

طرح بهینه اختلاط دوغاب در منطقه خشک مسیر حفاری EPB TBM های مترو شیراز

حجت اله معصومی فشانی^۱، محمد علی ابراهیمی فرسنگی^{۲*}، حمید منصوری^۳، حامد جمشیدی^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی استخراج معدن، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، hamffeshan@gmail.co

۲- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، maebrahimi@mail.uk.ac.ir

۳- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، hmansouri@mail.uk.ac.ir

۴- مسئول بخش کنترل حفاری EPB TBM های متروی شیراز، شرکت بام راه

(دریافت 13 تیر 1389، پذیرش 17 مهر 1390)

چکیده

در هنگام تونل سازی توسط روش حفاری مکانیزه سپری و بعد از نصب سیستم نگهداری، بین سطح خارجی نگهداری نصب شده و محیط حفاری شده یک فضای خالی بوجود می آید که می بایست جهت جلوگیری از ریزش خاک و سنگ به درون این فضا و ایجاد نشست سطحی در اثر این ریزش، بوسیله ماده مناسبی پر شود. از پر کردن این فضای خالی حلقوی تحت عنوان عملیات Backfilling و تزریق تماسی یاد می شود که معمولاً با استفاده از دوغاب های تهیه شده از سیمان، ماسه، آب و ... صورت می گیرد. لذا می بایست مخلوطی جهت تزریق انتخاب شود که هم دارای قابلیت پمپاژ خوبی باشد و با توجه به شرایط محیط حفاری علاوه بر خاصیت پرکنندگی دارای مقاومت لازم نیز بوده و حتی در شرایط اشباع قدرت آب بندکنندگی لازم را جهت جلوگیری از نفوذ آب به درون تونل داشته باشد. با توجه به اینکه بخشی از مسیر حفاری تونل های قطار شهری شیراز در محیط خشک حفر می شود و نیازی به خاصیت آب بندکنندگی دوغاب نیست، و اینکه با کاهش بنتونیت جهت محیط خشک قیمت واحد حجم دوغاب کاهش می یابد، در این تحقیق سعی شده است تا با توجه به آزمایش ها به عمل آمده طرح اختلاط مناسبی برای دوغاب در این محیط ارائه شود. تعداد ۳۶ آزمایش با نسبت های مختلف مواد تشکیل دهنده دوغاب طراحی و انجام شد. نتایج به دست آمده دو طرح اختلاط دوغاب را برای محیط خشک به عنوان طرح های بهینه پیشنهاد می دهد.

کلمات کلیدی

تونل سازی سپری مکانیزه، Backfilling، تزریق تماسی، طرح اختلاط دوغاب، مترو شیراز

۱- مقدمه

۲- زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

شهر شیراز بر روی آبرفت های جوان دوران چهارم توسعه یافته و منشأ این آبرفت ها تابع حمل رسوب توسط رودخانه خشک و رسوبگذاری در دریاچه مهارلو است. آبرفت های دوران چهارم دشت شیراز از رسوبات دانه درشت واریزه ای و مخروط افکنه ها در حاشیه ارتفاعات، تا رسوبات دانه ریز دریاچه ای در کنار دریاچه مهارلو متغیر است. بخش عمده مسیر مورد مطالعه به طول حدود ۲ کیلومتر و در امتداد بلوار کریم خان زند و بین میدان امام حسین (ستاد) تا میدان نمازی واقع شده است. خاک طبیعی منطقه مورد مطالعه عمدتاً از نوع خاک های ریزدانه از جنس رس لاغر (رس با خاصیت خمیری کم) تشکیل شده است و در گروه Lean Clay قرار دارد. البته در تعدادی از گمانه ها به میان لایه های خاک ریزدانه غیر چسبنده لای و یا لای همراه با ماسه به ضخامت حداکثر ۴ متر برخورد شده است. سطح آب زیرزمینی در ناحیه مورد مطالعه از سطح کف تونل پایین تر بوده و به طور کل تونل در این ناحیه در محیطی خشک حفر می شود [۲].

۳- طرح اختلاط دوغاب در پروژه های مختلف و طرح اختلاط مربوط به محیط اشباع مترو شیراز

چند نمونه از طرح اختلاط های انجام گرفته در پروژه های مختلف و مشابه با پروژه حاضر در جدول ۱ آورده شده است. مطابق جدول ۱ مشاهده می شود که نسبت مواد جامد (غیر سیمان) به آب بین ۳ تا ۷ متغیر است. همچنین در پروژه هایی که در آن ها از بنتونیت استفاده شده است درصد بنتونیت در مخلوط بین ۱ تا ۶ درصد وزنی آب مورد استفاده در ترکیب متغیر است.

مصالحی که در کارگاه قطار شهری شیراز جهت تهیه دوغاب استفاده می شود شامل سنگدانه (ماسه بادی و پودر سنگ)، سیمان پرتلند نوع II، بنتونیت و آب است. نمای کلی واحد تهیه دوغاب در کارگاه قطار شهری شیراز در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که ذکر شد به علت اینکه سطح آب زیرزمینی در نقاط مختلف حفر تونل متغیر بوده است (بین ۵ تا ۱۵ متری بالای تونل) به طور کل تونل های مترو در محیطی اشباع حفر می شده است و لذا جهت جلوگیری از نفوذ آب به محیط تونل و

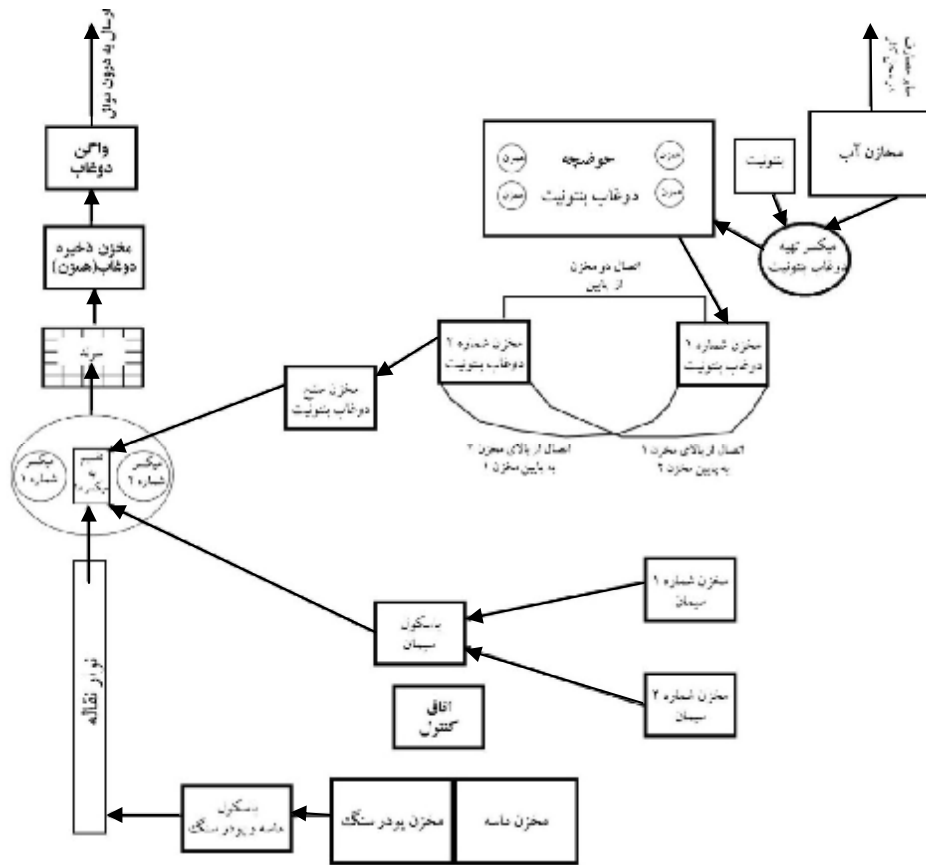
انتخاب دوغاب مناسب جهت انجام عملیات تزریق به پارامترهایی چون، اهداف تزریق، مشخصات محیطی که تزریق در آن صورت می گیرد، خصوصیات حمل و جابجایی دوغاب و ... بستگی دارد. علاوه بر این یکی از عمده ترین پارامترها جهت انتخاب مواد برای تهیه دوغاب، در دسترس بودن آن مواد یا مسایل اقتصادی است. این دوغاب ها همواره شامل سیمان پرتلند یا یک سیمان ویژه و آب هستند و همچنین می توانند شامل مواد سیمانی اضافی، پرکننده ها و یک یا چند افزاینده اصلاح کننده خاصیت دوغاب باشند. مخلوطی که تولید می شود می بایست دارای آب انداختگی کم و قابلیت پمپاژ خوبی باشد تا بخوبی و بدون ایجاد انسداد در سیستم های پمپاژ و انتقال، فضای خالی ایجاد شده را به خوبی پر کند و توانایی لازم جهت تحمل فشارهای روباره را داشته باشد. در مناطق اشباع از آب، دوغاب تولید شده باید پس از رسیدن به گیرش اولیه در برابر آب بردگی مقاومت کرده و نگهداری نصب شده را در برابر هجوم آب های موجود به درون فضای حفر شده آب بند نماید. همچنین می بایست مقاومت دوغاب تزریقی مساوی یا بیشتر از محیط احاطه کننده باشد. نهایتاً اینکه دوغاب باید با حداکثر سازی میزان اجزایی مانند خاکستر آتشفشانی (Fly Ash) و ماسه و حداقل سازی میزان اجزایی مانند سیمان و افزاینده ها به اقتصادی ترین شکل ممکن تولید شود [۱].

۱۳ کیلومتر از طرح تونل های قطار شهری مترو شیراز توسط دو دستگاه EPB TBM با قطر حفاری ۶/۸۸ متر در حال حفاری است که قطر خارجی رینگ های بتنی نصب شده ۶/۶ متر است. ۱۴ سانتی متر فضای خالی^۱ بین رینگ های بتنی و خاک وجود دارد که توسط دوغاب پر می شود. ۱۱ کیلومتر از مسیر محیط حفاری اشباع بوده و یکی از مهمترین انتظارات از دوغابی که مورد استفاده قرار می گرفته است، داشتن خاصیت آب بند کنندگی برای نگهداری سگمنت نصب شده بوده است. لذا با توجه به اینکه تونل های دوقلوی حفر شده در این پروژه، در ۲ کیلومتر آخر از محیط اشباع خارج شده و محیط حفاری کاملاً خشک می شود، اصلاح طرح اختلاط دوغابی که تاکنون مورد استفاده بوده است ضروری به نظر می رسد، چرا که دیگر نیازی به خاصیت آب بند کنندگی این دوغاب نیست و با کاهش اجزایی مانند بنتونیت می توان دوغاب با قیمت واحد حجم ارزان تر نیز به دست آورد. در این تحقیق این مهم با طراحی و اجرای آزمایش های گوناگون با نسبت های مختلف مواد تشکیل دهنده انجام شده است.

^۱ Gap (void)

جدول ۱: نمونه هایی از طرح اختلاط های انجام گرفته در پروژه های مشابه در نقاط مختلف دنیا [۳]

پروژه	اجزاء دوغاب	زمین شناسی منطقه
Milano, 2003	سیمان نوع IV: ۲۴۰ (Kg) پودر سنگ: ۴۵۰ (Kg) ماسه: ۱۲۰۰ (Kg) آب: ۳۰۰ (lit)	خاک متخلخل و آبدار، شن به همراه ماسه و مقداری لای ضعیف
Nodo di Bologna, 2003	سیمان نوع IV: ۱۶۰ (Kg) پودر سنگ: ۲۳۰ (Kg) خاکستر آتشفشانی: ۳۳۰ (Kg) ماسه: ۹۰۰ (Kg) آب: ۳۰۰ (lit)	لای-شن ماسه-رس
Hastings, UK, 2003	سیمان: ۱۱۰ (Kg/m ³) خاکستر آتشفشانی: ۳۳۰ (Kg/m ³) ماسه: ۱۳۰۵ (Kg/m ³) آب: ۲۵۵ (lit) بنتونیت: ۱۰ (Kg/m ³)	شرایط متغیر زمین شناسی از سنگ تا ماسه روان با سطح آب زیرزمینی بالا
Torino, Italy, 2003	سیمان نوع II: ۲۰۰ (Kg) خاکستر آتشفشانی: ۴۰۰ (Kg) ماسه: ریز دانه: ۵۰۰ (Kg)، دانه متوسط: ۵۰۰ (Kg) آب: ۳۰۰ (lit) گچ: ۵۰ (Kg)	شن به همراه ماسه با خواص سیمانی متفاوت (بسیار سفت)
Toulouse Metro Lot 2, 2002	سیمان نوع II: ۶۰ (Kg/m ³) خاکستر آتشفشانی: ۱۲۰ (Kg/m ³) ماسه: ۱۴۳۰ (Kg/m ³) آب: ۲۴۰ (lit) بنتونیت: ۱۶ (Kg/m ³) پودر سنگ: ۱۵۰ (Kg/m ³)	رس با پتانسیل کلوخه شوندگی بالا



شکل ۱: طرح کلی از کارگاه تهیه دوغاب در پروژه قطار شهری شیراز [۲]

جدول ۲: طرح اختلاط پیشنهاد شده توسط مشاور پروژه برای تونل های حفر شده در مترو شیراز در زیر سطح آب زیرزمینی (برای امتر مکعب دوغاب) [۲]

مقدار	واحد	نوع ماده
۱۰۰	Kg	سیمان
۹۰۰	Kg	ماسه
۱۲۰	Kg	پودر سنگ
۵۹۰	lit	دوغاب بنتونیت
۱۷۱۰	Kg	جمع کل
۱۷۱۰	Kg/m ³	دانسپته دوغاب

در حقیقت با توجه به درصد بالای رس و لای موجود در ماسه مصرفی (حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد)، رس موجود در ماسه مصرفی، که قابلیت جذب آب بالایی را دارد، باعث شده است غلظت مخلوط حاصله بالا رود که این غلظت بالا باعث می شود که

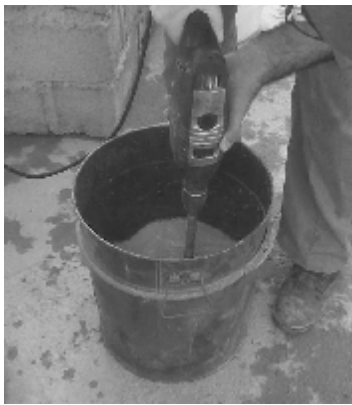
آب بند کردن دیواره نگهداری نصب شده، به مخلوطی نیاز است که دارای خاصیت آب بند کنندگی بالا باشد.

جهت تهیه چنین دوغابی که دارای خاصیت آب بند کنندگی نسبتاً مناسبی بوده و نیاز پروژه را برطرف نماید، از طرف مشاور پروژه طرح اختلاطی مطابق با جدول ۲ ارائه شده و می بایست تاکنون انجام بگیرد. بنابراین جهت تهیه چنین دوغابی مقدار بنتونیتی برابر با حدود ۱۰ درصد وزنی آب استفاده می شده است [۲].

البته با توجه به تغییرات عمده در کیفیت مصالح موجود، امکان انجام صحیح و دقیق طرح اختلاط کنونی امکان پذیر نبوده است.

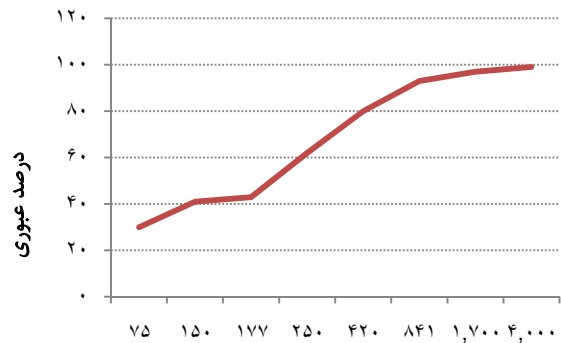
عمده ترین مشکل در راستای اجرای طرح اختلاط مورد نظر ماسه استفاده شده است که دارای درصد رس بالایی در ترکیب خود است. نتایج مربوط به آنالیز سرنندی یک نمونه از ماسه مورد استفاده در شکل ۲ آمده است.

به منظور کاربرد نتایج آزمایشگاهی در عمل، در این تحقیق جهت تهیه مخلوط های آزمایشی از مقیاس تقریبی ۱ به ۱۰۰ استفاده شده است. جهت شبیه سازی ساخت دوغاب بنتونیت با شیوه ساخت در کارگاه میزان ۱۰ لیتر آب را اندازه گرفته (یکصدم میزان حجم میکسر دوغاب بنتونیت) و میزان بنتونیت مورد نظر (برابر با درصد بنتونیت حل شده جهت تهیه دوغاب بنتونیت) در آن حل شده است. برای حل بنتونیت در آب و همچنین مخلوط کردن سایر اجزاء از یک همزنی شبیه به پره میکسر های موجود استفاده شد (شکل ۳).



شکل ۳: شیوه به هم زدن و تهیه مخلوط ها

جهت تعیین گرانروی دوغاب ها و مطابق با استاندارد ASTM C 939 از روش مخروط مارش استفاده شد [۴]. روش کار به این صورت است که زمان لازم (به ثانیه) برای خروج مقدار معین دوغاب از مخروط به عنوان میزان گرانروی آن دوغاب در نظر گرفته می شود. هرچه مدت زمان خروج دوغاب از روزنه خروجی مخروط بیشتر طول بکشد به این معنا است که گرانروی مخلوط بیشتر است و عکس این قضیه نیز صادق است. در دوغاب هایی که گرانروی پایینی دارند معمولاً آب انداختگی زیاد تر بوده، مخلوط قابلیت پمپاژ خوبی نخواهد داشت و در حقیقت می بایست انرژی بیشتری را صرف پمپاژ آن نمود. در این نوع دوغاب ها عدم توزیع یکنواخت سنگدانه ها در مخلوط باعث ته نشست در جداره های سیستم انتقال خواهد شد که این امر ساینده گی بیشتر تجهیزات تزریق را در پی خواهد داشت [۱]. لذا جهت افزایش میزان گرانروی مخلوط و بهبود قابلیت پمپاژ آن و در نتیجه کاهش در میزان آب انداختگی و انرژی پمپاژ، همواره



اندازه دهانه سرنده (میکرون)

شکل ۲: نتایج آنالیز سرنده یک نمونه از ماسه مورد استفاده در کارگاه تهیه دوغاب مترو شیراز

مشکلاتی در سیستم حمل و نقل و تزریق دوغاب ایجاد نماید. با توجه به غلظت دوغاب بنتونیت که جهت تقویت خاصیت آب بندکنندگی طرح اختلاط قدیم در محیط اشباع استفاده می شده است، می توان در طرح اختلاط جدید در محیط خشک غلظت این دوغاب را پایین آورد که در ادامه توضیح داده می شود.

۴- تعیین طرح اختلاط جدید جهت محیط خشک

از آنجا که حفاری EPB TBM ها در ۲ کیلومتر آخر پروژه در بالای سطح آب زیرزمینی انجام می شود و محیط حفاری کاملاً خشک است، لذا نیازی به خاصیت آب بند کنندگی برای مخلوط پرکننده نیست و اصلاح طرح اختلاط کنونی که جهت محیط اشباع طراحی شده است ضروری به نظر می رسد. بنابراین تهیه دوغابی با ویسکوزیته ای که دارای قابلیت پمپاژ خوبی بوده و علاوه بر آب انداختگی کم، مقاومت مناسبی را در برابر بارهای وارده داشته باشد مد نظر است. همچنین مخلوط تهیه شده از لحاظ سایش می بایست کمترین تأثیر ممکن را بر روی سیستم انتقال، پمپاژ، تزریق و مخصوصاً برس های آب بند کننده دستگاه TBM داشته باشد. جهت تهیه طرح اختلاط مناسب آزمایش های مختلفی باید صورت گیرد. در بخش بعد نحوه تعیین طرح بهینه اختلاط توضیح داده شده است.

۴-۱- طراحی آزمایش ها



شکل ۴: تعیین مارش دوغاب بنتونیت بوسیله مخروط مارش ۵ میلیمتر

جدول ۴: نمونه ای از میزان مواد استفاده شده جهت تهیه مخلوط

میزان آزمایشی		میزان کلی		مصالح
مقدار	واحد	مقدار	واحد	
۵	lit	۶۰۰	lit	دوغاب بنتونیت
۰/۴۱۶	Kg	۵۰	Kg	سیمان
۶/۷۰	Kg	۸۰۰	Kg	ماسه
۰/۸۳۰	Kg	۱۰۰	Kg	پودر سنگ
۱۲/۹۴۶	Kg	۱۵۵۰	Kg	وزن کل

پس از تهیه شدن مخلوط ابتدا با استفاده از استوانه ۱۰۰۰ سانتی متر مکعبی، میزان چگالی دوغاب حاصله اندازه گیری و با عبور دادن مقداری دوغاب از سرند شماره ۴، با استفاده از مخروط مارش (با خروجی ۱۰ میلی متر)، میزان مارش آن اندازه گیری شد. همچنین با استفاده از صفحه لمباردی مقدار مقاومت برشی مخلوط (پارامتر لمباردی) اندازه گیری شد. در این روش از یک صفحه فلزی نازک با ابعاد ۱۵ سانتی متر (صفحه لمباردی)^۱ و به ضخامت سه میلیمتر استفاده می شود که آن را ابتدا وزن نموده و سپس در ظرفی از دوغاب داخل نموده و سپس خارج می کنند و پس از اینکه دیگر از آن دوغابی چکه نکرد آن را مجدداً وزن می نمایند. از اختلاف وزن (Δw) بین صفحه خشک و حالتی که

موادی مانند بنتونیت به مخلوط اضافه می شود. ولی افزایش میزان گرانیوی مخلوط تا حد معینی مفید است و از آن میزان به بعد به علت ویسکوزیته بیش از حد، دوغاب قابلیت پمپاژ خود را از دست می دهد. به عبارت دیگر غلظت و چسبندگی ذرات مخلوط به حدی می رسد که قابلیت حرکت به روی یکدیگر را ندارند. لذا همواره سعی بر این است که گرانیوی مخلوط در حد قابل قبولی تنظیم شود تا علاوه بر کاهش میزان آب انداختگی، قابلیت پمپاژ مخلوط نیز افزایش یابد [۵].

پس از تهیه دوغاب بنتونیت میزان مارش آن بوسیله مخروط مارش ۵ میلی متر (شکل ۴)، اندازه گیری شد. در جدول ۳ میزان مارش دوغاب بنتونیت با توجه به درصد پودر بنتونیت (موجود در کارگاه) در دوغاب بنتونیت آورده شده است.

جدول ۳: مارش دوغاب بنتونیت با توجه به در صد های مختلف پودر

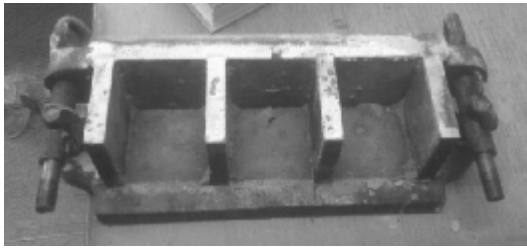
بنتونیت موجود در کارگاه در ۱ متر مکعب دوغاب

میزان مارش (ثانیه)	درصد بنتونیت
۳۱-۳۳	۱/۵
۳۲-۳۴	۳
۳۵-۳۷	۶
۳۷-۴۰	۹

سپس ۵ لیتر از دوغاب بنتونیت را جدا کرده و به ترتیب سایر مصالح موجود (سیمان، ماسه و پودر سنگ) با وزن های مشخص و به صورت پیوسته به مخلوط اضافه شد.

نمونه ای از میزان مواد استفاده شده جهت تهیه یک نمونه دوغاب در جدول ۴ آورده شده است.

¹ Lombardi Plate



شکل ۵: قالب های مکعبی ۵۰ میلی متری جهت تهیه نمونه از مخلوط های تهیه شده برای تعیین مقاومت فشاری



شکل ۶: شکل ظاهری نمونه ها پس از اندازه گیری مقاومت فشاری ۷ روزه

مخلوطی که در حال حاضر در کارگاه مترو شیراز مورد استفاده قرار می گیرد دارای قابلیت پمپاژ خوبی بوده و در راستای پمپاژ و تزریق در فضای خالی حلقوی، برای پمپ های موجود در کارگاه و همچنین سیستم انتقال دوغاب مشکلی را به همراه نداشته است. لذا با توجه به این نکات و آزمایش های که بر روی مخلوط دوغاب موجود صورت گرفت، تصمیم بر آن شد که مخلوط هدف نیز دارای چنین خصوصیات رئولوژیکی باشد. علاوه بر اندازه گیری چگالی، آزمایش های مارش، آب انداختگی و صفحه لمباردی نیز بر روی مخلوط مورد استفاده جهت محیط اشباع انجام شد که نتایج به دست آمده به شرح جدول ۵ است.

جدول ۵: خصوصیات رئولوژیکی دوغاب استفاده شده جهت محیط اشباع در مترو شیراز

مقدار	واحد	آزمایش
۱۵۸۰	Kg/m ³	چگالی
۴۰-۴۳	ثانیه	مارش
۱/۶-۱/۷	Kg/m ²	صفحه لمباردی
حدود ۱۰	درصد	درصد آب انداختگی

یکی از مشکلات مخلوط مورد استفاده وجود درصد زیاد دوغاب بنتونیت جهت تقویت خاصیت آب بندی است. در حالت هایی نیز که مارش دوغاب رعایت نشود آب انداختگی دوغاب افزایش

آغشته به مایع است مقاومت آستانه (τ_0) دوغاب از رابطه ۱ به دست می آید:

$$\tau_0 = \Delta w / 2A \quad (1)$$

که در این رابطه A مساحت صفحه فلزی است.

پارامتر τ_0 نشان دهنده گرانشی، چسبندگی اولیه (مقاومت برشی اولیه) بین ذرات دوغاب و همچنین چسبندگی بین ذرات دوغاب و جداره سیستم انتقال است. مقاومت برشی اولیه از آن جهت اهمیت دارد که دوغاب مورد تزریق نیازمند انرژی اولیه ای جهت غلبه بر چسبندگی موجود بین ذرات و شروع حرکت و جریان یابی در میان لوله های تزریق بوده و از طرفی می بایست گرانشی و چسبندگی آن به اندازه ای باشد که فقط تا فاصله مورد نظر از نقطه تزریق جریان یافته و سپس در آن فاصله که نیروی برشی کمتر از مقاومت برشی اولیه شد، دوغاب شروع به گیرش یابد. مقاومت برشی اولیه بالا انرژی زیادی را جهت شروع و ادامه حرکت دوغاب به پمپ تحمیل می کند و مقاومت برشی اولیه پایین نیز باعث فرار دوغاب به نقاطی می شود که هدف تزریق نیستند [۵]. جهت اندازه گیری پارامتر لمباردی نیز از صفحه لمباردی ساخته شده در کارگاه استفاده شد.

پس از اندازه گیری چگالی و انجام آزمایش ها مارش و لمباردی بر روی مخلوط، نمونه هایی نیز برای محاسبه آب انداختگی و مقاومت فشاری ۷ روزه از مخلوط سرند شده برداشت شد. برای محاسبه آب انداختگی مخلوط نیز مطابق با استاندارد ASTM C940 میزان حجم آب جمع شده بر روی مخلوط نمونه را پس از ۳ ساعت اندازه گرفته که با تقسیم این حجم بر حجم اولیه مخلوط درصد آب انداختگی حاصل شد [۶].

جهت اندازه گیری مقاومت فشاری در این تحقیق، مطابق با استاندارد ASTM C109 از قالب های مکعبی ۵۰ میلی متری (شکل ۵) استفاده و نمونه های مکعبی پس از حدود ۲۴ ساعت از قالب بیرون آورده شده و پس از ۷ روز ماندن در آب آهک مقاومت آن ها اندازه گیری شد [۷ و ۸]. در شکل ۶ نیز نمایی از نمونه های شکسته شده نشان داده شده است.



شکل ۷: نمونه ای از برس های خورده شده در اثر تماس با مخلوط دارای سیمان بالا



شکل ۸: از بین رفتن خاصیت آب بند کنندگی برس در اثر کنده شدن تکه ای از آن

به علت نبود آب در فضای خالی ایجاد شده و گیرش سریعتر مخلوط در اثر جذب سریعتر آب دوغاب بوسیله محیط پیرامون آن، مشکلات یاد شده در محیط های خشک بیشتر بروز می کند.

در حقیقت مهمترین انتظار از مخلوط تهیه شده و بخصوص در محیط های خشک این است که فضای خالی حلقوی ایجاد شده را به خوبی پر کند و لذا داشتن مقاومت بالا برای مخلوط مد نظر نیست و در حقیقت داشتن حداقل مقاومتی برابر با خاک احاطه کننده فضای خالی حلقوی، نیاز مقاومتی دوغاب را برآورده می کند. بنابر این از آنجا که در طرح اختلاط فعلی که در حال انجام است میزان سیمان مصرفی در تهیه مخلوط حدود ۱۰۰ کیلوگرم است، و عدم نیاز به مقاومت بالا و گیرش سریعتر برای مخلوط در محیط های خشک و همچنین جهت جلوگیری از مشکلاتی که در اثر استفاده از مقدار سیمان بالاتر در مخلوط ایجاد می شود، می توان میزان سیمان مخلوط را کاهش داد.

خواهد یافت. لذا در مخلوط مورد نظر جهت محیط خشک سعی شده است که آب انداختگی مخلوط کاهش یابد. جهت دستیابی به این هدف می بایست که میزان دوغاب بنتونیت مخلوط کاهش یابد که به تبع آن میزان ماسه نیز افزایش می یابد، در نتیجه چگالی دوغاب نیز افزایش خواهد یافت.

۴-۲- تعیین میزان سیمان

وجود سیمان در مخلوط دارای معایب و مزایای خاصی است. استفاده از سیمان بیشتر در مخلوط باعث می شود که مقاومت نهایی مخلوط بالاتر رفته و همچنین زمان گیرش دوغاب کاهش یابد. همچنین استفاده از درصد سیمان بالاتر در مخلوط علاوه بر این که قابلیت پمپاژ مخلوط را بالا می برد، میزان آب انداختگی مخلوط را نیز کاهش می دهد. ولی هرچه میزان سیمان در مخلوط بالاتر رود علاوه بر اینکه قیمت تمام شده دوغاب افزایش می یابد، دارای تأثیرات بدی بر روی برس های آب بند کننده TBM است. هر چه درصد سیمان در مخلوط زیادتر باشد باعث گیرش سریع تر مخلوط شده و این گیرش سریع تر باعث می شود که آن قسمت مخلوط که در تماس با برس های آب بند کننده قرار دارد، در مواقع توقف دستگاه با نفوذ به درون منافذ برس ها و در نهایت گیرش یافتن آن، باعث کندن این برس ها شود که حتی کنده شدن یک تکه کوچک از این برس ها باعث می شود که برس به طور کل خاصیت آب بند کنندگی خود را در ناحیه ای از تونل حفر شده از دست بدهد. همچنین با نفوذ این دوغاب به درون برس های سیمی آب بند کننده و اشغال فضاهای خالی بین این برسها و گیرش یافتن آن، باعث می شود گریسی که جهت آب بند کردن این برس ها به درون این برس ها تزریق می شود اجازه ورود نیافته و برس خاصیت آب بند کنندگی خود را از دست بدهد و مخلوط با عبور از روزنه های ایجاد شده در این برس ها به سمت جبهه کار فرار کند. تمیز کردن و یا تعویض این برس های آب بند کننده بسیار مشکل آفرین و هزینه بر است که سعی می شود از برخورد با چنین مشکلی جلوگیری شود. در پروژه مترو شیراز نیز در عملیات تزریقی که قبلاً انجام گرفته است با چنین مشکلاتی برخورد شده است که در شکل های ۷ و ۸ نمونه هایی از برس های خورده و یا کنده شده نشان داده شده است.

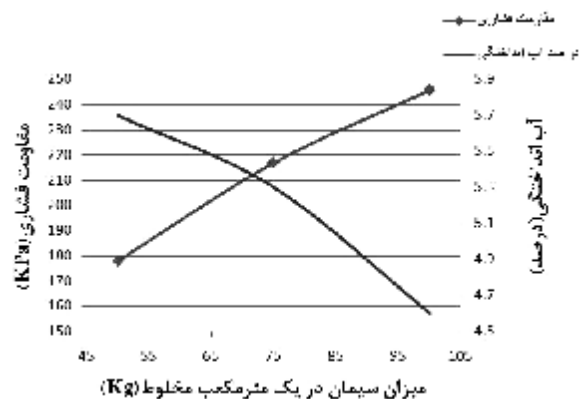
بنتونیت علاوه بر عیوبی که برای مخلوط حاصله فراهم می کند، صرف نظر از دردسرهای فراوان هنگام حمل آن جهت مخلوط کردن با آب، به علت سبک بودن دانه های بنتونیت و پخش شدن آن در هوا و تنفس آن بوسیله کارگرانی که با آن سروکار دارند و همچنین داشتن خاصیت تورمی، به علت ترکیب شیمیایی آن (پایه سدیمی بودن بنتونیت مصرفی) باعث مشکلات تنفسی برای کارگران می شود. همچنین به علت ترکیب شیمیایی آن، در تماس با پوست بدن سبب آسیب هایی به پوست بدن می شود. لذا هرچه میزان استفاده از آن کمتر باشد صرفنظر از کاهش مشکلات اجرایی، خطراتی را که سلامتی کارگران را تهدید می کند نیز کاهش می یابد.

از طرفی با توجه به درصد بالای رس موجود در ماسه مصرفی که خود خاصیت جذب آب و متورم شدن را داراست، درصد بالای بنتونیت در مخلوط باعث می شود که آب موجود در ترکیب هم بوسیله بنتونیت و هم بوسیله رس موجود در ماسه جذب و ویسکوزیته مخلوط نهایی در اثر افزایش میزان ماسه به سرعت بالا رود. لذا هرچه میزان بنتونیت در دوغاب بنتونیت تهیه شده کمتر باشد می توان از ماسه بیشتر و در نتیجه نسبت آب کمتری استفاده نمود که در آزمایش ها به انجام رسیده این موضوع به خوبی مشاهده می شود. جهت تعیین تأثیر درصد بنتونیت بر میزان سنگدانه قابل استفاده در مخلوط، پس از تهیه ۳۶ نمونه مختلف با نسبت های گوناگون سیمان، آب و سنگدانه (مجموع پودر سنگ و ماسه) و با توجه به اینکه مارش ۴۰ ثانیه برای دوغاب در حال استفاده، با توجه به قابلیت پمپاژ آن عدد مناسبی است، نمونه های با مارش ۴۰ ثانیه انتخاب می شوند که با بررسی آن ها نتایجی مطابق با جدول ۶ حاصل شد.

جدول ۶: میزان بنتونیت مصرفی در یک متر مکعب آب در دوغاب های با مارش یکسان (حدود ۴۰ ثانیه)

بنتونیت (درصد)	مارش (ثانیه)	نسبت سنگدانه به آب	چگالی (Kg/m^3)
۹/۶	۳۹	۱/۲۵	۱۵۵۰
۸	۳۹/۵	۱/۵	۱۵۸۷
۶/۴	۴۰/۵	۱/۹۲	۱۶۵۴
۳	۴۰/۵	۲/۴۴	۱۶۹۴
۱/۵	۳۹	۲/۶	۱۷۳۲

لذا مخلوط های متفاوتی با ۵۰ کیلو گرم، ۷۵ کیلو گرم و ۱۰۰ کیلو گرم سیمان تهیه و مطابق با استاندارد ASTM C109 جهت تعیین میزان مقاومت آن ها نمونه های مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی متر تهیه و مقاومت ۷ روزه آن ها تعیین شد که نتایج حاصله مطابق با نمودار شکل ۹ است. همچنین مطابق با استاندارد ASTM C940 میزان آب انداختگی مخلوط های تهیه شده با سیمان های مختلف نیز اندازه گیری شد که مطابق با شکل ۹ با افزایش سیمان میزان آن نیز کاهش یافته و بین ۴/۵ تا ۶ درصد متغیر است. مطابق با نمودار نشان داده شده و با توجه به این که حداکثر مقاومت خاک اندازه گیری شده در محل مورد مطالعه حدود ۱۲۵ KPa است [۱]، و از طرفی مقاومت ۷ روزه همه نمونه های تهیه شده، حتی با ۵۰ کیلو گرم سیمان، از مقاومت خاک احاطه کننده فضای خالی حلقوی بیشتر است. لذا با توجه به در نظر گرفتن فاکتورهای ایمنی بالاتر برای مخلوط و به علت درصد آب انداختگی نسبتاً پایین تر مخلوط های تهیه شده با ۷۵ کیلو گرم سیمان، میزان سیمان جهت تهیه مخلوط نهایی ۷۵ کیلوگرم تعیین شد.



شکل ۹: تأثیر میزان سیمان بر مقاومت فشاری ۷ روزه و آب انداختگی

۴-۳- تعیین میزان بنتونیت

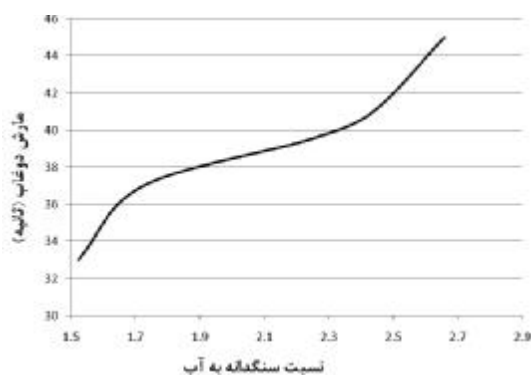
اضافه کردن بنتونیت به مخلوط باعث می شود که مخلوط حاصله حالت سوسپانسیونی داشته و قابلیت جریان یابی و پمپاژ مخلوط را افزایش می دهد. ولی افزایش بیش از اندازه بنتونیت به مخلوط علاوه بر غلیظ کردن بیش از حد مخلوط، به علت خاصیت جذب آب آن، باعث می شود که آب کافی جهت هیدراته شدن سیمان موجود در ترکیب باقی نمانده و در نتیجه مقاومت نهایی مخلوط به شدت کاهش می یابد [۹].

نظر گرفته شد. هر چند که می توان با $1/5$ درصد بنتونیت نیز مخلوط های مناسبی را تهیه نمود.

۴-۴- تعیین میزان سنگدانه

با توجه به نتایج آزمایش های قبل، مخلوط هایی که جهت تعیین میزان سنگدانه تهیه شد حاوی ۳ درصد بنتونیت و ۷۵ کیلو گرم سیمان است. لذا مخلوط هایی با نسبت های متفاوت سنگدانه به آب تهیه شده و علاوه بر تعیین چگالی، آزمایش های مارش، لمباردی و آب انداختگی نیز بر روی آن ها انجام شد. مطابق آزمایش های به عمل آمده نتایج زیر حاصل شد:

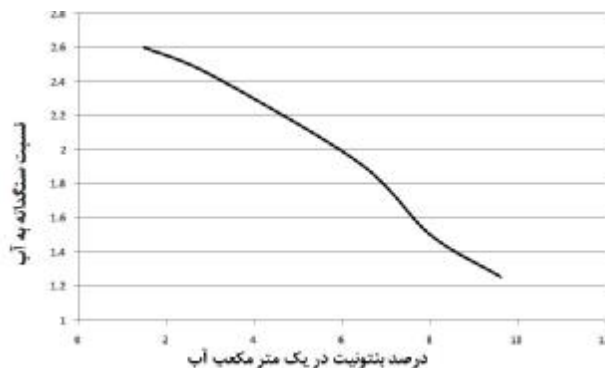
مطابق با نمودار شکل ۱۲، با افزایش نسبت مواد جامد، میزان مارش مخلوط های تهیه شده نیز افزایش می یابد، به گونه ای که با میزانی برابر با حدود $2/4$ تا $2/6$ برابر وزن آب، مارش حاصله با مارش مخلوط هدف (۴۳-۴۰ ثانیه) برابری می کند.



شکل ۱۲: تأثیر میزان سنگدانه بر مارش حاصله در مخلوط های تهیه شده با ۳ درصد بنتونیت و ۷۵ کیلوگرم سیمان

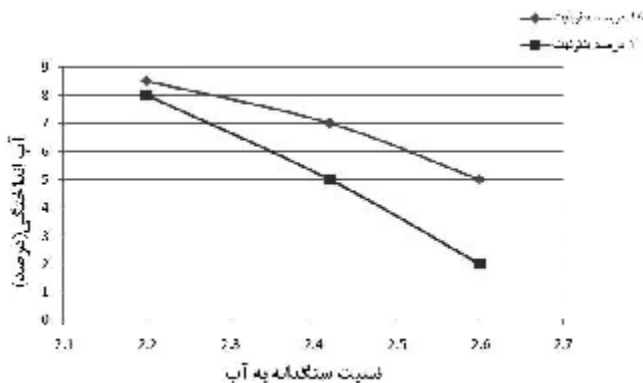
بر روی مخلوط های تهیه شده با ۳ درصد بنتونیت و ۷۵ کیلو سیمان، آزمایش لمباردی نیز انجام و مشاهده شد که با افزایش نسبت سنگدانه به آب میزان پارامتر لمباردی (مقاومت آستانه) نیز افزایش می یابد (شکل ۱۳). با توجه به این شکل مشاهده می شود که با مقدار سنگدانه ای با نسبت حدود $2/3$ تا $2/5$ برابر وزن آب، مقدار پارامتر لمباردی بدست آمده با مقدار محاسبه شده برای مخلوط هدف برابری می کند.

مطابق جدول ۶ و شکل ۱۰ مشاهده می شود که با کاهش درصد بنتونیت میزان سنگدانه ای که می توان اضافه کرد تا به مارش دلخواه رسید به طور قابل ملاحظه ای افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۰: تأثیر درصد بنتونیت بر میزان سنگدانه مصرفی در دوغاب های با مارش حدود ۴۰ ثانیه

البته با توجه به نمودار شکل ۱۱، جهت تهیه دوغاب هدف نمی توان میزان سنگدانه را از حد معینی افزایش داد. لذا با توجه به آزمایش ها به عمل آمده بر نمونه هایی که از دوغاب های با $1/5$ درصد و ۳ درصد بنتونیت تهیه شد مشاهده می شود که اختلاف در میزان آب انداختگی، در مخلوط های تهیه شده با نسبت های بالاتر مواد جامد واضح تر بوده و این نکته خود عامل محدود کننده ای در استفاده از میزان بنتونیت مصرفی و در نهایت حداکثر ممکن سنگدانه است.



شکل ۱۱: تأثیر میزان بنتونیت بر میزان آب انداختگی در دوغاب های با مارش ۴۰ ثانیه

با توجه به نمودار شکل ۱۱ و درصد آب انداختگی مناسب تر نمونه های با ۳ درصد بنتونیت میزان بنتونیت مخلوط هدف ۳ درصد در

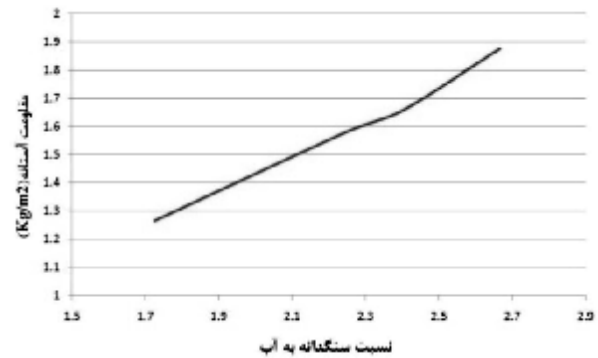
۴-۴-۱- تعیین میزان حداکثر ماسه در مخلوط

باتوجه به مشخص شدن میزان سیمان (۷۵ کیلوگرم)، بنتونیت (۳ درصد) و میزان سنگدانه (حدود ۲/۳ تا ۲/۶ برابر میزان آب) در آزمایش ها ی قبل، جهت تعیین حداکثر میزان ماسه قابل استفاده در مخلوط هدف نیز آزمایش هایی انجام شد. بدین منظور مخلوط هایی با نسبت های مختلف ماسه به آب تهیه و مارش آن ها تعیین شد که نتایج حاصله در جدول ۷ مشاهده می شود.

جدول ۷: تعیین میزان ماسه در مخلوط

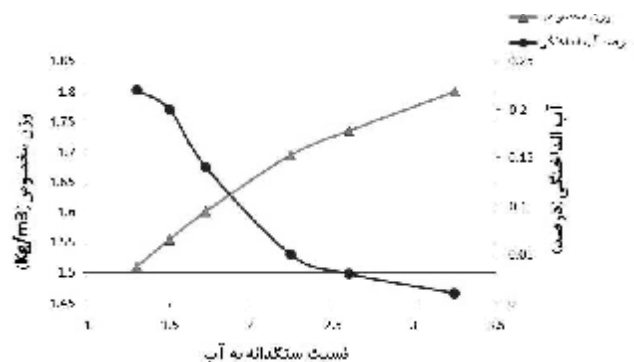
نسبت ماسه به آب	مارش (ثابته)
۱/۱۳	۳۳
۱/۳۳	۳۶
۱/۵۲	۳۷
۲	۴۰
۲/۲۴	۴۱/۵
۲/۴۶	۴۴
۲/۵۳	۴۷
۲/۶۶	غیر قابل اندازه گیری
۳	غیر قابل اندازه گیری

مطابق جدول ۷ و همانطور که انتظار می رفت با افزایش میزان ماسه (به علت درصد بالای رس آن) میزان مارش نیز پیوسته افزایش می یابد به نحوی که از میزان حدود ۲/۵۵ برابری وزن آب و ویسکوزیته مخلوط به علت وجود رس در ترکیب ماسه و جذب آب موجود در مخلوط آنقدر افزایش می یابد که دیگر قابلیت عبور از سوراخ مخروط مارش را نداشته و این خود طبیعتاً بدین معنا است که مخلوط های تهیه شده با چنین نسبت هایی به هیچ وجه قابلیت پمپاژ خوبی را نیز نخواهند داشت و بنابراین حداکثر میزان ماسه ای که می توان به مخلوط اضافه نمود حدود ۲/۵ برابر وزن آب است (شکل ۱۵).



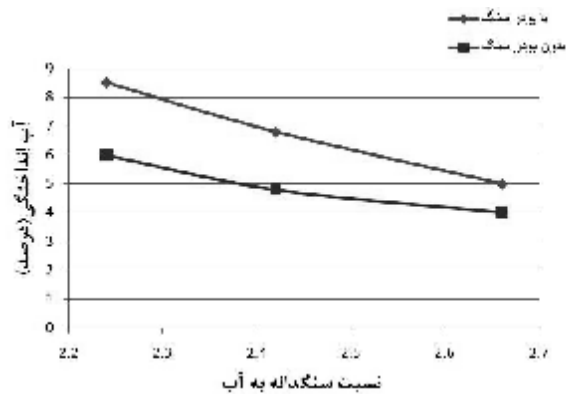
شکل ۱۳: مقدار پارامتر لمباردی بدست آمده برای مخلوط های تهیه شده با ۳ درصد بنتونیت و ۷۵ کیلوگرم سیمان

باتوجه به شکل های ۱۲ و ۱۳ و مقادیر به دست آمده از آزمایش های لمباردی و مارش، مشخص شد که اگر میزان سنگدانه در مخلوط حدوداً برابر با ۲/۳ تا ۲/۶ برابر میزان آب مصرفی باشد، پارامترهای بدست آمده به مقدار پارامتر های هدف نزدیکتر خواهند بود. همچنین مطابق شکل ۱۴، با توجه به این نسبت برای سنگدانه در مخلوط، مقدار چگالی برابر با 1650 Kg/m^3 تا 1750 Kg/m^3 حاصل می شود. همچنین میزان آب انداختگی که با این میزان سنگدانه در مخلوط حاصل می شود حدود ۳ تا ۵ درصد است به نحوی که حدود ۵ تا ۷ درصد از میزان آب انداختگی مخلوطی که در حال حاضر تهیه می شود کمتر است (شکل ۱۴). لذا جهت تعیین طرح اختلاط نهایی نیز میزان سنگدانه در ترکیب در حدود ۲/۳ تا ۲/۶ برابر میزان آب در نظر گرفته شده است.

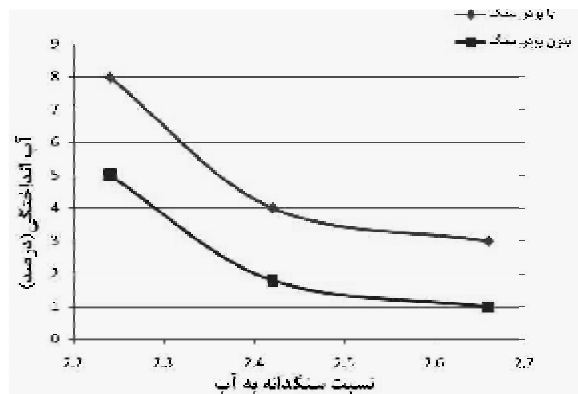


شکل ۱۴: تأثیر میزان مواد جامد بر چگالی و نسبت آب انداختگی در مخلوط های تهیه شده با ۳ درصد بنتونیت و ۷۵ کیلوگرم سیمان

همچنین برای تعیین حداکثر میزان ماسه و پودرسنگ در سنگدانه مورد استفاده جهت تهیه دوغاب نیز آزمایش هایی انجام شد که شرح آزمایش ها و نتایج آن ها در ادامه بیان شده است.

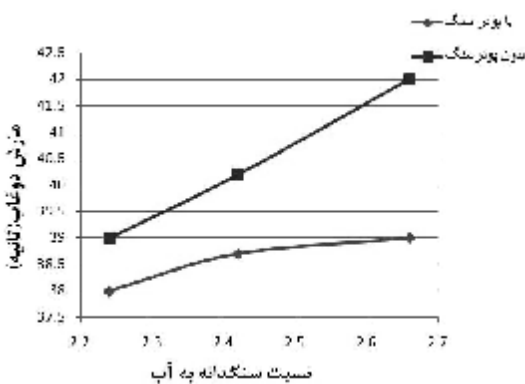


شکل ۱۶: تأثیر حضور پودر سنگ بر میزان آب انداختگی در مخلوطهای تهیه شده با ۱/۵ درصد بنتونیت

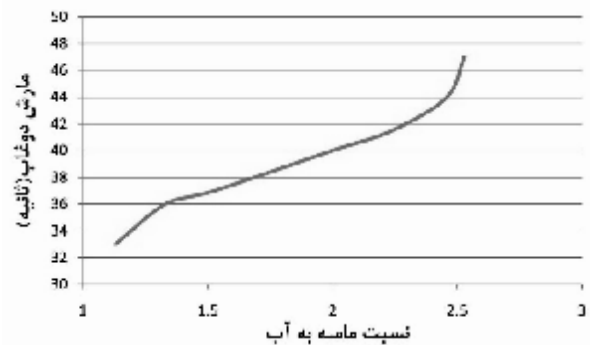


شکل ۱۷: تأثیر حضور پودر سنگ بر میزان آب انداختگی در مخلوطهای تهیه شده با ۳ درصد بنتونیت

همچنین با توجه به آزمایش‌ها مخروط مارش که بر مخلوط‌های تهیه شده حاوی پودر سنگ و بدون پودر سنگ انجام گرفت نتایجی مطابق با شکل‌های ۱۸ و ۱۹ حاصل شد.



شکل ۱۸: تأثیر حضور پودر سنگ بر میزان مارش در مخلوط‌های تهیه شده با ۱/۵ درصد بنتونیت



شکل ۱۵: تأثیر افزایش ماسه بر میزان مارش مخلوط (عدم قابلیت گرفتن مارش از نسبت ۲/۵۵ به بعد)

لذا مطابق نمودار شکل ۱۵ با توجه به اینکه با نسبت‌های بین ۲ تا ۲/۴۵ برابر وزن آب می‌توان مارشی برابر با حالت مطلوب (۴۰ تا ۴۳ تائیه) را بدست آورد، نسبت ماسه در مخلوط نیز تقریباً برابر با همین مقدار در نظر گرفته شده است.

۴-۴-۲- تعیین میزان پودر سنگ در سنگدانه

مهمترین دلیل استفاده از پودر سنگ به عنوان یک پرکننده، کاهش زمان گیرش مخلوط است. در حقیقت پس از تزریق دوغاب در فضای خالی حلقوی و مخصوصاً در محیط‌های اشباع، گیرش سریعتر مخلوط باعث عدم شسته شدن سیمان ترکیب بوسیله آب موجود در فضای خالی حلقوی می‌شود. شسته شدن سیمان در دوغاب باعث کاهش مقاومت نهایی دوغاب می‌شود. با توجه به خاصیتی که برای حضور پودر سنگ در مخلوط ذکر شد، وجود این ماده در ترکیب دوغاب دارای معایبی است. صرفنظر از بالاتر بودن قیمت پودر سنگ در قیاس با ماسه موجود، یکی از عیوب اساسی وجود پودر سنگ در ترکیب این است که به علت عدم گرد گوشه بودن ذرات پودر سنگ و در حقیقت گوشه‌های بسیار تیز ذرات این ماده، وجود آن در مخلوط باعث سایش شدید جداره‌های داخلی تجهیزات پمپاژ (مخصوصاً پمپ مربوط به واگن حمل دوغاب) و انتقال پرکننده می‌شود. همچنین حضور پودر سنگ در مخلوط، به علت چگالی بالاتر آن نسبت به ماسه مورد استفاده، باعث می‌شود که درصد آب انداختگی مخلوط نیز بالاتر رود. مطابق با شکل‌های ۱۶ و ۱۷، در مخلوط‌های تهیه شده با حضور ۱/۵ و ۳ درصد بنتونیت و در حضور یا عدم حضور پودر سنگ این مورد به خوبی قابل ملاحظه است (میزان پودر سنگ موجود در مخلوط ۱۰۰ کیلوگرم در ۱ متر مکعب دوغاب است).

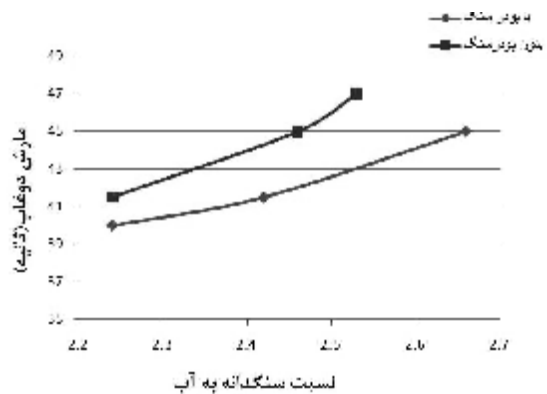
زمان گیرش و کاهش میزان آب انداختگی شده و در نتیجه قیمت تمام شده دوغاب افزایش می یابد. کاهش زمان گیرش ممکن است باعث سفت شدن زود هنگام دوغاب شده و به برس های آب بند کننده TBM آسیب جدی وارد کند.

- با توجه به درصد بالای رس موجود در ماسه بادی مصرفی جهت تهیه دوغاب در مترو شیراز که خود خاصیت جذب آب و متورم شدن را دارا است، در صد بنتونیت بالا تر از ۳٪ باعث افزایش ویسکوزیته دوغاب و در نتیجه کاهش قابلیت پمپاژ دوغاب می شود.

- با افزایش نسبت سنگدانه (پودر سنگ و ماسه بادی) به آب، میزان مارش دوغاب و پارامتر لمباردی افزایش می یابد. بهترین نتیجه برای دوغاب جهت مترو شیراز با نسبت های حدود ۲/۳ تا ۲/۶ بدست آمد. در این حالت میزان آب انداختگی ۳٪ تا ۵٪ است که در محدوده مخلوط هدف قرار دارد.

با توجه به مطالعات انجام شده، دو طرح اختلاط دوغاب برای محیط خشک به عنوان طرح های بهینه مطابق جدول ۸ پیشنهاد شدند.

در دوغاب شماره یک و دو نسبت سنگدانه (ماسه بادی و پودر سنگ) به آب به ترتیب برابر با ۲/۶ و ۲/۴۲ است. همچنین نسبت ماسه به آب در دوغاب های شماره یک و دو به ترتیب برابر با ۲/۳۷ و ۲/۴۲ است، که با توجه به مارش دوغاب شماره یک (۴۱ ثانیه) و دوغاب شماره دو (۴۲/۵ ثانیه) و همچنین پارامتر لمباردی دوغاب شماره یک (۱/۶ کیلو گرم بر متر مربع) و دوغاب شماره دو (۱/۶۷ کیلو گرم بر متر مربع)، مخلوط این دو دوغاب در محدوده تعیین شده (مخلوط هدف) قرار می گیرند. همچنین با توجه به آزمایش های آب انداختگی به عمل آمده، میزان آب انداختگی هر دو مخلوط نیز نسبتاً کم است (۵٪ و ۳٪ به ترتیب برای دوغاب های شماره یک و دو) و بنابر این باتوجه به مقاومت فشاری بدست آمده از آن ها (۲۱۵ کیلو پاسکال و ۲۳۱ کیلو پاسکال به ترتیب برای دوغاب های شماره یک و دو)، این دو مخلوط می توانند نیاز های پروژه را به خوبی تأمین نمایند.



شکل ۱۹: تأثیر حضور پودر سنگ بر میزان مارش در مخلوطهای تهیه شده با ۳ درصد بنتونیت

همانطور که در شکل های ۱۸ و ۱۹ ملاحظه می شود اگر پودر سنگ از مخلوط حذف شود میزان مارش بالاتر خواهد بود که در مخلوط های با نسبت سنگدانه بیشتر این اختلاف در میزان مارش بیشتر است. مطابق آنچه که قبلاً ذکر شد در مخلوط هایی که با ۳ درصد بنتونیت تهیه شده است، در صورت عدم وجود پودر سنگ، در نسبت های بیش از ۲/۵۵ برابری مقدار آب، به علت ویسکوزیته بیش از اندازه مخلوط، نمی توان از مخلوط تهیه شده میزان مارش را اندازه گرفت. با توجه به مزایا و معایب ذکر شده برای حضور و عدم حضور پودر سنگ در مخلوط، و با توجه به محیط حفاری که محیط خشکی است و آبی در فضای خالی حلقوی وجود ندارد و بنابراین خطری از لحاظ شسته شدن سیمان مخلوط را تهدید نمی کند، می توان پودر سنگی که تاکنون به علت اشباع بودن محیط به مخلوط اضافه می شده است را از ترکیب حذف نمود.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق امکان طراحی بهینه اختلاط دوغاب در منطقه خشک مسیر حفاری حفاری EPB TBM های مترو شیراز مورد بررسی قرار گرفت. تعداد ۳۶ آزمایش با نسبت های مختلف مواد تشکیل دهنده دوغاب شامل: سیمان، بنتونیت و سنگدانه (ماسه بادی و پودر سنگ) طراحی و انجام شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- افزایش میزان سیمان در دوغاب باعث افزایش مقاومت دوغاب، افزایش قابلیت پمپاژ، کاهش

جدول ۸: طرح اختلاط دوغاب های پیشنهادی جهت محیط خشک در پروژه مترو شیراز

دوغاب شماره دو		دوغاب شماره یک		مورد
مقدار	واحد	مقدار	واحد	
۷۵	Kg	۷۵	Kg	سیمان
۱۱۵۰	Kg	۱۰۷۰	Kg	ماسه
۴۷۵	lit	۴۵۰	lit	آب
۱۴/۲۵ (% وزن آب)	Kg	۱۳/۵ (% وزن آب)	Kg	بنتونیت
۰	Kg	۱۰۰	Kg	پودر سنگ
۴۲/۵	ثانیه	۴۱	ثانیه	مارش دوغاب
۱/۶۷	Kg/m ²	۱/۶	Kg/m ²	پارامتر لمباردی
۱۷۰۰	Kg/m ³	۱۷۲۰	Kg/m ³	چگالی دوغاب
۲۳۱	KPa	۲۱۵	KPa	مقاومت فشاری
۳	درصد	۵	درصد	آب انداختگی

۵- نانواپلر، ای.، ۱۳۷۵، عملیات مهندسی تزریق. ترجمه:

مهندسین مشاور زابند آب. انتشارات صنعت سرا (علم و صنعت اصفهان).

- 6- ASTM; 2003; *Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*. C940.
- 7- ASTM; 2002; *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. C 109.
- 8- Sonebi, M. and McKendly, D.; 2008; *Effect of Mix Proportions on Rheological and Hardened Properties of Composite Cement Pastes*. The Open Construction and Building Technology Journal.
- 9- Warner, J.; 2004; *Practical Handbook of Grouting*; John Wiley & Sons.

منابع

- 1- Raymond, W. H.; 2003; "AUA Guidelines for Backfilling and Contact Grouting of Tunnels and Shafts", ASCE Press.
- ۲- مهندسان مشاور خدمات مهندسی مکانیک خاک، ۱۳۸۵، "گزارش آزمایشگاه مکانیک خاک و ژئوتکنیک مسیر قطار شهری شیراز"
- 3- Degussa Construction Chemicals. 2008; *Degussa Annulus Grout, System and Admixture*.
- 4- ASTM; 2002; *Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)*, c939.