



ارائه یک مدل توام ژئومکانیکی - هیدرودینامیکی برای پیش‌بینی ماسه‌دهی

حسن قاسم‌زاده^۱؛ سیدامیرالدین صدرنژاد^۲؛ احمدعلی خدائی اردبیلی^{۳*}

۱- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، گروه خاک و پی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

۲- استاد؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، گروه خاک و پی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشجوی دکتری؛ مهندسی عمران، مکانیک خاک و پی، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۱/۰۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۴/۲۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2017.50047

| واژگان کلیدی | چکیده |
|---|---|
| پیش‌بینی ماسه‌دهی معیار ماسه‌دهی تونل مشبک‌کاری پیاده‌سازی عددی روش اجزای محدود | در صنعت نفت به تولید ذرات یا تکه‌های به هم چسبیده ماسه همراه با سیالات مخزن، ماسه‌دهی گفته می‌شود. در ماسه‌دهی از چاه‌های نفت معمولاً دو مکانیسم اصلی دخیل است. مکانیسم اول ناپایداری مکانیکی و خرد شدن سنگ در مجاورت گمانه چاه بوده و مکانیسم بعدی، ناپایداری هیدرودینامیکی ناشی از اعمال نیروی تراوش بر مصالح خرد شده است. در این مقاله با در نظر گرفتن هر دو مکانیسم مزبور، یک مدل عددی برای پیش‌بینی شروع و میزان ماسه‌دهی پیشنهاد شده است. پیاده‌سازی مدل در یک برنامه اجزای محدود با توام‌سازی صریح معادلات جریان سیال و تغییر شکل اسکلت جامد تشریح شده است. مدل پیشنهادی با حذف المان‌های ارضاء کننده‌ی معیار ماسه‌دهی و همچنین تکه سنگ‌های نسبتاً بزرگ جدا شده از مخزن، قادر به نمایش تغییرات هندسی حفره در اثر ماسه‌دهی است. این مدل با استفاده از نتایج چاپ شده یک آزمایش ماسه‌دهی بر روی مغزه مشبک‌کاری شده از یک سنگ مخزن، کالیبره شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مدل در قالب شروع و میزان ماسه‌دهی، انطباق مناسبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بیانگر قابلیت استفاده از آن در تحلیل ماسه‌دهی چاه‌های نفت است. |

۱. پیش‌گفتار

طی حفاری و آماده‌سازی چاه‌های نفت و گاز، آسیب‌هایی به مصالح اطراف گمانه چاه وارد می‌شود که عمدتاً ناشی از عملکرد تجهیزات و باز توزیع تنش‌های برجا است. در ادامه با شروع برداشت که با کاهش فشار حفره‌ای در ته چاه همراه است؛ ضمن تشدید آسیب‌ها نیروهای هیدرودینامیکی نیز به مصالح وارد می‌شود. در این مرحله اگر نیروهای ناشی از تراوش سیال بر نیروهای نگهدارنده ذرات ماسه غلبه نماید؛ ماسه‌دهی رخ داده و ذرات ماسه یا تکه‌های خرد شده ماسه‌سنگ همراه با سیالات مخزن وارد گمانه چاه می‌شوند.

ماسه‌دهی می‌تواند منجر به ریزش دیواره چاه و یا انسداد مشبک‌کاری‌ها شده و برداشت از چاه را مختل نماید (Wang

et al., 2016). همچنین سایش خطوط لوله و تجهیزات مختلف، کاهش نرخ برداشت از چاه و سایر اثرات زیست‌محیطی، می‌تواند هزینه‌های تولید را تا حد زیادی افزایش دهد (Ranjith *et al.*, 2014). امروزه حدود ۴۰ درصد نفت و گاز تولیدی از مخازن ماسه‌سنگی استحصال می‌شود، ولی ۹۰ درصد چاه‌های هیدروکربوری در این نوع مخازن حفر شده‌اند (Ranjith *et al.*, 2014). و از این میان، ۳۰ درصد مخازن مستعد وقوع ماسه‌دهی هستند (Walton *et al.*, 2002). لذا در صنعت نفت پیش‌بینی شروع ماسه‌دهی و نیز تخمین میزان آن حائز اهمیت بالایی است. لازم به ذکر است که تعدادی از مخازن نفتی ایران هم دارای پتانسیل ماسه‌دهی بوده و به همین دلیل در ایران نیز بررسی این موضوع مورد توجه صنعت نفت بوده است (Pak *et al.*,

* تهران؛ خیابان ولیعصر (عج)، تقاطع میرداماد؛ دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران؛ کدپستی: ۱۹۹۶۷۱۵۴۳۳؛ رایانامه: khodaie@dena.kntu.ac.ir

(2015).

مدلی ارائه کردند که در آن ماسه‌دهی صرفاً به صورت افزایش تدریجی تخلخل مصالح و در قالب پدیده فرسایش داخلی بیان شده بود. وان و وانگ (Wang & Wan, 2004) با افزودن اثرات ناشی از تغییر شکل‌های سنگ این مدل را ارتقاء دادند. گراوانیس و همکاران (Gravanis et al., 2015) نیز مدلی ارائه کردند که در آن نرم‌شوندگی مصالح تحت اثر آسیب‌های مکانیکی و افزایش تخلخل در نظر گرفته شده بود.

در بسیاری از مطالعات عددی ماسه‌دهی، از معیار کرنش خمیری بحرانی به دلیل سادگی ذاتی آن استفاده شده است (مانند Wang et al., 2016) و (Gui et al., 2016)). کاستی بزرگ این معیار، وابستگی کامل پاسخ ماسه‌دهی به کرنش‌های اسکلت جامد و عدم لحاظ کردن اثرات جریان سیال در ماسه‌دهی است. لذا نتایج مدل تنها برای محدوده‌های سرعت جریان به کار رفته در آزمایش ماسه‌دهی معتبر خواهد بود (Nouri et al., 2006).

در این مقاله با ارتقاء معیار کرنش پلاستیک بحرانی، یک معیار کاربردی برای ماسه‌دهی ارائه شده که در آن هر دو جنبه ناپایداری ژئومکانیکی و هیدرومکانیکی در وقوع ماسه‌دهی در نظر گرفته شده است. سپس در ادامه، پیاده‌سازی معیار پیشنهادی در چارچوب روش اجزای محدود تشریح شده و به کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل عددی پرداخته شده است.

۲. مکانیسم ماسه‌دهی

ماسه‌دهی فرایندی دو مرحله‌ای شامل ناپایداری مکانیکی و هیدرودینامیکی سنگ مخزن است (Moosavi, 2015) و (Vardoulakis et al., 1996)). در مرحله نخست، آسیب‌های وارده طی حفاری و آماده‌سازی چاه همراه با تغییر تنش‌های مؤثر ناشی از افت فشار مخزن منجر به متلاشی شدن سنگ در اطراف حفرات تولید (گمانه چاه یا تونل مشبک کاری) می‌شود. ذرات حاصل از گسیختگی سنگ در محل خود باقی می‌مانند تا زمانی که نیروهای کششی ناشی از جریان سیالات قادر به ناپایداری‌سازی و حمل آن‌ها به درون گمانه چاه شود. بدون اعمال آسیب‌های مکانیکی، نیروهای ناشی از تراوش حتی قادر به جدا کردن ذرات ماسه از ماسه‌سنگی با مقاومت فشاری یک مگا پاسکال نیز نمی‌باشند (Sanfilippo et al., 1997). در شکل ۱، تصویر میکروسکوپی از ناحیه گسیختگی تحت آزمایش

در مدل‌های پیش‌بینی ماسه‌دهی باید از یک معیار وقوع ماسه‌دهی استفاده شود. این معیارها را می‌توان به چهار گروه شامل معیارهای مبتنی بر گسیختگی برشی-کششی، معیار گرادیان فشار بحرانی، معیارهای کرنش پلاستیک بحرانی و معیارهای مبتنی بر فرسایش طبقه‌بندی کرد.

موریتا و همکاران (Morita et al., 1989b) یک مدل ماسه‌دهی ارائه کردند که در آن گسیختگی برشی ناشی از ترکیب تنش‌های برجا و افت فشار حفره‌ای و یا گسیختگی کششی ناشی از گرادیان فشار حفره‌ای عامل وقوع ماسه‌دهی در نظر گرفته شده بود. نوری و همکاران (Nouri et al., 2006) ضمن استفاده از این معیار نشان دادند که استفاده از یک مدل رفتاری الاستوپلاستیک با قابلیت نرم‌شوندگی و حذف المان‌های ارضاء کننده معیار ماسه‌دهی، از ملزومات شبیه‌سازی عددی پدیده ماسه‌دهی است. این معیار در قالب تعادل نیروهای وارده بر المان‌های دیواره حفره نیز بیان شده است (Kim et al., 2012).

براتلی و ریزنز (Bratli & Risnes, 1981) یک معیار ماسه‌دهی بر مبنای گرادیان فشار حفره‌ای ارائه کردند که در آن فروریزی پوسته داخلی حفرات با رسیدن گرادیان فشار حفره‌ای به مقاومت فشاری تک محوری مصالح رخ می‌دهد. نوری و همکاران (Nouri et al., 2006) نشان دادند که در این معیار لازم است از مقاومت فشاری تک محوری مصالح خرد شده استفاده شود.

موریتا و فاه (Morita & Fuh, 1998) یک مدل عددی برای پیش‌بینی ماسه‌دهی ارائه کردند که در آن رسیدن کرنش خمیری به کرنش پلاستیک بحرانی به عنوان شرط وقوع ماسه‌دهی در نظر گرفته شده بود. کرنش پلاستیک بحرانی با انجام آزمایش ماسه‌دهی بر روی ماسه‌سنگ قابل تعیین است. در استفاده از این معیار فرض می‌شود که مصالح با رسیدن به کرنش پلاستیک بحرانی کاملاً سست شده و توسط سیال به درون چاه حمل شوند. وانگ و پاپامیچس (Wang & Papamichos, 2012) با انجام آزمایش ماسه‌دهی نشان دادند که معیار کرنش پلاستیک بحرانی نسبت به دو معیار گسیختگی برشی-کششی و گرادیان فشار بحرانی، نتایج دقیق‌تری را حاصل می‌کند.

وردولاکیس و همکاران (Vardoulakis et al., 1996)

در ایران نیز تحقیقات فراوانی بر روی پدیده تولید ماسه انجام گرفته است. از آن جمله می‌توان به آزمایش‌های بسیار وسیع انجام گرفته در دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران اشاره کرد. به عنوان نمونه، فتاح‌پور و همکاران (Fattahpour et al., 2012a) اثرات مقاومت سنگ و اندازه حفره را در پاسخ ماسه‌دهی بررسی کرده و ضمن طبقه‌بندی تولید ماسه به گام‌های مختلف، نشان دادند که آستانه شروع ماسه‌دهی مستقل از اندازه حفره بوده ولی جرم کل ماسه تولیدی تابعی از سطوح تنش و مقاومت ماسه‌سنگ می‌باشد. فتاح‌پور و همکاران (Fattahpour et al., 2012 b) به بررسی اثرات اندازه ذرات در پاسخ ماسه‌دهی نیز پرداخته و نشان دادند که در نمونه‌های ریزدانه، در اطراف حفره نوارهای برشی ایجاد و با اتساع آن‌ها ماسه‌دهی به شکل لایه‌ای رخ می‌دهد؛ ولی در مصالح درشت‌دانه، ایجاد ریزترک‌ها منجر به تشکیل نواحی سست شده و با رسیدن تنش‌ها به یک آستانه مشخص، تولید ماسه در قالب جدا شدن منفرد یا گروهی ذرات اتفاق می‌افتد.

۳. مدل ماسه‌دهی پیشنهادی

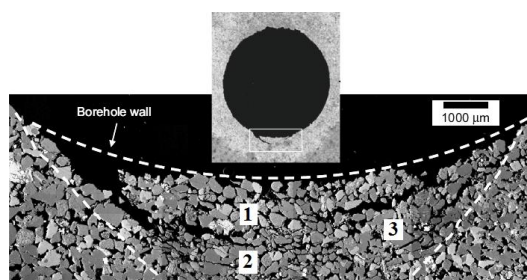
۱.۳ معیار ماسه‌دهی

در معیار کرنش پلاستیک بحرانی با صرف‌نظر کردن از مکانیسم ناپایداری هیدرودینامیکی، رسیدن اندازه کرنش‌های خمیری به یک آستانه مشخص به عنوان شرط کافی برای ماسه‌دهی در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر با ارتقاء این معیار ضمن حفظ سهولت استفاده، مدلی ارائه شده که در آن هر دو مکانیسم دخیل در ماسه‌دهی لحاظ شده است. در این مدل، شرایط لازم برای تولید ماسه به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- مصالح در اثر تنش‌های وارده دچار گسیختگی مکانیکی شوند. در این حالت پیوند بین ذرات ماسه با ایجاد ریزترک‌ها و لغزش‌های بین‌دانه‌ای تا حد زیادی از بین رفته و ماسه‌سنگ به ذرات تشکیل دهنده خود تجزیه می‌شود.
- نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از جریان سیال به اندازه کافی بزرگ باشند که بتوانند بر مقاومت پسماند مصالح غلبه کرده و ذرات ماسه را به درون چاه حمل کنند.

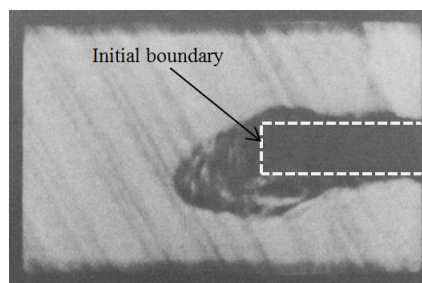
در مدل پیشنهادی، ملاک گسیختگی مکانیکی سنگ مخزن، مشابه معیار کرنش پلاستیک بحرانی رسیدن کرنش خمیری

ماسه‌دهی بر روی مغزه‌ای به شکل استوانه توخالی نشان داده شده است. در این شکل، ایجاد ترک‌ها و جدا شدن ذرات ماسه از سطوح شکستگی‌ها قابل مشاهده است. علاوه بر آن، توسعه شکاف‌ها و تلاقی آن‌ها با یکدیگر می‌تواند منجر به جدا شدن تکه‌های بزرگ‌تری از دیواره حفره شود. در این شکل، تکه سنگ مشخص شده با شماره ۱، آماده ورود به درون حفره می‌باشد.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی از مقطع یک نمونه ماسه‌سنگ تحت آزمایش ماسه‌دهی (Lee et al., 2016)

امروزه تکمیل بسیاری از چاه‌ها به روش مشبک‌کاری انجام می‌شود. در این روش سیالات مخزن از طریق تعدادی تونل که در لوله‌ی جدار، لایه سیمان و بخشی از سازند نفوذ کرده‌اند، به گمانه چاه وارد می‌شوند. در این حالت به علت سرعت بیشتر جریان در رأس تونل مشبک‌کاری، معمولاً ماسه‌دهی از این ناحیه شروع می‌شود (Wang & Wan, 2004) و (Rahmati et al., 2012). برقراری جریان در امتداد محور تونل می‌تواند منجر به افزایش قابل توجهی در میزان ماسه‌دهی شده و راستای گسترش آسیب‌ها را تحت تأثیر قرار دهد (Tronvoll & Fjær, 1994). نمونه‌ای از الگوی رشد تونل مشبک‌کاری در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. الگوی گسیختگی حفره طی آزمایش ماسه‌دهی از مشبک‌کاری (Tronvoll & Fjær, 1994)

مؤثر به یک آستانه معین در نظر گرفته شده است:

$$\epsilon^p \geq \epsilon_c^p \quad (1)$$

که در آن، ϵ_c^p کرنش پلاستیک بحرانی است که با کالیبره کردن مدل به دست می‌آید؛ ϵ^p کرنش خمیری مؤثر است که با استفاده از تانسور کرنش پلاستیک، \mathcal{E}^p ، طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود (Morita et al., 1989b):

$$\epsilon^p = \sqrt{2(\mathcal{E}^p : \mathcal{E}^p)}/3 \quad (2)$$

در شکل ۳، نیروهای وارده به یک ذره ماسه در دیواره حفره نشان داده شده است. نیروی F_r لازم برای کندن این ذره را می‌توان طبق معادله (۳)، به صورت مجموع نیروهای مورد نیاز برای وقوع گسیختگی برشی در چهار صفحه تماسی در اطراف دانه به اضافه نیروی لازم برای ایجاد گسیختگی کششی در صفحه تماسی واقع در پشت ذره تخمین زد (Fjaer et al., 2008):

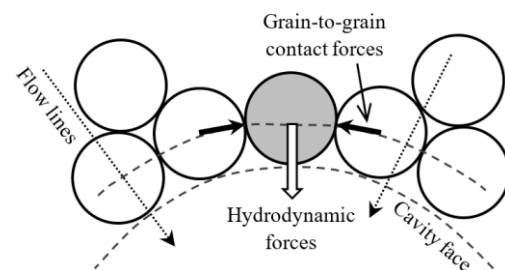
$$F_r = \pi d_g^2 [4S_0 - 2(\sigma'_\theta + \sigma'_z) \tan \varphi + T_0]/4 \quad (3)$$

که در آن، d_g قطر ذره، T_0 و S_0 به ترتیب مقاومت کششی و چسبندگی، φ زاویه اصطکاک داخلی و σ'_θ و σ'_z به ترتیب تنش‌های مؤثر محوری و مماسی در دیواره حفره هستند.

در این مدل فرض شده که چسبندگی بین ذرات بعد از تحمل کرنش پلاستیک بحرانی به طور کامل از بین برود. این حالت زمانی رخ می‌دهد که سیمان بین ذرات ترد باشد (Morita et al., 1989a). لذا رابطه (۳) به فرم ساده‌تر زیر درمی‌آید:

$$F_r = -\pi d_g^2 [\tan \varphi (\sigma'_\theta + \sigma'_z)]/2 \quad (4)$$

برای حفراتی با هندسه غیر استوانه‌ای لازم است در رابطه فوق به جای σ'_θ و σ'_z از مؤلفه‌های تنش در صفحه مماس بر دیواره حفره استفاده شود. می‌توان نشان داد که در هر نقطه بردار نرمال صفحه‌ی مزبور هم‌راستا با بردار جریان سیال می‌باشد.



شکل ۳. نیروهای وارده به ذرات ماسه در دیواره حفره

با عبور سیال از محیط متخلخل، در امتداد جریان نیروی هیدرودینامیکی بر ذرات وارد می‌شود. نیروی هیدرودینامیکی وارده به یک المان حجمی سنگ به صورت زیر قابل تخمین است (Fjaer et al., 2008):

$$F^{hd} = -\nabla p_f V \quad (5)$$

که در آن، F^{hd} بردار نیروی هیدرودینامیکی، ∇p_f بردار گرادیان فشار سیال حفره‌ای و V حجم المان است. چنانچه d_g قطر متوسط ذرات ماسه باشد، تعداد ذرات ماسه موجود در این المان حجمی، N ، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$N = 6A\Delta l(1 - \phi)/(\pi d_g^3) \quad (6)$$

در رابطه فوق، A و Δl به ترتیب سطح مقطع و ضخامت متوسط المان بوده و ϕ تخلخل مصالح است. با استفاده از روابط (۵) و (۶)، اندازه نیروی هیدرودینامیکی وارده به یک ذره‌ی ماسه، F_p ، طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$F_p = \frac{|F^{hd}|}{N} = \frac{\pi d_g^3}{6(1 - \phi)} |\nabla p_f| \quad (7)$$

که در آن، $| |$ نماد نرمال اقلیدسی است.

فرسایش یا حمل ذرات به درون چاه زمانی می‌تواند رخ بدهد که نیروی هیدرودینامیکی وارده بر ذرات جامد بزرگ‌تر از نیروهای مقاوم شود:

$$F_p > F_r \quad (8)$$

با جایگذاری روابط (۴) و (۷) در معادله (۸)، معیار وقوع فرسایش به صورت زیر به دست می‌آید:

$$|\nabla p_f| > c_r(\sigma'_\theta + \sigma'_z); c_r = \frac{3 \tan \varphi (\phi - 1)}{d_g} \quad (9)$$

مطابق رابطه (۵)، $|\nabla p_f|$ برابر با اندازه نیروی هیدرودینامیکی در واحد حجم محیط متخلخل است. بنابراین، معادله (۹) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$F^{hd} > c_r(\sigma'_\theta + \sigma'_z) \quad (10)$$

که در آن، F^{hd} اندازه نیروی هیدرودینامیکی در واحد حجم محیط متخلخل است. سمت راست نامساوی فوق، بیانگر اندازه نیروی هیدرودینامیکی بحرانی در واحد حجم بوده و می‌تواند با F_c^{hd} نشان داده شود. در این رابطه، پارامتر c_r با بعد L^{-1} ، تابعی از تخلخل، قطر متوسط و زاویه اصطکاک ذرات ماسه بوده و با در نظر گرفتن فرضیات بکار رفته، لازم است از طریق کالیبره کردن مدل تعیین شود.

به این ترتیب در معیار پیشنهادی برای وقوع ماسه‌دهی لازم است کرنش پلاستیک مؤثر و نیروی هیدرودینامیکی وارده

هر کدام از ریزصفحات به کمک مرزهای تنش- کرنش تعیین می‌شود. تانسور تنش نیز با استفاده از اصل کار مجازی قابل محاسبه است (Sadrnejad & Shakeri, 2017):

$$\sigma_{ij} = 6 \sum_{n=1}^{N_n} w_n (\sigma_N N_{ij} + \sigma_L L_{ij} + \sigma_M M_{ij})_n \quad (16)$$

در معادله بالا، σ_N تنش نرمال ریزصفحه‌ای، و σ_L و σ_M مؤلفه‌های برشی هستند. w_n ضریب وزنه و N_n تعداد نقاط مبنای گوسی است. در مطالعه حاضر به دلیل تقارن مناسب از ۲۸ نقطه مبنای گوسی بر روی نیم‌کره استفاده شده است. کسینوس‌های هادی و ضرایب وزنه این نقاط توسط بازانت و او (Bažant & Oh, 1986) استخراج شده است.

در مدل رفتاری مورد استفاده، رفتار واقعی توده سنگ مطابق رابطه زیر از طریق توام‌سازی رفتار فاز سنگ بکر و فاز درزه‌ها بیان شده است (Chen & Bažant, 2014):

$$\sigma_i = (1 - \omega)\sigma_i^{(R)} + \omega\sigma_i^{(J)} ; i = N, L, M \quad (17)$$

که در آن، $\sigma_i^{(R)}$ ، $\sigma_i^{(J)}$ و σ_i به ترتیب مؤلفه‌های بردار تنش ریزصفحه‌ای مربوط به سنگ بکر، درزه و توده‌سنگ می‌باشند. ω نیز یک پارامتر آسیب موسوم به ضریب پیوستگی درزه^۲ است که مطابق رابطه زیر تعریف شده است (Chen & Bažant, 2014):

$$\omega = 1 - e^{-\left[\left(\frac{\varepsilon_V^+}{a_1} \right)^{q_1} + \left(\frac{\varepsilon_D^+}{a_2} \right)^{q_2} + \left(\frac{\varepsilon_T^+}{a_3} \right)^{q_3} \right]} \quad (18)$$

در معادله فوق، ε_V^+ ، ε_D^+ و ε_T^+ به ترتیب حداکثر کرنش حجمی اتساعی، حداکثر کرنش تفاضلی کششی و حداکثر کرنش برشی برآیند وارده به هر کدام از ریزصفحات است. پارامترهای a_1 ، a_2 ، a_3 و q_1 ، q_2 ، q_3 جزء مشخصات مصالح بوده و توسط کالیبره کردن مدل با نتایج آزمایش‌های متداول سه‌محوری و تک‌محوری تعیین می‌شوند.

برای اطلاع از جزئیات بیشتر در مورد پارامترهای الگوی رفتاری و همچنین در خصوص روابط الاستیسیته و مرزهای تنش- کرنش می‌توان به مقاله (Chen & Bažant, 2014) مراجعه کرد.

۳.۳ پیاده‌سازی عددی مدل ماسه‌دهی

در این مطالعه به بررسی پدیده ماسه‌دهی تحت جریان تک

به واحد حجم مصالح به ترتیب در روابط (۱) و (۱۰) صدق کنند. این معیار دارای دو پارامتر ورودی شامل ε_C^P و C_T بوده و در آن، F^{hd} با استفاده از رابطه داری قابل محاسبه است:

$$F^{hd} = |\mu \kappa^{-1} v| \quad (11)$$

که در آن، κ تانسور نفوذپذیری ذاتی، v بردار سرعت جریان سیال و μ لزجت سیال است.

۲.۳ الگوی رفتاری ماسه‌سنگ

به کمک الگوی رفتاری، رابطه بین تانسورهای تنش و کرنش مصالح بیان می‌شود. در این مطالعه برای بیان رفتار ماسه‌سنگ از الگوی رفتاری ارائه شده توسط چن و بازانت (Chen & Bažant, 2014) استفاده شده است. این الگو در چارچوب نظریه ریزصفحه‌ای^۱ و برای بیان رفتار غیرخطی سنگ‌های شبه‌ترد ارائه شده است.

در نظریه ریزصفحه‌ای معادلات رفتاری بر روی صفحاتی در اطراف نقاط مصالح نوشته شده و رفتار کل از طریق انتگرال‌گیری روی این صفحات به دست می‌آید. از مدل‌های مبتنی بر این نظریه، می‌توان به نحو مطلوبی در حل مسائل مربوط به ترک‌خوردگی و ایجاد نوارهای برشی استفاده کرد. در این الگو، مؤلفه‌های کرنش روی هر کدام از صفحات مصالح (ریزصفحه)، مطابق روابط زیر از طریق تصویر کردن تانسور کرنش بر روی همان ریزصفحه حاصل می‌شود (Sadrnejad & Shakeri, 2017):

$$\varepsilon_N = N_{ij} \varepsilon_{ij} ; N_{ij} = n_i n_j \quad (12)$$

$$\varepsilon_L = L_{ij} \varepsilon_{ij} ; L_{ij} = (l_i n_j + l_j n_i) / 2 \quad (13)$$

$$\varepsilon_M = M_{ij} \varepsilon_{ij} ; M_{ij} = (m_i n_j + m_j n_i) / 2 \quad (14)$$

در روابط فوق، ε_N مؤلفه نرمال کرنش ریزصفحه‌ای، و ε_L و ε_M مؤلفه‌های مماسی هستند. n_i بردار واحد عمود بر ریزصفحه و l_i و m_i نیز بردارهای یک‌ه‌ی مماس بر ریزصفحه می‌باشند. کرنش نرمال ریزصفحه‌ای به نوبه‌ی خود به دو مؤلفه‌ی حجمی (ε_V) و تفاضلی (ε_D) قابل تفکیک است (Chen & Bažant, 2014):

$$\varepsilon_N = \varepsilon_D + \varepsilon_V ; \varepsilon_V = \varepsilon_{ii} / 3 \quad (15)$$

بعد از محاسبه کرنش‌های ریزصفحه‌ای، مؤلفه‌های تنش روی

^۱Microplane

^۲Joint continuity factor

شار گرهی کل، N بردار توابع شکل برای تغییر مکان و n_e تعداد المان‌ها است. معادله تعادل استاتیکی بافت جامد (معادله ۲۱) نیز به فرم زیر گسسته‌سازی می‌شود (Lewis & Schrefler, 1998):

$$\sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} B^T D B d\Omega \delta = \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} B^T m N_p d\Omega P^e + F \quad (23)$$

که در آن، δ بردار تغییر مکان‌های گرهی کل، D تانسوری رفتاری الاستوپلاستیک مصالح، P^e بردار فشار حفره‌ای گرهی المان، N_p بردار توابع شکل برای فشار و F بردار نیروهای گرهی ناشی از بارگذاری مکانیکی است. بردار m نیز به صورت $\{1.1.1.0.0.0\}^T$ تعریف شده است. در معادله (۲۳)، جمله اول سمت راست، بردار بار معادل گرهی ناشی از فشار حفره‌ای سیال را تشکیل می‌دهد. جمله سمت چپ نیز بیانگر نیروهای داخلی ناشی از تغییر شکل‌های محیط متخلخل است. با حل این معادله، تغییر مکان‌های گرهی و در نتیجه تانسورهای تنش و کرنش در نقاط گوسی حاصل می‌شوند.

برای پیاده‌سازی عددی مدل ماسه‌دهی لازم است برنامه عددی قادر به حذف المان‌های ارضاء کننده معیار ماسه‌دهی (روابط (۱) و (۱۰)) باشد. به این منظور در ماژول جریان سیال، می‌توان فشار حفره‌ای را در گره‌های این المان‌ها برابر فشار حفره‌ای ته چاه قرار داد؛ به این ترتیب شرایط مرزی معادله‌ی جریان سیال طی وقوع ماسه‌دهی به راحتی به‌روز می‌شود. در ماژول ژئومکانیک نیز می‌توان المان‌های ارضاء کننده‌ی معیار ماسه‌دهی را در تشکیل ماتریس سختی کل دخالت نداده و سپس درجات آزادی مختص این المان‌ها را به لیست درجات آزادی مقید افزود.

طی وقوع ماسه‌دهی ممکن است تکه سنگ‌های نسبتاً بکری از مصالح بدون ارضاء معیار ماسه‌دهی و به دلیل فرسایش المان‌های مجاور از دیواره‌ی حفره جدا شوند (شکل ۴). وجود این المان‌ها باعث ناپایداری حل عددی بوده و لازم است به روش مناسبی شناسایی و حذف شوند. با توجه به اینکه فشار حفره‌ای در تمامی گره‌های مرزی این تکه سنگ‌ها برابر است، لذا نیروی هیدرودینامیکی وارده به المان‌های مربوطه برابر صفر خواهد بود. در شبیه‌سازی‌های عددی می‌توان از این ویژگی برای شناسایی و حذف المان‌های جدا شده از دیواره چاه استفاده کرد.

چرخه کلی محاسبات مدل ماسه‌دهی در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق این شکل، در هر گام زمانی، بعد از

فازهی سیال از محیط متخلخل تغییر شکل‌پذیر پرداخته شده است. با فرض تراکم‌ناپذیری سیال، معادله دیفرانسیل حاکم بر جریان دائمی به صورت زیر می‌باشد (Chen et al., 2006):

$$-\rho_f \nabla \cdot v + q = 0 \quad (19)$$

که در آن، ρ_f چگالی سیال، q شار ورودی یا خروجی و $\nabla \cdot$ عملگر دیورژانس است. معادله بقای مومنتوم سیال در قالب رابطه تجربی دارسی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\nabla p = -\mu \kappa^{-1} v \quad (20)$$

معادله‌ی تعادل استاتیکی نیروها برای بافت جامد با استفاده از اصل تنش مؤثر ترازقی مطابق رابطه‌ی زیر قابل نگارش است (Belytschko et al., 2014):

$$-\nabla \cdot (\sigma' - p1) = b \quad (21)$$

که در آن، b بردار نیروهای حجمی، 1 تانسور واحد، و σ' تانسور تنش مؤثر است.

برای حل هم‌زمان معادلات (۱۹) و (۲۱) می‌توان از روش توام‌سازی کامل و یا روش توام‌سازی صریح استفاده کرد (Settari & Walters, 2001). در روش توام‌سازی صریح، معادلات به صورت هم‌زمان حل نمی‌شوند، بلکه ابتدا توزیع فشار حفره‌ای با حل معادله‌ی جریان سیال تعیین شده و سپس فشار حفره‌ای به صورت بار معادل گرهی در محاسبه تنش‌ها و تغییر شکل‌ها به کار برده می‌شود. استفاده از این روش در مهندسی مخازن هیدروکربوری با شرایط مرزی پیچیده و درجات آزادی فراوان مرسوم بوده و مخصوصاً در مواردی که بارگذاری خارجی ناشی از تغییر نرخ جریان ورودی و خروجی باشد، به کار برده می‌شود (Lewis & Schrefler, 1998). روش توام‌سازی صریح به ملزومات سخت‌افزاری پایین‌تری نیاز داشته و در عین حال پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و به‌روزرسانی آن‌ها با سهولت و سرعت بیشتری قابل انجام است. در این مقاله از روش توام‌سازی صریح استفاده شده است.

در روش اجزای محدود (Zienkiewicz et al., 2013) معادله دیفرانسیل (۱۹) به شکل زیر گسسته‌سازی می‌شود:

$$\frac{1}{\mu} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} B^T \kappa B d\Omega P = \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} N^T q d\Omega \quad (22)$$

$$\Rightarrow K_f P = Q$$

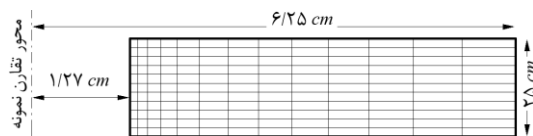
که در آن، B ماتریس مشتقات توابع شکل المان، K_f ماتریس نفوذپذیری کل، P بردار فشار حفره‌ای گرهی کل، Q بردار

برای شبیه‌سازی ماسه‌دهی تهیه و تحت صحت‌سنجی‌های مختلفی قرار گرفت. در ادامه، دو مورد از این صحت‌سنجی‌ها ارائه شده است.

یک حفره استوانه‌ای با ارتفاع 25 cm ، شعاع خارجی 6.25 cm و شعاع داخلی 1.27 cm در نظر گرفته شده است. رفتار مصالح ارتجاعی و فشار حفره‌ای در جدار بیرونی استوانه 141 kPa و در جدار داخلی برابر صفر فرض شده است. نمونه فاقد بارگذاری مکانیکی بوده و مؤلفه قائم تغییر مکان در سطوح فوقانی و تحتانی مدل مقید شده است. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ طبق جدول ۱ می‌باشند. المان‌بندی پهنه هندسی مدل در حالت تقارن محوری در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ

| مدول یانگ (MPa) | نسبت پواسون | نفوذپذیری (md) |
|---------------------|-------------|--------------------|
| ۴۰۰ | ۰٫۴۳ | ۳۶۰۰ |

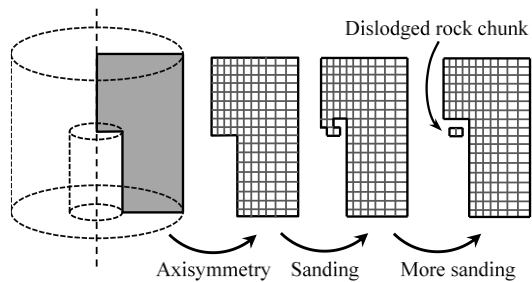


شکل ۶. المان‌بندی پهنه هندسی مدل

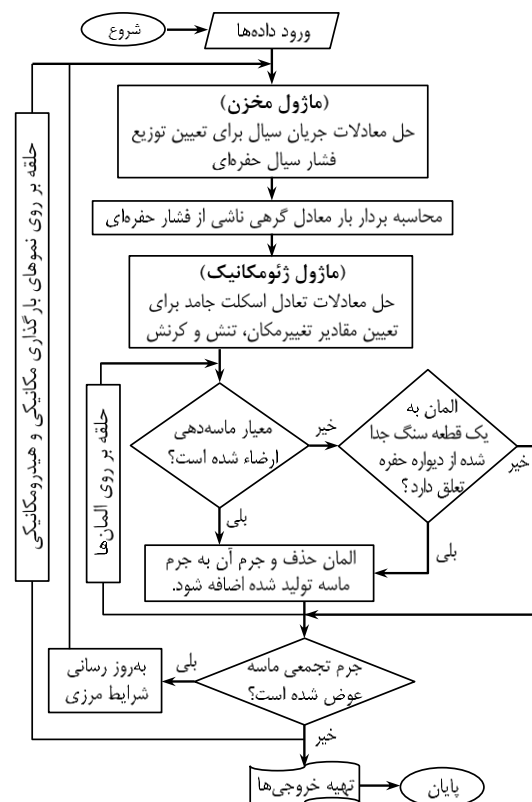
در شکل ۷ مقادیر تنش‌های مؤثر شعاعی و مماسی حاصل از شبیه‌سازی عددی همراه با نتایج ارائه شده توسط نوری و همکاران (*Nouri et al., 2006*) ترسیم شده است. مطابق این شکل انطباق مناسبی بین نتایج مشاهده می‌شود که حاکی از عملکرد مناسب الگوریتم توام‌سازی معادلات است. همان‌طور که در این شکل مشخص است؛ در دیواره چاه تنش مؤثر شعاعی صفر و تنش مؤثر پیرامونی حداکثر مقدار خود را دارد. لذا تنش‌های برشی بزرگی در دیواره چاه ایجاد می‌شود که می‌تواند منجر به گسیختگی مصالح شود.

در مسئله مورد بررسی می‌توان با داشتن توزیع فشار حفره‌ای، اندازه نیروی هیدرودینامیکی وارده به واحد حجم اولین لایه از المان‌های دیواره حفره را محاسبه و با نتایج حاصل از برنامه عددی مقایسه کرد. فشار حفره‌ای در دیواره چاه صفر و در فاصله 1.37 cm از محور چاه برابر 6.68 kPa می‌باشد. به این ترتیب کل نیروی وارده به اولین لایه از

حذف المان‌های ارضاء کننده‌ی معیار ماسه‌دهی، شرایط مرزی به‌روز شده و بعد از حل معادلات جریان و تغییر شکل، معیار ماسه‌دهی مجدداً کنترل می‌شود. این روند تا زمانی که سیستم به تعادل مکانیکی و هیدرودینامیکی برسد، تکرار می‌شود.



شکل ۴. جدا شدن تکه‌های نسبتاً بزرگ سنگ از دیواره حفره پس از ارضای معیار ماسه‌دهی در المان‌های مجاور



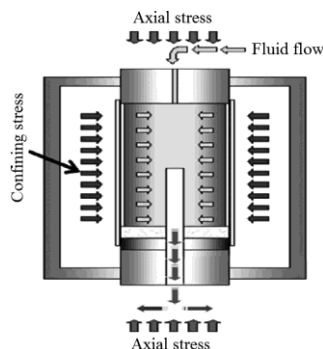
شکل ۵. چرخه محاسباتی مدل ماسه‌دهی پیشنهادی

۴. صحت‌سنجی برنامه عددی

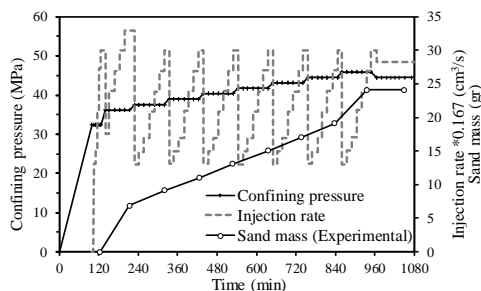
با استفاده از مدل ارائه شده در این مقاله، یک برنامه عددی

استفاده شد. قطر تونل مشبک‌کاری 1.27 cm و طول آن 5.08 cm بوده است. نفوذپذیری و تخلخل ماسه‌سنگ به ترتیب 150 md و 0.24 بوده و دانسیته آن 2.035 gr/cm^3 تعیین شده است.

طی انجام آزمایش، تنش‌های همه‌جانبه مختلفی به نمونه اعمال شده و جریان سیال با نرخ‌های مختلف از طریق سطوح جانبی و فوقانی مغزه وارد و از طریق تونل مشبک‌کاری خارج شده است. جرم تجمعی ماسه تولید شده نیز در هر لحظه ثبت شده است. مقادیر تنش همه‌جانبه، نرخ جریان تزریقی و جرم تجمعی ماسه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق این شکل، ماسه‌دهی تقریباً در فشار همه‌جانبه 36 MPa و نرخ جریان $3\text{ cm}^3/\text{s}$ شروع شده است. بعد از شروع ماسه‌دهی، تنش همه‌جانبه با نموداری جزئیات بیشتر آزمایش می‌توان به مقاله رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2012) مراجعه کرد.

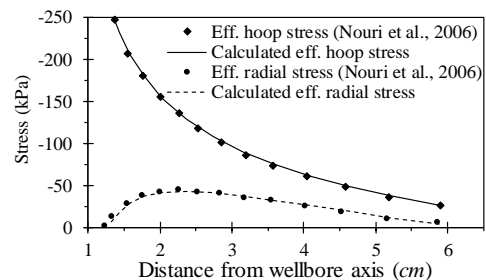


شکل ۹. تصویر شماتیک از دستگاه انجام آزمایش ماسه‌دهی (Rahmati et al., 2012)

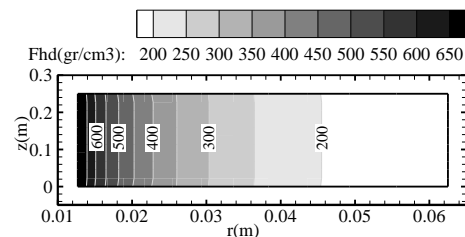


شکل ۱۰. نتایج آزمایشگاهی حاصل از انجام آزمایش ماسه‌دهی (Rahmati et al., 2012) (باز ترسیم شده).

المان‌ها برابر 14654 gr خواهد بود که با تقسیم آن بر حجم این المان‌ها، مقدار F^{hd} برابر 707 gr/cm^3 به دست می‌آید. در شکل ۸ کانتور توزیع اندازه نیروی هیدرودینامیکی نشان داده شده است. مطابق این شکل مقدار F^{hd} برای اولین لایه از المان‌های دیواره چاه تقریباً برابر با 675 gr/cm^3 به دست می‌آید که اختلاف کمی با عدد 707 دارد و حاکی از عملکرد مناسب برنامه در تعیین نیروهای هیدرودینامیکی است.



شکل ۷. پروفیل تنش‌های مؤثر در دیواره‌ی حفره



شکل ۸. توزیع نیروی هیدرودینامیکی در دیواره‌ی حفره

۵. ارزیابی مدل در شبیه‌سازی ماسه‌دهی

در این بخش به منظور تشریح نحوه کالیبراسیون مدل و ارزیابی نتایج آن، اقدام به شبیه‌سازی یک آزمایش ماسه‌دهی شده است.

۱.۵ معرفی آزمایش ماسه‌دهی

رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2012) برای بررسی مکانیسم ماسه‌دهی از مشبک‌کاری‌ها، یک آزمایش ماسه‌دهی بر روی مغزه مشبک‌کاری شده از ماسه‌سنگ سولت واش جنوب^۲ انجام دادند. تصویر شماتیک از دستگاه انجام آزمایش و وضعیت نمونه در شکل ۹ نشان داده شده است. در این آزمایش از مغزه‌ای به قطر 1.24 cm و ارتفاع 2.54 cm

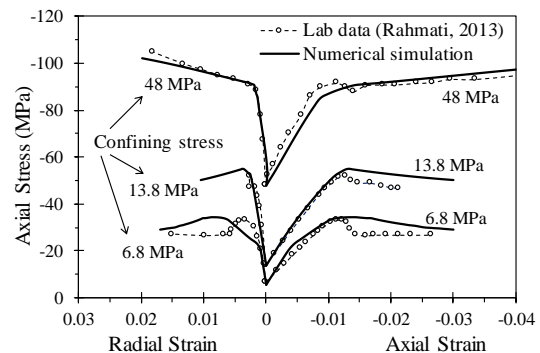
^۲ Salt Wash South, SWS

۲.۵ کالیبراسیون مدل پیشنهادی

برای کالیبره نمودن مدل پیشنهادی، ابتدا لازم است پارامترهای الگوی رفتاری ماسه‌سنگ تعیین شوند. سپس در ادامه از طریق بررسی مقادیر کرنش‌های پلاستیک و نیروهای ناشی از تراوش در لحظه شروع ماسه‌دهی، می‌توان نسبت به تعیین پارامترهای معیار ماسه‌دهی اقدام کرد. با استفاده از نتایج سه آزمایش سه‌محوری بر روی ماسه‌سنگ سولت واش جنوب (Rahmati, 2013)، فراسنج‌های الگوی رفتاری مطابق جدول ۲ به دست آمده‌اند. نمودارهای تنش-کرنش مصالح در شکل ۱۱ ترسیم شده است. لازم به ذکر است که معادلات رفتاری مصالح در حالت سه‌بعدی نوشته شده‌اند ولی به دلیل استفاده از تقارن محوری در شبیه‌سازی آزمایش‌ها، لازم است تبدیل تنش‌ها و کرنش‌ها بین مختصات کارتزین و استوانه‌ای انجام شود. به این منظور، چنانچه محور z در هر دو دستگاه مذبور منطبق بر هم فرض شوند؛ برای همه نقاطی که روی صفحه تقارن xy واقع هستند، درایه‌های تانسور تنش در هر دو سیستم برابر خواهند بود (Bower, 2009).

جدول ۲. خصوصیات مصالح برای ماسه‌سنگ SWS

| پارامتر | مقدار | پارامتر | مقدار |
|------------------------|----------|-----------|--------|
| $E^{(R)}, E^{(J)}$ | ۵۰۰۰ MPa | β_c | ۰.۶ |
| $\nu^{(R)}, \nu^{(J)}$ | ۰.۲ | c_3 | ۰.۱۰۰۱ |
| $T^{(R)}$ | ۵ MPa | c_4 | ۰.۱۰۵ |
| $T^{(J)}$ | ۰ | a_1 | ۰.۱۰۰۱ |
| a_0 | ۲۰ | a_2 | ۰.۱۰۰۲ |
| ε_{N}^0 | ۰.۱۰۰۰۵ | a_3 | ۰.۱۰۰۳ |
| ε_{V}^0 | ۰.۱۰۰۱ | q_1 | ۱.۵ |
| c_1 | ۰.۱۴ | q_2 | ۱.۵ |
| c_2 | ۰.۱۰۰۵ | q_2 | ۱.۰ |



شکل ۱۱. نمودارهای تنش-کرنش برای ماسه‌سنگ SWS

معیار ماسه‌دهی (معادلات ۱ و ۱۰) دارای دو پارامتر ورودی شامل ϵ_c^p و c_r است. برای تعیین این پارامترها اقدام به شبیه‌سازی آزمایش ماسه‌دهی تا لحظه شروع تولید ماسه گردید. با توجه به شروع ماسه‌دهی از رأس تونل مشبک‌کاری (Wang & Wan, 2004) و (Tronvoll & Fjær, 1994)، مقدار متوسط کرنش پلاستیک مؤثر و نیروی هیدرودینامیکی در این ناحیه تعیین شدند. با استفاده از این مقادیر می‌توان تخمین اولیه‌ای برای پارامترهای معیار ماسه‌دهی به دست آورد. در ادامه با تغییر مقادیر، بهترین انطباق با نتایج آزمایشگاهی قابل حصول است. با استفاده از این روش، کرنش خمیری بحرانی برابر با ۰.۱۲ و ضریب c_r برابر 0.129 cm^{-1} به دست آمدند.

۳.۵ شبیه‌سازی عددی آزمایش ماسه‌دهی

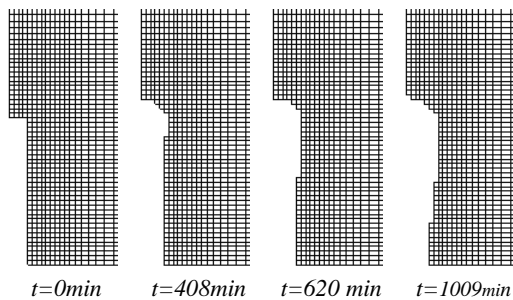
در آزمایش مورد بررسی با توجه به تقارن موجود در هندسه، بارگذاری و شرایط مرزی، شبیه‌سازی عددی در حالت تقارن محوری انجام گرفت. جزءبندی مدل با استفاده از المان‌های چهار ضلعی خطی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

مصالح دیواره حفره طی وقوع ماسه‌دهی عمدتاً رفتار نرم شونده دارند (Nouri et al., 2009). بروز نرم‌شوندگی منجر به موضعی شدن کرنش‌ها و ایجاد نوارهای برشی می‌شود. در این حالت اگر ابعاد المان برابر با عرض نوار برشی انتخاب شود، می‌توان انرژی شکست را به درستی تخمین زد (Crook et al., 2003). عرض نوار برشی معمولاً در بازه ۶ تا ۳۰ برابر قطر متوسط دانه‌ها می‌باشد (Nouri et al., 2009) از این‌رو با توجه به قطر متوسط ذرات ماسه‌سنگ SWS که تقریباً 0.118 mm است (Rahmati et al., 2012)، ابعاد المان‌ها در مجاورت مشبک‌کاری حدود 1.6 mm در نظر گرفته شده است.

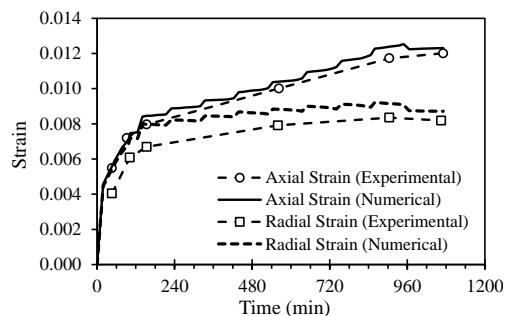
فشار حفره‌ای در سطوح داخلی تونل مشبک‌کاری ثابت و برابر با فشار اتمسفر می‌باشد. ولی در سطوح بیرونی نمونه برای تأمین نرخ جریان تزریقی لازم است در هر مرحله از آزمایش با استفاده از روش آزمون و خطا نسبت به تعیین فشار حفره‌ای اقدام شود (زیرا توزیع شار ورودی در مرزهای نامعلوم است). به این ترتیب با داشتن تاریخچه تنش‌های همه‌جانبه و نرخ جریان تزریقی (شکل ۱۰)، می‌توان آزمایش را شبیه‌سازی کرد.

گزارش شده توسط رحمتی و همکاران (*Rahmati et al., 2012*) سازگاری داشته و در اثر تمرکز تنش‌ها و همگرایی بالای جریان در رأس تونل مشبک‌کاری رخ داده است. در مش اجزای محدود، مطابق مقاله رحمتی و همکاران (*Rahmati et al., 2012*) تغییر مکان‌های قائم و افقی گره‌های واقع در سطح تحتانی مدل، مقید در نظر گرفته شده‌اند. محدود بودن تغییر شکل‌های مصالح در این ناحیه نیز می‌تواند یکی از علل فعالیت کمتر ماسه‌دهی در سمت دیواره گمانه چاه باشد.

تغییرات کرنش‌های محوری و شعاعی در دیواره بیرونی مغزه طی انجام آزمایش در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این شکل انطباق خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن پارامترهای مدل است. همچنین لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده، ملاحظه گردید که بدون استفاده از الگوریتم تشریح شده برای تشخیص و حذف المان‌های نسبتاً بکر جدا شده از دیواره حفره، آنالیز عددی از همان مراحل اولیه دچار ناپایداری می‌شود.

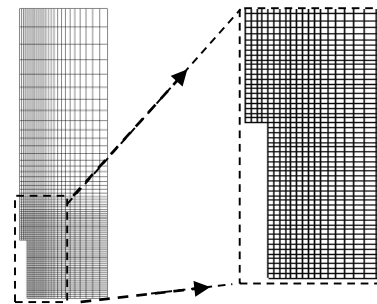


شکل ۱۴. افزایش ابعاد حفره طی وقوع ماسه‌دهی

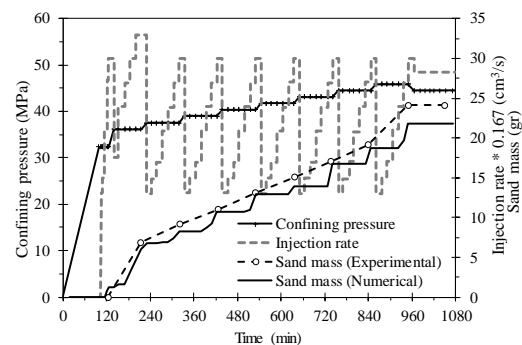


شکل ۱۵. کرنش‌های محوری و شعاعی حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایشگاهی

جرم تجمعی ماسه تولیدی حاصل از شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل، نتایج عددی در قالب پیش‌بینی شروع و میزان ماسه‌دهی انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. مخصوصاً انطباق نتایج تا قبل از زمان ۵۴۰ دقیقه بسیار مناسب است. بعد از این لحظه، اختلاف اندکی بین نتایج مشاهده می‌شود. بخشی از این اختلاف می‌تواند ناشی از خطاهای اندازه‌گیری در آزمایشگاه، عدم کالیبراسیون دقیق الگوی رفتاری مصالح، عدم تعیین دقیق پارامترهای معیار ماسه‌دهی و عدم لحاظ کردن تغییرات نفوذپذیری ناشی از کرنش‌های حجمی ماسه‌سنگ باشد.



شکل ۱۶. جزءبندی مدل در حالت تقارن محوری



شکل ۱۷. مقایسه جرم تجمعی ماسه حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی

تغییر و تحول دیواره حفره در زمان‌های مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مطابق این شکل، عمده‌ی فعالیت ماسه‌دهی در مجاورت رأس مشبک‌کاری روی داده است. همچنین مشاهده می‌شود که جدا شدن لایه‌های مصالح از رأس تونل مشبک‌کاری شروع شده و به سمت انتهای آن پیشروی کرده است. این الگو در حالت کلی با شکل ۲ و نتایج

۶. نتیجه‌گیری

پیش از استحصال نفت از مخازن ماسه‌سنگی لازم است وضعیت چاه از نظر تولید ماسه مورد ارزیابی قرار گرفته و تدابیر لازم برای جلوگیری از وقوع ماسه‌دهی یا کنترل آن اتخاذ شود. یکی از معیارهای کاربردی برای پیش‌بینی ماسه‌دهی، معیار کرنش پلاستیک بحرانی است. در این معیار از دو مکانیسم اصلی دخیل؛ مکانیسم ناپایداری مکانیکی در نظر گرفته شده و مکانیسم ناپایداری هیدرودینامیکی، مغفول مانده است. در مطالعه حاضر با ارتقاء این معیار، یک مدل جدید ارائه شد که در آن ضمن حفظ سهولت استفاده از مدل، اثرات هر دو مکانیسم اصلی در نظر گرفته شده است.

در معیار پیشنهادی لازم است گرادیان فشار حفره‌ای برای المان‌های مجاور حفرات تولید محاسبه شده و با استفاده از آن، اندازه نیروی هیدرودینامیکی وارده به واحد حجم مصالح به دست آید. چنانچه این نیرو از یک آستانه معین بیشتر باشد می‌توان انتظار داشت که نیروهای ناشی از تراوش قادر به حمل ذرات ماسه به درون چاه خواهند بود. این مقدار آستانه با استفاده از تحلیل میکرومکانیکی، به صورت تابعی از تنش‌های وارده به دست آمد. پیاده‌سازی معیار پیشنهادی در قالب روش اجزای محدود با توام‌سازی صریح معادلات جریان سیال و تعادل اسکلت جامد تشریح شد. برای جلوگیری از بروز ناپایداری عددی، روشی برای شناسایی المان‌های نسبتاً بکری که در اثر فرسایش سایر المان‌ها از دیواره حفره جدا شده‌اند، ارائه گردید.

مدل پیشنهادی با استفاده از نتایج چاپ شده‌ی یک آزمایش فیزیکی ماسه‌دهی، کالیبره شده و مورد ارزیابی بیشتر قرار گرفت. به این منظور یک مغزه مشبک‌کاری شده تحت نرخ‌های مختلف جریان و فشارهای همه‌جانبه متفاوت در نظر گرفته شد. نتایج حاصله از مدل عددی در قالب جرم تجمعی ماسه و نرخ افزایش آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. در کل با توجه به انطباق مناسب نتایج و همچنین الگوی مشاهده شده برای رشد حفره می‌توان گفت که مدل پیشنهادی قادر است با در نظر گرفتن مکانیسم‌های اصلی حاکم بر پدیده، پیش‌بینی قابل قبولی از ماسه‌دهی ارائه بدهد.

۷. سیاهه‌ی نمادها

جدول ۳. سیاهه‌ی نمادها

| نماد | واحد | شرح |
|--|---------------------|--|
| b | N | بردار نیروهای حجمی |
| F^{hd} | N | بردار نیروی هیدرودینامیکی |
| K_f | m/s | ماتریس هدایت کل |
| P^e | Pa | بردار فشار حفره‌ای در گره‌های المان |
| Q | kg/s/m ² | بردار شار جرمی گرهی کل |
| v | m/s | بردار سرعت سیال |
| c_r | m ⁻¹ | پارامتر اندازه نیروی هیدرودینامیکی |
| d_g | m | قطر ذره ماسه |
| F_e^{hd} | N | اندازه نیروی هیدرودینامیکی بحرانی |
| F_p | N | نیروی هیدرودینامیکی وارده به ذره |
| F_r | N | نیروی مقاوم ذره‌ی ماسه |
| n_i, l_i, m_i | | بردارهای یک‌ه‌ی ریز صفحه‌ی i ام |
| $\epsilon_N, \epsilon_L, \epsilon_M$ | | مؤلفه‌های کرنش ریزصفحه‌ای |
| κ | md | تانسور نفوذپذیری ذاتی |
| σ' | Pa | تانسور تنش مؤثر |
| $\sigma_i^{(R)}, \sigma_i^{(D)}, \sigma_i$ | Pa | بردار تنش ریزصفحه‌ای سنگ بکر، درزه‌ها و توده سنگ |
| $\in \epsilon^p$ | Pa | کرنش پلاستیک بحرانی |
| $\in \epsilon^p$ | N | کرنش خمیری مؤثر |
| ϕ | | تخلخل ماسه‌سنگ |
| φ | degree | زاویه اصطکاک داخلی ذرات ماسه |
| μ | Pa.s | لزجت سیال حفره‌ای |
| ρ_f | kg/m ³ | چگالی سیال حفره‌ای |
| $\sigma_N, \sigma_L, \sigma_M$ | Pa | مؤلفه‌های تنش ریزصفحه‌ای |
| $\sigma'_z, \sigma'_\theta$ | Pa | تنش مؤثر محوری و مماسی در مختصات استوانه‌ای |
| ω | | ضریب پیوستگی درزه |

۸. مراجع

- Bažant, P., & Oh, B. H. (1986). Efficient Numerical Integration on the Surface of a Sphere. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 66, 37-49. doi:10.1002/zamm.19860660108
- Belytschko, T., Liu, W. K., Moran, B., & Elkhodary, K. (2014). *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures* (2 ed.). Wiley.
- Bower, A. F. (2009). *Applied Mechanics of Solids*. Boca, Raton: CRC Press.
- Bratli, R. K., & Risnes, R. (1981). Stability and Failure of Sand Arches. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 21, 236-248. doi:10.2118/8427-PA
- Chen, X., & Bažant, Z. P. (2014). Microplane damage model for jointed rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 38, 1431-1452. doi:10.1002/nag.2257
- Chen, Z., Huan, G., & Ma, Y. (2006). 2. Flow and Transport Equations. In *Computational Methods for Multiphase Flows in Porous Media* (pp. 9-49). Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Crook, T., Willson, S., Yu, J. G., & Owen, R. (2003). Computational modelling of the localized deformation associated with borehole breakout in quasi-brittle materials. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 38, 177-186.
- Fattahpour, V., Moosavi, M., & Mehranpour, M. (2012a). An experimental investigation on the effect of rock strength and perforation size on sand production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 86-87, 172-189. doi:j.petro.2012.03.023
- Fattahpour, V., Moosavi, M., & Mehranpour, M. (2012b). An experimental investigation on the effect of grain size on oil-well sand production. *Petroleum Science*, 9(3), 343-353. doi:10.1007/s12182-012-0218-5
- Fjær, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M., & Risnes, R. (2008). *Petroleum related rock mechanics*. Hungary: Elsevier.
- Gravanis, E., Sarris, E., & Papanastasiou, P. (2015). Hydro-mechanical erosion models for sand production. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39, 2017-2036. doi:10.1002/nag.2383
- Gui, F., Khaksar, A., Zee, W. V., & Cadogan, P. (2016). Improving the Sanding Evaluation Accuracy by Integrating Core Tests, Field Observations and Numerical Simulation. *SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Perth: Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/182499-MS
- Kim, S. H., Sharma, M. M., & Fitzpatrick, H. J. (2012). A Predictive Model for Sand Production in Poorly Consolidated Sands. *Int. Petroleum Technology Conference*. Bangkok.
- Lee, H., Moon, T., & Haimson, B. C. (2016). Borehole Breakouts Induced in Arkosic Sandstones and a Discrete Element Analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 1369-1388. doi:10.1007/s00603-015-0812-0

- Lewis, R. W., & Schrefler, B. A. (1998). *The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media*. John Wiley.
- Moosavi, M. (2015). *Sand Production Mechanism in Oil Wells and Controlling Factors*. 1st National Conference on Petroleum Geomechanics. Tehran: International Convention Center of RIPI.
- Morita, N., & Fuh, G. F. (1998). Prediction of Sand Problems of a Horizontal Well from Sand Production Histories of Perforated Cased Wells. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/48975-MS
- Morita, N., Whitfill, D. L., Fedde, O. P., & Levik, T. H. (1989a). Parametric Study of Sand-Production Prediction: Analytical Approach. SPE Production Engineering Journal, 4, 25–33. doi:10.2118/16990-PA
- Morita, N., Whitfill, D. L., Massie, I., & Knudsen, T. W. (1989b). Realistic Sand-Production Prediction: Numerical Approach. SPE Production Engineering Journal, 4, 15–24. doi:10.2118/16989-PA
- Nouri, A., Kuru, E., & Vaziri, H. (2009). Elastoplastic Modelling of Sand Production Using Fracture Energy Regularization Method. Journal of Canadian Petroleum Technology, 48, 64–71. doi:10.2118/09-04-64
- Nouri, A., Vaziri, H., Kuru, E., & Islam, R. (2006). A comparison of two sanding criteria in physical and numerical modeling of sand production. Journal of Petroleum Science and Engineering, 50, 55-70.
- Pak, A., Abbasi, B., Rouhbakhsh, B., & Selseleh, A. (2015). Numerical Study of Sand Production in Oil Extracting Wells. 1st National Conference on Petroleum Geomechanics. Tehran: International Convention Center of RIPI.
- Rahmati, H. (2013). *Micromechanical Study of Borehole Breakout Mechanism*. Ph.D. thesis, University of Alberta
- Rahmati, H., Nouri, A., Vaziri, H., & Chan, D. (2012). Validation of Predicted Cumulative Sand and Sand Rate Against Physical-Model Test. Journal of Canadian Petroleum Technology, 51, 403-410. doi:10.2118/157950-PA
- Ranjith, P. G., Perera, M. S., Perera, W. K., Choi, S. K., & Yasar, E. (2014). Sand production during the extrusion of hydrocarbons from geological formations: A review. Journal of Petroleum Science and Engineering, 124, 72-82. doi:10.1016/j.petrol.2014.10.017
- Sadrnejad, S. A., & Shakeri, S. (2017). Fabric assessment of damaged anisotropic geo-materials using the multi-laminate model. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 91, 90-103. doi:10.1016/j.ijrmms.2016.11.013
- Sanfilippo, F., Brignoli, M., Giacca, D., & Santarelli, F. J. (1997). Sand Production: From Prediction to Management. SPE European Formation Damage Conference. The: Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/38185-MS
- Settari, A., & Walters, D. A. (2001). Advances in Coupled Geomechanical and Reservoir Modeling With Applications to Reservoir Compaction. SPE Journal, 6. doi:10.2118/74142-PA
- Tronvoll, J., & Fjær, E. (1994). Experimental study of sand production from perforation cavities. Int.

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 31, 393-410.
doi:10.1016/0148-9062(94)90144-9

Vardoulakis, I., Stavropoulou, M., & Papanastasiou, P. (1996). Hydro-mechanical aspects of the sand production problem. *Transport in Porous Media*, 22, 225-244. doi:10.1007/BF01143517

Walton, I. C., Atwood, D. C., Halleck, P. M., & Bianco, L. C. (2002). Perforating Unconsolidated Sands: An Experimental and Theoretical Investigation. *SPE Drilling & Completion*, 17, 141-150. doi:10.2118/79041-PA

Wang, H., Cardiff, P., & Sharma, M. M. (2016). A 3-D Poro-Elasto-Plastic Model for Sand Production around Open-Hole and Cased & Perforated Wellbores. 50th U.S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. Houston: American Rock Mechanics Association.

Wang, J., & Wan, R. G. (2004). Computation of sand fluidization phenomena using stabilized finite elements. *Finite Elements in Analysis and Design*, 40, 1681-1699. doi:10.1016/j.finel.2003.10.005

Wang, Y., & Papamichos, E. (2012). Sand Prediction by Different Criteria and a Validation by a Perforated Test in a Sandstone. *SPE Heavy Oil Conference Canada*. Calgary, Alberta, Canada: Society of Petroleum Engineers.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). In *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals* (7 ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.