

مقاله پژوهشی

تأثیر شرایط بارگذاری و تعداد گلوله خرج گود بر کارایی مشبک کاری با گلوله خرج گود

پیمان نوروزی^{۱*}

۱- دکترای مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی اصفهان

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2022.359562.1178

چکیده

عملیات مشبک کاری با خرج گود شامل ایجاد یک سوراخ در لوله جداری، سیمان پیرامون آن و سازند بهره‌ده به منظور ایجاد ارتباط بین مخزن و چاه نفت است. عوامل متعددی بر کارایی و عمق نفوذ مشبک کاری تأثیرگذار است. در این میان نقش تنش سه محوره واقعی زمین، نوع بارگذاری و تعداد گلوله‌ها بر روی کارایی مشبک کاری به خوبی بررسی نشده است. بنابراین یک دستگاه بزرگ‌مقیاس جهت مشبک کاری نمونه‌های بلوک تحت شرایط سه محوره واقعی طراحی و ساخته شد. در این مطالعه برای بهینه‌سازی تعداد آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس، از روش طرح آزمایش تاگوچی بهره‌مند شده و سهم هر کدام از تنش‌های برجا بر روی عمق نفوذ با استفاده از تحلیل آماری نتایج، معین شد. آزمون‌های این پژوهش، شرایط مشبک کاری در چاه‌های عمودی و افقی در حوزه‌های گسلس به ترتیب امتداد لغز و معکوس را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج نشان داد که عمق نفوذ در شرایط سطحی حداکثر است. تنش موازی با محور شلیک کمترین تأثیر را در کاهش عمق نفوذ دارد. عمق نفوذ گلوله در شرایط دوبعدی متناظر از حالت بارگذاری سه‌بعدی رایج بیشتر و هر دو آنها عمق نفوذ بیشتری نسبت به حالت بارگذاری سه محوره واقعی بدست می‌دهند. در مشبک کاری با گان، عمق نفوذ گلوله اول از گلوله‌های دوم و سوم با اختلاف زیادی کمتر است. شلیک گلوله باعث ایجاد یک سوراخ مشبک کاری و تعدادی ترک کششی در اطراف آن می‌گردند. الگوی انتشار ترک‌های کششی به نوع بارگذاری بستگی دارد. تعداد ترک‌های کششی ایجاد شده در اطراف سوراخ مشبک کاری در سنگ آهک نسبت به بتن به مراتب بیشتر است. روند کاهش قطر در سوراخ اول نسبت به دوم متفاوت است.

واژگان کلیدی

خرج گود
تنش واقعی زمین
تنش سه محوره واقعی
تنش سه محوره رایج تنش
دومحوره
عمق نفوذ
ترک کششی

۱. پیش‌گفتار

مشبک کاری به عنوان مهم‌ترین روش تکمیل چاه شامل ایجاد ارتباط هیدرولیکی بین لایه تولیدکننده هیدروکربن و فضای داخل چاه می‌باشد [۸-۱]. روش‌های مختلفی برای سوراخ کاری چاه توسعه داده شده‌اند. در بین روش‌های مختلف، استفاده از گلوله خرج گود به جایگاه مناسبی دست‌یافته است. گلوله‌ی خرج گود از دیواره خارجی، آستری، مواد منفجره اصلی، فتیله و چاشنی تشکیل می‌شود (شکل ۱). فتیله انفجاری در اثر شوک الکتریکی چاشنی را منفجر می‌کند. با انفجار چاشنی مواد منفجره اصلی منفجر می‌شوند. در نتیجه آستری فلزی گلوله به حالت ذوب درآمده و در اثر

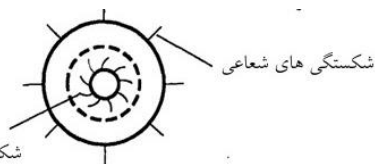
فشار زیاد به شکل یک مخروط وارونه به سمت بیرون هدایت می‌شود. جت بوجود آمده با سرعت، فشار و حرارت زیاد، لوله جداری را سوراخ و سیمان اطراف آن را ذوب کرده و به داخل سنگ مخزن نفوذ می‌کند [۹-۱۵]. شارما (۲۰۰۹) بیان کرد موج انفجاری ایجاد شده مقاومت سنگ را کاهش داده و ذرات ریز ناشی از شکست ذرات بزرگ‌تر را در ناحیه اطراف تونل مشبک کاری ایجاد می‌کند. به‌طور کلی دست‌یابی به عمق نفوذ بالا، مسیر جریان مؤثرتر و نفوذ در سنگ مخزن بدون ایجاد صدمه مهم‌ترین اهدافی هستند که در عملیات مشبک کاری دنبال می‌شود [۱۰ و ۱۶-۲۵].

موسسه نفتی آمریکا استاندارد (۱۹۹۱) *API RP 43* را در چهار قسمت برای ارزیابی عملکرد مشبک کاری با گلوله خرج گود

دولومیت واسون مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که عمق نفوذ گلوله با افزایش تنش محصورکننده کاهش می‌یابد. روند کاهش عمق نفوذ در سنگ‌ها متفاوت گزارش شد. بر طبق مطالعه هالک و همکاران (۱۹۸۸)، عمق نفوذ گلوله خرج گود در ماسه‌سنگ بریا تحت تنش محصورکننده $20/7$ مگاپاسکال، تا 50% کاهش می‌یابد. بنابراین تنش محصورکننده از مهم‌ترین پارامترهای کنترل‌کننده کارایی گلوله محسوب می‌گردد. در مطالعات فوق فشارهای محصورکننده بصورت یکنواخت و یکسان بر روی نمونه‌های مغزه اعمال شده است و عمق نفوذ گلوله‌های خرج گود در شرایط بارگذاری دومحوره بررسی شده است.

تنش برجا در زمین به صورت دومحوره و یکنواخت نیست. بنابراین مشبک‌کاری در شرایط بارگذاری استاندارد *API RP 19B* حالت تنش واقعی در زمین را احراز نمی‌کند. هالک و همکاران (۱۹۸۸) بلوک‌های مکعبی ماسه‌سنگ بریا و سنگ‌آهک بدفورد به ابعاد $0/9 \times 0/75 \times 0/75$ متر را با استفاده از دستگاه سه محوره واقعی شلمبرژه مشبک‌کاری نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که حساسیت عمق نفوذ به تنش محصورکننده در ماسه‌سنگ بریا بیشتر از سنگ‌آهک بدفورد است. در این مطالعه تأثیر جداگانه هر کدام از تنش‌های محصورکننده بر روی عمق نفوذ بررسی نشده است.

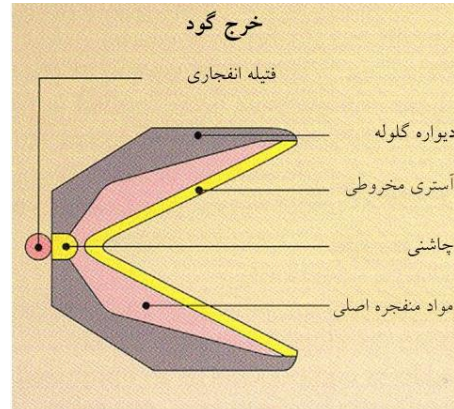
پاکنل و همکاران (۱۹۹۱) در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی الگوی شکستگی‌ها در مشبک‌کاری برای نمونه‌های به قطر ۴ اینچ با گلوله‌های $3/2$ ، $6/5$ و 22 گرم تحت بارگذاری دومحوره پرداختند. شکل الگوی شکستگی‌ها در اطراف سوراخ ایجاد شده را نشان می‌دهد. آن‌ها بیان کردند که در اثر شلیک گلوله، شکستگی‌های مارپیچی و شعاعی در اطراف سوراخ انتشار می‌یابند.



شکل ۲. الگوی شکستگی‌ها در اطراف سوراخ مشبک‌کاری [۴].

تا جایی که ما می‌دانیم، مطالعه‌ی جامع و کامل دیگری در خصوص بررسی تنش برجا بر کارایی مشبک‌کاری و الگوی شکست ناشی از آن گزارش نشده است. بنابراین این مطالعه با

ارائه نمود. هر چند این استاندارد بعدها با استاندارد (۲۰۱۴) *API RP 19B* جایگزین شد. در قسمت دوم و چهارم استاندارد به ترتیب عملکرد گلوله و کارایی جریان در شرایط اعمال تنش محصورکننده دومحوره می‌پردازد [۱ و ۲].

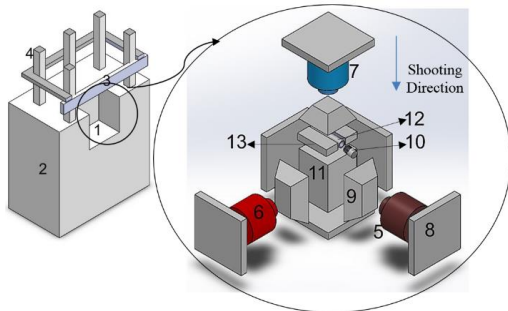


شکل ۱. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده خرج گود [۳]

در مطالعات گذشته عوامل مؤثر بر عمق نفوذ و کارایی جریان در مشبک‌کاری به صورت آزمایشگاهی و نظری مورد بررسی قرار گرفتند. بنابر نتایج بدست آمده، عوامل مؤثر بر عمق نفوذ گلوله در دو دسته کلی خواص ذاتی سنگ و عوامل عملیاتی دسته‌بندی می‌گردند. خواص ذاتی سنگ نظیر مقاومت فشاری سازند، دانسیته بالک، سرعت صوت در سازند، مدول بالک دینامیکی، اندازه دانه‌های سازند، لیتولوژی سنگ، درصد اشباعیت و نوع سیال موجود در سازند، ناهمسانگردی هدف، فشار منفذی، تنش‌های برجا، تنش مؤثر و عوامل عملیاتی کارایی شامل ضخامت لوله جدار، کیفیت جت، فشار چاه، کیفیت سیمان اطراف لوله جدار، موقعیت گان و گلوله کارایی مشبک‌کاری و عمق نفوذ گلوله خرج گود را کنترل می‌کنند [۱۸-۳۳].

تامسون (۱۹۶۲) آزمایشاتی را به روش قسمت دوم استاندارد *API RP 43* بر روی ۴ نوع سنگ با ۵ نوع خرج مختلف انجام داد و نشان داد که یک روند کاهشی شبه‌لگاریتمی بین افزایش مقاومت سنگ و کاهش عمق نفوذ در سنگ وجود دارد. آت و بل (۱۹۹۴) یک رابطه بین عمق نفوذ سطحی و درون چاهی ارائه نمودند. سوشیر و لندس (۱۹۷۸) به روش استاندارد *API RP 43* و به منظور ارائه مدل جدید درون‌چاهی، تأثیر تنش‌های محصورکننده دوبعدی را بر روی عمق نفوذ و کارایی جریان در مغزه‌های ماسه‌سنگ بریا، سنگ‌آهک آستین و

مگاپاسکال را دارد. نتایج واسنجی نشان داد که جک‌های هیدرولیک دارای راندمان ۹۵٪ می‌باشند. این جک‌ها به صورت متعامد و در جهت محورهای مختصات محلی xyz بر روی نمونه مکعبی و در داخل اتاقک فشار^۱ قرار می‌گیرند (شکل ۲). جک‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نیروهای عمود بر محور و موازی با محور شلیک را در جهت محورهای مختصات x ، y و z و به صفحات yz ، xz و xy از نمونه‌های مکعبی اعمال می‌کنند. اتاقک تنش به‌گونه‌ای طراحی شد که جک‌های ۱ و ۲ به‌صورت ثابت و جک ۳ به‌صورت متحرک و بیرون از آن قرار می‌گیرد. نمونه بلوکی در امتداد محور تلاقی سه جک و در یک گوشه از اتاقک تنش قرار گرفته و نیروهای سه محوره به آن وارد می‌گردند. قسمت تحتانی جک‌های افقی به‌وسیله دو صفحه بارگذاری ضخیم به دیواره اتاقک فشار ثابت شدند. قسمت تحتانی جک عمودی به‌وسیله یک صفحه بارگذاری به یک تیر افقی صلب و متحرک متصل شد (شکل ۲). نیروهای سه محوره از طریق سه جک هیدرولیکی به ظرفیت ۳۵۵ تن با ماکزیمم فشار روغن ۷۰۰ بار تأمین می‌گردد. از سه پمپ هیدرولیک دستی مجزا مجهز به ۳ عدد فشارسنج جهت تأمین فشار هیدرولیکی استفاده شد.



- | | |
|--------------------------------|----------------------|
| ۱- اتاقک فشار | ۸- صفحه بارگذاری |
| ۲- چارچوب اصلی | ۹- صفحات صلب پرکننده |
| ۳- تیر اصلی فلزی برای جک j_3 | ۱۰- درپوش گان |
| ۴- تیر صلب عمودی | ۱۱- نمونه بلوکی هدف |
| ۵- جک هیدرولیک j_1 | ۱۲- گان |
| ۶- جک هیدرولیک j_2 | ۱۳- صفحه بارگذاری |
| ۷- جک هیدرولیک j_3 | |

شکل ۲. شماتیک دستگاه مشبک‌کاری سه محوره

۱.۲. طراحی آزمایشات

در این مطالعه تأثیر مقدار تنش برجا، نوع بارگذاری و

هدف بررسی اثر تنش‌های برجا، نوع بارگذاری و تعداد گلوله بر روی عمق نفوذ طراحی و انجام شد. برای همین منظور یک دستگاه سه محوره واقعی طراحی و آزمایش‌های مشبک‌کاری در شرایط واقعی تنش زمین بر روی نمونه‌ها سنگ‌آهک و بتن در ابعاد $۰/۴ \times ۰/۳ \times ۰/۳$ متر انجام گرفت. نمونه‌های سنگ‌آهک در راستای عمود بر لایه‌بندی مشبک‌کاری شدند. روش تاگوچی یک روش استاندارد طراحی آزمایش می‌باشد که توسط دکتر جنیچی تاگوچی برای مطالعه اثرات چندین متغیر به‌طور هم‌زمان برای تعیین نتیجه بهینه توسعه‌یافته است. در واقع تاگوچی بر این باور بود که بهترین راه بهبود کیفیت، طراحی و ایجاد آن در خود محصول است. برای رسیدن به کیفیت مطلوب با استفاده از طراحی، روش تاگوچی فرآیند سه مرحله‌ای طراحی سیستم‌ها، پارامترها و تلورانس را پیشنهاد کرد. روش تاگوچی با استفاده از آرایه‌های متعامد تعداد آزمایش‌ها را بسیار کاهش داده است. این آرایه‌ها با ویژگی‌های خاصی از بین تعداد کل آزمایش‌ها در روش فاکتوریل کامل انتخاب می‌شوند. آرایه‌های متعامد را بصورت $L_n(x^y)$ نشان می‌دهند که L حرف اول کلمه *Latin squares* (آرایه‌ای که در طراحی آزمایش‌ها بکار می‌رود و خصوصیات ویژه‌ای دارد)، n تعداد آزمایش‌ها، x تعداد سطوح فاکتور و y حداکثر تعداد فاکتورهایی است که با آرایه مورد نظر قابل بررسی است. فاکتورهای نامحدودی در این روش قابل بررسی هستند اما گاهی امکان بررسی کلیه اثرات متقابل وجود ندارد.

۲. دستگاه مشبک‌کاری سه محوره

حالت واقعی تنش در زمین به‌صورت سه محوره واقعی است. بنابراین در این مطالعه یک دستگاه مشبک‌کاری سه محوره طراحی و ساخته شد. دستگاه آزمایشگاهی جدید توانایی مشبک‌کاری بلوک‌های بزرگ مقیاس در ابعاد مختلف و حداکثر $۶۰ \times ۶۰ \times ۶۰$ سانتی‌متر تحت تنش سه محوره را دارد. در این مطالعه دستگاه برای نمونه به طول، عرض و ارتفاع به ترتیب ۳۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر سازگار شد. اسکلت اصلی اتاقک تنش از بتن مسلح ساخته شد. این دستگاه با به‌کارگیری سه جک هیدرولیکی به ظرفیت اسمی ۳۵۵ تن، قابلیت اعمال تنش‌های عمود بر محور شلیک (σ_x, σ_y) تا $۲۹/۶$ مگاپاسکال و تنش موازی با محور شلیک (σ_z) تا ۲۲

۱ - Pressure Chamber

تعداد آزمایشات بدون کاهش کیفیت محصولات استفاده می‌گردد [۱۳، ۲۱، ۲۹]. به‌تازگی، این روش به‌طور گسترده و موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های مختلف به‌کار گرفته شده است [۲۱، ۲۹، ۳۷، ۴۳-۳۱] نویسندگان در این قسمت، از یک طرح شانزده تایی با در نظر گرفتن سه عامل تنش برجا و چهار سطح برای هر کدام از آنها، نقش تنش برجا بر روی عمق نفوذ گلوله‌ی خرج گود را به‌صورت آماری بررسی نموده‌اند. طرح آزمایش ارائه شده به روش تاگوچی در جدول ۲ آورده شده است.

ب- طراحی آزمایشات برای بررسی نوع بارگذاری
تأثیر شرایط بارگذاری بر روی عمق نفوذ گلوله و مکانیزم خرابی در دسته دیگری از آزمایش‌های مشبک‌کاری بررسی شد. در این دسته از آزمایش‌ها، نمونه‌های سنگ‌آهک تحت شرایط سطحی (بدون اعمال تنش محصورکننده) و سه نوع بارگذاری سه محوره واقعی، رایج و دومحوره مشبک‌کاری شدند. برای اینکه نتایج آزمایش‌ها قابل مقایسه باشند، دو حالت متناظر با بارگذاری سه محوره واقعی (سه محوره رایج و دومحوره) در نظر گرفته شد.

تنش‌های عمود بر محور شلیک در حالت بارگذاری متناظر دومحوره و سه محوره رایج (σ_x و σ_y) برابر با میانگین تنش‌های عمود بر محور شلیک گلوله در حالت بارگذاری سه محوره واقعی ($\sigma_{mean} = (\sigma_x + \sigma_y)/2$) در نظر گرفته شد. تنش موازی محور شلیک (σ_z) در حالت بارگذاری سه محوره واقعی و رایج باهم برابر است و مقدار آن در حالت تنش دومحوره، صفر در نظر گرفته شد. طرح آزمایش برای بارگذاری‌های سه محوره واقعی، رایج و دومحوره در جدول ۳ آورده شده است.

ج- طراحی آزمایش برای بررسی تأثیر تعداد گلوله‌ها
برای بررسی تعداد گلوله‌ها بر روی عمق نفوذ، سه آزمایش سه محوره واقعی با یک، دو و سه گلوله تحت فاصله‌داری ۶ گلوله در فوت (۲۰ گلوله در متر) انجام شد. سطوح تنش و شرایط این دسته از آزمایش‌ها در جدول ۴ آورده شده است.

فاصله‌داری گلوله‌ها بر روی عمق نفوذ و الگوی شکست هدف بررسی می‌گردد. گلوله‌های خرج گود در امتداد محور z از دستگاه مختصات محلی شلیک شدند. بنابراین σ_x ، σ_y و σ_z به ترتیب تنش‌های عمود بر محور و موازی با محور شلیک گلوله هستند. با توجه به مقادیر هر کدام از تنش‌های برجا، تأثیر سه نوع بارگذاری (سه محوره واقعی^۲، سه محوره رایج^۳ و دومحوره^۴) و در شرایط سطحی (بدون اعمال تنش محصورکننده) بر عمق نفوذ گلوله‌ها بررسی می‌شود. از نمونه‌های بلوکی با ابعاد طول، عرض و ارتفاع به ترتیب $0/3 \times 0/4 \times 0/3$ متر برای آزمایش‌های سه محوره و دومحوره و از نمونه‌های مغزه با قطر و ارتفاع به ترتیب $0/15$ و $0/5$ متر برای آزمایش‌ها در شرایط سطحی استفاده شده است. در شکل ۳ مشخصات هر کدام از انواع بارگذاری، شماتیک نمونه‌های هدف و راستای شلیک نسبت به محورهای مختصات نشان داده شده است. بنابراین آزمایش‌های آزمایشگاهی در گروه‌های سه‌گانه زیر طراحی و انجام شدند.

الف- طراحی آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر مقدار تنش‌های برجا

در این گروه از آزمایشات چهار سطح تنش موازی و عمود بر محور شلیک، مطابق با جدول ۱ در نظر گرفته شد. در تمام آزمایش‌ها مقادیر تنش‌های عمود بر محور شلیک از تنش موازی محور شلیک بیشتر است. بنابراین نتایج این آزمایش‌ها، چاه عمودی و افقی، به ترتیب در حوزه گسلش امتدادلغز و معکوس را شبیه‌سازی می‌کند [۴۵]. بر طبق طرح آزمایش کامل فاکتوریل، در مجموع بایستی تعداد ۶۴ (۴۳) آزمایش انجام شود. انجام این تعداد آزمایش مشبک‌کاری در مقیاس بزرگ، مستلزم صرف هزینه بسیار زیاد خواهد بود. در میان رویکردهای مختلف برای کاهش تعداد آزمایش‌ها، طرح متعامد تاگوچی^۵ بسیار پرکاربرد است [۱۳].

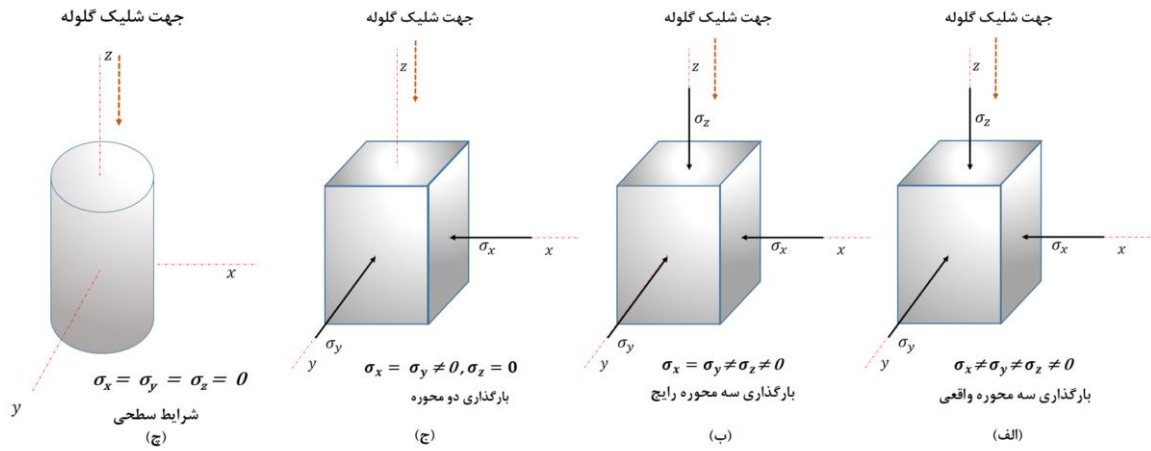
تاگوچی این روش تجربی را برای بهبود کیفیت کالاهای صنعتی توسعه داد. در این روش از مفهوم متعامد برای کاهش

۴ - Biaxial Loading Condition

۵ - Taguchi's Orthogonal Scheme

۲ - Polyaxial Loading Condition

۳ - Conventional Triaxial Loading Condition



شکل ۳. شرایط مختلف بارگذاری، (الف) سه محوره واقعی، (ب) سه محوره رایج، (ج) دومحوره و (چ) شرایط سطحی

جدول ۱. پارامترهای تنش برجا و سطوح آنها

تنش برجا	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
تنش عمودی (σ_z) (MPa)	۴	۶	۸	۱۰
تنش افقی (σ_x) (MPa)	۱۰	۱۴	۱۸	۲۰
تنش افقی (σ_y) (MPa)	۱۰	۱۴	۱۸	۲۰

جدول ۲. طرح آزمایش تاگوچی برای بررسی تأثیر تنش‌های برجا بر عملکرد گلوله

شرایط بارگذاری	عمق نفوذ (cm)	σ_z (MPa)	σ_y (MPa)	σ_x (MPa)	آزمایش
سه محوره رایج	۱۵,۷	۴	۱۰	۱۰	۱
سه محوره رایج	۱۲,۳	۴	۱۴	۱۴	۲
سه محوره رایج	۸,۱	۴	۱۸	۱۸	۳
سه محوره رایج	۶,۶	۴	۲۰	۲۰	۴
سه محوره واقعی	۱۳,۱	۶	۱۴	۱۰	۵
سه محوره واقعی	۱۲,۸	۶	۱۰	۱۴	۶
سه محوره واقعی	۶,۷	۶	۲۰	۱۸	۷
سه محوره واقعی	۶,۰	۶	۱۸	۲۰	۸
سه محوره واقعی	۱۱,۲	۸	۱۸	۱۰	۹
سه محوره واقعی	۷,۸	۸	۲۰	۱۴	۱۰
سه محوره واقعی	۱۰,۲	۸	۱۰	۱۸	۱۱
سه محوره واقعی	۷,۱	۸	۱۴	۲۰	۱۲
سه محوره واقعی	۸,۳	۱۰	۲۰	۱۰	۱۳
سه محوره واقعی	۷,۶	۱۰	۱۸	۱۴	۱۴
سه محوره واقعی	۸,۴	۱۰	۱۴	۱۸	۱۵
سه محوره واقعی	۷,۹	۱۰	۱۰	۲۰	۱۶

جدول ۳. طرح آزمایش برای بررسی تأثیر شرایط بارگذاری بر عملکرد گلوله

آزمایش	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	σ_{mean} (MPa)	عمق نفوذ (cm)	شرایط بارگذاری
۱۷	۱۰	۷	۶	۸٫۵	۱۶٫۸	سه محوره واقعی
۱۸	۷	۱۰	۶	۸٫۵	۱۶٫۷	سه محوره واقعی
۱۹	۷	۱۴	۸	۱۰٫۵	۱۵٫۰	سه محوره واقعی
۲۰	۱۴	۷	۸	۱۰٫۵	۱۵٫۲	سه محوره واقعی
۲۱	۱۰	۲۰	۱۰	۱۵	۸٫۲	سه محوره واقعی
۲۲	۲۰	۱۰	۱۰	۱۵	۸٫۳	سه محوره واقعی
۲۳	۸٫۵	۸٫۵	۶	۸٫۵	۱۷٫۷	سه محوره رایج
۲۴	۱۰٫۵	۱۰٫۵	۸	۱۰٫۵	۱۶٫۵	سه محوره رایج
۲۵	۱۵	۱۵	۱۰	۱۵	۹٫۵	سه محوره رایج
۲۶	۸٫۵	۸٫۵	۰	۸٫۵	۱۹٫۱	دومحوره
۲۷	۱۰٫۵	۱۰٫۵	۰	۱۰٫۵	۱۸٫۳	دومحوره
۲۸	۱۵	۱۵	۰	۱۵	۱۲٫۴	دومحوره
۲۹	۰	۰	۰	۰	۲۳	سطحی

جدول ۴. طراحی آزمایش برای بررسی تأثیر تعداد گلوله‌ها

آزمایش	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	σ_z (MPa)	تعداد گلوله	عمق نفوذ گلوله اول	عمق نفوذ گلوله دوم	عمق نفوذ گلوله سوم
۳۰	۲۰	۱۰	۴	۱	۱۲٫۲	--	--
۳۱	۲۰	۱۰	۴	۲	۱۲٫۱	۱۶٫۲	--
۳۲	۲۰	۱۰	۴	۳	۱۲٫۲	۱۶٫۳	۱۶٫۵

۲.۲ مشبک کاری

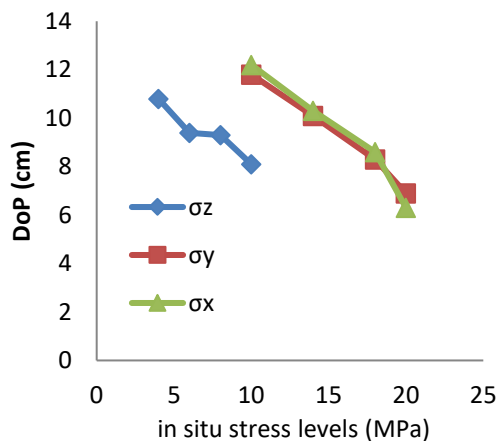
در این مطالعه از نمونه‌های بلوکی و مغزه سنگ‌آهک و بتن با طرح اختلاط و روش عمل‌آوری ارائه شده در استاندارد *API RP 19B (2014)* استفاده شده است. نمونه‌های سنگ‌آهک در ابعاد ارتفاع، طول و عرض به ترتیب ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۳ متر و نمونه‌های مغزه به ارتفاع و قطر به ترتیب ۰/۵ و ۰/۱۵ متر تهیه شدند. نمونه‌های سنگ‌آهک در امتداد عمود بر صفحات لایه‌بندی مشبک کاری شدند و بصورت کاملاً صاف و صیقلی بریده شدند تا از بروز تمرکز تنش در آنها در حین بارگذاری جلوگیری شود. خواص مکانیکی و فیزیکی مصالح در جدول ۵ آورده شده است. برای مشبک کاری نمونه‌ها از خرجهای ۱۴ گرم *HMX* با قطر خارجی ۱/۸-۲ اینچ استفاده شد. برای شبیه‌سازی لوله جداری، جلوگیری از پرتاب قطعات بدنه‌ی گلوله و جلوگیری از خروج گازهای انفجار از گان استفاده شد. گلوله‌ها بر روی ریل نصب و در داخل گان نصب می‌شوند. گان

در واقع یک لوله مغزی *L-80* با جرم ویژه ۱۸ پوند بر فوت (۲۶/۸ کیلوگرم بر متر)، قطر خارجی ۵ اینچ (۱۲/۷ سانتی‌متر) و قطر داخلی ۴/۲۷۶ اینچ (۱۰/۹ سانتی‌متر) است (شکل ۴). قبل از بارگذاری گلوله، انتهای گان با جوش دادن یک صفحه فلزی نشت بندی شده و پس از بارگذاری گلوله ابتدای آن با پیچاندن یک درپوش کاملاً نشت بندی می‌گردد. تنها راه ارتباطی بین داخل و خارج گان، یک سوراخ به قطر ۰/۷۵ میلی‌متر جهت خروج سیم‌های نازک برق به منظور برقراری جریان الکتریسیته و انفجار چاشنی می‌باشد. قطر این سوراخ در مقایسه با ابعاد گان بسیار ریز تلقی می‌شود و خروج گازهای ناشی از انفجار از این منفذ را می‌توان نادیده انگاشت.

۳. نتایج

این مطالعه با هدف دستیابی به سه هدف کلی زیر انجام گردید:

نظر گرفتن مقادیر ثابت ضخامت لوله جداري و فاصله‌داري گلوله از لوله جداري اندازه‌گيري و نتايج آن در جدول ۲ آورده شده است. نتايج نشان مي‌دهند که با افزايش مؤلفه‌هاي تنش برجا، عمق نفوذ بصورت غيريکنواخت کاهش مي‌يابد. در واقع تأثير تنش‌هاي عمود بر محور و موازي با محور شليک با يکديگر برابر نيستند. بنا بر اين يک تحليل واريانس براي پارامتر هدف (عمق نفوذ) و پارامترهاي تأثيرگذار (مؤلفه‌هاي تنش برجا) انجام گرفت. تحليل ANOVA يک تکنیک محاسباتي براي برآورد سهم نسبي هر يک از عوامل کنترلي و اثرات متقابل بين آنهاست [۱۳]. شکل ۵ نقش هر کدام از تنش‌هاي برجا را بر روي کاهش عمق نفوذ گلوله‌ها نشان مي‌دهد. با افزايش سطح تنش برجا از سطح يک به چهار، عمق نفوذ کاهش مي‌يابد. تأثير تنش‌هاي عمود بر محور شليک (σ_x) (مشابه روند ارائه شده در مطالعات پيشين نظير هالک و بهرمن (۱۹۹۰) و هالک (۱۹۸۸) است. هرچند که در مطالعات پيشين به بررسي تأثير تنش موازي با محور شليک (σ_z) پرداخته نشده است.



شکل ۵. تأثير پارامترهاي تنش برجا بر روي عمق نفوذ گلوله‌ي خرج گود

بر اساس نتايج ANOVA با افزايش هر کدام از مؤلفه‌هاي تنش برجا يعني σ_x ، σ_y و σ_z عمق نفوذ گلوله‌هاي خرج گود به ترتيب ۴۹٪، ۳۹٪ و ۱۲٪ کاهش مي‌يابد. بنا بر اين تنش موازي با محور شليک (σ_z) کمترین تأثير در کاهش عمق نفوذ گلوله‌ها را داشته است.

۲.۳. نقش نوع بارگذاري بر روي عمق نفوذ و الگوي

۱- بررسي نقش مقدار تنش‌هاي برجا بر عملکرد مشبک‌کاري
 ۲- بررسي نقش شرايط بارگذاري بر عملکرد مشبک‌کاري و الگوي شکست ناشي از آن.
 ۳- بررسي نقش تعداد گلوله بر عملکرد مشبک‌کاري.
 در ادامه به ترتيب به بررسي نقش هر کدام از پارامترهاي ارائه شده در بالا پرداخته شده است.

جدول ۵. خواص مکانیکی و فیزیکی سنگ آهک و بتن

بتن	سنگ آهک	خواص مکانیکی و فیزیکی مصالح
۳۷.۸	۶۸.۶	مقاومت فشاري تک محوري (MPa)
۱۲/۲	۲۰	مدول الاستيسيته (GPa)
۴۰۲۰	۵۱۶۰	سرعت موج طولی (m/s)
۲۳۶۰	۲۷۴۰	سرعت موج عرضی (m/s)
۲۳۸۰	۲۴۵۰	دانسيته (Kg/m^3)
۱۶/۷	۸/۵	تخلخل (%)



شکل ۴. گان مشبک‌کاري و درپوش آن

۳.۱. نقش مقدار تنش‌هاي برجا بر روي عملکرد مشبک‌کاري

در اين قسمت از طرح آزمايش تاگوچي براي دست‌يابي به تعداد آزمايشات بهينه و از تحليل واريانس (ANOVA) براي بدست آوردن سهم هر کدام از تنش‌هاي برجا بر روي عملکرد مشبک‌کاري استفاده شد. به همين منظور چهار سطح تنش موازي با محور و عمود بر محور شليک به ترتيب برابر با ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۴، ۱۸ و ۲۰ مگاپاسکال بر روي نمونه‌هاي سنگ آهک اعمال شد. عمق نفوذ گلوله بدون در

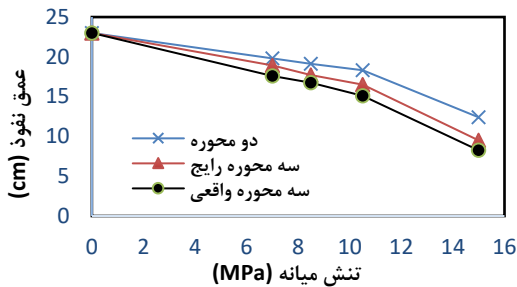
انتشار شکستگی

عملکرد گلوله‌ها و الگوی انتشار شکستگی در شرایط بارگذاری سه محوره واقعی، رایج و دومحوره برای نمونه‌های بلوکی و شرایط سطحی (بدون اعمال تنش محصورکننده) برای نمونه‌های مغزه بررسی شد. در حالت متناظر دو و سه‌بعدی مقدار تنش‌های عمود بر محور شلیک برابر با تنش میانه در حالت سه محوره واقعی در نظر گرفته شد. تنش عمودی در حالت دوبعدی صفر و در بارگذاری سه محوره رایج برابر با حالت بارگذاری سه محوره واقعی اعمال شد و در نهایت مقادیر عمق نفوذ بدست آمده با مقدار آن در شرایط سطحی مقایسه شد. مشخصات آزمایشات و عمق نفوذ بدست آمده در جدول ۳ آورده شده است. در شکل ۶ عمق نفوذ در انواع مختلف بارگذاری‌ها نسبت به مقدار تنش میانه آورده شده است. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که عمق نفوذ در شرایط سطحی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. با افزایش تنش میانه عمق نفوذ با روند مختلف برای انواع مختلف بارگذاری، کاهش یافته است. در تنش میانه ثابت، عمق نفوذ گلوله در شرایط بارگذاری دومحوره بیشتر است و حالت بارگذاری سه محوره واقعی، مقدار کمینه عمق نفوذ را بدست می‌دهد. بنابراین مدل‌سازی شرایط دومحوره یا سه محوره رایج به جای سه محوره واقعی در آزمایشگاه مشبک‌کاری، عمق نفوذ بیشتری بدست می‌دهد.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که شرایط بارگذاری بر روی الگوی شکست در اطراف سوراخ مشبک‌کاری تأثیرگذار است. در اطراف سوراخ مشبک‌کاری ترک‌های کششی منتشر می‌شوند. الگوی شکستگی به نسبت تنش بیشینه به کمینه عمود بر محور شلیک گلوله ($k = \sigma_H / \sigma_h$) وابسته است. شکل ۷ تصویر سنگ‌آهک مشبک‌کاری شده در شرایط بارگذاری $\sigma_x = 20MPa$ ، $\sigma_y = 10MPa$ و $\sigma_z = 4MPa$ ($k=2$) را نشان می‌دهد. در این شرایط بارگذاری، دو ترک کششی از دیواره سوراخ مشبک‌کاری در راستای تنش بیشینه عمود بر محور شلیک بیشینه (σ_H) گسترش می‌یابند.

شکل ۸ تصویر سنگ‌آهک مشبک‌کاری شده در شرایط بارگذاری سه محوره واقعی و $k=1.4$ ($\sigma_x = 14MPa$ ، $\sigma_y = 10MPa$ و $\sigma_z = 4MPa$) را نشان می‌دهد. در این شرایط بارگذاری، تعدادی ترک کششی در اطراف سوراخ مشبک‌کاری در امتداد و یا با زاویه ۳۰ درجه نسبت به تنش بیشینه عمود

بر محور شلیک منتشر می‌شوند.

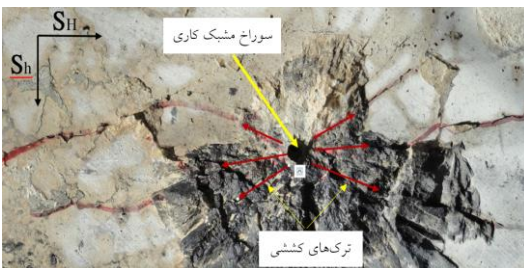


شکل ۶. عمق نفوذ گلوله در شرایط مختلف بارگذاری



شکل ۷. انتشار دو ترک کششی در اطراف سوراخ

مشبک‌کاری در شرایط بارگذاری سه محوره واقعی و $k=2$.



شکل ۸. انتشار دو ترک کششی در اطراف سوراخ

مشبک‌کاری در شرایط بارگذاری سه محوره واقعی و $k=1.4$.

در شکل ۹ الف، ب و ج تصویر نمونه‌های سنگ‌آهک مشبک‌کاری شده، به ترتیب در شرایط سه محوره رایج $\sigma_x = 10MPa$ ، $\sigma_y = 10MPa$ و $\sigma_z = 4MPa$ ($k=1.0$)، دومحوره $\sigma_x = 10MPa$ ، $\sigma_y = 10MPa$ و $\sigma_z = 0$ ($k=1.0$) و سطحی (بدون اعمال تنش محصورکننده) آورده شده است. ترک‌های کششی به‌صورت شعاعی و در تمام جهات نسبت به مرکز سوراخ مشبک‌کاری و با بیشینه زاویه ۳۰ درجه نسبت به یکدیگر منتشر شده‌اند. بنابراین الگوی انتشار ترک در اطراف سوراخ مشبک‌کاری در بارگذاری سه محوره رایج و دومحوره مشابه به حالت بدون بارگذاری (سطحی) می‌باشد. با این تفاوت که

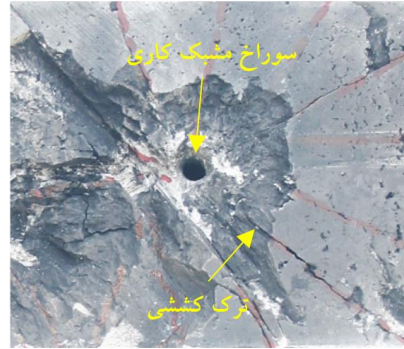
دیگری بر روی نمونه‌های بتن A و B و C به ترتیب با یک، دو و سه گلوله مطابق با جدول ۴ انجام گرفت. در شکل عمق نفوذ برحسب تعداد گلوله آورده شده است. عمق نفوذ برای گلوله‌های اول در نمونه‌های A و B و C اختلاف ناچیز در حد ± 1 میلی‌متر داشته است. عمق نفوذ برای گلوله دوم در نمونه‌های A و B نسبت به گلوله اول در تمام نمونه افزایش چشمگیر $1/1 \pm 4/1$ سانتی‌متر داشته است. این در حالی است که عمق نفوذ گلوله سوم در نمونه C نسبت به گلوله دوم در نمونه‌های A و B به ترتیب ۳ و ۲ میلی‌متر افزایش یافته است. بنابراین عمق نفوذ گلوله‌های دوم و سوم نسبت به گلوله اول افزایش چشمگیر نشان داده است و عمق نفوذ گلوله سوم نسبت به گلوله دوم افزایش چشمگیری نداشته است.

برشی عرضی نمونه بتنی B در عمق‌های ۱۰ و ۱۴/۵ سانتی‌متری از سطح نمونه در شکل ۱۰ (الف) و (ب) آورده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود، در عمق ۱۰ سانتی‌متری سوراخ‌های گلوله اول و دوم به‌وضوح قابل مشاهده است (شکل ۱۰ (الف)). نکته قابل تأمل در این شکل بیشتر بودن قطر سوراخ دوم نسبت به سوراخ اول است. در این مقطع عرضی قطر سوراخ اول و دوم به ترتیب ۴ و ۶ میلی‌متر و مقادیر در سطح نمونه به ترتیب ۱/۱ و ۱/۲ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. در عمق ۱۴/۵ سانتی‌متری از سطح نمونه تنها سوراخ گلوله دوم قابل مشاهده است.

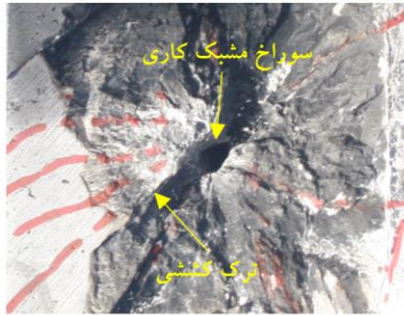
قطر سوراخ دوم در این مقطع ۳ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. بنابراین قطر سوراخ مشبک‌کاری در امتداد محور شلیک کاسته شده تا اینکه در انتهای سوراخ مشبک‌کاری قطر آن به صفر می‌رسد. ضمن اینکه روند کاهش قطر در امتداد محور شلیک برای سوراخ اول نسبت به سوراخ دوم بیشتر است. بررسی دقیق‌تر شکل ۱۰ (الف) نشان می‌دهد که یک ترک کششی در امتداد تنش بیشینه عمود بر محور شلیک در اثر مشبک‌کاری گسترش یافته است.

برای بررسی اثر تعداد گلوله بر عمق نفوذ در سنگ‌آهک، آزمایش دیگری در شرایط بارگذاری یکسان و با دو گلوله‌ی مشابه انجام شد. در این آزمایش عمق نفوذ گلوله اول و دوم به ترتیب ۹،۰ و ۱۳،۵ سانتی‌متر به دست آمد. برشی عرضی نمونه سنگ‌آهک در عمق ۸،۵ سانتی‌متری از سطح نمونه در شکل ۱۱ آورده شده است. قطر سوراخ دوم نسبت به سوراخ اول بیشتر و ترک‌های کششی در اطراف نمونه و در امتداد

در شرایط سطحی تعداد ترک‌های مشاهده شده در اطراف سوراخ مشبک‌کاری به مراتب بیشتر از دو حالت بارگذاری دیگر است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹. انتشار ترک‌های کششی در اطراف سوراخ مشبک‌کاری در شرایط بارگذاری (الف) سه محوره واقعی و $k=1.0$ (ب) دوماحوره و $k=1.0$ (ج) شرایط سطحی.

۳.۳. نقش تعداد گلوله بر عمق نفوذ گلوله خرج گود

برای بررسی تأثیر تعداد گلوله بر عمق نفوذ گلوله در فاصله‌داری ثابت (۶ گلوله در فوت)، آزمایش‌های مشبک‌کاری

اصلی به همراه ذرات موجود در آن با سرعت و فشار زیادی به سمت جداره تفنگ (لوله جداری) و نهایتاً هدف شلیک می‌گردد. در تمام آزمایش‌ها، محل قرار گرفتن گلوله‌ها (گان) نشأت بندی شده است. بنابراین قبل از شلیک گلوله اول مسیری برای خروج گازهای ناشی از انفجار وجود ندارد، بنابراین فشار گاز موجود در تفنگ به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد. در ادامه گلوله دوم با فاصله زمانی بسیار اندک (زمان رسیدن انفجار در فاصله انفجاری از گلوله اول به دوم) شلیک می‌گردد.

در حین شلیک گلوله دوم فشار گاز موجود در تفنگ بیشتر از زمان شلیک گلوله اول است. در نتیجه ذرات با سرعت و فشار بیشتری نسبت به گلوله اول به سمت هدف پرتاب خواهند شد. بنابراین پروفایل دو سوراخ ایجاد شده با یکدیگر مشابه نیستند. اما اختلاف ناچیز در عمق نفوذ گلوله دوم و سوم نشان می‌دهد که فشار گاز در داخل گان در حین شلیک گلوله سوم و دوم تفاوت چندانی نداشته است. در غیر این صورت عمق نفوذ گلوله سوم افزایش یا کاهش زیادی نسبت به گلوله دوم داشت.

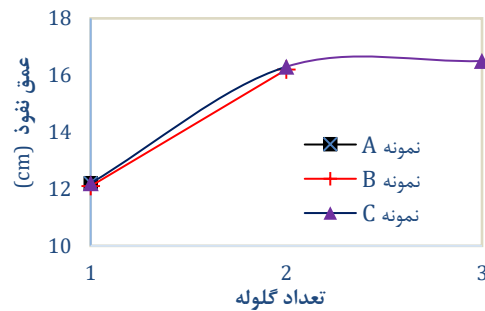


(ب)

شکل ۱۰. مقطع عرضی نمونه بتن مشبک کاری شده با دو گلوله در عمق (الف) ۱۰ سانتی‌متر و (ب) ۱۴ سانتی‌متر.

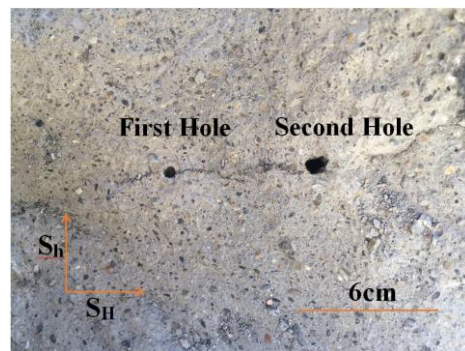
وجود باقیمانده‌های شلیک گلوله به رنگ سیاه در اطراف سوراخ‌های ناشی از گلوله اول و دوم شاهدی بر مدعا است. مقایسه تعداد ترک‌ها در واحد سطح در اطراف سوراخ مشبک‌کاری در سنگ‌آهک و بتن نشان می‌دهد تعداد ترک‌های کششی ایجاد شده در اطراف سنگ‌آهک به‌مراتب بیشتر از بتن است که احتمالاً به شکننده‌تر بودن سنگ‌آهک نسبت به بتن ارتباط دارد.

تنش بیشینه عمود بر محور شلیک انتشار یافته‌اند.



شکل ۱۱. عمق نفوذ نسبت به تعداد گلوله خرج گود.

گلوله‌ها در آزمایش‌های فوق یکسان بوده است. یکی از عواملی که به نظر می‌رسد باعث بروز اختلاف عمق نفوذ در گلوله اول و دوم می‌گردد، اختلاف زمان بین شلیک دو گلوله است. گلوله‌ها به‌صورت سری و با فاصله انفجاری به یکدیگر متصل می‌شوند. بنابراین ابتدا گلوله اول و پس از فاصله زمانی بسیار کوتاه گلوله دوم و نهایتاً گلوله سوم شلیک می‌شود. در اثر عبور جریان الکتریسیته از چاشنی، فاصله انفجاری منفجر شده و سبب شلیک اولین گلوله می‌گردد. در نتیجه مواد منفجره



(الف)

عامل دیگر اختلاف محسوس بین عمق نفوذ گلوله اول و دوم ایجاد شکستگی‌های شعاعی در مسیر عبور گلوله‌ها است. در فاصله‌داری ۶ گلوله در فوت فاصله مرکز تا مرکز گلوله‌ها به‌صورت اسمی ۶٫۱ سانتی‌متر است. بنابراین احتمال عبور گلوله دوم از شعاع تأثیر گلوله اول وجود دارد. از آنجاکه شلیک گلوله اول باعث کاهش مقاومت سنگ در ناحیه تأثیر خود می‌گردد، در نتیجه انرژی مورد نیاز برای پیمایش مسیر در گلوله دوم کاهش می‌یابد و گلوله دوم عمق نفوذ بیشتری دارد.

عمودی و افقی به ترتیب در حوزه گسلش امتدادلغز و معکوس کاربرد دارد. در ادامه به اختصار برخی نتایج به دست آمده از این تحقیق ارائه شده است.

❖ عمق نفوذ گلوله خرج گود با افزایش تنش‌های برجا کاهش می‌یابد. نرخ کاهش عمق نفوذ برای مؤلفه‌های تنش‌های برجا متفاوت است.

❖ تحلیل آماری عمق نفوذ گلوله‌های خرج گود تحت شرایط سه محوره واقعی نشان داد که افزایش تنش‌های عمود بر محور شلیک گلوله نقش بسیار بیشتری در کاهش عمق نفوذ گلوله نسبت به تنش همسو با محور شلیک دارند.

❖ عمق نفوذ گلوله‌ها در شرایط بارگذاری دومحوره از شرایط بارگذاری سه محوره رایج و واقعی بیشتر است. در حالت بارگذاری سه و دومحوره متناظر تنش موازی با محور شلیک گلوله در هر دو حالت با یکدیگر برابر است. تنش عمودی در حالت سه محوره متناظر با حالت سه محوره واقعی یکسان در نظر گرفته شده و در حالت دومحوره تنش عمودی اعمال نشده است.

❖ الگوی انتشار شکستگی‌ها به نسبت تنش بیشینه به کمینه عمود بر محور شلیک گلوله ارتباط دارد.

❖ الگوی انتشار ترک‌ها در شرایط بارگذاری سه محوره رایج، دومحوره و شرایط سطحی مشابه می‌باشد.

❖ حالت بارگذاری سه محوره متناظر عمق نفوذ بیشتری نسبت به حالت بارگذاری سه محوره واقعی بدست می‌دهد. بنابراین در مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی مشبک‌کاری، شرایط واقعی تنش زمین باید اعمال شود.

❖ در مشبک‌کاری با گان، عمق نفوذ گلوله اول و دوم با یکدیگر متفاوت است.

❖ عمق نفوذ گلوله دوم با اختلاف زیادی از گلوله اول بیشتر است. این در حالی است که عمق نفوذ گلوله سوم افزایش چشمگیری نسبت به گلوله دوم نشان نداده است.

❖ در مشبک‌کاری نمونه‌های بتن و سنگ‌آهک در حالت بارگذاری سه محوره واقعی تعدادی ترک کششی در امتداد تنش بیشینه عمود بر محور شلیک انتشار یافته‌اند.

❖ مقاطع عرضی در محل سوراخ مشبک‌کاری نشان داده است که گازهای ناشی از شلیک گلوله در ترک‌های کششی اطراف سوراخ مشبک‌کاری انتشار یافته و مقداری از مواد بجای مانده از خرج اصلی گلوله در داخل این شکستگی‌ها انتقال



شکل ۱۱. برش عرضی از ۸،۵ سانتیمتری مسیر شلیک گلوله‌ها از آنجا که تمام عوامل دخیل در بارگذاری و شلیک

۴. نتیجه‌گیری

مشبک‌کاری یکی از مهم‌ترین قسمت‌های تکمیل چاه محسوب می‌شود. موسسه نفتی آمریکا استاندارد *API RP 19B* را برای ارزیابی عملکرد مشبک‌کاری ارائه کرده است. در این استاندارد گلوله‌ها در شرایط بارگذاری سطحی و دومحوره شلیک و عملکرد آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالی که در شرایط واقعی مخزن، گلوله تحت بارگذاری سه محوره واقعی شلیک می‌گردند. بنابراین در این مطالعه یک دستگاه بزرگ‌مقیاس برای مشبک‌کاری سه محوره واقعی طراحی و ساخته شد. تعدادی نمونه‌ی بلوکی از جنس بتن با طرح اختلاط استاندارد فوق و سنگ‌آهک تهیه شد. آزمایش‌های مشبک‌کاری تحت بارگذاری سه محوره واقعی و بدون در نظر گرفتن فشار منفذی و چاه انجام گرفت. بر اساس نتایج این آزمایش‌ها، سهم هرکدام از مؤلفه‌های تنش برجا، تأثیر شرایط بارگذاری (سه محوره واقعی، رایج، دومحوره و سطحی) بر عمق نفوذ و الگوی انتشار شکستگی بررسی شد. ضمن اینکه تأثیر تعداد نمونه بر روی عمق نفوذ گلوله‌ها تحت بارگذاری سه محوره واقعی مطالعه شد. این مطالعه برای بهینه‌سازی تعداد آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس از روش طرح آزمایش تاگوچی بهره‌مند شده و سهم هرکدام از تنش‌های برجا بر روی عمق نفوذ با استفاده از تحلیل واریانس نتایج معین شد. نتایج این مطالعه برای بهینه‌سازی مشبک‌کاری در چاه‌های

[org/10.2118/18243-MS](https://doi.org/10.2118/18243-MS).

[6] Bird, K., and Blok, R.H.J. (1996). Perforating in Tight Sandstones: Effect of Pore Fluid and Underbalance. Presented at the SPE European Petroleum Conference, Milan, Italy, 22-24 October. SPE-36860-MS. <https://doi.org/10.2118/36860-MS>.

[7] Brooks, J.E., Yang, W., and Behrmann, L.A. (1998). Effect of Sand-Grain Size on Perforator Performance. Presented at the SPE Formation Damage Control Conference, Lafayette, Louisiana, 18-19 February. SPE-39457-MS. <https://doi.org/10.2118/39457-MS>.

[8] Casero, A., Nicolaysen A., Rylance M., et al. (2017). The Importance of Being Well Connected-High Rate Fracs in Horizontals. Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 24-26 January. SPE-184813-MS. <https://doi.org/10.2118/184813-MS>.

[9] Deisman, N., Soderberg, H., Lang, P. et al. (2013). Cased Wellbore Tools for Sampling and In-Situ Testing of Cement/Formation Flow Properties. International Journal of Greenhouse Gas Control. 16: 62-69. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.02.004>.

[10] Elshenawy, T., and Li, Q.M. (2013). Influences of Target Strength and Confinement on the Penetration Depth of an Oil Well Perforator. International Journal of Impact Engineering 54: 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.10.010>.

[11] Gladkikh, M., LeCompte, B., Harvey, W. et al. (2009). Combining the Prediction of Penetration Depth of Downhole Perforators with the Depth of Invasion. Presented at the SPE European Formation Damage Conference, Scheveningen, Netherlands, 27-29 May. SPE-122319-MS. <https://doi.org/10.2118/122319-MS>.

[12] Grove, B., Heiland, J., Walton, I. et al. (2008). New Effective Stress Law for Predicting Perforation Depth at Downhole Conditions. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, 13-15 February. SPE 111778-MS. <https://doi.org/10.2118/111778-MS>.

[13] Gupta, V., Pandey P.M., Mohinder P.G. et al. (2014). Minimization of Kerf Taper Angle and

یافته‌اند. این مواد عمدتاً به رنگ سیاه در ترک‌های کششی اطراف سوراخ مشبک‌کاری قابل مشاهده هستند.

❖ تعداد ترک‌های کششی ایجادشده در اطراف سوراخ مشبک‌کاری در سنگ‌آهک نسبت به بتن به مراتب بیشتر است.

❖ قطر سوراخ مشبک‌کاری در امتداد محور شلیک کاهش‌یافته به گونه‌ای که سوراخ مشبک‌کاری را زا لحاظ هندسی می‌توان به یک مخروط وارونه شبیه دانست.

❖ روند کاهش قطر سوراخ مشبک‌کاری در امتداد محور شلیک برای گلوله اول و دوم متفاوت است. قطر گلوله دوم با نرخ کمتری نسبت به طول سوراخ کاهش می‌یابد.

۵. فهرست نمادها

جدول ۶. فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
σ	پاسکال	تنش
<i>SPF</i>	گلوله در فوت	دانسیتیه شلیک
<i>SPM</i>	گلوله در متر	دانسیتیه شلیک

۶. مراجع

[1] API RP 43. (1991). Recommended Practice Standard Procedure for Evaluation of Well Perforators.. Washington, DC: API.

[2] API RP 19B. (2014). Recommended Practice for Evaluation of Well Perforators.. Washington, DC: API.

[3] Aseltine, C.L. (1985). Flash X-Ray Analysis of the Interaction of Perforators With Different Target Materials. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, 22-26 September. SPE-14322-MS. <https://doi.org/10.2118/14322-MS>.

[4] Behrmann, L.A., and Halleck P.M. (1988a). Effect of Concrete and Berea Strengths on Perforator Performance and Resulting Impact on the New API RP 43. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 2-5 October, SPE-18242-MS. <https://doi.org/10.2118/18242-MS>.

[5] Behrmann, L.A., and Halleck P.M. (1988b). Effects of Wellbore Pressure on Perforator Penetration Depth. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 2-5 October. SPE-18243-MS. <https://doi.org/10.2118/18243-MS>.

Doi:10.1007/ s00170-004-2102-y.

[22] Karacan, C.O., and Halleck, P.M. (2003). Comparison of Shaped-Charge Perforating Induced Formation Damage to Gas-and Liquid-Saturated Sandstone Samples. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 40 (1–2): 61-75. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(03\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(03)00084-6).

[23] King, G.E., Bingham, M.D., and Kidder, R.W. (1986). Factors Affecting Perforating Charge Performance and Relationship to Port Plug Condition. *SPE Production Engineering* 1 (05): 379-387. SPE-13128-PA. <https://doi.org/10.2118/13128-PA>.

[24] Klotz, J.A., Krueger R.F., and Pye, D.S. (1974). Effect of Perforation Damage on Well Productivity. *Journal of Petroleum Technology* 26 (11): 303-314. SPE-4654-PA. <https://doi.org/10.2118/4654-PA>.

[25] Ott, R. and Bell, W., (1994). Simple Method Predicts Downhole Shaped-Charge Gun Performance (includes associated papers 29332 and 30069). *SPE Production & Facilities*, 9(03): 171-178. SPE 27424-PA. <https://doi.org/10.2118/27424-PA>.

[26] Pucknell, J.K., and Behrmann, L.A. (1991). An Investigation of the Damaged Zone Created by Perforating. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 6-9 October. SPE-22811-MS. <https://doi.org/10.2118/22811-MS>.

[27] Renpu, W. (2011). *Perforating In Advanced well completion engineering*. 3th edition. Gulf Professional Publishing. Chapter.6: 295-363.

[28] Romero, J., Mack, M. G., and Elbel, J. L.(2000). Theoretical Model and Numerical Investigation of Near-Wellbore Effects in Hydraulic Fracturing. *SPE Production & Facilities*, 15 (02): 76-82. SPE-63009-PA. <https://doi.org/10.2118/63009-PA>.

[29] Ross, P.J., (1996). *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*. 2nd edition. McGraw-Hill Press, New York. USA. 333.

[30] Sarmadivaleh, M., Nabipour A., Asadi M.S. et al. (2010) Identification of Porosity Damaged Zones around a Perforation Tunnel Based on

Kerf Width Using Taguchi's Method in Abrasive Water Jet Machining of Marble. *Procedia Materials Science* 6: 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.017>.

[14] Halleck, P. M., Karacan, C.O., Hardesty, J. et al. (2004). Changes in Perforation-Induced Formation Damage with Degree of Underbalance: Comparison of Sandstone and Limestone Formations. Presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, 18-20 February. SPE-86541-MS. <https://doi.org/10.2118/86541-MS>.

[15] Halleck, P.M., Wesson, D.S., Snider, P.M. et al. (1991). Prediction of In-Situ Shaped Charge Penetration Using Acoustic and Density Logs. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 6-9 October. <https://doi.org/10.2118/22808-MS>.

[16] Halleck, P.M., (1994). Further Effect of Stress on Penetration and Flow Performance of Jet Perforators. *API Project* 87-36.

[17] Halleck, P.M., and Behrmann, L.A. (1990). Penetration of Shaped Charges in Stressed Rock. *American Rock Mechanics Association*. Presented at the Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Golden, Colorado, 18-20 June, ARMA-90-0629.

[18] Halleck, P. M., Saucier, R. J., Behrmann, L. A. et al. (1988). Reduction of Jet Perforator Penetration in Rock Under Stress. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 2-5 October. SPE-18245-MS. <https://doi.org/10.2118/18245-MS>.

[19] Harris, M.H. (1966). The Effect of Perforating Oil Well Productivity. *Journal of Petroleum Technology* 18 (04): S518-S528. SPE-1236-PA. <https://doi.org/10.2118/1236-PA>.

[20] Hong, K.C. (1975). Productivity of Perforated Completions in Formations with or without Damage. *Journal of Petroleum Technology*. 27 (08): 1027-1038. SPE-4653-PA. <https://doi.org/10.2118/4653-PA>.

[21] Jeyapaul, R., Shahabudeen, P., and Krishnaiah, K., (2005). Quality Management Research by Considering Multi-Response Problems in the Taguchi Method – a Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 26 (11–12): 1331–1337.

- [39] Wang, T.Y., and Huang, C.Y. (2007). Improving Forecasting Performance by Employing the Taguchi Method. *European Journal of Operational Research*. 176 (2): 1052–1065. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.08.020>.
- [40] Weeks, S.G., (1974). Formation Damage or Limited Perforating Penetration? Test-Well Shooting May Give a Clue. *Journal of Petroleum Technology*. 26 (09): 979-984. SPE-4794-PA. <https://doi.org/10.2118/4794-PA>.
- [41] Yew, C. H., Mear, M. E., Chang, C. C. et al. (1993). On Perforation and Fracturing of Deviated Cased Wellbores. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 3-6 October. SPE-26514-MS. <https://doi.org/10.2118/26514-MS>.
- [43] Yizong, T., Zulkifli M.A., and Khalil, A.M. (2017). Influence of Processing Parameters on Injection Molded Polystyrene Using Taguchi Method as Design of Experiment. *Procedia Engineering* 184. 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.105>.
- [44] Zhang, F.B., Wang Z.L., and Yang, M.Y. (2015). Assessing the Applicability of the Taguchi Design Method to an Interrill Erosion Study. *Journal of Hydrology* 521. 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.059>.
- [45] Zoback, M.D., (2010). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press. New York.
- DEM Simulation. Presented at the ISRM International Symposium, New Delhi, India 23-27 October. ISRM-ARMS6-2010-041.
- [31] Sadeghi, S.H., Moosavi, V., Karami, A. et al. (2012). Soil Erosion Assessment and Prioritization of Affecting Factors at Plot Scale Using the Taguchi Method. *J. Hydrol.* 448, 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.038>.
- [32] Saucier, R.J., and Lands J.F. Jr. (1978). A Laboratory Study of Perforations in Stressed Formation Rocks. *Journal of Petroleum Technology* 30 (09): 1347-1353. SPE-6758-PA. <https://doi.org/10.2118/6758-PA>
- [33] Sharma. M.M. (2000). The Nature of the Compacted Zone Around Perforation Tunnels. Presented at the SPE International Symposium on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, 23-24 February. SPE-58720-MS. <https://doi.org/10.2118/58720-MS>.
- [34] Smith, P.S. Behrmann, L.A., and Yang, W. (1997). Improvement in Perforating Performance in High Compressive Strength Rocks. Presented at the SPE European Formation Damage Conference, The Hague, Netherlands, 2-3 June. SPE-38141-MS <https://doi.org/10.2118/38141-MS>.
- [35] Taguchi, G., (1990). *Introduction to Quality Engineering*. McGraw-Hill, New York, USA, p. 191.
- [36] Thompson, G.D. (1962). Effects of Formation Compressive Strength on Perforator Performance. *American Petroleum Institute, Drilling and Production Practice*, 01 January, New York. API-62-191.
- [37] Turgut, E., Gülşah Ç., and Cengiz Y. (2012). Optimization of the Concentric Heat Exchanger with Injector Turbulators by Taguchi method. *Energy Conversion and Management* 53 (1): 268-275. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.09.011>.
- [38] Van Gijtenbeek, K. A. W., and Pongratz, R. (2004). Perforating and Hydraulic Proppant Fracturing in Western Siberia, Russia. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 26-29 September, Houston, Texas. SPE-90238-MS. <https://doi.org/10.2118/90238-MS>.