



ساخت ماسه سنگ مصنوعی با حوزه وسیعی از تخلخل

مسیح امیری^۱؛ حسن مومبوند^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار؛ گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۹/۲۲. پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2018.63115

واژگان کلیدی	چکیده
مدل‌سازی فیزیکی ماده شبیه سنگ تخلخل مواد پرکننده ماسه و سیمان	<p>تخلخل یکی از ویژگی‌های ذاتی بارز سنگ بوده و کاربردهای مهمی در مکانیک سنگ به‌ویژه در محیط‌های متخلخل نظیر مخازن نفتی دارد. سنگ یک ماده ناهمگن بوده و عوامل ذاتی متعددی بر مقاومت و رفتار مکانیکی آن مؤثر هستند. حتی برای یک نوع سنگ با تغییر یکی از ویژگی‌های آن نظیر تخلخل، ویژگی ذاتی دیگر تغییر نموده به طوری که تأثیر سهم تخلخل بر رفتار و ویژگی‌های مکانیکی به خوبی مشخص نمی‌شود. یافتن نمونه‌های سنگ دارای تخلخل مختلف و در عین حال همگن که سایر ویژگی‌های ذاتی نظیر اندازه‌ی دانه‌ها یکسان باشد، کاری سخت یا غیرممکن به نظر می‌رسد. از این جهت مدل‌سازی فیزیکی می‌تواند ابزار مفیدی برای ساخت ماده‌ی شبیه سنگ با تخلخل مختلف باشد طوری که بتوان دیگر عوامل ذاتی مؤثر بر ویژگی‌های مکانیکی آن را ثابت نگهداشت. در این تحقیق ماده‌ی مدل متشکل از سیمان، آب و مواد پرکننده با دانه‌بندی ویژه در دو نوع ماسه و سیلیس استفاده شده است. با به‌کارگیری دو تکنیک جدید افزایش آب محتوی به منظور افزایش تخلخل و متراکم‌سازی ترکیب ملات به منظور کاهش تخلخل، نمونه‌های استوانه‌ای شکل ساخته شده‌اند. تخلخل مؤثر و وزن حجمی نمونه‌ها با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شده‌اند. با استفاده از نتیجه‌ی مدل‌سازی فیزیکی ماده‌ی شبیه سنگی دارای دامنه‌ی وسیع تخلخل بین ۹/۰۰ تا ۳۴/۰۹ درصد و وزن حجمی بین ۱/۶۲ تا ۲/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب ارائه شده است که شباهت خوبی با ماسه‌سنگ‌های طبیعی دارد. مقاومت فشاری یک‌محوری ماده‌ی شبیه سنگ ارائه‌شده با تغییر تخلخل به علت همگنی دارای پراکندگی بسیار کمی نسبت به مقاومت فشاری ماسه‌سنگ واقعی است. ماده‌ی شبیه سنگ ارائه‌شده می‌تواند در مطالعه‌ی تأثیر تخلخل، وزن حجمی و جنس مواد پرکننده بر رفتار و ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌های متخلخل همچون ماسه‌سنگ در صنعت معدن، نفت و عمران کمک کند.</p>

۱. مقدمه

آن‌ها بستگی دارد. تخلخل مهم‌ترین و برجسته‌ترین ویژگی فیزیکی سنگ‌های مخزن به عنوان محیط متخلخل است که قابلیت ذخیره نفت در این نوع سنگ‌ها را بالا می‌برد. بسیاری از محاسبات و طراحی‌های مهندسی مخزن از جمله اندازه‌گیری پتانسیل حجمی هیدروکربن‌ها، تعیین ظرفیت ذخیره، برآورد مقدار تولید، قابلیت هدایت هیدرولیکی و پیش‌بینی عملکرد مخزن و غیره بر اساس آگاهی از ویژگی‌های کمی و کیفی این پارامتر انجام می‌گیرد (Hu & Huang, 2017). تخلخل بر اساس سه معیار شامل زمان تشکیل، اندازه‌ی آن‌ها و ارتباط (اتصال) روزنه‌ها به یکدیگر

تخلخل به‌عنوان یکی از ویژگی‌های فیزیکی، پارامتری است که بیشترین اطلاعات را از ماهیت ریزساختاری درونی سنگ نشان می‌دهد و همچنین نقش مهمی در مکانیزم شکست سنگ و ویژگی‌های مکانیکی آن دارد است (Smorodinov et al., 1970; Laskaripour & Dunn et al., 1973; Passaris, 1995; Schultze et al., 2006; Chang et al., 2011; Moomivand, 2011). برای مثال تفاوت‌های ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌ها تا حد زیادی به تفاوت در مقدار تخلخل

مؤثر هستند. به این علت بررسی تأثیر هر یک از ویژگی‌های ذاتی داخلی سنگ نظیر تخلخل بر رفتار و ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی موضوعی پیچیده است. با تغییر تخلخل در سنگ، عوامل دیگر تغییر نموده و رفتار و ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی را کنترل می‌نمایند.

مدل‌سازی فیزیکی در تحقیقات مکانیک سنگ کم‌تر مرسوم است. مدل‌سازی فیزیکی می‌تواند ابزار مفیدی برای ساخت ماده‌ی شبیه سنگ با تخلخل مختلف باشد؛ به طوری که دیگر عوامل ذاتی در آن را می‌توان کنترل نمود و ثابت نگهداشت. مواد با ترکیبات مختلف برای انواع کارهای مدل‌سازی فیزیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ماده‌ی مدل در مکانیک سنگ برای اهداف مختلف تقسیم‌بندی شده‌اند (Stimpson, 1970). بعضی از این مواد کاربردی شامل سیمان پرتلند، بتن، گچ، ساروج و غیره است (Hobbs, 1966; Johnston & Rosenblad, 1968; Saucier, 1967; Gu & Mostyn, 1990; Choi, 1986; Johnston & Choi, 1986; Li, 1991). جانستن و چای (Johnston & Choi, 1986; Li, 1991)، برای شبیه‌سازی گل سنگ ملبورن استرالیا، ماده مدلی شامل سیمان و پودر گل سنگ ارائه نمودند اما به علت تغییرپذیری ذاتی گل سنگ هوازده طبیعی، امکان شناخت مطمئن مکانیزم‌های شکست و متغیرهایی که رفتار مکانیکی را کنترل می‌کنند وجود نداشت.

الْحَمْدَهِی و حَمَادَا (Al-Homadhi & Hamada, 2001) ماده‌ی مدل با نسبت وزنی سیمان ۴، ۶ و ۸ درصد و دانه‌بندی مواد پرکننده‌ی ماسه با اندازه‌ی دانه‌ی ۴۵ تا ۳۰۰ میکرون تحت فشار تراکم ۱۱، ۱۷ و ۲۳ مگا پاسکال ارائه نمودند که دامنه‌ی تخلخل نمونه‌ها بین ۲۰ تا ۳۵ درصد بوده است. با چنین درصد وزنی از سیمان و دانه‌بندی ریز، ماده‌ی مدلی شبیه به خاک حاصل خواهد شد. اگر چه مقدار نفوذپذیری این ماده‌ی شبیه خاک، اندازه گرفته شده است؛ اما قبل از انجام چنین تحقیقی اشراف قابل قبولی به صورت همه‌جانبه بر دانش فنی مربوط به فرآیند مدل‌سازی، عمل‌آوری سیمان و مواد پرکننده و ویژگی‌های سنگ‌های

تقسیم‌بندی می‌شود. تخلخل بر اساس زمان تشکیل به دو صورت اولیه^۱ و ثانویه^۲ به وجود می‌آید. تخلخل اولیه شامل فضاهای خالی است که در هنگام ژنز همچون رسوب‌گذاری ساخته می‌شود. تخلخل ثانویه به آن دسته از فضاهای خالی گفته می‌شود که در اثر فرآیندهای دیاژنز پس از رسوب‌گذاری به وجود می‌آیند (Hu & Huang, 2017).

تخلخل بر اساس اندازه‌ی روزنه‌ها به تخلخل ماکروسکوپی و میکروسکوپی تقسیم می‌شود. در تخلخل ماکروسکوپی قطر روزنه‌ها از ۸ میکرون بیشتر است. در این روزنه‌ها آب و مواد سیال دائماً و به آسانی جریان پیدا می‌کنند و حرکت آن‌ها تابع نیروی جاذبه بود و از قانون داری پیروی می‌کند (Fahimifar & Sourosh, 2001).

تخلخل بر اساس اتصال (ارتباط) روزنه‌ها به یکدیگر به صورت تخلخل مؤثر^۳ و کل^۴ تقسیم می‌شود. تخلخل مؤثر شامل حفره‌های متصل به هم است که قادر هستند مایعات را از خود عبور دهند. از نسبت حجم حفره‌های مرتبط موجود در سنگ به حجم کل سنگ به دست می‌آید. تخلخل کل شامل تمام روزنه‌های موجود در سنگ هستند که از نسبت حجم حفره‌های موجود در سنگ به حجم کل سنگ به دست می‌آید. در سنگ حفره‌هایی وجود دارند که قادر نیستند مایعات را از خود عبور دهند. این حفره‌ها به نام تخلخل غیر مؤثر نامیده می‌شود و از تفاضل تخلخل مؤثر از تخلخل کل به دست می‌آید. تخلخل مؤثر نقش اساسی در هدایت سیال نظیر نفت در سنگ مخزن دارا است (Hu & Huang, 2017).

تخلخل در سنگ دارای تغییرات وسیعی است و بر اساس برخی اندازه‌گیری‌های به عمل آمده از مقدار ۱ تا ۴۳ درصد تغییر می‌نماید (Hu & Huang, Goodman, 1989). دامنه‌ی بالای تخلخل مؤثر در سنگ‌های مخزن ماسه‌سنگ و آهک است. مقدار تخلخل اغلب مخازن نفت از ۵ تا بیش از ۳۰ درصد از درجه‌بندی ضعیف تا عالی متغیر است (Hu & Huang, 2017; Levorsen, 1966).

سنگ یک ماده‌ی ناهمگن است و عوامل داخلی ذاتی در هم‌تنیده‌ای بر رفتار و ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی آن

^۱ Primary porosity

^۲ Secondary porosity

^۳ Effective Porosity

^۴ Total Porosity

شد. برای ساخت نمونه‌هایی شبیه سنگ با تخلخل و وزن حجمی مختلف از دو تکنیک جدید شامل متراکم سازی و اعمال فشارهای مختلف بر ملات سیمان، ماسه و آب و تکنیک دیگر تغییر درصد آب محتوی استفاده شد دو نوع مواد پرکننده در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر جنس دانه‌های مواد پرکننده بر تخلخل و وزن حجمی ماده‌ی شبیه سنگ است.

طرح اختلاط ترکیب ماده‌ی مدل و مقدار فشارهای تراکم برای ایجاد دامنه‌ی وسیع تخلخل در ماده‌ی شبیه سنگ موضوع مهمی است. دو تکنیک تغییر آب محتوی مواد مدل و متراکم‌سازی ترکیب ملات ماده‌ی مدل به منظور ایجاد تغییر در تخلخل به کار گرفته شد.

دانه‌بندی مواد پرکننده تأثیر بسیاری بر تکنیک مدل‌سازی دارد. در دانه‌بندی‌های درشت به دلیل اصطکاک بین دانه‌های درشت با بدنه‌ی قالب‌ها و همچنین اصطکاک بین دانه‌های درشت با یکدیگر، روند تراکم و فشردگی‌سازی ماده‌ی مدل دچار مشکل می‌شود و ترکیب مواد در داخل قالب‌ها نه قابل تراکم و نه همگن هستند. دانه‌بندی‌های مختلفی برای ساخت ماده مدل با تکنیک‌های یادشده بررسی شد و سرانجام اندازه‌ی ذرات بین ۰٫۰۹ تا ۱٫۲ میلی‌متر انتخاب شد. دانه‌بندی انتخاب شده شامل ۳۳٫۳ درصد وزنی با اندازه‌ی دانه بین ۰٫۰۹ تا ۰٫۶ میلی‌متر و ۶۶٫۷ درصد وزنی با اندازه‌ی دانه ۰٫۲ تا ۱٫۲ میلی‌متر است. این دامنه‌ی اندازه‌ی ذرات شبیه اندازه‌ی دانه‌های ماسه‌سنگ است (Boggs, 2009).

ماسه‌ی پرکننده‌ی استفاده شده در این تحقیق از رسوبات ماسه‌ای حاشیه رودخانه نازلو واقع شده در منطقه‌ی روستای نازلوی شهرستان ارومیه در استان آذربایجان غربی تهیه شده است. این ماسه محصول کارخانه ماسه شویی محلی واقع در منطقه است که بعد از شستشو برداشت شده است. دلیل استفاده از ماسه‌ی شسته شده حذف میکرو ذرات رسی موجود در ماسه رودخانه‌ای است که با قرار گرفتن در اطراف ذرات بزرگ‌تر مواد پرکننده باعث تضعیف پیوند سیمان و دانه‌ها می‌شود (Ramezani pour & Arabi, 2016).

مواد پرکننده‌ی سیلیس استفاده شده در این تحقیق محصول خردایش سنگ فروسیلیس معدن هدر خوی واقع شده در حاشیه روستای خالی از سکنه هدر شهرستان خوی در استان آذربایجان غربی تهیه شده است. ذرات

معمولی و سنگ‌های متخلخل نیاز است که در نظر گرفته نشده است. لی و همکاران (Li et al, 2015)، به منظور بررسی تأثیر عامل سیمان‌شوندگی بر ویژگی‌های فیزیکی و رفتار مکانیکی ماده مدل ساخته شده از ترکیب سیمان و ماسه با نسبت‌های مختلف سیمان پرتلند معمولی، نمونه‌هایی با تخلخل ۵۰ تا ۷۰ درصد ایجاد نمودند. اندازه‌ی دانه‌های ماسه‌ی پرکننده بین ۱ تا ۵ میلی‌متر استفاده شده و بیشترین مقاومت فشاری یک‌محوری نمونه‌های تهیه شده ۰٫۷۷ مگا پاسکال بوده است. مدل مصنوعی ساخته شده نه تنها از نظر فیزیکی انسجام کافی نداشته و تخلخل بسیار بالایی داشته بلکه از نظر رفتار مکانیکی آن شباهتی به سنگ نداشته و مقاومت آن‌ها بسیار پایین (در حد مقاومت خاک) بوده است. بنابراین چنین ماده مدلی نمی‌تواند شبیه سنگ باشد. ارائه‌ی یک ماده‌ی مدل که رفتار مکانیکی شبیه سنگ داشته باشد، همواره کار دشواری بوده است. از طرفی ماده‌ی مدل باید اقتصادی، همگن، همسانگرد و به آسانی قابل تهیه و آماده‌سازی نیز باشد.

هدف اساسی این تحقیق ارائه‌ی ماده‌ی شبیه سنگ همگن متشکل از سیمان و مواد پرکننده ماسه است به صورتی که کلیه عوامل مؤثر بر ویژگی‌های مکانیکی سنگ نظیر اندازه‌ی دانه و غیره ثابت قرار داده شوند که تاکنون ارائه نشده است. نتایج حاصل از این مرحله از تحقیق می‌تواند در موارد متعددی، پایه‌ای برای بررسی تأثیر تخلخل بر ویژگی‌های مکانیکی و هیدرولیکی ماسه‌سنگ‌های معمولی تا ماسه‌سنگ‌های متخلخل باشد. برای مثال مقدار ثابتی برای ضریب مقاومت فشاری سه محوری (m_t) در معیار شکست هوک و همکاران (Hoek, et al. 1992; Marinós & Hoek, et al. 1992; 2001; Brady and Brown, 2005) برای هر نوع سنگی ضمن ملاحظه‌ی اندازه دانه‌ها برای برخی سنگ‌های رسوبی ارائه شده است. ضریب مقاومت فشاری سه محوری ماسه سنگ برابر مقدار ثابت ۱۷ ارائه شده است؛ در صورتی که تخلخل ماسه‌سنگ که از عوامل مؤثر بر مقاومت سنگ است، دارای تغییرات وسیع است.

۲. مواد اولیه‌ی مدل و ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق ماده‌ی مدل از ترکیب سیمان، آب و دو نوع مواد پرکننده شامل ماسه و سیلیس با دانه‌بندی ویژه انتخاب

جدول ۲. آنالیز شیمیایی سیمان تیپ ۱-۴۲۵ ارومیه

ترکیبات	محتوا (%)	ترکیبات	محتوا (%)
SiO_2	۲۰٫۹۲	MgO	۱٫۵۸
Al_2O_3	۴٫۸۵	SO_3	۲٫۶۳
Fe_2O_3	۲٫۸۴	K_2O	۱٫۰۸
CaO	۶۳٫۲۵	Na_2O	۰٫۳۰
Cf	۰٫۰۱۸		

میکروسلیسی بسیار ریز این ماده‌ی پرکننده به روش سرد تر جدا شده است و همان طور که برای ماسه نیز ذکر شد وجود این ذرات، همچون ذرات رسی، پیوند سیمان در اطراف دانه‌های مواد پرکننده را تضعیف می‌کند. تهیه دانه‌بندی موردنظر به روش سرد خشک در آزمایشگاه دانشگاه ارومیه انجام شد (شکل ۱). سیمان مصرفی، سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ تولید شده توسط کارخانه سیمان ارومیه است. آنالیز شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی سیمان در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

۱.۲ تغییر تخلخل با تغییر آب محتوی ماده‌ی مدل

نسبت آب به سیمان بر واکنش شیمیایی و درجه‌ی هیدراسیون سیمان و همچنین تخلخل بتن مؤثر است. آب اضافی برای واکنش شیمیایی و هیدراسیون سیمان، پس از گیرش و خشک شدن، به حفرات خالی هوا و تخلخل تبدیل می‌شود؛ بنابراین با تغییر درصد وزنی آب می‌توان تخلخل را تغییر داد به طوری که با افزایش درصد آب تخلخل افزایش می‌یابد. کمترین آب موردنیاز برای واکنش شیمیایی سیمان ۲۳ تا ۲۶ درصد است (Ramezani pour & Arabi, 2016). کمترین مقادیر نسبت آب به سیمان برای قابلیت اجرایی مدل‌سازی و همچنین نسبت وزنی سیمان به مواد پرکننده‌ی ماسه نیز در آزمایشگاه مورد بررسی قرار گرفت. درصد وزنی سیمان نسبت به مواد پرکننده به صورت درصد وزنی مساوی برای ایجاد ماده شبیه سنگ مناسب نشان داد. برای ایجاد نمونه‌های دارای دامنه‌ی تغییرات تخلخل از چهار نسبت مختلف آب به سیمان شامل ۲۶٪، ۳۴٪، ۵۰٪ و ۹۰٪ درصد انتخاب شد. در نسبت آب به سیمان ۹۰ درصد، ملات موردنظر شباهت زیادی به دوغاب دارد؛ اما با این حال نمونه‌ها پس از گیرش از نظر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی شبیه سنگ هستند. نمونه‌ها به شکل نمونه‌های استاندارد دارای قطر ۵۴ میلی‌متر و طول حدود بیشتر از دو برابر قطر نیاز است آماده‌سازی شوند. از لوله‌های UPVC استوانه‌ای فشارقوی به عنوان قالب استفاده شد. طول قالب‌ها به دلیل اینکه تحت بار قرار نمی‌گیرند، محدودیتی ندارد و ۱۵ سانتی‌متر انتخاب شد و قطر داخلی قالب‌ها ۵۴ میلی‌متر انتخاب شد. تهیه قالب‌های استوانه‌ای استفاده‌شده در این روش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱. دانه‌بندی به روش سرد خشک دو نوع ماده‌ی پرکننده. الف: ماسه و ب: سیلیس، بازه دانه‌بندی بین ۰٫۰۹ تا ۱٫۲ میلی‌متر هر یک در سه قسمت اندازه‌ی دانه‌ی ۰٫۰۹ تا ۰٫۲، ۰٫۲ تا ۰٫۶ و ۰٫۶ تا ۱٫۲ میلی‌متر

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی سیمان تیپ ۱-۴۲۵

ارومیه	
مقاومت فشاری (۲۸ روزه)	575 kg/cm^2
مقاومت فشاری (۷ روزه)	462 kg/cm^2
زمان گیرش نهایی (دقیقه)	۱۸۰
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۴۵
انبساط اتوکلاو (%)	۰٫۰۷
سطح مخصوص (cm^2/g)	۳۶۷۰

دادن ماده‌ی مدل از یک طرف در داخل قالب استوانه‌ای، باعث می‌شد که در طول نمونه ملات به صورت یکسان فشرده نشود و در نتیجه نمونه همگن حاصل نشود. برای جبران این مشکل، دو عدد پیستون دارای قطر ۵۳/۴ میلی‌متر و طول قسمت فرورونده ۵ سانتی‌متر طراحی شده و توسط کارگاه تراشکاری آماده‌سازی شدند (شکل ۳). قطر خارجی پیستون‌ها به‌اندازه ۰/۶ میلی‌متر از قطر داخلی قالب‌ها کمتر است. این فاصله نه تنها باعث خروج مواد نشده بلکه باعث ایجاد یک حاشیه‌ی ۰/۳ میلی‌متری در اطراف پیستون‌ها برای حرکت آسان آن‌ها در داخل قالب شد.



شکل ۲. قالب‌های استوانه‌ای آماده‌سازی شده از UPVC

طول قالب‌ها بایستی به اندازه‌ای باشد که اولاً به راحتی داخل دهانه‌ی صفحات بارگذاری دستگاه قرار گیرد و ثانیاً در فشارهای تراکم بالا پس از فرو رفتن پیستون‌های فشرده‌نده در داخل قالب، طول نمونه تهیه شده بیش از حد کوتاه نباشد و همچنین پیستون‌های فشرده‌نده در فشارهای زیاد در حدی داخل قالب فرو نروند که قبل از رسیدن به فشار مدنظر، انتهای پیستون به سر قالب گیر کند؛ چراکه در این صورت بار اعمال‌شده به قالب وارد می‌شود و ملات تحت فشار قرار نمی‌گیرد. به این منظور برای انتخاب طول بهینه قالب‌های فولادی استوانه‌ای، طی آزمون و خطاهای بسیار، برابر ۲۱/۵ سانتی‌متر انتخاب شد. قالب فولادی در حالت عادی دارای یک شکاف طولی باز است. توسط بست‌های فلزی مستحکم دو طرف شکاف قالب به هم نزدیک می‌شود. ایجاد شکاف طولی در قالب‌های فولادی ضخیم کاری بسیار دشوار، نیازمند دقت فراوان و هزینه‌بر بوده که توسط تراشکار ماهر انجام شد.

برای اعمال فشار و متراکم‌سازی ماده‌ی مدل داخل قالب‌ها نیاز به دو صفحه‌ی بارگذاری و دستگاه اندازه‌گیری بار وارده است. برای اعمال فشار معین از دستگاه آزمایش مقاومت فشاری استفاده شد. یکی از پیستون‌ها را در قسمت پایین قالب قرار داده و ملات آماده‌سازی شده را در داخل قالب ریخته و در ادامه پیستون دوم در قسمت بالا قرار داده شد. نمونه‌ای از ماده‌ی مدل قالب‌ریزی شده و تحت فشار قرار دادن ملات آن توسط ماشین آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده است. ملات قالب‌ریزی شده بین دو آرواره‌ی ماشین آزمایش فشاری تحت بار قرار داده شد تا از دو طرف توسط دو پیستون فولادی فشرده گردد. ملات ماده‌ی مدل در اثر اعمال فشار، آب از دست داده و از طریق شکاف طولی تعبیه‌شده در قالب

ماده‌ی مدل پس از ترکیب در دستگاه مخلوط‌کن (شکل ۴)، در داخل قالب‌های مخصوص ریخته شد. شکاف طولی در امتداد طول قالب‌ها به‌منظور خارج‌سازی آسان نمونه‌ها پس از گیرش اولیه تعبیه شده است. نمونه‌های ساخته‌شده به روش تغییر درصد وزنی آب نیازی به اعمال فشار بر ملات ماده‌ی مدل ندارد ولی ملات این نوع نمونه‌ها حاوی درصد‌های بالای آب است و نیاز است که شکاف طولی قالب‌ها در هنگام ریختن ملات در داخل آن‌ها کاملاً جمع شده و به یکدیگر بچسبند به طوری که اجازه خارج شدن ملات نرم آب‌دار را ندهد. ملات به داخل قالب طوری ریخته شد که حباب‌های هوا خارج شوند. قالب‌ها پس از گیرش اولیه ۲۴ ساعته باز شده و نمونه‌های استوانه‌ای ساخته‌شده در درون ظروف پر از آب در دمای محیط به مدت ۱۴ روز در داخل آب نگهداری شدند. آب باعث هیدراسیون سیمان شده و در افزایش مقاومت آن کمک می‌نماید (Ramezaniapour & Arabi, 2016).

۲.۲ تغییر تخلخل با تغییر میزان فشار روی ترکیب

ماده‌ی مدل

برای ایجاد حدود پایین دامنه‌ی تخلخل، درصد وزنی سیمان به مواد پرکننده نیز برابر بوده، حداقل درصد وزنی آب به سیمان (برابر ۲۶٪) استفاده شد و تکنیک تغییر فشار روی ملات ماده‌ی مدل به کار گرفته شد. افزایش فشار روی ماده مدل باعث از دست دادن حباب‌های هوا و کاهش آب ملات و تهیه‌ی نمونه‌های متراکم‌تر شد. برای تحت فشار قرار دادن ماده‌ی مدل، قالب‌های مستحکم نظیر فولاد نیاز است. به این منظور قالب‌های فولادی استوانه‌ای شکل دارای قطر داخلی ۵۴ میلی‌متر آماده‌سازی شدند (شکل ۳). با تحت فشار قرار

وجود نسبت‌های کم آب به سیمان و عدم هیدراسیون کامل نمونه‌ها و همچنین افت درونی آب به دلیل پدیده‌ی خودخشک‌شوندگی با عمل‌آوری مناسب از طریق آب خارجی و رطوبت پیوسته جبران‌پذیر است (Ramezani pour & Arabi, 2016). نمونه‌ها پس از زمان گیرش اولیه طی ۲۴ ساعت در دمای معمولی اتاق، از داخل قالب‌ها خارج شده و درون ظرف‌های پراز آب در محیط اشباع در دمای محیط به مدت ۲ هفته نگهداری شدند. سپس در دمای معمولی اتاق برای مدت ۶۰ روز خشک شدند.



شکل ۴. آماده‌سازی ملات ماده‌ی مدل توسط مخلوط‌کن

خارج می‌شد. آب خارج شده شفاف و بدون ذرات بود. برای ایجاد چهار گروه نمونه‌های استوانه‌ای دارای دامنه‌ی تخلخل مختلف به ترتیب فشارهای ۱، ۶، ۱۶ و ۳۲ مگاپاسکال بر ملات ماده‌ی مدل اعمال شد. نمونه‌های ساخته‌شده به این روش نیز پس از گیرش اولیه در درون آب قرار داده شدند. در نهایت ۸ گروه نمونه‌های استوانه‌ای دارای درصد مختلف آب و تحت فشارهای تراکم مختلف و نسبت وزنی سیمان به مواد پرکننده یکسان مطابق جدول ۳ ایجاد شد. چنین فرآیندی برای ماده‌ی پرکننده سیلیس تحت شرایط یکسان برای ایجاد ۸ گروه نمونه‌های استوانه‌ای نیز به مرحله‌ی اجرا در آمد. در نهایت تعداد ۱۶ گروه نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شد.



شکل ۳. قالب استوانه‌ای فولادی آماده‌سازی شده به قطر ۵۴ میلی‌متر و دو پیستون به قطر ۵۳/۴ میلی‌متر توسط دستگاه تراشکاری

بر اساس استاندارد توسط دستگاه مغزه‌بر آماده‌سازی شد (شکل ۶). ابتدا ابعاد نمونه‌ها به دقت ۰٫۱ میلی‌متر و وزن اشباع آن‌ها به دقت ۰٫۱ گرم اندازه‌گیری شدند. بر این اساس حجم کلی نمونه‌ها (V_b) و وزن اشباع (W_{sat})، آن‌ها تعیین شد. سپس نمونه‌ها در دستگاه گرم‌خانه مطابق شکل ۷ در دمای ۴۵ درجه به مدت ۲ روز خشک شدند و وزن خشک (W_d) آن‌ها نیز تعیین شد. حجم روزنه‌ها (V_p) و تخلخل مؤثر (n) با استفاده از وزن اشباع (W_{sat})، وزن خشک (W_d)، و وزن حجمی آب (γ_w) برای کلیه نمونه‌ها به شرح زیر مطابق رابطه‌ی ۱ و ۲ تعیین گردید.

$$V_p = \frac{W_{sat} - W_d}{\gamma_w} \quad (1)$$

$$n = \frac{V_p}{V_b} \quad (2)$$

وزن حجمی خشک و اشباع کلیه‌ی نمونه‌ها نیز به شرح زیر مطابق رابطه‌ی ۳ و ۴ تعیین شد.

$$\gamma_d = \frac{W_d}{V_b} \quad (3)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{W_{sat}}{V_b} \quad (4)$$



شکل ۶. برخی از نمونه‌های آماده‌سازی شده از مجموع ۱۹۲ نمونه دارای وزن حجمی و تخلخل مختلف با دو نوع مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس



شکل ۵. متراکم سازی ملات ماده‌ی مدل در داخل قالب‌های استوانه‌ای فولادی به وسیله ماشین بارگذاری

جدول ۳. تغییرات نسبت آب به سیمان و فشار تراکم ملات ماده‌ی مدل دارای دانه‌بندی یکسان ماسه و نسبت وزنی برابر سیمان به ماده‌ی پرکننده

شماره ترکیب	نسبت وزنی آب به سیمان (درصد)	فشار تراکم (مگا پاسکال)
SA1-G1	۹۰	۰
SA2-G2	۵۰	۰
SA3-G3	۳۴	۰
SA4-G4	۲۶	۰
SA5-G5	۲۶	۱
SA6-G6	۲۶	۶
SA7-G7	۲۶	۱۶
SA8-G8	۲۶	۳۲

۳. تعیین تخلخل و وزن حجمی نمونه‌ها و بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان و فشار

تراکم ملات ماده‌ی مدل

پس از خشک شدن نمونه‌های استوانه‌ای در دمای آزمایشگاه و حصول گیرش نهایی، دو سر آن‌ها به صورت موازی و صاف

آب به سیمان در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تخلخل با افزایش درصد وزنی آب به سیمان به صورت تابع خطی با ضریب همبستگی بالا افزایش می‌یابد. افزایش درصد وزنی آب به سیمان تأثیر معکوس بر وزن حجمی خشک و اشباع دارد (شکل ۱۱).

رابطه‌ی بین میانگین تخلخل ۱۶ گروه نمونه‌ی ساخته‌شده با دو نوع مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس با فشار تراکم ملات ماده مدل در شکل ۱۲ نشان داده شده است. تخلخل با افزایش تراکم ملات ماده‌ی مدل به صورت تابع نمایی با ضریب همبستگی بالا کاهش می‌یابد همچنین افزایش تراکم ملات ماده‌ی مدل تأثیر معکوس بر وزن حجمی خشک و اشباع دارد (شکل ۱۳).

یک معیار مهم برای نشان دادن شباهت ماده‌ی مدل ارائه شده با سنگ، مقاومت فشاری یک محوری آن است. مقاومت فشاری یک محوری کاربردهای متعددی در مهندسی سنگ دارد (Moomivand, 2011). مقاومت فشاری یک محوری گروه‌های مختلف نمونه بر اساس استاندارد انجمن جهانی مکانیک سنگ (ISRM, 1979) اندازه‌گیری شد. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری یک محوری (UCS) نمونه‌های ساخته‌شده از مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس با مقاومت فشاری یک محوری نمونه‌های ماسه‌سنگ واقعی دارای تخلخل بین ۹٪ تا ۳۵٪ حاصل از منابع مختلف (Mampitiyarachchi, 1982; Palchik, 1999;) (Moomivand, 2007) مقایسه شد (شکل ۱۴). مقاومت فشاری یک محوری نمونه‌های ماسه‌سنگ واقعی حاصل از منابع مختلف برای یک تخلخل معین دارای پراکندگی زیادی است؛ چون علاوه بر تخلخل عوامل ذاتی دیگری بر مقاومت سنگ مؤثر هستند و با تغییر تخلخل تأثیر آن‌ها قابل کنترل نیست. بر اساس استاندارد انجمن جهانی مکانیک سنگ (ISRM, 1979) بازه‌ی مقاومت فشاری یک محوری بین مقاومت کم تا زیاد تغییر می‌نماید. با افزایش تخلخل، مقاومت فشاری نمونه‌ها به صورت تابع توانی با ضریب همبستگی بالا و کاهش یافته و از بین مقادیر پراکنده مقاومت فشاری ماسه‌سنگ‌های واقعی عبور می‌نماید. همچنین اندازه‌ی دانه‌های مواد پرکننده ماده‌ی مدل ارائه شده در حدود اندازه‌ی دانه‌های ماسه‌سنگ طبیعی است (Boggs, 2009).



شکل ۷. نگهداری نمونه‌ها به مدت ۲ روز در دمای ۴۵ درجه در گرم‌خانه به منظور خشک شدن آن‌ها

از هر گروه ۱۲ نمونه، آماده‌سازی شده و تخلخل و وزن حجمی آن‌ها تعیین شد. در نهایت تخلخل و وزن حجمی ۱۶ گروه نمونه‌های دارای دو نوع مواد پرکننده‌ی ماسه (نوع یک) و سیلیس (نوع دو) تعیین گردید.

مقادیر تخلخل، وزن حجمی خشک و اشباع و مقدار انحراف از معیار هر گروه در جدول ۴ نشان داده شده است. تخلخل در ۸ گروه نمونه‌های دارای مواد پرکننده‌ی ماسه، از ۹،۵۳ تا ۳۴،۰۹ درصد متغیر است (شکل ۸). همچنین وزن حجمی خشک و اشباع آن‌ها به ترتیب از ۱،۶۳ تا ۲،۳۷ و از ۱،۹۷ تا ۲،۴۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در تغییر است (شکل ۹). در شرایطی که تخلخل با استفاده از اعمال فشار روی ملات ماده‌ی مدل تغییر داده شده است، تحت فرآیند یکسان عمل مدل‌سازی، تخلخل نمونه‌های دارای مواد پرکننده‌ی ماسه مقدار بسیار کمی از تخلخل نمونه‌های دارای مواد پرکننده‌ی سیلیس بیشتر است (شکل ۱۲). اما برای شرایط تغییر تخلخل با استفاده از تغییر درصد آب محتوی، تفاوت قابل توجهی محسوس نیست (شکل ۱۰). چنین اختلاف ناچیزی می‌تواند مربوط به بیشتر بودن تخلخل دانه‌های ماسه نسبت به دانه‌های سیلیس باشد؛ چون دانه‌های سیلیس در مقایسه با دانه‌های ماسه به دلیل هوازگی کم‌تر و یافت دانه‌ای متراکم‌تر دارای تخلخل دانه‌ای پایین‌تری می‌توانند باشند. وزن حجمی خشک و اشباع نیز به صورت معکوس از روند تغییرات تخلخل در فرآیند مدل‌سازی پیروی می‌نماید (شکل ۹).

رابطه‌ی بین میانگین تخلخل ۱۶ گروه نمونه‌ی ساخته شده با دو نوع مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس با درصد وزنی

۴. نتیجه‌گیری

۳- ماده شبیه سنگ ارائه شده همگن بوده، کلیه عوامل ذاتی آن با تغییر تخلخل تغییر نمی‌کنند و در عین حال شباهت زیادی از نظر مواد تشکیل دهنده، ویژگی‌های بارز فیزیکی همچون تخلخل، وزن حجمی و اندازه‌ی ذرات و همچنین ویژگی‌های مکانیکی نظیر مقاومت فشاری یک‌محوری به ماسه‌سنگ‌های معمولی دارای تخلخل کمتر و ماسه‌سنگ‌های مخازن نفتی با دامنه‌ی بالای تخلخل دارد.

۴- تخلخل نمونه‌های دارای مواد پرکننده‌ی ماسه مقدار بسیار کمی از تخلخل نمونه‌های دارای مواد پرکننده‌ی سیلیس بیشتر است.

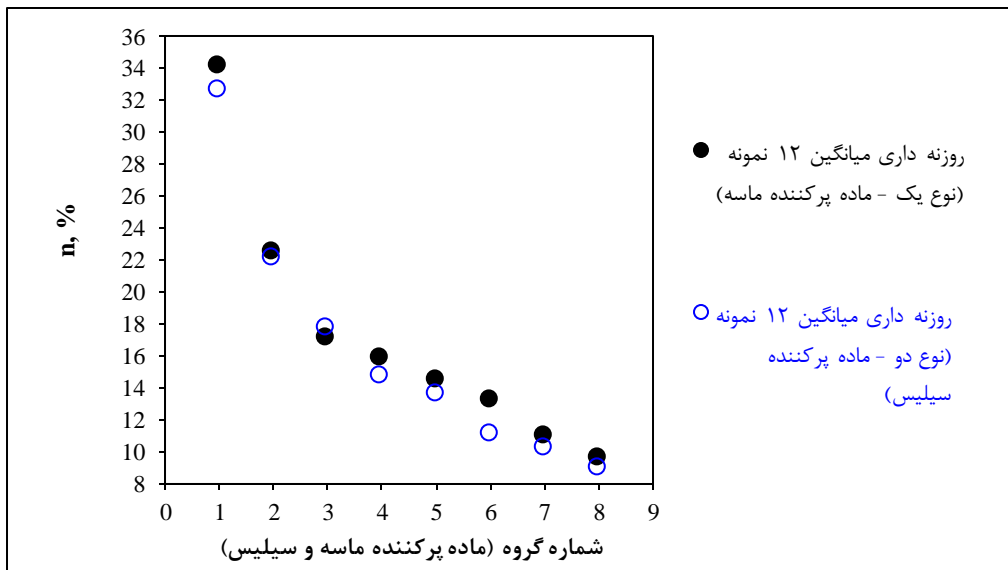
۵- ماده شبیه سنگ همگن متخلخل ارائه شده، می‌تواند ابزار مفید و کم‌هزینه‌ای برای بررسی تأثیر تخلخل و وزن حجمی بر ویژگی‌های مکانیکی، دینامیکی و هیدرولیکی ماسه‌سنگ‌های معمولی و دارای تخلخل بالا باشد.

۱- با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی با دو تکنیک جدید ارائه شده در این مقاله شامل تغییر محتوی آب ماده‌ی مدل و متراکم‌سازی ترکیب ماده‌ی مدل، ماده شبیه سنگ از ترکیب سیمان، آب و مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس با دانه‌بندی ویژه ذرات در اندازه‌ی ۰/۰۹ تا ۱/۲ میلی‌متر با دامنه‌ی وسیع تخلخل از ۹/۰۰ تا ۳۴/۰۹ درصد و وزن حجمی خشک نمونه‌ها از ۱/۶۲ تا ۲/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شد.

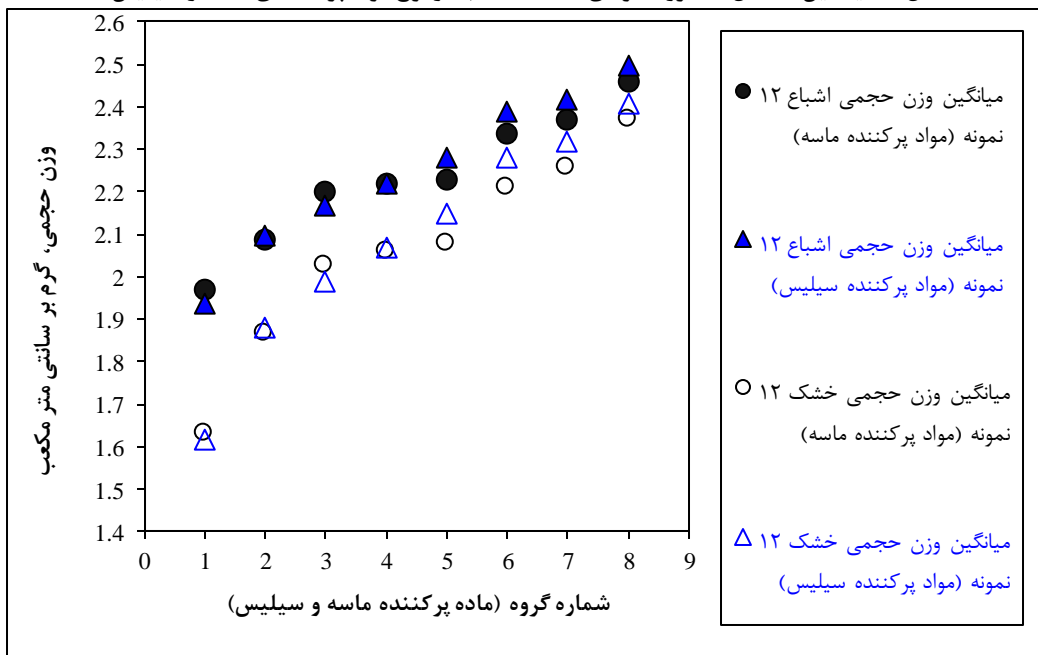
۲- با افزایش درصد آب محتوی، تخلخل به صورت تلیع خطی با ضریب همبستگی خوب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فشار تراکم، تخلخل نمونه‌ها به صورت تابع‌نمایی با ضریب همبستگی خوب افزایش می‌یابد. این دو فرآیند به کار گرفته شده تأثیر معکوس بر وزن حجمی خشک و اشباع دارند.

جدول ۴. تخلخل مؤثر و وزن حجمی خشک و اشباع نمونه‌ها با دو نوع ماده‌ی پرکننده‌ی ماسه (SA) و سیلیس (SI)

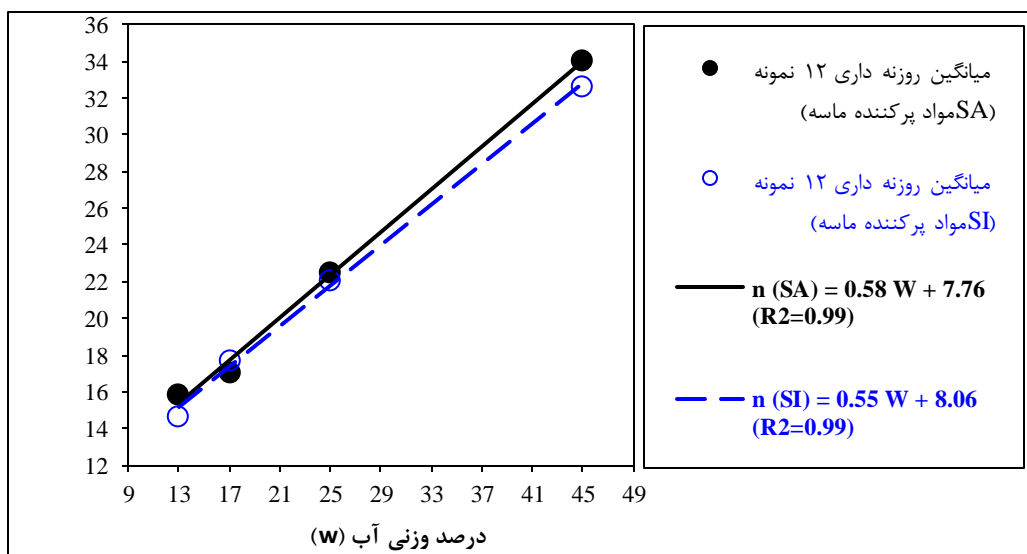
شماره ترکیب و گروه نمونه	نوع مواد پرکننده ماسه/سیلیس	وزن حجمی خشک		وزن حجمی اشباع		تخلخل مؤثر
		میانگین وزن حجمی ۱۲ نمونه gr/cm^3	انحراف از معیار gr/cm^3	میانگین وزن حجمی ۱۲ نمونه gr/cm^3	انحراف از معیار gr/cm^3	
SA1-G1	ماسه	۱/۶۳	۰/۰۵	۱/۹۷	۰/۰۶	۳/۲۰
SA2-G2	ماسه	۱/۸۷	۰/۰۵	۲/۰۹	۰/۰۳	۳/۱۰
SA3-G3	ماسه	۲/۰۳	۰/۰۶	۲/۲۰	۰/۰۵	۲/۵۲
SA4-G4	ماسه	۲/۰۶	۰/۰۴	۲/۲۲	۰/۰۵	۲/۲۸
SA5-G5	ماسه	۲/۰۸	۰/۰۴	۲/۲۳	۰/۰۵	۲/۴۷
SA6-G6	ماسه	۲/۲۱	۰/۰۴	۲/۳۴	۰/۰۳	۲/۲۹
SA7-G7	ماسه	۲/۲۶	۰/۰۴	۲/۳۷	۰/۰۳	۱/۷۸
SA8-G8	ماسه	۲/۳۷	۰/۰۴	۲/۴۶	۰/۰۴	۰/۹۰
SI1-G9	سیلیس	۱/۶۲	۰/۰۳	۱/۹۴	۰/۰۱	۲/۶۶
SI2-G10	سیلیس	۱/۸۸	۰/۰۲	۲/۱۰	۰/۰۱	۱/۷۰
SI3-G11	سیلیس	۱/۹۹	۰/۰۷	۲/۱۷	۰/۰۶	۲/۹۵
SI4-G12	سیلیس	۲/۰۷	۰/۰۳	۲/۲۲	۰/۰۲	۱/۸۵
SI5-G13	سیلیس	۱/۱۵	۰/۰۳	۲/۲۸	۰/۰۲	۲/۰۱
SI6-G14	سیلیس	۲/۲۸	۰/۰۳	۲/۳۹	۰/۰۲	۱/۶۵
SI7-G15	سیلیس	۲/۳۲	۰/۰۴	۲/۴۲	۰/۰۲	۱/۹۰
SI8-G16	سیلیس	۲/۴۱	۰/۰۴	۲/۵۰	۰/۰۲	۱/۶۱



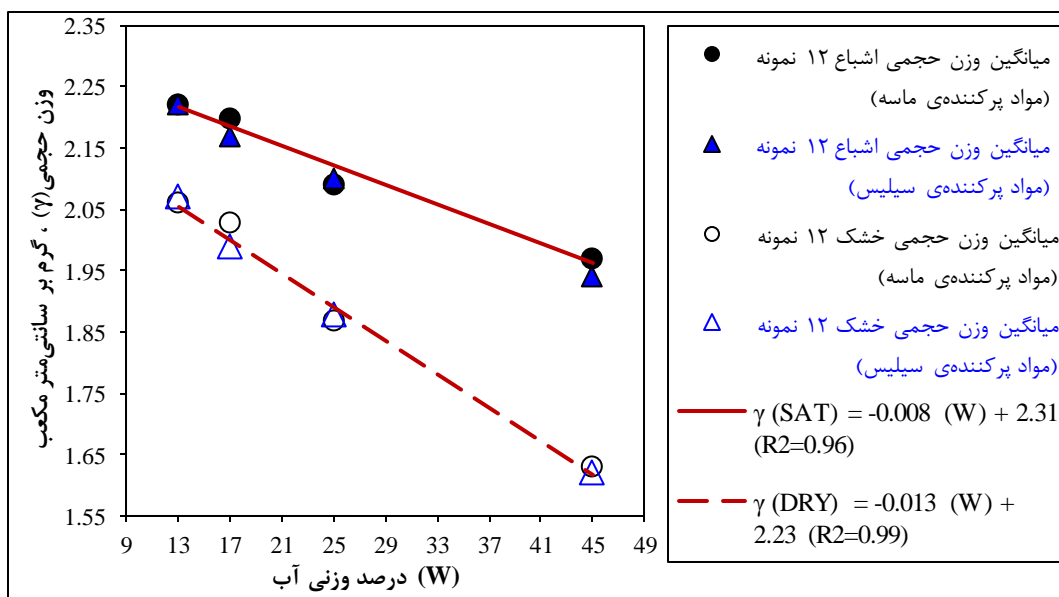
شکل ۸. میانگین تخلخل ۱۶ گروه نمونه‌ی ساخته شده با دو نوع مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس



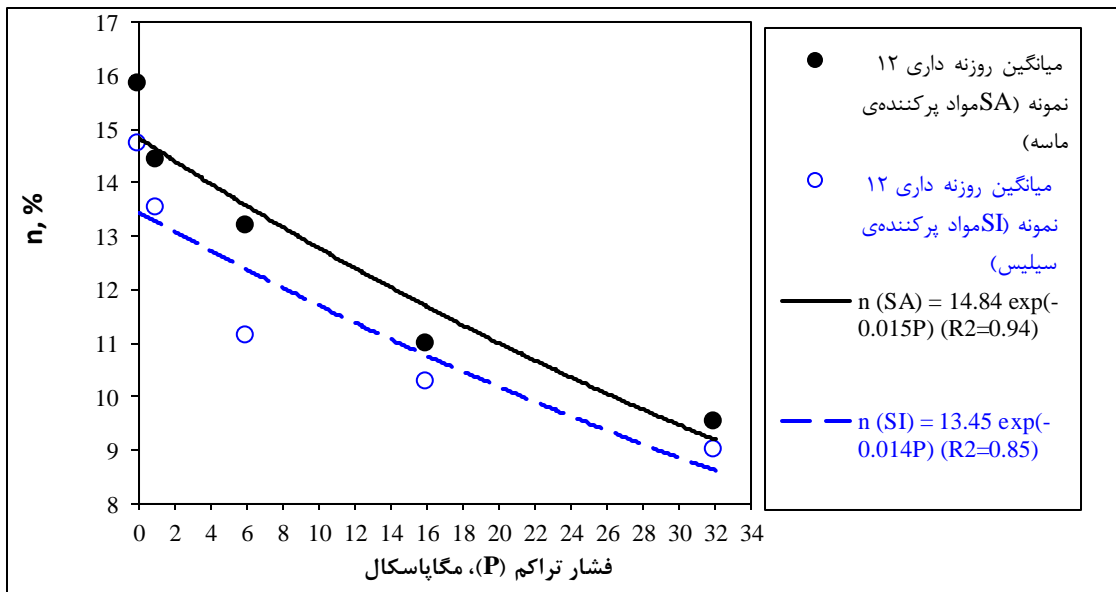
شکل ۹. میانگین وزن حجمی خشک و اشباع ۱۶ گروه نمونه‌ی مدل سازی شده با دو نوع مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس



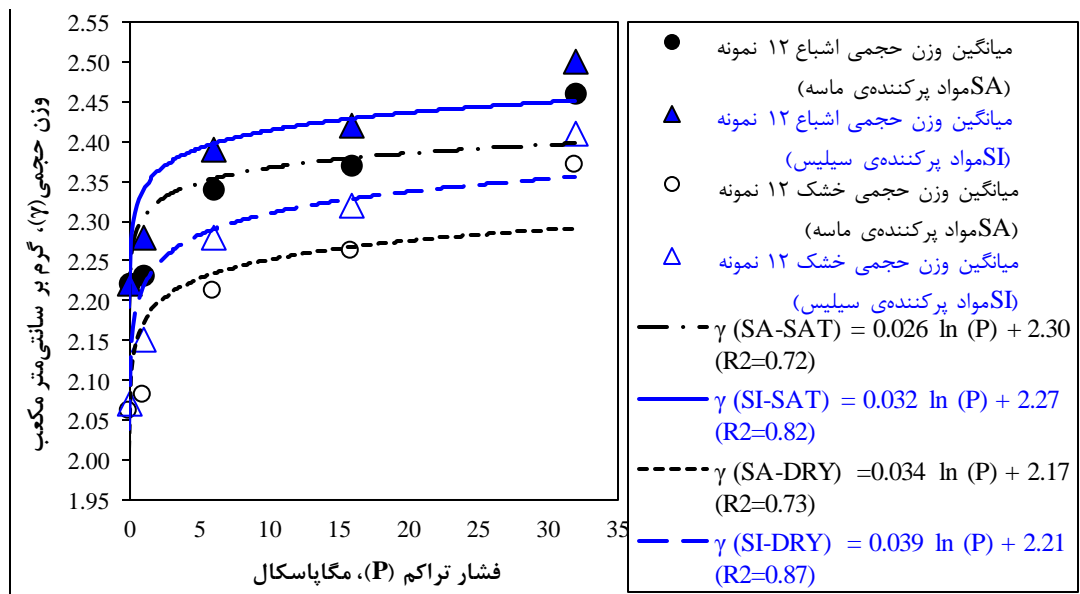
شکل ۱۰. رابطه‌ی بین تخلخل و درصد وزنی آب محتوی مواد مدل برای ۸ گروه نمونه‌ی ساخته‌شده با مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس



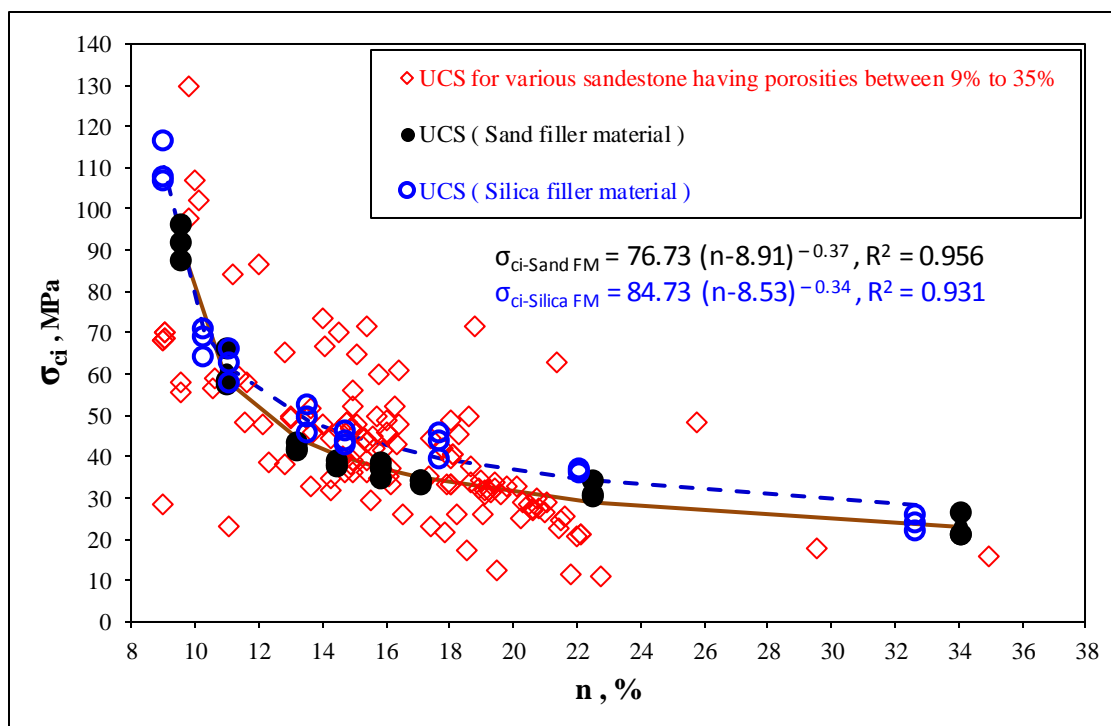
شکل ۱۱. رابطه‌ی بین وزن حجمی خشک و اشباع با درصد وزنی آب محتوی ماده‌ی مدل برای ۸ گروه نمونه‌ی ساخته‌شده با مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس



شکل ۱۲. رابطه‌ی تخلخل و فشار تراکم برای ۸ گروه نمونه‌ی ساخته‌شده با مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس



شکل ۱۳. رابطه‌ی بین وزن حجمی خشک و اشباع با فشار تراکم برای ۸ گروه نمونه‌ی ساخته‌شده با مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس



شکل ۱۴. مقایسه رابطه‌ی بین مقاومت فشاری یک‌محوری (UCS) ۸ گروه نمونه‌های ساخته‌شده از مواد پرکننده‌ی ماسه و سیلیس با مقاومت فشاری یک‌محوری نمونه‌های ماسه‌سنگ واقعی دارای تخلخل بین ۹٪ تا ۳۵٪ حاصل از منابع مختلف

۵. سیاهه‌ی نمادها

جدول ۵ معرف نمادهای مورد استفاده در این مقاله است.

جدول ۵. سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح
n	درصد	تخلخل
V_b	سانتی‌متر مکعب	حجم کل نمونه
V_p	سانتی‌متر مکعب	حجم روزنه‌ها
W_d	گرم	وزن خشک نمونه
W_{sat}	گرم	وزن اشباع نمونه
γ_d	گرم بر سانتی‌متر مکعب	وزن حجمی خشک
γ_{sat}	گرم بر سانتی‌متر مکعب	وزن حجمی اشباع
γ_w	گرم بر سانتی‌متر مکعب	وزن حجمی آب

۶. تشکر و قدردانی

از آقای مهندس وحید محبی کارشناس محترم آزمایشگاه مکانیک سنگ گروه معدن دانشگاه ارومیه برای حمایت بی دریغ در فراهم نمودن تجهیزات مدل‌سازی و اجرای فرآیند عملیات مدل‌سازی نمونه‌ها سپاس‌گزاری می‌شود.

۷. مراجع

- Al-Homadh, E.S. and Hamada, G.M. (2001). Determination of Petrophysical and Mechanical Property Interrelationships for Simulated Sandstone Rocks. Proc. 6th Nordic symposium on petrophysics. 15-16 May 2001, NTNU, Trondheim, Norway.
- Boggs, S.J. (2009). Petrology of Sedimentary Rocks. 2th Edition. Chapter 4. pp. 129-134., Cambridge University Press., ISBN: 978-0-511-71933-2
- Chang, C., Zoback, M.D. and Khaksar, A. (2006). Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 51, pp. 223-237.
- Dunn, D.E., LaFountain, L.J. and Jackson, R.E. (1973). Porosity dependence of mechanism of brittle fracture in sandstones. Journal of Geophysical Research, Vol. 78, No. 14, pp. 2403 - 2417.
- Fahimi far, A. and Sourosh, H. (2001). Rock Mechanics Tests (First Volume : Theoretical Fundamental and Standards). Tehran : 'Prof. Hesabi AmirKabir University.
- Goodman, R.E. (1989). Introduction to Rock Mechanics. 2nd Edition, John Wiley, Chichester, 562 P.
- Gu, D. and Mostyn, G.R. (1991). The study of a method of making equivalent material models. 2nd International Symposium of Mining Technology and Science, Zhusou, China.
- Hobbs, D.W. (1966). Scale model studies of strata movement around mine roadways. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 3, pp. 101-127.
- Hu, X. and Huang, S. (2017). Physics of Petroleum Reservoirs. Chapter 2 (Physical Properties of Reservoir Rocks), pp. 7-162. Springer Mineralogy, DOI 10.1007/978-3-662-53284-3_2
- Indraratna, B. (1990). Development and application of synthetic material to simulate soft sedimentary rocks. Geotechnique, Vol. 40, No. 2, PP. 189-200.
- ISRM (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol. 16, pp. 135 - 140.
- Johnston, I.W. and Choi, S.K. (1986). A synthetic soft rock for laboratory model studies. Geotechnique, Vol. 36, No. 2, pp. 251-263.
- Laskaripour, G.R. and Passaris, E.K.S. (1995). Correlations between index parameters and mechanical properties of shales. Proc. 8th Congress of ISRM, Tokyo, Vol. 1, pp. 257 - 261.
- Levorsen, A.I. (1967). Geology of Petroleum. W.H. Freeman and San Francisco, 350 P.
- Li, D., Liu, X.R., Liu, X.S. (2015). Experimental Study on Artificial Cemented Sand Prepared with Ordinary Portland Cement with Different Contents. Materials journal, Vol. 8, pp. 3960-3974; doi:10.3390/ma8073960.
- Mampitayarachchi, D.K.D.S. (1982). Some factors influencing properties of Hawkesbury sandstone. Ph.D. Thesis, The University of New South Wales, Sydney, Australia.

- Moomivand, H. (2007). Effect of porosity on the estimating uniaxial compressive strength of sandstone using Schmidt hammer and investigation in to exhaustive relationship between its mechanical properties. Research Project, Urmia University.
- Moomivand, H. (2011). Development of a new method for estimating the indirect uniaxial compressive strength of rock using Schmidt hammer. Journal of BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte (Journal of Minig, Metallurgical, Materials, Geotechnical and Plant Engineering), Vol. 156, No. 4, pp. 142 - 146.
- Marinos, P. and Hoek, E. (2000). GSI-a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. GeoEng Conference, Melbourne. Invitedpapers, vol. I. Technonic Publishing Co., Inc., Pennsylvania, 1422 -1440.
- Marinos, P. and Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bull. Int. Assoc. Eng. Geo, Vol. 60, 85-92.
- Neville, A.M., Brooks, J.J. (2010). Concrete Technology. (Ramezaniapour, A. A., Arabi, N., Trans.). (2016). 4th Edition. Tehran: 'Negarande Danesh'. 420 P. ISBN: 978-600-6190-08-2.
- Rosenblad, J. L. (1968). Development of rock like material. Tenth U.S. Symposium on Rock Mechanics. pp. 331-361.
- Palchik, V. (1999). Influence of porosity and elastic modulus on uniaxial compressive strength in soft brittle porous sandstones. Journal of Rock Mech. Rock Engineering, Vol. 32 (4), 303-309.
- Saucier, K.L. (1967). Development of material for modelling rock. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (Vicksburg Mississippi). Miscellaneous Paper, No. 6-93, October.
- Schultz, R.A., Okubo, C.H. and Fossen, H. (2010). Porosity and grain size controls on compaction band formation in Jurassic Navajo Sandstone. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 37, L22306, doi:10.1029/2010GL044909, 2010.
- Smorodinov, M.I., Motovilov, E.A. and Volkov, V.A. (1970). Determinations of correlation relationships between strength and some physical characteristics of rocks. Proc. Second Congress of ISRM, Belgrade, Privredni pregled, Vol. 2, pp. 35 - 37.
- Stimpson, B. (1970). Modelling materials for engineering rock mechanics. International journal of rock Mechanics and mining sciences, Vol. 7, pp. 71-121.