

## بررسی تأثیر سرعت و زاویه برخورد جت آب صفحه‌ای بر ملاتهای پوششی خاکی با میکروسیلیس در مجاری انتقال آب

بابک تقدیسی<sup>۱</sup>، کاظم اسماعیلی<sup>۲\*</sup>، سعید رضا خداشناس<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه فردوسی مشهد (پردیس بین الملل)

۲. دانشیار، گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۹/۱۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۱۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۴/۲۵)

### چکیده

استفاده از پوشش‌های بتنی جهت کنترل فرسایش مجاری انتقال آب در مناطق صعب‌العبور و کوهستانی، به علت هزینه‌های بالای تهیه و حمل مصالح در بسیاری مواقع دارای توجیه اقتصادی نمی‌باشد. این مسئله در خاکهای گچی به علت انحلال و فرسایش‌پذیری بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. مطالعات پیشین نشان می‌دهد که با افزودن سیمان و دیگر مصالح به خاک محل می‌توان، مقاومت فشاری خاکها را افزایش داد. استفاده از پودر میکروسیلیس در تثبیت خاک‌های گچی و بررسی مقاومت فشاری و فرسایشی می‌تواند تفاوت عمده‌ای با تحقیقات قبلی داشته باشد. در پژوهش حاضر مقاومت فشاری و فرسایشی ناشی از برخورد جت آب صفحه‌ای بر نمونه‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد، شروع فرسایش در نمونه‌ها وابسته به سرعت و زاویه برخورد جت آب به نمونه‌ها و زمان فرسایش داشته و برای نمونه‌هایی با ۱۰٪ میکروسیلیس، در سرعت ۴ متر بر ثانیه و زاویه برخورد عمودی ( $\Theta=0$ )، ترکیبی با ۱۰٪ سیمان تا زمان ۶ ساعت و ترکیبی با ۱۲٪ سیمان در کل زمان آزمایش (۸ ساعت) و در سرعت ۶ متر بر ثانیه و زاویه برخورد افقی ( $\Theta=90$ ) هر دو ترکیب (۱۰٪ و ۱۲٪ سیمان) در کل زمان آزمایش (۸ ساعت)، در مقابل فرسایش، مقاومت دارند.

**واژه‌های کلیدی:** تثبیت خاکهای گچی، کنترل فرسایش، تثبیت خاک محل.

### مقدمه

یکی از پارامترهای اصلی در توسعه بخش کشاورزی، تهیه آب با کیفیت برای اراضی مستعد کشاورزی می‌باشد. در خیلی از مناطق کوهستانی آب با کیفیت ناشی از چشمه‌ها و نزولات جوی در اثر عبور از سازندهای مختلف از جمله گچساران، کیفیت مطلوب خود را از دست داده و سبب انحلال و فرسایش شدید در مجاری انتقال می‌گردد. به گونه‌ای که ساخت هر سازه آبی را با مشکل مواجه می‌کند. در منطقه مورد مطالعه به خاطر کوهستانی و صعب‌العبور بودن مسیر، انتقال مصالح به محل و عملیات اجرایی بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. به گونه‌ای که در منطقه مورد مطالعه با وجود وفور اراضی مستعد کشاورزی، تا کنون هیچ‌گونه عملیات سازه‌ای در مجاری انتقال آب صورت نگرفته است. در این مناطق بهترین راه کار اجرایی، تثبیت نمودن خاک‌های فرسایش پذیر و قابل انحلال با حداقل مواد

افزودنی می‌باشد. در تحقیقات آقای بچار و همکارانش بهترین ترکیب جهت تثبیت، افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری خاک، ترکیبی با ۵۸٪ خاک، ۳۰٪ شن و ماسه و ۱۲٪ سیمان پیشنهاد گردید. (Bachare et al., 2015). در بررسی تأثیر درجه حرارت (۴۰-۱۰ درجه سانتیگراد) و رطوبت نسبی (۹۵ - ۳۳ درصد) بر تثبیت خاکهای چسبیده با افزودن سیمان و گچ به نقش تأثیرگذارتر رطوبت نسبت به حرارت در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها اشاره شده است (Ashour et al., 2015a). در بررسی تأثیر افزودن سیمان و گچ به خاک همراه با کاه (الیاف گندم و جو) به افزایش مقاومت فشاری و تبدیل شدن نمونه به یک نوع عایق حرارتی اشاره شده است (Ashour et al., 2015b). کوپتا و کومار به تأثیر افزودن سیمان و خاکستر پوسته برنج، جهت تثبیت خاکهای رسی پرداخته و در نتایج عنوان گردید افزودن این مواد به خاک سبب ایجاد یک ترکیب مقاوم و سبک در سازه‌های مختلف مثل خاکیزها و تثبیت دیواره‌ها می‌شود (Gupta and Kumar, 2015). محققین ژاپنی در نتایج تحقیقات خود در سال ۱۹۸۷ در

\* نویسنده مسئول: esmaili@um.ac.ir

شد و در مابقی محدوده، تا ۱۴۰ متر در سواحل، تخریب ایجاد گردید (به نقل از Rahimi and Kheir Andish, 1996). با توجه به موارد عنوان شده در پیشینه تحقیق، کارهای خوبی در زمینه اختلاط مواد مختلف با خاک - سیمان در داخل و خارج از کشور انجام شده است ولی در این کار تحقیقاتی با افزودن درصدهای متفاوتی از سیمان و میکروسیلیس به خاک منطقه (سازند گچساران) و عمل آوری نمونه‌ها متناسب با شرایط دمایی محل، مقاومت فشاری نمونه‌ها بررسی و نتایج در شکل‌های ۹ الی ۱۲ ارائه گردید. سپس به منظور بررسی عملی پژوهش، نمونه‌هایی از خاک تثبیت شده، تحت تأثیر جت آب صفحه‌ای در ۴ سرعت متفاوت (۶،۴،۲ و ۸ متر بر ثانیه)، ۴ زاویه متغیر  $\Theta$  (صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق) و ۴ زمان فرسایش (۲،۴،۶،۸ ساعت) قرار گرفت و افت وزنی ایجاد شده (در این آزمایش چون فرسایش از سطح نمونه‌ها انجام می‌شود همانند آزمایش تر و خشک ۴ افت وزنی ملاک اندازه‌گیری فرسایش قرار گرفته است) در شرایط هیدرولیکی متفاوت مورد بررسی و نتایج در شکل‌های ۱۳ الی ۲۰ ارائه گردید. در انتها ضمن بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها، آستانه فرسایش ناشی از برخورد جت آب صفحه‌ای در شرایط هیدرولیکی متفاوت، بررسی و بهترین ترکیب از بابت فنی و اقتصادی پیشنهاد گردید.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ۴ سطح سیمان (C) تیپ ۲ (۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد نسبت به خاک خشک)، ۲ سطح میکروسیلیس (M) (۵ و ۱۰ درصد نسبت به سیمان (افزودن بیش از این مقدار مقرون به صرفه نمی‌باشد) و نمونه‌های شاهد بدون میکروسیلیس (در این تحقیق یکی از اهداف اصلی، بررسی تأثیر پودر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌باشد لذا نمونه‌های شاهد از نمونه‌های بدون میکروسیلیس و با درصدهای مختلف سیمان، نمونه خاک بدون سیمان دارای مقاومت بسیار پایین در حدود ۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع برای نمونه ۷ روزه می‌باشد، در نظر گرفته شده است). در دمای عمل آوری ۴۰ درجه سانتیگراد (متوسط دمای فصل تابستان منطقه) استفاده گردید. خاک مورد استفاده در این پژوهش از منطقه دره اناری واقع در ۱۰ کیلومتری جنوب غربی شهرستان باغملک (استان خوزستان) تهیه گردید.

میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق از ذرات بسیار ریز

خصوص افزودن سیمان به خاک جهت تثبیت و افزایش مقاومت در مقابل ذوب و انجماد<sup>۱</sup> عنوان نمودند، خاک تثبیت شده با سیمان، می‌تواند بعنوان ملات پوششی با نفوذپذیری بسیار کم در تثبیت حاشیه رودخانه‌ها و کانال‌ها جهت کنترل فرسایش استفاده گردد و با توجه به نتایج مثبت تحقیقات، این ترکیبات از آن به بعد در پروژه‌های انجمن عمومی توسعه منابع آب ژاپن<sup>۲</sup>، مورد استفاده قرار گرفت. (Kurihara et al., 2006). در تحقیقات انجام شده به بررسی کاربرد مخلوط خاک، سیمان در حفاظت بالادست خاکریزهای مخازن ذخیره آب در اثر برخورد امواج پرداخته و در نتایج اعلام گردید این ترکیب نسبت به پوشش سنگ‌چین<sup>۳</sup> مقرون به صرفه‌تر می‌باشد لذا کاربرد آن پیشنهاد می‌گردد (Fares, 2007). آقای رفتاری در تحقیقات خود به بررسی رفع مشکل تورم و مقاومت پایین خاکهای رسی کائولین پرداخته و به خاک مورد تحقیق، ۵ تا ۱۵ درصد سیمان نسبت به خاک خشک اضافه و ۱۲ روز عمل آوری نمود. نتایج کار حاکی از افزایش مقاومت و بهبود خاصیت الاستیسیته و کاهش نسبت تخلخل در خاک مورد آزمایش بود (Raftari et al., 2014). در تحقیق انجام شده به تأثیر افزودن ۵٪ وزنی زه‌آب گیاهان حاوی ذرات کائولینیت به ملات خاک - سیمان جهت تثبیت خاک مورد نظر پرداخته و در نتایج عنوان گردید افزودن این مواد سبب افزایش مقاومت فشاری و کاهش آلودگی محیط‌زیست می‌شود. (Rodrigues and Nilsson, 2015). در تحقیق انجام شده به تأثیر جنس خاک، مقدار سیمان و میکروسیلیس بر افزایش مقاومت فشاری تاکید و با در نظر داشتن دمای منطقه مورد مطالعه، نمونه‌هایی تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت و در انتها کاربرد میکروسیلیس و سیمان به عنوان افزودنی‌های تأثیرگذار در افزایش مقاومت فشاری پیشنهاد گردید. (Roshandel, 2000 ; Tabatabai, 2001). هوبو و وی در نتایج تحقیقات خود عنوان نمودند، افزودن یکسری الیاف‌های پلیمری به خاکهای رسی نیز می‌تواند سبب بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها و حفظ طبیعت از این الیاف‌ها گردد (Hou and Wei, 2015). استفاده از مخلوط خاک، سیمان برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ در تثبیت سواحل رودخانه تاکسون در ایالات متحده به کار رفت و اثربخشی آن در سیلاب سال ۱۹۸۳ مورد تأیید قرار گرفت به گونه‌ای که در مناطقی که سواحل با این روش تثبیت شده بود کاملاً سالم و بدون تخریب مشاهده

1. freeze-thaw effect

2. Japan Water Resources Development Public Corporation (name at that time).

3. rip rap

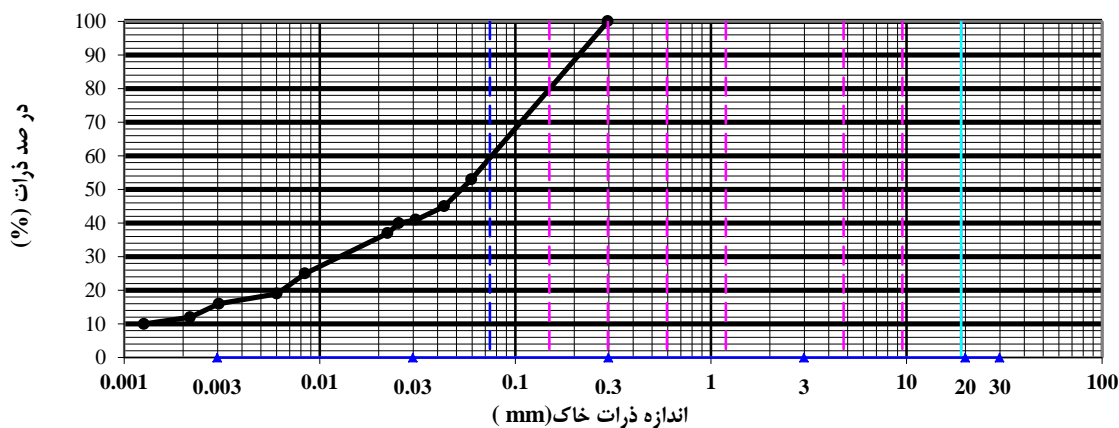
میکروسیلیس به ترکیبی مقاومتری بنام هیدرات سیلیکات کلسیم ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3$ ) تبدیل می‌گردد. که باعث افزایش سختی در نمونه‌ها می‌شود. در جدول (۱) نتایج آزمایشهای دانه‌بندی هیدرومتری (ASTM D422)، حدود اتربرگ خاک (ASTM D423 424 , 427) و طبقه بندی (USCS (BS 5930)) خاک منطقه و در شکل (۱) دانه‌بندی ذرات خاک آمده است.

سیلیسیم غیرکریستالی خاکستری رنگ، محصول جانبی فرآیند تولید عناصر سیلیکون مانند فروسیلیسیوم در کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد. این ماده در حدود ۹۵ بار از ذرات سیمان کوچکتر بوده و در فضاهای خالی بین ذرات قرار گرفته و تا حد زیادی سبب کاهش نفوذپذیری ترکیب می‌شود و از طرفی به علت واکنش سیمان پرتلند موجود در خاک، ترکیبی بنام هیدروکسید کلسیم  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  تولید شده که این ماده در مقابل

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و دانه‌بندی نمونه خاک محل اجرای پروژه

طبقه بندی خاک	چگالی ماگزیم ( $\%$ )	رطوبت بهینه ( $\%$ )	نشانه <sup>۱</sup> خمیری ( $\%$ )	حد خمیری ( $\%$ )	حد روانی ( $\%$ )	رس ( $\%$ )	سیلت ( $\%$ )	ماسه ( $\%$ )	گچ (Me/100)	D10 (mm)	D30 (mm)	D50 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc
CL	۱/۹۱	۷/۵	۷/۸	۱۶/۲	۲۴	۱۲	۳۷	۵۱	۱۷۸	۰/۰۰۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۵۴	۰/۰۷۵	۵۳	۱/۶۱

۱- تثبیت خاک با سیمان به روش درجا برای خاکهایی مناسب است که دامنه خمیری آنها کمتر از ۱۸ باشد. (Instruction Manual. ,N268)



شکل ۱- دانه‌بندی ذرات خاک

چپ به راست ۴ سطح سیمان، ۲ سطح میکروسیلیس، سه زمان عمل‌آوری در ۳ تکرار و ۳۶ نمونه شاهد بدون میکروسیلیس (صفر درصد) در ۳ تکرار در نسبت‌های متفاوت سیمان بوده که در کل تعداد نمونه‌های ساخته شده برابر ۱۰۸ نمونه می‌باشد. در شکل‌های (۲) تا (۵) تصاویری از تهیه و شکست نمونه‌ها آمده است.

#### ب- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم افزار آماری SAS<sup>۲</sup> و الگوی آماری اسپلیت پلات و مقایسه میانگین داده‌ها نیز به کمک آزمون حداقل تفاوت معنی دار<sup>۳</sup> انجام شد. با توجه به نتایج حاصل از آنالیز آماری داده‌ها (جدول ۲) تفاوت معنی داری در سطح ۰/۰۱ بین داده‌های تأثیرگذار بر مقاومت نمونه‌ها وجود دارد و تغییر در درصد مصالح افزوده شده به خاک، نتیجه مثبتی را در مقاومت فشاری به همراه خواهد داشت.

#### الف- آزمایش مقاومت فشاری

برای تهیه نمونه‌های مربوط به آزمایش مقاومت فشاری، ۱۲ طرح اختلاط متفاوت از مصالح موردنظر به روش استاندارد آشتو اصلاحی<sup>۱</sup> در رطوبت بهینه هر اختلاط برای رسیدن به حداکثر تراکم در مولد استاندارد به قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۱/۶۴ سانتی‌متر، طی ۵ مرحله و هر بار در ۲۵ ضربه به روش استاندارد پروکتور اصلاح شده تحت تراکم قرار گرفته و در دمای ۴۰ درجه در حالت اشباع و در سن‌های ۱۴،۷ و ۲۸ روزه عمل‌آوری گردید. (با توجه به شکل ۴ جهت تامین رطوبت لازم جهت انجام عمل هیدراتاسیون و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز در شرایط محیطی اشباع از رطوبت در گونی کفی مرطوب و پلاستیک در بسته درون گرمخانه قرار داده می‌شوند.) تعداد کل نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش مقاومت فشاری برابر ۱۰۸ نمونه ( $3 \times 3 \times 3 = 27$ ) به ترتیب از

2. SAS (Statistical Analysis System)  
3. LSD (Least Significant Difference)

1. AASHTO T180 - 70 و ASTM D1557 - 70



شکل ۳- مولد، چکش و نمونه متراکم شده



شکل ۲- آماده سازی مخلوط جهت تراکم



شکل ۵- نمونه های شکسته شده بعد از تعیین مقاومت فشاری



شکل ۴- نگهداری نمونه ها در حالت اشباع در ۴۰ درجه

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر عوامل آزمایش بر مقاومت فشاری مخلوط های مختلف خاک-سیمان-میکروسیلیس

منابع تغییرات (Source)	درجه آزادی (DF)	میانگین مربعات (SS)	مجموع مربعات (MS)	F
R (تکرار)	۲	۱۷۹/۱۹۸	۳۵۸/۳۹۷	** ۴۶/۲۴
M (میکروسیلیس)	۲	۱۱۶۹۴/۱۱۹	۲۳۳۸۸/۲۳۸	** ۸۳۹۰/۰۲
R*M (خطای آزمایش ۱)	۴	۱/۱۴۱۸	۴/۵۶۷	۰/۴۶
C (سیمان)	۳	۹۹۳۹/۲۵۶	۲۹۸۱۷/۷۶۸	**۹۲۵۵/۳۶
M*C (میکروسیلیس × سیمان)	۶	۵۴۹/۱۶۹	۳۲۹۵/۰۱۸	**۲۰۰/۴۲
R*M*C (خطای آزمایش ۲)	۱۸	۴/۶۷۶	۸۴/۱۷۷	۰/۹۴
D (عمل آوری)	۲	۳۹۶۸۳/۵۴	۷۹۳۶۷/۰۸۱	**۲۱۶۲۰/۵
M*D (میکروسیلیس × عمل آوری)	۴	۱۰۵۹/۸۸۶	۴۲۳۹/۵۴۵	**۴۳/۲۱
C*D (سیمان × عمل آوری)	۶	۴۶۰/۷۲۴	۲۷۶۴/۳۴۷	**۴۷۱/۴۴
M*C*D (میکروسیلیس × سیمان × عمل آوری)	۱۲	۳۴۴/۵۶۳	۴۱۳۴/۷۵۸	**۷۷/۴۸
EC (خطای آزمایش ۳)	۴۸	۳/۹۱۶۵	۱۸۷/۹۸۹	
G (کل)	۱۰۷		۱۴۷۶۴۱/۸۹۲	

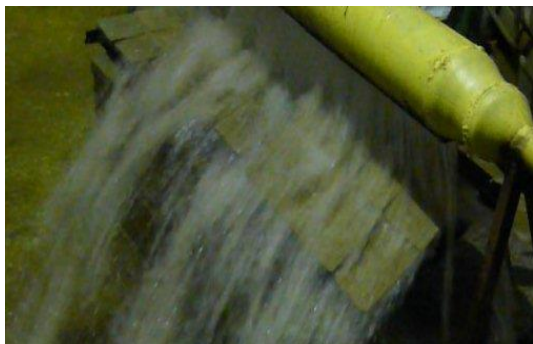
\*\* و \* به ترتیب اختلاف معنی داری در سطح ۱ و ۵ درصد بین تیمارها وجود دارد. ( cv = ۱/۸۸ )

حداقل سرعت ۲ و حداکثر آن به منظور اطمینان و امکانات آزمایشگاهی ۸ متر بر ثانیه منظور گردید. و ۴ زمان فرسایش (T) ۲،۴، ۸،۶، ساعت (بر اساس گزارش مطالعات هیدرولوژی ارائه شده توسط شرکت مهندسی مشاور قطر آب سازه از منطقه مورد مطالعه، زمان تمرکز برای حوزه ۱/۵۶ ساعت محاسبه گردید که در این تحقیق در جهت اطمینان و با توجه به امکانات آزمایشگاهی، زمان آزمایش تا ۸ ساعت ادامه پیدا کرد. و آزمایش مذکور در ۴ بازه زمانی انجام شد.) در کل

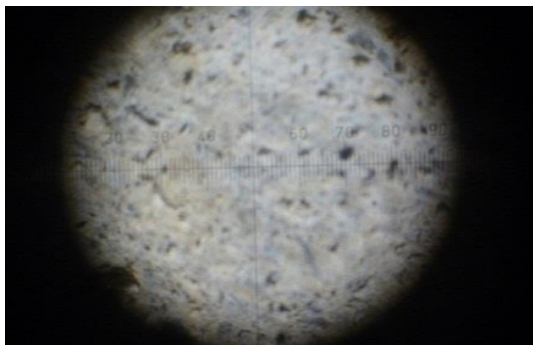
### ج- آزمایش فرسایش پذیری :

این آزمایش نیز به منظور بررسی فرسایش ناشی از برخورد جت آب صفحه ای به نمونه ها بوده که در ۴ زاویه  $\theta$  متفاوت صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق و ۴ سرعت (V) ۰،۴، ۲ و ۶،۴، ۸ متر بر ثانیه ( بر اساس گزارش مطالعات مهندسی رودخانه ارائه شده توسط شرکت مهندسی مشاور قطر آب سازه از منطقه مورد مطالعه، سرعت جریان آب در طغیان رودخانه در حدود ۲-۳ متر بر ثانیه برآورد گردیده است. لذا در این کار تحقیقاتی

نمونه‌ها، جهت جلوگیری از حرکت و پخش شدن جریان در لحظه برخورد، نمونه‌ها با دستگاه برش بتن، در راستای طولی از وسط بریده و موزائیک گردید و سپس با ایجاد سرعت موردنظر در زوایای مختلف، میزان افت وزنی ناشی از فرسایش آبی در ساعات متوالی اندازه‌گیری شد.

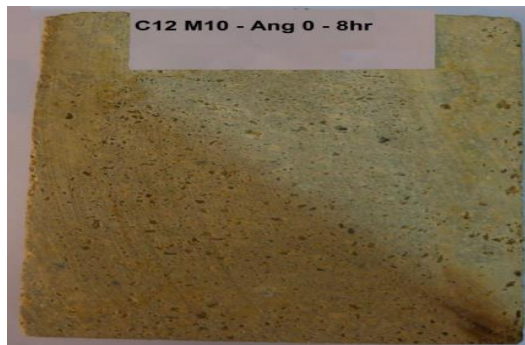
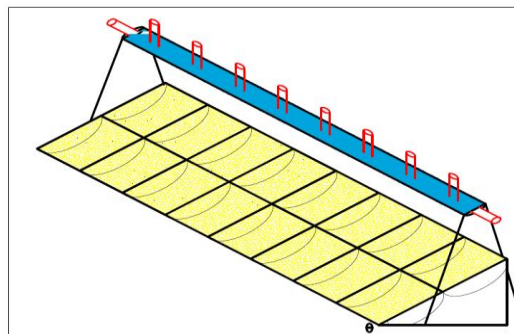


شکل ۶- نمایی از سازه جت آب صفحه‌ای و چیدمان نمونه‌ها در زیر آن



شکل ۸- فرسایش نمونه خاک با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر

در ۶۴ حالت (۴\*۴\*۴) انجام شد. جهت ایجاد جت آب صفحه‌ای، از یک لوله آهنی به عنوان جمع‌کننده به قطر ۵ اینچ با ۱۰ مجرای ورودی با شیر تنظیم دبی استفاده شد. در زیر لوله جمع‌کننده نیز شکافی به ابعاد ۸۰ سانتی‌متر در ۴ میلی‌متر تعبیه گردید. فاصله محل خروج آب با محل برخورد نمونه‌ها برابر ۲۵ سانتی‌متر تنظیم گردید و با توجه به استوانه‌ای بودن



شکل ۷- فرسایش ایجاد شده بر روی نمونه خاک

$$d_w/w_0 = f(\theta, h/h_{max}, V/V_{max}) \quad (\text{رابطه ۳})$$

لذا افت وزنی ناشی از فرسایش جت آب صفحه‌ای تابعی از زاویه قرارگیری نمونه‌ها نسبت به افق ( $\theta$ )، زمان فرسایش ( $h$ ) و سرعت برخورد جت آب به نمونه ( $V$ ) می‌باشد. که در این مقاله ارتباط بین آنها در شکل‌های (۱۳) تا (۲۰) آورده شده‌است.

### نتایج و بحث

با توجه به دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راه‌ها در صورتی که خاک عمل‌آوری شده بعد از ۷ روز در اتاق مرطوب، دارای مقاومت فشاری برابر با ۲۱ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع باشد و علاوه بر آن با گذشت زمان بر مقاومت آن افزوده شود برای تثبیت با سیمان مناسب می‌باشد. لذا در تمامی نمونه‌های ساخته شده (شکل (۹) تا (۱۲)) مقاومت ۷ روزه بیش از ۲۱ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بوده (مقاومت ۷ روزه خاک طبیعی برابر ۷ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌باشد) و با گذشت زمان در ۱۴ و ۲۸ روز نیز بر مقاومت آن افزوده می‌شود لذا طبق آیین‌نامه می‌توان از تمام حالت‌های اختلاط در این

به منظور انجام آنالیز ابعادی، پارامترهای تأثیرگذار بر افت وزنی ( $d_w/w_0$ ) نمونه‌ها شامل: سرعت جریان  $V$ ، زمان فرسایش  $h$ ، جرم مخصوص سیال  $\rho_w$ ، لزجت دینامیکی سیال  $\mu_w$ ، شتاب ثقل  $g$ ، زاویه قرارگیری نمونه‌ها نسبت به افق  $\theta$ ، فاصله جت آب تا نمونه‌ها  $H$  در نظر گرفته شد. رابطه (۱) بین پارامترهای تأثیرگذار به شرح ذیل نوشته می‌شود:

$$f\left(\frac{d_w}{w_0}, V, h, \rho_w, \mu_w, g, \theta, H\right) = 0 \quad (\text{رابطه ۱})$$

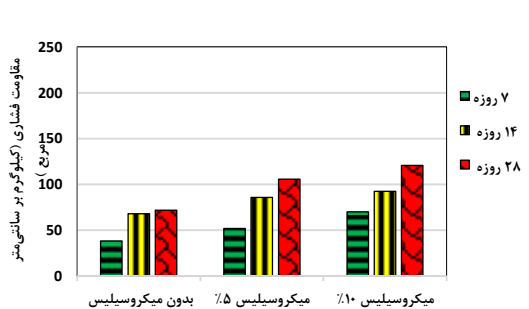
با انتخاب پارامترهای  $V$  و  $H$  و  $\rho_w$  به عنوان پارامترهای تکراری و با استفاده از روش باکینگهام پارامترهای بی‌بعد به صورت رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$d_w/w_0 = f(\theta, h/h_{max}, F_r, Re) \quad (\text{رابطه ۲})$$

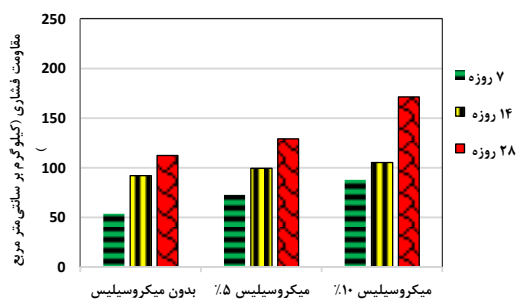
در این آزمایش پارامترهای  $H$ ،  $g$  ثابت می‌باشد لذا عدد فرود  $F_r = V/\sqrt{gH}$  تنها تابع سرعت جریان است. لذا در نمودارها به منظور درک بهتر سرعت جریان از پارامتر  $V/V_{max}$  استفاده گردید. با توجه به انجام آزمایش‌ها در محدوده کاملاً آشفته ( $Re = 3 \times 10^5$ ) از پارامتر رینولدز صرف‌نظر شده و رابطه نهایی (۳) به شرح ذیل ارائه می‌گردد.

دیگر تأثیرگذار بر افزایش مقاومت فشاری، درصد سیمان در ترکیب است، همانطور که پیش‌بینی می‌گردد افزایش درصد سیمان، سبب افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ها می‌شود. ولی نکته حایز اهمیت، رسیدن به مقاومت فشاری مورد نیاز با استفاده از حداقل مصالح افزودنی به خاک می‌باشد. نتایج بررسی مقاومت‌های فشاری در شکل‌های (۹) تا (۱۲) نشان می‌دهد که جهت دستیابی به یک مقاومت فشاری مطلوب، می‌توان با افزودن میکروسیلیس به ترکیب، مقدار سیمان مصرفی را کاهش داده و هزینه‌های طرح را تقلیل داد. به عنوان نمونه می‌توان به برابر بودن مقاومت فشاری ترکیبی با ۵٪ سیمان و ۱۰٪ میکروسیلیس (شکل ۹) نسبت به ترکیبی با ۱۰٪ سیمان و بدون میکروسیلیس (شکل ۱۱) اشاره کرد که در این حالت هزینه ترکیب اول در حدود ۶۰٪ کمتر از ترکیب دوم می‌باشد. لذا با تغییر در نسبت موادافزودنی به خاک محل می‌توان به یک ترکیب مقاوم و با صرفه اقتصادی (به عنوان نمونه می‌توان به برابر بودن مقاومت فشاری ترکیبی با ۵٪ سیمان و ۱۰٪ میکروسیلیس نسبت به ترکیبی با ۱۰٪ سیمان و بدون میکروسیلیس اشاره کرد که در این حالت هزینه ترکیب اول در حدود ۶۰٪ کمتر از ترکیب دوم می‌باشد. چون در ترکیب اول با کاهش ۵٪ سیمان و افزودن ۱۰٪ میکروسیلیس، هزینه ملات با کاهش مقدار سیمان در حدود ۶۰٪ صرفه جویی را به همراه دارد این در حالی است که مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش نیافته است) دست پیدا کرد.

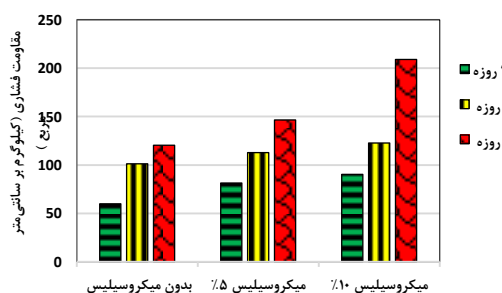
تحقیق استفاده کرد. از طرفی افزودن میکروسیلیس سبب افزایش مقاومت فشاری تمام نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد (بدون میکروسیلیس) شده است. با توجه به وابستگی میکروسیلیس به سیمان جهت واکنش‌های شیمیایی (میکروسیلیس ابتدا با سیمان وارد واکنش شده و تولید هیدرات سیلیکات کلسیم می‌کند، معادلات در بالا ذکر شده است، در مراحل ترکیب مواد برای ساخت نمونه‌ها نیز، میکروسیلیس ابتدا با سیمان خوب ترکیب شده و سپس با خاک خشک محل مخلوط می‌گردد) در صورت پایین بودن مقدار سیمان در مخلوط، واکنش‌های بین این دو مواد بصورت کامل انجام نشده و نقش میکروسیلیس در ترکیب تأثیرگذار نمی‌باشد. لذا به علت پایین بودن مقدار سیمان در ترکیب‌هایی با ۵ درصد سیمان، تأثیر میکروسیلیس بر افزایش مقاومت فشاری ناچیز می‌باشد. ولی در نمونه‌های بعدی با افزایش درصد سیمان، میکروسیلیس تأثیر بهتری بر افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها داشته است. البته این روند تأثیر میکروسیلیس نسبت به سیمان مصرفی تا حدود سیمان ۱۰ درصد چشمگیر است و بعد از آن نیز با افزایش مقدار سیمان، شیب منحنی افزایش مقاومت فشاری، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر سیر رشد مقاومت فشاری با افزایش سیمان از ۱۰٪ به بالا کاهش می‌یابد که علت آن واکنش‌های شیمیایی انجام شده بین سیمان و میکروسیلیس و تأثیر آن بر مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌باشد. لذا بهترین حالت موازنه برای نسبت سیمان و میکروسیلیس در این نمونه خاک در سیمان ۱۰ درصد با میکروسیلیس ۱۰ درصد حاصل می‌گردد. پارامتر



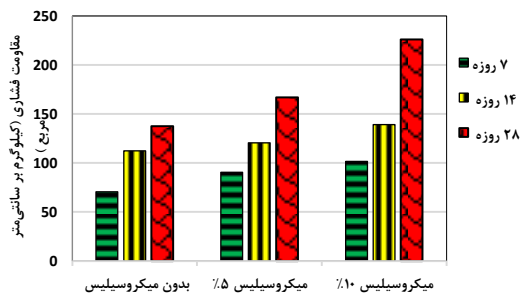
شکل ۱۰- مقاومت فشاری نمونه‌ها در ۸٪ سیمان



شکل ۹- مقاومت فشاری نمونه‌ها در ۵٪ سیمان



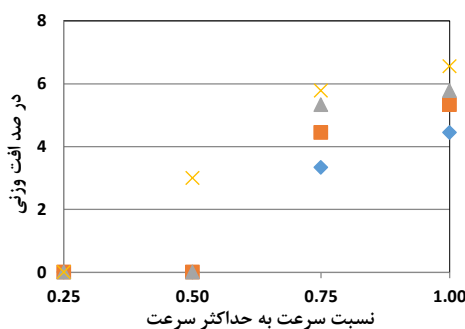
شکل ۱۲- مقاومت فشاری نمونه‌ها در ۱۲٪ سیمان



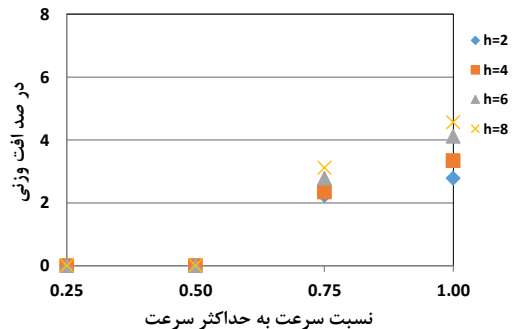
شکل ۱۱- مقاومت فشاری نمونه‌ها در ۱۰٪ سیمان

کمتز شده است، تأثیر جریان بر فرسایش نمونه کمتر و میزان افت وزنی آن نیز نسبت به حالت قبل ( $\Theta = 0$ ) کاهش می‌یابد. در شکل (۱۶) راستای جریان بر سطح نمونه مماس می‌باشد و کمترین ضربه به نمونه‌ها وارد می‌شود لذا مقاومت نمونه‌ها نسبت به جت آب بیشتر شده و تا سرعت ۶ متر بر ثانیه ( $V/V_{max} = 0.75$ ) هیچگونه فرسایشی در سطح نمونه مشاهده نگردید. (در زاویه ۹۰ درجه نسبت به افق، جریان ناشی از جت بر روی سطح نمونه‌ها مماس می‌باشد لذا کمترین فشار و ضربه از طرف جت آب به نمونه‌ها وارد می‌شود لذا قدرت فرسایش آب در این حالت پایین می‌باشد. در حالی که در زاویه ۶۰ درجه قرارگیری نمونه‌ها نسبت به افق، جت آب با زاویه ۳۰ درجه به نمونه‌ها برخورد می‌کند و قدرت فرسایش در این حالت بیشتر از حالت قبل است که جریان بصورت مماس به نمونه‌ها برخورد می‌کند) و بعد از آن با افزایش سرعت، فرسایش در سطح نمونه شروع شده و با گذشت زمان بر مقدار آن افزوده می‌گردد. لذا در حالت کلی هرچه نمونه‌ها دارای زاویه بیشتری نسبت به افق باشند تأثیر جت آب بر فرسایش کمتر و افت وزنی نیز به تبع آن کاهش می‌یابد.

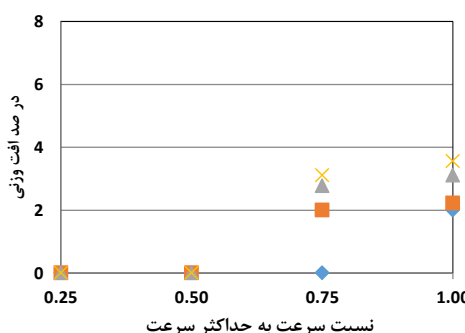
شکل‌های (۱۳) تا (۱۶) درصد افت وزنی نمونه‌های خاک را تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت نشان می‌دهد. در شکل (۱۳) در اثر برخورد عمودی ( $\Theta = 0$ ) جت آب به سطح نمونه‌ها، تا سرعت ۴ متر بر ثانیه و زمان ۶ ساعت، نمونه‌ها به فرسایش مقاوم بوده و با افزایش سرعت و زمان، فرسایش در نمونه‌ها آغاز می‌گردد. شیب منحنی در حفاصل ۴ تا ۶ متر بر ثانیه ( $V/V_{max} = 0.5 - 0.75$ ) حداکثر بوده، که علت آن انحلال ذرات گچ آزاد در سطح نمونه در اثر برخورد جت آب می‌باشد و بعد از آن با پرشدن حفره‌های ایجاد شده از آب ناشی از جت، تا حدودی از قدرت فرسایشی آب کاسته شده و شیب منحنی (نماینگر افت وزنی) ملایم‌تر می‌گردد. با توجه به شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نیز نمونه‌ها تا سرعت ۴ متر بر ثانیه، نسبت به فرسایش مقاوم بوده و با افزایش سرعت، فرسایش در نمونه شروع می‌گردد. (البته در شکل ۱۵ - نمونه‌هایی که در زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق قرار گرفته‌اند تا سرعت ۶ متر بر ثانیه در ساعات اولیه آزمایش (۲ ساعت) نیز در مقابل فرسایش مقاوم می‌باشند) در این حالت نیز روند سیر نمودار معرف افت وزنی نمونه‌ها تقریباً همانند حالت قبل است. ولی با توجه به اینکه زاویه قرارگیری نمونه‌ها نسبت به افق بیشتر و تبع آن نسبت به راستای جریان



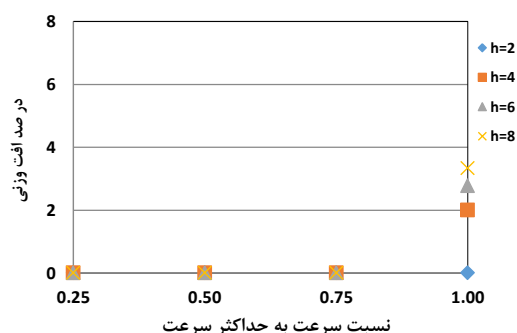
شکل ۱۴- درصد افت وزنی نمونه‌ها در ۱۰٪ سیمان،  $\Theta = 30^\circ$



شکل ۱۳- درصد افت وزنی نمونه‌ها در ۱۰٪ سیمان،  $\Theta = 0^\circ$



شکل ۱۶- درصد افت وزنی نمونه‌ها در ۱۰٪ سیمان،  $\Theta = 90^\circ$



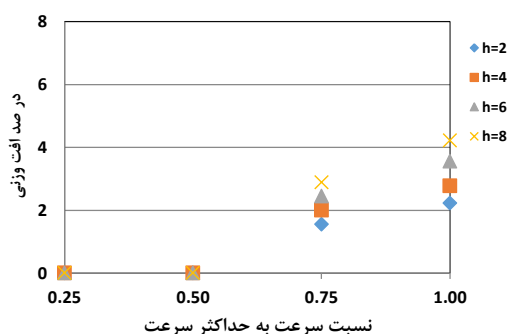
شکل ۱۵- درصد افت وزنی نمونه‌ها در ۱۰٪ سیمان،  $\Theta = 60^\circ$

برخورد جت آب بصورت عمودی (نسبت به افق  $\Theta = 0$ ) نمونه‌ها، تا سرعت ۴ متر بر ثانیه، نسبت به فرسایش مقاوم بوده و با افزایش سرعت جریان، آثار فرسایش و انحلال در سطح نمونه

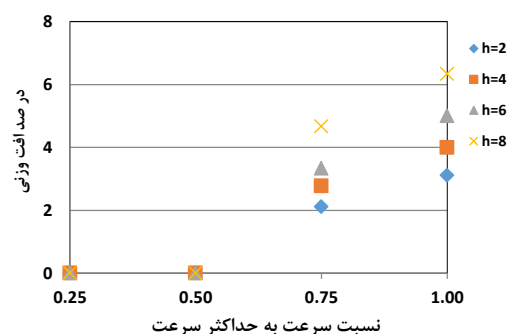
در شکل‌های (۱۷) تا (۲۰)، درصد افت وزنی نمونه‌ها نسبت به پارامتر بدون بعد سرعت در سیمان ۱۲٪ تحت شرایط هیدرولیکی متفاوت نشان داده می‌شود. در شکل (۱۷) در اثر

فرسایشی بر روی نمونه مشاهده نمی گردد. و انحلال در قسمت هایی از نمونه مشاهده می گردد که ذرات گچ بصورت آزاد وجود داشته باشند به عبارت دیگر اگر مخلوط کردن مواد بخوبی انجام گردد به گونه ای که ذرات گچ بین ذرات سیمان و میکروسیلیس محبوس گردند، احتمال انحلال در نمونهها به شدت کاهش می یابد. البته تثبیت خاک به این روش در محلهایی که سرعت آب بسیار بالا می باشد مانند شوت ها جایز نمی باشد. ولی در محلهایی که هدف کنترل فرسایش بوده و سرعت در محدوده مورد بررسی باشد این روش تثبیت خاک توصیه می شود) و بعد از آن با افزایش سرعت و زمان، فرسایش در سطح نمونه آغاز می گردد. در این نمونهها نیز در حالت کلی، تأثیر پارامترهای سرعت، زمان و زاویه قرارگیری نمونهها مشهود می باشد و هرچه نمونهها دارای زاویه بیشتری نسبت به افق باشند تأثیر جت آب بر فرسایش کمتر و افت وزنی نیز به تبع آن کاهش می یابد. لذا در حالت کلی می توان گفت هر چند با افزایش سیمان تا ۱۲٪ مقاومت فشاری در نمونهها افزایش و فرسایش در آنها کاهش می یابد و این حالت از بابت فنی و مهندسی شرایط بهتری را ایجاد می کند. ولی با توجه به سرعت و زمان فرسایش در منطقه مورد مطالعه و با هدف کاهش هزینه های اجرا با حداقل مواد افزودنی (سیمان و میکروسیلیس)، ترکیبی با ۱۰٪ سیمان و ۱۰٪ میکروسیلیس را می توان به عنوان ترکیب مناسب برای این منطقه پیشنهاد داد هر چند که ترکیبی با ۱۲٪ سیمان نیز مناسب بوده ولی هزینه اجرا با افزایش سیمان بیشتر از ترکیب اول است.

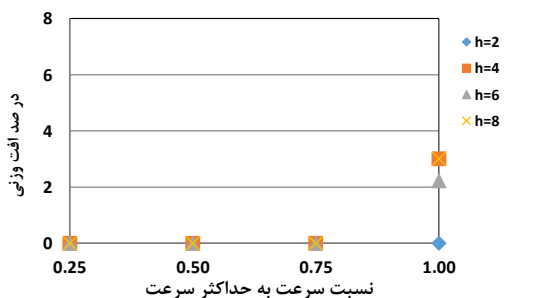
ظاهر و با گذشت زمان بر میزان آن افزوده گردید. با بررسی دقیق تر حفره های ایجاد شده در سطح نمونه (شکل ۸) مشخص گردید که اولین محل های فرسایش یافته بر روی سطح نمونه مناطقی می باشند که بر روی آنها گچ آزاد قرار دارد و در اثر برخورد جت آب، گچ انحلال یافته و با گذشت زمان حفره ایجاد شده است و این روند تا زمانی که گچ درون حفره به اتمام برسد ادامه دارد و با اتمام مقدار گچ، فرسایش نیز در حفره کاهش یافته و در بعضی مواقع متوقف می گردد. و سپس با پرشدن حفره ها از آب ناشی از جت، تاحدی از قدرت فرسایشی آب کاسته شده و شیب منحنی (نماینگر افت وزنی) ملایم تر می گردد. و زمانی حفره ایجاد شده توسعه می یابد و فرسایش در آن بیشتر می گردد که سرعت جریان افزایش یابد. در شکل (۱۸) و (۱۹) نمونهها تا سرعت ۴ متر بر ثانیه، به فرسایش مقاوم بوده و با افزایش سرعت، فرسایش در نمونه شروع می گردد. (البته در شکل (۱۹) نمونههایی که در زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق قرار گرفته اند شروع فرسایش در سرعت ۶ متر بر ثانیه، ۲ ساعت بعد از شروع آزمایش می باشد). شکل (۲۰) تأثیر برخورد جت آب به نمونهها را در حالتی که راستای جریان بر سطح نمونه مماس می باشد را نشان می دهد. در این حالت جریان، کمترین ضربه را به نمونهها وارد می نماید لذا تا سرعت ۶ متر بر ثانیه ( $V/V_{max}=0.75$ ) هیچگونه فرسایشی در سطح نمونه مشاهده نمی شود. فرسایش ایجاد شده بر روی نمونهها وابسته به سرعت و زمان فرسایش می باشد و تا زمانی که مقاومت نمونهها بر توان فرسایشی جت آب برتری داشته باشد،



شکل ۱۸- درصد افت وزنی نمونهها در ۳۰٪ سیمان،  $\Theta=30^\circ$



شکل ۱۷- درصد افت وزنی نمونهها در ۱۲٪ سیمان،  $\Theta=0^\circ$



شکل ۲۰- درصد افت وزنی نمونهها در ۱۲٪ سیمان،  $\Theta=90^\circ$



شکل ۱۹- درصد افت وزنی نمونهها در ۱۲٪ سیمان،  $\Theta=60^\circ$



### نتیجه گیری کلی

با توجه به نتایج حاصل از اندازه گیری مقاومت فشاری در نمونه‌ها، می‌توان گفت با در نظر داشتن تأثیر توأم افزودن سیمان و میکروسیلیس به نمونه‌ها، روند افزایش مقاومت فشاری تا سیمان ۱۰٪ و میکروسیلیس ۱۰٪ در تمام نمونه‌ها چشمگیر بوده و با افزایش مقدار سیمان به ۱۲٪، مقاومت فشاری نسبت به حالت قبل رشد کمتری داشته است. لذا می‌توان گفت از نظر فنی و اقتصادی ترکیبی با سیمان ۱۰٪ و میکروسیلیس ۱۰٪ مطلوب می‌باشد. و افزودن سیمان بیش از این مقدار شاید بتواند سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه گردد ولی هزینه طرح را بالا می‌برد.

در خصوص مقاومت فرسایشی در حالت کلی می‌توان گفت در مناطقی از محدوده مورد مطالعه که زاویه برخورد جریان به سازه بصورت عمود ( $\Theta=0$ ) و حداکثر سرعت جریان ۴ متر بر ثانیه باشد، اگر در تثبیت خاک محل از ترکیب ۱۰٪ میکروسیلیس و ۱۰٪ سیمان استفاده گردد، سازه تا زمان ۶ ساعت و در صورتی که جهت تثبیت این خاک، میزان سیمان به ۱۲٪ افزایش یابد، سازه تا زمان ۸ ساعت نسبت به فرسایش از خود مقاومت نشان می‌دهد. و در مناطقی که زاویه برخورد جریان به سازه بصورت مماس ( $\Theta=90$ ) و حداکثر سرعت جریان ۶ متر بر ثانیه باشد هر دو ترکیب با ۱۰٪ و ۱۲٪ سیمان و ۱۰٪ میکروسیلیس تا زمان ۸ ساعت نسبت به فرسایش از خود مقاومت نشان می‌دهند. لذا می‌توان جهت تثبیت مجاری انتقال آب منطقه مورد مطالعه، با افزودن ۱۰٪ سیمان و ۱۰٪ میکروسیلیس به خاک محل، ترکیب مناسبی را از بابت فنی و اقتصادی پیشنهاد نمود.

بصورت کلی در حالتی که زاویه برخورد جت آب به نمونه‌ها بصورت عمودی ( $\Theta=0$ ) و سرعت جریان ۴ متر بر ثانیه باشد (شکل (۱۳) و (۱۷)) در نمونه‌هایی با ۱۰٪ سیمان، تا ۶ ساعت بعد از شروع آزمایش و در نمونه‌هایی با ۱۲٪ سیمان، در کل مدت آزمایش، نمونه‌ها نسبت به فرسایش مقاوم می‌باشند. در حالتی که زاویه قرارگیری نمونه‌ها نسبت به افق برابر  $\Theta=30$  (شکل (۱۴) و (۱۸)) باشد برخورد جت آب به نمونه‌ها بصورت مایل بوده و فرسایش در سطح نمونه نسبت به حالت قبل کمتر می‌باشد. و روند تغییرات منحنی فرسایش در هر دو نمونه با درصدهای مختلف سیمان تقریباً یکسان است. در حالتی که زاویه قرارگیری نمونه‌ها نسبت به افق برابر  $\Theta=60$  (شکل ۱۵ و ۱۹) باشد برخورد جت آب به نمونه‌ها نسبت به حالت قبل مایل‌تر بوده و در سرعت ۶ متر بر ثانیه برای نمونه‌هایی با ۱۰٪ سیمان، تا زمان ۴ ساعت و برای نمونه‌هایی با ۱۲٪ سیمان، تا زمان ۲ ساعت، نسبت به فرسایش مقاوم می‌باشند و بعد از آن با افزایش زمان آزمایش، ذرات نمونه شروع به حرکت کرده و فرسایش شروع می‌گردد. در حالتی که زاویه قرارگیری نمونه‌ها نسبت به افق برابر  $\Theta=90$  (شکل ۱۶ و ۲۰) باشد برخورد جت آب به نمونه‌ها بصورت مماس می‌باشد. در نمونه‌هایی با ۱۰٪ و ۱۲٪ سیمان روند تغییرات منحنی معرف فرسایش در نمونه‌ها تقریباً یکنواخت بوده و تا سرعت ۶ متر بر ثانیه، نمونه‌ها نسبت به فرسایش مقاوم بوده و با افزایش سرعت تا ۸ متر بر ثانیه و زمان ۲ ساعت، ذرات شروع به حرکت کرده و آثار فرسایش در سطح نمونه مشخص می‌گردد.

### REFERENCES

- Ashour, T., Korjenic, A. and Korjenic, S. (2015a). Equilibrium moisture content of earth bricks bio composites stabilized with cement and gypsum. *Original Research Article Cement and Concrete Composites*. Volume 59. Pages 18-25.
- Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S. and Wu, W. (2015b). Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Original Research Article Energy and Buildings*. Volume 104. Pages 139-146.
- Bachar, M., Azzouz, L., Rabehi, M. and Mezghiche, B. (2015). Characterization of a stabilized earth concrete and the effect of incorporation of aggregates of cork on its thermo-mechanical properties. Experimental study and modeling. *Original Research Article construction and building Materials* 74. pages 259-267.
- Fares, Y.A. (2007). Soil-cement protect Upstream Embankment of reservoir against Erosive wave Action. *Government Engineering*. www.govengr.com. pages 52-54
- Instruction Manual for Stabilization and Construction of Embankment Subgrade and Pavement Layers with Stabilized Mixture. Retrieved Aug 23, 2016, from <http://www.omransoft.ir>. Issue 268.
- Ghoarabsazeh Engineers Co. (2009). Department of Natural Resources and Watershed Management of Khuzestan State. Detailed studies on the implementation of sustainable management of natural resources and watershed management Valley Anari Baghmalek Basin. (In Farsi)
- Gupta, D. and Kumar, A. (2015). Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures. *Geotextiles and Geomembranes In Press*. Geotextile and Geomembranes 44(3).
- Hou, D. Wei. and Wu, H.N. (2015). Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene

fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay. *Original Research Article Geotextiles and Geomembranes*. 43(6), pages 515-523.

Kurihara, J., Takezawa, N. Terada, H. and Matsui, M. (2006). Circumstances in the utilization of the soil Cement in Sabo Works in japan. Disaster Mitigation of Debris Flows. Slops Failures and Landslides. *By Universal Academy Press. Tokyo japan*. pp 787-795.

Raftari, M., Safuan, A., Kassim, K. and Moayedi, h. (2014). Evaluation of kaolin slurry properties treated with cement. *International measurement confederation; Institute of measurement and control, Elsevier*. Volume 50. Pages 222-228.

Rahimi, H. Kheir andish, KH. (1996). Stability of soil-

cement coatings (blanket and block) the waves and rainfall education and the promotion of agricultural. *research agency Research Journal of Agricultural Engineering*. Issue 28, pp. 1 and 2. (In Farsi).

Rodrigues, L.P. and Nilsson, F. (2015). Recycling of Water Treatment Plant Waste for Production of Soil-Cement Bricks. *Original Research Article Procedia Materials Science*. Volume 8. Pages 197-202.

Roshandel, B. (2000). Evaluation of different methods for soil stabilization and road pavement aggregate. *Journal of Geotechnical and Materials Resistance*. 83 (In Farsi).

Tabatabai, A. (2001). road pavement Publishing Center of Tehran University. Ninth printing. (In Farsi)