

ارایه رویکرد نوینی برای ساخت مغزه‌های مصنوعی شکسته با الگوی زبری تعریف شده برای آزمایش در شرایط مخزن

محمد لطفی^۱، بهزاد تخم‌چی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

(دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۰۴، پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۳۰)

چکیده

در این مقاله به فرآیند ساخت مغزه‌های مصنوعی با قطر ۱/۵ اینچ برای مطالعه شکستگی نمونه‌های مخزنی پرداخته می‌شود. این نمونه‌ها دارای الگوی منظم‌اند و تمرکز اصلی در خصوص آن‌ها، امکان اجرای زبری بطور کنترل شده است، بنابراین از الگوی کنگره‌ای (دندانه اره‌ای) به عنوان ساختار مصنوعی مفروض در طراحی الگوهای زبر استفاده شد. در روش‌های ایجاد سطوح زبر از طریق شکست سنگ، علاوه بر خارج کنترل بودن زبری، میکروشکستگی‌هایی همراه شکستگی اصلی ایجاد می‌شود. چنانچه از روش‌های پیشرفته برشی مانند سیستم‌های کنترل عددی رایانه‌ای بدین منظور استفاده شود؛ باطله برش به اندازه‌ای است که حجم باقیمانده در قیاس با حجم اولیه و مقیاس الگو، از نظر فنی کاملاً مردود است. این موارد در کنار هزینه‌بر بودن تامین تجهیزات، پژوهشگران را عملاً به استفاده از مغزه‌های مخزنی توام با آزمایش‌های مخرب مجبور می‌کند. در این مقاله روشی ساده اما مبتنی بر رویکرد ابتکاری ارایه شده است که در آن با هزینه کمتر، هیچ یک از این مشکلات وجود نخواهد داشت. در این روش در عین توانایی در اجرای الگو، می‌توان سطح مقطع مغزه را به صورت دوار نگه داشت. همچنین با توجه به قالب‌گیری مغزه، هیچ میکروشکستگی در مغزه وجود نخواهد داشت. این موارد در کنار تشابه ساختاری و بافتی مغزه‌های مصنوعی ساخته شده از بتن ویژه با ابعاد خاص، منجر به پاس شدن آزمون‌های کنترل کیفی تعیین سرعت عبور امواج اولتراسونیک و مقاومت فشاری تک محوری شد و در نهایت در دو طرح اختلاط، مقاومت قابل قبول بیش از ۹۸۹۰ و ۱۱۳۸۰ psi به دست آمد.

کلمات کلیدی

بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC)، برش واترجت، ساختار کنگره‌ای (دندانه اره‌ای)، کنترل عددی رایانه‌ای (CNC)، ماده شبیه‌سنگ.

۱- مقدمه

روند نمونه‌گیری و مطالعات آزمایشگاهی در حوزه مهندسی مخازن و بررسی‌های ژئومکانیکی، همانند بسیاری از پروژه‌های فنی و مهندسی مستلزم دسترسی کافی و ساده به نمونه معرف است. با توجه به برخی محدودیت‌ها در مورد انجام آزمایش‌های مخرب بر روی مغزه‌های مخزنی از جمله محدودیت‌های اقتصادی و به دنبال آن، کاهش مغزه مورد نیاز، دریافت نتایج رفتاری حاصل از انجام چنین آزمون‌هایی دشوار خواهد بود. تعداد کم مغزه‌های گران‌قیمت مخزنی برای انجام تست، حتی چنانچه با فرض عدم رخداد هیچ گونه خطایی طی انجام آزمایش‌های مختلف همراه باشد، باز هم ممکن است منجر به افزایش عدم قطعیت و سوق نتایج به سمت عدم اطمینان کامل شود [۴-۱].

از سویی دیگر مغزه‌های به کار رفته در انواع آزمایش‌های طراحی شده در حوزه مطالعات نفتی، عموماً به صورت پلاگ‌های استوانه‌ای شکل‌اند. پلاگ‌ها از نظر هندسی، ابعادی کوچکتر از اندازه رایج در آزمایش‌هایی مانند مکانیک سنگ و عمران دارند و با قطر استاندارد ۱٫۵ اینچ (حدود ۳۸ میلی‌متر) و طول‌های متفاوتی مورد آزمایش‌های گوناگون در سطوح معمولی^۲ و پیشرفته^۳ قرار می‌گیرند. با توجه به ابعاد خاص این مغزه‌ها و لزوم تحمل شرایط فشار/دمای بالا، اجرای برخی الگوها و ساختارهای خاص بر روی چنین نمونه‌هایی با دشواری‌های خاصی همراه است. رفع چنین محدودیت‌هایی مستلزم جایگزینی مغزه طبیعی با نمونه‌های مناسب مصنوعی است تا بتوان الگوی شکستگی مصنوعی را به طریق مناسب در شرایط دلخواه با صرف هزینه کمتر شبیه‌سازی و نتایج آن را مدل کرد. از جمله این موارد به ارایه مدلی عملی برای ساخت و بررسی پارامتر زبری سطوح شکسته می‌توان اشاره کرد.

مطالعه در مورد ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی توسط افراد گوناگون و با مصالح متفاوتی انجام شده است. جانسون و گوی مطالعات خود را در راستای ساخت نمونه مصنوعی ایزوتروپیک مشابه با گل‌سنگ‌های ملبورن استرالیا انجام دادند [۵]. اینجراتنا بر روی توسعه مصالح مناسب برای شبیه‌سازی سنگ‌های رسوبی مطالعات خود را انجام داد. وی در مطالعات خود پارامتر هموزن بودن را لحاظ کرده و برای ساخت نمونه‌های خود از سیمان گچی استفاده کرد. همچنین از آزمون مقاومتی برای کنترل کیفیت نمونه‌ها بهره برد [۶].

ونگ و همکارانش برای بررسی تراوایی نسبی نفت - آب، دو مدل آزمایشگاهی با سطح شکسته ساختند. سطح یکی از آن‌ها هموار و دیگری زبر طراحی شد. آنان برای اجرای سطح زبر، طبق پیشنهاد فورر و همکارانش عمل کردند و این کار را با استفاده از دانه‌های شیشه‌ای^۴ انجام دادند [۷،۸]. با داغالی و همکارانش اثر دو پارامتر زبری و لیتولوژی را بر تراوایی نسبی جریان‌های دو فاز آب - گاز و آب - نفت در شکستگی‌ها بررسی کردند. بدین منظور نمونه‌هایی شفاف در ابعاد ۲۰×۲۰ سانتی‌متر حاوی شکستگی مصنوعی از جنس پلی‌اورتان^۵ و سیلیکون^۶ ساختند [۹]. معراجی و همکاران اثر انواع الیاف‌های کربنی، فولادی و فولادی قلاب‌دار را در نمونه‌های بتنی بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌های ساخته شده را از نظر میزان مقاومت فشاری، رفتار خمشی و ظرفیت جذب انرژی کرنشی کل با یکدیگر مقایسه کردند [۱۰]. ژو و همکارانش در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که ابعاد ریز دانه‌بندی، به شدت منجر به هموار شدن سطح شکسته می‌شود. بنابراین حساسیت تنش آن تحت فشار محصور کننده زیاد، بسیار قوی است. آن‌ها پیشنهاد کردند که به پارامترهای سختی، زبری سطح و پهنای پرشدگی دانه‌ها پرداخته شود [۱۱]. می و همکارانش در عملیات شمع‌کوبی، به ساخت نمونه‌های بتنی پرداختند. آن‌ها نمونه‌های خود را در ابعاد بزرگ تولید کردند سپس رفتار مقاومتی نمونه سنگ مصنوعی و شبیه‌سازی شده خود را مورد تحلیل قرار دادند [۱۲]. امیری و مومیوند با مطالعه مصالح موجود، ماسه سنگ مصنوعی ایجاد کردند. نمونه‌های مصنوعی ارایه شده توسط آن‌ها با تمرکز بر روی پارامتر تخلخل بوده و در بازه ۹۰۰ تا ۳۴۰۹ درصد قرار داشته است [۱۳]. یانگ و همکاران مطالعه خود را بر روی نمونه مصنوعی و صرفاً با هدف تحلیل مقاومت برشی ترکیب سه تایی از سیمان/ماسه/شن انجام دادند، آن‌ها نتایج مقاومتی به دست آمده را به صورت تابعی از سیمان محتوی ارایه کردند [۱۴]. بررسی‌های انجام شده حاکی از اهمیت فوق‌العاده نمونه‌های مصنوعی در مطالعات مختلف از جمله زبری است. در این مسیر، مطالعات بسیاری نیز با تمرکز بر روی زبری پس از شکست طبیعی سنگ انجام شده است [۱۱، ۱۵، ۱۶].

در این مقاله با هدف توسعه ترکیب با مقاومت بالا به مطالعه ساخت مغزه‌هایی با قطر استاندارد آزمایش‌های نفتی پرداخته شده است. همچنین تلاش شده است تا نمونه‌ها دانه‌بندی مناسبی داشته باشند. نکته اصلی در طراحی و ساخت چنین نمونه‌هایی، امکان طراحی الگویی برای کنترل

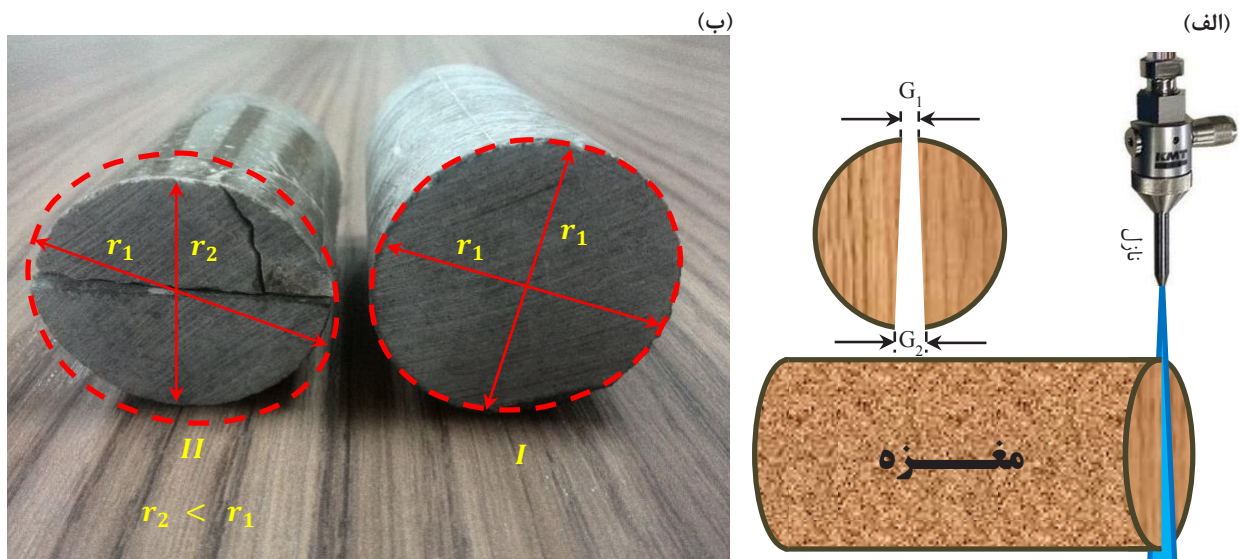
و دندان‌اره‌ای (ساختار مفروض زبری)، دقیق‌ترین دستگاه برش واترجت^۷ رادوکس^۸ مجهز به کنترل عددی رایانه‌ای^۹ به کار گرفته شد (شکل ۱). در این دستگاه، آب به همراه ساینده‌هایی از جنس اکسید آلومینیوم از اریفیس^{۱۰} خارج شده و با اعمال فشاری بیش از ۴۰۰ مگاپاسکال بر سطح مغزه، سنگ را برش می‌دهد. نمونه مورد مطالعه نیز به صورت پلاگ استوانه‌ای شکل با قطر ۱٫۵ و طول ۳ اینچ در نظر گرفته شد. با توجه به ابعاد مغزه و لزوم توجه به اجرای ساختار زبری طراحی شده در چنین فضایی، پس از طراحی و ساخت نگهدارنده مخصوص^{۱۱}، این کار با نازلی^{۱۲} با دقت برش ۰٫۱ میلی‌متر انجام شد.

با توجه به ناهمگنی ساختاری و بافتی سنگ‌ها و نمونه‌های طبیعی و همچنین سختی متغیر ترکیبات کانی‌شناسی همراه، رفتار آن‌ها در هنگام اجرای الگوهای برشی مختلف، متفاوت و عموماً غیرقابل پیش‌بینی و کنترل است؛ زیرا کانی‌ها با میزان مقاومت گوناگون در قیاس با یکدیگر و مواجهه با شرایط یکسان، رفتار همسانی از خود بروز نمی‌دهند. از سویی فرآیند برش با هر میزان از دقت که انجام شود، در نهایت با از دست دادن بخشی از نمونه به عنوان باطله برش همراه است (شکل ۱-الف). این موضوع بی‌اختیار و فارغ از هر میزان دقت در هر

پارامتر زبری و اجرای آن به صورت یک ساختار غیرتصادفی و متناسب با ابعاد کلی مغزه است. به بیان دیگر، محوریت اصلی بر روی طراحی و ساخت مغزه‌های مصنوعی با مقدار زبری مشخص است. این موضوع مهمی است که در مطالعات مشابه تاکنون، عموماً به صورت تصادفی و کنترل نشده از سوی پژوهشگران انجام شده است و همچنان نیز با همین سبک اجرا می‌شود. علاوه بر این تلاش شده است تا با ارایه یک راهکار ابتکاری، ارزان و عملی، این نقطه ضعف مهم برطرف شود. بدیهی است مغزه‌های مدنظر باید از نظر مصالح و همچنین شرایط آزمایشگاهی در حدی باشند که ضمن احراز تمامی الزامات فنی، کیفیت لازم را نیز برای تحمل شرایط آزمایشگاهی در انواع طراحی آزمایش‌های مخزنی، ژئومکانیکی و هیدرومکانیکی دارا باشند. همچنین به دلیل لزوم اجرای الگوهای خاص و پیچیده در چنین آزمایش‌هایی، ترکیب یاد شده باید ضمن گذر از مرز مقاومتی مورد نیاز، چنین قابلیت‌هایی را نیز به همراه داشته باشد و این موضوع، اهمیت این مطالعه را دو چندان می‌کند.

۲- ضرورت انجام مطالعه

پس از بررسی‌های انجام شده، برای اجرای الگوی کنگره‌ای



شکل ۱: الف) شماتیک برش ناهمگن مغزه سنگ با استفاده از نازل واترجت CNC و افزایش ممتد عرض شکاف از اندازه G_1 تا G_2 ($G_1 < G_2$) با فاصله گرفتن از دهانه نازل (این میزان از ناهمگنی در دو راستای موازی و عمود بر امتداد محور مغزه رخ می‌دهد). ب) مقایسه دو نمونه بکر (I) و برش خورده (II) با استفاده از دستگاه واترجت CNC رادوکس (تغییر قطر حاصل از فرایند برش در مقایسه دو مغزه I با قطر r_1 و II با قطر r_2 به r_1 ، کاملاً مشهود و خارج از حد پذیرش ($r_2 < r_1$) است).

را صرفاً به شکستگی اصلی نسبت داد؛ زیرا در تخصیص رفتار ثبت شده، وجود میکروشکستگی‌ها قطعاً بی‌تاثیر نبوده و منجر به وقوع رفتاری خارج از حوزه تشخیص کارشناسی می‌شود. در روش دیگر، اجرای زبری به طور مصنوعی با ساختاری کاتوره‌ای روی سطح ایجاد شده و به این طریق، زبری تولید و مطالعه می‌شود. در واقع مولفه‌هایی تصادفاً روی سطح قراردادده می‌شود و در مجموع به عنوان زبری در نظر گرفته می‌شوند [۸،۷]. این رویکرد نیز حاکی از خارج کنترل بودن و عدم توانایی در کنترل شرایط است. برای فائق آمدن به این مشکلات اساسی و ارایه راهکاری برای ساخت الگوهای زبر، از دو سناریوی اجرای آن بر روی دو نمونه طبیعی و مصنوعی استفاده شد. در هر دو سناریو، اجرای فرآیند مطابق با طراحی انجام گرفته مطابق با شکل ۲ انجام شد. در این طراحی پارامترهای a ، b ، d و l برای مغزه و الگوی داخل آن در نظر گرفته شد (جدول ۱).

با توجه به مقیاس اجرای الگوی دندان‌اره‌ای مستقر در متن مغزه، اجرای آن با توجه به پیچیدگی ساختاری با آسیب‌های مختلف به الگو همراه است. بنابراین از برش لیزری

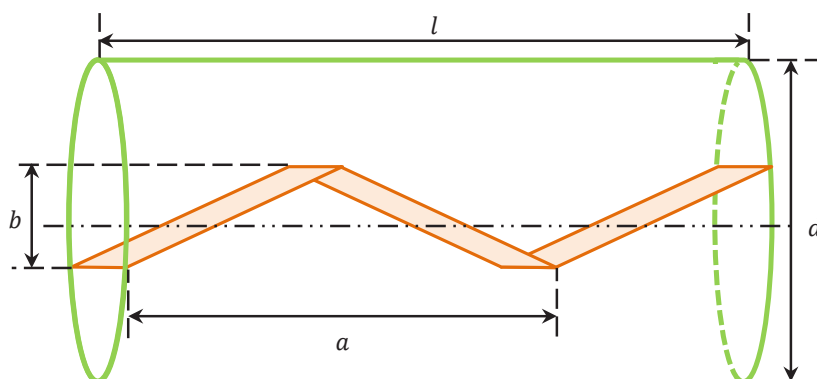
جدول ۱: پارامترهای لحاظ شده در طراحی الگوی زبری کنگره‌ای (دندان‌اره‌ای)

پارامتر	مشخصات	مقدار
a	تناوب الگو	۵ تا ۸ میلی‌متر (بسته به طراحی)
b	دامنه الگو	۳ تا ۵ میلی‌متر
d	قطر مغزه	۳۸ میلی‌متر
l	طول مغزه	۱۰۰ میلی‌متر (قالب اصلی)

شرایطی رخ می‌دهد. در چنین شرایطی که دقت کار اهمیت زیادی دارد، وقوع چنین امر ناگزیری منجر به مردود شدن نمونه از نظر مهندسی می‌شود (شکل ۱-ب). قرارگیری این موضوع در کنار تجهیزات گران قیمت در دو حوزه تامین و یا دریافت خدمات فنی، شرایط اجرایی چنین ایده‌هایی را در عمل به سمت عدم فراهم شدن امکان فنی و حرکت به سمت غیراقتصادی شدن سوق می‌دهد؛ زیرا با چنین رویکردی حتی در صورت حل مساله اقتصادی، از وقوع محدودیت فنی رخ داده نمی‌توان چشم‌پوشی کرد. از این رو یافتن راه‌حلی برای حل این موضوع می‌تواند به گام بزرگی در این حوزه منجر شود. موضوعی که در حوزه‌های مختلف مطالعاتی می‌تواند برای پژوهشگران علاقمند، راه‌گشا باشد.

۳- ساخت الگو

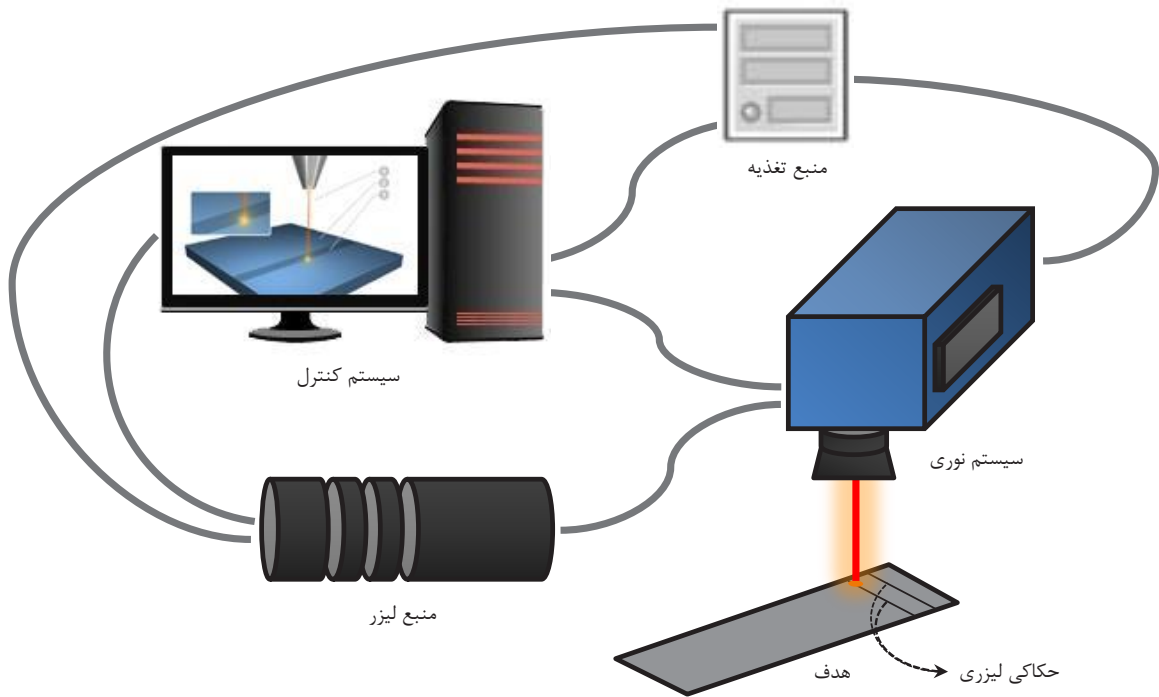
در ساخت الگوی مورد نظر، طراحی زبری اهمیت زیادی دارد. برای دستیابی به این هدف، ساختار کنگره‌ای با اجرای آن در قالب الگوهای دندان‌اره‌ای، به عنوان ایده‌ای جدید برای ساخت زبری تحت کنترل، طراحی شد (شکل ۲). این کار به جهت فاصله گرفتن هر چه بیشتر از ایجاد زبری تصادفی بر روی سطوح شکسته و اجرای آن به صورت تعریف شده است. در نمونه‌های مطالعه شده مشابه، یکی از راه‌های ایجاد سطوح زبر، شکستن سنگ به طور طبیعی و ایجاد دو سطح مکمل با زبری بدون ترتیب بوده است [۱۶،۱۵،۱۱]. چنین ایده‌ای منجر به ایجاد سطحی با زبری اتفاقی و به طور ناخواسته منجر به ایجاد میکروشکستگی‌ها و میکروتورک‌هایی همراه با شکستگی اصلی می‌شود. وجود این میکروشکستگی‌ها منجر به این می‌شود که نتوان رفتار ثبت شده در حوزه مطالعاتی



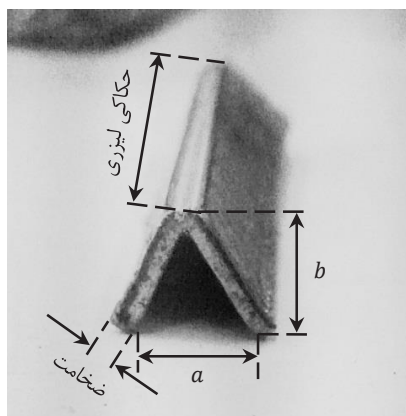
شکل ۲: طراحی الگوی کنگره‌ای (دندان‌اره‌ای) برای ایجاد ساختار زبر قابل کنترل

برش بخشی از ضخامت الگو است (شکل ۴-الف) که اجرای هرچه دقیق‌تر الگو را باعث می‌شود (شکل ۴-ب). با چنین رویکردی می‌توان الگوهای زبری مختلفی را به صورت کاملاً کنترل شده در اختیار داشت.

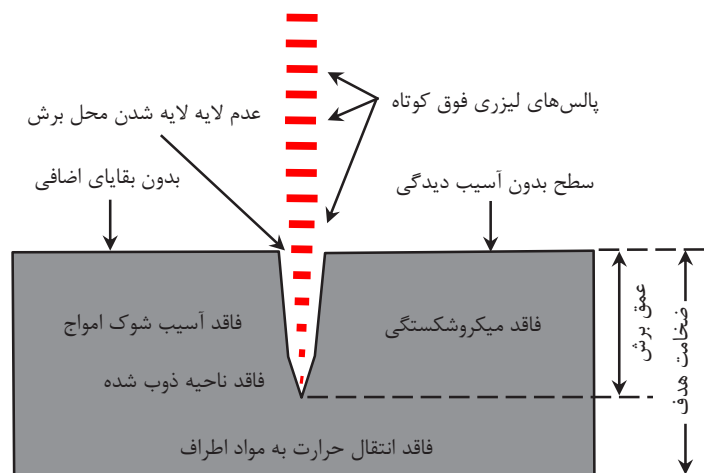
کنترل شده بدین منظور استفاده شد (شکل ۳). در این نوع برش با استفاده از پالس‌های فوق‌العاده کوتاه و قدرتمند لیزری، می‌توان برش را با کمترین القای آثار جانبی مزاحم در متن باقیمانده نمونه هدف انجام داد. در واقع برش کنترلی به معنی



الف) دیاگرام شماتیک ساختار دستگاه حکاکای لیزری

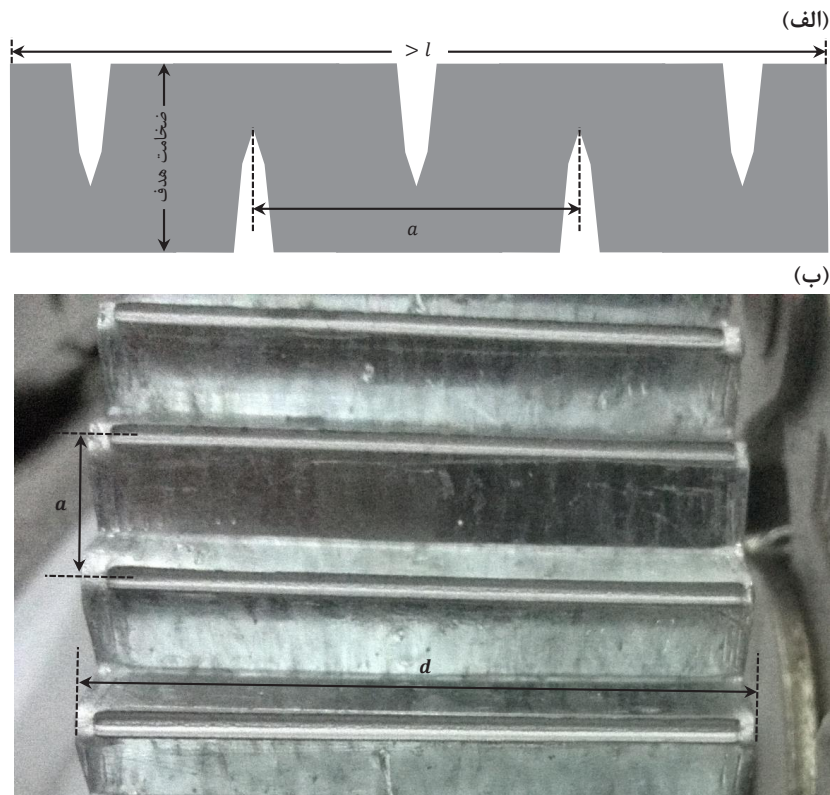


پ) الگوی کنگره‌ای (دندان‌اره‌ای)



ب) حکاکای و برش کنترلی لیزری

شکل ۳: الف) دیاگرام شماتیکی از ساختار دستگاه حکاکای لیزری مورد استفاده در برش کنترلی سطح الگو مطابق با طراحی زبری، ب) روش اجرای برش کنترلی انجام شده بر روی سطح الگوی مدنظر، پ) نمونه‌ای از نتیجه اجرای الگو پس از حکاکای و برش کنترلی لیزری طبق الگوی کنگره‌ای (دندان‌اره‌ای) زبری



شکل ۴: الف) ساختار اجرای الگوی زبری با برش کنترل شده لیزری بر روی طولی بزرگتر از طول مغزه (l)، ب) نمای نزدیک از اجرای برش بر روی نمونه واقعی با مشخصات مندرج در طراحی الگوی زبری در شکل ۲

۳-۱- ساخت مغزه مصنوعی

با توجه به مقیاس اجرای الگوی زبری، سناریوهای مختلفی از تعدد مواد تا نحوه اجرا می‌توان مطرح کرد. در سناریوی اجرای برش واترجت CNC و اجرای زبری بر روی مغزه طبیعی، با توجه به بروز مشکل غیرقابل انکار کاهش حجم نمونه به دلیل برش مخروطی آب خارج شده از اریفیس (شکل ۱-الف)، سطح مقطعی بیضوی شکل ایجاد می‌شود و مغزه از نظر فنی مردود است (شکل ۱-ب). در سناریوی اجرای الگو با روش ابتکاری، این کار با استفاده از ترکیب بتن ویژه پودری واکنش‌پذیر^{۱۲} انجام شد. در این ساختار بتنی، با توجه به ابعاد خاص قالب‌ریزی و قرارگیری ذرات به صورت کاملاً هدایت شده در مسیر قالب، مشکل کاهش سطح مقطع وجود نخواهد داشت اما دستیابی به طرح اختلاط مناسب بتن مهم است.

۴- مواد به کار رفته در ساخت مغزه مصنوعی

از جمله راه‌های موثری که در افزایش مقاومت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد، افزودن الیاف به بافت آن است. در

حقیقت وجود الیاف در کنار دانه‌های درشت موجود در ترکیب، مقاومت بسیار محسوسی به نمونه‌های بتنی خواهد داد؛ اما در ساخت مغزه‌های مطابق با هدف مفروض در مقیاس خاص، وجود الیاف استیل در کنار دانه‌های درشت بخش سنگدانه، نه تنها کمکی به ساخت نمونه نخواهد کرد؛ بلکه به عنوان عامل بازدارنده و منفی به شمار می‌رود؛ زیرا وجود دانه‌های درشت به همراه الیاف فولادی، منجر به عدم اجرای صحیح و کامل الگوی زبری درون مغزه می‌شود (شکل ۵). علاوه بر این، ابعاد خاص الیاف فولادی به گونه‌ای است که اجرای بتن در چنین ابعادی را با اختلال جدی همراه می‌کند (شکل ۵-ب). همچنین لزوم تحمل تنش فشارشی به جای کششی در مغزه‌های مدنظر موضوع دیگری است که در مجموع به کارگیری الیاف را در چنین نمونه‌ای منتفی می‌کند. بنابراین با چنین بتنی می‌توان اقدام به ساخت مغزه‌ای کرد که علاوه بر دارا بودن ساختاری مقاوم، امکان اجرای چنین الگویی با ساختار و بافتی مشابه سنگ طبیعی در قیاس با موادی مانند فایبرگلاس را نیز باشد (شکل ۶).

۴-۱- سنگدانه

لزوم به کارگیری رابطه فولر- تامسون برای تعیین بازه مطلوب سنگدانه بتن [۱۷] از یک سو و تاکید بر لزوم حذف بخش درشت دانه تا حد امکان از سویی دیگر منجر به انتخاب ساختار پیشنهادی توسط پیر (۱۹۹۵) به عنوان طرح مبنای بتن RPC شد [۱۸]. بدین منظور، ماسه مورد نیاز پس از خردایش و آماده‌سازی مطابق با نمودارهای دانه‌بندی شکل ۷ و ۸ مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۲- بخش سیمانی

در اجرای عمومی بتن، سیمان‌های رایج مطابق با استاندارد ۱۱۵۷ انجمن مواد و آزمون امریکا است [۱۹، ۲۰]. با در نظر گرفتن مصالح و طرح اختلاط بتن، سیمان تیپ ۲ پورتلند (جدول ۲) منطبق بر استاندارد ۱۵۰ انجمن مواد و آزمون امریکا [۲۱] استفاده شد.

۴-۲-۱- نسبت آب به سیمان

در نمونه‌های بتنی، معمولاً نمونه‌های با مقاومت بیشتر از ۴۲ مگاپاسکال (حدوداً معادل ۶۰۰۰ psi) را با مقاومت بالا در نظر می‌گیرند (شکل ۹) [۲۲]. برای دستیابی به این میزان از مقاومت، نسبت آب به سیمان که میکروساختارهای بتن را تغییر می‌دهد عاملی اثرگذار است (شکل ۱۰). آبرامز (۱۹۱۹) رابطه بین نسبت آب به سیمان و میزان مقاومت فشاری را در سال ۱۹۱۹ به صورت رابطه ۱ بیان کرد.

$$f_c = \frac{k_1}{k_2 c} \quad (1)$$

که در آن:

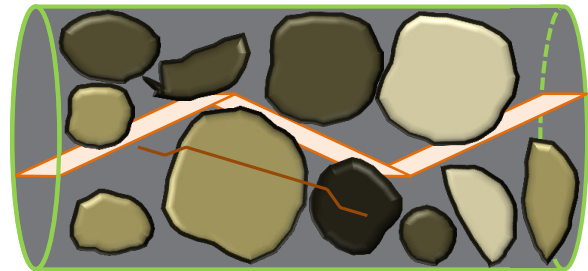
k_1 و k_2 : ثابت‌های تجربی

w/c: نسبت آب به سیمان است [۲۳، ۲۴].

۴-۳- فوق روان‌کننده

فوق روان‌کننده‌ها به عنوان یکی از عوامل کاهنده آب، معمولاً بر پایه پلی‌کربوکسیلات یا نفتالین‌سولفونات به صورت زودگیر و یا دیرگیر سنتز می‌شوند [۲۵، ۲۶]. این ماده با بازه موثر مصرفی ۰٫۶ تا ۱٫۰ درصد وزنی سیمان [۲۷] و جذب به دانه‌های سیمانی منجر به ساختاری منظم در ذرات و روانی بالا در آزمون اسلامپ می‌شود.

(الف)

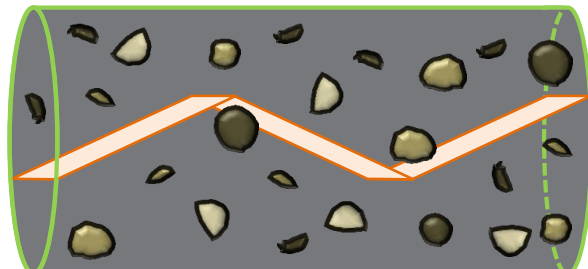


(ب)

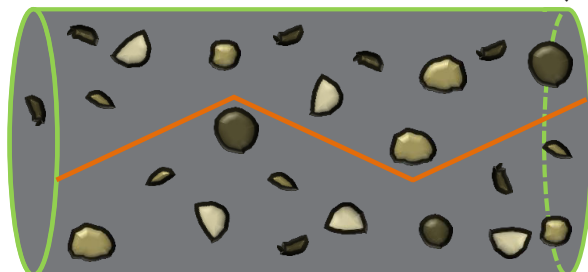


شکل ۵: ممانعت ذرات درشت دانه بخش سنگدانه و الیاف فولادی هنگام به کارگیری در طرح اختلاط بتن، وضعیت مورد انتظار، (الف) وضعیت واقعی (منطقه هاشورخورده، نشانگر فضای خالی ایجاد شده هنگام قالب‌گیری و از بین رفتن ساختار منظم الگو به دلیل وجود ابعاد مزاحم است).

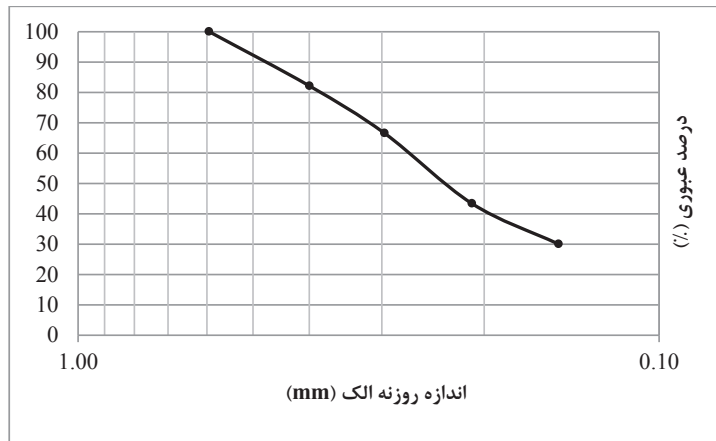
(الف)



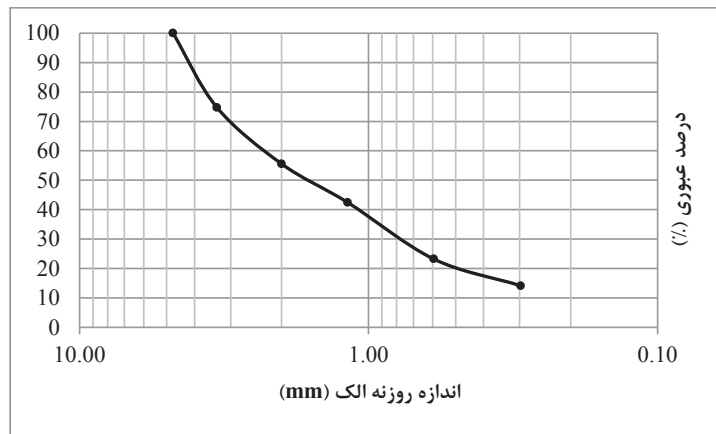
(ب)



شکل ۶: اصلاح قرارگیری دانه‌بندی با مینا قرار دادن RPC به عنوان مبنای مطالعاتی ساخت بتن با قابلیت اجرای طراحی الگوی زبر طبق الگوی کنگره‌ای شکل (دندانه اره‌ای) با مقاومت مورد تایید، (الف) وضعیت مورد انتظار، (ب) تطبیق وضعیت واقعی با وضعیت مورد انتظار با قرارگیری مناسب ذرات در زوایای تعیین شده مطابق با طراحی الگوی زبری پس از قالب‌گیری



شکل ۷: منحنی دانه‌بندی ماسه به کار رفته در طرح‌های اختلاط بتن شماره ۱ و ۲



شکل ۸: منحنی دانه‌بندی ماسه به کار رفته در طرح اختلاط بتن شماره ۳

جدول ۲: نتایج آنالیز فیزیکی و شیمیایی سیمان پورتلند تیپ ۲ مورد استفاده در طرح اختلاط بتن

آنالیز شیمیایی							
SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	LOI (%)	IR (%)	C ₃ A (%)
حد استاندارد	ماکزیمم ۸	ماکزیمم ۰,۷۵	ماکزیمم ۳	ماکزیمم ۳	ماکزیمم ۳	ماکزیمم ۰,۷۵	ماکزیمم ۸
سیمان مصرفی	۲۱,۵	۴,۹۲	۴,۳۱	۱,۳	۱,۸	۱,۷	۵,۸
آنالیز فیزیکی							
مقاومت فشاری ($\frac{kg}{cm^2}$)			درصد انبساط اتوکلاو	گیرش (دقیقه)		بلین ($\frac{cm^2}{gr}$)	
۲۸ روزه	۷ روزه	۳ روزه		نهایی	ابتدایی		
حد استاندارد	مینیمم ۳۱۵	مینیمم ۱۷۵	مینیمم ۱۰۰	ماکزیمم ۰,۸	ماکزیمم ۳۶۰	مینیمم ۴۵	مینیمم ۲۸۰۰
سیمان مصرفی	۴۹۵	۲۹۹	۲۰۷	۰,۰۵	۲۰۰	۱۴۰	۲۹۵۰

این مقاله از فوق روان کننده Vand Superplast PCAHR2 استفاده شده است.

۴-۴- میکروسیلیس

میکروسیلیس با دارا بودن ساختار فیزیکی و ترکیب شیمیایی منحصر به فرد و به شدت واکنش پذیر خود و همچنین با خنثی سازی آهک تولید شده طی هیدراسیون سیمان و افزایش سرعت واکنش با هیدروکسید کلسیم حاصل از آن، منجر به افزایش مقاومت بتن می شود. این ماده طبق مندرجات جدول ۳ از نظر فیزیکی پودری با وزن مخصوص ۰٫۲ تا ۰٫۶ گرم بر سانتی متر مکعب است. برای جلوگیری از اثر مخرب افزودن بیش از حد آن بر مکانیزم اثرگذاری، برخلاف پیشنهاد برخی مبنی بر به کارگیری مقدار ۲۵ تا ۳۰ درصدی از این ماده [۳۰]، در همه طرح‌های اختلاط حدود ۸ درصد از آن مورد استفاده قرار گرفت.

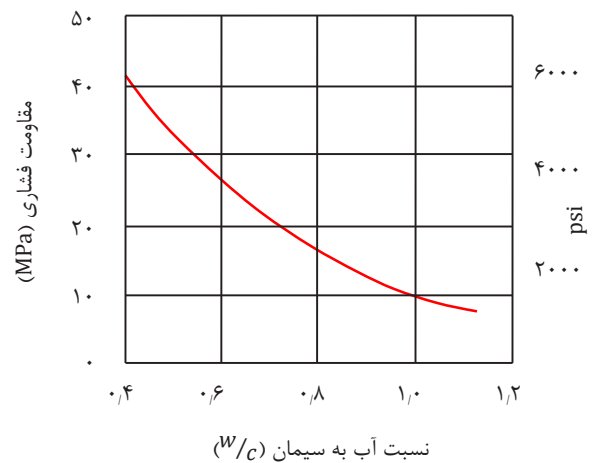
جدول ۳: نتایج آنالیز شیمیایی پودر میکروسیلیس مورد استفاده در طرح اختلاط بتن

ترکیب شیمیایی	مقدار (درصد)
Al ₂ O ₃	۰٫۲۷
CaO	۱٫۳۰
Fe ₂ O ₃	۱٫۵۶
MgO	۳٫۸۱
SiO ₂	۸۷٫۹۷

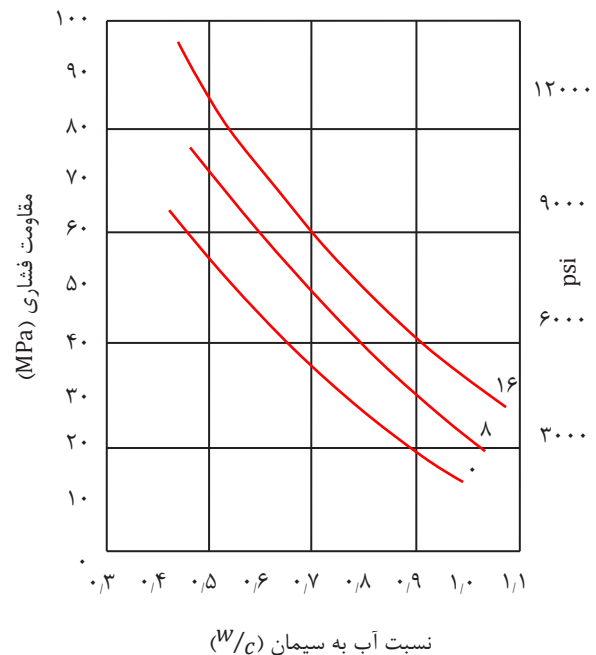
$$\bullet \rho = 0,91 \frac{kg}{m^3}$$

۵- اختلاط بتن

در فرآیند ساخت مغزه‌ها، سه برنامه اختلاط مختلف مطابق با جدول‌های ۴، ۵ و ۶ طراحی شد. در طرح شماره ۱ (جدول ۴)، ابتدا اجزای خشک ترکیب به مدت ۶ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. سپس ۷۰ درصد ترکیب فوق روان کننده و آب، به مجموعه افزوده شد. پس از گذشت ۵ دقیقه از ادامه اختلاط، مقدار باقیمانده نیز به مخلوط اضافه و ۵ دقیقه دیگر ترکیب شد. این فرآیند به طور مشابه برای طرح شماره ۲ (جدول ۵) نیز تکرار و فرآیند قالب‌گیری انجام شد (شکل ۱۱). در طرح شماره ۳، (جدول ۶) اجزای خشک به مدت ۱۰ دقیقه و مابقی فرآیند به طور مشابه انجام و در ابعاد استاندارد قالب‌گیری شد (جدول ۷).



شکل ۹: رابطه بین میزان مقاومت فشارشی و نسبت آب به فشار در بتن [۲۳]



شکل ۱۰: منحنی رابطه بین مقاومت فشارشی و نسبت آب به سیمان در حضور مقادیر مختلفی میکروسیلیس [۲۴]

در این بین ترکیبات دیرگیر با تاخیر در دوره خاموش^{۱۴} هیدراسیون، سخت شدن سیمان را به تعویق انداخته [۲۸] و جای‌گیری بتن را در قالب تسهیل می‌کنند. این فرآیند، گیرش بتن را مطابق با استاندارد ۴۰۳ انجمن مواد و آزمون امریکا [۲۹] با مطلوبیت همراه می‌کند. در طرح‌های اختلاط

جدول ۵: طرح اختلاط شماره ۲ (کیلوگرم / مترمکعب)

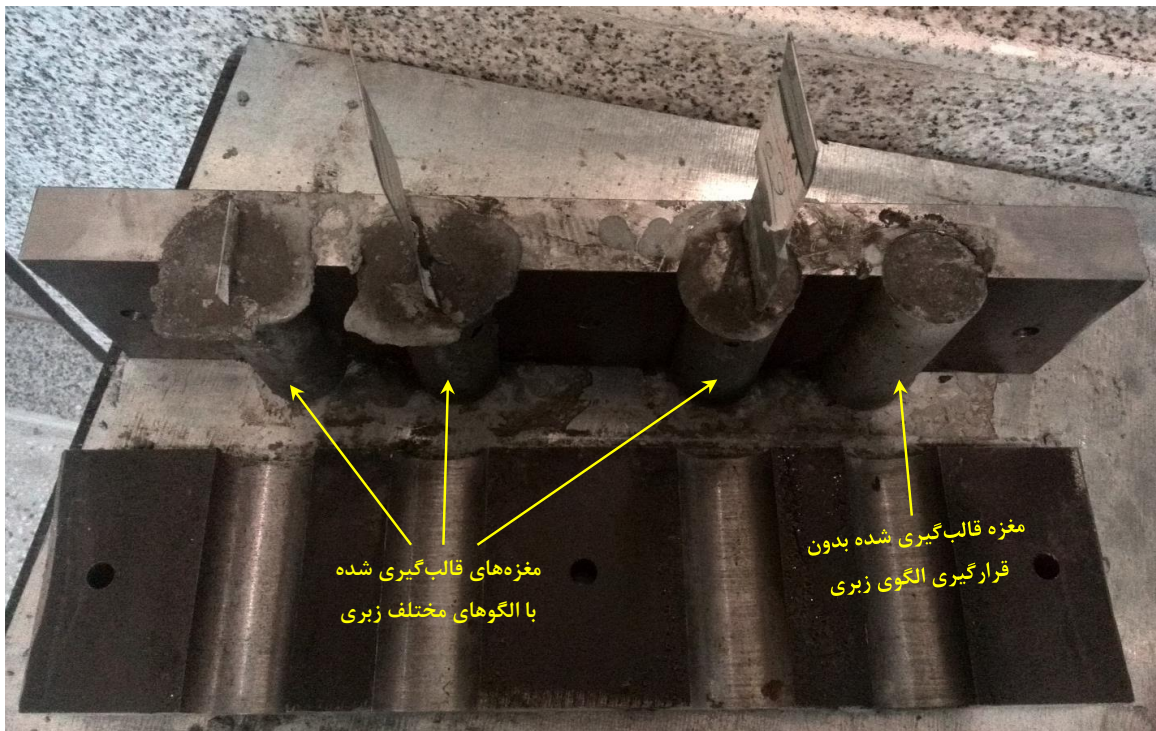
جرم (کیلوگرم)	مصالح
۷۹۴,۰۰	سیمان
۱۲۴۱,۷۸	ماسه ۱۵۰ تا ۶۰۰ میکرومتر
۱۹۸,۵	پودر میکروسیلیس
۱۱,۹۱	فوق روان کننده
۱۹۸,۵	آب

جدول ۴: طرح اختلاط شماره ۱ (کیلوگرم / مترمکعب)

جرم (کیلوگرم)	مصالح
۸۰۰,۰۰	سیمان
۱۰۱۰	ماسه ۱۵۰ تا ۶۰۰ میکرومتر
۲۰۰	پودر میکروسیلیس
۱۲	فوق روان کننده
۱۹۰	آب

جدول ۶: طرح اختلاط شماره ۳ (کیلوگرم / مترمکعب)

جرم (کیلوگرم)	مصالح
۷۹۴,۰۰	سیمان
۱۷۵,۶۰	۰ تا ۰,۳
۱۱۲,۹۰	۰,۳ تا ۰,۶
۲۳۸,۳۰	۰,۶ تا ۱,۲
۱۶۳,۱۰	۱,۲ تا ۰,۲
۲۳۸,۳۰	۲,۰ تا ۳,۲
۳۱۳,۵۸	۳,۲ تا ۴,۷۵
۱۹۸,۵	میکروسیلیس
۱۱,۹۱	فوق روان کننده
۱۹۸,۵	آب



شکل ۱۱: قالب طراحی شده برای ساخت مغزه های بتنی در لحظه قالب گیری مغزه ها با / بدون الگوی زبری

جدول ۷: مشخصات هندسی نمونه‌های بتنی ساخته شده و آزمایش شده

شماره نمونه			پارامتر	
۳	۲	۱	دفعه اندازه‌گیری	
۳۷,۸۹	۳۷,۸۰	۳۷,۸۱	۱	r (mm)
۳۷,۷۷	۳۷,۷۴	۳۷,۸۱	۲	
۳۷,۹۱	۳۷,۷۲	۳۸,۰۱	۳	
۳۷,۹۱	۳۷,۷۰	۳۷,۹۵	۴	
۳۷,۸۷	۳۷,۷۴	۳۷,۹۰	\bar{r} (mm)	
۱۱۲۵,۸۰	۱۱۱۸,۰۸	۱۱۲۷,۲۸	A (mm ²)	
۸۷,۰۶	۸۷,۰۶	۸۷,۰۶	L (mm)	

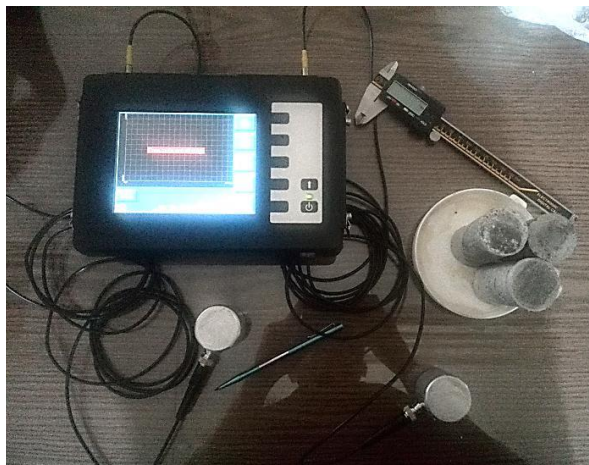
۶- آزمون‌های کنترل کیفی

برای کنترل کیفیت، نمونه‌های بتنی ساخته شده تحت آزمایش تعیین سرعت عبور امواج اولتراسونیک (شکل ۱۲) و مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند (شکل ۱۳).

بررسی نتایج به دست آمده از هر دو آزمایش (جدول ۸ و ۹) بر روی مغزه‌های ساخته شده نشان می‌دهد که مقاومت اکتسابی در طرح اختلاط شماره ۱ (جدول ۴)، اندکی بالاتر از حد آستانه بتن‌های با مقاومت بالا است؛ اما با توجه به نوع طراحی برخی آزمایش‌های مخزنی و ژئومکانیکی و لزوم اعمال فشار در محدوده‌ای به مراتب بالاتر از این مقدار، چنین مغزه‌ای با وجود کسب حد نصاب لازم، صرفاً در محدوده فشار کسب شده پاسخگو خواهد بود و برای مقادیر بالاتر از آن مناسب نیست. ضمن اینکه در صورت اجرای طرح‌های خاص بر روی مغزه مصنوعی، عدم توانایی در تحمل تقابل مابین فشارهای موجود مانند فشار محصورکننده و فشار تزریق سیال نیز می‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین باید این نقیصه جدی را با نمونه‌ای با مقاومت فشاری بالاتر برطرف کرد. این نقیصه در نتایج به دست آمده از آزمایش طرح اختلاط شماره ۲ (جدول ۵) به خوبی و با فاصله کاملاً مناسبی رفع شده است (جدول ۹).

جدول ۸: نتایج آزمایش اولتراسونیک

شماره نمونه			پارامتر
۳	۲	۱	r (μs)
۲۰,۳	۲۱,۷۰	۱۹,۳۰	$V \left(\frac{m}{s} \right)$
۴۲۸۸,۶۷	۴۰۱۱,۹۸	۴۵۱۰,۸۸	

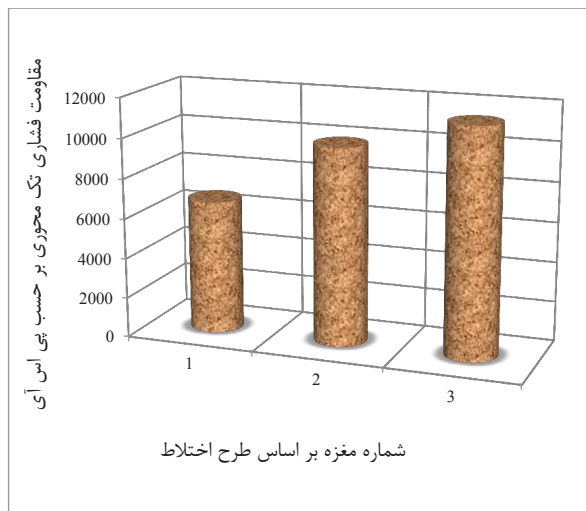


شکل ۱۲: انجام آزمون تعیین سرعت عبور امواج اولتراسونیک مغزه‌ها



شکل ۱۳: آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری مغزه‌های مصنوعی

دارد (جدول ۱۰). در مجموع، رویکرد پیشنهادی از لحاظ اقتصادی و زمانی مقرون به صرفه است. همچنین با ساخت نمونه به این روش علاوه بر موارد یاد شده، امکان شبیه‌سازی مخزن با صرف هزینه کمتر توأم با انجام متعدد آزمایش‌های تکرارپذیر مخرب فراهم می‌شود. این موضوعی است که در مقایسه با نمونه‌های طبیعی، مغزه پس از پیاده‌سازی الگوی زبری از نظر فنی مردود نخواهد شد.



شکل ۱۴: نتایج تست مقاومت فشاری تک محوری بر روی مغزه‌های بتنی با سه طرح اختلاط مختلف

جدول ۹: نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

پارامتر	شماره نمونه		
	۱	۲	۳
F (kN)	۵۱٫۷۰	۷۶٫۵۰	۸۸٫۳۵
f_c (MPa)	۴۶٫۰۸	۶۸٫۲۰	۷۸٫۴۸
f_c (psi)	۶۶۸۳٫۳۴	۹۸۹۱٫۵۷	۱۱۳۸۲٫۵۶

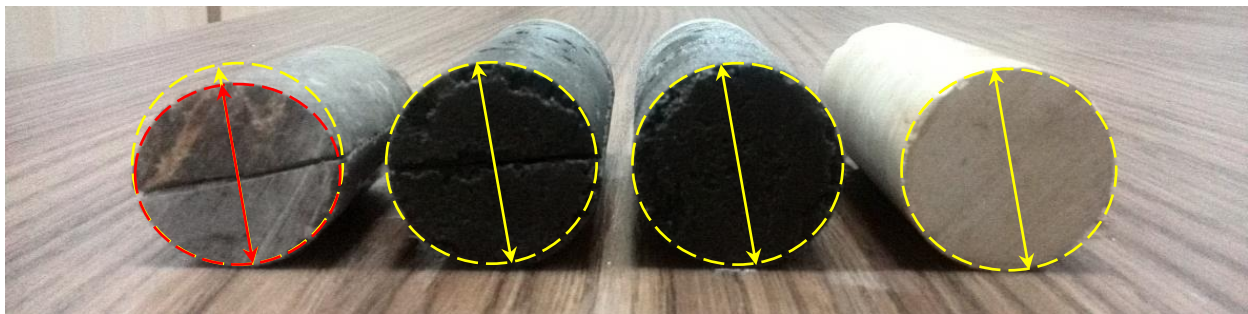
در طرح اختلاط شماره ۲ (جدول ۵)، با نمونه‌ای کاملا مناسب و در محدوده آزمایشگاهی رایج در صنعت می‌توان مواجه بود. این موضوع با بررسی نتایج حاصل از طرح اختلاط شماره ۳ (جدول ۶) به اوج خود می‌رسد. در حقیقت مقاومت به دست آمده حاکی از ساخت نمونه‌ای فراتر از محدوده فشاری مدنظر است (شکل ۱۴). ضمن اینکه در مورد طرح شماره ۲ (جدول ۵) و طرح شماره ۳ (جدول ۶)، با توجه به استفاده از فوق روان‌کننده دیرگیر، بتن امکان قرارگیری کامل در قالب و الگوی مابین آن را داشته است (شکل ۱۵). بنابراین در اجرای الگوی طراحی شده نیز، از طرف هر دو نمونه پاسخ مناسبی دریافت شد (شکل ۱۶).

۷- نقاط قوت و ضعف

طراحی آزمایشگاهی انجام گرفته، نشان می‌دهد که همانند دیگر مطالعات آزمایشگاهی، رویکرد پیشنهادی نقاط قوت و ضعفی



شکل ۱۵: مقایسه الگوی زبر کنگره‌ای (دندانه اره‌ای) اجرا شده بر روی دو نمونه الف) طبیعی و ب) مصنوعی، الف) نمونه طبیعی برش خورده با استفاده از دستگاه برش CNC، ب) نمونه بتنی قالب‌گیری شده با طراحی و ساخت الگوی ابتکاری طراحی شده



(ت)

(پ)

(ب)

(الف)

قطر مغزه بدون تغییر (۳۸ میلیمتر) --- قطر مغزه با تغییر (کمتر از ۳۸ میلیمتر) ---

شکل ۱۶: مقایسه قطر سطح مقطع مغزه‌های مصنوعی (RPC) و طبیعی برش خورده با دستگاه CNC با مغزه استاندارد آزمایشات نفتی، (الف) نمونه مغزه استاندارد آزمایشات نفتی با قطر ۱/۵ اینچ (حدود ۳۸ میلی‌متر)، (ب) مغزه RPC قالب‌گیری و ساخته شده بدون قرارگیری الگوی زبری، (پ) مغزه با اجرای الگوی زبری و حفظ قطر سطح مقطع، (ت) مغزه سنگی برش خورده با استفاده از برش CNC

جدول ۱۰: نقاط قوت و ضعف مغزه مصنوعی ساخته شده مطابق با رویکرد پیشنهادی

نقطه قوت	نقطه ضعف
دسترسی آسان به مصالح مورد نیاز و ملزومات اجرایی	لزوم دقت در مقدار استفاده از ماده فوق روان‌کننده در طرح اختلاط بتن
عدم نیاز به استفاده از الیاف و یا مخلوط‌های حاوی آن در طرح اختلاط	لزوم دقت در نوع ماده فوق روان‌کننده در طرح اختلاط
دقت بالا در ساخت و ارایه نمونه آزمایشگاهی نهایی	لزوم گذر زمان مناسب برای رسیدن به مقاومت نهایی بتن
صحت کافی و عبور موفقیت‌آمیز از آزمون‌های کنترل کیفی	لزوم دقت در طراحی قطر قالب برای قرارگیری مغزه در نگهدارنده
تکرارپذیر بودن فرآیند ساخت نمونه با حفظ دقت و صحت	نیاز به زمان و دقت کافی در ساخت الگوی زبری
اجرای مناسب زبری با توجه به دانه‌بندی بتن ویژه	نیاز به رعایت دقت کافی در نسبت آب و سیمان
امکان اجرای تحت کنترل الگوی زبری تعریف شده بر روی مغزه	
مقاومت الگو و قالب در برابر رطوبت	
امکان استفاده چندین باره از الگوی زبری ساخته شده در فرآیند قالب‌گیری	
نداشتن باطله در قیاس با برش واترجت و از دست نرفتن نمونه	
مقاومت کاملاً مناسب برای انجام آزمون‌های مخزنی و ژئومکانیکی	
نبود میکروشکستگی در مغزه مصنوعی	
بازشدگی تحت کنترل شکستگی با جلوگیری از افزایش ممتد عرض شکاف	
حفظ سطح مقطع مغزه برای قرارگیری در نگهدارنده مغزه	
صرفه اقتصادی کامل در قیاس با اجرای مشابه طرح بر روی نمونه طبیعی	
حفظ و نگهداری از مغزه‌های ارزشمند مخزنی در طراحی آزمون‌های مخرب	
شباهت بافتی و ساختاری مغزه مصنوعی با نمونه‌های طبیعی	

۸- نتیجه‌گیری

نمونه‌های طبیعی بسیار کم هزینه‌تر و کاملاً مقرون به صرفه است. ضمن اینکه با چنین رویکرد و روندی، از نظر مسایل اجرایی نیز به مراتب ساده‌تر و با دقت بالاتری خواهد بود.

در عموم آزمایش‌های مخزنی طراحی شده در صنایع نفتی، مغزه‌های آزمایشی با قرارگیری در نگهدارنده مغزه^{۱۵} تحت آزمایش قرار می‌گیرند. این موضوع، مطالعات مربوط به رفتار شکستگی‌ها را نیز شامل می‌شود. بنابراین دستیابی به نتیجه دلخواه، مستلزم حفظ سطح مقطع مغزه با وجود اجرای هرگونه الگو و شکستگی به عنوان شکستگی مصنوعی و یا شبه‌طبیعی است. با توجه به فضای ناهمگن نمونه‌های سنگی و محدودیت‌های اجرایی، سطح مقطع مغزه‌هایی از جنس طبیعی سنگ، بیضوی شده و عملاً طی برش از دست می‌رود. در حقیقت این رخداد فراتر از نگاه اقتصادی است که می‌توان به این فرآیند از منظر مقرون به صرفه بودن داشت. این موضوع درحالی مطرح می‌شود که به عنوان سناریوی جایگزین این نقیصه، باید از تجهیزات گران‌قیمتی استفاده کرد که یا به دلیل تامین و یا دریافت خدمات فنی، حتی در صورت جبران محدودیت‌های فنی، هزینه‌برند. این در حالی است که در روش ساخت مغزه‌های مصنوعی به این روش سطح مقطع نمونه کاملاً حفظ می‌شود؛ بنابراین هیچگونه محدودیتی در نگهداری مغزه درون نگهدارنده مغزه برای ادامه آزمایش‌ها وجود نخواهد داشت، همچنین مطالعه رفتار شکستگی‌ها مطابق با الگوی پیشنهادی در قیاس با نمونه‌های با مواد دیگر و ساختار نزدیک به سنگ با رفتار مشابه را در عین کاهش هزینه ساخت فراهم می‌کند. نتایج پیشنهادی را می‌توان برای مطالعه رفتار شکستگی‌ها با قابلیت تکرار ساخت الگو به منظور پایش شرایط مختلف انواع آزمایش‌های مخرب طراحی شده با حفظ مغزه‌های ارزشمند مخزنی انجام داد.

۹- مراجع

- [1] National Research Council, (2000). "Risk analysis and Uncertainty in Flood Reduction Studies". National Academic Press, Washington, D.C. DOI: <https://doi.org/10.17226/9971>.
- [2] Hashemi Tangestani, M., and Moore, F. (2002). "The use of Dempster-Shafer model and GIS in integration of geoscientific data porphyry Copper potential mapping, north of Shahr-e-Babak, Iran". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4(1): 65-74.
- [3] Challa, S., and Koks, D. (2004). "Bayesian and Depster-

مغزه‌های مورد استفاده در حوزه‌های گوناگون صنعت نفت، عموماً در ابعادی متفاوت با ابعاد رایج در آزمایشگاه مکانیک سنگ‌اند. این موضوع در کنار طراحی خاص و برخی مطالعات ژئومکانیکی، مکانیک سنگی و همچنین مخزنی مانند بررسی شکستگی‌ها، منجر به عدم امکان اجرای الگوهای خاص بر روی نمونه و یا صرف هزینه سنگین برای اجرای آن می‌شود. علاوه بر این، توانایی تحمل فشار به وسیله نمونه سنگی نیز امری اجتناب‌ناپذیر و بدیهی به شمار می‌رود. عدم توجه تجمیع این دو موضوع و یا محدودیت‌های دسترسی و اقتصادی (حتی در صورت امکان اجرا) منجر به لزوم ساخت مغزه‌هایی خاص به طور مصنوعی و آزمایشگاهی می‌شود.

بررسی نتایج به دست آمده از ساخت چندین نمونه با طرح اختلاط گوناگون نشان می‌دهد که مغزه‌های مصنوعی علاوه بر قابلیت ساخت و تحمل فشار، از نظر ساخت و مسایل اقتصادی قابل قیاس با روش‌های اجرایی بر روی نمونه‌های طبیعی به منظور الگوهای پیچیده مانند زبری طراحی شده مطابق با الگوی دندان‌اره‌ای نیستند. این موضوع، نیازمند دستیابی به طرحی مناسب برای اختلاط مصالح است که نتایج به دست آمده حاکی از موفقیت‌آمیز بودن این بخش نیز است.

بررسی طرح‌های اختلاط مختلف نشان می‌دهد که هر سه طرح، هدفی که به عنوان چشم‌انداز مطالعه در نظر گرفته شده بود را احصا کرده و از نظر اجرای الگوی زبری و میزان مقاومت، کاملاً قابلیت اجرایی دارند؛ اما با توجه به لزوم توانایی تحمل فشارهای بالاتر به وسیله مغزه‌های آزمایشگاهی، دو طرح ۲ و ۳ به ترتیب با کسب مقاومت فشارشی بیش از ۹۸۹۰ و ۱۱۳۸۰ psi، نمونه‌های کاملاً مناسبی ارزیابی می‌شوند.

در صورتی که بتوان طرح‌هایی با الگوی خاص را با استفاده از امکانات پیشرفته بر روی نمونه‌های طبیعی اجرا کرد، بار مالی فوق‌العاده سنگین آن (از نظر لزوم تامین تجهیزات و یا دریافت خدمات فنی) منجر به اقتصادی نشدن چنین فرآیندی می‌شود. این موضوع در عموم موارد، به دلیل مواجهه با دشواری‌های همراه و همچنین پذیرفتن ناگزیر کاستی‌های فنی جدی و غیرقابل اصلاح مانند باطله خارج از کنترل فرآیند برش و بیضوی شدن سطح مقطع نهایی نمونه، شرایط را به سمت مردود شدن فنی موضوع سوق می‌دهد. در حالی که دستیابی به مغزه‌های ساخته و شبیه‌سازی شده طبق روش پیشنهادی و با چنین طرح اختلاطی، از نظر مسایل اقتصادی در قیاس با

- N. (2016). "Experimental investigation of fracture aperture and permeability change within Enhanced Geothermal Systems". *Geothermics*, 62: 12–21.
- [16] Singh, K. K., Singh, D. N., and Gamage, R. P. (2016). "Effect of sample size on the fluid flow through a single fractured granitoid". *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1–12.
- [۱۷] دفتر مقررات ملی ساختمان؛ ۱۳۹۲؛ «مقررات ملی ساختمان ایران مبحث نهم طرح و اجرای ساختمان های بتن آرمه». نشر توسعه ایران، تهران.
- [18] Pierre R., and Cheyrezy, M. (1995). "Composition of Reactive Powder Concretes". *Cement and Concrete Research*, 25(7): 1501–1511.
- [19] ASTM Standard C 1157, (2009). "Standard Performance Specification for Hydraulic Cement". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, pp. 5.
- [20] Holcim (US) Inc., (2007). "Common Work Results for Concrete". Holcim GranCem Cement, SPEC-DATA, The Construction Specifications Institutes, pp. 2.
- [21] ASTM Standard C150/C150M, (2012). "Standard Specification for Portland Cement". Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, pp. 9. DOI: 10.1520/C0150_C0150M-12.
- [22] Russell, H. (1997). "High-Performance Concrete – From Buildings to Bridges". *Concrete International* August, pp. 63.
- [23] Neville, A. M. (1996a). "Strength of Concrete, Properties of Concrete". 4th Edition, NY: John Wiley & Sons, Inc, New York, 269–273.
- [24] Neville, A. M. (1996b). "Concrete and Particular Properties, Properties of Concrete". 4th Edition, NY: John Wiley & Sons, Inc, New York, 667–669.
- [۲۵] امیدوار لنگرودی، ل.، اشرفی زاده، س. ن.؛ ۱۳۸۸؛ "سننتز فرمالدئید نفتالین سولفونات به عنوان فوق روانساز بتن". همایش ملی مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، ۱۱ صفحه.
- [۲۶] عباسیان، س.، اویسی، آ.، عباسیان، س.؛ ۱۳۹۲؛ "بررسی ساختار و عملکرد فوق روانساز بتن بر پایه پلی کربوکسیلات اتر". پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران.
- [27] Muhit, I. B. (2013). "Dosage Limit Determination of Superplasticizing Admixture and Effect Evaluation on Properties of Concrete". *International Journal of Scientific & Engineering Research*, (4)3.
- [28] National Concrete Pavement Technology Center, (2007). "Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State of the Practice Manual".
- Shafer Fusion". *Sadhana*, 29(2): 145–174.
- [۴] تخم‌چی، ب.، لطفی، م.، صیفی، ح.، حسینی، م. س.؛ ۱۳۹۵؛ «ترکیب اطلاعات، رویکردی نوین جهت تصمیم‌گیری در زمین‌شناسی، مهندسی معدن و نفت». انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک)، تهران، ۸۰۸ صفحه.
- [5] Johnston, I. W., and Choi, S. K. (1986). "A synthetic soft rock for laboratory model studies". *Geotechnique*, 2(36): 251-263.
- [6] Indraratna, B. (1990). "Development and applications of a synthetic material to simulate soft sedimentary rocks". *Geotechnique*, (40)2: 189-200.
- [7] Fourar, M., Bories, S., Lenormand, R., and Persoff, P. (1993). "Two-phase flow in smooth and rough fractures: measurement and correlation by porous-medium and pipe flow models". *Water Resources Research*, 29(11): 3699–3708.
- [8] Wei, C., Zou, M., Sun, Y., Cai, Z., and Qi, Y. (2015). "Experimental and applied analyses of particle migration in fractures of coalbed methane reservoirs". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 23: 399–406.
- [9] Babadagli, T., Raza, S., Ren., X., and Develi, K. (2015). "Effect of surface roughness and lithology on the water–gas and water–oil relative permeability ratios of oil-wet single fractures". *International Journal of Multiphase Flow*, 75: 68–81.
- [۱۰] معراجی، ل.، افشین، ح.، عابدی، ک.؛ ۱۳۹۵؛ "بررسی اثر نوع الیاف بر خواص بتن پودری واکنش‌پذیر". نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۴۶، شماره ۴، ص ۸۹–۹۹.
- [11] Zhou, T., Zhang, S., Feng, Y., Shuai, Y., Zou, Y., and Li, N. (2016). "Experimental study of permeability characteristics for the cemented natural fractures of the shale gas formation". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 29: 345-354.
- [12] Mei, C., Fang, Q., Luo, H., Yin, J., and Fu, X. (2017). "A Synthetic Material to Simulate Soft Rocks and Its Applications for Model Studies of Socketed Piles". *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 1565438, pp. 8.
- [۱۳] امیری، م.، مومیوند، ح.؛ ۱۳۹۷؛ "ساخت ماسه‌سنگ مصنوعی با حوزه وسیعی از تخلخل". دو فصلنامه علمی - پژوهشی ژئومکانیک نفت، دوره دوم، شماره ۱، ص ۸۵–۹۹.
- [14] Yang J., Cai, X., Pang, Q., Guo, X., Wu, Y., and Zhao, J. (2018). "Experimental Study on the Shear Strength of Cement-Sand-Gravel Material". *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 2531642, pp. 11.
- [15] Caulk, R. A., Ghazanfari, E., Perdrial, J. N., and Perdrial,

- ³ Special Core Analysis (SCAL)
- ⁴ Glass beads
- ⁵ Polyurethane
- ⁶ Silicone
- ⁷ Waterjet
- ⁸ Radox Co.
- ⁹ Computer Numerical Control (CNC)
- ¹⁰ Orifice
- ¹¹ Fixture
- ¹² Nozzle
- ¹³ Reactive powder concrete (RPC)
- ¹⁴ Dormant
- ¹⁵ Core Holder
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Center of Transportation Research and Education (ctre), IOWA State University, pp. 355, Doc.: FHWA HIF-07-004.
- [29] ASTM Standard C 403/C 403M, (1999). “*Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance*”. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02, ASTM International, West Conshohocken, pp. 7.
- [30] Aitcin, P. C. (1998). “*Materials selection, High-Performance Concrete*”. NY: Routledge, New York, pp. 194.
-
- ¹ Plug
- ² Routine Core Analysis (RCAL)



Imam Khomeini International University
Vol. 4, No. 3, Autumn 2019, pp. 17-19



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/jmre.2019.9944.1217

A New Method for Constructing Fractured Synthetic Cores with Defined Roughness Pattern Suitable for Testing in Reservoir Conditions

Lotfi M.¹, Tokhmechi B.^{2*}

- 1- Ph.D of Mining Engineering, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
m.lotfi139@yahoo.com
- 2- Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
tokhmechi@ut.ac.ir

(Received: 24 Jan. 2019, Accepted: 20 Jun. 2019)

Abstract: This article focuses on the process of manufacturing of 1.5-inche diameter synthetic cores for fracture studies. The results of this study are suitable for rock mechanical studies as well as reservoir engineering and geomechanical experiments. These cores were manufactured by a fracture pattern, and the main focus on them was the possibility of performing the surface roughness characteristic in a controlled manner. In these cores, unlike the same examples, the roughness pattern was created non-randomly. For this purpose, the Triangular form (Sawtooth) was used as a supposed synthetic structure in the design of rough patterns. To achieve this goal, Reactive Powder Concrete (RPC) has been selected as the main material after studying on a variety of materials to make synthetic samples. To perform concrete, and considering RPC, several mixing designs were tested. The accepted mixing designs are compared together and presented as the results of the research. The structure and texture of provided core are similar to natural ones, in comparison with the other common samples were made of fiberglass. High Uniaxial Compressive Strength (UCS), and ability to implementation a variety of specific and complex geometric patterns such as Triangular Pattern (Sawtooth form), are two complementary advantages of the proposed samples. It should be mentioned that making the patterns on natural rocks is usually impossible, and also expensive, while cheap with high UCS in the case of synthetic samples. Also these cores haven't any micro-fractures. The capability of perfectly suiting the particles helps to implement variety patterns.

Keywords: Computer Numerical Control (CNC), Reactive Powder Concrete (RPC), Triangular form, Synthetic rock, Waterjet cutting.

INTRODUCTION

Sampling process and experimental studies in the field of reservoir engineering and geomechanical investigations require sufficient access to the suitable samples as well as many engineering projects. Due to some limitations on destructive tests such as economic parameter which leads to the reduction of cores; it

would be difficult to obtain suitable results from insufficient tests. In fact, low number of expensive reservoir's plugs can be increased uncertainty and this problem must be controlled [1-4]. On the other hand, the cores used in the Routine Core Analysis (RCAL) and Special Core Analysis (SCAL) are cylindrical plugs with radius 1.5" and different lengths. According to the special size of these plugs used to high pressure / high temperature (HPHT) tests, implementation of specific forms such as saw-tooth pattern with non-random structure is difficult. This problem can be solved applying suitable material and appropriate aggregation.

METHODS

According to the Figure 1, saw-tooth pattern has been considered as a new idea for manufacturing non-random roughness. This scenario using two technologies waterjet and laser engraving was applied to natural plug and synthetic plug made of Reactive Powder Concrete (RPC). Finally, using waterjet causes change of cross-section and this is not acceptable. Therefore, molding was selected using laser engraving.

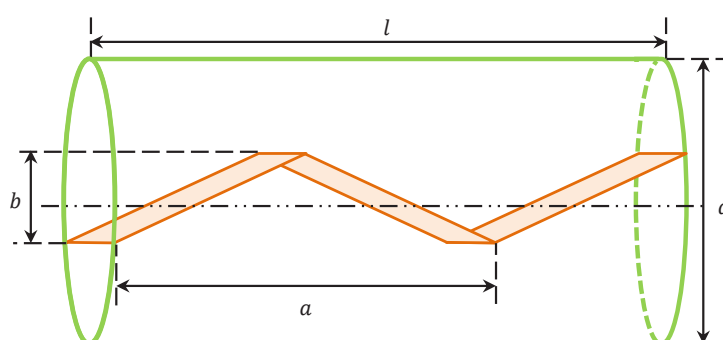


Figure 1. Design parameters in sample construction

In the core manufacturing process, three different mixing programs were designed according to Tables 1, 2 and 3. In mix design 1, the dry components of the mixture were first mixed for 6 minutes. Then 70% of the superplasticizer and water was added to the mix. After 5 minutes, the residue was added to the mixture and combined for another 5 minutes. This process was similarly repeated for mix design 2 and the molding process was performed. In mix design 3, the dry components were mixed for 10 min and the rest of the process and molded to standard dimensions.

Table 1. Mixing Design 1 (kg/m^3)

Material	Mass (kg)
Cement	800
Sand (150 – 600 μm)	1010
Microsilica	200
Superplasticizer	12
Water	190

Table 2. Mixing Design 2 (kg/m^3)

Material	Mass (kg)
Cement	794
Sand (150 – 600 μm)	1241.78
Microsilica	198.5
Superplasticizer	11.91
Water	198.5

Table 3. Mixing Design 3 (kg/m³)

Material	Mass (kg)
Cement	794
Sand (0 – 0.3 mm)	175.6
Sand (0.3 – 0.6 mm)	112.9
Sand (0.6 – 1.2 mm)	238.3
Sand (1.2 – 2.0 mm)	163.1
Sand (2.0 – 3.2 mm)	238.3
Sand (3.2 – 4.75 mm)	313.58
Microsilica	198.5
Superplasticizer	11.91
Water	198.5

FINDINGS AND ARGUMENT

In order to control the quality of the manufactured cores, they were subjected to ultrasonic wave velocity testing and Uniaxial Compressive Strength (UCS). Examination of the obtained results showed that the acquired resistance in mixing design 2 and 3 is quite appropriate.

The result showed that, as with other laboratory studies, the proposed approach is accompanied by strengths and weaknesses. Overall, the proposed approach is considered economically and temporally cost-effective. Also, by making the sample in this way, it is possible to simulate the reservoirs at a lower cost by performing numerous repeated destructive tests.

CONCLUSIONS

The results obtained from the manufacturing cores with different mixing designs shows that the capability to build and withstand pressure, synthetic cores are economically feasible and comparable to the methods applied to natural samples for complex patterns. Like the roughness designed, they do not conform to the saw-tooth pattern. This requires an appropriate plan for mixing the materials, and the results indicated that this section is successful.

Examination of the different mixing designs shows that all three designs have applicable strength; but two designs 2 and 3, with compressive strengths > 9890 psi and 11380 psi are perfect, respectively.

Implementation of special pattern on natural cores using advanced technologies is extremely expensive. This coupled with technical limitation such as cross-section reduction, make it difficult to manufacture cores; but the approach proposed can help us to have many economics plugs with no technical problem such as controlled roughness.

REFERENCES

- [1] Hashemi Tangestani, M., and Moore, F. (2002). "The use of Dempster-Shafer model and GIS in integration of geoscientific data porphyry Copper potential mapping, north of Shahr-e-Babak, Iran". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4(1): 65-74.
- [2] National Research Council, (2000). "Risk analysis and Uncertainty in Flood Reduction Studies". National Academic Press, Washington, D.C. DOI: <https://doi.org/10.17226/9971>.
- [3] Challa, S., and Koks, D. (2004). "Bayesian and Dempster-Shafer Fusion". Sadhana, 29(2): 145–174.
- [4] Tokhmechi, B., Lotfi, M., Seifi, H., and Hosseini, M. S. (2016). "Data Fusion, A New Approach for Decision Making in Geology, Mining and Petroleum Engineering". Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic) Press, pp. 884.