



## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر نرخ نفوذ سرمته و خواص ظاهری کنده‌های حفاری بر شاخص تمیزکاری چاه‌های جهت‌دار

محسن دودار<sup>۱</sup>؛ پرویز معارفوند<sup>۲\*</sup>؛ مصطفی مروجی کشاورز<sup>۳</sup>؛ محمد فضائلی زاده<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- استادیار؛ دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۳/۱۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2017.49771

### چکیده

به دلیل اهمیت ارتباط نرخ نفوذ حفاری و تمیزکاری چاه‌های جهت‌دار در کاهش هزینه‌های عملیات حفاری، با استفاده از یک دستگاه شبیه‌ساز حفاری جهت‌دار، بعد از تعیین زاویه بحرانی، ارتباط این شاخص با پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ و خصوصیات ظاهری کنده‌های تولیدی از قبیل اندازه، شکل و جنس تعیین می‌شود. کنده‌های حفاری استفاده شده در این مطالعه آزمایشگاهی، همگی دارای توزیع اندازه مشخصی بوده و در سه جنس ماسه، آهک و سیلیس تست شده‌اند. نتایج این مطالعه بیان می‌کند که استفاده از سرمته‌هایی که سنگ را به صورت پودری شکل درمی‌آورند، شاخص تمیزکاری را به شدت بهبود خواهند داد. اثر وزن اعمالی بر رشته حفاری تا یک نقطه خاصی بوده و بعد از آن شاخص کاهش خواهد یافت. چرخش رشته حفاری نیز رفتار مشابهی را خواهد داشت. نقطه انتهایی و طول بستر کنده‌ها رفتار مشابهی داشتند. کنده‌هایی با چگالی بیشتر ولی اندازه کوچک‌تر شاخص تمیزکاری بهتری را نسبت به کنده‌هایی با دانسیته کمتر ولی اندازه بزرگ‌تر خواهند داشت. همچنین در مواقعی که با توزیع اندازه ذرات مواجه هستیم، اثر شکل ذرات قابل توجه می‌باشد.

### واژگان کلیدی

شاخص تمیزکاری چاه،  
نرخ نفوذ، خواص کنده  
حفاری، سرمته، دستگاه  
شبیه‌ساز حفاری جهت‌دار

### ۱. مقدمه

جدول به آن‌ها اشاره‌ای نشده است. در کنار موارد زیر، سختی و نرمی سازند بسیار حائز اهمیت است، به گونه‌ای که در پاره‌ای از مواقع هر دسته از سرمته‌های فوق، نوع خاصی از انواع سازندها را حفر می‌کند (Mitchell & Miska, 2011).  
کنده‌های تولیدشده در هنگام حفاری چاه‌های جهت‌دار، بسته به نوع سرمته و سازندی که در آن حفاری صورت می‌گیرد، دارای اندازه، شکل، دانسیته و حجم متفاوتی هستند. این مشخصات در کنار خواص رئولوژیک سیال حفاری نقشی عمده را در فرآیند ته‌نشینی کنده‌ها چه در شرایط دینامیکی

پارامترهایی که در انتخاب یک سرمته باید لحاظ شود عبارتند از: نرخ نفوذ، عمر سرمته، قابلیت جهت‌دهی، پایداری مته، توانایی حفاری در شرایط مختلف عملیاتی، هماهنگی با دیگر وسایل درون چاهی، موجود بودن، قیمت مناسب، قابلیت تعمیر و استفاده مجدد و در نهایت قابل اعتماد بودن (Fazaelizadeh, 2016). بسته به موارد فوق یکی از انواع سرمته‌های متداول جدول شماره ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ البته سرمته‌های خاص دیگری وجود دارد که در این

و چه در شرایط استاتیکی بازی می‌کنند ( Baldino et al., 2015).

جدول ۱. دسته‌بندی رایج سرمته‌های حفاری (Nabe'ei, 1394; Fazaelizadeh, 2016)

نمونه‌ای از شکل رایج سرمته	نوع سازنده مورد استفاده	نام لاتین	
		Fish tail	دم ماهی
	نرم	Natural diamond	الماس طبیعی
	سخت و نرم	PDC	الماس مصنوعی
	سخت و خورنده	TSP	
	نرم	Milled tooth	دندان‌ه فولادی
	سخت و نیمه سخت	Bottom bit	دکمه‌ای
	لایه‌های بسیار سخت	Hybrid bit	سرمته‌های هیبریدی

در این مقاله تأثیر این پارامترها در مباحث هیدرولیکی بعد از برداشتن وزن روی مته بررسی شده است. هرچند بعد از حذف وزن روی مته، تولید کنده‌ها متوقف می‌شود؛ ولی همچنان کنده‌های پیشین در فضای دالیزی حضور خواهند داشت. تمیزکاری چاه در چاه‌های افقی، پارامتری کلیدی است (Wang et al., 2007; Bizhani & Kuru, 2015; Davidson et al., 2016). این دغدغه در زمان رسیدن به زوایای بحرانی بسیار بیشتر خواهد شد، چون در هر لحظه از حفاری امکان بروز انواع گیر و جا گذاشتن مانده در درون فضای چاه، وجود خواهد داشت (Nazari, 2010; Egenti, 2016; Corredor et al., 2016).

منظور از زاویه بحرانی، بدترین زاویه ممکن جهت تمیزکاری چاه است که در بیشتر مواقع به صورت بازه‌ای خاص بیان می‌شود؛ ولی در این مقاله به دلیل گسسته بودن زوایای تست آزمایشگاهی، یک زاویه خاص به عنوان نماینده آن بازه انتخاب شده است. این زاویه محتمل‌ترین مکان برای وقوع انواع مشکلاتی است که در حین حفاری ممکن است بروز کند. در این مقاله زاویه بحرانی برای تمیزکاری چاه به وسیله دستگاه شبیه‌ساز حفاری جهت‌دار مشخص شده و سپس تأثیر اندازه، شکل، دانسیته و حجم کنده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

کنده‌های تولیدشده مستقیماً تحت تأثیر سرعت حفاری است که تابعی از دبی (Corredor et al., 2016; Bizhani & Kuru, 2015; Egenti, 2014; Duan et al., 2009; Mohammadsalehi & Malekzadeh, 2011 Nazari, 2010; Duan et al., 2007; Wang et al., 2009; Bizhani & Kuru, 2015; Duan et al., 2008; Egenti, 2014; Valluri et al., 2006; Kim et al., 2016)، فشار-دما (Baldino et al., 2014; Bizhani & Kuru, 2015; Duan et al., 2007) زاویه (Nazari, 2010; Egeni, 2014 Duan et al., 2007; Bizhani & Kuru, 2015; Egenti, 2014) نوع سیال (Nazari, 2010; Duan et al., 2007; Bizhani & Kuru, 2015; Egenti, 2014; Nazari et al., 2010; Duan et al., 2009; Baldino, 2015; Valluri et al., 2006) و حتی رژیم جریان (Baldino et al., 2015; Bizhani & Kuru, 2015) می‌باشد. بالا بردن نرخ حفاری، نیازمند سرعت‌های بالاتر سیال حفاری جهت

انواع سرمته‌های رایج در عملیات حفاری

دکمه‌ای و یا به‌طور کلی سرمته‌هایی با دندان‌های به هم نزدیک و کوتاه، کاج‌های کوچک‌تری با زاویه زیاد خط تقارن نسبت به افق و بدون انحراف نسبت به هم، سرعت پایین سیال، نرخ حفاری متوسط و یا پایین، سرعت چرخش رشته حفاری پایین، پلاستیک ویسکوزیته و نقطه واروی پایین برای سیال حفاری استفاده شود ( Bourgoyne, 1986; Egenti, 2014).

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲ مباحث تئوری

مروری بر معادلات تجربی ارائه شده:

محققان در مورد نرخ نفوذ متهم مطالعات فراوانی داشته‌اند. رویکردی که معمولاً اتخاذ می‌شود این است که، اثرات وزن روی سرمته، سرعت دورانی، سایش دندان و غیره بر روی نرخ نفوذ همگی مستقل از یکدیگر فرض می‌شود. بنابراین، اثر ترکیبی آن‌ها را می‌توان با استفاده از معادله ۱ محاسبه نمود.

$$R = (f_1) \times (f_2) \times (f_3) \times (f_4) \dots (f_n) \quad (۱)$$

که  $f_1, f_2, f_3, f_4$  و غیره، بیان‌کننده رابطه تابعی بین نرخ نفوذ و متغیرهای مختلف حفاری می‌باشند. شاید کامل‌ترین مدل ریاضی در حفاری که برای سرمته‌های کاج‌دار مورد استفاده قرار گرفته است، مدل پیشنهادی بورگوآن و یانگ باشد. مدل حفاری بورگوآن و یانگ به‌وسیله معادله ۱ و با روابط تابعی زیر تعریف می‌گردد (Bourgoyne, 1986):

$$f_1 = e^{2.303a_1} = K \quad (۲)$$

$$f_2 = e^{2.303a_2(10000-D)} \quad (۳)$$

$$f_3 = e^{2.303a_3D^{0.69}(g_p-9.0)} \quad (۴)$$

$$f_4 = e^{2.303a_4D(g_p-\rho_c)} \quad (۵)$$

$$f_5 = \left[ \frac{\left(\frac{W}{d_b}\right) - \left(\frac{W}{d_b}\right)_t}{4 - \left(\frac{W}{d_b}\right)_t} \right]^{a_5} \quad (۶)$$

$$f_6 = \left(\frac{N}{60}\right)^{a_6} \quad (۷)$$

$$f_7 = e^{-a_7h} \quad (۸)$$

انتقال کنده‌ها از داخل فضای دالیزی می‌باشد ( Nazari, 2010; Egenti, 2014).

با یک برنامه‌ریزی مناسب و همچنین پایش مستمر پارامترهای اثرگذار، می‌توان به نرخ‌های بالاتر حفاری در زمان‌های کوتاه‌تر دست یافت؛ که البته این کار به ما در مدیریت بهتر انتقال کنده‌ها در فضای دالیزی کمک خواهد کرد (Davidson et al., 2016).

در بررسی بازه کنده‌های حفاری، سایزهای میانه نسبت به اندازه‌های کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر راحت‌تر از داخل چاه حذف می‌شوند (Bizhani & Kuru, 2015) و ذرات ریزتر خیلی سخت‌تر از داخل چاه به بیرون انتقال داده می‌شوند (Egenti, 2014; Nazari, 2010; Duan et al., 2009). حذف ذرات ریز در چاه‌های افقی و در زمان استفاده از سیستم حفاری چرخشی بسیار نگران‌کننده است (Nazari, 2010)؛ علت این امر را می‌توان این‌گونه دانست که با کاهش اندازه کنده‌های حفاری، اثرگذاری نیروهای بین‌ذره‌ای مثل واندروالسی افزایش یافته و همین باعث سخت شدن حذف این نوع ذرات از داخل چاه خواهد شد (Egenti, 2014; Bizhani & Kuru, 2015). پیشنهاد می‌شود جهت حمل کنده‌های ریز، از سیالات حفاری حاوی پلی‌آنیونیک سلولز استفاده شود (Bizhani & Kuru, 2015; Duan et al., 2008).

شکل کنده‌ها عمدتاً با نوع سازند و نوع سرمته‌ی مورد استفاده مرتبط است. کنده‌هایی که از سازندهایی سخت مثل سنگ آهک جدا می‌شوند، معمولاً ابعاد بزرگی دارند. کنده‌های ناشی از حفاری سازندهای نرمی چون سنگ‌های ماسه‌ای و مادستون‌ها، کروییت بیشتری داشته و در اکثر مواقع در سیال حفاری حل خواهند شد.

در سازندهای نرم توصیه می‌شود که از سرمته‌های تیغه فولادی و یا به‌طور کلی سرمته‌ای با دندان‌های بزرگ و فاصله‌دار و کاج‌های بزرگ‌تری با زاویه کم خط تقارنشان نسبت به افق و انحراف بالا نسبت به هم استفاده شود؛ همچنین سرعت جریان بالا، سرعت حفاری بالا، سرعت چرخش رشته حفاری بالا، ویسکوزیته‌ی پلاستیک و نقطه واروی بالا و پایین بودن ویسکوزیته کلی گل تا جای ممکن، باعث می‌شود تا یک تمیزکاری مناسب صورت گیرد. برعکس این امور برای سازندهای سخت به کار گرفته می‌شود تا تمیزکاری چاه به خوبی صورت گیرد؛ یعنی از سرمته‌های

بینگهام دشواری حفر و حمل کنده‌های حفاری را در رابطه زیر نشان داد. برای مثال رس ممکن است سرمته را گیر بیندازد و بنابراین حفاری آن مشکل باشد؛ درحالی‌که ماسه به راحتی تمیز می‌شود. رابطه سختی بینگهام به صورت زیر است (Kim et al., 2008):

$$\Gamma = \frac{NFd^2}{VT} \quad (12)$$

در رابطه فوق  $N$  سرعت چرخش رشته بر حسب دور بر ثانیه،  $F$  نیروی فشاری اعمال شده روی سرمته بر حسب کیلونیوتن،  $D$  قطر سرمته بر حسب متر،  $V$  سرعت نرخ نفوذ بر حسب متر بر ثانیه،  $T$  گشتاور پیچشی بر حسب کیلونیوتن متر و  $\Gamma$  سختی بینگهام در نظر گرفته شده‌اند.

تیل برای تعیین اطلاعات زمین‌شناسی رابطه‌ای را برای انرژی مخصوص به صورت انرژی لازم برای حفر یک واحد حجم سنگ تعریف کرد که از آن به عنوان شاخصی برای تعیین کارایی مکانیکی فرآیند حفاری استفاده کرد. رابطه انرژی مخصوص به صورت زیر است (Pfleider & Blake, 1953):

$$E = \frac{F}{A} + \frac{2\pi NT}{AV} \quad (13)$$

که در آن  $F$  فشار روی سرمته بر حسب کیلونیوتن،  $A$  سطح کنده شده توسط سرمته بر حسب مترمربع،  $N$  سرعت چرخش بر حسب دور در ثانیه،  $T$  گشتاور پیچشی بر حسب کیلونیوتن متر و  $V$  سرعت حفاری بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. سمرتن با استفاده از گروه‌بندی بی‌بعد پارامترها، رابطه‌ای بین نرخ نفوذ، سرعت چرخش سرمته، وزن روی سرمته و سختی سنگ به دست آورد. این رابطه به این صورت به دست می‌آید:

$$\frac{R}{DN} = f\left(\frac{F}{D^2S}\right) \quad (14)$$

که در آن  $S$  سختی سنگ،  $N$  سرعت چرخش بر حسب دور در ثانیه،  $F$  وزن روی سرمته بر حسب کیلونیوتن و  $R$  نرخ نفوذ بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. اگر قطر سرمته ( $d$ ) در تمام آزمایش‌ها یکسان باشد آنگاه داریم (Bingham, 1965):

$$S = F\left(\frac{N}{R}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$f_8 = \left(\frac{F_j}{1000}\right)^{a_8} \quad (9)$$

در معادلات فوق  $D$  عمق چاه بر حسب فوت،  $g_p$  گرادیان فشار منفذی،  $\rho_c$  چگالی جریانی معادل ( $lbm/gal$ )،  $\left(\frac{W}{ab}\right)_t$  وزن آستانه اعمال شده بر سرمته به ازای هر اینچ از قطر سرمته در جایی که سرمته شروع به حفاری می‌کند ( $1000lb/in$ )،  $h$  کسری از کندی دندان،  $F_j$  نیروی برخورد هیدرولیکی در زیر سرمته ( $lb$ ) و  $a_1$  تا  $a_8$  ثابت‌هایی هستند که بر اساس شرایط حفاری باید انتخاب گردند.

تابع  $f_1$  تأثیر مقاومت سازند، نوع سرمته، نوع سیال حفاری و درصد جامدات سیال که به طور مستقل در مدل بیان نشده‌اند را وارد می‌کند. این تابع دارای واحدی مشابه با نرخ نفوذ بوده و اغلب قابلیت حفاری سازند نامیده می‌شود. توابع  $f_2$  و  $f_3$  تأثیر فشردگی ناشی از عمق بر نرخ نفوذ را مدل می‌کنند. تابع  $f_4$  تأثیر چگالی سیال حفاری، تابع  $f_5$  اثر وزن روی سرمته و تابع  $f_6$  اثر دور سرمته بر سرعت حفاری را مدل می‌کنند. تابع  $f_7$  تأثیر میزان خوردگی دندان سرمته و تابع  $f_8$  اثر هیدرولیک سرمته بر نرخ نفوذ را بیان می‌کنند (Duan et al., 2007).

فیستر، اندیسی را که نشان‌دهنده سختی نسبی سنگ است ارائه داد که عددی بین صفر تا ۲ است. به طوری که صفر برای سنگ‌های بسیار نرم و ۲ برای سنگ‌های بسیار سخت است. لازم به ذکر است که این اندیس در سختی کم و متوسط به شدت حساس است. اندیس دگرگونی به این صورت تعریف می‌شود (Valluri et al., 2006):

$$A = 1 + \left(\frac{W}{W_{max}}\right) - \left(\frac{V}{V_{max}}\right) \quad (10)$$

فیستر همچنین برای آنالیز انرژی مصرف شده برای خاک‌های سخت و سنگ‌های نرم رابطه زیر را ارائه داد (Valluri et al., 2006):

$$W = \frac{TN}{V} \quad (11)$$

در معادله فوق  $T$  گشتاور پیچشی بر حسب کیلونیوتن متر،  $N$  سرعت چرخش رشته بر حسب دور در ثانیه و  $V$  نرخ نفوذ لحظه‌ای بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد.

یک رابطه تجربی برای ضریب پسا برای ذرات صاف و کروی به صورت زیر است:

$$C_{Drag} = \frac{24}{Re_p} + \frac{6}{1 + Re_p} + 0.4 \quad (21)$$

عدد رینولدز ذره با استفاده از معادله زیر که برای سیالات غیر نیوتنی نیز معتبر است، محاسبه خواهد شد:

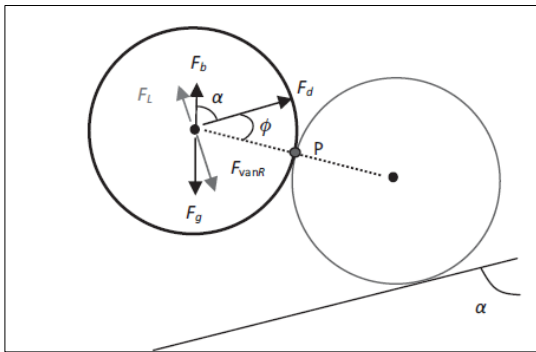
$$Re_p = v_x^2 * \rho_p / \tau \quad (22)$$

در این رابطه  $\tau$  تنش برشی بر حسب پاسکال می‌باشد. نیروی جاذبه بین ذره‌های بستر در گل عبارت است از (Skalle, 2010):

$$F_{cohesive} = \frac{\pi * d_p^2 * \tau_y}{4} * f_y \quad (23)$$

$$f_y = 2 * \left( \phi + \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) * (\sin \phi)^2 - \cos \phi \sin \phi \right) \quad (24)$$

در رابطه بالا  $\phi$  زاویه بستر ته‌نشین شده و  $\tau_y$  نقطه واروی سیال حفاری می‌باشد. شکل ۱ نیروهای مؤثر بر یک ذره را نشان می‌دهد. اگر  $F_{net, lift}$  که همان نیروی برآیندی جهت بلند کردن ذره است مثبت باشد، ذره بلند خواهد شد و به همراه جریان به سمت جلو حرکت خواهد کرد و اگر  $F_{net, rolling}$  مثبت باشد، ذره به صورت غلطان به سمت جلو حرکت خواهد نمود (Somerton, 1959).



شکل ۱. نیروهای عمل‌کننده بر یک ذره (Peker & Helvaci, 2011)

(Helvaci, 2011)

نیروی برآیندی جهت بلند کردن ذره از بستر عبارت است از (Skalle, 2010):

معادله ۱۶ انرژی لازم برای حفر سنگ با یک نوع سرتمه خاص را بیان می‌کند. بدین‌صورت که مقدار انرژی کمتر، بیانگر آسان‌تر بودن حفاری سنگ است و سرتمه‌ای که کمترین انرژی را لازم دارد، بهترین سرتمه برای حفاری سنگ است. رابطه انرژی مخصوص ریا به این صورت است (Teale, 1965):

$$SE = \frac{(WOB)(RPM)}{d(PR)} \quad (16)$$

که در آن  $WOB$  وزن روی سرتمه بر حسب کیلو نیوتن،  $RPM$  سرعت چرخش سرتمه بر حسب دور در دقیقه،  $PR$  نرخ نفوذ بر حسب متر بر ثانیه و  $d$  قطر سرتمه بر حسب متر است. بعد از برداشتن وزن روی مته و شکل گرفتن کنده‌هایی با خصوصیات متفاوت نوبت به بررسی نیروهای حاکم بر تست خواهد رسید.

نیروهای حاکم بر جریان مسئله در طول تست:

با در نظر گرفتن اثر شناوری، وزن مؤثر ذره به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Skalle, 2010):

$$W = g * \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_s - \rho_{fluid}) \quad (17)$$

در رابطه فوق  $g(m/s^2)$  ضریب گرانش،  $d_p(m)$  قطر ذره،  $\rho_s$  دانسیته ذره جامد و  $\rho_{fluid}$  دانسیته سیال می‌باشند. نیروی برآ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Skalle, 2010):

$$F_{lift} = C_{lift} * \frac{\pi d_p^2}{8} * \rho * v_x^2 \quad (18)$$

در این رابطه  $v_x$  سرعت سیال در جهت  $x$  دستگاه مختصات و  $C_{lift}$  همان ضریب برآ می‌باشد که برای ذرات بستر، عدد ثابت ۰.۰۹ در نظر گرفته می‌شود و برای سطوح ناصاف با استفاده از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$C_{lift} = 5.82 \left[ \frac{d_p}{2v_x Re_p} \frac{dv_x}{dr} \right]^2 \quad (19)$$

برابر با گرادیان شعاعی سرعت است و  $Re_p$  عدد رینولدز ذره می‌باشد.

نیروی پسا به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{Drag} = C_{Drag} * \frac{\pi * d_p^2}{8} * \rho * V_x^2 \quad (20)$$

این دستگاه امکان مطالعه پارامترهای متفاوتی مانند سطح مقطع فضای دالیزی، خواص سیال حفاری، خواص کنده‌ها، خصوصیات رشته حفاری و همچنین دما و فشار را، مهیا نموده است. در کنار این موارد می‌تواند با اعمال پارامترهای مختلف حفاری از جمله وزن روی مته، سرعت چرخش رشته حفاری و تغییر سیال، سایز، شکل و جنس کنده‌ها را در یک عملیات شبیه‌سازی شده حفاری تولید نماید.

نقش لوله جداری در فضای دالیزی دستگاه را، یک پلکسی گلاس شفاف با طول ۷/۲۱ فوت و قطر داخلی ۳/۵۴ اینچ بازی می‌کند. رشته حفاری هم از لوله‌ای از جنس استیل است که دارای قطر ۱/۹۶ اینچ است. روی این لوله چهار نازل با قطر ۸ میلی‌متر و اختلاف فاز ۹۰ درجه در سطح پیرامونی لوله قرار گرفته‌اند. رشته حفاری از طریق یک شفت به یک الکتروموتور که به یک مبدل فرکانسی مرتبط است، وصل شده است. از طریق مبدل فرکانسی می‌توان سرعت الکتروموتور را کنترل نمود. مخلوطی از آب و کنده نیز از طریق محل ورودی کنده‌ها، به وسیله یک گیربکس و الکتروموتوری که آن هم به مبدل فرکانسی جهت تعیین سرعت تزریق مرتبط است، به داخل فضای دالیزی فرستاده می‌شوند. زاویه دستگاه از طریق دو بازوی جانبی دستگاه از صفر تا نود درجه قابل تغییر است. سیال حفاری مورد نظرمان در هر تست از طریق یک پمپ سانتریفیوژی که دبی خروجی آن قابل کنترل است به داخل رشته پمپ شده و از آنجا، از طریق چهار نازل انتهایی به داخل فضای آنالوس پمپ می‌شود.

بعد از خروج سیال مخلوط با کنده‌ها، از محل خروجی دستگاه، شیکر دست‌سازی قرار دارد که الک نهایی آن ۴۰ است. سیال بلافاصله بعد از خارج شدن از آخرین مش به داخل تانک اولیه ریخته شده و آماده پمپاژ به داخل دستگاه می‌شود. به غیر از این تانکر، تانکر دیگری نیز وجود دارد که با یک همزن بسیار قوی مخلوط آب و کنده‌ها را آماده می‌کند. در دو سر ابتدا و انتهایی پلکسی دو گیج مخصوص وجود دارد؛ که اختلاف فشار آن دو نقطه در طول تست‌های آزمایشگاهی به صورت مستمر اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.

$$F_{net,lift} = (F_L - F_{cohesive} - W * \sin \alpha) > 0 \quad (25)$$

در این رابطه  $\alpha$  زاویه چاه با خط قائم می‌باشد. نیروی برآیندی جهت غلطاندن ذره به سمت جلو عبارت است از (Skalle, 2010):

$$F_{net,rolling} = F_D * \sin \phi + (F_L - F_{cohesive}) * \cos \phi + W * \sin(-\alpha - \phi) > 0 \quad (26)$$

بعد از ساده‌سازی سرعت بحرانی جهت بلند کردن ذره و یا غلطاندن آن، بدون در نظر گرفتن اصطکاک به دست خواهد آمد (Rabia, 1985; Skalle, 2010). سرعت بحرانی جهت بلند کردن ذره (Skalle, 2013):

$$v_x = \left\{ \frac{4 [3\tau_y (\phi + (\frac{\pi}{2} - \phi) \sin^2 \phi - \cos \phi \sin \phi) \tan \phi + d_p (\rho_p - \rho) * (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi)]}{3\rho(C_{drag} + C_{Lift} \tan \phi)} \right\}^{0.5} \quad (27)$$

سرعت بحرانی جهت غلطاندن ذره (Skalle, 2013):

$$v_x = \left\{ \frac{4 [3\tau_y (\phi + (\frac{\pi}{2} - \phi) \sin^2 \phi - \cos \phi \sin \phi) + d_p (\rho_p - \rho) \sin \alpha]}{3\rho(C_{drag} - C_{Lift} \tan \phi)} \right\}^{0.5} \quad (28)$$

فرمول اصلی که مبنای اندازه‌گیری شاخص تمیزکاری چاه در تست‌های آزمایشگاهی این مطالعه است به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$HCI(\%) = \frac{\text{گرم کنده جدا شده روی شیکر}}{\text{گرم کنده تزریقی}} \quad (29)$$

## مباحث آزمایشگاهی:

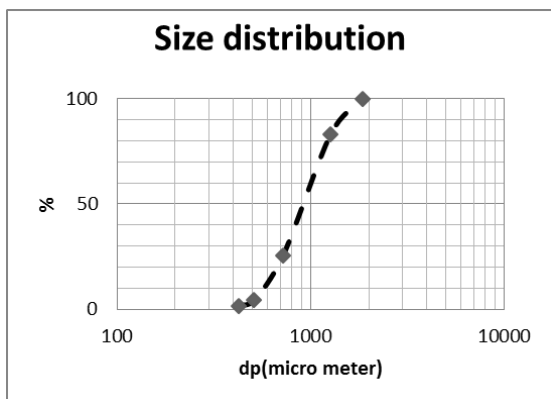
### دستگاه شبیه‌ساز حفاری

از آنجا که بررسی پارامترهای عملیاتی در حین حفاری یک چاه به سهولت امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ لذا تمایل تحقیق به روی دستگاه‌های آزمایشگاهی که امنیت بیشتری دارند، روزبه‌روز بیشتر می‌شود. در این مطالعه از دستگاه شبیه‌ساز حفاری جهت‌دار دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات ۹ تست تعیین زاویه بحرانی

شماره تست	اندازه کنده توزیعی (میلی متر)	جرم کنده توزیعی (گرم)	دانشپسته (گرم بر سانتی متر مکعبی)	نوع سازند	زوایای تست شده (درجه)
۹ تا ۱	۰/۵-۱۵-۲	۵۰۰	۲۱۶۴	ماسه سنگی	۴۰-۲۵-۰ -۷۰-۵۵-۴۵ ۹۰-۸۵-۷۵

تمام ذرات استفاده شده در طول ۹ تست اول یکسان بوده است. شکل ۳ نمودار توزیع اندازه ذرات استفاده شده را نشان می‌دهد. بعد از تعیین زاویه بحرانی، ۷ تست دیگر مطابق جدول ۳، جهت مطالعه پارامترهای مؤثر انجام شد.



شکل ۳. توزیع اندازه ذرات در ۹ تست اول



شکل ۲. شبیه‌ساز حفاری جهت‌دار

#### نحوه انجام تست

تست‌های این مطالعه با بخش شبیه‌ساز حفاری جهت‌دار دستگاه انجام شده است. در ابتدا زوایای گوناگونی جهت بررسی و تعیین بحرانی‌ترین زاویه مشخص شد، و در نهایت با انجام ۹ تست که در جدول شماره ۲ ذکر شده است زاویه ۵۵ درجه به عنوان زاویه بحرانی معلوم شد.

جدول ۳. مشخصات پارامترهای اثرگذار در تست‌های

انجام‌شده در زاویه بحرانی

شماره تست	اندازه کنده تزریقی (میلی‌متر)	قطر متوسط (میلی‌متر)	جرم کنده تزریقی (گرم)	دانشیه (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	نوع سازند	
۵	۰/۵۹۵-۲	۱/۲۶۷۵	۵۰۰	۲/۶۴	ماسه	
۱۰	۱/۶۸-۳	۱/۸۴	۵۰۰	۲/۶۴		
۱۱	۰/۸۴۱-۱/۶۸	۱/۲۶۰	۵۰۰	۲/۶۴		
۱۲	۰/۵۹۵-۰/۸۴۱	۰/۷۱۸	۵۰۰	۲/۶۴		
۱۳	۰/۵۹۵-۲	۱/۲۶۷۵	۱۰۰۰	۲/۶۴		
۱۴	کوچک‌تر از ۰/۵۹۵	۰/۳۷۲	۵۰۰	۲/۶۴		
۱۵	۰/۵۹۵-۲	۱/۲۶۷۵	۱۰۰۰	۲/۵۴		آهک
۱۶	کوچک‌تر از ۰/۵۹۵	۰/۳۷۲	۵۰۰	۲/۳۱		سیس

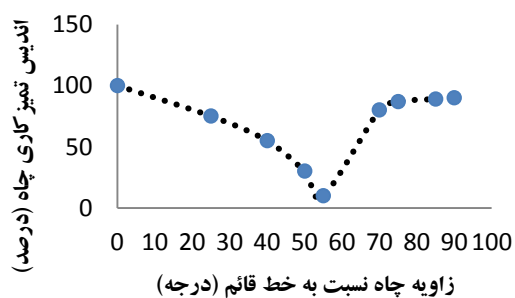
شکل ۴ دو نمونه از ماسه و آهک در نظر گرفته شده، که دارای یک نوع توزیع اندازه ذره بوده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمونه‌ای از آهک و ماسه استفاده شده در تست‌های ۵ و ۱۵

۲. نتایج حاصله از تست‌های آزمایشگاهی

همان‌گونه که از اندازه‌گیری شاخص تمیزکاری چاه در شکل ۵ مشخص است؛ زاویه ۵۵ درجه به‌عنوان زاویه بحرانی در تمیزکاری چاه تشخیص داده شد.



شکل ۵. تعیین زاویه بحرانی در تمیزکاری چاه

در بررسی نتایج حاصل از تست‌ها، جدول ۴ که شامل نقطه شروع، پایان، طول بستر و اندیس تمیزکاری چاه می‌باشد، ذکر شده است.

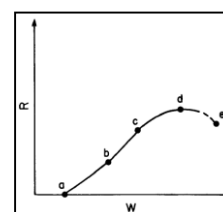
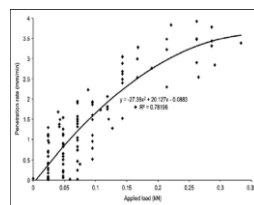


جدول شماره ۴. نتایج حاصل از تست‌ها

شماره تست	اندیس	طول بستر (اینچ)	نقطه نهایی بستر (اینچ)	نقطه شروع بستر (اینچ)
۵	۵/۱۲	۱۵	۲۵	۱۰
۱۰	۴/۴۱	۱۴	۱۴	۰
۱۱	۴/..	۱۸	۱۸	۰
۱۲	۶/۵۸	۱۹	۲۴	۵
۱۳	۷/۵۵	۳۰	۳۵	۵
۱۴	۲۰/۶۲	۷۰	۷۰	۰
۱۵	۶/۹۴	۲۵	۲۵	۰
۱۶	۲۲/۷۱	۷۰	۷۰	۰

### ۳. بحث به روی نتایج

با افزایش حجم کنده‌های تزریقی هرچند در ابتدا ممکن است این تصور اشتباه پیش آید که شاخص تمیزکاری بهبود یافته است؛ ولی درعین حال نباید فراموش شود که حجم کندهایی که موجب بروز گیر می‌شوند نیز در فضای دالیزی افزایش یافته است. به عبارتی دیگر در مورد اثر حجم کنده‌های تزریقی در طول تست، که به نوعی معادل‌سازی اثر نرخ حفاری است؛ می‌توان این‌گونه بیان داشت که همان‌گونه که در شکل ۶ مشخص است با افزایش وزن روی مته ( $W$ ) این میزان ( $R$ ) افزایش خواهد یافت.



الف) رابطه نرخ حفاری ( $R$ ) و وزن روی سرمته ( $W$ )  
ب) رابطه ارائه شده توسط پکر بین نرخ نفوذ و وزن روی سرمته (Peker & Helvacı, 2011)

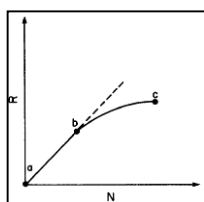
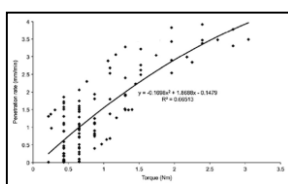
### شکل ۶. رابطه نرخ حفاری و وزن روی سرمته

تا زمانی که وزن آستانه بر روی سرمته (نقطه  $a$ ) اعمال نشود، نرخ نفوذ قابل توجهی ایجاد نمی‌شود. توجه به این نکته ضروری است که نیرو یا وزن آستانه لازم برای آغاز حفاری،

به وسیله رسم نمودار نرخ حفاری به صورت تابعی از وزن سرمته بر قطر سرمته  $\frac{W}{D_b}$  و برون‌یابی کردن نرخ حفاری صفر، محاسبه می‌شود. حال با افزایش مقادیر وزن اعمالی بر سرمته، نرخ نفوذ افزایش می‌یابد (قسمت  $ab$ ). در وزن‌های متوسط، غالباً یک منحنی خطی مشاهده می‌شود (قسمت  $bc$ ). به هر حال در وزن‌های زیاد، با افزایش وزن سرمته، نرخ نفوذ به مقدار ناچیزی بهبود می‌یابد (قسمت  $cd$ ). در بعضی موارد، با افزایش وزن اعمال شده بر سرمته به مقدار خیلی زیاد، نرخ نفوذ کاهش می‌یابد (قسمت  $de$ ). این‌گونه رفتار را غالباً دفن شدن سرمته می‌نامند.

پاسخ ضعیف نرخ نفوذ در وزن‌های زیاد، معمولاً به پایین آمدن شاخص تمیزکاری چاه در هنگام تولید بیش از حد کنده‌های حفاری نسبت داده می‌شود. در وزن و نرخ نفوذ پایین، سطح هیدرولیکی مورد نیاز برای پاک‌سازی چاه کم است (شکل ۶ الف) (Bourgoyne, 1986). همان‌طور که وزن بیشتری روی سرمته اعمال می‌شود، خرده‌های حفاری نیز سریع‌تر تولید می‌شوند. سرانجام در جایی که خرده‌های حفاری به سرعتی که تولید می‌شوند، برداشته نشوند، نقطه تدفین رخ می‌دهد. اگر سطح هیدرولیکی افزایش داده شود، در وزن و نرخ نفوذ بالاتری، تدفین سرمته رخ می‌دهد (شکل ۶ ب) (Bourgoyne, 1986).

از دیگر پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ و حجم کنده‌های تولیدی، میزان چرخش رشته حفاری است. نمودار رایج نرخ نفوذ بر حسب سرعت دورانی ( $N$ ) که با ثابت نگه‌داشتن دیگر متغیرهای حفاری به دست آمده، در شکل ۷ نشان داده شده است.



الف) نمودار ارتباط بین سرعت چرخش ( $N$ ) و نرخ نفوذ ( $R$ )  
ب) رابطه ارائه شده توسط پکر در ارتباط بین گشتاور و نرخ نفوذ (PR)

شکل ۷. ارتباط بین سرعت چرخش رشته حفاری و به عبارتی گشتاور اعمالی و نرخ نفوذ (Peker & Helvacı, 2011)




چرخش رشته حفاری را می‌توان به گونه‌های مختلفی اثرگذار دانست؛ از آنجا که با این عمل حرکتی دورانی یا شعاعی را به مؤلفه‌های سرعت ذره و سیال اضافه خواهد کرد، در طول تست مشاهده خواهد شد که شاخص تمیزکاری چاه می‌تواند از این پارامتر تأثیر پذیرد و بهبود یابد. البته نباید پارامترهای دیگر را نیز کم اهمیت دانست. سایز کنده‌ها یکی از این موارد است. در آزمایش‌های مختلف مشاهده شد که با کاهش اندازه کنده‌ها بستر ثابت تشکیل شده در ته چاه به صورت تپه‌های کوچکی درآمد که همگی دارای سرعت مشخصی به سمت خروجی بودند (شکل ۸ ج) که این پدیده برای اندازه‌های بزرگ‌تر اتفاق نمی‌افتاد.

بعد از مشخص شدن اثر نرخ نفوذ و سرعت چرخش رشته حفاری، آنچه قابل تأمل است اثر خصوصیات ظاهری کنده‌های تولیدی است. اندازه، جنس و شکل ذرات، تأثیر بسزایی بر تمیزکاری آن‌ها خواهد داشت. نحوه تأثیر اندازه کنده‌های حفاری در تست‌های شماره ۵، ۱۰، ۱۱، ۱۲ مورد بررسی قرار گرفت. این تست‌ها همگی با ماسه‌هایی انجام شده است که دارای توزیع اندازه ذرات خاصی بودند و همگی دارای دانسیته خاصی بودند.

با دقت در نمودار شکل ۹، پی خواهیم برد که یک نقطه کمینه در هنگام تست با انواع سایز دیده می‌شود. به عبارتی دیگر در بازه مش‌های بین ۱۰ تا ۳۰، در ابتدا با کاهش اندازه ذرات، اندیس تمیزکاری چاه اندکی کاهش یافته و سپس کم‌کم بالا رفته و برای مش‌های بزرگ‌تر، این شاخص با سرعت قابل‌تأملی بالا خواهد رفت. البته در باب علت این امر، می‌توان به روی میزان کرویت کنده‌ها در بازه‌های مش انتخابی متمرکز شد. هر چه بازه مشخص شده برای مش کوچک‌تر باشد، تأثیر کرویت ذرات بالا رفته و در نتیجه سخت‌تر از داخل چاه حذف خواهند شد. نمونه این استدلال را می‌توان در دو بازه مش‌های بین ۱۰ تا ۱۲ (تست شماره ۱۰) و ۱۲ تا ۲۰ (تست شماره ۱۱) دانست.

با کاهش اندازه کنده‌ها، اندیس تمیزکاری چاه، طول بستر کنده‌ها و همچنین نقطه انتهایی بستر به صورت ملایم، از الگ شماره ۲۰ با قطر متوسط ۸۴۱ میکرون، به الگ شماره ۳۰ با قطر متوسط ۵۹۵ میکرون، افزایش یافته و سپس با سرعت بالایی تا الگ شماره ۴۰ که دارای قطر متوسط ۴۰۰ میکرون است، افزایش خواهد یافت (شکل‌های ۹ و ۱۰).

می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که معمولاً در سرعت‌های دورانی پایین، با افزایش سرعت دورانی، نرخ نفوذ به صورت خطی زیاد می‌شود. در سرعت‌های دورانی بالاتر، با افزایش سرعت، پاسخ نرخ نفوذ کم می‌شود. پاسخ ضعیف نرخ نفوذ در سرعت دورانی بالا، معمولاً به بازده ضعیف پاک‌سازی ته چاه نسبت داده می‌شود (Bourgoyne, 1986).

الف	تزیق ۵۰۰ گرم کنده به داخل فضای دالیری	
ب	تزیق ۱۰۰۰ گرم کنده به فضای دالیری	
ج	اثر چرخش رشته حفاری بر تشکیل بسترهای تپه‌ای شکل سیلیس	

شکل ۸. اثر نرخ نفوذ و چرخش رشته حفاری بر شاخص تمیزکاری چاه

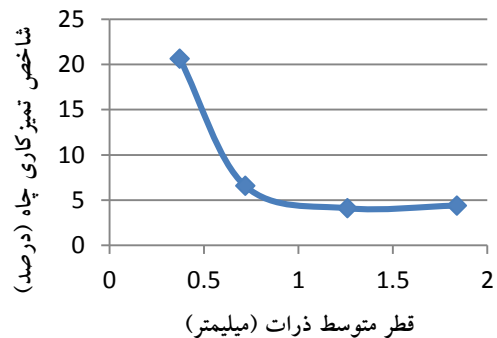
همان‌گونه که در جدول ۴ دیده می‌شود کنده‌هایی با دانسیته بیشتر ولی اندازه کوچک‌تر اندیس تمیزکاری بهتری را می‌توانند نسبت به ذراتی با دانسیته کمتر ولی سایز بزرگ‌تر داشته باشند. می‌توان نتیجه گرفت که صرف توجه به دانسیته سازند نمی‌تواند شاخص خوبی برای تصمیم‌گیری در زمینه تمیزکاری چاه باشد. در دانسیته‌های نزدیک به هم اثر اندازه و شکل کنده‌ها بسیار مهم‌تر از نوع سازند است.

مقایسه‌ای بین نتایج حاصله از شاخص تمیزکاری سنگ‌های آهکی، ماسه‌ای و سیلیسی نشان می‌دهد که در شرایط یکسان برای اندازه‌های میکرونیزه، هر چه دانسیته سنگ پایین‌تر باشد، شاخص تمیزکاری بیشتر خواهد بود؛ ولی در سایزهای متوسط برای دانسیته‌های نزدیک به هم، نوع سازند معیار مناسبی نیست و در تحلیل نتایج، اثر کرویت و شکل کنده‌ها مهم‌تر از چگالی است.

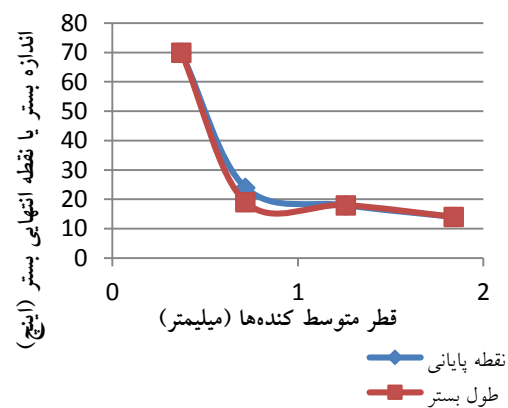
#### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعه تجربی انجام شده، این‌گونه می‌توان نتیجه گرفت که:

۱. زاویه بحرانی یا به عبارتی محتمل‌ترین زاویه وقوع گیر لوله‌های حفاری، در دستگاه شبیه‌ساز حفاری جهت‌دار دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۵۵ درجه است.
۲. افزایش حجم کنده‌های تزریقی که معادل با اعمال وزن بیشتر بر سرته است، هر چند شاخص تمیزکاری چاه را بهبود می‌دهد ولی در عین حال شانس وقوع گیر را نیز افزایش خواهد داد؛ پس صرف اتکا به شاخص تمیزکاری چاه نمی‌تواند عامل تصمیم‌سازی باشد.
۳. پاسخ ضعیف نرخ نفوذ در سرعت دورانی بالا، معمولاً به شاخص پایین تمیزکاری چاه، نسبت داده می‌شود.
۴. با کاهش اندازه کنده‌ها بستر ثابت تشکیل شده در ته چاه به صورت تپه‌های کوچکی درآمد که همگی دارای سرعت مشخصی به سمت خروجی بودند، که این پدیده برای اندازه‌های بزرگ‌تر اتفاق نمی‌افتاد.
۵. هر چه بازه مشخص شده برای مش کوچک‌تر باشد، تأثیر کرویت ذرات بالا رفته و در نتیجه سخت‌تر از داخل چاه حذف خواهند شد.
۶. با کاهش اندازه کنده‌ها، اندیس تمیزکاری چاه، طول بستر کنده‌ها و همچنین نقطه انتهایی بستر به صورت



شکل ۹. شاخص تمیزکاری چاه در قطر متوسط بازه الک انتخابی



شکل ۱۰. اندازه و نقطه انتهایی بستر کنده‌ها

نکته مهم دیگری که در این مطالعه می‌توان به آن اشاره نمود این است که ترکیب چندین مش می‌تواند تمیزکاری بهتری را نسبت به اکثریت آن‌ها به صورت مجزا داشته باشد؛ که این اتفاق را نیز می‌توان با مقایسه تست‌های ۵ و ۱۰ و ۱۱ به دست آورد و آن را با نیروهای مؤثر بر سطح ذرات ناهمگون و کروی مرتبط کرد.

پیشنهاد می‌شود که در هر کجا که امکان‌پذیر است، از سرته‌های الماسه به جای سرته‌های سه کاج استفاده نمایند تا اندازه ذرات به سمت پودری شدن رفته و توسط جریان‌های سیال راحت‌تر تمیز شوند. البته جوانب دیگری از کار اعم از عدم تغییر در خواص رئولوژیکی سیال حفاری نیز باید لحاظ شود. این نکته را نباید فراموش نمود که نقش ناظر عملیات و رفتار در بهبود این امر، بسیار ضروری است.

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر نرخ نفوذ سرمته و خواص ظاهری کنده‌های حفاری بر شاخص تمیزکاری چاه‌های جهت‌دار

حداکثر نرخ نفوذ	$m/s$	$V_{max}$
گشتاور پیچشی	$KNm$	$T$
سرعت چرخش	$Rounds/sec$	$N$
وزن روی سرمته	$KN$	$F$
قطر مته	$M$	$D$
سختی بینگهام	-	$\Gamma$
نرخ نفوذ	$m/s$	$R$
سختی سنگ	-	$S$
سطح کنده شده توسط سرمته	$m^2$	$A$
وزن روی سرمته	$KN$	$WOB$
دور رشته	$Rounds/min$	$RPM$
نرخ نفوذ	$m/s$	$PR$
برآیند نیروهای برآ	$KN$	$F_{net,lift}$
نیروی برآ	$KN$	$F_L$
وزن ظاهری ذره	$KN$	$W$
زاویه چاه از خط قائم	$degree$	$\alpha$
نیروی برآیندی غلطاننده	$KN$	$F_{net,rolling}$
نیروی درگ	$KN$	$F_D$
زاویه بستر ته‌نشین شده	$degree$	$\phi$
برآیند نیروهای واندروالسی	$KN$	$F_{vanR}$
قطر کنده	$m$	$d_p$
دانسیتته کنده	$Kg/m^3$	$\rho_p$
دانسیتته گل	$Kg/m^3$	$\rho$
ضریب درگ	-	$C_{Drag}$
ضریب برآ	-	$C_{Lift}$
سرعت جریان سیال در آنالوس	$m/s$	$v_x$
نقطه واروی سیال حفاری	$lb/100ft^2$	$\tau_y$

ملایم از الک شماره ۲۰ با قطر متوسط ۸۴۱ میکرون، به الک شماره ۳۰ با قطر متوسط ۵۹۵ میکرون، افزایش یافته و سپس با سرعت بالایی تا الک شماره ۴۰ که دارای قطر متوسط ۴۰۰ میکرون است، افزایش خواهد یافت.

۷. ترکیب چندین مش می‌تواند تمیزکاری بهتری را نسبت به اکثریت آن‌ها به صورت مجزا داشته باشد، که آن را می‌توان با نیروهای مؤثر بر سطح ذرات ناهمگون و کروی مرتبط دانست.

۸. صرف توجه به دانسیته سازند نمی‌تواند شاخص خوبی برای تصمیم‌گیری در زمینه تمیزکاری چاه باشد. در دانسیته‌های نزدیک به هم اثر اندازه و شکل کنده‌ها بسیار مهم‌تر از نوع سازند است. در شرایط یکسان برای اندازه‌های میکرونیزه، هر چه دانسیته سنگ پایین‌تر باشد شاخص تمیزکاری بیشتر خواهد بود، ولی در سایزهای متوسط برای دانسیته‌های نزدیک به هم، نوع سازند معیار مناسبی نیست و در تحلیل نتایج، اثر کروی و شکل کنده‌ها مهم‌تر از چگالی است.

۵. سیاهه‌ی نمادها

جدول ۵. سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
$D$	$Ft$	عمق چاه
$a_8$ تا $a_1$	-	ثابت‌ها
$g_p$	$psi$	گرادیان فشار منفذی
$\rho_c$	$\frac{ft}{lb_m}$	چگالی جریانی معادل
$(\frac{W}{d_b})_t$	$\frac{gal}{1000 \frac{lb_f}{in}}$	وزن آستانه اعمال شده بر سرمته به ازای هر اینچ از قطر سرمته
$h$	-	کسر کندی دندان
$F_j$	$lb_f$	نیروی برخورد
$W$	$KN$	هیدرولیکی زیر سرمته
$W_{max}$	$KN$	وزن روی سرمته
	$KN$	حداکثر مقدار وزن روی سرمته
$V$	$m/s$	نرخ نفوذ لحظه‌ای

## ۶. مراجع

- Baldino, S., Ozbayoglu, E., Miska, S., Takach, N., May, R., & Clapper D. (2015). Cuttings settling and slip velocity evaluation in synthetic drilling fluids. Paper presented at the 12th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition in Ravenna, Italy.
- Bizhani, M., & Kuru. E. (2015). Hole Cleaning Performance of Water vs. Polymer-Based Fluids Under Turbulent Flow Conditions. Paper presented at the SPE, Alberta, Canada.
- Bourgoyne, A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., & Young, F.S. (1986). Applied drilling engineering.
- Bingham, G. (1965). A new approach to interpreting rock drillability. Technical manual reprint, oil and gas journal, 1965. P93.
- Davidson, J., Dearing, H., Jones, C.S., & Shipman, J. (2016). Improved Drilling Performance in Extended Horizontals Using Clean Brines in the Williston Basin. Paper presented at the IADC/SPE, Texas, USA.
- Egenti, N.B. (2014). Understanding Drill-cuttings Transportation in Deviated and Horizontal Wells. Paper presented at the SPE-172835-MS, Lagos, Nigeria.
- Fazaelizadeh, M. (2016). Advanced drilling bit course, Tehran, Iran.
- Kim, Y.J., Yoon, C.H., Park, Y.C., Park, J., Kang, J.S., Kwon, S.K., & Hwang, Y.K. (2008, January). A Study on the Rotating Flow in an Annulus. In The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Mitchell, R.F., & Miska, S. (2011). Fundamentals of drilling engineering, Society of Petroleum Engineers.
- Mingqin Duan, S.M., Yu, M., Takach, N., Ahmed, R.M., & Zettner, a.C. (2009). Critical Conditions for Effective Sand-Sized-Solids Transport in Horizontal and High-Angle Wells. SPE Drilling & Completion.
- Mingqin Duan, S.M., Yu, M., Takach, N., Ahmed, R.M., & Zettner, a.C.(2007). Critical Conditions for Effective Sand-Sized Solids Transport in Horizontal and High-Angle Wells. Paper presented at the SPE 106707, Oklahoma, U.S.A.
- Mingqin Duan, S.M., Yu, M., Takach, N., Ahmed, R.M., & Zettner, a.C.(2008). Transport of Small Cuttings in Extended-Reach Drilling. SPE.
- Mohammadsalehi, M., & Malekzadeh, N. (2011, January). Optimization of hole cleaning and cutting removal in vertical, deviated and horizontal wells. In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Nazari, T. (2010). Review of Cuttings Transport in Directional Well Drilling- Systematic Approach. Paper presented at the SPE, Anaheim, California, USA.
- Nabe'ei, M. (2015) Drilling bit engineering. Drilling employee group.

- Peker, S.M., & Helvacı, S.S. (2011). Solid-liquid two phase flow. Elsevier.
- Pfleider, E.P., & Blake, R.L. (1953). Research on the cutting action of the diamond drill bit. *Mining Engng*, 5, 187-195.
- Rabia, H. (1985). A unified prediction model for percussive and rotary drilling. *Mining Science and Technology*, 2(3), 207-216.
- Rodriguez Corredor, F.E., Bizhani, M., & Kuru, E. (2016). Experimental investigation of cuttings bed erosion in horizontal wells using water and drag reducing fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 147, 129-142.
- Skalle, P. (2010). *Drilling fluid engineering*. Bookboon.Chicago.
- Skalle, P. (2013). *Drilling fluid engineering*. Bookboon. Chicago.
- Somerton, W.H. (1959). A laboratory study of rock breakage by rotary drilling.
- Teale, R. (1965, March). The concept of specific energy in rock drilling. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 2, No. 1, pp. 57-73). Pergamon.
- Valluri, S.G., Miska, S.Z., Yu, M., Ahmed, R.M., & Takach, N. (2006, January). Experimental study of effective hole cleaning using "sweeps" in horizontal wellbores. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Wang, Z.m., Guo, X.l., Li, M., & Hong, Y.k. (2009). Effect of drill pipe rotation on borehole cleaning for extended reach well. *Journal of Hydrodynamics*, 21(3).