

# بررسی عوامل موثر در نرخ نفوذ حفاری و بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری یکی از چاه‌های جنوب ایران جهت دستیابی به بیشینه نرخ نفوذ

رحیم عباسی‌پور آتشگاه، مدیریت برنامه‌ریزی تلفیقی شرکت ملی نفت ایران<sup>۱</sup>

## چکیده

سرعت یا نرخ نفوذ حفاری (ROP) یکی از پارامترهای مهم در راستای دستیابی بهینه به منابع هیدروکربوری است که بهینه‌سازی آن باعث افزایش راندمان عملیات حفاری و در نتیجه کاهش هزینه و زمان عملیات می‌شود. لذا در این مقاله ابتدا عوامل اساسی موثر در نرخ نفوذ حفاری معرفی می‌گردد. این عوامل شامل نوع مته، مشخصه‌های ذاتی سازند، خصوصیات سیال حفاری، شرایط عملیاتی کارکرد مته، ساییدگی دندان مته و در نهایت هیدرولیک مته می‌باشد.

با توجه به اینکه نرخ نفوذ حفاری به پارامترهای مکانیکی و هیدرولیکی زیادی بستگی دارد و همچنین با عنایت به اهمیت زیاد طراحی بهینه هیدرولیک حفاری در دستیابی به بیشینه سرعت حفاری، بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری حفره آخر (۸ ۱/۲") یکی از چاه‌های میدین جنوب ایران در نرم‌افزار Drilling Office انجام گردیده است.

ابتدا با استفاده از اطلاعات موجود در برنامه حفاری چاه مورد مطالعه، چاه مزبور در نرم‌افزار Drilling Office شبیه‌سازی گردید. در ادامه کار به منظور بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری و در نتیجه بهبود راندمان و نرخ نفوذ، پارامترهای دبی جریان سیال (GPM)، وزن گل (MW)، ویسکوزیته پلاستیکی گل (PV)، نقطه واروی گل (YP) و همچنین سطح مقطع نازل‌های مته (TFA) به عنوان پارامترهای ورودی و تابع هدف (خروجی) مدل، پارامتر HSI (Hydraulic Power Per Square Inch) در نظر گرفته شد که بر اساس نتایج آنالیز حساسیت در نرم‌افزار بیشینه گردید. البته در این مطالعه محدودیت مساله، میزان فشار مجاز برای تجهیزات سطحی و پمپ‌ها بوده که می‌بایست رعایت شود. نتایج مطالعه نشان می‌دهد با بکارگیری پارامترهای هیدرولیکی بهینه بدست آمده برای چاه‌های میدان مورد مطالعه می‌توان نرخ نفوذ حفاری در حفره پایانی این چاه‌ها را بیشینه نمود.

**کلمات کلیدی:** نرخ نفوذ حفاری، بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری، نرم‌افزار Drilling Office، پارامتر HSI

<sup>۱</sup> abbasspour@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

پرهزینه‌ترین فاز توسعه یک میدان نفتی، فاز عملیات حفاری آن میدان است. اگر چه هزینه‌های عملیات حفاری تا حد زیادی به محل چاه، عمق چاه، توسعه‌ای یا اکتشافی بودن چاه بستگی دارد اما پس از حفاری چاه‌های اکتشافی و توصیفی و جمع‌آوری اطلاعات لازم، به حداقل رساندن هزینه‌های حفاری در طراحی بهینه چاه‌ها باید به عنوان یک اصل در نظر گرفته شود. فلسفه بهینه‌سازی، استفاده از وقایع و داده‌های چاه‌های قبلی برای برآورد و به کارگیری تکنیک‌هایی در حفاری چاه‌های بعدی است؛ به گونه‌ای که هر چه زودتر حداقل هزینه‌ی حفاری یک چاه در آن میدان میسر گردد. [۱]

به زبان ساده می‌توان گفت هر زمان که هزینه‌های حفاری کاهش یابد بهینه‌سازی انجام شده است. بدین منظور همیشه باید دو راهکار زیر همزمان باهم در نظر گرفته شود:

۱- به حداقل رساندن هزینه‌ی حفاری به ازای هر متر.

۲- به حداقل رساندن مواجهه با مشکلات در حین و پس از حفاری.

مشکلات حفاری که در حین یا پس از حفاری یک حفره ایجاد می‌شوند باعث اتلاف وقت و در نتیجه هدر رفت هزینه‌ها خواهند شد. بنابراین باید با اجتناب از به کارگیری پارامترهای ناصحیح تا حد ممکن از ایجاد مشکلات جلوگیری نمود. [۲]

بهینه‌سازی حفاری از اوایل دهه ۱۹۳۰ مورد مطالعه قرار گرفت. پس از اینکه حفاری از حالت سنتی خود فاصله گرفت و با ایجاد سیستم‌های اتوماتیک حفاری، سیستم‌های تصفیه گل و سیستم‌های کامپیوتری کنترل و ثبت داده‌ها قدم‌هایی به سوی دانش‌بنیان شدن برداشت، در اوایل دهه ۱۹۵۰ تلاش‌ها برای بهینه‌سازی و افزایش سرعت حفاری آغاز شد. [۳]

در دهه ۱۹۹۰، رویکردهای طراحی متفاوتی پدید آمدند. امکان پایش پارامترهای حفاری در نقاطی دورتر از محل چاه امکان‌پذیر شد. پارامترهای حفاری به سادگی جمع‌آوری، ذخیره و منتقل شده و سیستم‌های اتوماتیک ثبت اطلاعات و ارتباط آن‌ها با سرویس‌های کنترل نرم‌افزاری و بهینه‌سازی لحظه‌ای و همزمان حفاری شروع به کار کردند. [۴]

در سال ۱۹۹۱، Maidla and Ohara در ابتدا با استفاده از اطلاعات حفاری چاه‌های قبلی، ضرایب لازم مدل Bourgoyne – yong را بدست آورده و به وسیله این مدل به پیش‌بینی سرعت حفاری در آن میدان پرداختند و نمودارهایی را جهت بهینه‌سازی هزینه‌ها در آن میدان ارائه کردند. [۵]

در سال ۱۹۹۳، Hareland and Hoberock با در نظر گرفتن تاثیر عواملی همچون Chip hold down effect و « اثر ساییدگی دندانته مته » مدل حفاری اصلاح شده‌ی Warren را ارائه نمودند. [۶]

در سال ۱۹۹۸، Samuel and Miska بهینه‌سازی حفاری با موتور (PDM) را مورد بررسی قرار دادند. [۷]

در سال ۱۹۹۹، Pereira پارامترهای بهینه‌سازی را در چاه‌های افقی تعیین و تاثیر آن را روی کاهش هزینه‌ها بررسی کردند. [۸]

## ۲- عوامل موثر بر سرعت حفاری

عوامل موثر بر سرعت حفاری را می‌توان به دو دسته قابل کنترل<sup>۲</sup> و محیطی<sup>۳</sup> (غیر قابل کنترل) تقسیم بندی کرد. عوامل قابل کنترل (مانند WOB و PRM) عواملی هستند که می‌توان آن‌ها را به طور لحظه‌ای تغییر داد. از سوی دیگر عواملی همچون خصوصیات سازند که خود تعیین‌کننده پارامترهای دیگری هستند را عوامل محیطی می‌نامند.

مهمترین عوامل موثر بر سرعت حفاری عبارتند از [۹]:

۱- نوع مته

۲- مشخصه‌های ذاتی سازند

۳- خصوصیات سیال حفاری

۴- شرایط عملیاتی کارکرد مته

۵- ساییدگی دندانته مته

۶- هیدرولیک مته

اگر چه تعدادی از این عوامل خود بستگی نزدیکی به سایر عوامل دارند اما آزمایشات زیادی جهت تعیین اثر هر یک از این عوامل با ثابت نگه داشتن سایر عوامل انجام گرفته‌اند که در ادامه هر یک از این عوامل بررسی می‌گردد.

---

<sup>۲</sup> . Controllable

<sup>۳</sup> . Environmental

## ۲-۱- نوع مته

انتخاب صحیح نوع مته، برای حفاری یک حفره، تاثیر مستقیمی روی سرعت حفاری خواهد داشت. فرآیند انتخاب مته<sup>۴</sup> با بررسی و مطالعه‌ی دقیق رکوردهای مته<sup>۵</sup> از اطلاعات چاه‌های مجاور<sup>۶</sup> آغاز می‌گردد. بهترین و بدترین کارآیی، ارزیابی «نمره دهی فرسودگی مته‌ها<sup>۷</sup>» در سازندهای مشابه باید مورد تحلیل قرار گرفته و از آن‌ها جهت انتخاب مته و همچنین انتخاب بهترین کارآیی آن، استفاده گردد. در این بررسی‌ها باید به جزئیاتی مانند: خرابی پیش از موقع مته، دلیل بیرون کشیدن مته از چاه و همچنین خصوصیات فرسودگی دندان مته توجه ویژه‌ای شود. به عنوان مثال اگر نوع فرسودگی دندان مته، از نوع شکستگی باشد، نشان دهنده آن است که برای حفاری این سازند باید از مته‌های ویژه سازندهای سخت‌تر استفاده شود. [۱۰]

امروزه گستره وسیعی از انواع مته توسط سازندگان برای استفاده در شرایط مختلف به بازار عرضه می‌شود. بنابراین لازمه یک انتخاب صحیح، شناخت کامل از انواع مته و آگاهی از تفاوت‌های ناشی از طراحی مختلف مته‌ها می‌باشد.

در یک طبقه بندی کلی مته‌ها برحسب آنکه دارای اجزا متحرک یا ثابت باشند به دو گروه ۱- کاج غلتان<sup>۸</sup> و ۲- تیغه ثابت<sup>۹</sup> طبقه‌بندی می‌شوند. البته نوع دیگری از مته تیغه ثابت به نام Drag-Bits که در گذشته مورد استفاده قرار می‌گرفته، امروز منسوخ شده است.

لازم به ذکر است معیارهای انتخاب صحیح مته را بر اساس سه نوع اطلاعات دسته‌بندی می‌کنند [۱۰]:

۱- سیال حفاری

۲- نوع حفاری (مستقیم یا جهت دار)

۳- سنگ شناسی سازند

## ۲-۲- مشخصه‌های ذاتی سازند

هنگامی که وزن لوله‌های وزنه بر روی مته اعمال می‌شود باعث اعمال نیرو به دندان‌های مته جهت فرو رفتن دندان در سازند می‌شود. این عمل، فشار تماس بین سطح زیرین را تا آنجایی بالا می‌برد که از مقاومت سنگ

---

<sup>4</sup> . Bit selection

<sup>5</sup> . Bit records

<sup>6</sup> . Offset wells

<sup>7</sup> . Dull bit grading

<sup>8</sup> . Roller cone bits

<sup>9</sup> . Fixed cutter

تجاوز کرده و سنگ را خرد کرده و در آن فرو می‌رود. در این حالت قطعات خرد شده بسیار ریزی در زیر دندان جمع می‌شوند. با ادامه یافتن افزایش فشار اعمال شده بر روی دندان، این قطعات خرد شده فشرده‌تر می‌گردند تا جایی که تنش برشی ( $\tau$ ) از مقاومت برشی سنگ فراتر می‌رود و یک شکستگی (ترک) در سنگ شکل می‌گیرد. این شکستگی هنگامی رخ می‌دهد که فشار مابین دندان و سنگ از یک مقدار حد آستانه<sup>۱۰</sup> عبور کند. حرکت دندان مته، تمام حجم خرد شده در بالای این شکستگی را از سنگ جدا کرده و این پدیده مدام تکرار می‌گردد. مقدار حجمی که در این پدیده از سنگ شکسته و جدا می‌شود به مقاومت برشی و استحکام تراکمی<sup>۱۱</sup> سنگ بستگی دارد. [۱۱]

ترکیب کانی‌های سازنده سنگ نیز بر روی سرعت حفاری تاثیر دارد. سنگ‌های دربردارنده کانی‌های ساینده و سخت باعث کند شدن سریع‌تر دندان‌های مته می‌شوند. همچنین سنگ‌های دربردارنده کانی‌های رس چسبنده باعث «تویی شدن»<sup>۱۲</sup> مته و در نتیجه کاهش سرعت حفاری خواهند شد.

## ۲-۳- خصوصیات سیال حفاری

سیال حفاری وظایف متعددی را در حفاری سازند بعهده دارد که تعدادی از آنها در جهت افزایش سرعت حفاری تاثیر مثبت و تعدادی از آنها ناگزیر اثر منفی دارند. انتقال کنده و تمیزسازی چاه، پایدار نگه داشتن دیواره چاه، انتقال انرژی هیدرولیک و خنک سازی مته و روان سازی حرکت دورانی از جمله کارکردهای مثبت سیال حفاری هستند که باعث افزایش سرعت حفاری خواهند شد از سوی دیگر عوامل دیگری همچون ایجاد فشار فراتعادلی سیال حفاری باعث کاهش سرعت حفاری می‌شود. [۱۲]

خصوصیاتی از سیال حفاری که بر سرعت حفاری تاثیر دارند عبارتند از: ۱- چگالی (وزن مخصوص) ۲- خواص رئولوژی ۳- خاصیت تراوایی<sup>۱۳</sup> ۴- اندازه و درصد حجمی ذرات ۵- ترکیب شیمیایی. [۹]

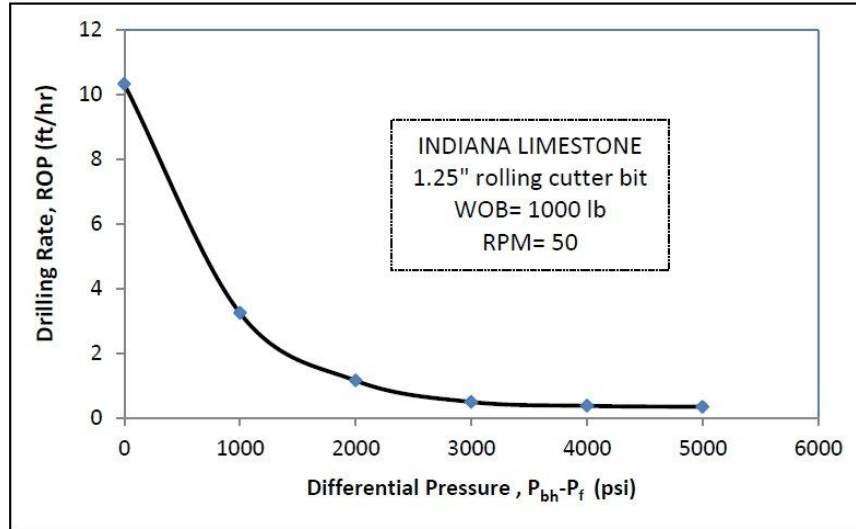
از آنجایی که با افزایش وزن گل، اختلاف فشار هیدرولیک ستون سیال و فشار سیال سازند (فشار فراتعادلی) بیشتر می‌شود این افزایش فشار باعث کوچکتر شدن حفره ایجاد شده توسط دندان مته کاج غلتان در سنگ شده و در نتیجه باعث کاهش سرعت حفاری خواهد شد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است با افزایش فشار فراتعادلی، سرعت حفاری کاهش می‌یابد و این روند کاهش در مقادیر پایین اختلاف فشار، شدت بیشتری از خود نشان می‌دهد. [۱۳]

<sup>10</sup> . Threshold Value

<sup>11</sup> . Compressive Strength

<sup>12</sup> . Balled-Up

<sup>13</sup> . Filtration



شکل ۱- اثر افزایش فشار فرا تعادلی روی سرعت حفاری در یکی از میادین هیدروکربوری [۱۳]

خواص رئولوژی مناسب گل می‌تواند در مهیا نمودن هیدرولیک مطلوب و تمیزسازی مناسب چاه تاثیر مستقیمی داشته و باعث افزایش سرعت حفاری شود. همچنین اگر مقدار تراوایی گل در حد مطلوب باشد سرعت متعادل شدن فشار مابین کنده و سنگ افزایش می‌یابد و بدین صورت سرعت حفاری افزایش خواهد یافت.

## ۲-۴- شرایط عملیاتی کارکرد مته

پارامترهای کارکرد مته، مهمترین فاکتورهایی هستند که مستقیماً بر سرعت حفاری اثر می‌گذارند. این پارامترها برای هر مته در حفاری هر سازند باید به گونه‌ای تغییر یابند که بهترین سرعت حفاری حاصل گردد. از جمله مهمترین این متغیرها وزن روی مته (WOB) و سرعت دورانی (RPM) هستند. البته هیدرولیک مته نیز از اهمیت خاصی برخوردار است اما هیدرولیک باید قبل از راندن مته درون چاه به نحو مناسب طراحی و اجرا گردد، تحقیقات زیادی برای بهینه کردن سرعت حفاری با استفاده از تغییر WOB و RPM انجام گرفته که مهمترین نتایج آن به شرح زیر است [۱۴]:

۱- سازند نرم: افزایش PRM (با اندکی اثر بر روی سرعت ساییدگی دندانها) سرعت حفاری را افزایش می‌دهد. WOB نسبتاً کم توصیه می‌شود.

۲- سازند متوسط: افزایش PRM به اندازه تاثیر در سازند نرم، باعث افزایش سرعت نخواهد شد بلکه یک میزان متوسط از WOB به همراه اندازه متوسطی از PRM سرعت حفاری را افزایش و مقدار فرسودگی مته را

کاهش خواهد داد. همچنان که ساییدگی دندان‌ها متعادل می‌شود. WOB هم برای ثابت نگه داشتن سرعت، باید زیاد گردد.

۳- سازند سخت: افزایش WOB از افزایش PRM تاثیرگذارتر است. WOB نسبتاً بالا به همراه حداقل PRM معمولاً یک سرعت حفاری بهینه را در بر خواهد داشت.

## ۲-۵- ساییدگی دندان‌ها

دندان‌های متعادل یا زود ساییده می‌شوند و در نتیجه سرعت حفاری کم خواهد شد. گرچه در اغلب موارد فرسایش در یاتاقان‌ها عامل اصلی پایان کار یک متعادل کاج غلتان است اما یک ارزیابی دقیق از راندمان متعادل می‌تواند زمان دقیق پایان رفتن عمر مفید و بهینه متعادل را مشخص کند. [۱۵]

نوع ساییدگی در متعادل‌های مختلف، متفاوت است. در متعادل‌های کاج غلتان دندان‌های فرسایش دندان‌ها از نوع ساییدگی<sup>۱۴</sup> و گاهی لبه شکستگی<sup>۱۵</sup> می‌باشد. در مقابل متعادل‌های کاج غلتان دکمه‌ای کمتر در اثر سایش فرسوده می‌شوند و غالباً دندان‌های آن دچار شکستگی می‌شوند. گاهی نیز دندان‌ها به طور کامل از مقر خود بیرون آمده و از متعادل جدا می‌شود. همچنین در متعادل‌های PDC همه نوع فرسایش دندان‌ها (ساییدگی، شکستگی و جدا شدن) دیده می‌شود. [۱۶]

## ۲-۶- هیدرولیک متعادل

هدف از تمام برنامه‌های هیدرولیک، بهینه‌سازی فشار متعادل است به گونه‌ای که حداکثر تمیزسازی چاه حاصل گردد. بعد از آن که احساس نیاز به تمیزسازی بهتر ته چاه در چاه‌های عمیق بیشتر احساس شد در سال ۱۹۴۸ برای اولین بار جت نازل به صنعت حفاری معرفی گردید. قبل از آن برای عبور سیال از درون متعادل، سوراخی در مرکز متعادل قرار داشت. امروز در تمام متعادل‌های مقررهای جهت نصب جت نازل تعبیه شده است. (در متعادل‌های کاج غلتان سه یا چهار عدد و در متعادل‌های PDC شش یا نه عدد و یا بیشتر). هدف اصلی استفاده از جت نازل‌ها، افزایش سرعت سیال خارج شونده از متعادل است که در واقع در بهینه‌سازی هیدرولیک متعادل نقش مهمی دارد. [۱۷]

در مورد آنکه کدام پارامتر هیدرولیکی بیشترین تاثیر را بر روی سرعت حفاری خواهد داشت دیدگاه‌های مختلفی وجود دارد آنچه مسلم است هر چه انتقال‌کننده‌ها از زیر متعادل و تمیزسازی ته چاه بهتر صورت گیرد سرعت

<sup>14</sup> . Abrasion

<sup>15</sup> . Chipping

حفاری افزایش خواهد یافت. در مورد سازندهای نرم، سازند ممکن است توسط عمل جت شدن سیال از جت نازل مته حفر گردد و سرعت حفاری به دلیل تجمع کنده‌ها در فضای حلقوی محدود گردد. در مقابل در سازندهای سخت اگر ته چاه به خوبی تمیز شود عامل محدود کننده سرعت WOB خواهد بود. معمولاً آنچه در هیدرولیک مته محدود کننده است؛ تجهیزات سطحی است. حداکثر فشار مجاز تجهیزات و همچنین حداکثر توان هیدرولیکی که پمپ‌های گل می‌توانند ایجاد کنند مهمترین عوامل محدود کننده هیدرولیک مته هستند. [۱۸]

با توجه به اهمیت و تاثیر قابل توجه بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری در دستیابی به نرخ نفوذ و سرعت حفاری بیشینه در این بخش از مقاله بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری حفره آخر یکی از چاه‌های میدانی جنوب ایران که مربوط به عملیات حفاری در مخزن می‌باشد، انجام می‌شود.

### ۳- شبیه‌سازی چاه مورد مطالعه

برای انجام عملیات شبیه‌سازی در نرم‌افزار Drilling Office ابتدا اطلاعات میدان مورد مطالعه و سپس دستگاه حفاری و در نهایت مشخصات و برنامه چاه مورد مطالعه وارد نرم‌افزار می‌گردد. بنابراین پس از تعریف به ترتیب میدان، دستگاه حفاری، چاه و Borehole و نقطه هدف در نرم‌افزار، در نهایت اطلاعات مربوط به هر حفره از چاه وارد نرم‌افزار می‌شود. لازم به ذکر است اطلاعات چاه مورد مطالعه اعم از مختصات اولیه ورودی به نرم‌افزار، اطلاعات سیال حفاری استفاده شده، مته حفاری، هندسه چاه (عمق هر حفره و پاشنه جداری در هر حفره) و در نهایت مجموعه ته‌چاهی بکار رفته به تفکیک هر حفره از برنامه حفاری چاه مزبور استخراج شده است.

با توجه به اینکه هیدرولیک حفاری در این مقاله مورد مطالعه قرار می‌گیرد و یافتن پارامترهای هیدرولیکی بهینه به منظور بهینه‌سازی نرخ نفوذ حفاری مقصود این تحقیق است، بنابراین پارامتر HSI به عنوان نماینده هیدرولیک حفاری تابع هدف قرار داده می‌شود که می‌بایست بیشینه گردد. در واقع پارامترهای مساله طوری انتخاب می‌گردند که منجر به ماکزیمم شدن خروجی شوند.

ضمناً علاوه بر محدودیت‌های عملیاتی مساله، دو محدودیت اساسی در مدلسازی سیستم می‌بایست رعایت گردد:

۱- افت فشار کل باید کمتر از فشار مجاز برای تجهیزات باشد. در این مساله فشار مجاز برای دستگاه حفاری ۴۰۰۰ پام است.

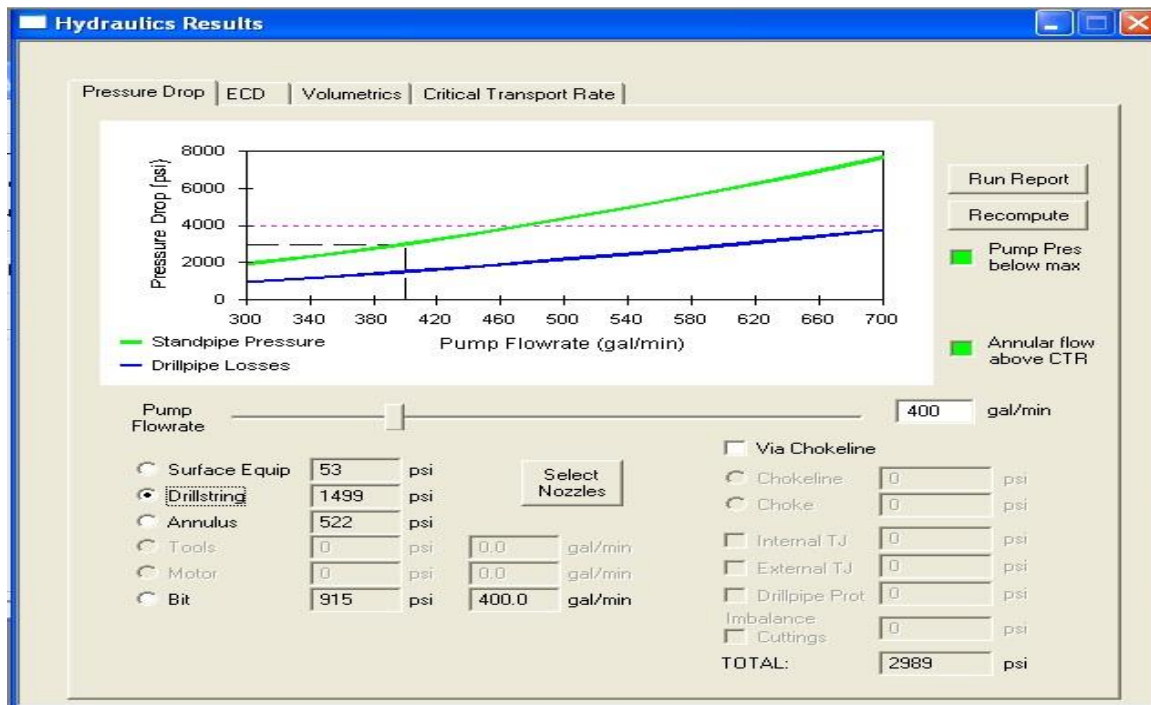


۲- دبی جریان سیال حفاری باید از حداقل دبی لازم برای تمیزسازی فضای آنالوس از خرده‌های حفاری بیش‌تر باشد.

### ۳-۱- بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری حفره " ۸ ۱/۲ "

شکل ۲ نمایش دهنده آنالیز حساسیت افت فشار سیستم در دبی‌های مختلف جریان می‌باشد. همچنین در این نمودار میزان افت فشار سیستم در دبی ۴۰۰ gal/min که برای حفاری این حفره پس از سعی و خطا انتخاب گردیده، نمایش داده شده است. میزان کل افت فشار سیستم با این شرایط ۲۹۸۹ psi می‌باشد. باتوجه به شکل، بخش زیادی از افت فشار ایجاد شده در مته اتفاق افتاده است که این موضوع گویای طراحی بهینه هیدرولیک حفاری برای این حفره می‌باشد. جزئیات افت فشار در هر قسمت در زیر نمودار آورده شده است. همچنین با توجه به قسمت سمت راست نمودار دو محدودیت اساسی مساله نیز رعایت گردیده است. رنگ سبز در مقابل گزینه های فشار کل سیستم (فشار پمپ گل) و همچنین دبی بحرانی نشانگر این است که افت فشار کل سیستم در طراحی مذکور کمتر از محدودیت فشاری تجهیزات حفاری (۴۰۰۰ پام) و نیز جریان سیال حفاری در آنالوس بیشتر از میزان دبی بحرانی لازم جهت تمیزسازی آنالوس از خرده‌های حفاری می‌باشد. البته این نمودار حاصل آنالیز حساسیت و روش سعی و خطا روی نازل‌های مته است.

همچنین پس از ران‌های متعدد در نهایت ۱ نازل ۷/۳۲ و ۸ نازل ۸/۳۲ برای این حفره به عنوان طراحی بهینه نازل‌های مته انتخاب شد. شکل ۳ مقادیر بهینه دبی جریان و نازل‌های مته برای حفره " ۸ ۱/۲ " در چاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- آنالیز حساسیت افت فشار سیستم نسبت به دبی جریان حفره ۸ ۱/۲"

**Hydraulics Inputs**

BHA: BHA8.5 | 1888.5 ft  
Well Geom: Wellbore Geometry8.5 | 16463.3 ft | Filter  
Survey: trajectory 8.5 | 16210.4 ft

Bit Depth: 16210.42 ft

Run Plots | Run Report

Rheology | Bit/Flow | Rig | Tools/Misc | Cuttings | Swab/Surge

Pump / Flow

Pump Flowrate	400	gal/min
Plot: Min Flow	300	gal/min
Plot: Max Flow	700	gal/min
Pump Stroke Volume	0.117	bbl
Max Pump Pressure	4000	psi

Sensitivity

Min Flow	300	gal/min
Max Flow	500	gal/min

Nozzles

Count	Size (1/32")
1	7
8	8

Save to BHA

Total Flow Area: 0.43 in<sup>2</sup>

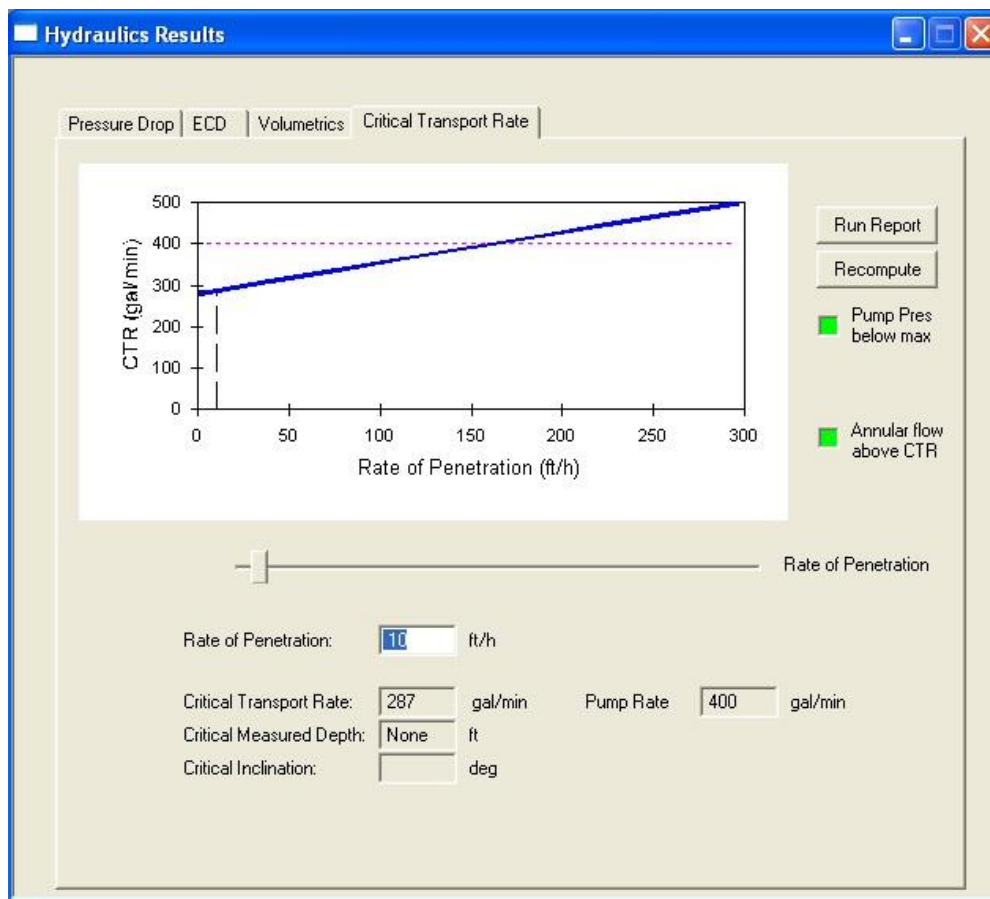
Nozzle Optimization

Method: None

Planned Pump Press: 0 psi

شکل ۳- مقادیر بهینه دبی جریان و نازل مته برای حفره ۸ ۱/۲"

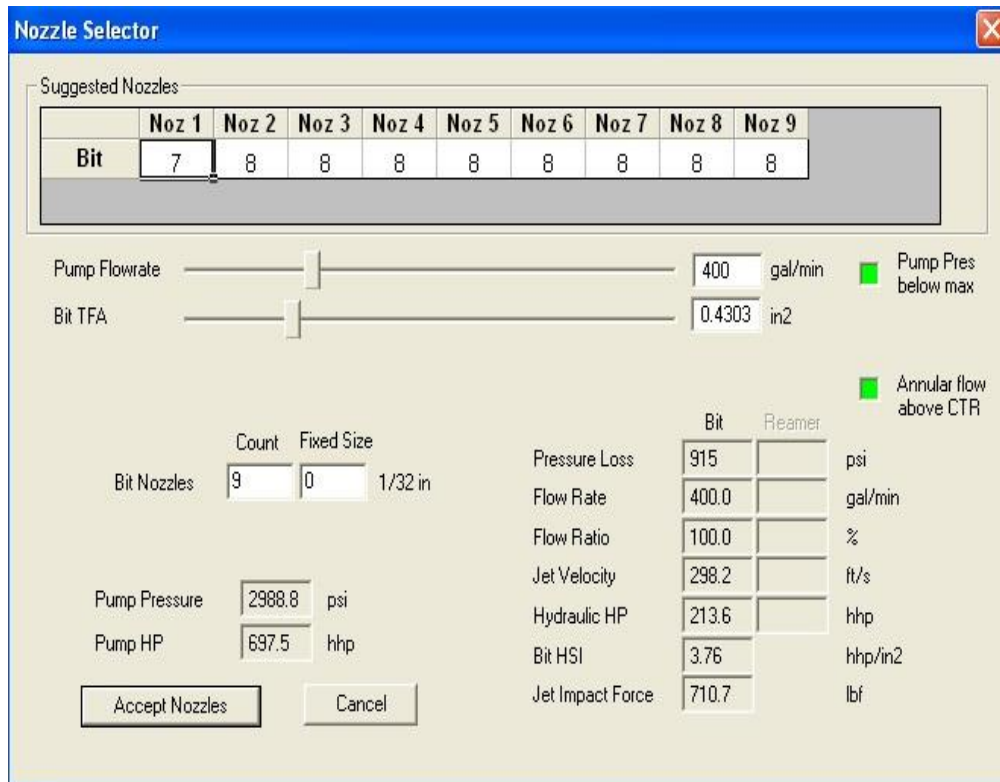
شکل ۴ حداقل دبی لازم جریان در آنالوس برای تمیزسازی چاه از خرده‌های حفاری را در نرخ نفوذهای مختلف نمایش می‌دهد. باتوجه به اینکه نرخ نفوذ متوسط در حفاری چاه‌های مجاور در حفره ۸ ۱/۲" در میدان مورد مطالعه ۱۰ ft/hr بوده است، بنابراین با قرار دادن این عدد در نرم‌افزار، میزان دبی لازم برای تمیزسازی چاه طبق نمودار ۲۸۷ gal/min بدست آمده است بنابراین دبی ۴۰۰ gal/min تامین‌کننده دبی لازم جهت تمیزسازی آنالوس از خرده‌های حفاری می‌باشد.



شکل ۴- نمودار رابطه بین نرخ نفوذ حفاری و حداقل دبی لازم برای تمیزسازی آنالوس در حفره ۸ ۱/۲"

همانطور که از نمودار فوق مشخص است با افزایش نرخ نفوذ حفاری، دبی لازم برای تمیزسازی چاه از خرده‌های حفاری به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند.

در نهایت با بهینه‌سازی هیدرولیک سیستم، HSI بدست آمده برای این حفره ۳/۷۶ بود که شکل ۵ نشان‌دهنده آن می‌باشد.



شکل ۵- خروجی های هیدرولیکی بدست آمده با نازل‌های انتخابی برای حفره ۱/۲" ۸

## ۴- نتیجه‌گیری

با عنایت به نقش اساسی و موثر سیال حفاری در تمیزسازی ته چاه از خرده‌های حفاری جهت افزایش راندمان مته، مبحث هیدرولیک مته اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. در این مقاله ابتدا عوامل اساسی موثر در نرخ نفوذ حفاری بررسی گردید سپس شبیه‌سازی و بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری برای حفره ۱/۲" ۸ انجام شده و با استفاده از آنالیز حساسیت، پارامترهای هیدرولیکی بهینه شده و همچنین دبی بهینه جریان برای این حفره تعیین گردید. تابع هدف برای یافتن پارامترهای بهینه، HSI مته انتخاب گردید و نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان داد که مقادیر پارامترهای بهینه نزدیک به مقادیر پیشنهادی در برنامه حفاری چاه می‌باشد.

پس از بررسی شبیه‌سازی انجام شده، آنالیز حساسیت روی پارامترهای مختلف و روش سعی و خطا مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولیکی بدست آمد. جدول ۱ مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولیکی را برای حفره "۱/۲ ۸ چاه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولیکی حفره "۱/۲ ۸ چاه مورد مطالعه براساس آنالیز حساسیت

نیروی ضربه نازل مته (lbf)	HSI مته (hhp/in <sup>2</sup> )	وزن گل (ppg)	ویسکوزیته پلاستیکی (cp)	نقطه واروی (lb/100 ft <sup>2</sup> )	دبی پمپ (Gal/min)	سطح مقطع نازل‌های مته (in <sup>2</sup> )
۷۱۰/۷	۳/۷۶	۱۱/۲	۱۸	۲۳	۴۰۰	۰/۴۳

## منابع

- [1] [خادمیان، محمد، ۱۳۸۸، کاهش زمان و هزینه های حفاری با روش های نوین مدیریت و بهینه سازی روش های موجود، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران.]
- [2] Archer, J. S. and Wall C. G. 1986. *Petroleum Engineering (principles & practice)*, first edition, The Alden Press, Oxford.
- [3] [بابامیر ساطعی، حسین. ۱۳۹۳، بهینه سازی حفاری میدان نفتی اهواز. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران.]
- [4] Eren, T. 2010. "Real-Time-Optimization Of Drilling Parameters During Drilling Operations" Ph.D. Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University.
- [5] Maidla, E.E. and S. Ohara. 1991. "Field Verification of Drilling Models and Computerized Selection of Drill Bit, WOB, and Drillstring Rotation," *SPE Drilling Engineering*, SPE Paper 19130, p.p. 189-195.
- [6] Hareland, G. and Hoberock, L.L. 1993. "Use of Drilling Parameters to Predict In-Situ Stress Bounds," *SPE paper 25727*, presented at the 1993 SPE/ IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands.
- [7] Samuel, G. R. and Miska, S. 1998. "Optimization of Drilling Parameters with the Performance of Multilobe Positive Displacement Motor (PDM)," *SPE 47791*, IADC/SPE Asia Pacific Drilling Conference, Jakarta, Indonesia.
- [8] Pereira, J. J. 1999. "Comprehensive Optimization of Drilling Parameters for Horizontal Wells," Ph.D. Thesis, The Graduate School, University of Tulsa.
- [9] Bourgoyne, A. T. Jr. and Millheim K. K. and Chenevert M. E. and Young F. S. 1991. *Applied Drilling Engineering (Society of Petroleum Engineers Text Book Series)*, Richardson, TX.
- [10] Rabia, H. 2002. *Well Engineering & Construction*, Entrac Consulting Ltd.
- [11] Maurer, W. C. and Aime, M. Jr. 1965. "bit-tooth penetration under simulated borehole conditions", *Journal of Petroleum Technology*, p.p. 1433-42.
- [12] M-I L.L.C.; *M-I Drilling Fluids Engineering Manual (Version 1.0 - 07/1998)*, [www.midf.com](http://www.midf.com)
- [13] Cunningham, R. A. and Eenink, J. G. 1959. "Laboratory Study Of Effect of Overburden, Formation, and Mud Column Pressures on Drilling Rate of Permeable Formations", *Trans., AIME 216*, p.p. 9-17.
- [14] Baker Hughes INTEQ. 1995. *Drilling Engineering Workbook (A Distributed Learning Course)*, Houston, TX.
- [15] Whalen, B. R. 1981. *Rotary Drilling Series (Unit I, Lesson 2: The Bit)*, Third Edition, PETEX, Austin, Texas.

[16] Rabia, H. 1986. *Oilwell Drilling Engineering (Principles and Practice)*, Springer.

[17] Sutko, A.A. and Meyers, G.M.. 1971. "The Effect of the Nozzle Size, Number and Extension on the Pressure Distribution under a Tricone Bit", *JPT*, 1299-1304.

[18] Barragan, B. V. and Santos, O. L. A. and Maidla, E.E. 1997. "Optimization of Multiple Bit Runs", *SPE/IADC 37644*, presented at the *SPE/IADC Drilling Conference held in Amsterdam, The Netherlands*, 4-6.