بهینه سازی طرح اختلاط دوغاب سیمانی بر پایه مطالعات آزمایشگاهی (مطالعه موردی تزریق آب‌بند تونل کرج-تهران)

حسین مهدوی نژاد (مسئول مکاتبات)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

احمد رمضان زاده، استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

سید محمد اسماعیل جلالی، دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

E-mail:hossein_mahdavinejad@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۲/۰۱/۲۰ پذیرش:۱۳۹۲/۰۸/۱۲

چکیده

هر چند امروزه به منظور بهبود ویژگی‌های دوغاب، تنوع گسترده‌ای از مصالح مختلف بکار می‌رود، اما ارایه طرح اختلاط مناسب دوغاب به علت نبود پایه‌های نظری، معمولاً براساس تجربه صورت می‌گیرد. هدف از این تحقیق انجام مطالعات آزمایشگاهی و انتخاب دوغاب (با نگاهی ویژه به تزریق آب‌بند) در آزمایشگاه است. ابتدا دستورالعملی برای دستیابی به طرح اختلاط دوغاب در آزمایشگاه ارایه شده است. با استفاده از دوغاب تزریق، آب‌بند تونل انتقال آب کرج تهران طراحی شده و نتایج به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایجی که با استفاده از دوغاب‌های ساخته شده با سیمان پرتلند تیپ ۲ به دست آمده نشان می‌دهند که برای کسب قابلیت نفوذ دوغاب به میزان رضایت بخش، نسبت آب به سیمان باید بیشتر از ۱ باشد. نسبت آب به سیمان ۲ را می‌توان مرز بین دوغاب غلیظ و رقیق دانست. از دیدگاه جریان و پایداری، بهترین دوغابها در محدوده ۱ تا ۱/۵ به دست آمده اند. استفاده از بنتونیت در نسبت‌های زیاد مضر است و فوق روان کننده‌ها در سیمآنهای ریزدانه مفیدترند. همچنین با سیلیکات سدیم می‌توان زمان گیرش دوغابها را کنترل و حتی در حد گیرش آنی کاهش داد.

واژهای کلیدی: دوغاب پایه سیمانی، افزودنیها، طرح اختلاط، تزریق آب‌بند، آزمایشهای دوغاب

۱. مقدمه

به منظور جلوگیری از تبعات منفی نفوذ آب زیرزمینی به سازه‌های مهم و در عین حال پرهزینه مانند تونل‌ها و سدها، انجام عملیات تزریق آب‌بند به عنوان راهکاری ارزان و موثر با هدف ایجاد یک ناحیه نفوذ ناپذیر و در نتیجه جلوگیری از نفوذ آب همواره مورد توجه است. از مهم‌ترین پایه‌های موفقیت یک پروژه تزریق، انتخاب دوغابی با خصوصیات مطلوب است. هم اکنون ارایه طرح اختلاط مناسب دوغاب برای یک کاربرد خاص، به علت نبود پایه‌های نظری مورد نیاز، معمولاً براساس تجربه پیمانکار و یا طراح صورت می‌گیرد و در این زمینه نمودارهای گردشی[1] متعددی نیز ارایه شده است. هر چند در بیشتر موارد با توجه به محدود بودن اطلاعات مورد نیاز در تزریق، این نمودارها بسیار مفید خواهند بود، ولی در آنها برای دستیابی به بهترین دوغاب، مطابق با شرایط خاص پروژه، تلاشی نمی‌شود. این درحالی است که اجزای دوغاب‌های پایه سیمانی به عنوان پرکاربردترین دوغاب مورد استفاده در صنعت، از گستردگی زیادی برخوردار هستند و به تبع آن خصوصیات دوغاب نیز وابسته به مواد بکار رفته و نسبت آنها بسیار متغیر است. بنابراین برای رسیدن به نتیجه مطلوب در تزریق، شناخت کامل اثر هر یک از اجزای تشکیل دهنده دوغاب ضروری است. به منظور دستیابی به این هدف، توسعه مطالعات آزمایشگاهی و طراحی دوغاب با خصوصیات مطلوب در آزمایشگاه، گام موثری خواهد بود، مطالعاتی که نسبت به اهمیت موضوع، به آن توجه کمی شده است.

هدف از این تحقیق انتخاب طرح اختلاط دوغاب سیمانی به منظور آب‌بندی، بر پایه کارهای آزمایشگاهی است. از این‌رو ابتدا ویژگی‌های مورد نیاز دوغاب‌ها و روش‌های اندازه‌گیری آنها معرفی می‌شود. با استفاده از نمودار گردشی ارایه شده، دوغاب تزریق آب‌بند تونل انتقال آب کرج تهران طراحی شده و نتایج به دست آمده در خلال آزمایش‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند. تنوع مواد و آزمایش‌های بکار گرفته شده در این تحقیق علاوه بر کمک به کسب تحلیل‌های جامع، در رسیدن به نتایج جدید، بویژه در سطح مقالات داخلی، موثر بوده است.

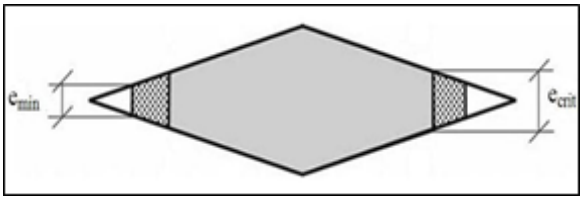
تونل انتقال آب کرج-تهران، یک تونل با نگهدارنده دائم بتنی پیش‌ساخته است که در مجموعه‌ای رسوبی- آتشفشانی از سازند کرج حفر شده است. سنگ‌شناسی آن به طور کلی شامل تناوبی از توف، ماسه سنگ و کنگلومراهای ریزدانه بوده و در مناطق محدودی از تونل میزان نشت آب که عمدتاً از طریق درزه‌های باز و پیوسته جریان دارد، بیش از حد مجاز است. کاستن از نفوذپذیری توده سنگ در مناطق آب‌دار با انجام عملیات تزریق یکی از راه‌های پیش رو برای رسیدن به نشت مجاز تونل است [Mahdavinejad, 2012].

از اساسی ترین خصوصیاتی که برای یک دوغاب با هدف تزریق آب بند باید مورد توجه قرار گیرد، می‌توان به قابلیت نفوذ[2]، خصوصیات جریان، پایداری و زمان گیرش اشاره کرد.

قابلیت نفوذ وابسته به ترکیبی از عوامل مختلف از قبیل، شدت قطبی بودن ذرات، سطح مقطع متوسط فضاهای محیط مورد تزریق، اندازه ذرات، فشار تزریق و همچنین زمان گیرش است [Karbala & Katibeh, 2010]. در اکثر تحقیقاتی که در رابطه با قابلیت نفوذ دوغاب‌های سیمانی انجام شده است، سعی شده ارتباطی بین بازشدگی هیدرولیکی درزه و اندازه دانه¬های دوغاب یافت شود. در همین رابطه می‌توان مدل درزه لوزی گونه (شکل ۱) را مدنظر قرار داد. در این شکل دو پارامتر بازشدگی بحرانی (ecrit) و بازشدگی حداقل (emin)، نشان داده شده‌اند. برای بازشدگی‌های بیشتر از مقدار بازشدگی بحرانی، نفوذ دوغاب امکان پذیر بوده و توقف نفوذ دوغاب به علت ایجاد تعادل بین چسبندگی دوغاب و فشار تزریق رخ خواهد داد. در بازشدگی‌های کمتر از بازشدگی حداقل، نفوذ دوغاب ممکن نخواهد بود. بین این دو بازشدگی، یک حالت گذار رخ می‌دهد و طی آن دانه‌های سیمان فیلتر می‌شوند. ذرات ریزتر نفوذ کرده و ذرات درشت‌تر به تدریج لایه‌ای از دوغاب را تشکیل

خواهند داد و سرانجام منجر به توقف نفوذ دوغاب می‌شود [Axelsson et.al, 2009] و [Hernquist, 2009].

شکل ۱. مدل درزه لوزی شکل [Axelsson et.al , ۲۰۰۹]



این دو پارامتر به نسبت ابعاد ترک و اندازه ذرات دوغاب بستگی خواهند داشت [Eklund and Stille, 2008]. تحقیقات آکلسون[3] نشان می‌دهد بازشدگی بحرانی ۵ برابر بزرگ‌ترین اندازه ذرات دوغاب، و بازشدگی حداقل، ۳ برابر بزرگ‌ترین اندازه ذرات دوغاب است. مرحله گذار نیز بین این دو نسبت رخ می‌دهد. نفوذ مناسب به درون بازشدگی گذار، از طریق جدایش خوب ذرات و بهبود خصوصیات جریان از جمله ویسکوزیته و چسبندگی امکان پذیر است [Axelsson et.al , 2009]. کاهش چسبندگی و افزایش ویسکوزیته دوغاب سبب افزایش قابلیت نفوذ آن خواهد شد [Kronlof, 2003]. همچنین افزایش ویسکوزیته و چسبندگی سبب افزایش مقاومت دوغاب در برابر آب‌شستگی و پایداری آن می‌شود.

با استفاده از یک دوغاب پایدار می‌توان از بسته شدن حداکثر مقطع درزه‌ها و در نتیجه کاهش موثر آب نشتی اطمینان یافت. دوغاب پایدار از نظر انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) دوغابی است که بعد از ۲ ساعت کمتر از ۵٪ آب اندازی[4] داشته باشد و به عقیده کوتزنر[5] تا ۱۰ درصد آب‌اندازی نیز مجاز است [Warner, 2004] و [Widmann, 1996].

وقتی تزریق درون آب در حال جریان یا حتی آب ساکن انجام می‌شود، گیرش سریع مطلوب است و دوغاب قبل از ترقیق یا شسته شدن توسط آب باید به گیرش مطلوب برسد [Warner, 2004]. جدول ۱ زمان گیرش لازم در شرایط مختلف آب زیرزمینی برای دوغاب را ارایه می‌کند.

جدول ۱. گیرش لازم دوغاب در شرایط مختلف آب زیرزمینی [Warner, 2004]

استفاده معمول	زمان گیرش
مقابله با آب در حال جریان	۱ تا ۱۰ ثانیه
کنترل آب	۱ تا ۲۰ دقیقه
زودگیر کردن دوغاب	۳۰ تا ۶۰ دقیقه

آزمایش‌های کمی به طور خاص برای تزریق طراحی شده‌اند. اصول کلی مهم‌ترین و معتبرترین آزمایش‌های قابل استفاده در دوغاب‌ها، به ویژه با هدف تعیین خصوصیات دوغاب آب‌بند در جدول ۲ ارایه شده است.

۲. طرح اختلاط تزریق آب‌بند تونل انتقال آب کرج- تهران

۲-۱ روش انجام آزمایش‌ها

همان‌گونه که بیان شد، توانایی پیش‌بینی و کنترل خصوصیات دوغاب یک نکته بسیار حائز اهمیت در موفقیت عملیات تزریق بوده و بهتر است دوغاب در آزمایشگاه متناسب با شرایط پروژه و با تمام خصوصیات مورد نیاز طراحی شده و سپس با اطمینان از کیفیت دوغاب، عملیات تزریق انجام گیرد. در این راستا نمودار شکل ۲ به منظور طراحی دوغاب پیشنهاد می‌گردد. برای دستیابی به یک دوغاب بهینه برای تزریق آب‌بند پروژه تونل انتقال آب کرج- تهران بر اساس الگوریتم پیشنهاد شده آزمایش‌هایی در آزمایشگاه بتن کارخانه تولید سگمنت تونل مورد مذکور انجام شد که در ادامه شرح داده می‌شود.

جدول ۲. آزمایش‌های قابل استفاده در تعیین خصوصیات دوغاب‌های پایه سیمانی [Widmann, 1996] و [Warner, 2004]

آزمایش	استاندارد	ویژگی مشخص کننده	اصول آزمایش	کاربرد
آب‌اندازی	ASTMC940	پایداری	اندازه‌گیری حجم آب جمع شده روی دوغاب ساکن	آزمایشگاه
لزجت سنجی[۶]	EN219	ویسکوزیته و چسبندگی	به دست آوردن ویسکوزیته و چسبندگی، با رسم منحنی جریانِ دوغاب توسط ویسکومتر.	آزمایشگاه
قیف مارش	API-RP 13 B	ویژگی کلی جریان و قابلیت تحرک	اندازه گیری زمان لازم برای خروج مقداری مشخص از دوغاب از داخل یک قیف ویژه	آزمایشگاهی و میدانی
صفحه‌فرورونده	-*	چسبندگی	اندازه‌گیری وزن دوغاب چسبیده به صفحه فولادی مربعی (۱۰×۱۰×mm۱)	آزمایشگاهی و میدانی
فیلتر پمپ	prEN 14497	قابلیت نفوذ	اندازه‌گیری نسبت حجم دوغاب عبوری از لوله دستگاه که توسط فیلترهایی مسدود شده است	آزمایشگاهی و میدانی
مخزن فشار	VU SC 48	قابلیت نفوذ	اندازه‌گیری نسبت حجم دوغاب عبوری از یک بازشدگی، تحت فشار معین	آزمایشگاه
سوزن ویکات	ASTMC953	زمان گیرش	اندازه‌گیری زمان لازم برای نفوذ سوزن دستگاه به میزان معین درون دوغاب	آزمایشگاه

* یک آزمایش ساده و میدانی مفید است که توسط ISRM پیشنهاد می‌گردد. اما زبری صفحه استاندارد نشده است.

۲-۲ تعیین آزمایش‌های لازم

به منظور کاهش موثر آب نشتی به تونل، نفوذ دوغاب به حداکثر درزه‌های ممکن و پس از آن بستن تمام مقطع درزه الزامی است. بنابراین در یک تزریق آب‌بند، خصوصیات جریان مناسب و پایداری کافی از مهم‌ترین ویژگی‌های دوغاب است. به همین منظور در تعیین آزمایش‌ها اندازه‌گیری آب‌اندازی، زمان جریان مارش و چسبندگی دوغاب‌ها مد نظر قرار گرفته است. دوغاب‌هایی که زمان گیرش کمتری دارند، در تزریق، در حضور جریان آب ارجح بوده و مقاومت آنها در برابر آب‌شستگی و رقیق شدن بیشتر است. بنابراین برای انتخاب دوغاب مناسب زمان گیرش دوغاب‌ها نیز باید بررسی شوند.

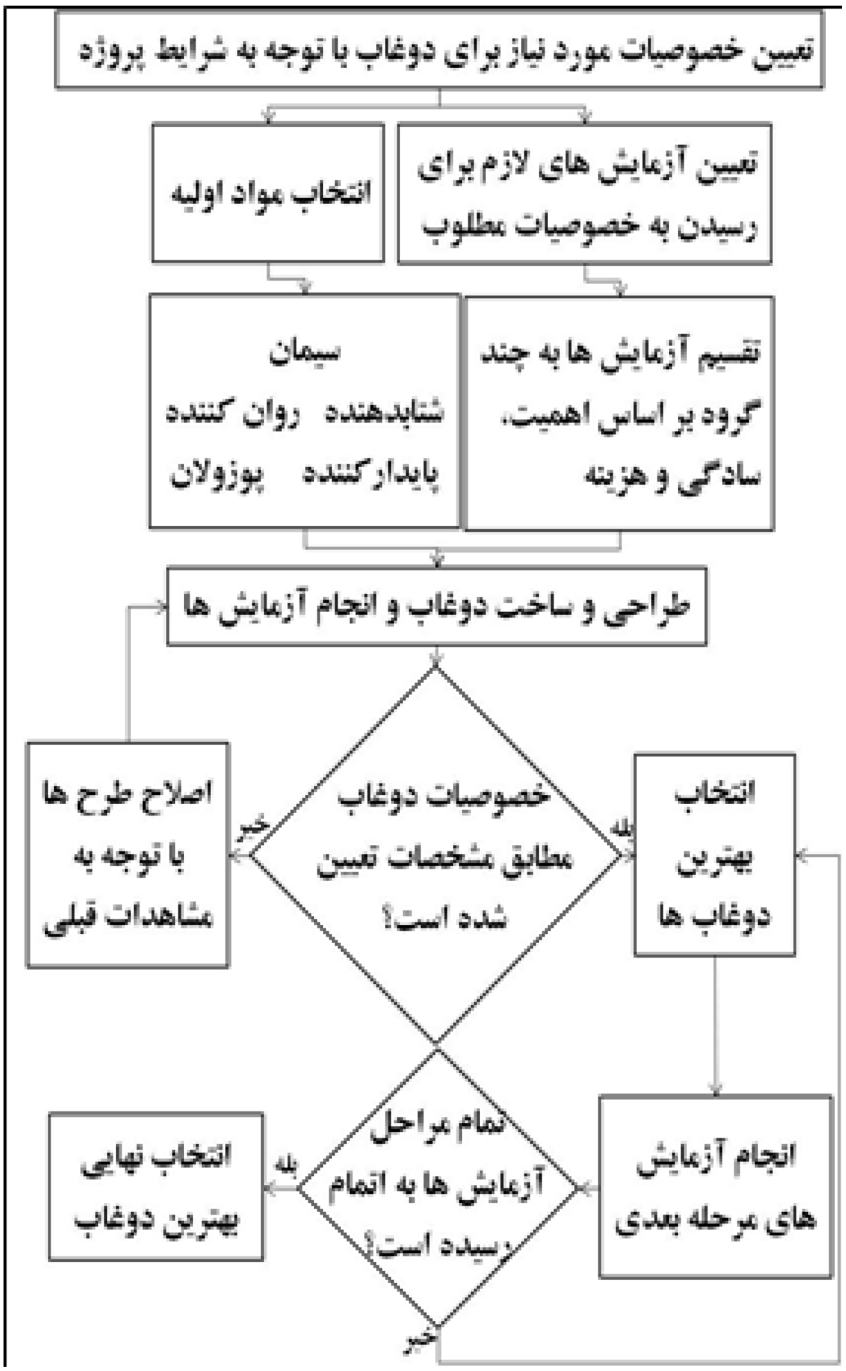
آزمایش‌های مذکور با توجه به سادگی و زمان‌بری به دو گروه تقسیم شده‌اند. آزمایش‌های مرحله اول موارد زیر را شامل می‌شوند:

زمان جریان: با استفاده از قیف مارش و استاندارد API اندازه‌گیری شده است (شکل ۳ الف).

آب اندازی: طبق پیشنهاد و دستورالعمل ISRM پس از دو ساعت قرائت شده است (شکل ۳ ب).

چسبندگی: برای این منظور از صفحه چسبندگی سنج لامبردی استفاده شده است (شکل ۳ پ).

قیف‌مارش، ویژگی‌های کلی جریان (ویسکوزیته و چسبندگی) و قابلیت تحرک دوغاب را مشخص می‌کند. در این آزمایش که بر اساس استاندارد API انجام می‌شود، زمان خارج شدن یک چهارم گالن دوغاب از یک قیف ویژه به عنوان زمان جریان دوغاب در نظر گرفته می‌شود. بنابراین هر چه این زمان برای دوغاب کمتر باشد، قابلیت تحرک و در نتیجه تمایل آن برای حرکت در درون حفرات بیشتراست. البته باید توجه داشت دوغاب‌هایی که زمان جریان یکسانی دارند، ممکن است چسبندگی و ویسکوزیته مختلفی داشته باشند، پس بهتر است قابلیت نفوذ دو دوغاب فقط بر اساس زمان جریان مقایسه نشود.



شکل ۲. الگوریتمی برای انتخاب طرح بهینه دوغاب‌های سیمانی در آزمایشگاه

[Mahdavinejad, 2012]

صفحه چسبندگی سنج لامبردی یک آزمایش پیشنهاد شده توسط ISRM برای اندازه گیری چسبندگی است. این آزمایش شامل فروکردن یک صفحه مربعی ٤ اینچ فولادی در دوغاب است. از تقسیم وزن دوغاب چسبیده به صفحه بر مساحت آن چسبندگی دوغاب به دست می‌آید. هر چند این آزمایش استاندارد نشده اما اطلاعات حاصل از آن را می‌توان به منظور مقایسه بکار برد. به این ترتیب به وسیله عدد حاصل از چسبندگی لامبردی و زمان جریان، قابلیت نفوذ دوغاب‌ها را نیز می‌توان مقایسه کرد.

آب اندازی نیز به راحتی توسط پر کردن یک استوانه مدرج از دوغاب و گزارش نسبت آب شفاف جمع شده در بالای دوغاب به کل مخلوط پس از دو ساعت به دست می‌آید.

شکل ۳. آزمایش‌های مرحله اول (الف: قیف مارش)
(ب:آب اندازی) (پ:چسبندگی)

دستیابی به دوغابی با خصوصیات زمان جریان کمتر از ۳۵ ثانیه، آب‌اندازی کمتر از ۱۰٪ و کمترین چسبندگی، هدف آزمایش‌های مرحله اول بوده و در مرحله دوم، بهترین دوغاب‌های مرحله اول از نظر زمان گیرش بررسی شده‌اند. همچنین با استفاده از سدیم سیلیکات زمان گیرش دوغاب منتخب برای مقابله با شرایط متفاوت آب زیرزمینی مطابق جدول ۱ تنظیم گردیده است. می‌توان جهت تعیین زمان گیرش از دو لیوان پلاستیکی مطابق شکل ٤ استفاده کرد. لحظه‌ای که خمیر دوغاب ساخته شده به حدی از استحکام رسیده باشد که درون لیوان دیگر جریان پیدا نکند، را می‌توان زمان گیرش دوغاب تلقی کرد. هر چند این آزمایش غیراستاندارد است ولی ساده و موثر است [Pellegrini & Perruzza, 2009] و [Peila et.al, 2011].

شکل ٤. تعیین زمان گیرش دوغاب در مرحله دوم

۲-۳ انتخاب مواد اولیه

سیمان و آب به عنوان اجزای اصلی یک دوغاب سیمانی، همچنین روان کننده، پایدارکننده و زودگیرکننده به عنوان مواد افزودنی در طرح‌های اختلاط بکار گرفته شدند. در ادامه توضیحات بیشتری در مورد نحوه انتخاب این مواد ارایه شده است.

الف- سیمان

شرایط آب‌بندی تونل‌ها سختگیرانه‌تر از پرده آب‌بند سدها است و در بسیاری از تونل‌ها نفوذپذیری باید به زیر ۱ لوژان برسد [Stille et.al, 2012]. به همین دلیل کاربرد سیمآنهای ریزدانه[۷] و خیلی ریزدانه[۸] که حدود ۳ الی ٤ برابر گرانتراند، ولی قابلیت نفوذ بسیار بیشتری نسبت به سیمان پرتلند معمولی دارند، مناسب‌تر خواهد بود. [Warner, 2004]. اما در تونل‌های با نگهدارنده پیش‌ساخته، وظیفه اصلی آب‌بندی به عهده همین پوشش است [Grov, 2001]. تونل انتقال آب مورد مطالعه نیز از این مزیت برخوردار است و با سیمانهای معمولی نیز می‌توان به شرایط نشت مجاز رسید.

از آنجا که بزرگ ترین اندازه دانه‌های سیمان پرتلند تیپ ۲، ٦۷ میکرومتر است، بازشدگی بحرانی و بازشدگی حداقل این سیمان به ترتیب حدود ۳۳۵ و ۲۰۰ میکرون است. از طرفی متوسط بازشدگی درزه‌های نواحی نیازمند تزریق آب‌بندِ تونل، حداقل ۳۲۸ میکرومتر تخمین زده می‌شود [Mahdavinejad, 2012] که نشان می‌دهد دوغاب‌های ساخته شده با این سیمان از نظر تئوری، قابلیت نفوذ در شرایط محیطی پروژه را خواهند داشت. همچنین این سیمان در مقابل آبهای سولفاته احتمالی مقاوم بوده، ارزان و به راحتی در دسترس است. در نتیجه سیمان پرتلند تیپ ۲ جهت تزریق آب‌بند انتخاب شده است. محدوده بلین سیمانهای مورد استفاده در این تحقیق بین ۳۰٤۵ تا ۳٤۰۰ اندازه‌گیری شد.

ب- نسبت آب به سیمان(W/C)

در آزمایش‌ها آب آشامیدنی مورد استفاده قرار گرفته است.

دوغاب‌های با محتوی آب کمتر، در زمان تزریق کمتر در مقابل آب از هم پاشیده می‌شوند، آب اندازی کمتری دارند و بعد از سخت شدن نیز مقاومت و دوام بیشتر، همچنین نفوذپذیری کمتری می‌توان از آنها انتظار داشت. [Widmann, 1996] در مورد سیمانهای استاندارد اکثر محققین عنوان می‌کنند که نسبت آب به سیمان نباید بیشتر از ۳ شود. به همین دلیل نسبت‌های انتخاب شده در این تحقیق نیز کمتر از ۳ انتخاب شده است.

ج- افزودنی‌ها

شرح مهم‌ترین نوع افزودنی‌هایی که در دوغاب بکار می‌آیند در جدول ۳ ارایه شده است.

- در این تحقیق از فوق روان کننده‌ای بر پایه شیمیایی کربوکسیلات و میزان مصرف ۰/۱ تا ۱/۲ درصد وزن سیمان استفاده شده است. این محصول اثر زودگیر کننده نیز داشت.
- به دلیل ارزان و در دسترس بودن، جهت پایداری دوغاب از بنتونیت استفاده شده است.
- بکارگیری کلریدکلسیم در کنار سازه‌های بتنی مسلح ممنوع است. [Warner, 2004] از اینرو از سیلیکات سدیم نیز به عنوان افزودنی سوم استفاده شده است.

جدول ۳. مهم‌ترین افزودنی‌ها برای دوغاب [Widmann, 1996]، [Warner, 2004]

افزودنی	کاربرد	مواد معمول	میزان مصرف (٪وزن سیمان)
زودگیر	کاهش زمان گیرش و کنترل آب	سدیم سیلیکات سدیم و کلرید کلسیم	کلسیم کلرایدحداکثر ٪۲
روان‌کننده	افزایش روانی و در نتیجه افزایش قابلیت نفوذ	لیگنوسولفات‌ها (روان‌کننده) کربوکسیلیت‌ها (فوق روان‌کننده)	بر اساس آزمایش‌ها و توصیه سازنده
پایدارکننده	افزایش پایداری	میکروسیلیس و بنتونیت	بنتونیت حداکثر ٪۳

۲-٤ مخلوط کردن اجزای دوغاب

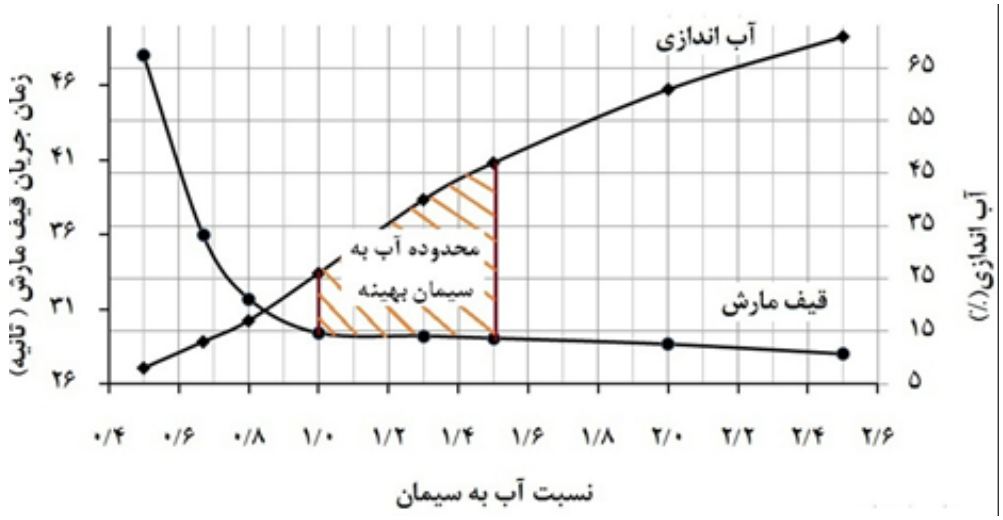
اجزای دوغاب توسط یک همزن برقی با سرعت چرخش ۳۵۰ الی ٤۰۰ دور در دقیقه که زایده‌های پارویی شکلی برای آن تعبیه شده بود، مخلوط شده اند. در هر طرح، ابتدا بنتونیت خشک به مدت ٤ دقیقه با آب اختلاط (که در دمای ۲۰ الی ۲٤ درجه سانتی‌گراد قرار داشت) مخلوط شده و پس از اضافه کردن سیمان نیز به مدت ٤ دقیقه دیگر دوغاب به هم زده شده است. روان کننده در ۳۰ ثانیه آخر اضافه شده و به منظور کاهش زمان گیرش در دوغاب‌های منتخب نیز ۳ دقیقه بعد از تهیه مخلوط زودگیر افزوده گردیده است.

۳. انجام و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۳-۱ مرحله اول

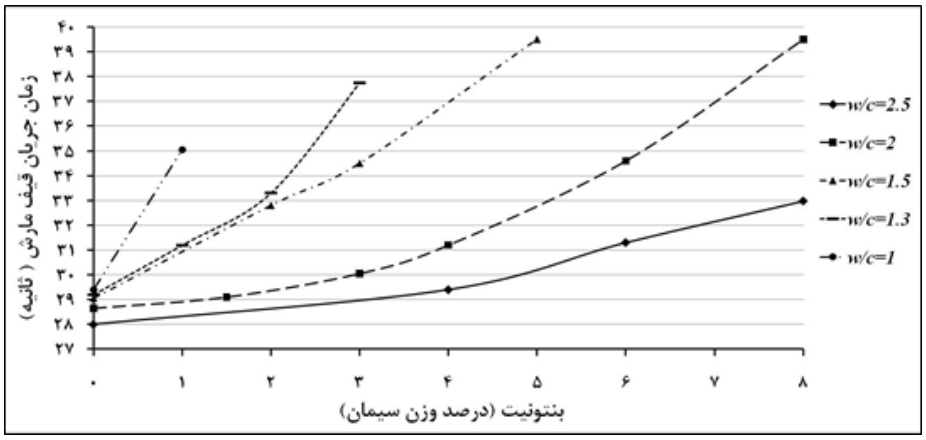
طرح‌های اختلاط ساخته شده در مرحله اول را می‌توان در سه رده، به شرح زیر طبقه بندی کرد.

ابتدا برای دستیابی به نسبت آب به سیمان بهینه، طرح‌های اختلاط دوغاب در نسبت‌های مختلف آب به سیمان ۲/۵ الی ۰/۵ ساخته شدند. شکل ۵ زمان جریان قیف مارش و آب اندازی این دوغاب‌ها را نشان می‌دهد. زمان جریان تابع ویسکوزیته و ویسکوزیته خود تابعی از اصطکاک ملکول‌های سیال است. بنابراین با افزایش غلظت دوغاب می‌بایست زمان جریان افزایش یابد. اما همان گونه که در شکل ۵ مشهود است، این افزایش در نسبت آب به سیمان کمتر از ۱ به طور ناگهانی شدت می‌گیرد که نشانه افزایش و حتی تغییر رفتار اصطکاکی ملکول‌های دوغاب و در واقع تغییر مدل رئولوژیکی دوغاب از حالت سیال بینگهامی به حالت خمیری و یا اسلاری[9] در این نقطه است. به منظور قابلیت نفوذ بالای دوغاب نسبت آب به سیمان باید بیشتر از ۱ باشد. از طرفی با دقت در منحنی آب‌اندازی آنها مشاهده می‌شود که در نسبت‌های آب به سیمان ۱/۵ تا ۰/۸ شیب منحنی اندکی بیشتر از دو سمت محدوده ذکر شده است. به عبارتی در این محدوده کاهش نسبت آب به سیمان تاثیر بیشتری در کاهش آب اندازی دارد. اشتراک این محدوده با ناحیه‌ای که دوغاب‌ها در آن عملکرد بهتری از لحاظ رئولوژیکی دارند (نسبت آب به سیمان بزرگتر از ۱) ناحیه نسبتاً کوچکی از ۱ تا ۱/۵ است که به نظر می‌رسد از جنبه خصوصیات جریان و پایداری (آب‌اندازی) محدوده آب به سیمان بهینه در سیمانهای معمولی باشد.

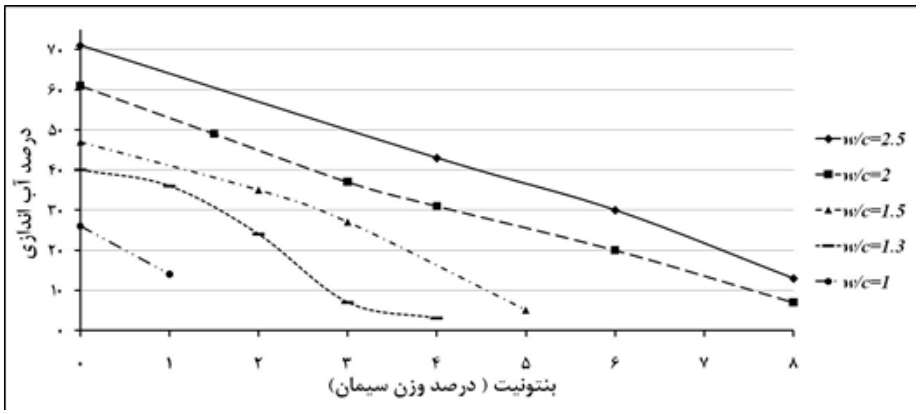


شکل ۵. زمان جریان و آب اندازی دوغاب‌های خالص سیمانی

هر چند ویژگی‌های دوغاب‌های با نسبت بهینه مطلوب‌تر از نسبت‌های آب به سیمان دیگر می‌باشند، اما هنوز با خصوصیات مورد نظر فاصله دارد. بنابراین در طرح‌های بعدی تصمیم گرفته شد ابتدا دوغاب‌های محدوده بهینه پایدار شوند و سپس توسط روان کننده‌ها، به روانی مطلوب برسند بر همین اساس کلاس دوم دوغاب‌های تهیه شده، دوغاب‌های بنتونیتی بودند. از آنجا که محدوده بهینه، محدوده کوچکی است، کران بالای آن نادیده گرفته شد و به هر کدام از نسبت‌های پایه ۱ تا ۲/۵، درصدهای مختلفی از بنتونیت اضافه شد تا هر یک به مرز پایداری مورد نظر برسند. شکل ٦ و ۷ روند تغییرات زمان جریان و آب‌اندازی دوغاب‌های بنتونیتی را نشان می‌دهد. در این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش بنتونیت زمان جریان دوغاب با نرخ افزایشی و میزان پایداری تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. شکل منحنی‌ها در هر دو نمودار دور از انتظار نبوده و تقریباً روندی همانند شکل ۵ دارند که خود نشان دهنده وابستگی این خصوصیات به میزان، نوع ذرات و اندرکنش میان آنها است.

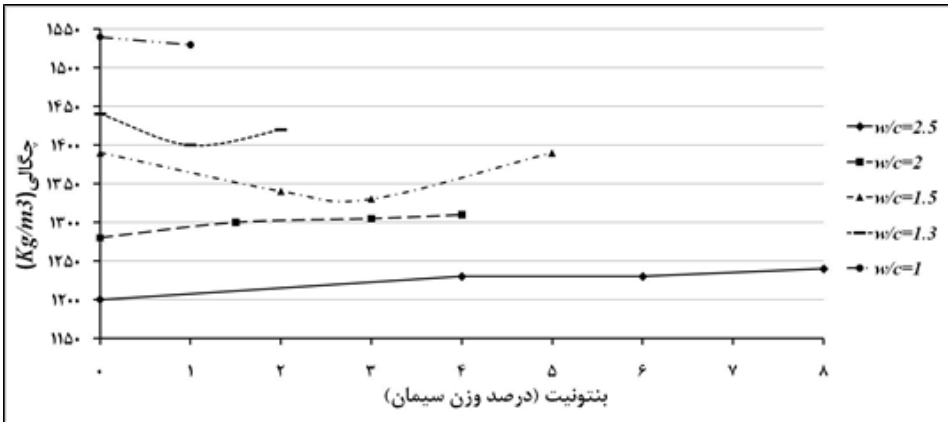


شکل ٦. روند تغییرات زمان جریان دوغاب‌های سیمانی- بنتونیتی در نسبت‌های آب به سیمان مختلف.



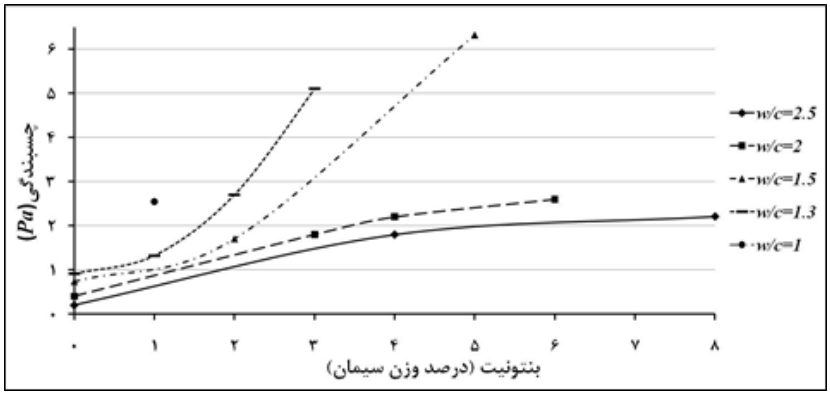
شکل ۷. روند تغییرات آب اندازی دوغاب‌های سیمانی- بنتونیتی در نسبت‌های آب به سیمان مختلف

نکته قابل توجه دیگر در منحنی چسبندگی و چگالی این دوغاب‌ها دیده می‌شود. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود برخلاف دوغاب‌های با نسبت آب به سیمان ۲ و ۲/۵، در دوغاب‌های غلیظ‌تر با افزایش درصد بنتونیت چگالی دوغاب در ابتدا کاهش می‌یابد. در واقع در دوغاب‌های رقیق فضای اشغال نشده بین ذرات زیاد است به همین دلیل با افزودن بنتونیت، ذرات آن به راحتی می‌توانند در این فضا قرارگرفته و در نتیجه چگالی مخلوط دوغاب افزایش می‌یابد. اما در دوغاب‌های غلیظ‌تر این فضا وجود نداشته و دوغاب در ابتدا حتی فضای بیشتری را اشغال می‌کند. پس از آن با افزودن درصد بنتونیت اندرکنش ذرات در مخلوط افزایش یافته و در نتیجه چگالی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۸ روند تغییرات چگالی دوغاب‌های سیمانی- بنتونیتی در نسبت‌های آب به سیمان مختلف

اثر چنین پدیده‌ای متفاوت بودن الگوی تغییرات چسبندگی در دوغاب‌های غلیظ و رقیق است. به طوری که در شکل ۹ مشاهده می‌شود برخلاف دوغاب‌های رقیق، شیب منحنی چسبندگی در دوغاب‌های غلیظ مثبت است که خود نشان می‌دهد چسبندگی نیز تابعی از میزان، نوع ذرات و اندرکنش میان آنها است ودرصورت افزودن مواد روان‌کننده که با تغییر نیروهای فیزیکی شیمیایی موثر بر سطح مشترک ذرات سبب اصلاح اندرکنش و توزیع بهتر آنها خواهد شد، انتظار می‌رود بتوان ویژگی‌های جریان بهتری در دوغاب ایجاد کرد.



شکل ۹. روند تغییرات چسبندگی دوغاب‌های سیمانی- بنتونیتی در نسبت‌های آب به سیمان مختلف

جدول ٤. مشخصات بهترین دوغاب‌های بنتونیتی قبل و بعد از اضافه کردن روان‌کننده

مشخصات طرح				خصوصیات	
W/C	٪B	٪Sp*	مارش (S)	آب اندازی (٪)	چسبندگی (Pa)
۰/۸	۰	۰/۵	–	از لحاظ پایداری رد شد.	–
۱	۱	۰	۳۵	١٤	۲/٦
۱	۱	۰/٦	–	از لحاظ پایداری رد شد.	–
۱/۳	۳	۰	۳۸	۷	۵/۱
۱/۳	۳	۰/٦	۳۳	٦	۲/۱
۱/۳	۳	۰/۸	۳۳	١٤	۱/۷
۲	۸	۰	٤۰	۷	–
۲	۷	۰/۸	۳٦	۵	۳/۵
۲/۵	۸	۰	۳۳	۱۳	۲/۲
۲/۵	۸	۰/۸	۳۵	۵	۳/۹۲

*درصد وزنی روان کننده به سیمان

با همین هدف در رده سوم به بهترین دوغاب‌های پایدار ساخته شده با بنتونیت، فوق روان کننده اضافه شد. به این ترتیب که فوق روان کننده در میزانی از آب اختلاط طرح محلول شده و در نهایت به کل مجموعه دوغاب اضافه شد. زمان گیرش نیز از لحظه افزودن فوق روان کننده تا زمانی که خمیر دوغاب به درون لیوان دیگر جریان پیدا نکند اندازه گیری شد. در جدول ٤ مشخصات این دوغاب‌ها ارایه شده است.

در طی آزمایش‌ها مشاهده شد که در نسبت‌های آب به سیمان پایین، فوق روان کننده سبب ایجاد آب اندازی شدیدی شده و باعث جدایش دانه‌های درشت و ریز سیمان از هم می‌گردید. به طوری که دانه‌های درشت سیمان ته‌نشین شده و دانه‌های ریز سیمان همچنان معلق می‌مانند. در شکل ۱۰ این موضوع نشان داده شده است. تغییر رنگ ستون دوغاب در شکل سمت راست نشان دهنده جدایش کامل ذرات سیمان از هم است. فوق روان کننده ذاتاً ماده‌ای برای افزایش روانی بتن است. نسبت آب به سیمان در بتن‌ها پایین بوده و فوق‌روان کننده‌ها برای این نسبت ساخته می‌شوند. بنابراین در مورد از هم پاشیدگی دوغاب در نسبت‌های پایین می‌توان گفت اثر فوق‌روان کننده چنان زیاد بوده که سبب رخ دادن چنین پدیده‌ای شده است.

شکل ۱۰. آب اندازی شدید دوغاب غلیظ همراه روان کننده (راست) آب اندازی دوغاب‌های بدون روان کننده (چپ)

جدول ۵. بهترین دوغاب‌های ساخته شده در مرحله اول آزمایش‌ها

ردیف	مشخصات طرح				خصوصیات	
	W/C	٪B	٪Sp*	مارش (S)	آب اندازی (٪)	چسبندگی (Pa)
۱	۱/۳	۳	۰/٦	۳۳	٦	۲/۱
۲	۲/۵	۸	۰/۸	۳۵	۵	۳/۹۲

جدول ٤ نشان می‌دهد فوق روان‌کننده در نسبت‌های آب به سیمان بالا سبب افزایش زمان جریان و در پاره‌ای موارد کاهش آب‌اندازی شده است. دلیل این مساله علاوه بر کارایی کمتر فوق‌روان کننده در نسبت‌های بالای آب به سیمان می‌تواند متاثر از درصد بالای بنتونیت و واکنش‌های احتمالی بین این دو ماده باشد.

اما در نسبت‌های آب به سیمان و بنتونیت متوسط، بدون کاهش چشمگیر پایداری، روان کننده اثر مطلوبی بر روانی دوغاب داشته است. با توجه به مشاهدات عنوان شده به نظر می‌رسد استفاده از فوق روان کننده در مورد سیمآنهای ریزدانه به طور نسبی در مقایسه با سیمآنهای درشت دانه سودمندتر است.

از بین دوغاب‌ها، دو دوغاب ارایه شده در جدول ۵ تمام مشخصات تعیین شده در مرحله اول را دارا هستند و در مرحله بعد زمان گیرش آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد

۳-۳ مرحله دوم

هر دو گزینه ارایه شده در جدول ۵ آب‌اندازی و زمان جریان یکسانی دارند. اما چسبندگی طرح شماره ۱ به مراتب مطلوب‌تر است. تفاوت عمده این دو طرح در نسبت آب به سیمان آنها است و در واقع هر کدام به نوعی نماینده دو نوع متفاوت دوغاب پایه سیمانی است "دوغاب غلیظ و دوغاب رقیق". نسبت آب به سیمان و درصد بنتونیت دوغاب شماره ۲ بسیار بالا است و به عبارتی دیگر ارزش سیمانی کمی دارد. این نوع دوغاب‌ها مقاومت و دوام کمی خواهند داشت و بدیهی است که زمان گیرش طرح شماره ۱ به مراتب کمتر از دوغاب دیگر است. بنابراین طرح شماره ۱ به عنوان دوغاب تزریق آب‌بند انتخاب شد. در گام بعدی درصدهای مختلفی از سدیم سیلیکات بر روی دوغاب منتخب آزمایش شد و زمان گیرش متناظر آنها به دست آمد نتایج این آزمایش‌ها که در صورت برخورد با آب‌های در حال جریان و یا تحت فشار بکار می‌رود در جدول ٦ ارایه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با این ماده می‌توان زمان گیرش دوغاب‌ها را کنترل و حتی در حد گیرش آنی کاهش داد. البته لازم به ذکر است که در این سیستم استفاده از پمپ‌های جداگانه برای دوغاب و سیلیکات سدیم ضروری است.

جدول ٦. زمان گیرش متناظر با درصدهای مختلفی از سیلیکات سدیم

مورد استفاده	زمان گیرش	سیلیکات سدیم *
آب در حال جریان	۳۰ ثانیه	۳۰
کنترل آب شدید	۲۰ دقیقه	۲۵
کنترل آب	۳۱ دقیقه	۲۰
کنترل آب	۳۷ دقیقه	۱۵
کنترل آب	٤۲ دقیقه	۱۰

* غلظت سیلیکات سدیم مورد استفاده ٪ ۲۷ و نسبت Na_2O/SiO_2 آن برابر ۳/۲ است.

٤. نتایج

در طرح اختلاط یک دوغاب پایه سیمانی، مواد متنوع با نسبت‌های گوناگون می‌توانند شرکت داشته باشند که هر یک ویژگی‌های متمایزی در دوغاب ایجاد می‌کنند. از آنجا که در حال حاضر آزمایش‌های زیادی برای اندازه‌گیری این ویژگی‌ها وجود دارد، بکارگیری مطالعات آزمایشگاهی، ضامن انتخاب درست و تضمین کیفیت دوغاب، مطابق با نیاز

پروژه خواهد بود. روش کار می‌تواند بر اساس فلوچارت ارایه شده در شکل ۲ باشد. این رویه در مرحله عمل نیز با موفقیت در این تحقیق اجرا گردید و در نهایت دوغابی با خصوصیات مطلوب و مورد انتظار ساخته شد. علاوه بر آن نتایجی که از تحلیل آزمایش‌ها به دست می‌آید کمک شایانی به درک صحیح رفتار دوغاب و در نهایت عملیات تزریق خواهد کرد. نکات زیر تعدادی از این نتایج در مورد دوغاب‌های پایه سیمانی پرتلند معمولی است.

۱.افزایش زمان جریان در نسبت آب به سیمان کمتر از ۱، به طور ناگهانی شدت می‌گیرد که نشانه تغییر مدل رئولوژیکی دوغاب از حالت سیال به حالت خمیری در این نقطه است. بنابراین به منظور قابلیت نفوذ بالای دوغاب نسبت آب به سیمان باید بیشتر از ۱ انتخاب شود.

۲.با توجه به منحنی آب اندازی معلوم می‌شود در نسبت‌های آب به سیمان ۱/۵ تا ۰/۸ کاهش نسبت آب به سیمان تاثیر بیشتری در کاهش آب اندازی داشته است. بنابراین از جنبه خصوصیات جریان و پایداری بهترین دوغاب‌ها در فصل مشترک این محدوده با ناحیه‌ای که دوغاب‌ها در آن عملکرد بهتری از لحاظ رئولوژیکی دارند (نسبت آب به سیمان بزرگ تر از ۱)، به دست خواهد آمد. که این محدوده اشتراکی نسبت آب به سیمان ۱ تا ۱/۵ است.

۳.مزیت بکارگیری بنتونیت حتی در بهبود خصوصیات دوغاب تازه کمتر از معایب آن بوده و استفاده از بنتونیت در نسبت‌های بالا توصیه نمی‌شود. زیرا با افزایش بنتونیت نرخ افزایش زمان مارش بیشتر از نرخ کاهش آب‌اندازی است.

٤.بررسی روند تغییرات چگالی و چسبندگی دوغاب‌های بنتونیتی نشان دهنده تبعیت چسبندگی از میزان، نوع ذرات و اندرکنش میان آنها است و نسبت آب به سیمان ۲ را می‌توان مرز بین دوغاب رقیق و غلیظ معرفی کرد.

۵.در طی آزمایش‌ها مشاهده شد که فوق روان کننده باعث جدایش بیشتری در مورد دانه‌های درشت به نسبت دانه‌های ریز سیمان می‌گردد. به طوری که هنگام استفاده از فوق روان کننده دانه‌های درشت سیمان ته‌نشین شده و دانه‌های ریز سیمان همچنان معلق می‌مانند. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از فوق روان کننده در مورد سیمآنهای ریزدانه در مقایسه با سیمآنهای درشت دانه سودمندتر است.

٦.آزمایش‌ها نشان داد با سدیم سیلیکات می‌توان زمان گیرش دوغاب‌ها را کنترل و در حد گیرش آنی کاهش داد.

۵. پی‌نوشتها

1-Flowchart

2-Penetrability

3-Axelsson

4-Bleeding

5-Kutzner

6-Viscometry

7-Micro fine cement

8-Ultrafine cement

9- Slurry

٦. منابع

-کربلا، محمد امین و کتیبه، همایون (۱۳۸۸) "تزریق دوغاب سیمانی در سنگ "، چاپ اول، تراوا، اهواز.

- مهدوی‌نژاد، حسین (۱۳۹۰) "بررسی فرایند تزریق آب‌بند در تونل‌های سنگ سخت"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

-Axelsson, M., Gustafson.G. and Fransson. A. (2009) "Stop mechanism for cementitious grouts at different water-to-cement ratios ", Tunneling and Underground Space Technology, Volume 24, Decem-

ber, pp. 390-397

- Eklund, D. and Stille, H. (2008) "Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts ", Tunneling and Underground Space Technology, Volume 23, September, pp. 389-398

- Grov, E. (2001) "Introduction to water control in Norwegian tunneling ", Norwegian Tunnel Association Publication ,www.NFF.com

- Hernquist, L. (2009) "Analyses of the grouting results for a section of APSO Tunnel at ASPO Hard Rock Laboratory ", Rock Mechaics and Mining Sciences, Volume 46, April, pp. 439-449

- Kronlof, A. "Development of cement based materials for grouting of rock at Olkiluoto" (2003) Working Reports, VTT Building and Transport.

- Peila,D., Borio, L. and Pelizza, S. (2011) The behaviour of a two-component back filling grout used in a tunnel boaring machine ", Acta Geotechnica Slovenica.

- Pellegrini, L. and Perruzza, P. (2009) "Sao Paulo Metro Project—Control of settlements in variable soil conditions through EPB pressure and bicomponent backfill grout ", June 14-17, Las Vegas, Nevada, Rapid Excaviation and Tunneling Conferance, pp 1137-1153

- Stille, H., Gustafson, G. and Hassler, L. (2012) “Application of new theories and technology for grouting of dams and foundations on rock ", Geotechnical and Geological Engineering, Volume 30, April, pp 603-624,

- Warner, J. (2004) "Practical handbook of grouting, soil, rock and structures ", first edition, John wiley & sons, pp. 40-92 & 144-155

- Widmann, R. (1996) “ Rock grouting”, International Society for Rock Mechanics Commission on Rock Grouting, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol 33, No 8, pp. 803-847