تأثیر حضور سدیم بنتونیت و تغییرات نسبت آب به سیمان بر کارایی ملات تزریق تراکمی

وحیدرضا اوحدی [*۱]، علیرضا کاتبی [۲]، سیدحسین زمانی [۳]، امیررضا حاجمرادی [۴]، یزدان سوری [۵]، هانیه حجازی‌فر [۶]

۱- عضو هیئت علمی گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا و عضو هیئت علمی وابسته دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲، ۳، ۴- دانشجوی کارشناسی‌ارشد عمران، مؤسسه آموزش عالی عمران و توسعه

۵- کارشناس عمران، مؤسسه آموزش عالی عمران و توسعه

۶- کارشناس‌ارشد عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

خلاصه

ملات تزریق تراکمی را به دلیل اسلامپ کمتر از ۵۰ میلی‌متر، نمی‌توان ملاتی با کارایی مناسب دانست. از سوی دیگر نیز با پیشرفت فرآیند گیرش در این ملات، از مقدار کارایی در طول زمان کاسته می‌شود. از این رو عملیات اجرایی در این روش با مخاطراتی همراه است؛ بنابراین، توجه به افزایش کارایی در ملات تزریق تراکمی ضروری است. افزایش مقدار آب به منظور افزایش کارایی، باعث ایجاد مشکلاتی از جمله کاهش پایداری ملات تزریق تراکمی در داخل زمین می‌شود. سدیم بنتونیت به دلیل افزایش انسجام در این نوع ملات، می‌تواند در بهبود برخی از خواص فیزیکی آن مؤثر باشد. از این رو هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر حضور سدیم بنتونیت بر کارایی ملات تزریق تراکمی است. برای این منظور از ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سدیم بنتونیت نسبت به وزن کل ملات و نسبت‌های آب به سیمان ۰/۸، ۱ و ۱/۲ در ملات ماسه_سیمان استفاده شده‌است. همچنین به منظور ارزیابی کارایی ملات تزریق تراکمی در طول زمان گیرش، یک مجموعه آزمایش‌های سوزن ویکات و اسلامپ انجام شده‌است. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش هم‌زمان درصد رس و نسبت آب به سیمان، کارایی ملات تزریق تراکمی در برخی از نمونه‌ها بهبود یافته‌است. به طوری که در نسبت آب به سیمان ۱ و حضور ۲ درصد سدیم بنتونیت و همچنین در نسبت آب به سیمان ۱/۲ و حضور ۵ درصد سدیم بنتونیت، علاوه بر آن‌که زمان گیرش به ترتیب نسبت به نمونه‌ی شاهد ۲۶ و ۵۳ درصد افزایش داشته‌است؛ عدد اسلامپ مطلوب نیز در این نمونه‌ها حاصل شده‌است. از سوی دیگر حضور مقادیر ۱۰ و ۱۵ درصد سدیم بنتونیت در ملات تزریق تراکمی نیز به دلیل کاهش زمان گیرش و مقدار کارایی توصیه نمی‌شود.

کلمات کلیدی: تزریق تراکمی، سدیم بنتونیت، نسبت آب به سیمان، کارایی، زمان گیرش.

۱. مقدمه

برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ روش تزریق تراکمی به‌عنوان روشی برای بهبود رفتار خاک در برابر مشکلات ناشی از عدم تراکم آن ارائه شده است [1]. این روش در متراکم کردن ماسه‌های سست، اصلاح نشست نامتقارن سازه‌ها و جلوگیری از تشکیل فروچاله‌ها کاربرد دارد [2]. در این روش یک ملات با کارایی کم و یک نرخ پمپاژ آهسته و کنترل شده

[*]**Email: vahidouhadi@yahoo.ca and vahidouhadi@ut.ac.ir**

به داخل زمین تزریق می‌شود. توسعه‌ی توده‌های کروی شکل ملات تزریق تراکمی در زمین، ذرات خاک را به اطراف حرکت داده و آن را متراکم می‌کند [1,3].

مواد تشکیل‌دهنده‌ی ملات تزریق تراکمی شامل ماسه‌ی سیلتی، سیمان و آب است [4]. این مواد در کنار یکدیگر باید به نحوی ترکیب شوند که ملات تزریق تراکمی، توانایی متراکم نمودن خاک و انجام عملیات تزریق را داشته باشد. برای این منظور، ۳ شرط توسط کمیته‌ی تزریق انجمن مهندسین عمران آمریکا (ASCE, 2010) ارائه شده است. ۱- ملات باید به‌عنوان یک توده در داخل زمین باقی بماند ۲- کارایی ملات باید به نحوی باشد که توانایی پمپاژ به داخل زمین را داشته باشد ۳- ملات باید فاقد پدیده‌ی روزدگی آب باشد. به منظور برآورده شدن شرط اول و توانایی ملات برای جابه‌جایی ذرات خاک، پیشنهادات مختلفی توسط محققین مطرح شده است [5,6]. در این بین معیار تعیین عدد اسلامپ دارای اهمیت است. به این ترتیب که اسلامپ ملات تزریق شده به داخل زمین برای متراکم نمودن خاک نباید بیشتر از ۵۰ میلی‌متر باشد [7].

آزمایش اسلامپ یکی از رایج‌ترین معیارهای مورد استفاده برای تعیین کارایی است [8]. در این آزمایش مقدار آب به میزان مستقیم و بیشتری نسبت به سایر اجزای مخلوط بر روی کارایی اثر می‌گذارد [9]. از آنجا که در ملات تزریق تراکمی عدد اسلامپ باید کمتر از ۵۰ میلی‌متر باشد؛ به‌طورکلی ملات تزریق تراکمی را نمی‌توان ملاتی با کارایی مناسب دانست. زمانی که ملات یا بتن دارای کارایی مناسبی نیست، افزایش مقدار آب رایج است [8]. از سوی دیگر افزایش میزان آب در طرح اختلاط، می‌تواند سبب افزایش هزینه و کاهش دوام و پایداری در بتن شود [10]. همچنین با افزایش مقدار آب، ملات دیگر نمی‌تواند به‌عنوان یک توده در زمین باقی بماند. از این رو ضروری است تا ضمن افزایش کارایی ملات تزریق تراکمی در طول عملیات مهندسی، توجه ویژه‌ای نیز به حفظ انسجام، پایداری و عدد اسلامپ مورد نظر ملات در هنگام تزریق شود.

همان‌طور که اشاره شد؛ یکی از اجزای تشکیل‌دهنده‌ی ملات تزریق تراکمی سیمان است. در هنگام تماس ذرات سیمان با آب، سیمان با گذشت زمان دچار گیرش می‌شود. گیرش یک اصطلاح است که برای توصیف سخت شدن خمیر سیمان، ملات یا بتن در طول زمان مورد استفاده قرار می‌گیرد [11]. عوامل متعددی بر وقوع زمان گیرش مؤثر است. ازجمله‌ی این عوامل می‌توان به ترکیبات شیمیایی سیمان، نوع و درصد افزودنی، دما و نسبت آب به سیمان اشاره کرد [12]. زمان گیرش می‌تواند کارایی ملات را برای انجام عملیات اجرایی به خطر اندازد [13]. به این صورت که با آغاز زمان گیرش و سفت شدن خمیر سیمان، کارایی در طول این مدت کاهش می‌یابد. میزان وقوع گیرش و در نتیجه کاهش کارایی، به مقدار واکنش‌های هیدراسیون سیمان وابسته است [11]. به این ترتیب که با کند شدن فرآیند هیدراسیون و در نتیجه افزایش زمان گیرش ملات تزریق تراکمی، کارایی بیشتر شده و در نتیجه سهولت در طول اجرای عملیات تزریق رخ می‌دهد. عواملی مانند افزایش نسبت آب به سیمان به علت افزایش فاصله‌ی دسترسی ذرات، باعث افزایش زمان گیرش می‌شوند [14]. از سوی دیگر افزایش آب در ملات، پدیده‌ی روزدگی آب را افزایش می‌دهد [15]. اصولاً پدیده‌ی روزدگی آب در ملات تزریق تراکمی توصیه نمی‌شود. از این رو ضروری است تا ضمن ممانعت از وقوع پدیده روزدگی در ملات، توجه ویژه‌ای به افزایش زمان گیرش و در نتیجه افزایش کارایی ملات تزریق تراکمی در طول عملیات مهندسی شود.

در حال حاضر استفاده از افزودنی‌های شیمیایی برای بهبود خواص فیزیکی بتن توصیه می‌شود [16]. با این حال برخی از محققین استفاده از بعضی افزودنی‌های شیمیایی مانند رس با دامنه‌ی خمیری زیاد (به عنوان مثال سدیم بنتونیت) را در ملات تزریق تراکمی پیشنهاد نمی‌کنند [17,18]. از این رو استفاده‌ی بیش از ۱/۵ درصد بنتونیت در ملات تزریق تراکمی مناسب به نظر نمی‌رسد [4]. با این حال حضور این نوع از رس در ۵ تا ۱۰ درصد، می‌تواند در سهولت پمپاژ ملات با اسلامپ کم به داخل زمین مؤثر باشد [19].

خصوصیات رفتاری و مشخصات مهندسی خاک‌های رسی ازجمله پارامترهای میزان تورم و درصد جذب آب، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای متأثر از نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خاک و خصوصیات سیال حفره‌ای است. به دلیل وجود

پیوندهای ضعیف واندروالسی در کانی‌های مونت‌موریلونیت و زیاد بودن سطح مخصوص آن، این کانی دارای جذب آب بیشتری نسبت به سایر کانی‌ها است. از سوی دیگر به منظور درک چگونگی بافت‌های تشکیل‌دهنده‌ی رس‌ها، می‌بایست به طور فزآینده‌ای به اجزای بنیادی آن یعنی دانه‌ها، ذرات و نوع و غلظت کاتیون‌های لایه‌ی دوگانه‌ی آن‌ها توجه نمود [20]. لایه‌ی دوگانه‌ی رسی به پولک رسی و تجمع کاتیون‌های تبادلی اطراف آن اطلاق می‌شود. کاتیون‌های تبادلی مختلف شامل Na^{+}، Ca^{2+}، K^{+} و Mg^{2+} است. حضور کاتیون سدیم در لایه‌ی دوگانه‌ی کانی مونت‌موریلونیت نسبت به سایر کاتیون‌ها، باعث می‌شود تا رس دارای کارایی کمتری باشد [21]. حضور رس در ملات باعث کاهش پدیده‌ی روزدگی آب می‌شود و همچنین به دلیل افزایش انسجام ملات و نقش پرکنندگی حفرات، دارای نقش مهمی در عملیات تزریق ملات است [15]. با توجه به مطالعات اندک صورت گرفته در خصوص بررسی تأثیر رفتار کانی رسی در بهبود مشخصات ملات تزریق تراکمی، ضروری است تا برای درک بهتر رفتار این ملات، فرآیند اندرکنش پولک‌های رسی کانی مونت‌موریلونیت و سیمان، با دقت بیشتری بررسی شود.

همان‌طور که اشاره شد کانی رسی مونت‌موریلونیت، دارای کارایی کمتر و جذب آب زیادی نسبت به سایر کانی‌ها است. همچنین با توجه به اهمیت کارایی و افزایش زمان گیرش در پروژه‌های تزریق تراکمی، ضروری است تا توجه ویژه‌ای به افزایش نسبت آب به سیمان شود. از سوی دیگر مطالعات اندکی در خصوص تغییرات کارایی ملات تزریق تراکمی توسط کانی رسی مونت‌موریلونیت صورت گرفته است. از این رو هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر حضور سدیم بنتونیت بر کارایی ملات تزریق تراکمی است.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. سیمان مصرفی در ملات تزریق تراکمی

سیمان مصرف شده در ملات تزریق تراکمی از شرکت سیمان هگمتان تهیه شده و از نوع تیپ ۲ است. همچنین عیار سیمان استفاده‌شده در این پژوهش مطابق با توصیه‌ی ارائه شده در پژوهش نیکولز و گودینز در سال ۲۰۰۰ [19]، ۲۰ درصد وزن کل ملات انتخاب شده است.

۲. ۲. کانی رسی مورد استفاده در ملات تزریق تراکمی

خاک مورد استفاده در ملات تزریق تراکمی از نوع بنتونیت بوده که بخش زیادی از کانی‌های این خاک را کانی مونت‌موریلونیت تشکیل داده است. بنتونیت مصرفی از شرکت باریت فلات ایران تهیه شده است. خصوصیات خمیری بنتونیت مصرفی در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

اگرچه حضور سدیم بنتونیت در ملات تزریق تراکمی به ۱/۵ درصد محدود شده است اما در برخی پژوهش‌ها حضور این نوع از رس تا ۱۰ درصد در ملات نیز باعث بهبود خصوصیات تزریقی آن شده است [19]. بنابراین با توجه به مطالعات اندک صورت گرفته در خصوص تأثیر درصدهای متفاوت سدیم بنتونیت بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات تزریق تراکمی، در این پژوهش از مقادیر ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سدیم بنتونیت نسبت به وزن ملات استفاده شده است.

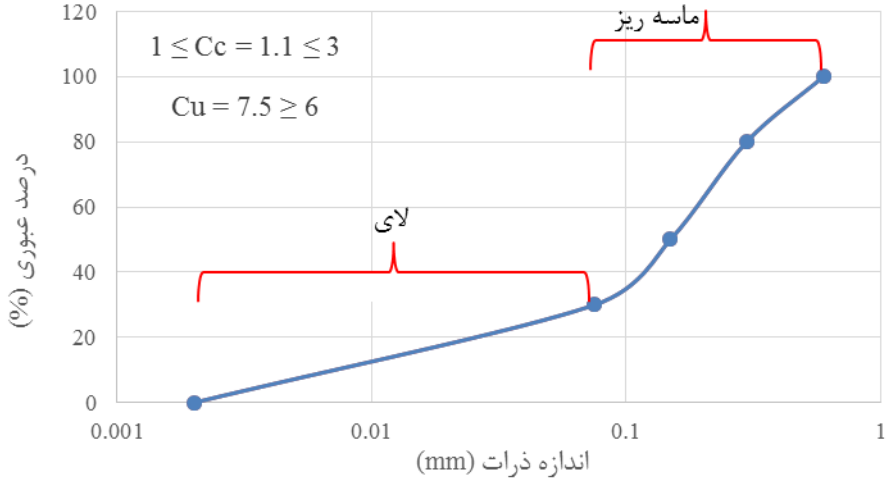
جدول ۱- خصوصیات خمیری بنتونیت استفاده‌شده در ملات تزریق تراکمی

خاصیت خمیری	مقدار (درصد)
حد خمیری	۵۰
حد روانی	۳۰۰
دامنه‌ی خمیری	۲۵۰

۲. ۳. ماسه‌ی مصرفی در ملات تزریق تراکمی

ماسه‌ی استفاده شده در ملات تزریق تراکمی از نوع ماسه‌ی استاندارد بوده است. دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده در این پژوهش نیز بر اساس تحقیق نیکولز و گودینز در خصوص تزریق تراکمی انتخاب شده‌است [19].

در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی مصرفی در ملات تزریق تراکمی ارائه شده‌است. با توجه به اعداد C_c (ضریب خمیدگی) و C_u (ضریب‌یکنواختی)، می‌توان دریافت که دانه‌بندی ماسه، از نوع خوب دانه‌بندی بوده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه استفاده‌شده در ملات تزریق تراکمی

۲. ۴. مقدار آب مصرفی در ملات تزریق تراکمی

آب مورد استفاده در این پژوهش از نوع آب مقطر بوده است. در این تحقیق آزمایشگاهی مقدار آب موجود در ملات بر اساس نسبت آب به سیمان تعریف شده است. در برخی از تحقیقات گذشته محدوده‌ی نسبت آب به سیمان برای ملات سیمان حاوی رس، از ۰/۶ تا ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود [15]. همچنین به دلیل وجود عدد اسلامپ کمتر از ۵۰ میلی‌متر در ملات تزریق تراکمی، ضروری است تا در این روش از نسبت‌های آب به سیمان کم استفاده شود [4]. بنابراین در این پژوهش با توجه به اهمیت استفاده از نسبت‌های آب به سیمان کم و از سوی دیگر استفاده از سدیم بنتونیت با خواص خمیری زیاد در ملات تزریق تراکمی و همچنین اهمیت افزایش کارایی و زمان گیرش در این ملات، از نسبت‌های آب به سیمان ۰/۸، ۱ و ۱/۲ به منظور تعیین نقش افزایش آب در تغییرات رفتاری ملات تزریق تراکمی استفاده شده است.

۲. ۵. روش اختلاط مواد استفاده شده در ملات تزریق تراکمی

به‌منظور انجام هر گونه آزمایش در ارتباط با ملات، ضروری است تا ملات مورد استفاده به طور کامل مخلوط و همگن شده باشد. برای دست‌یابی به این منظور با توجه به استاندارد (ASTM C305-14)، در ابتدا آب در داخل ظرف مخلوط‌کن ریخته شده است. با اضافه شدن سیمان به آب، کرونومتر روشن شده و دستگاه به مدت ۳۰ ثانیه و با دور کند، آب و سیمان را با یکدیگر مخلوط می‌کند. پس از آن‌که سطح دسترسی ذرات سیمان به آب به طور کامل انجام و دوغاب همگنی از سیمان حاصل شد؛ به مدت ۳۰ ثانیه و به‌تدریج، مخلوط ماسه و سدیم بنتونیت به دوغاب سیمان اضافه می‌شود. سپس به مدت ۳۰ ثانیه دستگاه با دور تند، مواد ملات را با یکدیگر مخلوط می‌کند. سپس همزن برقی خاموش و به ملات اجازه استراحت به مدت ۹۰ ثانیه داده شده است. در ادامه همزن برقی روشن شده و به مدت ۶۰ ثانیه و با دور تند، شروع به هم‌زدن ملات می‌کند. پس از پایان این مدت، اگر مواد تشکیل‌دهنده‌ی ملات با یکدیگر به‌طور کامل مخلوط شده باشند؛ ملات مورد نظر برای شروع آزمایش آماده است. در غیر این صورت باید عملیات اختلاط تا ایجاد یک ملات به طور کامل همگن ادامه پیدا کند.

۲. ۶. آزمایش سوزن ویکات

از لحظه‌ی اختلاط آب با سیمان تا زمانی که سوزن و میله‌ی ۳۰۰ گرمی به میزان مشخصی (۱۰ میلی‌متر) به داخل ملات ماسه_سیمان نفوذ کند را زمان گیرش می‌نامند. برخی از محققین به منظور ارزیابی مدت زمانی که در آن ملات یا بتن می‌توانند کارایی لازم برای انجام عملیات مهندسی را داشته باشند، از آزمایش سوزن ویکات استفاده کرده‌اند. روند انجام آزمایش گیرش مطابق با استاندارد (ASTM C807-13) صورت گرفته است. در ابتدا ملات تازه در داخل قالب دستگاه سوزن ویکات که بر روی یک شیشه قرار دارد، ریخته می‌شود. سپس قالب به مدت ۳۰ دقیقه در محیط مرطوب (دستگاه ژرمیناتور) قرار می‌گیرد. پس از سپری شدن زمان مورد نظر، قالب از داخل دستگاه ژرمیناتور خارج و در محل مخصوص خود در دستگاه سوزن ویکات قرار داده می‌شود. سپس سوزن موجود در این دستگاه آزاد و مقدار نفوذ آن در ملات پس از ۳۰ ثانیه قرائت می‌شود. به همین ترتیب در فواصل زمانی مشخص این قرائت‌ها انجام می‌شود تا درنهایت سوزن به اندازه‌ی ۱۰ میلی‌متر در ملات نفوذ کند. در این هنگام زمان ثبت شده در کرنومتر، به‌عنوان زمان گیرش ثبت می‌شود. لازم است دقت شود که همیشه سوزن به طور دقیق به مقدار ۱۰ میلی‌متر به داخل ملات نفوذ نمی‌کند و ممکن است گاهی این مقدار کمتر از ۱۰ میلی‌متر شده باشد. در این صورت می‌توان با استفاده از معادله‌ی موجود در استاندارد ذکر شده، زمان گیرش را محاسبه کرد.

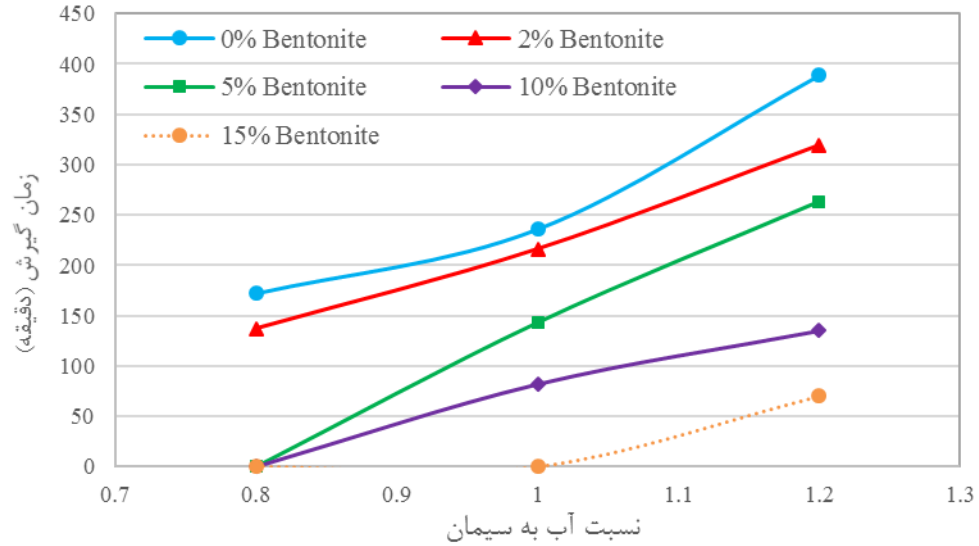
۲. ۷. آزمایش اسلامپ

عدد اسلامپ و کارایی بر اساس مقدار ریزش ملات قرار داده شده در مخروط ناقص اسلامپ به دست می‌آید. برخی از محققین به منظور ارزیابی کارایی و همچنین تشخیص عدد اسلامپ ملات تزریق شده به داخل زمین در عملیات تزریق تراکمی، از آزمایش اسلامپ استفاده کرده‌اند. روند آزمایش اسلامپ مطابق با استاندارد (ASTM C143-15) صورت می‌گیرد. در ابتدا ملات تازه در سه لایه، داخل مخروط ناقص اسلامپ قرار داده می‌شود. هر لایه به‌وسیله‌ی کوبه‌ی استوانه‌ای فلزی با ابعاد مشخص (طول ۴۰ سانتی متر و قطر ۱/۵ سانتی متر) و با ۲۵ ضربه مورد تراکم قرار می‌گیرد. پس از اطمینان از صاف شدن سطح ملات، مخروط ناقص به آرامی از جای خود برداشته می‌شود. در نهایت پس از آن‌که ملات به طور کامل دچار نشست شد، میزان افت آن به‌وسیله‌ی خط‌کش اندازه‌گیری و عدد به دست آمده به‌عنوان عدد اسلامپ گزارش می‌شود. سپس مراحل فوق در هر ۲۰ دقیقه به‌طور مجدد مورد تکرار قرار گرفته است. منظور از این کار بررسی

کارایی ملات در طول مدت زمان گیرش بوده است. به این صورت که پس از گذشت زمانی که در آن عدد اسلامپ ملات به کمتر از ۵۰ میلی‌متر رسیده باشد، می‌توان ملات را به داخل زمین تزریق نمود. در این مدت می‌توان مراحل ساخت، انتقال و آماده‌سازی ملات برای تزریق را مد نظر قرار داد. همچنین اولین آزمایش اسلامپ نیز پس از ۲۰ دقیقه از آغاز اختلاط مواد صورت گرفته است. این زمان صرف آماده سازی ملات و انجام روند آزمایش اسلامپ شده است.

۳. بحث و بررسی

به منظور ارزیابی تأثیر حضور بنتونیت بر کارایی ملات تزریق تراکمی یک مجموعه آزمایش گیرش ملات در نسبت‌های آب به سیمان مختلف و درصدهای مختلف بنتونیت انجام شد. نتایج این آزمایشات در شکل ۲ مشاهده می‌شود. در این مجموعه آزمایشات سوزن ویکات از ۳ نسبت آب به سیمان ۰/۸، ۱ و ۱/۲ استفاده شده است.



شکل ۲- زمان گیرش ملات بر حسب نسبت آب به سیمان در درصدهای مختلف سدیم بنتونیت

با بررسی این نمودارها می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش نسبت آب به سیمان در تمامی درصدهای سدیم بنتونیت، زمان گیرش افزایش یافته است. در نمونه‌های فاقد بنتونیت این امر می‌تواند به دلیل افزایش آب آزاد ملات در بین ذرات سیمان و تأثیر آن در کاهش تشکیل ژل توبرموریت و همچنین کاهش اصطکاک بین دانه‌ها ناشی از افزایش مقدار آب باشد. مطالعات دیگر محققین در خصوص زمان گیرش ملات سیمان در حضور انواع و درصدهای مختلف رس نیز بیانگر این موضوع است [25,26].

از سوی دیگر، تغییرات شیب در هر نمودار می‌تواند شاخصی برای بیان میزان حساسیت زمان گیرش به افزایش نسبت آب به سیمان باشد. به این ترتیب که هر مقدار میزان شیب نمودار در شکل ۲ بیشتر باشد، حاکی از آن است که نتایج آزمایشات به تغییرات نسبت آب به سیمان حساس‌تر بوده و تغییرات نسبت آب به سیمان، زمان گیرش را با نرخ بیشتری افزایش داده است. از این رو به منظور سنجش میزان حساسیت زمان گیرش به مقادیر نسبت آب به سیمان در حضور درصدهای مختلف سدیم بنتونیت، تغییرات شیب در هر یک از نمودارها مورد توجه قرار گرفته است. در هر نمودار با درصد یکسان بنتونیت، ملاک سنجش این تغییرات مقایسه‌ی شیب خط بین دو نسبت آب به سیمان ۰/۸ و ۱ (بخش اول شیب نمودار) با شیب همان خط در بین دو نسبت آب به سیمان ۱ و ۱/۲ (بخش دوم شیب نمودار) مبنای قضاوت قرار گرفته است. به این صورت که در هر نمودار با درصد یکسان بنتونیت، اگر شیب بخش اول کوچک‌تر از شیب بخش دوم

باشد، تقعر منحنی رو به بالا بوده و آزمایش گیرش نسبت به افزایش مقدار آب به سیمان از حساسیت بیشتری برخوردار بوده‌است. در نمونه‌های ملاتی که در آن سدیم بنتونیت حضور ندارد، تقعر نمودار رو به بالا است. به این معنی که با افزایش نسبت آب به سیمان، شیب نمودار در بخش اول و دوم به ترتیب از ۳۲ درصد به ۷۶ درصد افزایش یافته است. با حضور سدیم بنتونیت در درصدهای ۲ و ۵، از تقعر نمودار کاسته شده و منحنی به طور تقریبی شکل خط به خود گرفته است. از این رو در این درصدها با افزایش نسبت آب به سیمان، شیب نمودار در بخش اول و دوم تغییر خاصی را از خود نشان نداده است. در حضور ۱۰ درصد سدیم بنتونیت، تقعر نمودار رو به پایین است. به این صورت که با افزایش نسبت آب به سیمان، در هر مرحله از شیب نمودار کاسته شده است. به نحوی که در حضور ۱۰ درصد سدیم بنتونیت در ملات، شیب نمودار در بخش اول و بخش دوم به ترتیب از ۴۱ درصد به ۲۶ درصد کاهش یافته است. در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش درصد سدیم بنتونیت در ملات، از تأثیر نسبت آب به سیمان بر افزایش زمان گیرش کاسته شده است.

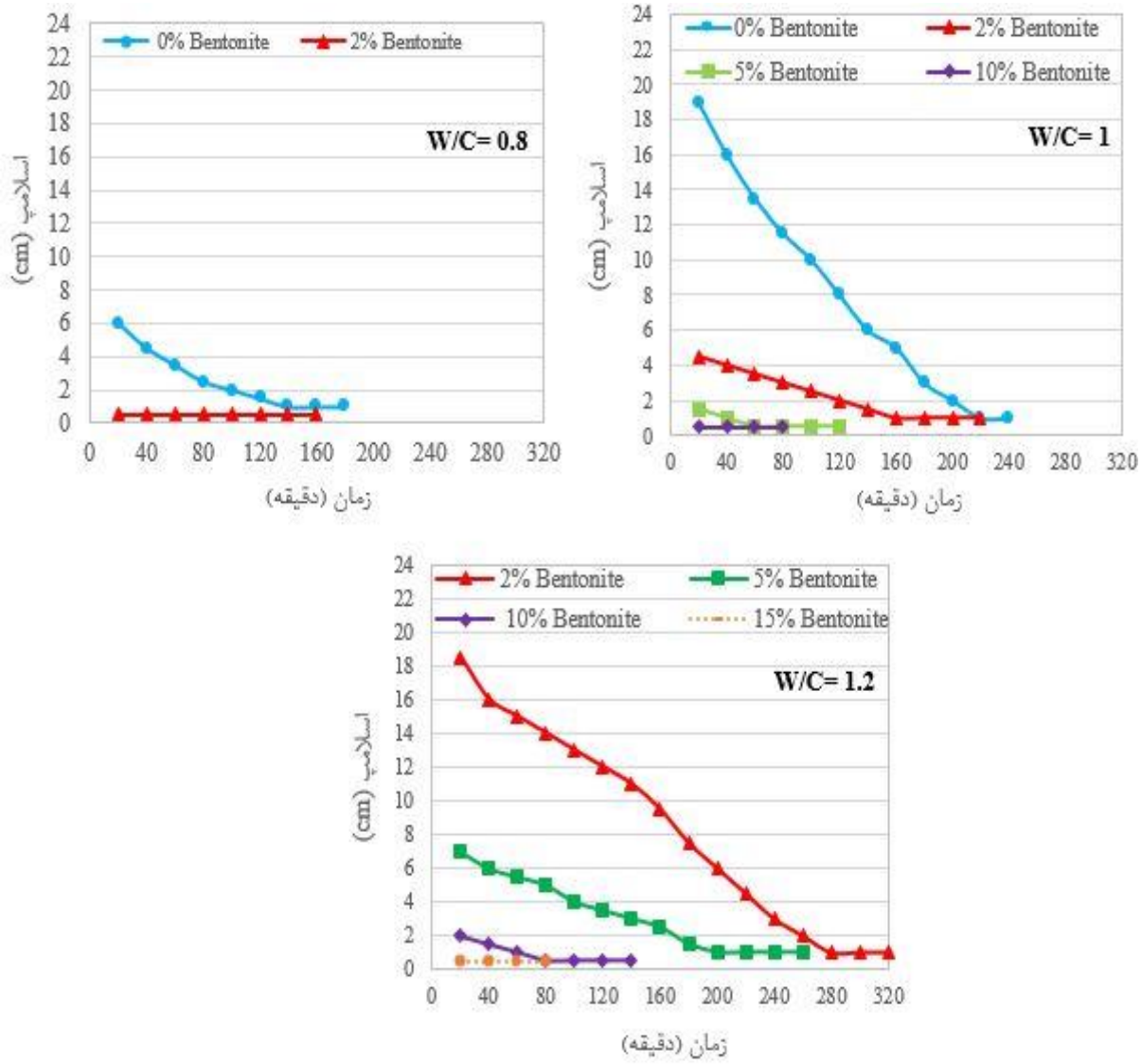
همچنین با دقت در نمودارهای شکل ۲ می‌توان دریافت که زمان گیرش در برخی از نقاط، وجود نداشته است. به بیان دیگر در نسبت آب به سیمان ۰/۸ و حضور ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سدیم بنتونیت و همچنین در نسبت آب به سیمان ۱ و حضور ۱۵ درصد سدیم بنتونیت، به علت جذب آب توسط درصدهای زیاد سدیم بنتونیت به عنوان یک رس با خواص خمیری زیاد، ملات همگنی تشکیل نشده است. از این رو به دلیل کمبود آب لازم در ملات، امکان بررسی گیرش ملات در این نقاط وجود نداشته است.

از سوی دیگر با توجه به نمودارهای شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که حضور سدیم بنتونیت با درصدهای مختلف در ملات تزریق تراکمی، زمان گیرش را در تمامی نسبت‌های آب به سیمان کاهش داده است. دلیل این موضوع می‌تواند حل شدن بنیان‌های سیلیسی و آلومیناتی رس در مقدار pH بزرگ سیمان (pH=۱۲/۴) باشد. به این صورت که در شرایط قلیایی فوق، بخشی از بنیان‌های سیلیس و آلومینای رس حل شده و یون‌های سیلیس و آلومینیوم آزاد شده از رس در واکنش‌های پوزولانی شرکت کرده و باعث افزایش تشکیل ژل‌های CSH و CAH می‌شوند [27]. در یک نسبت آب به سیمان ثابت، با توجه به کاهش ۷۰ تا ۱۰۰ درصدی زمان گیرش در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد سدیم بنتونیت نسبت به نمونه‌ی فاقد سدیم بنتونیت، حضور این مقادیر از رس سبب کاهش مقدار قابل توجهی از زمان گیرش ملات شده است. از این رو به نظر می‌رسد که با کاهش زمان گیرش، کارایی ملات کاهش یابد و انجام عملیات تزریق تراکمی با مشکلات اجرایی مواجه شود.

از سوی دیگر زمان گیرش ملات ماسه_سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۸ (نمونه‌ی شاهد)، برابر با ۱۷۲ دقیقه است. با افزایش نسبت آب به سیمان و درصدهای سدیم بنتونیت، در بعضی از نمونه‌ها زمان گیرش نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. با حضور ۲ درصد سدیم بنتونیت در دو نسبت آب به سیمان ۱ و ۱/۲ به ترتیب زمان گیرش ۲۶ و ۸۵ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. همچنین در نسبت آب به سیمان ۱/۲ و حضور ۵ درصد سدیم بنتونیت نیز افزایش ۵۳ درصدی در زمان گیرش نسبت به نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود. از این رو به‌نظر می‌رسد که حضور سدیم بنتونیت در درصدهای فوق و همچنین افزایش نسبت آب به سیمان، می‌توانند تأثیر مثبتی بر افزایش زمان لازم برای انجام مراحل اجرایی در عملیات تزریق تراکمی داشته باشند.

پس از حصول زمان گیرش بزرگ‌تر در ملات نسبت به نمونه‌ی شاهد، لازم است تا کارایی آن‌ها به‌منظور باقی ماندن ملات به عنوان یک توده‌ی در حال گسترش در داخل زمین نیز مورد مطالعه قرار گیرد. از این رو از آزمایش اسلامپ به منظور ارزیابی کارایی و همچنین تشخیص عدد اسلامپ ملات تزریق شده به داخل زمین در عملیات تزریق تراکمی استفاده شده است. در ابتدای ساخت، بعضی از ملات‌های دارای نسبت آب به سیمان بزرگ‌تر، دارای اسلامپ بزرگ‌تر از ۵۰ میلی‌متر بوده‌اند. از این رو برای حاصل شدن عدد اسلامپی که در آن، ملات توانایی لازم برای متراکم نمودن خاک را داشته باشد، ضروری است تا از این آزمایش در طول زمان استفاده شود. به این ترتیب زمانی که از ابتدای ساخت ملات تا رسیدن عدد اسلامپ آن به زیر ۵۰ میلی‌متر سپری می‌شود را می‌توان زمان مناسبی برای سهولت انجام کار در طول مراحل اجرایی

دانست. اسلامپ هر ملات تا زمان وقوع گیرش در آن، مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج آن برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۸، ۱ و ۱/۲ در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- اسلامپ نمونه‌های ملات با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و در حضور درصدهای مختلف سدیم بنتونیت در طول زمان گیرش

در شکل ۳ اسلامپ برخی از نمونه‌ها گزارش نشده است. به عنوان مثال در نسبت آب به سیمان ۰/۸، با افزایش مقدار سدیم بنتونیت از ۵ تا ۱۵ درصد، آب لازم برای انجام واکنش‌های ملات توسط این رس جذب شده است. از این رو در این نسبت‌ها ملات همگنی تشکیل نشده است و در نتیجه عدد اسلامپ برای این نمونه‌ها قابل گزارش نبوده است. در نسبت آب به سیمان ۱/۲ نیز به دلیل زیاد بودن آب آزاد موجود در ملات، نمونه‌ی فاقد حضور سدیم بنتونیت تبدیل به دوغاب شده است. بنابراین عدد اسلامپ آن قابل‌اندازه‌گیری نبوده و نمودار آن گزارش نشده است. بر اساس نتایج شکل ۳

در نسبت آب به سیمان ۰/۸، اسلامپ اولیه‌ی ملاتی که در آن سدیم بنتونیت حضور ندارد، برابر با ۶۰ میلی‌متر بوده است. پس از ۴۰ دقیقه مقدار اسلامپ به عدد ۴۵ میلی‌متر کاهش یافته و آماده‌ی تزریق شده است. با افزایش ۲ درصد سدیم بنتونیت به ملات، مقدار اولیه‌ی اسلامپ ۹۲ درصد کاهش یافته و به مقدار مناسب (عدد ۵ میلی‌متر) رسیده است. به همین ترتیب در نسبت آب به سیمان ۱ نیز با حضور ۲ درصد سدیم بنتونیت در ملات، مقدار اولیه‌ی اسلامپ با کاهش ۷۶ درصدی مواجه شده است. با توجه به آن‌که مقدار آب آزاد موجود در ملات، نقش مهمی را در مقدار کارایی ایفا می‌کند؛ جذب آب قابل توجه ۲ درصد سدیم بنتونیت، باعث کاهش در مقدار کارایی شده است. در سایر نمونه‌ها نیز با افزایش میزان سدیم بنتونیت در یک نسبت آب به سیمان ثابت، مقدار کارایی ملات کاهش یافته است.

از سوی دیگر نتایج ارائه شده در شکل ۳ نشان می‌دهد که در طول زمان، عدد اسلامپ نمونه‌های ملات به دلیل پیشرفت واکنش‌های هیدراسیون و وقوع گیرش در ملات، کاهش یافته و پس از مدت زمان معینی مقدار آن ثابت شده است. در نمونه‌های ملاتی که به علت حضور زیاد درصد سدیم بنتونیت و یا میزان آب کم برای هیدراسیون بنتونیت کارایی کافی نداشته‌اند، مقدار عدد اسلامپ در طی زمان ثابت بوده و قابلیت بروز رفتار کاهشی از خود را نداشته و شیب آن برابر صفر شده است. از این رو در نمونه‌های مختلف، روند تغییرات شیب متفاوت بوده است. به بیان دیگر، این تغییرات می‌تواند نشان‌دهنده تفاوت رفتاری در ملات‌های حاوی درصدهای مختلف سدیم بنتونیت باشد. به این صورت که در طول زمان و با وقوع گیرش، هر مقدار شیب نمودارها به یکدیگر نزدیک باشد؛ مقدار کارایی نمونه‌ها نیز به یکدیگر نزدیک‌تر شده است. در نتیجه با بررسی افزایش یا کاهش شباهت در اندرکنش‌های شیمیایی در ملات‌های مختلف، می‌توان به یک ارتباط منطقی مابین حساسیت آزمایش اسلامپ و درصدهای رس رسید. در این راستا به منظور امکان مقایسه بهتر رفتار ملات‌های مختلف، مقدار شیب نمودارها برای نسبت‌های آب به سیمان ۱ و ۱/۲ محاسبه شده است. برای نسبت آب به سیمان ۱ مقدار شیب برای هر یک از ملات‌های حاوی ۰، ۲، ۵ و ۱۰ درصد سدیم بنتونیت به ترتیب برابر با ۸، ۲، ۰/۹ و ۰ درصد بوده است. برای نسبت آب به سیمان ۱/۲ نیز شیب هر یک از ملات‌های حاوی ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد سدیم بنتونیت به ترتیب برابر با ۶، ۳، ۱ و ۰ محاسبه شده است. با دقت در این اعداد می‌توان دریافت که با افزایش درصد سدیم بنتونیت، مقادیر شیب کاهش یافته و به یکدیگر نزدیک شده است. همچنین در حضور ۱۰ درصد سدیم بنتونیت در ملات نیز با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار شیب به علت جذب آب قابل توجه این مقدار از رس تنها یک درصد افزایش داشته است. از این رو می‌توان نتیجه‌گیری نمود که با افزایش مقادیر سدیم بنتونیت از حساسیت آزمایش اسلامپ نسبت به افزایش این رس و همچنین از حساسیت نتایج به افزایش نسبت آب به سیمان کاسته شده است. از این رو در درصدهای زیاد سدیم بنتونیت، افزایش نسبت آب به سیمان قادر به افزایش قابل توجه میزان کارایی نبوده است. در آزمایش گیرش نیز با افزایش درصد رس، از اثر افزایش آب به سیمان در افزایش زمان گیرش کاسته شده بود. بنابراین به نظر می‌رسد که حضور درصدهای زیاد سدیم بنتونیت (۱۰ و ۱۵ درصد) در ملات تزریق تراکمی، کارایی آن را با مخاطراتی مواجه خواهد کرد. از این رو به نظر می‌رسد استفاده از درصد رس ۱۰ و ۱۵ درصد در ملات تزریق تراکمی توصیه نمی‌شود.

از طرف دیگر با توجه به تأثیر توأم مقدار سدیم بنتونیت و نسبت آب به سیمان در گیرش و کارائی ملات تزریق تراکمی، از نمودارهای فوق امکان انتخاب درصد سدیم بنتونیت بهینه به ازای هر نسبت آب به سیمان با حصول زمان گیرش و کارادی مناسب فراهم می‌شود. به عنوان مثال در نسبت آب به سیمان ۱، حضور ۲ درصد سدیم بنتونیت علاوه بر تأثیر اندک بر کاهش زمان گیرش (۹درصد) نسبت به ملات فاقد رس، باعث شده است تا اسلامپ مورد نیاز برای تزریق ملات در ابتدای ساخت تأمین شود. به‌علاوه مقدار اسلامپ پس از ۱۶۰ دقیقه به حداقل مقدار خود رسیده و ثابت شده است. همچنین در این ملات، زمان گیرش نسبت به نمونه‌ی شاهد ۲۶ درصد رشد داشته است. همچنین در نسبت آب به سیمان ۱/۲ و با حضور ۵ درصد سدیم بنتونیت در ملات نیز مقدار اولیه‌ی اسلامپ نیز برابر با ۷۰ میلی‌متر بوده است. در این ملات مقدار مطلوب اسلامپ برای آغاز عملیات تزریق، پس از ۸۰ دقیقه حاصل شده است. این زمان بیانگر فرصت مناسبی برای اعمال صلاح‌دیدهای اجرایی است. همچنین در این ملات زمان گیرش برابر با ۲۶۳ دقیقه بوده است که این

مقدار، نسبت به زمان گیرش نمونه‌ی شاهد، ۵۳ درصد رشد داشته است. از این رو این دو ملات در تزریق تراکمی عملکرد مناسبی را از منظر کارایی از خود نشان داده‌اند. از مقایسه نمودارهای بدست آمده به نظر می‌رسد که استفاده از ملات با نسبت آب به سیمان ۱ و حضور ۲ درصد سدیم بنتونیت به دلیل استفاده کمتر از منابع آب مناسب‌تر باشد.

۴. نتیجه‌گیری

۱- حضور سدیم بنتونیت در ملات تزریق تراکمی سبب کاهش زمان گیرش، کاهش اسلامپ و تغییر میزان کارایی ملات می‌شود. نرخ این تغییرات در ملات تزریق تراکمی تابعی از نسبت آب به سیمان است، ضمن آنکه با افزایش درصد سدیم بنتونیت در ملات، از تأثیر نسبت آب به سیمان بر افزایش زمان گیرش کاسته شده است.

۲- در نسبت آب به سیمان ۰/۸، حضور سدیم بنتونیت در ملات تزریق تراکمی توصیه نمی‌شود؛ زیرا سدیم بنتونیت علاوه بر کاهش زمان گیرش، کاهش کارایی را نیز به میزان ۹۲ درصد به دنبال داشته است.

۳- در نسبت آب به سیمان ۱ و افزودن ۲ درصد سدیم بنتونیت به ملات زمان گیرش ۲۱۶ دقیقه بوده که مقدار آن ۲۶ درصد نسبت به زمان گیرش نمونه‌ی شاهد (۱۷۲ دقیقه) بیشتر بوده است. از سوی دیگر در این نمونه، در ابتدای ساخت، اسلامپ مناسبی برای تزریق ملات به داخل زمین مشاهده شده است. از این رو استفاده از این نسبت‌ها در ملات تزریق تراکمی، باعث بهبود رفتار آن از منظر افزایش کارایی شده است.

۴- در نسبت آب به سیمان ۱/۲ و حضور ۵ درصد سدیم بنتونیت در ملات، زمان گیرش ۲۶۳ دقیقه بوده که مقدار آن ۵۳ درصد نسبت به زمان گیرش نمونه‌ی شاهد (۱۷۲ دقیقه) بیشتر بوده است. از سوی دیگر در این نمونه، عدد اولیه‌ی اسلامپ برابر با ۷۰ میلی‌متر بوده و پس از ۸۰ دقیقه به حالت مطلوب برای تزریق ملات به داخل زمین رسیده است. از این رو استفاده از نسبت آب به سیمان ۱/۲ و حضور ۵ درصد سدیم بنتونیت در ملات تزریق تراکمی، باعث بهبود خصوصیات کارایی این ملات شده است.

۵- با افزودن مقادیر سدیم بنتونیت به ملات تزریق تراکمی، از حساسیت آزمایش‌های گیرش و اسلامپ نسبت به افزایش مقدار آب کاسته شده است. از این رو استفاده از مقادیر ۱۰ و ۱۵ درصد سدیم بنتونیت در ملات، نه‌تنها باعث کاهش زمان گیرش شده است بلکه افزایش مقدار آب نیز نمی‌تواند تأثیر زیادی بر افزایش کارایی ملات داشته باشد.

۵. مراجع

1. Graf, E. D. (1969). Compaction grouting technique and observations. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 95(5), 1151-1158.
2. Tuncdemir, F. (2007). Theoretical and practical aspects of compaction grouting. Teknik Dergi, 18(1), 4069-4080.
3. Griffin, (1998). Grouting Rehabilitation Without Disruption of Plant Operations, Proceedings, Underground Technology Conference, Houston TX.
4. ASCE Consensus Guide Committee. (2010). Compaction Grouting Consensus Guide. ASCE/GI, 53-10.
5. Warner, J., Schmidt, N., Reed, J., Shepardson, D., Lamb, R., & Wong, S. (1992, February). Recent advances in compaction grouting technology. In Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics (pp. 252-264). ASCE.

6. Bruce, D. A., & Grouting Committee of the Geo-Institute. (2005). Glossary of grouting terminology. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 131(12), 1534-1542.
7. Szynakiewicz, T. (2016) Compaction Grouting for Ground Improvement and Structure Rehabilitation. In Rocky Mountain Geo-Conference (pp. 23-31).
8. Cook, M. D., Ley, M. T., & Ghaeezadah, A. (2014). A workability test for slip formed concrete pavements. Construction and Building Materials, 68, 376-383.
9. Burgos-Montes, O., Alonso, M. M., & Puertas, F. (2013). Viscosity and water demand of limestone-and fly ash-blended cement pastes in the presence of superplasticisers. Construction and Building Materials, 48, 417-423.
10. Taylor, P. C., Kosmatka, S. H., & Voigt, G. F. (2006). Integrated materials and construction practices for concrete pavement: A state-of-the-practice manual (No. FHWA HIF-07-004).
11. Zhang, M. H., Sisomphon, K., Ng, T. S., & Sun, D. J. (2010). Effect of superplasticizers on workability retention and initial setting time of cement pastes. Construction and Building Materials, 24(9), 1700-1707.
12. Kruml, F. (1990). Setting process of concrete. Properties of fresh concrete. H.-J. Wierig HJ.
13. Yaphary, Y. L., Yu, Z., Lam, R. H., & Lau, D. (2017). Effect of triethanolamine on cement hydration toward initial setting time. Construction and Building Materials, 141, 94-103.
14. Bentz, D. P. (2007). Cement hydration: building bridges and dams at the microstructure level. Materials and Structures, 40(4), 397-404.
15. Zhang, C., Yang, J., Ou, X., Fu, J., Xie, Y., & Liang, X. (2018). Clay dosage and water/cement ratio of clay-cement grout for optimal engineering performance. Applied Clay Science, 163, 312-318.
16. Chun, B. W., Dair, B., Macuch, P. J., Wiebe, D., Porteneuve, C., & Jeknavorian, A. (2006). The development of cement and concrete additive. In Twenty-Seventh Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals (pp. 645-658). Humana Press.
17. Brown, D. R., & Warner, J. (1973). Compaction grouting. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 99 (Proc Paper).
18. Graf, E. D. (1992). Compaction grout, 1992. In Grouting, soil improvement and geosynthetics (pp. 275-287). ASCE.
19. Nichol, S. C., & Goodings, D. J. (2000). Physical model testing of compaction grouting in cohesionless soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(9), 848-852.
20. Ouhadi, V. R., Amiri, M., & Goodarzi, A. R. (2012). The special potential of nano-clays for heavy metal contaminant retention in geo-environmental projects. Civil Engineering Infrastructures Journal, 45(6), 631-642.
21. Murray, H. H. (1991). Overview—clay mineral applications. Applied Clay Science, 5(5-6), 379-395.

22. ASTM. (2014). ASTM C305-14: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.
23. ASTM. (2013). ASTM C807-13: Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle.
24. ASTM. (2015). ASTM C143-15: Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete.
25. Huang, W. H. (1997). Properties of cement-fly ash grout admixed with bentonite, silica fume, or organic fiber. Cement and Concrete Research, 27(3), 395-406.
26. Vipulanandan, C., & Sunder, S. (2012). Effects of meta-kaolin clay on the working and strength properties of cement grouts. In Grouting and Deep Mixing 2012 (pp. 1739-1747).
27. Ouhadi, V. R., Yong, R. N., Amiri, M., & Ouhadi, M. H. (2014). Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays. Applied Clay Science, 95, 111-118.