
علاوه بر این، چگالی و گرانیوی سیال دوفازی، حین کیک متغییر است. لذا سرعت ته نشینی خرده ها باید در زمان های مختلف محاسبه شود. سرعت ته نشینی ذرات جامد با ابعاد مختلف، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. از معادله (۳۴) برای محاسبه سرعت انتقال خرده ها استفاده شده است:

$$v_t = v_m - v_s \quad (34)$$

افزایش یافته و پس از گذشت ۱۰۰۰ ثانیه از وقوع کیک این ضریب به صورت توانی افزایش پیدا کرده و به بینهایت میل می‌کند.

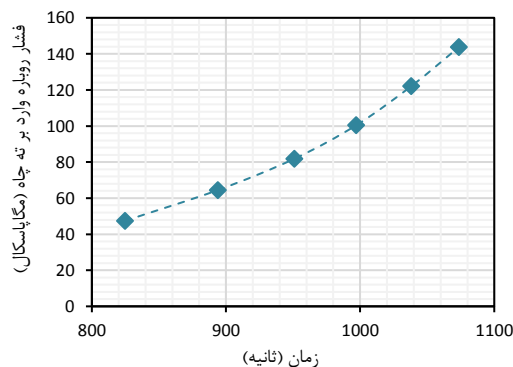
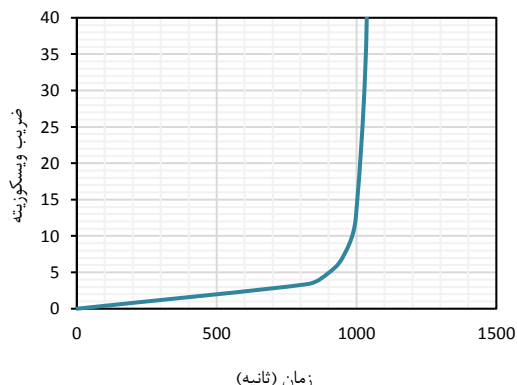


با گذشت زمان به ته چاه اعمال می‌شود را نشان می‌دهد. فشار روباره پس از گذشت ۹۹۷ ثانیه از شروع کیک، به مقداری برابر با فشار لایه گازی یعنی ۱۰۲.۵۴ مگاپاسکال می‌رسد.



شکل ۱۲. سرعت انتقال ذرات جامد توسط جریان دوفازی

شکل ۱۴. تغییرات غلظت ذرات جامد در درون جریان دوفازی در طول توسعه کیک



شکل ۱۳. فشار روباره وارد بر ته چاه در طول توسعه کیک

شکل ۱۵. تغییرات ضریب ویسکوزیته و ویسکوزیته جریان دوفازی در طول توسعه کیک

## ۸. نتیجه گیری

در این مطالعه، امکان سنجی پدیده خودمهاری چاه به عنوان یک روش کنترل فوران در یکی از چاه‌های دریای خزر بررسی شده است. از یک روش نیمه عددی شبه کوپل برای شبیه سازی کیک، پایداری دیواره و ته نشینی ذرات استفاده شد تا امکان وقوع این پدیده طبیعی در چاه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گیرد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که فشار درون چاه حین وقوع کیک به شدت کاهش می‌یابد. این افت فشار باعث تغییر تمرکز تنش‌های القایی در اطراف چاه شده و موجب وقوع ریزش دیواره سازند می‌شود. با توجه به بررسی

با در نظر گرفتن مکانیزم دوم، خودمهاری از طریق پل‌زدگی درون چاه اتفاق خواهد افتاد. برای بررسی این مکانیزم، غلظت ذرات جامد درون سیال دوفازی (مخلوط گاز و گل حفاری) باید در زمان‌های مختلف محاسبه شود. با دانستن میزان ریزش خرده سنگ‌ها و حجم درون چاه، غلظت ذرات جامد حین کیک، به دست می‌آید. شکل ۱۳ غلظت خرده‌ها با زمان را درون سیال دوفازی نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج، پس از ۱۰۷۳ ثانیه، غلظت خرده‌ها به مقدار ۰.۵ می‌رسد که برابر با غلظت بحرانی برای ذرات زاویه دار است. لازم به ذکر است که در این زمان گرانروی موثر سیال به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که باعث توقف جریان می‌شود. به علاوه، این پدیده با ضریب گرانروی نیز قابل توصیف است. تغییرات ضریب گرانروی حین کیک، در شکل ۱۴، نشان داده شده است. این ضریب ابتدا به صورت تدریجی

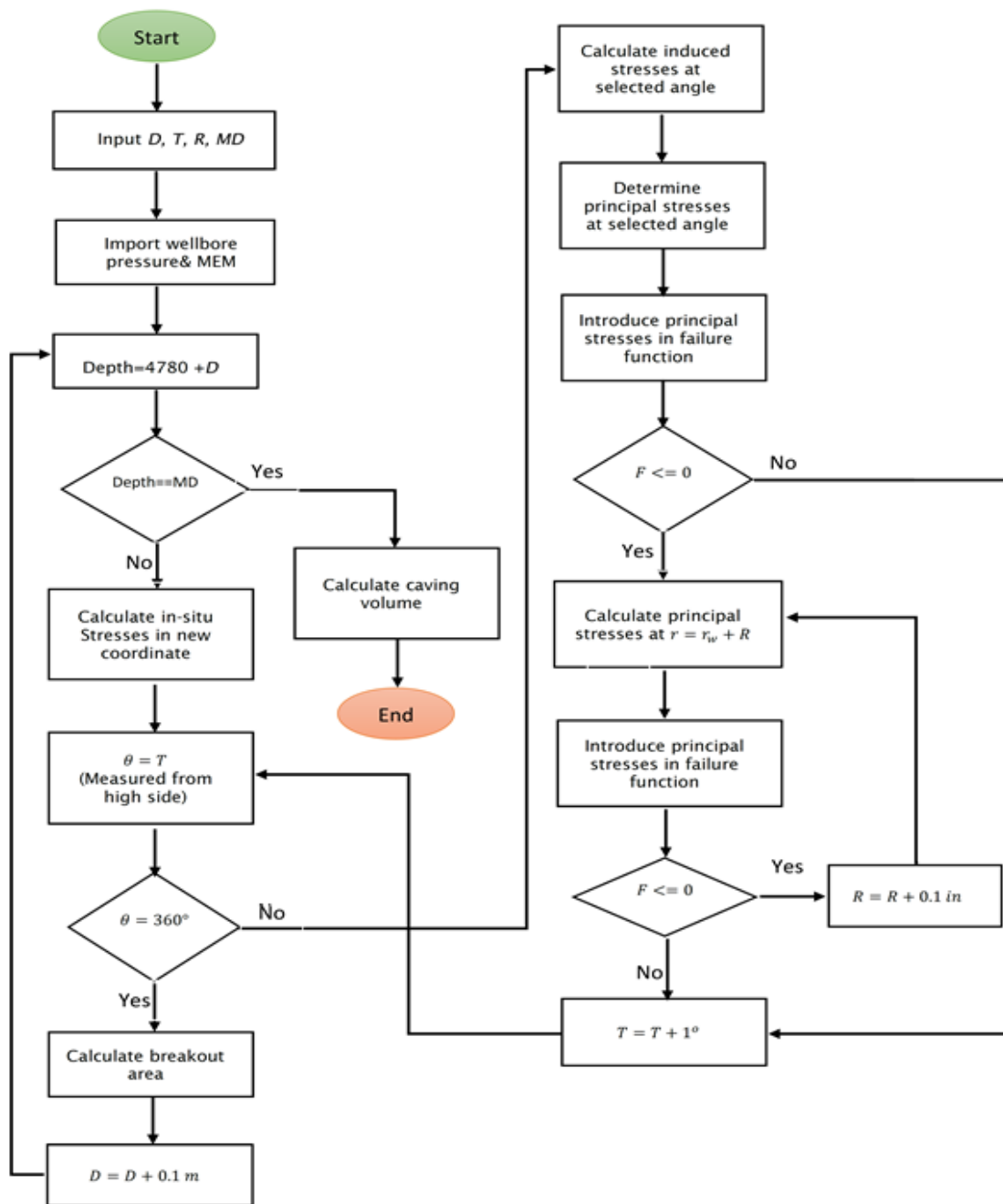
غلظت بحرانی مواد جامد	-	$\phi_c$
سرعت ته نشینی مواد جامد	$\frac{m}{s}$	$V_s$
میزان کرویت ذرات انسجام سنگ	-	$\omega$
ضریب انحراف گاز دبی	$MPa$	$c$
شعاع چاه	-	$z$
شعاع مخزن تراوایی	$\frac{Mscf}{D}$	$q$
کسر حجمی گاز	$m$	$r_w$
شتاب گرانش	$ft$	$r_e$
قطر هیدرولیک	$md$	$k$
سرعت ظاهری گاز	-	$f_g$
سرعت لغزشی گاز	$\frac{m}{s^2}$	$g$
ضریب گرانشی	$m$	$d_H$
	$\frac{m}{s}$	$V_{sg}$
	$\frac{m}{s}$	$V_{\infty}$
	-	$n$

های انجام شده، خرده سنگ هایی که از دیواره چاه جدا می شوند، در طول توسعه کیک توسط سیال دوفازی (مخلوط گاز و گل حفاری) به سطح حمل شده و احتمال اینکه خودمهاری چاه از طریق ته نشینی اتفاق بیفتد، بسیار کم است. از طرف دیگر، آنالیزهای پل زدگی طبیعی نشان می دهند که غلظت خرده ها درون سیال دوفازی در طول پیشروی کیک به سطح افزایش یافته و پس از گذشت زمان مشخصی از وقوع کیک به حد بحرانی می رسد. با رسیدن غلظت خرده ها به حد بحرانی، گرانشی مؤثر سیال دوفازی به بی نهایت میل می کند و جریان سیال متوقف می شود. با توجه به نتایج، خودمهاری بیشتر در سازندهای سست اتفاق می افتد و کیک قبل از این که به فوران تبدیل شود، مهار می شود. باید خاطر نشان کرد که عوامل مختلفی می توانند باعث وجود آمدن کیک شوند. با توجه به شرایط کیک و نحوه ی به وجود آمدن آن، نتایج آنالیزهای خودمهاری می توانند متفاوت باشند. لذا این پدیده نمی تواند به عنوان یک روش اصلی برای کنترل فوران به حساب آورد. اما می توان از این روش، به عنوان یک روش ثالثیه یا کمکی برای نقشه جامع کنترل فوران استفاده کرد.

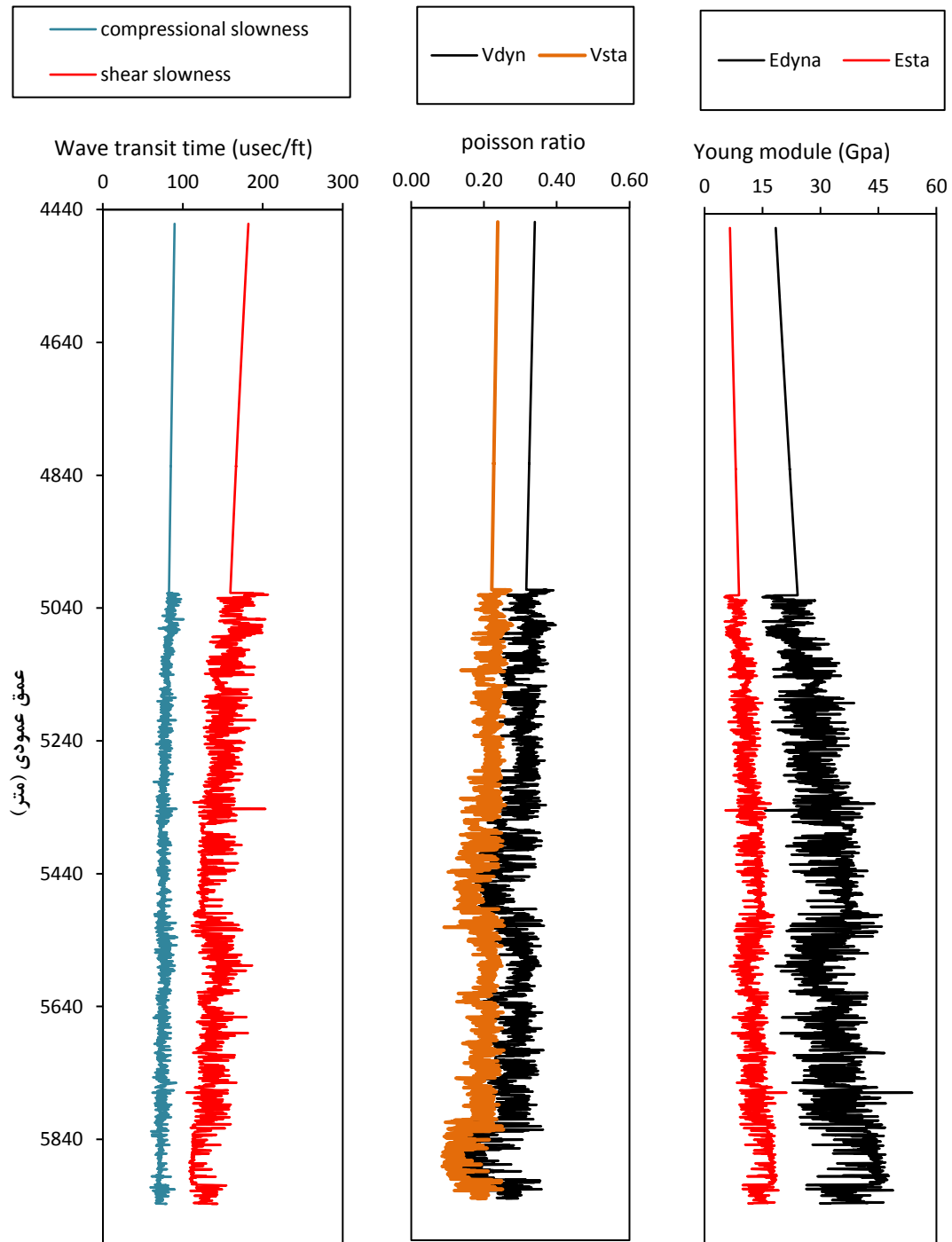
### ۹. سیاهه ی نمادها

نماد	واحد	شرح
$\sigma_v$	$MPa$	تنش روباره
$\sigma_h$	$MPa$	تنش اصلی افقی
$\sigma_H$	$MPa$	کمینه تنش اصلی افقی
$\tau$	$MPa$	بیشینه تنش برشی
$\epsilon$	-	کرنش
$p_o$	$MPa$	فشارمنفدی
$\Delta t_p$	$\frac{\mu s}{m}$	زمان عبور موج فشاری
$\Delta t_s$	$\frac{\mu s}{m}$	زمان عبور موج برشی
$F$	$Mpa$	تابع شکست
$E$	$Mpa$	مدول یانگ
$\theta$	-	نسبت پواسون
$\varphi$	degree	ضریب اصطکاک داخلی
$\rho$	$\frac{Kg}{m^3}$	چگالی
$\mu$	cp	گرانروی

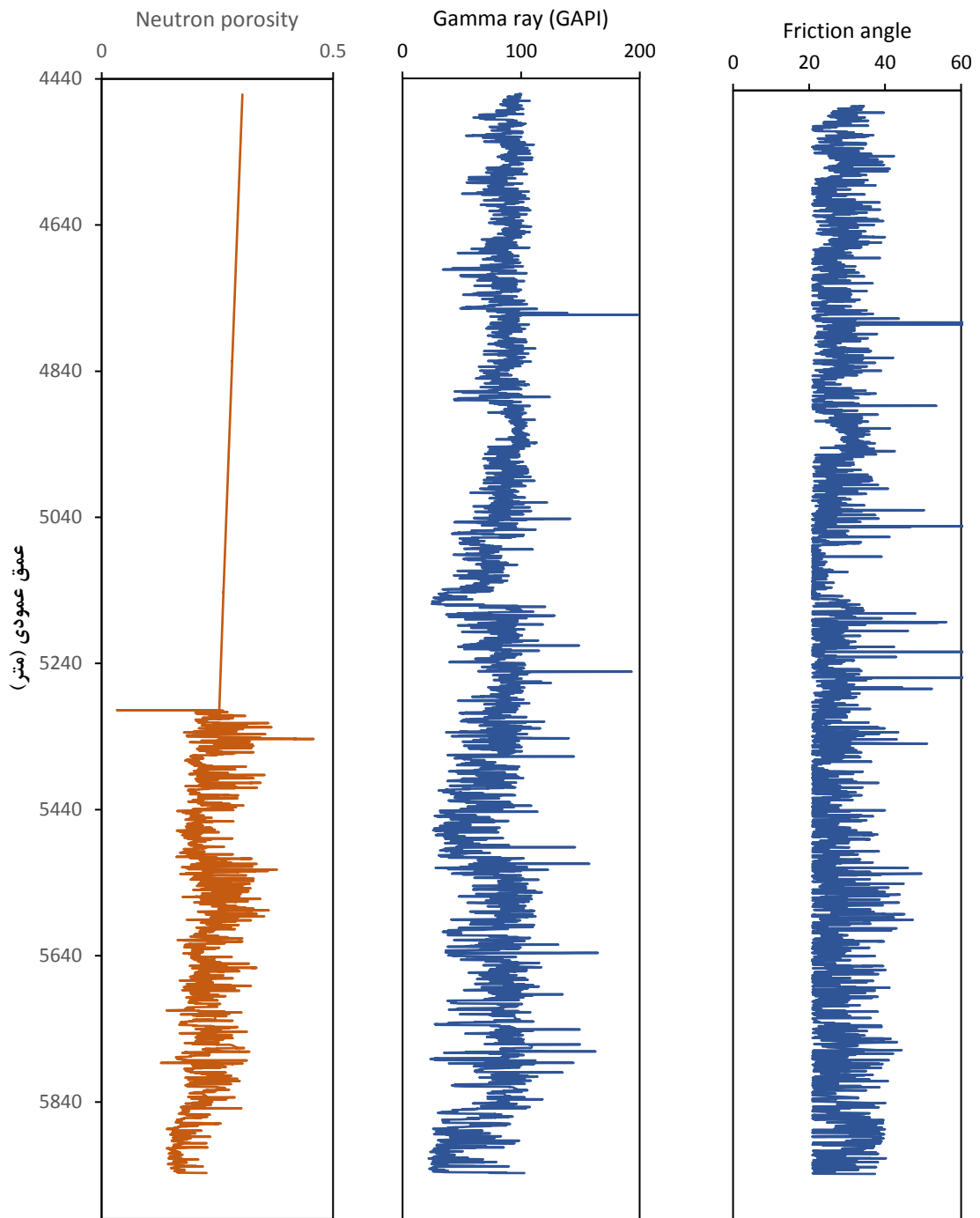
۱۰. پیوست‌ها



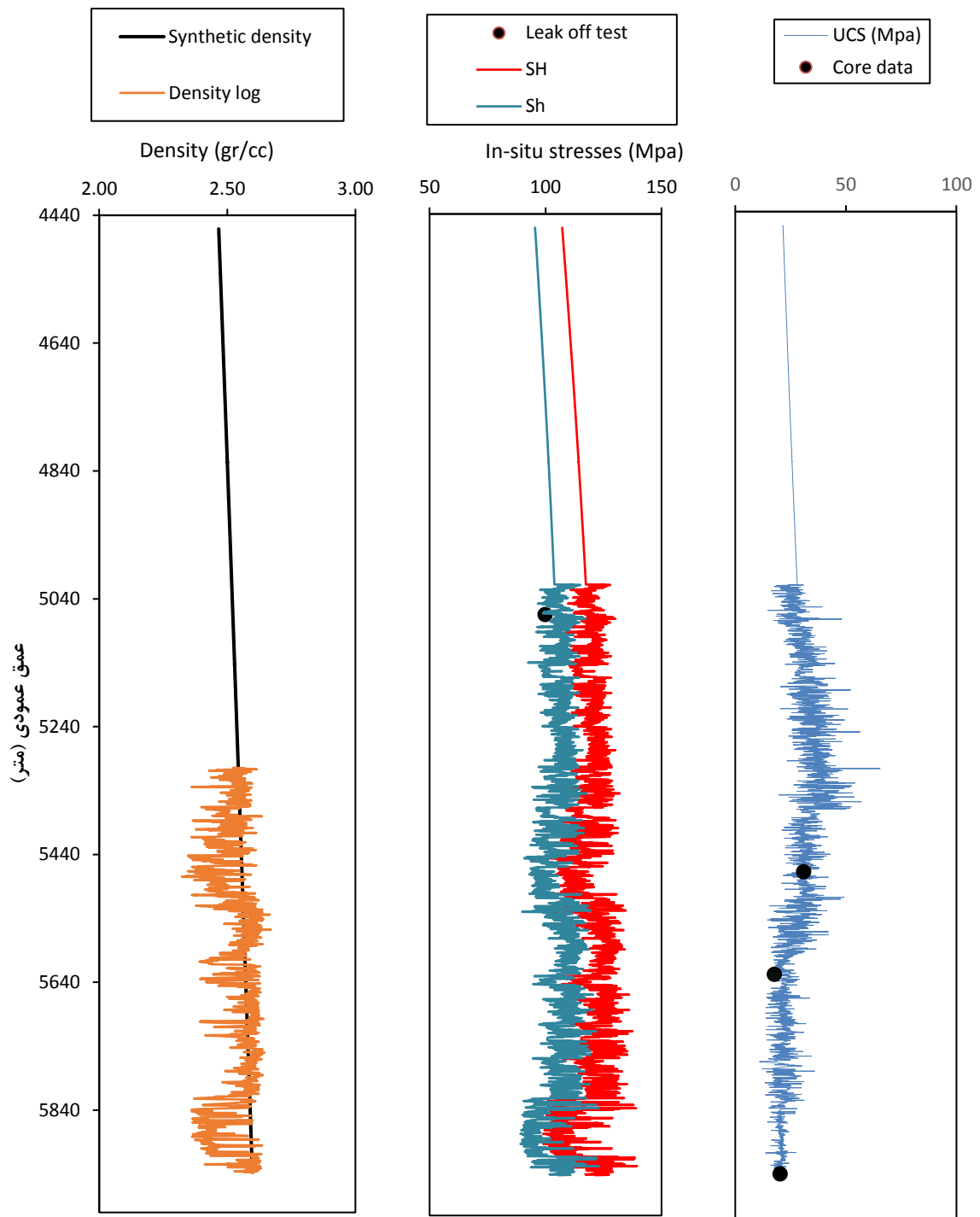
شکل الف. فرایند محاسبه حجم ریزش چاه در طول پیشروی سیال سازند (کیک) به سطح



شکل ب. داده های مربوط به لاگ صوتی و خواص الاستیک سنگ



شکل ج. داده های مربوط به لاگ تخلخل نوترونی، گاما و زاویه اصطکاک داخلی



شکل د. داده های مربوط به لاگ دانسیته، تنش های برجا و مقاومت فشاری تک محوره

[11] Willson, S.M. A (2012). *Wellbore Stability Approach For Self-Killing Blowout Assessment*. in *SPE Deepwater Drilling and Completions Conference*. Society of Petroleum Engineers.

[12] Hasan, A.R. and C.S. Kabir. (1988). *Predicting multiphase flow behavior in a deviated well*. SPE Production Engineering. **3**(04): p. 474-482.

[13] Hasan, A. and C. Kabir. (1992). *Two-phase flow in vertical and inclined annuli*. International Journal of Multiphase Flow. **18**(2): p. 279-293.

[14] Lyons, W. (2009). *Working guide to petroleum and natural gas production engineering*. Gulf Professional Publishing.

[15] Zigrang, D. and N. Sylvester. (1982) *Explicit approximations to the solution of Colebrook's friction factor equation*. AIChE Journal. **28**(3): p. 514-515.

[16] Rasouli, V., Z.J. Pallikathakathil, and E. Mawuli. (2011). *The influence of perturbed stresses near faults on drilling strategy: a case study in Blacktip field, North Australia*. Journal of Petroleum Science and Engineering. **76**(1): p. 37-50.

[17] Maleki, S., et al. (2014) *Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weigh window in drilling practice*. Earth-Science Reviews. **136**: p. 36-58.

[18] Gholami, R., et al. (2014). *Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. **6**(1): p. 13-25.

[19] Bradley, W. (1979). *Failure of inclined boreholes*. ASME J. Energy Resour. Technol. **101**(4) p. 232-239.

[20] Fjar, E., et al. (2008). *Petroleum related rock mechanics*. Vol. 53. Elsevier.

[21] Goodman, R.E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. Vol. 2: Wiley New York.

## ۱۱. مراجع

[1] Nesheli, B.A. (2010). *Rock Mechanics Aspects of Blowout Self-containment*. Texas A & M University.

[2] Skalle, P., H. Jinjun, and A. Podio. (1999). *Killing methods and consequences of 1120 gulf coast blowouts during 1960-1996*. in *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers.

[3] Al-Qattan, F. and M. Alam. (2014). *Challenges of Drilling HPHT High H2S Content Well Focusing Effective Well Control Measures with Consideration to SimOps*. in *IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference*.

[4] Babalola, S.D., (2015) *Effect of Mud Cake and Temperature on Wellbore Collapse Initiation Pressure Using Different Failure Criteria*.

[5] Willson, S., A. Nagoo, and M. Sharma. (2013). *Analysis of potential bridging scenarios during blowout events*. in *SPE/IADC Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers.

[6] Adams, N. and L. Kuhlman. (1990). *Case history analyses of shallow gas blowouts*. in *SPE/IADC Drilling Conference*. Society of Petroleum Engineers.

[7] Nesheli, B.A. (2006). *Rock Mechanics Aspects of Blowout Self-containment*. Texas A&M University.

[8] Frankel, N. and A. Acrivos. (1967). *On the viscosity of a concentrated suspension of solid spheres*. Chemical Engineering Science. **22**(6): p. 847-853.

[9] Eaton, L.F. (1999). *Drilling through deepwater shallow water flow zones at Ursa*. in *SPE/IADC drilling conference*. Society of Petroleum Engineers.

[10] Akbarnejad-Nesheli, B. and J.J. Schubert. (2006). *Effect of Water Depth on Bridging Tendencies in Ultradeepwater Blowouts in Gulf of Mexico*. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.



*Model (MEM): an effective tool for borehole stability analysis and managed pressure drilling (Case Study).* in *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. Society of Petroleum Engineers.

[26] Plumb, R. (1994). *Influence of composition and texture on the failure properties of clastic rocks.* in *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*. Society of Petroleum Engineers.

[27] Heidbach, O., et al., *The world stress map database release 2008*, doi: 10.1594/GFZ. WSM. Rel2008, 2008.

[22] Einstein, A. (1906). *Effect of suspended rigid spheres on viscosity.* Ann. Phys. **19**: p. 289-306.

[23] Senapati, P.K., D. Panda, and A. Parida (2009). *Predicting viscosity of limestone–water slurry.* Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. **8**(03): p. 203.

[24] Nur, A. and Z. Wang. (1989). *Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks: recent developments.* Vol. 10: Soc of Exploration Geophysicists.

[25] Afsari, M., et al. (2009). *Mechanical Earth*