

مقاله پژوهشی

توسعه مدل تحلیلی برهم کنش سنگ و سرمته با در نظر گرفتن تنش‌های برجا و مورد کاوی برای یکی از میادین نفتی ایران

حبیب الله ظفریان^۱؛ محمدجواد عامری شهرابی^{۲*}؛ یاسر ارجمند^۳؛ سید مرتضی میرعباسی^۴

۱. دانشجوی دکتری تخصصی؛ دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۳. دانشجوی دکترای تخصصی، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۴. دانشجوی دکترای تخصصی، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.280758.1137

واژگان کلیدی	چکیده
برهم کنش سنگ و سرمته، زاویه شکست سنگ، نیروی شکست سنگ، مدل تحلیلی، سرمته دندان الماسی مصنوعی.	امروزه استفاده از سرمته‌های دندان الماسی مصنوعی (PDC) ^۱ در صنعت نفت به‌ویژه در حفاری‌های عمیق گسترش یافته است. از همین رو، با توجه به قیمت بالای این نوع سرمته‌ها، شناخت و تحلیل مدل برهم کنش این نوع سرمته با سنگ حائز اهمیت فراوان است. تاکنون مدل‌های ریاضی زیادی برای تبیین برهم کنش سنگ و سرمته ارائه شده است که یکی از مهم‌ترین این مدل‌ها، مدل تحلیلی نیشیماتسو می‌باشد. تمامی مدل‌های موجود، برهم کنش سنگ و سرمته را در شرایط محیطی مدل‌سازی کرده‌اند؛ حال آنکه در حفاری واقعی، سنگ تحت تنش‌های برجای زمین نیز قرار دارد. از این رو میزان نیروی اعمالی توسط سرمته برای کندن سنگ بسیار متفاوت از شرایط محیطی خواهد بود. تلاش‌های بعدی برای توسعه مدل نیشیماتسو در شرایط حفاری، فرض کرده‌اند که سنگ در همان زاویه‌ای دچار شکست می‌شود که در شرایط محیطی می‌شکند؛ این در حالی است که با تغییر عمق و در نتیجه تغییر تنش‌های برجای وارده به سنگ، زاویه شکست متفاوت خواهد بود. در این مقاله، با حذف این فرض ساده شونده، مدل تحلیلی نیشیماتسو برای شکست سنگ، مبتنی بر شرایط واقعی حفاری توسعه داده شده و برای داده‌های یکی از میادین نفتی ایران، مورد کاوی شده است. نتایج نشان می‌دهد حذف این فرض ساده شونده منجر به کاهش خطای ۱۵-۲۰٪ در محاسبه زاویه شکست و نیروی لازم برای شکست می‌شود.

۱. پیشگفتار

کم و سازندهای سخت شده است. سرمته‌های حفاری از نوع دندان الماسی مصنوعی، با اعمال نیروی برشی، سنگ را می‌شکنند که این امر تأثیر بسزایی در بهبود روند حفاری دارد. اگرچه حفاری با این سرمته‌ها با مشکلات فراوانی مانند پدیده توپی شدن سرمته در حفاری سازندهای نرم و یا افزایش سایش در سرمته به هنگام حفاری سازندهای سخت مواجه است. با توجه به کاربرد فراوان و روزافزون سرمته‌های دندان الماسی مصنوعی در صنعت حفاری، یافتن روشی جهت تعیین سرمته بهینه دندان الماسی مصنوعی جهت حفر یک چاه،

عملیات حفاری یکی از مهم‌ترین بخش‌های اکتشاف و تولید نفت و گاز می‌باشد به‌گونه‌ای که بخش عظیمی از هزینه‌های تولید را به خود اختصاص داده است. یکی از موارد کاهش هزینه‌های جاری در عملیات‌های حفاری، انتخاب سرمته حفاری مناسب یا به عبارتی بهینه‌سازی انتخاب سرمته حفاری جهت حفر یک چاه می‌باشد. توسعه انواع عملیات‌های حفاری، منجر به افزایش کاربرد سرمته‌های دندان الماسی در اعماق

¹ Polycrystalline diamond compact

مانند گلوکا (۱۹۹۳)، درحالی که برخی نیز سعی در بهبود و تکمیل مدل ارائه شده داشته‌اند، مانند داگرین (۲۰۰۱)، پرندر (۲۰۱۲) [۵، ۶].

ریچارد (۲۰۰۷) مطالعه‌ای روی همین موضوع انجام داد. دستگاهی که برای تست این موضوع مورد استفاده قرار می‌گیرد عمدتاً دستگاه مقاومت سنگ^۴ است. ریچارد دو رابطه متفاوت برای ارتباط نیروی کندن با عمق مبتنی بر رژیم شکست (ترد^۵ یا نرم^۶) ارائه کرد:

رژیم نرم: در این رژیم که در حفاری در اعماق پایین اتفاق می‌افتد، لایه برداری بدون ایجاد شکاف انجام شده و رابطه بین نیرو و عمق، خطی است.

رژیم ترد: در این رژیم که در حفاری در اعماق بالا اتفاق می‌افتد، لایه برداری با ایجاد شکاف انجام شده و در واقع سنگ لب پر^۷ می‌شود. در این حالت رابطه بین نیرو و عمق، غیرخطی (تابع جذر عمق کندن) است [۷].

تمام مدل‌های تحلیلی ارائه شده برای پیش‌بینی برهم کنش سنگ و سرمته، بر پایه مدل‌سازی برهم کنش فلز با فلز می‌باشند. یکی از اولین مدل‌های تحلیلی ارائه شده جهت استخراج این زاویه در فلز، مرجانت (۱۹۴۵) می‌باشد. وی رابطه‌ای بین مقدار نیروی شکست و سایر پارامترهای شکست ارائه داد که منجر به دست آمدن زاویه بهینه شکست فلز گردید [۸]. تحقیقات بعدی این مدل‌سازی را توسعه دادند.

نیشیماتسو (۱۹۷۲)، با استفاده از مدل مرجانت، یکی از قدیمی‌ترین و قدرتمندترین مدل‌های تحلیلی برهم کنش سنگ و سرمته را ارائه داده است. در این مدل‌سازی ابتدا نیروی وارده از سمت دندان سرمته به قطعه بر روی صفحه برش، تصویر شده و سپس با استفاده از معیار شکست مور-کلمب، رابطه‌ای تحلیلی برای توضیح رابطه بین نیرو و عمق کندن استخراج شده است. در اینجا هدف، یافتن رابطه‌ای بین نیروی کلی وارد بر سنگ با عمق نفوذ است. در این مدل، نیروی شکست تابعی از مقاومت برشی سنگ، زاویه اصطکاک داخلی سنگ، عمق کندن، زاویه دندان سرمته با سنگ و می‌باشد. نیشیماتسو مدل خود را با استفاده از داده‌های

امری ضروری به نظر می‌رسد. به‌طور کلی برای انتخاب سرمته مناسب برای حفاری، مدل‌سازی دقیق برهم کنش سنگ و سرمته امری ضروری می‌باشد [۱].

مفهوم برهم کنش سنگ و سرمته در حفاری انحرافی برای اولین بار توسط چیثام و هو (۱۹۸۱) معرفی شد. آن‌ها یک رابطه خطی بین اجزای نیروی سرمته و ماتریس نرخ حفاری^۲ برقرار کردند به صورتی که برتری واضحی در بین سهم مجزای غیرایزوتروپی سنگ و غیر ایزوتروپی سرمته (عاملی که توانایی حفاری محوری و جانبی سرمته را نشان می‌دهد) ایجاد شد [۲]. این مدل بعدها توسط هو (۱۹۸۸-۱۹۸۹-۱۹۹۵-۱۹۹۷) تکمیل شد و او یک رابطه خطی کلی برای برهم کنش سنگ و سرمته ارائه داد که گشتاورهای اعمالی بر سرمته و ماتریس نرخ گردش^۳ را در نظر می‌گرفت. با این توضیح، قانون برهم کنش سنگ و سرمته بایستی بتواند رابطه بین نیروها و گشتاورهای اعمالی توسط سرمته به سنگ را با عمق و جهت نفوذ بیان نماید [۳].

پژوهش‌های فراوانی جهت یافتن مدل مناسب برهم کنش سنگ و سرمته انجام شده است. به‌طور کلی دو رویکرد در تبیین رابطه برهم کنش سنگ و سرمته وجود دارد: رویکرد تجربی و رویکرد تحلیلی. به دلیل آنکه مطالعه حاضر، متمرکز بر مدل‌سازی تحلیلی برهم کنش سنگ و سرمته است؛ تنها به توضیح دو مورد از مهم‌ترین مدل‌سازی‌های تجربی پرداخته شده و در ادامه مدل‌های تحلیلی به‌طور کامل مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

دتورنی و دفورنی (۱۹۹۲)، مدلی نیمه تجربی از برهم کنش سنگ و سرمته را توسعه دادند که پایه و اساس مطالعات بعدی را تشکیل داد. فرض اصلی این مدل بر این اساس است که شکست سنگ در دو مرحله رخ می‌دهد: اول برخورد اصطکاکی سرمته و سنگ در یک صفحه از سنگ و دوم، کندن سنگ. بر اساس این مدل، کندن سنگ وابسته به عمق حفاری بوده ولی زاویه برخورد اصطکاکی سنگ و سرمته در طول حفاری تغییر نمی‌یابد [۴].

مطالعات بسیاری نتایج ذکر شده را مورد انتقاد قرار داده‌اند

² drilling rate vector

³ turning rate vector

⁴ RSD (Rock Strength Device)

⁵ Brittle

⁶ Ductile

⁷ Chipping

از اطلاعات یکی از میادین غرب کشور، نتایج حاصله از مدل جدید ارائه شده با نتایج حاصل از مدل های پیشین مقایسه شده که حاکی از بهبود ۱۵ - ۲۰٪ مقادیر محاسبه شده برای زوایای شکست سنگ و نیروی شکست در شرایط ته چاهی می باشد.

۲. مدل ریاضی برهم کنش سنگ و سرمته

در این بخش، یک نمونه دوبعدی از مدل تحلیلی برهم کنش سنگ و سرمته بیان گردیده است. روش به دست آوردن مدل، مشابه با روش نیشیماتسو می باشد، با این تفاوت که در این روش اثر تنش های برجا نیز در مدل سازی لحاظ گردیده است. به عنوان اولین قدم در مدل سازی، تنش های حاصله از نیروی سرمته و تنش های برجا به دست آمده و مطابق اصل جمع آثار با یکدیگر جمع شده اند. سپس تنش عمودی و برشی موجود در صفحه شکست سنگ محاسبه شده است. در نهایت با جایگذاری تنش های حاصله در معیار شکست مور-کلمب، رابطه نیروی شکست سنگ (نیروی سرمته) برحسب خواص سنگ، سرمته و تنش های برجای منطقه به دست آمده است. معادله نهایی برای محاسبه نیروی شکست سنگ پس از مشتق گیری از رابطه نیروی سرمته نسبت به زاویه شکست سنگ و به دست آوردن نقطه اکسترمم آن حاصل گردیده است.

۱.۲ به دست آوردن تنش های اعمالی به صفحه شکست

برای به دست آوردن رابطه برهم کنش سنگ و سرمته در شرایط ته چاهی، باید تنش های اعمال شده به یک المان مکعبی از سنگ در شرایط ته چاهی را محاسبه نمود. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده، تنش های اعمال شده به یک المان مکعبی از سنگ در شرایط ته چاهی به دو دسته تقسیم می شوند: دسته اول عبارت اند از تنش های وارده ناشی از نیروی سرمته به المان سنگ. دسته دوم نیز تنش های برجای اعمالی به سنگ می باشند که به یک تنش عمودی (تنش روباره) و دو تنش افقی بیشینه و کمینه تقسیم می شوند که در مدل سازی دوبعدی تنش های افقی اعمالی با یکدیگر برابر در نظر گرفته می شوند. همچنین، در این مدل سازی، تنش عمودی اعمالی به المان سنگ برابر با ستون هیدرواستاتیکی موجود در چاه در نظر گرفته می شود. در

آزمایشگاهی اعتبار سنجی نمود. در ادامه نیشیماتسو توانست صحت این روابط را با انجام تست های آزمایشگاهی در شرایط محیطی (در غیاب تنش های برجای زمین) به اثبات برساند [۹].

ژانتئو لی و کن ایچی ایتاکورا (۲۰۱۲) مبتنی بر مدل نیشیماتسو و با تقسیم بندی فرایندهای مؤثر در حفاری به دو فرایند کندن^۸ و فیدینگ^۹ توانستند رابطه ای کامل تر بین نیروی اعمالی از سرمته با پارامترهای سنگ و سرمته ارائه کنند. همچنین مبتنی بر این مدل، رابطه ای تحلیلی برای محاسبه تنش تک محوره فشاری ارائه کردند [۱۰].

در نهایت ژین لینگ (۲۰۱۹)، مدلی کامل تر جهت پیش بینی نیروی شکست در سرمته های دندان الماسی مصنوعی در شرایط حفاری (در حضور تنش های برجای زمین) ارائه نمود. او ابتداء مقدار نیروی وارده به المان سنگ را با استفاده از مدل نیشیماتسو به دست آورد و سپس این نیرو را با مقادیر تنش های برجای موجود جمع نمود که منجر به شکل گیری مدل جدیدی شد. مدل ارائه شده توسط ژین لینگ، یک فرض ساده شونده مهم را دربردارد که منجر به اختلاف نتایج این مدل با آنچه در واقعیت اتفاق می افتد خواهد شد. این فرض، برابر قرار دادن زاویه شکست سنگ در شرایط محیطی با زاویه شکست آن در شرایط ته چاهی می باشد. به نوعی می توان گفت، در مدل ارائه شده توسط ژین لینگ، فرض شده که تنش های برجا اثری بر روی تغییر زاویه شکست سنگ نداشته بلکه صرفاً در میزان کل نیروی اعمالی به سنگ اثرگذار می باشند [۱۱].

با توجه به آنچه گفته شد، به جز مدل ارائه شده توسط ژین لینگ، هیچ یک از مدل های تحلیلی مطرح شده، برهم کنش سنگ و سرمته را در شرایط واقعی حفاری (حضور تنش های برجای زمین) مدل سازی نکرده اند. همچنین مدلی که توسط ژین لینگ ارائه شده است نیز از تأثیر تنش های برجا بر روی زاویه شکست سنگ صرف نظر نموده است و در واقع مدل کاملی ارائه نکرده است. در این پژوهش، فرض ساده شونده مدل های قبل، (برابری زاویه شکست سنگ در سطح و ته چاه) حذف شده و مدل تحلیلی کامل تری جهت پیش بینی برهم کنش سنگ سرمته ارائه گردیده است. در انتها، با استفاده

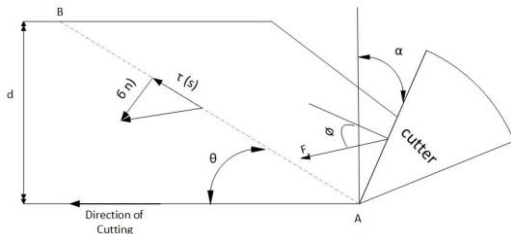
⁸ cutting

⁹ feeding

توزیع شده بر روی سنگ، ناشی از نیروی شکست F به دست می‌آیند. حال با به دست آوردن مقادیر P در راستاهای عمود و موازی با سطح سنگ، همچنین در نظر گیری $\lambda = 0$ مقادیر تنش‌های عمودی و افقی بیشینه بر روی خط (AB) به صورت معادلات (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند.

$$\sigma_n = (n + 1) \cdot \frac{\sin \theta}{d \cdot w} \cdot F \cdot \sin(\theta - \alpha) + \varphi \quad (4)$$

$$\tau_s = (n + 1) \cdot \frac{\sin \theta}{d \cdot w} \cdot F \cdot \cos(\theta - \alpha) + \varphi \quad (5)$$



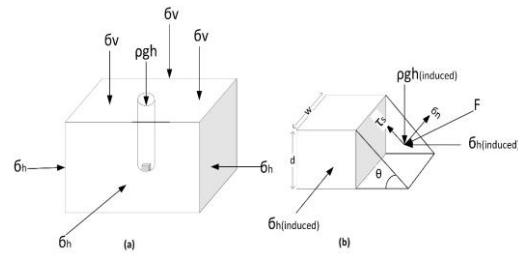
شکل ۲. شماتیک سنگ در حال حفاری توسط سرمته

ب- تنش‌های اعمالی ناشی از تنش‌های برجا

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، تنش‌های برجای اعمالی به المان سنگ به سه بخش تقسیم می‌شوند: تنش عمودی، افقی کمینه و افقی بیشینه برای به دست آوردن تنش حاصل از تنش‌های ذکر شده بر روی المان سنگ، فرض می‌شود شدت اثر تنش‌های برجا در نقطه‌ای که المان سنگ قرار گرفته برابر با نقاط دور دست است، بدین معنی که تنش اعمال شده به سنگ برابر با تنش‌های افقی کمینه و بیشینه می‌باشد. همچنین تنش عمودی اعمال شده به سنگ برابر با فشار ناشی از ستون هیدرواستاتیک موجود در چاه می‌باشد. این فرض با استفاده از شبیه‌سازی توزیع تنش‌ها تایید می‌شود؛ بنابراین، تانسور مرتبه اول تنش‌های برجای منطقه بر روی المان سنگ به صورت معادله (۶) تعریف می‌شود.

در معادله فوق σ_1 برابر با تنش افقی اعمال شده (با در نظر گیری برابری تنش‌های بیشینه و کمینه افقی) و σ_3 تنش عمودی اعمالی به سنگ می‌باشد که برابر است با فشار ناشی از ستون هیدرواستاتیک سیال حفاری موجود در چاه. با دوران تانسور تنش‌های مذکور به میزان ۹۰ درجه پادساعت‌گرد، تنش‌های عمودی و برشی حاصله بر روی صفحه

ادامه تمامی تنش‌های ذکر شده محاسبه می‌شوند.



شکل ۱. (a) تنش‌های مؤثر در شرایط ته چاهی - (b) تنش‌های وارده بر المان سنگ در شرایط ته چاهی

الف- تنش‌های اعمالی ناشی از نیروی سرمته

برای این بخش از مدل نیشیماتسو و نام‌گذاری‌های آن استفاده شده تا بتوان مقایسه بهتری میان مدل جدید ارائه شده و مدل نیشیماتسو داشت. با توجه به شکل ۲، سرمته به اندازه عمق (d) درون سنگ نفوذ کرده و با محور عمود بر سنگ زاویه (α) را می‌سازد که موجب شکست سنگ بر اساس مدل دو مرحله ای نیشیماتسو شده است. نیروی سرمته موجب تشکیل یک تنش عمودی و یک تنش افقی بر روی صفحه شکست سنگ با زاویه (θ) نسبت به افق می‌شود. با توجه به مدل‌سازی دوبعدی، صفحه شکست را خط (AB) در نظر گرفته و با استفاده از معادله (۱)، می‌توان تنش را بر روی این صفحه به دست آورد [۹].

$$P = P_0 \left(\frac{d}{\sin \theta} - \lambda \right)^n \quad (1)$$

در معادله (۱)، P_0 ثابتی است که از روی تعادل نیروهای وارد بر المان سنگ به دست آمده است. λ فاصله نقطه A نسبت به یک نقطه دلخواه بر روی محور AB و n اندیس توزیع تنش در سنگ می‌باشد. در ادامه، با فرض اینکه جهت تنش در راستای خط AB ثابت باقی می‌ماند، مجموع نیروی حاصل از تنش‌های وارده در محدوده خط AB (P)، باید با نیروی شکست سنگ در تعادل باشد (مطابق معادله (۲)).

$$F + P_0 \int_0^{\frac{d}{\sin \theta}} \left(\frac{d}{\sin \theta} - \lambda \right)^n d\lambda = 0 \quad (2)$$

با انتگرال‌گیری از جمله دوم معادله (۲)، مقدار P_0 به صورت معادله (۳) قابل محاسبه می‌باشد.

$$P_0 = -(n + 1) \left(\frac{d}{\sin \theta} \right)^{n+1} \cdot F \quad (3)$$

با جایگذاری معادله (۳) در معادله (۱) مقادیر تنش‌های

شکست را می توان به صورت معادلات (۷) و (۸) نوشت.

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$\sigma_n = \sigma_1 \cdot \sin^2 \theta + \sigma_3 \cdot \cos^2 \theta \quad (۷)$$

$$\tau_s = (\sigma_3 - \sigma_1) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (۸)$$

(۱۰) به دست آورد.

$$\sigma_{n_{total}} = \sigma_1 \cdot \sin^2 \theta + \sigma_3 \cdot \cos^2 \theta + (n+1) \cdot \frac{\sin \theta}{d \cdot w} \cdot F \cdot \sin(\theta - \alpha + \varphi) \quad (۹)$$

$$\tau_{s_{total}} = (\sigma_3 - \sigma_1) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + (n+1) \cdot \frac{\sin \theta}{d \cdot w} \cdot F \cdot \cos(\theta - \alpha + \varphi) \quad (۱۰)$$

بنابراین، تنش اعمالی عمودی و برشی به صفحه شکست سنگ را با جمع نمودن تنش های حاصل از تنش های برجا و تنش های حاصل از نیروی سرمته، به صورت معادلات (۹) و

۲.۲ محاسبه زاویه و نیروی شکست سنگ

با جایگذاری تنش های مؤثر به دست آمده در انتهای مرحله قبل درون معیار شکست مور کلمب و بازنویسی آن، معادله (۱۲) که نمایانگر تنش حاصل از نیروی سرمته بر روی سنگ می باشد، به دست می آید.

$$\tau_s = S_s + \tan k \cdot \sigma_n \quad (۱۱)$$

$$F = -\frac{d \cdot w}{(n+1) \cdot \sin \theta} \cdot \frac{1}{\left[\frac{S_s + \tan k \cdot (\sigma_3 \cdot \cos^2 \theta + \sigma_1 \cdot \sin^2 \theta - P) + \sin 2\theta \left(\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \right)}{\tan k \cdot \sin(\theta - \alpha + \varphi) - \cos(\theta - \alpha + \varphi)} \right]} \quad (۱۲)$$

دو دسته تنش های ذکر شده، قبل از مشتق گیری و یافتن زاویه شکست تأکید دارد. این نکته در مدل های پیشین از جمله مدل ارائه شده توسط ژین لینگ رعایت نشده است. این مدل همانند مدل نیشیماتسو، زاویه شکست سنگ بدون لحاظ نمودن اثر تنش های برجا (شرایط ته چاهی) محاسبه گردیده است، لذا می توان گفت هر دو مدل نیشیماتسو و ژین لینگ از یک رابطه جهت محاسبه زاویه شکست سنگ بهره می گیرند (معادله (۱۳)).

همان طور که مشخص است، نیروی شکست (نیروی سرمته) تابعی از زاویه شکست سنگ می باشد. بر اساس معیار مور کلمب، سنگ در کمترین زاویه ممکن برای نیروی سرمته می شکند، بنابراین جهت یافتن زاویه شکست سنگ باید از معادله (۱۲) نسبت به زاویه شکست سنگ مشتق گرفته و آن را برابر با صفر قرار داد. باید توجه داشت که زاویه شکست سنگ وابسته به هر دو دسته تنش های ناشی از نیروی سرمته و تنش های برجای اعمال شده می باشد که بر ضرورت جمع

$$\theta_{Nishimatsu} = \theta_{Xin ling} = \frac{(2k+1)\pi}{4} - \frac{(k-\alpha+\varphi)}{2}; \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (۱۳)$$

$$\theta_{presented model} = \text{Atan} \left[\frac{-\sin(k-\alpha+\varphi) + \sqrt{1 + \frac{(\sigma_3 - \sigma_1) \cdot \sin(-\alpha+\varphi) \cdot \cos(k-\alpha+\varphi)}{\sin k \cdot (\sigma_3 - P_p) + \cos k \cdot S_s}}}{(\sigma_3 - \sigma_1) \cdot \sin(-\alpha+\varphi) + \cos(k-\alpha+\varphi) \cdot [\sin k \cdot (\sigma_3 - P_p) + \cos k \cdot S_s]} \right] \quad (۱۴)$$

مکانیکی سنگ (زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت برشی)، برهم کنش سنگ و سرمته (زاویه بین سنگ و سرمته) و تنش های برجای اعمالی (افقی و عمودی) می باشد. جهت سهولت در نمایش معادله (۱۴)، بازنویسی آن بر حسب تانژانت زاویه شکست به صورت معادله (۱۵) استخراج گردیده است.

همان طور که در معادله (۱۴) مشخص است، اگر از اثر ناشی از تنش های برجای اعمالی و فشار منفذی سنگ صرف نظر شود، زاویه شکست محاسبه شده در معادله برابر با زاویه شکست محاسبه شده در مدل نیشیماتسو می باشد. همچنین مشخص است که زاویه شکست سنگ تابعی از خواص

$$F = -\frac{d.w}{2(n+1)} \cdot \left[\frac{(\sigma_3 - \sigma_1)[2 \tan \theta \cdot \cos k + (1 - \tan^2 \theta) \cdot \sin k] + (1 + \tan^2 \theta)[2 \cos k \cdot S_s + \sin k \cdot (\sigma_3 + \sigma_1 - P)]}{\tan^2 \theta \cdot \sin(k - \alpha + \varphi) - \tan \theta \cdot \cos(k - \alpha + \varphi)} \right] \quad (15)$$

ایران صورت پذیرفته است.

مورد مطالعه شده، یکی از میدانی نفتی ایران واقع در جنوب غرب کشور می باشد. این میدان حاوی ۴۲۱۲ میلیون بشکه نفت در جا و ۶۳۵ میلیون بشکه نفت قابل استحصال می باشد. جدول ۱ نمایانگر اطلاعات ژئومکانیکی این میدان می باشد. نمودار ۱ نشان دهنده تغییرات تنش های برجا بر حسب عمق در این میدان می باشد که به طریق مدل سازی مکانیکی زمین منطقه به دست آمده است.

۳. نتایج و بحث پیرامون آن ها

در این پژوهش، یک مدل جدید جهت پیش بینی نیروی شکست سنگ، با در نظر گرفتن اثر تنش های برجای منطقه (شرایط واقعی حفاری)، ارائه شد. در ادامه، نتایج حاصل از هر یک از مدل های نیشیماتسو، ژین لینگ و روش ارائه شده در این مطالعه برای محاسبه نیرو و زاویه شکست سنگ، مورد مقایسه قرار گرفته اند. این بررسی بر روی یکی از میدانی نفتی

جدول ۱. خواص مکانیکی مخزن مورد مطالعه [۱۲].

فشار منفذی (MPa)	نسبت پواسون	ضریب بیوت	زاویه اصطکاک داخلی	مدول الاستیسیته دینامیک (GPa)	مدول الاستیسیته استاتیکی (GPa)	UCS (MPa)
47.0	0.302	0.7	44.96	41.49	10.37	47.035

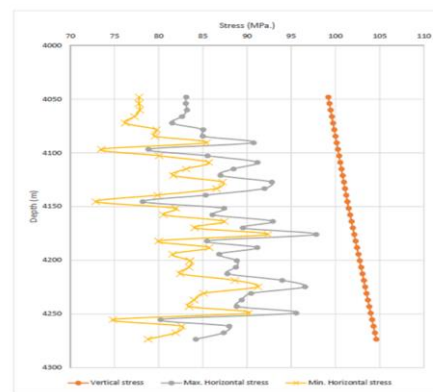
(۱۴) نمایانگر زاویه شکست محاسبه شده بر اساس مدل جدید ارائه شده می باشد. بر اساس مدل نیشیماتسو، زاویه اصطکاک داخلی سنگ (φ) و اندیس توزیع تنش (n)، هر دو بر روی زاویه شکست سنگ تأثیرگذار می باشند، لذا روابطی تجربی از سوی نیشیماتسو جهت محاسبه پارامترهای فوق الذکر مطرح گردیده است. ضمناً، برای مخزن مورد مطالعه در این پژوهش، مقدار سطح مقطع سنگ در حال حفاری برابر با ۱۴ میلی متر مربع در نظر گرفته شده است ($D=2, W=7 \text{ mm}$).

نمودار ۲ نمایانگر زوایای شکست سنگ محاسبه شده در عمق ۴۰۰۰ متری حفاری مخزن مورد مطالعه می باشد. نمودار آبی نشان دهنده تغییرات زاویه شکست بر حسب زاویه بین سرمته و سنگ بر اساس مدل ارائه شده توسط نیشیماتسو بوده، در حالی که نمودار زرد رنگ نمایانگر همین روند بر اساس مدل ارائه شده در این پژوهش می باشد.

نمودار ۳ نمایانگر مقایسه انجام شده بین زوایای شکست محاسبه شده بر اساس مدل جدید ارائه شده برای دو عمق متفاوت ۴۰۰۰ و ۴۵۰۰ متری می باشد. همان طور که پیش بینی می شود، با افزایش عمق، میزان خطای زوایای شکست محاسبه شده توسط مدل نیشیماتسو افزایش می یابد که علت آن نیز افزایش تنش های برجای موجود در منطقه می باشد. همچنین مطابق نمودار، در زوایای دندان سرمته بین

با توجه به عدم دسترسی به نمونه مغزه از مخزن مورد مطالعه، مدول الاستیسیته استاتیکی گزارش شده در جدول ۱ از روی مدول الاستیسیته دینامیک، مطابق با معادله (۱۶) به دست آمده است.

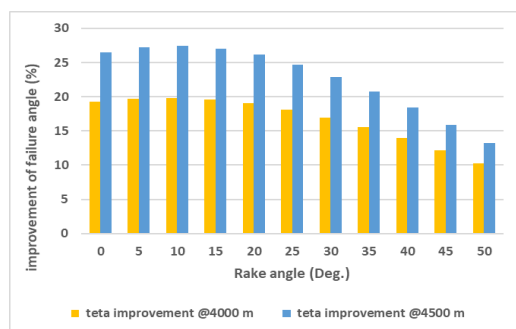
$$E_s = 0.4145E_{dyn} - 1.0593 \quad (16)$$



نمودار ۱. تغییرات تنش های برجای مخزن مورد مطالعه بر حسب عمق

۱.۳ مقایسه زاویه شکست سنگ

همان طور که پیش تر ذکر شد، معادله (۱۳)، زاویه شکست سنگ را بر اساس مدل نیشیماتسو محاسبه کرده و معادله

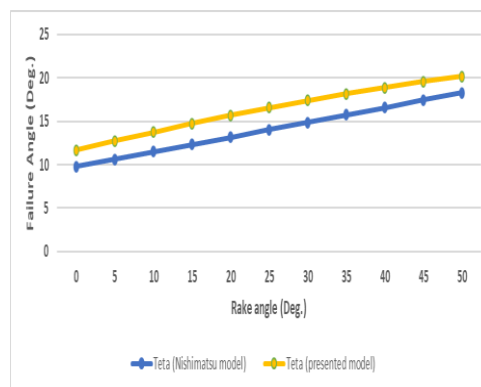


نمودار ۳. میزان بهبود محاسبات زاویه شکست سنگ بر اساس مدل ارائه شده در این تحقیق

۲.۳ مقایسه نیروی شکست سنگ

بر اساس روابط موجود جهت محاسبه زاویه شکست سنگ در هر یک از مدل‌های نیشیماتسو، ژین لینگ و مدل جدید مطرح شده، معادلات (۱۷)، (۱۸) و (۱۹)، به ترتیب بیانگر نیروی شکست سنگ در مدل‌های مذکور می‌باشند.

۲۵-۰ درجه، مقدار تفاوت زاویه شکست محاسبه شده در دو عمق مختلف تقریباً با یکدیگر برابر هستند، اما با افزایش زاویه دندان سرمته، اختلاف زوایای شکست محاسبه شده به تدریج کاهش می‌یابد.



نمودار ۴. زاویه شکست سنگ بر حسب زاویه بین سنگ و سرمته در حفاری در عمق ۴۰۰۰ متری

$$F_{Nish.} = \frac{2 \cdot d \cdot w \cdot S_s}{(n+1)} \cdot \frac{\cos k}{1 - \sin(k - \alpha + \varphi)} \quad (17)$$

$$F_{xin} = d \cdot w \cdot \left[\frac{\sigma_3 [1 - \cos(\varphi_k + \theta + \varphi)] + \frac{2\tau_m}{n+1} \cdot \frac{\cos(\varphi_k) \sin\left[\frac{1}{2}(\theta + \varphi - \varphi_k)\right]}{\cos\left[\frac{1}{2}(\theta + \varphi + \varphi_k)\right]} + \sigma_1 [1 + \cos(\varphi_k + \theta + \varphi)]}{\sin(\theta + \varphi) - \sin(\varphi_k) - \cos(\theta + \varphi) \sin(\theta + \varphi + \varphi_k)} \right] \quad (18)$$

$$F_{modet} = \frac{d \cdot w}{2(n+1)} \cdot \left[\frac{(\sigma_3 - \sigma_1) [2 \tan \theta \cdot \cos k + (1 - \tan^2 \theta) \cdot \sin k] + (1 + \tan^2 \theta) [2 \cos k \cdot S_s + \sin k \cdot (\sigma_3 + \sigma_1 - P)]}{\tan \theta \cdot \cos(k - \alpha + \varphi) - \tan^2 \theta \cdot \sin(k - \alpha + \varphi)} \right] \quad (19)$$

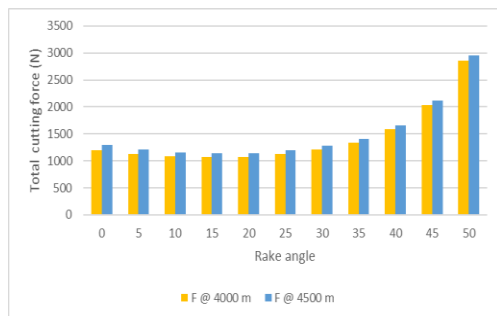
می‌باشد. باید توجه داشت که به علت اثر معکوس مقدار زاویه شکست بر مقدار نیروی شکست، با وجود اینکه مدل‌های قبل مقدار زوایای شکست را کمتر از حد واقعی تخمین می‌زنند، اما این مدل‌ها مقدار نیروی شکست سنگ را بیش از حد معقول نسبت به مدل ارائه شده تخمین می‌زنند.

همان‌طور که در نتایج نمایش داده شد، نمودار نیروی شکست سنگ بر حسب زاویه سنگ و سرمته در هر سه مدل ذکر شده به صورت یک ناودیس (دارای تقعر) می‌باشد. این ناودیس می‌تواند نقطه حداقل نیروی شکست بر حسب زاویه سنگ و سرمته را ارائه دهد، بنابراین منجر به شناخت نقطه بهینه زاویه سنگ و سرمته جهت طراحی مناسب سرمته خواهد شد. مطابق نمودار، بازه بهینه زاویه سنگ و سرمته بین ۱۰-۲۵ درجه می‌باشد که با واقعیات میدانی و تجربیات ثبت شده نیز تطابق

در ادامه مقدار نیروی شکست محاسبه شده در هر مدل با استفاده از اطلاعات مخزن مورد مطالعه، در نمودار نمایش داده شده است.

با توجه به نمودار، در محاسبه نیروی شکست سنگ، مدل نیشیماتسو دقت کمتری نسبت به مدل ارائه شده توسط ژین لینگ و مدل مطالعه حاضر دارد، چراکه در این مدل مقدار نیروی مورد نیاز جهت غلبه بر تنش‌های برجای اعمال شده به سنگ در نظر گرفته نمی‌شود. باید گفت، مدل ارائه شده توسط ژین لینگ نیز در محاسبه نیروی شکست دارای دقت کافی نمی‌باشد به گونه‌ای که نیروی شکست را بین ۷-۴۰٪ بیشتر نسبت به مدل جدید ارائه شده محاسبه می‌کند. برای زوایای سرمته و سنگ معمول (بین ۱۰-۲۵ درجه) این اختلاف مابین ۱۵-۲۰٪

به صورت ناگهانی افزایش می یابد. در پایان همان طور که انتظار می رود، در مدل جدید ارائه شده، با افزایش عمق و افزایش تنش های برجا، مقدار نیروی شکست مورد نیاز برای سنگ نیز افزایش می یابد (مطابق نمودار ۶).



نمودار ۶. اثر تغییر عمق بر روی نیروی شکست سنگ در اعماق مختلف

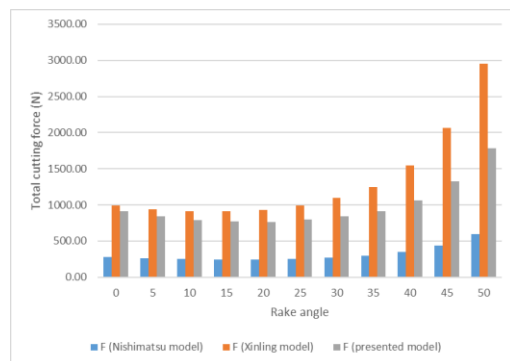
۴. نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش تحلیلی جهت استخراج برهم کنش سنگ و سرتمه در شرایط واقعی حفاری (با در نظر گیری اثر تنش های برجا) توسعه داده شد. هدف اصلی این اقدام، لحاظ نمودن اثر تنش های برجا بر زاویه شکست سنگ به صورت تحلیلی می باشد. در نتیجه این کار، رابطه ای مؤثر جهت به دست آوردن نیروی شکست سنگ در شرایط واقعی حفاری استخراج گردید. نتایج مقایسه مدل جدید ارائه شده با سایر مدل های قبلی با استفاده از اطلاعات یکی از مخازن نفتی ایران، حاکی از بهبود نتایج به دست آمده توسط مدل جدید می باشد. مهم ترین نتایج به دست آمده از این مقایسه عبارتند از:

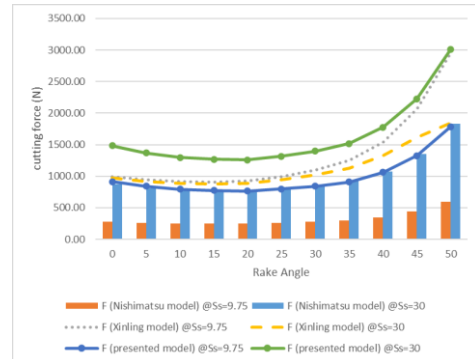
با در نظر گرفتن اثر تنش های برجا، فرض برابر بودن زاویه شکست سنگ در شرایط محیطی با مقدار آن در شرایط ته چاهی صحیح نیست. بر اساس اطلاعات مخزن مورد مطالعه، مدل ارائه شده در این مقاله می تواند نتایج حاصل از محاسبات زاویه شکست سنگ و نیروی شکست سنگ را به میزان ۱۵-٪ نسبت به مقادیر به دست آمده از سایر مدل ها در شرایط ته چاهی بهبود بخشد.

زاویه شکست سنگ علاوه بر خواص مکانیکی سنگ و سرتمه، تابع زاویه اصطکاک داخلی سنگ، مقاومت برشی سنگ، زاویه بین سنگ و سرتمه و نیز تابعی از پارامترهای ژئومکانیکی (فشار منفذی، تنش های بر جای افقی و ستون هیدرو استاتیکی سیال

دارد. هر سه مدل این واقعیت را نمایان می سازند اگرچه این مورد در مدل جدید ارائه شده و مدل نیشیماتسو واضح تر بیان شده است. برداشت اولیه از این مورد عبارت است از تفاوت بین مقادیر نیروی شکست محاسبه شده در بازه بهینه زاویه سنگ و سرتمه نسبت به سایر زوایا می باشد، اما مدل مطرح شده توسط ژین لینگ تغییر خاصی را نسبت به مقادیر نیروی شکست در بازه ۰-۲۵ درجه زاویه سنگ و سرتمه نمایش نمی دهد.



نمودار ۴. نیروی شکست محاسبه شده برای هر یک از مدل های مطرح شده بر حسب زاویه بین سرتمه و سنگ در عمق ۴۰۰۰ متری



نمودار ۵. تأثیر مقاومت برشی سنگ بر روی نیروی شکست

نمودار ۵، نمایانگر اثر مقاومت برشی سنگ بر روی نیروی شکست آن می باشد. مطابق نمودار، در مدل نیشیماتسو و مدل جدید ارائه شده، مقدار نیروی شکست محاسبه شده با افزایش مقاومت برشی سنگ، افزایش می یابد. خلاف این نتیجه، در مدل مطرح شده توسط ژین لینگ اتفاق افتاده است به گونه ای که نیروی شکست مورد نیاز برای سنگ در زوایای کم تقریباً مستقل از تغییرات زاویه دندان سرتمه بوده و با افزایش زیاد این زاویه،

حفری در چاه) می باشد. زاویه شکست سنگ و نیروی شکست سنگ هردو تابعی از عمق حفاری و زاویه دندان سرمت می باشند. با افزایش عمق، تنش های برجا افزایش یافته که باعث ایجاد خطای بزرگ تری در محاسبات مربوط به زاویه و نیروی شکست سنگ با استفاده از سایر روش ها خواهد شد؛ بنابراین استفاده از روش های دیگر مانند ژین لینگ در اعماق کم (تنش های برجا کم) منجر به اختلاف زیاد بین نتایج مدل و واقعیت نخواهد شد اما با افزایش عمق، این اختلاف زیاد شده و پیشنهاد می شود که از مدل جدید ارائه شده جهت محاسبه نیروی شکست استفاده نمود. اگرچه اختلاف بین نتایج حاصل از مدل جدید ارائه شده و سایر مدل ها در محاسبه نیروی شکست، با افزایش زاویه دندان سرمت کاهش می یابد؛ با این وجود این اختلاف در زاویه های متعارف سنگ و سرمت نسبتاً زیاد است. بر اساس مدل ارائه شده، حداقل نیروی شکست مورد نیاز برای شکست سنگ در بازه زاویه سنگ و سرمت بین ۱۰ الی ۲۰ درجه رخ می دهد؛ بنابراین محدوده مناسب برای طراحی سرمت های دندان الماسی مصنوعی در این بازه می باشد.

۵. مراجع

- Bellin F, D.A., King W, Thigpen M, The current state of PDC bit technology. World Oil, 2010.
- Cheatham, J., J. B. and Ho, C. Y., A theoretical model for directional drilling tendency of a drill bit in anisotropic rock. 1981, Rice University: Houston, Texas.
- Ho, H.-S., Prediction of drilling trajectory in directional wells via a new rock-bit interaction model., in SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 1988, SPE: Houston, Texas. p. 407-418.
- Detournay, E.a.D., P., phenomenological model for the drilling action of drag bits. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992. 29(1): p. 13-23.
- Dagrain, F., Detournay, E., and Richard, T., Influence of cutter geometry in rock cutting. Rock Mechanics in the National Interest, 2001. 1-2: p. 927-933.
- Perner, L., Detournay, E., and Downton, G. C., Bit/rock interface laws in directional drilling. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences., 2012. 51: p. 81-90.
- Richard, T., Gernay, C., and Detournay, E., A simplified model to explore the root cause of stick-slip vibrations in drilling systems with drag bits. Journal of Sound and Vibration, 2007. 305(3): p. 432-456.
- Merchant, Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. J Appl Phys, 1945. 16(5): p. 267-275.
- Nishimatsu, Y., THE MECHANICS OF ROCK CUTTING. Int. J. Rock Mech. Min. Sci, 1972. 9: p. 261-270.
- ZhantaoLi, K.-i.I., An analytical drilling model of drag bits for evaluation of rock strength. Soils and Foundations, 2012. 52(2): p. 216-227.
- Xin Ling, W.L., Hui Pu, Development of a Cutting Force Model for a Single PDC Cutter Based on the Rock Stress State. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019.
- Behnoudfar, P., Drilling Depleted Reservoirs by Using of Thermo-Poro Elastic Model, in Petroleum Engineering Department. 2016, Amirkabir U niversity of Technology (Tehran Polytechnic).