

اثر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان

آرش دهستانی^۱ و مهدی حسینی^{۲*}

۱ و ۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

نویسنده مسئول: * mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

دریافت: ۹۷/۱۰/۳۰ پذیرش: ۹۸/۳/۱۱

چکیده

در بسیاری از پروژه‌های عمرانی اغلب به سبب عواملی از قبیل مقادیر متغیر بارش، تبخیر آب و تغییرات سطح مخازن آب، ملات سیمان تحت تأثیر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن قرار دارد. برهم کنش متناوب آب و ملات بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان و تسریع فرسایش آن اثر می‌گذارد. از این رو بررسی اثر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان لازم و ضروری به نظر می‌رسد. برای رسیدن به این هدف تعدادی نمونه استوانه‌ای و دیسکی شکل آماده شدند. نمونه‌ها برای انجام آزمایش تراکم تک‌محوری، برزلی و آزمایش‌های تعیین تخلخل موثر و تعیین سرعت امواج طولی آماده شدند. نمونه‌ها در سیکل‌های ۰، ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. هر سیکل بدین صورت است که نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب اشباع و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند و پس از سرد شدن در داخل آون، تحت آزمایش قرار گرفتند. مقاومت تراکمی تک‌محوری، مقاومت کششی برزلی، مدول الاستیسیته و سرعت امواج طولی بعد از سیکل ۲۵ به ترتیب ۳۶/۷۲، ۳۷/۹۶، ۳۵/۴۴ و ۸/۱ درصد در مقایسه با سیکل صفر کاهش یافتند و تخلخل به میزان ۷/۶ درصد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: سیکل‌های تر شدن - خشک شدن، خواص فیزیکی، خواص مکانیکی، ملات سیمان

۱- مقدمه

در اغلب پروژه‌های مهندسی، ملات سیمان کاربردهای متنوعی دارد و برهم‌کنش آب و ملات سیمان اجتناب‌ناپذیر است. این برهم‌کنش باعث افزایش تخلخل و در نتیجه زوال پارامترهای فیزیکی و مکانیکی می‌گردد. از جمله موارد مورد استفاده ملات سیمان می‌توان به کاربرد آن برای پل‌ها، مخازن آب و سیلوها، پر کردن و مرمت ترک‌های موجود در بتن‌های قدیمی و تزریق در سنگ‌ها اشاره کرد (اوهاما و رامچاندرا، ۱۹۹۶). پژوهش‌های بسیاری درباره اثر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن روی خواص فیزیکی و مکانیکی مانند وزن مخصوص، سرعت امواج طولی، تخلخل، مقاومت تراکمی تک‌محوری و مقاومت کششی سنگ‌ها انجام شده است که تعدادی از این پژوهش‌ها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است (ژو و همکاران، ۲۰۱۷؛ توپال و دویوران، ۱۹۹۸؛ پاردینی و همکاران، ۱۹۹۶؛ هوا و همکاران، ۲۰۱۷؛ کگانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ یائو و همکاران، ۲۰۱۱؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴).

پژوهش‌های انجام شده در خصوص اثر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن روی خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان بسیار محدود است که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

در پژوهشی، حسین‌زاده و همکاران در مورد اثر تخلخل و رطوبت در گسترش ترک در نمونه ملاتی که تحت تنش تک‌محوره قرار گرفته همزمان با ثبت داده‌های آوایی مطالعه‌ای انجام داده‌اند. بر طبق این مطالعه، با افزایش تخلخل تعداد ترک‌های کششی ایجاد شده در نمونه‌ها در آزمایش تراکمی تک‌محوره افزایش یافته و با افزایش تخلخل و افزایش رطوبت، نرخ ایجاد ریزترک‌های جدید در نمونه کاهش می‌یابد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). هم‌چنین می‌توان به مطالعه وانگ و همکاران درباره تحقیقات تجربی در مورد ویژگی‌های فشرده‌سازی ملات آسفالت - سیمان در اثر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن اشاره کرد. این مطالعه نشان داد که با افزایش سیکل‌های تر شدن - خشک شدن مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته کاهش یافتند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۴). یه و همکاران درباره مدل نفوذ کلید

شدن روی خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان کار شده است و به همین علت این موضوع برای پژوهش انتخاب شد که از مزیت‌های این پژوهش است. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن بر خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان می‌باشد. در پایان این پژوهش سعی شده است یک رابطه تجربی بین میزان کاهش هریک از پارامترهای مورد آزمایش با تخلخل موثر ارائه شود.

به بتن ترک خورده تحت سیکل‌های تر شدن - خشک شدن مطالعاتی انجام داده‌اند. بر این اساس هنگامی که در بتن ترک ایجاد می‌شود راه برای ورود کلرید باز می‌شود که بر دوام آن اثر می‌گذارد. بدین منظور میزان کلرید موجود در نمونه‌های بتنی دارای ترک سطحی اندازه‌گیری شد که نشان داد بیش‌ترین میزان در سطح ترک وجود دارد و با فاصله گرفتن از ترک این میزان به تدریج کاهش می‌یابد (یه و همکاران، ۲۰۱۲).

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد پژوهش‌های اندکی در خصوص اثر تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک

جدول ۱. خلاصه‌ای از برخی پژوهش‌های انجام شده درباره تأثیر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن بر روی خواص فیزیکی سنگ

پارامترهای مورد بررسی	نام پژوهنده	نام سنگ	تعداد سیکل	زمان‌بندی سیکل	تغییرات پس از پایان سیکل نهایی (%)	مرجع
تخلخل	ژو و همکاران	ماسه سنگ	۵۰	نمونه‌ها ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس اشباع و سپس در همان دما خشک شدند.	۱۲ افزایش	(ژو و همکاران، ۲۰۱۷)
تخلخل	ژانگ و همکاران	ماسه سنگ	۸	ابتدا نمونه‌ها در آب اشباع شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۵ درجه خشک شدند.	۱۰ افزایش	(ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴)
چگالی	ژو و همکاران	ماسه سنگ	۵۰	نمونه‌ها ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس اشباع و سپس در همان دما خشک شدند	۲۰/۵۸ کاهش	(ژو و همکاران، ۲۰۱۷)
	پاردینی	سنگ رس	۳	نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آب اشباع و سپس خشک شدند.	تغییرات بسیار ناچیز	(پاردینی و همکاران، ۱۹۹۶)
جذب آب	ژو و همکاران	ماسه سنگ	۵۰	نمونه‌ها ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس اشباع و سپس در همان دما خشک شدند.	۲۵/۳۸ افزایش	(ژو و همکاران، ۲۰۱۷)
	توپال و دویوران	توف	۵۲	نمونه‌ها ۲۴ ساعت در آب اشباع شده است و سپس در دمای بین ۱۰۰-۱۱۰ درجه سلسیوس خشک شدند.	۲/۳۱ افزایش	(توپال و دویوران، ۱۹۹۸)
سرعت موج	ژو و همکاران	ماسه سنگ	۵۰	نمونه‌ها ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس اشباع و سپس در همان دما خشک شدند	در حالت خشک ۱۹/۷ و در حالت تر ۴/۵ کاهش	(ژو و همکاران، ۲۰۱۷)
	توپال و دویوران	توف	۵۲	نمونه‌ها ۲۴ ساعت در آب اشباع شده است و سپس در دمای بین ۱۰۰-۱۱۰ درجه سلسیوس خشک شدند.	۲۷/۸۳ کاهش	(توپال و دویوران، ۱۹۹۸)

جدول ۲. خلاصه‌ای از برخی پژوهش‌های انجام شده درباره تأثیر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن بر روی خواص مکانیکی سنگ

پارامترهای مورد بررسی	نام پژوهنده	نام سنگ	تعداد سیکل	زمان‌بندی سیکل	تغییرات پس از پایان سیکل نهایی (%)	مرجع
زاویه اصطکاک	کگانگ و همکاران	ماسه‌سنگ	۴۰	نمونه‌ها ۴۸ ساعت در آب اشباع شده است و سپس ۱۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس خشک شدند.	۳/۹۶ کاهش	(کگانگ و همکاران، ۲۰۱۶)
مدول الاستیسیته	ژو و همکاران	ماسه‌سنگ	۵۰	نمونه‌ها ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس اشباع و سپس در همان دما خشک شدند	۳۵/۷۱ کاهش	(ژو و همکاران، ۲۰۱۷)
	کگانگ و همکاران	ماسه‌سنگ	۴۰	نمونه‌ها ۴۸ ساعت در آب اشباع شده است و ۱۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس خشک شدند.	۴۲ کاهش	(کگانگ و همکاران، ۲۰۱۶)
مقاومت فشاری تک‌محوری	توپال و دویوران	ماسه‌سنگ	۵۰	نمونه‌ها ۲۴ ساعت در آب اشباع شده است و سپس در دمای بین ۱۰۰-۱۱۰ درجه سلسیوس خشک شدند.	۱۱/۴۸ کاهش	(توپال و دویوران، ۱۹۹۸)
	یانو و همکاران	ماسه‌سنگ	۸	نمونه‌ها ۳۲ ساعت در آب اشباع شده است و ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند.	۸۳ کاهش	(یانو و همکاران، ۲۰۱۱)
مقاومت فشاری سه‌محوره	کگانگ و همکاران	ماسه‌سنگ	۴۰	نمونه‌ها ۴۸ ساعت در آب اشباع شده است و ۱۲ ساعت در دمای ۵۰ درجه سلسیوس خشک شدند.	در فشارهای محصورکننده ۲، ۶ و ۱۰ مگاپاسکال به ترتیب ۴۶/۹۳، ۱۲/۳۴ و ۴۶/۶۴ کاهش می‌یابد.	(کگانگ و همکاران، ۲۰۱۶)
چسبندگی	ژانگ و همکاران	ماسه‌سنگ	۸	نمونه‌ها ۴ ساعت توسط پمپ خلا اشباع و ۲۰ ساعت در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند.	۵۷ کاهش	(ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴)
مقاومت کششی حاصل از آزمایش برزیلی	هوا و همکاران	ماسه‌سنگ	۷	نمونه‌ها ۴۸ ساعت در آب اشباع شده است و ۱۲ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شدند.	۵۶/۵ کاهش	(هوا و همکاران، ۲۰۱۷)

۲- آماده‌سازی نمونه

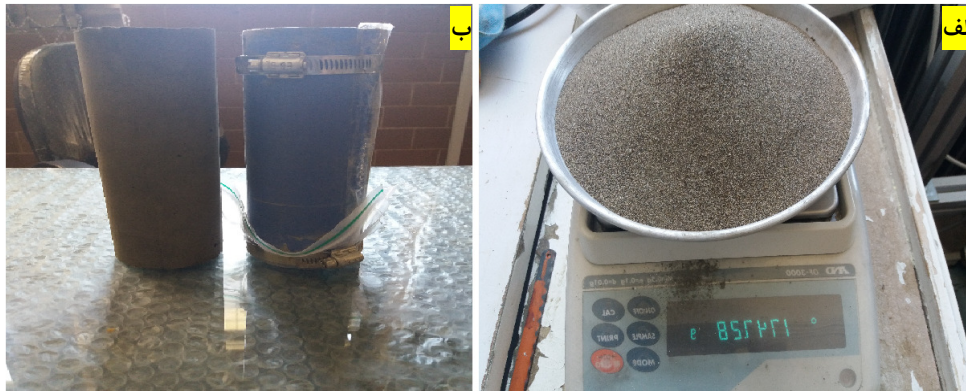
برای ساختن نمونه‌های ملات سیمان از قالب‌های استوانه‌ای شکل استفاده شده است. ملات سیمان ساخته شده ترکیبی از آب، سیمان و از ماسه ساحلی می‌باشد. (ماسه ساحلی دریا خزر در اطراف شهر رضوان‌شهر (ماسه ریز دانه) می‌باشد) ماسه‌ها دارای ابعاد بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ میکرون است. نسبت آب به سیمان ۰/۵ و سیمان به ماسه برابر ۱ می‌باشد. نمونه‌های استوانه‌ای به مدت ۲۸ روز در آب قرار داده شدند تا به مقاومت نهایی خود برسند. تعدادی از این نمونه‌های استوانه‌ای برای تعیین مقاومت تراکمی تک‌محوری و مدول الاستیسیته و تعیین سرعت امواج طولی جدا شدند و تعدادی دیگر برای انجام

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم توسط دستگاه برش به دیسک‌هایی به ضخامت متوسط ۳۰/۲۴ mm تبدیل شدند (شکل ۱ الف و ب).

قبل از انجام آزمایش‌ها نمونه‌های صیقل داده شده داخل تشت آب به مدت ۴۸ ساعت (سیکل تر شدن) قرار می‌گیرند؛ سپس نمونه‌ها از داخل تشت خارج شده و داخل آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ثابت ۱۰۵ درجه (سیکل خشک شدن) قرار داده می‌شوند و سپس نمونه‌ها در محیط کوره خنک می‌شوند. برای جلوگیری از وارد آمدن شوک حرارتی به نمونه‌ها در هنگام سرد شدن، بعد از خاموش کردن کوره، نمونه‌ها در محیط کوره به آرامی خنک می‌شوند تا میزان شوک حرارتی

هوا و همکاران در سال ۲۰۱۷ انجام شده است (هوا و همکاران، ۲۰۱۷).

ایجاد شده در اثر سرد شدن به کمترین میزان کاهش یابد. این فرآیند یک سیکل تر و خشک شدن را شامل می‌شود. طرح فرآیند تر و خشک شدن مطابق با پژوهش



شکل ۱. آماده‌سازی نمونه‌های ملات سیمان، الف) استفاده از ترازوی دیجیتال برای وزن کردن مصالح، ب) نمونه ملات سیمان ساخته شده

آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها در آون قرار داده شدند. پس از اینکه نمونه‌ها خشک شدند جرم خشک آن‌ها محاسبه شد. تخلخل پس از سیکل‌های ذکر شده به ترتیب برابر با ۱۷/۰۳، ۱۷/۵، ۱۷/۸، ۱۸/۰۵، ۱۸/۱۵، ۱۸/۳۵ و ۱۸/۴۵ درصد است. نتایج محاسبات را در شکل (۲) ملاحظه می‌کنید. همچنین با توجه به شکل (۲) ارتباط بین تخلخل موثر و تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$n_e = 0.0486N + 17.377 \quad (R^2 = 0.858) \quad (1)$$

که در آن n_e تخلخل موثر بر حسب درصد و N : تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن است.

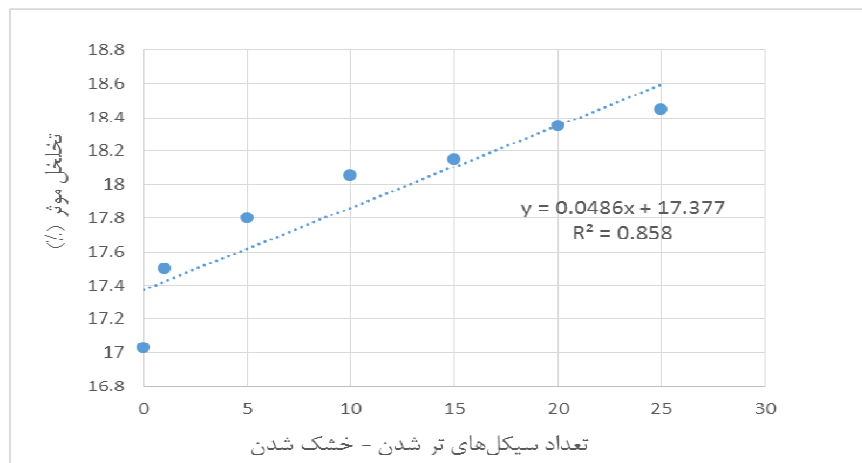
۳- خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان

تمام آزمایش‌ها بر اساس استاندارد ISRM انجام شده است (هتوی، ۲۰۰۹).

۳-۱- خواص فیزیکی

۳-۱-۱- تخلخل موثر

تخلخل موثر از تقسیم حجم منافذ موثر بر حجم کل نمونه محاسبه می‌شود که به صورت درصد بیان می‌شود. برای اینکه محاسبات با دقت بیشتری انجام گیرد در هر سیکل از چندین نمونه استفاده شد و میانگین آن‌ها برای تخلخل موثر مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور پس از سیکل‌های ۰، ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ نمونه‌ها توسط پمپ خلا اشباع شده و سپس جرم اشباع و غوطه‌وری



شکل ۲. رابطه بین سیکل‌های تر شدن - خشک شدن و تخلخل موثر

۳-۱-۲- سرعت امواج طولی

قبل از اینکه آزمایش تراکم تک‌محوری انجام شود نمونه‌ها برای تعیین سرعت امواج طولی مورد استفاده قرار می‌گیرند. قبل از هر آزمایش برای به حداقل رساندن خطای آزمایش دستگاه کالیبره می‌شود و زمان تاخیر دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. در ضمن وازلین نیز به دو انتهای نمونه مالیده می‌شود تا ارتباط مناسبی بین نمونه و فرستنده و گیرنده برقرار شود (شکل ۳). سرعت امواج طولی هر نمونه ملات سیمان پس از سیکل‌های ۰، ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول (۳) نشان داده شده‌اند که میانگین سرعت امواج طولی به

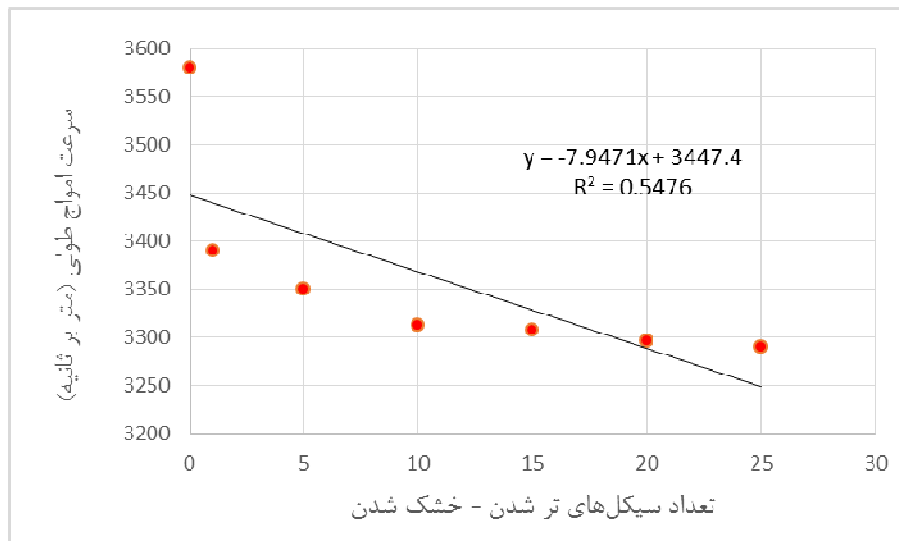
ترتیب برابر ۳۵۸۰، ۳۳۹۰، ۳۳۴۹، ۳۳۱۲، ۳۳۰۸، ۳۲۹۵ و ۳۲۹۰ متر بر ثانیه می‌باشد. این نتایج به صورت نموداری در شکل (۴) نیز نشان داده شده است. می‌توان دریافت که با افزایش سیکل‌های ترشدن - خشک شدن، سرعت امواج طولی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۴) ارتباط بین سرعت امواج طولی و تعداد سیکل‌های ترشدن - خشک شدن با استفاده از رابطه (۲) تعیین می‌شود:

$$V_p = -7/9471N + 3447/4 \quad (R^2 = 0/55) \quad (2)$$

که در آن V_p : سرعت امواج طولی بر حسب متر بر ثانیه و N : تعداد سیکل‌های ترشدن - خشک شدن است.



شکل ۳. کالیبره کردن دستگاه آزمایش تعیین سرعت امواج طولی



شکل ۴. رابطه تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن و سرعت امواج طولی

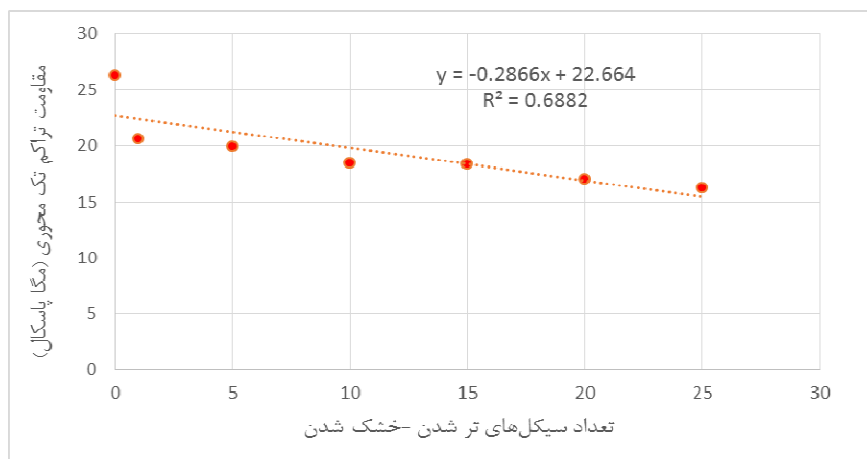
$$E = -0.4038N + 16.538 \quad (R^2 = 0.77) \quad (4)$$

که در آن E: مدول الاستیسیته بر حسب گیگاپاسکال و N: تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن است.

همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود با افزایش تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل (۸) ارتباط بین مدول الاستیسیته و تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن با استفاده از رابطه (۴) تعیین می‌شود:



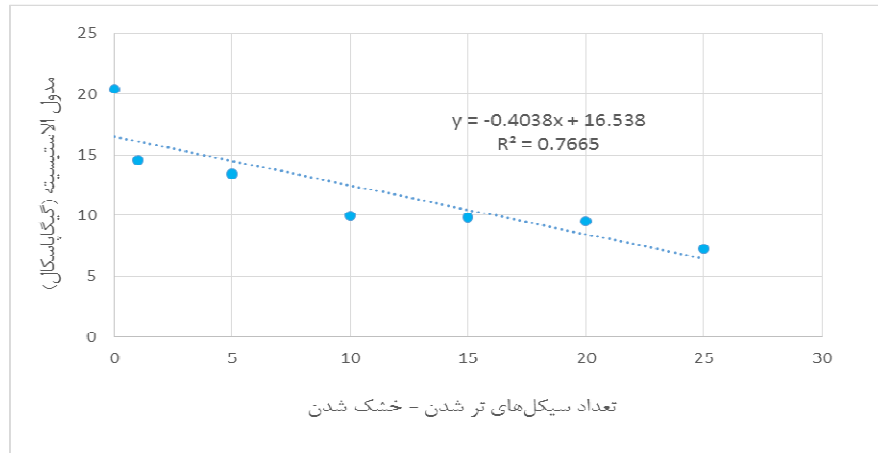
شکل ۵. آزمایش بارگذاری تک‌محوره (الف) تعدادی از نمونه‌های آماده شده (ب) نمونه تحت بارگذاری



شکل ۶. رابطه تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن و مقاومت تراکمی تک‌محوره



شکل ۷. نمونه‌های استوانه‌ای به کار رفته برای تعیین مدول الاستیسیته (الف) کرنش سنج نصب شده بر روی نمونه (ب) نمونه‌های شکسته شده پس از آزمایش



شکل ۸. رابطه بین تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن و مدول الاستیسیته

جدول ۴. نتایج آزمایشات مقاومت تراکمی تک‌محوری در سیکل‌های ۰ تا ۲۵

نام	سیکل	مقاومت تراکمی تک محوره (مگاپاسکال)	میانگین مقاومت تراکمی تک محوره (مگاپاسکال)
T-۲	۰	۲۹/۲۸	۲۶/۲۶
T-۱	۰	۲۳/۶۷	
T-۳	۰	۲۵/۸۴	
T-۱۹	۱	۲۰/۴۳	۲۰/۵۸
T-۲۰	۱	۲۰/۷۲	
T-۹	۵	۱۹/۳۶	۱۹/۸۹
T-۱۱	۵	۲۰/۴۳	
T-۱۷	۵	۱۹/۸۹	
T-۷	۱۰	۱۸/۱۸	۱۸/۴۳
T-۱۵	۱۰	۱۹/۴۸	
T-۶	۱۰	۱۷/۶۳	
T-۴	۱۵	۱۸/۸۵	۱۸/۳۱
T-۱۶	۱۵	۱۷/۶۶	
T-۱۴	۱۵	۱۸/۴۱	
T-۸	۲۰	۱۷/۴۱	۱۷/۰۷
T-۱۲	۲۰	۱۶/۸۵	
T-۱۳	۲۰	۱۶/۹۶	
T-۱۸	۲۵	۱۶/۸۱	۱۶/۲۹
T-۱۰	۲۵	۱۶/۰۴	
T-۵	۲۵	۱۶/۰۳	

آزمایش دور نمونه‌ها با کمک یک نوار چسب پوشانده شدند و سپس با آهنگ یکنواخت تحت بارگذاری قرار گرفتند تا در بازه زمانی بین ۱۵ تا ۳۰ ثانیه تحت تنش کششی القا شده در جهت عمود بر صفحه محوری شکسته شوند. در شکل (۹) نمونه تحت بارگذاری و در شکل (۱۰) و جدول (۵) نتایج آزمایشات نشان داده

۳-۲-۳- مقاومت کششی

آزمایشات بر روی نمونه‌های دیسک برزلی انجام شد که در آن ضخامت متوسط نمونه‌های دیسک برزلی ۳۰/۲۴ میلی‌متر و قطر متوسط آن‌ها ۵۹/۰۱ میلی‌متر می‌باشد. هدف از انجام آزمایش برزلی، تعیین مقاومت کششی نمونه‌های آماده شده به طور غیرمستقیم است. در این

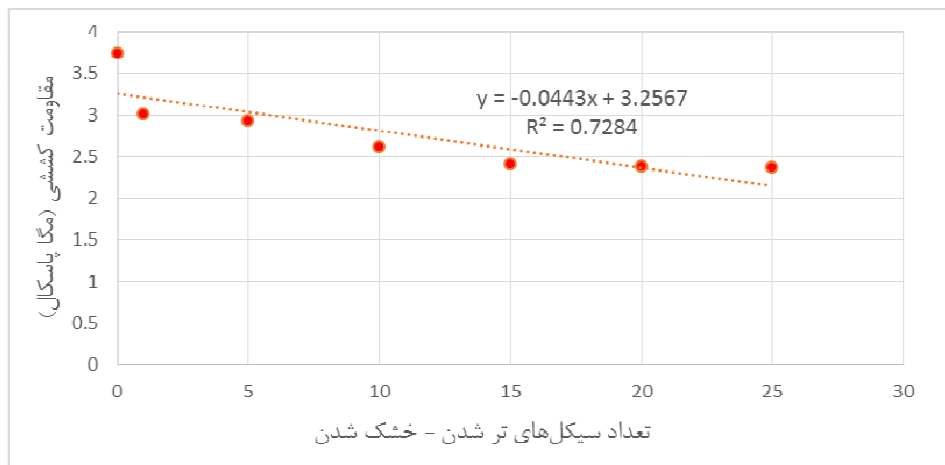
$$\sigma_t = -0.0443N + 3.2567 \quad (R^2 = 0.7284) \quad (5)$$

که در آن σ_t : مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال و N: تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن است.

شده‌اند. میانگین مقاومت کششی بعد از سیکل‌های ۰، ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ به ترتیب برابر ۳/۷۳، ۳/۰۱، ۲/۹۲، ۲/۶۱، ۲/۴، ۲/۳۷ و ۲/۳۶ مگاپاسکال می‌باشد. همانطور که در شکل (۱۰) ملاحظه می‌شود رابطه (۵) بین مقاومت کششی غیر مستقیم و تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن وجود دارد:



شکل ۹. آزمایش برزیلی (الف) نمونه تحت بارگذاری (ب) نمونه ترک‌خورده پس از انجام آزمایش



شکل ۱۰. رابطه بین تعداد سیکل‌های تر شدن - خشک شدن و مقاومت کششی

۷/۹ و ۸/۱ درصد می‌باشد. سیکل‌های تر شدن - خشک شدن موجب رشد و گسترش میکروترک‌ها در ملات سیمان می‌شود که باعث جذب بیش‌تر آب و تخلخل بیش‌تر می‌شود. تخلخل در اثر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن، میزان آسیب را تعیین می‌کند بر این اساس سیکل‌های تر شدن - خشک شدن بیش‌ترین تاثیر را بر مدول الاستیسیته و کمترین تاثیر را بر سرعت امواج طولی دارد. نتایج نشان می‌دهد بیش‌ترین میزان کاهش در پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی در سیکل اول اتفاق می‌افتد این نتایج در مقایسه با نتایج سایر محققین

۴- تحلیل نتایج

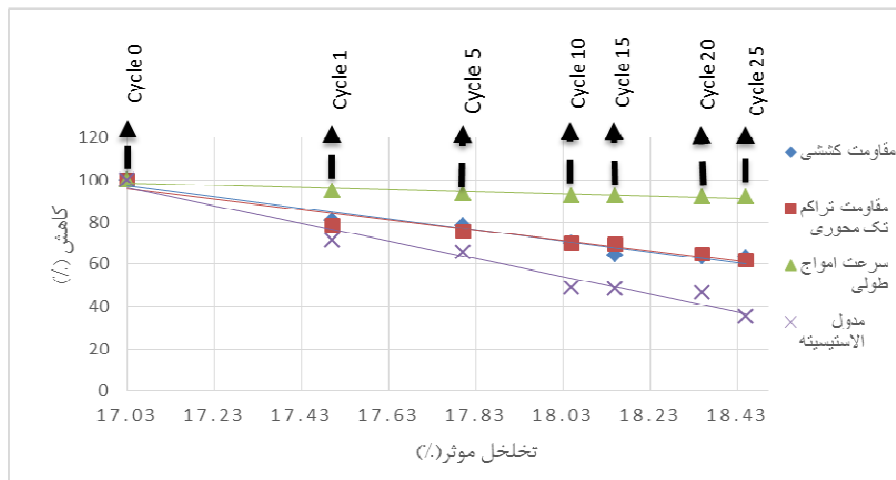
نتایج آزمایش نشان می‌دهد میزان افزایش تخلخل پس از سیکل‌های ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ به ترتیب برابر ۲/۷، ۴/۵، ۵/۹، ۶/۵، ۷/۷ و ۸/۳ درصد می‌باشد. همچنین میزان کاهش خواص ملات سیمان پس از سیکل‌های ذکر شده برای مقاومت تراکمی تک‌محوره ۲۱/۶، ۲۴/۲، ۲۹/۸، ۳۰/۲، ۳۴/۹ و ۳۷/۹ درصد، برای مقاومت کششی ۱۹/۳، ۲۱/۷، ۳۰، ۳۵/۶، ۳۶/۴ و ۳۶/۷ درصد، برای مدول الاستیسیته ۲۸/۷، ۳۴/۳، ۵۱، ۵۱/۸، ۵۳/۳ و ۶۴/۵ درصد و برای سرعت امواج طولی ۵/۳، ۶/۴، ۷/۴، ۷/۶

تخلخل ملات افزایش یافته است. با افزایش تخلخل، مقاومت تراکم تک‌محوری، مقاومت کششی، سرعت موج و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابند. در شکل ۱۱ درصد تغییرات تمام پارامترها با تخلخل آورده شده و در جدول (۶) رابطه ریاضی این نمودارها آورده شده است.

(ژو و همکاران، ۲۰۱۷؛ توپال و دویوران، ۱۹۹۸؛ پاردینی و همکاران، ۱۹۹۶؛ هوا و همکاران، ۲۰۱۷؛ کگانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ یائو و همکاران، ۲۰۱۱؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴) که در مورد سنگ‌ها انجام گرفته است مطابقت دارد. در ضمن همانطور که در شکل (۱۱) دیده می‌شود با افزایش سیکل‌های تر شدن - خشک شدن،

جدول ۵. نتایج آزمایشات مقاومت کششی در سیکل‌های ۰ تا ۲۵

نام	سیکل	مقاومت کششی (مگا پاسکال)	میانگین مقاومت کششی (مگا پاسکال)
B-۱-۱	۰	۴/۰۲	۳/۷۳
B-۱-۲	۰	۳/۴۴	
B-۴-۳	۱	۳/۱	۳/۰۱
B-۳-۱	۱	۲/۹۲	
B-۴-۲	۱	۳/۱۶	۲/۹۲
B-۴-۴	۱	۲/۶۸	
B-۲-۳	۱۰	۲/۶	۲/۶۱
B-۳-۴	۱۰	۲/۶۱	
B-۴-۱	۱۵	۲/۴۴	۲/۴
B-۳-۲	۱۵	۲/۳۷	
b-۲-۲	۲۰	۲/۴۱	۲/۳۷
b-۱-۳	۲۰	۲/۳۳	
B-۲-۱	۲۵	۲/۴۵	۲/۳۶
B-۳-۳	۲۵	۲/۲۸	



شکل ۱۱. رابطه بین تخلخل و تغییرات خواص فیزیکی و مکانیکی در سیکل‌های ۰ تا ۲۵

جدول ۶. رابطه ریاضی بین افزایش تخلخل و کاهش سایر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ملات بر حسب درصد

پارامترها	رابطه ریاضی	R ²
مقاومت کششی	$\sigma_t = -25/952n_e + 538/95$	۰/۹۵
مقاومت تراکمی تک‌محوری	$\sigma_c = -24/27n_e + 508/97$	۰/۹۳
مدول الاستیسیته	$E = -42/152n_e + 814/18$	۰/۹۶
سرعت امواج	$V_p = -5/3433n_e + 189/54$	۰/۸۷

- Sandstone. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 9 (3): 66-73.
- Ohama, Y. and Ramachandran, V. S (1996) Polymer-Modified Mortars and Concretes. In *Concrete Admixtures Handbook (Second Edition)*, William Andrew Publishing, 558-656.
- Pardini, G., Guidi, G. V., Pini, R., Regúés, D. and Gallart, F (1996) Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing—thawing cycles. *Catena*, 27 (3-4): 149-165.
- Topal, T. and Doyuran, V (1998) Analyses of deterioration of the Cappadocian tuff. Turkey. *Environmental Geology*, 34 (1): 5-20.
- Wang, P., Xu, H., Chen, R., Xu, J. and Zeng, X (2014) Experimental research on compression properties of cement asphalt mortar due to drying and wetting cycle. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-6.
- Xu, Z. H., Sun, Q. C. and Zhang, G. D (2017) Prediction of Peak Strength of Red Sandstones under the Effects of Wetting-Drying Cycles Based on Ultrasonic Velocity Test. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 22 (5): 1497-1512.
- Yao, H. Y., Zhang, Z. H. and Zhu, Z. H (2011) Uniaxial mechanical properties of sandstone under cyclic of drying and wetting. In *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, 243: 2310-2313.
- Ye, H., Jin, N., Jin, X. and Fu, C (2012) Model of chloride penetration into cracked concrete subject to drying–wetting cycles. *Construction and Building Materials*, 36: 259-269.
- Zhang, Z., Jiang, Q., Zhou, C. and Liu, X (2014) Strength and failure characteristics of Jurassic Red-Bed sandstone under cyclic wetting–drying conditions. *Geophysical Journal International*, 198 (2): 1034-1044.
- Zhou, Z., Cai, X., Chen, L., Cao, W., Zhao, Y. and Xiong, C (2017) Influence of cyclic wetting and drying on physical and dynamic compressive properties of sandstone. *Engineering Geology*, 220: 1-12.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر سیکل‌های تر شدن - خشک شدن بر روی برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان بررسی شده است. در اغلب پروژه‌های مهندسی مواجه شدن با این پدیده اجتناب ناپذیر است، بنابراین با توجه به مطالعات انجام گرفته می‌توان گفت سیکل‌های تر شدن - خشک شدن اثرات منفی و نامطلوبی بر خواص فیزیکی و مکانیکی ملات دارد. افزایش سیکل‌های تر شدن - خشک شدن، باعث کاهش سرعت امواج طولی، مقاومت تراکمی تک‌محوره، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته و افزایش تخلخل می‌شود.

سیکل‌های تر شدن - خشک شدن، بیش‌ترین اثر را بر مدول الاستیسیته و کمترین اثر را بر سرعت امواج طولی دارند. افزایش سیکل‌های تر شدن - خشک شدن با تخلخل رابطه‌ی مستقیم دارد. بیش‌ترین میزان کاهش در ویژگی‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی در سیکل اول اتفاق می‌افتد.

در این پژوهش تعدادی روابط تجربی بین تخلخل موثر و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ ارائه شده است. این روابط نشان می‌دهند با افزایش تخلخل موثر سرعت امواج طولی، مقاومت تراکمی تک‌محوره، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد با افزایش تخلخل موثر بیش‌ترین کاهش مربوط به مدول الاستیسیته و کمترین کاهش مربوط به سرعت امواج طولی است.

منابع

- حسین‌زاده، م، ح، احمدی، م. و نجاتی، ح، ر (۱۳۹۷) بررسی اثر تخلخل و رطوبت در مکانیزم شکست ملات سیمان با استفاده از پارامترهای انتشار آوایی (AE). *مجله علمی - پژوهشی عمران مدرس*، دوره ۱۸، شماره ۱، ص ۹۱ تا ۹۹.
- Hatheway, A. W (2009) The complete ISRM suggested methods for rock characterization. testing and monitoring, 1974–2006.
- Hua, W., Dong, S., Peng, F., Li, K. and Wang, Q (2017) Experimental investigation on the effect of wetting-drying cycles on mixed mode fracture toughness of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 93: 242-249.
- Kegang, L., Lin, M., Xiangxing, L. and Shoujian, P (2016) Effect of Drying-Wetting Cycles on Triaxial Compression Mechanical Properties of

Effects of Wetting-Drying Cycles on Physical and Mechanical Properties of Cement Mortar

A. Dehestani¹ and M. Hosseini^{2*}

1, 2- Dept., of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin

*mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

Received: 2019/1/20 Accepted: 2019/6/1

Abstract

In many construction projects, cement mortar is affected by wetting-drying cycles, often due to factors such as varying rainfall, evaporation, changes in level of water in reservoirs. Alternative interactions between water and mortar affects the physical and mechanical properties of cement mortar and accelerates its erosion. Therefore, evaluating the effect of wetting-drying cycles on the physical and mechanical properties of cement mortar seems to be essential. For this purpose, a number of cylindrical and disc shaped samples were prepared. Samples were prepared for uniaxial compression test, Brazilian test, effective porosity test, and also determining longitudinal wave velocity. Samples were examined in cycles 0, 1, 5, 10, 15, 20 and 25. In each cycle, the samples were saturated in water for 24 hours and then dried at 105 ° C for 24 hours; then the samples were cooled at room temperature and finally examined. After cycle 25, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, modulus of elasticity and longitudinal wave velocity decreased by 37.96, 36.72, 35.44 and 8.1 percent, respectively; while porosity increased by 7.6 percent.

Keywords: wetting-drying cycles, physical properties, mechanical properties, cement mortar