چهل و دومین گردهمایی (همایش) ملی
علوم زمین
The 42nd National Geosciences Congress
www.geoconf.ir

تعیین طرح اختلاط بهینه دوغاب دوجزئی تزریقی در عملیات حفاری تونل مکانیزه (مطالعه موردی: پروژه خط ۷ قطارشهری تهران)

علی دلاکی[۱]، مجید نوریان بیدگلی[۲*]

[۱]دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان Ali.dallaki7495@grad.kashanu.ac.ir

[۲]عضو هیات علمی، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان noriyan@kashanu.ac.ir

چکیده

در تونل‌سازی به روش مکانیزه، بعد از نصب پوشش بتنی پیش‌ساخته (سگمنت)، بین سطح خارجی سیستم نگهداری نصب شده و محیط حفاری شده، فضایی خالی به وجود می‌آید. برای جلوگیری از ریزش احتمالی خاک و سنگ به داخل فضای مذکور و در نتیجه کنترل نشست سطح زمین ناشی از این ریزش، باید فضای خالی توسط ماده مناسبی پر شود. بدین منظور می‌توان از روش تزریق تماسی به کمک دوغاب استفاده نمود. انتخاب دوغاب مناسب برای انجام عملیات تزریق بسیار مهم است چرا که مخلوطی که تولید می‌شود باید در زمان اجرا، آب انداختگی کم و قابلیت پمپاژ خوبی داشته باشد. همچنین این دوغاب باید بدون ایجاد انسداد در سیستم‌های پمپاژ و انتقال، فضای خالی ایجاد شده را به طور کامل پر کند تا توانایی لازم برای تحمل فشارهای روباره را داشته باشد. از طرفی در مناطق اشباع از آب، دوغاب تولیدشده باید پس از رسیدن به گیرش اولیه، در برابر آب‌بردگی مقاومت کرده و سیستم نگهداری نصب شده را در برابر ورود آب‌های زیرزمینی به درون فضای حفر شده، آب‌بند کند. در این تحقیق، با توجه به شرایط اجرایی و زمین‌شناسی موجود در تونل خط ۷ قطارشهری تهران، پارامترهای تاثیرگذار بر کارآیی دوغاب دوجزئی تزریقی شامل؛ زمان آب‌انداختگی، ویسکوزیته (زمان قیف مارش)، زمان ژل‌شدگی و مقاومت فشاری، در ۹ طرح اختلاط منتخب، به صورت آزمایشگاهی بررسی شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که طرح شماره ۲۷، با میزان ۳۵۰ کیلوگرم سیمان، ۳۵ کیلوگرم بنتونیت، ۳/۵ کیلوگرم دیرگیر، ۸۷۲ کیلوگرم آب و ۷۰ کیلوگرم سیلیکات سدیم، برای ساخت یک متر مکعب دوغاب دوجزئی تزریقی دارای بیشترین میزان کارآیی است. لذا این طرح به عنوان یک طرح اختلاط فنی و اقتصادی برای ساخت دوغاب دوجزئی بهینه، با هدف تزریق دوغاب برای پرکردن پشت سگمنت در عملیات حفاری مکانیزه تونل مذکور، تعیین شده است.

واژه‌های کلیدی

تونل، حفاری مکانیزه، دوغاب دوجزئی تزریقی، طرح اختلاط بهینه، سیستم نگهداری، سگمنت.

۱. مقدمه

در حفاری مکانیزه تونل، به دلیل اختلاف قطر حفاری با قطر خارجی پوشش بتنی تونل، فضای پیرامون پوشش بتنی تونل (سگمنت) پس از عبور ماشین حفاری مکانیزه (TBM) تحت فشار سینه کار، خالی باقی می‌ماند. پرکردن فضای خالی ایجاد شده پشت سیستم نگهداری در انتهای سپر عقبی ماشین حفار مکانیزه، یکی از عملیات مهم در زمان حفاری است. پرکردن این فضا باعث جلوگیری از نشست زمین بالای تونل می‌شود و همچنین باعث می‌شود بار وارده از زمین به سگمنت، به صورت کنترل شده باشد. از طرفی پرکردن مداوم فضای مذکور، باعث به وجود آمدن لایه‌ای نفوذناپذیر پشت سگمنت و اطراف تونل می‌شود. همچنین درزه و شکاف‌های موجود طی این عملیات پر شده که کمک قابل توجهی را به گسکت‌ها برای آب‌بندی تونل می‌کند. یکی از روش‌های رایج پرکردن این فضا، تزریق به کمک انواع دوغاب سیمانی است. در صورت انجام صحیح عملیات تزریق دوغاب، نتایج زیر باید حاصل شود [۱]:

- پوشش بتنی تونل (سگمنت‌ها) در جای خود باید محکم شوند.
- از جابجایی سگمنت‌ها به علت وزن خود همچنین نیروهای وارده از طرف جک‌های پیشران جلوگیری شود.
- سگمنت‌ها وزن قسمت بکآپ را تحمل کنند.
- جلوگیری از نیروی شکست ایجاد شده و تبدیل آن به یک نیروی متقارن و همگن در اطراف رینگ.

به منظور دستیابی به موارد فوق و انجام عملیات تزریق موثر، رعایت موارد زیر ضروری است [۲]:

- تزریق بایستی بلافاصله پس از شروع عملیات حفاری آغاز شود تا از ایجاد فضای خالی بیشتر در پشت سگمنت و همچنین نشست سطح زمین جلوگیری شود.
- فضای خالی ایجاد شده پشت سگمنت به صورت منظم و کامل پرشود تا یک محیط یکپارچه و همگن ایجاد شود.
- ویسکوزیته دوغاب باید به اندازه‌ای باشد که دوغاب به راحتی در داخل لوله حرکت نموده و گیر نکند،
- دوغاب طی عملیات دچار آب‌انداختگی بیش از حد نشود.
- زمان گیرش دوغاب به اندازه‌ای باشد که دوغاب در داخل لوله گیر نکند.
- عملیات تزریق تا رسیدن به فشار مورد نظر که با فشار سینه‌کار نیز در ارتباط است، ادامه یابد.

با توجه به موارد ذکر شده و اینکه بار وارد بر سیستم نگهداری بلافاصله بعد از عبور سپر ماشین حفاری، به طور مستقیم تابع ویژگی‌های دوغاب تزریقی و مشخصات زمین پیرامون است، بنابراین انتخاب نوع دوغاب و ویژگی‌های آن باید با توجه به جنس و شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل انجام شود [۴-۳]. در عمل استفاده از انواع دوغاب با ترکیب و ویژگی‌های مختلف، با توجه به مصالح در دسترس و ملاحظات فنی و اقتصادی، وجود دارد. در این تحقیق، به بررسی امکان استفاده از دوغاب دوجزئی تزریقی در عملیات حفاری تونل مکانیزه پرداخته شده است. بر این اساس، با توجه به شرایط زمین‌شناسی موجود در تونل خط ۷ قطارشهری تهران، طرح اختلاط بهینه دوغاب دوجزئی تزریقی به منظور پرکردن فضای خالی پشت سگمنت ارائه شده است.

۲. دوغاب دوجزئی تزریقی

دوغاب‌های دوجزئی (Two-component grout) بر پایه سیمان، شامل دو جزء A و B است. جزء A معمولاً از سیمان، بنتونیت، آب و مواد افزودنی شامل؛ روان‌کننده و دیرگیر تشکیل شده است. جزء B به عنوان زودگیر عمل می‌کند و معمولاً از سیلیکات سدیم به علت کارایی، در دسترس بودن و قیمت مناسب استفاده می‌شود. تفاوت این دو جزء اصولاً در طرح اختلاط، غلظت و رفتار جزء A و مقدار جزء B است [۳-۲]. در جدول ۱ تعدادی از طرح اختلاط دوغاب دوجزئی که در پروژه‌های تونل‌سازی کشور ایتالیا استفاده شده، آورده شده است. به هر حال، از نظر فنی امکان استفاده از دوغاب‌های یک‌جزئی (کم سیمان) و دوجزئی و به منظور تزریق پرکننده در پروژه‌های تونلی وجود دارد. برخی از مزایا و معایب این دو نوع دوغاب تزریقی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. طرح اختلاط دوغاب دوجزئی مورد استفاده در پروژه‌های تونل‌سازی [۴]

پروژه	مقطع تونل (متر)	اجزاء	مصالح مصرفی	مقدار مصالح
پروژه کاستلانزا ایتالیا	۷/۸۵	A	سیمان	۳۴۱ کیلوگرم
			بنتونیت	۴۳ کیلوگرم
			آب	۸۱۲ کیلوگرم
			مواد تثبیت‌کننده	۵ کیلوگرم
			مواد ژل‌ساز	۴ کیلوگرم
		B	مواد سفت‌کننده	۷۰ کیلوگرم
خط C قطارشهری رم ایتالیا	۶/۷	A	سیمان	۳۱۰-۳۱۵ کیلوگرم
			بنتونیت	۳۰-۶۰ کیلوگرم
			مواد کندگیر	۳-۷ لیتر
			آب	۷۷۰-۸۲۰ کیلوگرم
		B	مواد تندگیر	۵۰-۱۰۰ لیتر
خط یک قطارشهری برشا ایتالیا	۹/۱۵	A	سیمان	۳۱۵ کیلوگرم
			بنتونیت	۴۲ کیلوگرم
			مواد کندگیر	۳ لیتر
			آب	۸۱۶ کیلوگرم
		B	مواد تندگیر	۶۰ لیتر

جدول ۲. مقایسه مزایا و معایب دوغاب‌های یک‌جزئی با دوجزئی [۲، ۴]

دوغاب دوجزئی		دوغاب یک‌جزئی	
مزایا	معایب	مزایا	معایب
امکان حمل با پمپاژ و خط لوله	نیاز به دقت زیاد در تنظیم زمان گیرش اولیه	هزینه تمام شده کمتر	بازه زمانی کارپذیری ملات کمتر از دوغاب دوجزئی
کارپذیری در بازه زمانی گسترده	نیاز به مقدار زیاد افزودنی ها	عدم نیاز یا نیاز کم به افزودنی های شیمیایی	امکان گرفتن مجاری و لوله های تزریق بیشتر
انعطاف در زمان گیرش اولیه و مقاومت نهایی	هزینه تمام شده مواد مصرفی بالاتر از یک‌جزئی	حساسیت کمتر نسبت به تغییر شرایط محیطی	-
کنترل مؤثرتر نشست زمین	حساسیت زیاد نسبت به دما و شرایط محیطی و احتمال انقباض زیاد	نیاز به مهارت و دقت کمتر در فرایند تهیه و تزریق	-

۳. پروژه خط ۷ قطارشهری تهران

خط ۷ قطارشهری تهران، دارای تونلی به طول ۲۶۳۸۰ متر است. کل مسیر به صورت زیرزمینی توسط دستگاه حفاری مکانیزه تمام مقطع از نوع متعادل‌کننده فشار زمین (EPB-TBM)، اجرا شده است. در این تحقیق به طرح اختلاط دوغاب دوجزئی این تونل پرداخته شده است.

۱،۳. طرح اختلاط دوغاب دوجزئی تزریقی

با توجه به موارد ذکر شده در بخش‌های قبلی، انتخاب دوغاب مناسب برای تزریق پشت سگمنت‌ها و پرکردن پیرامون پوشش بتنی تونل، باید با در نظر گرفتن شرایط زمین، میزان پیشروی، بارهای وارد بر رینگ بتنی پس از تزریق، روش حمل، مصالح در دسترس و سایر الزامات مورد نیاز انجام شود. نوع دوغاب و مشخصات آن، تا حد زیادی به طراحی سیستم تزریق بر روی سپر و سیستم پشتیبان بستگی دارد. با توجه به اینکه در این پروژه از ماشین حفاری دست دوم استفاده می‌شود و بخش عمده ای از طراحی ماشین از قبل انجام شده است، طراحی دوغاب تزریق باید با توجه به این موضوع انجام شود. حمل دوغاب از پرتال (بچینگ) تا سیستم پشتیبانی نیز با استفاده از خط لوله و پمپاژ در نظر گرفته شده است.

- ترکیب و مشخصات جزء A

این جزء با توجه به نوع و مقدار مصالح مورد استفاده و وجود یا عدم وجود سنگدانه و پرکننده در ترکیب، ممکن است به صورت دوغاب یا ملات باشد. با توجه به روش حمل در نظر گرفته شده و ویژگی‌های سیستم تزریق، به ویژه نوع پمپ‌های در نظر گرفته شده برای تزریق در این پروژه، این جزء باید به صورت دوغاب (مایع) باشد [۵ ،۱]. در این حالت مصالح مورد نیاز شامل سیمان، بنتونیت، آب و افزودنی‌های روان‌کننده و دیرگیر (در صورت نیاز) می‌باشد، که مشخصات هر یک در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات مصالح مورد استفاده در پروژه خط ۷ قطارشهری تهران [۴]

مصالح	سازنده	وزن‌مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
سیمان	تهران	۳/۱۲۵
بنتونیت	کاوش	۲/۵۱
آب	شهری	۱
دیرگیر	پارسا	۱/۰۸

- ترکیب و مشخصات جزء B

جزء B شامل زودگیر است که با اضافه شدن به جزء A، باعث گیرش آن می شود. در این موارد، استفاده از زودگیرهای سیلیکاتی، به ویژه سیلیکات سدیم، به دلیل ارزان‌تر بودن، متداول است. مقدار این جزء با توجه به مشخصات مورد نیاز، می‌تواند متغیر باشد[۴]. این کار باید با آزمایشات لازم و با توجه به توصیه‌ها و پیشنهادهای سازنده افزودنی و با اخذ تأییدات لازم در مورد عملکرد ماده مورد استفاده و اثر شرایط محیطی مانند دما بر عملکرد آن، انجام می‌گیرد. مشخصات سیلیکات سدیم مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۴، آورده شده است.

جدول ۴. مشخصات سیلیکات سدیم مورد استفاده در پروژه خط ۷ قطارشهری تهران [۴]

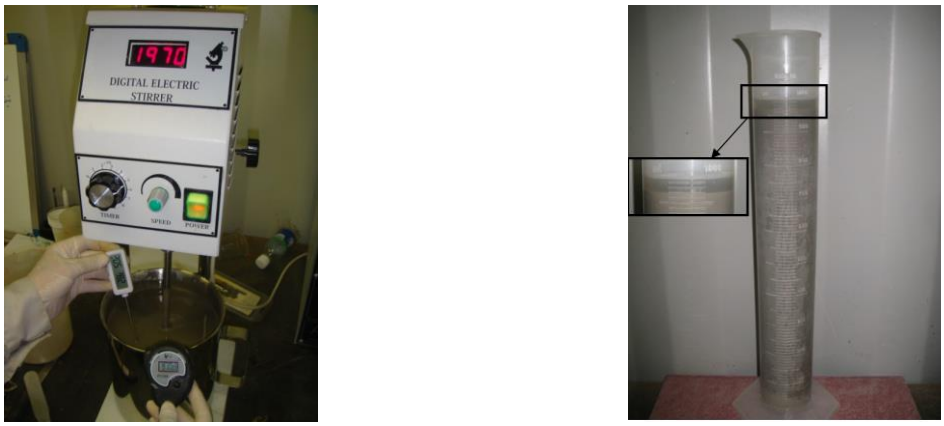
سازنده	مقدار Sio_2	مقدار Na_2o	نسبت	درصد جامد	وزن مخصوص (gr/cm^3)
۱	۲۰/۴۵	۶/۵۱	۳/۱۴	۲۶/۹۶	۱/۲۲۶
۲	۲۱/۷	۶/۱	۳/۵۶	۲۷/۸	۱/۲۳۱

۲،۳. بررسی آزمایشگاهی طرح اختلاط دوغاب دوجزئی تزریقی

برای رسیدن به یک طرح اختلاط که از نظر فنی کارایی لازم را داشته باشد، باید پارامترهای تاثیرگذار در کیفیت دوغاب ساخته شده به منظور تزریق پشت سگمنت مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. با این هدف، در این بخش به شرح عملیات انجام شده در آزمایشگاه پرداخت شده است.

۱،۲،۳. جزء A

از جمله ویژگی‌های مهم دوغاب، میزان آب‌انداختگی و قابلیت پمپاژ (گرانروی) است که به مقدار مصرفی سیمان، بنتونیت، آب و دیرگیر بستگی دارد. در این تحقیق برای اندازه‌گیری این دو پارامتر در جزء A، به ترتیب از استانداردهای ASTM 6910 و ASTM 940 استفاده شده است. در شکل ۱، نحوه اندازه‌گیری قابلیت پمپاژ دوغاب به کمک آزمایش قیف مارش و میزان آب‌انداختگی به کمک استوانه مدرج، نشان داده شده است.



شکل ۱. نحوه اندازه‌گیری زمان قیف مارش (شکل سمت چپ) و میزان آب‌انداختگی (شکل سمت راست) برای ساخت جزء A دوغاب دوجزئی

جزء A شامل موارد کنترلی دوغاب ساخته شده جهت تزریق می‌باشد که شامل میزان آب‌انداختگی و زمان قیف مارش است. پس از ترکیب این جزء با جزء B، در مرحله بعد، زمان ژل‌شدگی و مقاومت دوغاب دوجزئی نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند. به هر حال، جزء A بایستی طوری طراحی شود که مشخصات زیر را داشته باشد [۶]:

- روان بودن (سیالیت) مناسب
- رسیدن به مقاومت اولیه
- قابلیت پمپاژ در مسافت طولانی
- پایداری به لحاظ جدایش در زمان مواجهه با آب‌های زیرزمینی
- حداقل آب‌انداختگی یا حفظ روانی تا زمان لازم

در این تحقیق به منظور تهیه جزء A، مقادیر هر یک از مصالح به نوبت تغییر داده و پارامترهای تاثیرگذار در طرح نهایی اندازه‌گیری شده است. مشخصات ۹ طرح اجرا شده منتخب به همراه پارامترهای موثر جهت ساخت یک مترمکعب دوغاب جزء A، در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵. مشخصات طرح‌های منتخب و پارامترهای اندازه‌گیری شده دوغاب جزء A در آزمایشگاه [۲]

شماره طرح	سیمان (Kg)	بنتونیت (Kg)	دیرگیر (Kg)	آب (Kg)	دانسیته (gr/cm^3)	آب انداختگی (درصد پس از ۴ ساعت)	زمان قیف مارش (Sec)
۲۶	۳۵۰	۲۵	۳/۵	۸۷۵	۱۲۵۵	۷	۳۰

۲۷	۳۵۰	۳۵	۳/۵	۸۷۲	۱۲۶۵	۲/۴	۳۳
۲۸	۳۵۰	۴۵	۳/۵	۸۶۸	۱۲۸۵	۲	۳۸
۲۵	۳۸۰	۲۵	۳/۸	۸۶۶	۱۲۶۵	۴/۵	۳۰
۲۴	۳۸۰	۳۵	۳/۸	۸۶۲	۱۲۸۵	۲/۸	۳۳
۲۳	۳۸۰	۴۵	۳/۸	۸۵۸	۱۳۱۰	۷	۴۴
۲۹	۴۰۰	۲۵	۴	۸۵۹	۱۳۰۰	۵/۱	۳۰
۳۰	۴۰۰	۳۵	۴	۸۵۵	۱۳۳۰	۲	۳۸
۳۱	۴۰۰	۴۵	۴	۸۵۱	۱۳۵۰	۱/۲	۴۰

۲،۲،۳. جزء B

پس از انجام طرح‌های اختلاط مختلف و ساخت دوغاب جزء A می‌بایست جزء B به ترکیب اضافه شود تا بتوان با توجه به مقدار جزء B اضافه شده، پارامترهای زمان ژل‌شدگی و مقاومت فشاری را برای یک مترمکعب دوغاب اندازه‌گیری شود. در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری، از استاندارد ASTM C109 استفاده شده است. همچنین، زمان ژل شدگی نیز با استفاده از خاصیت افزایش شدید گرانروی در زمان ژل‌شدگی اندازه‌گیری شده است (شکل ۲). نتایج مربوط به زمان ژل‌شدگی برای طرح‌های مختلف در جدول ۶ ارائه شده است.

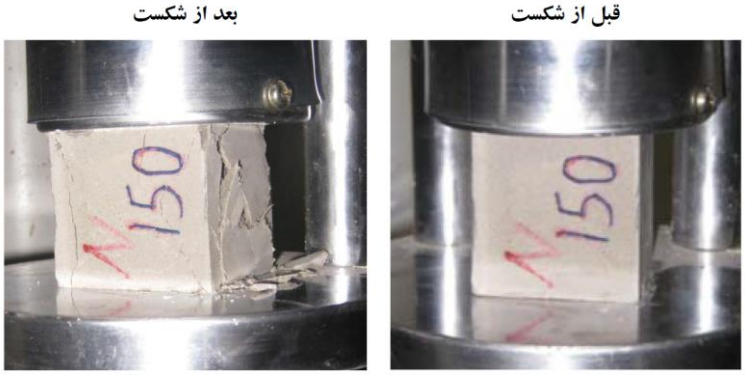
شکل ۲. نمایش ژل‌شدگی مناسب جزء B دوغاب تزریقی

جدول ۶ . نتایج مربوط به زمان ژل‌شدگی برای هر طرح اختلاط در جزء B دوغاب تزریقی

شماره طرح	مقدار جزء B (Kg)	زمان ژل-شدگی (Sec)	شماره طرح	مقدار جزء B (Kg)	زمان ژل-شدگی (Sec)	شماره طرح	مقدار جزء B (Kg)	زمان ژل‌شدگی (Sec)
	۴۰	۲۴		۴۰	۳۵		۵۵	۱۲
	۵۵	۲۲		۵۵	۳۳		۷۰	۱۳
۲۳	۷۰	۲۱	۲۶	۷۰	۱۶	۲۹	۹۰	۱۶
	۹۰	۲۳		۹۰	۱۹		۱۳۰	۲۴
	۱۳۰	۲۸		۲۰۰	۳۵۳۵		۲۰۰	۳۲

	۴۰	۳۵		۵۵	۱۵		۵۵	۱۲
	۵۵	۲۰		۷۰	۱۲		۷۰	۱۱
۲۴	۷۰	۱۶	۲۷	۹۰	۱۷/۷	۳۰	۹۰	۱۳
	۹۰	۲۱		۱۳۰	۲۷		۱۳۰	۱۹
	۱۳۰	۲۰		۲۰۰	۳۲		۲۰۰	۲۵
	۴۰	۳۴		۵۵	۱۳		۵۵	۱۴/۳
	۵۵	۳۰		۷۰	۱۲		۷۰	۱۲/۵
۲۵	۷۰	۱۲	۲۸	۹۰	۲۰	۳۱	۹۰	۱۶
	۹۰	۱۱		۱۳۰	۲۶		۱۳۰	۲۱
	۲۰۰	۳۲		۲۰۰	۳۰		۲۰۰	۲۷

به منظور تعیین مقاومت فشاری ۷ روزه، نمونه‌هایی مکعبی شکل به ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر تهیه شده است. در شکل ۳، نمونه‌های تهیه شکل قبل و بعد از شکست در آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است. نتایج مربوط به مقاومت فشاری ۷ روزه برای طرح‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است.لازم به ذکر است، این نمونه‌ها در دمای تقریبی ۲۸ درجه و رطوبت حدود ۸۰٪ تهیه شده است.



شکل ۳. نمونه‌های مکعبی شکل برای تعیین مقاومت فشاری قبل (شکل سمت راست) و بعد (شکل سمت چپ) از شکست

جدول ۷ . نتایج مربوط به مقاومت فشاری ۷ روزه برای طرح‌های اختلاط مختلف

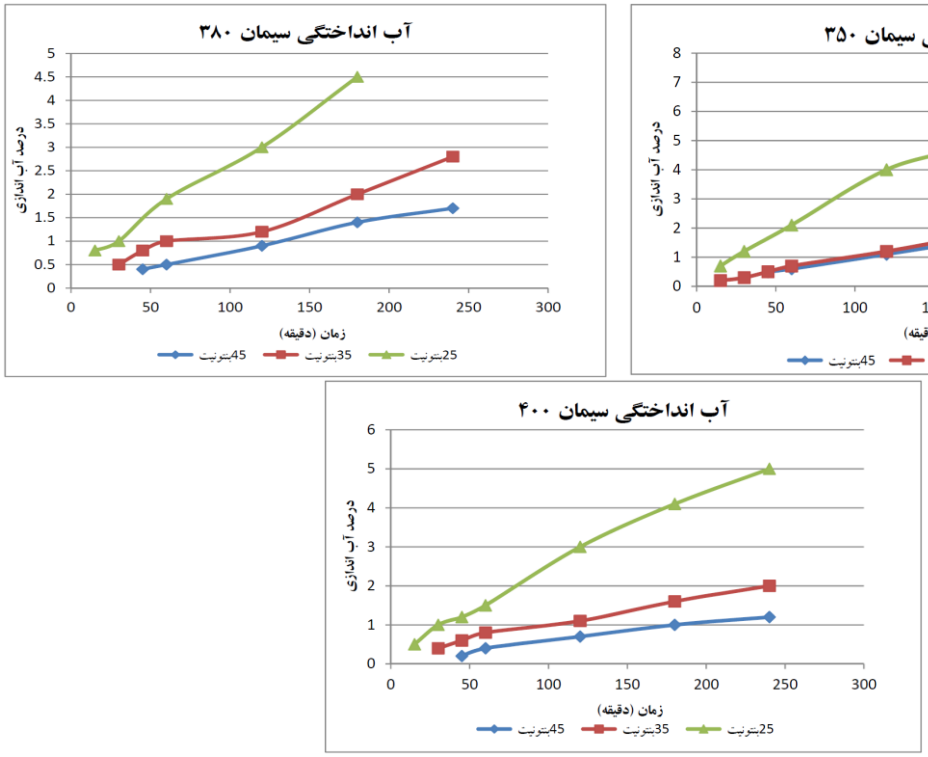
شماره طرح	شماره نمونه	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	شماره طرح	شماره نمونه	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	شماره طرح	شماره نمونه	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۲۳	N153	۱/۸	۲۶	N150	۱/۶۷	۲۹	N156	۱/۹۶
۲۴	N154	۲	۲۷	N151	۱/۹۲	۳۰	N157	۱/۹۶
۲۵	N155	۱/۹۲	۲۸	N152	۲	۳۱	N158	۱/۶۳

۳،۳. تحلیل و تفسیر نتایج

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در قسمت قبل، در این بخش تحلیل و تفسیر نتایج با هدف تعیین طرح اختلاط بهینه دوغاب دوجزئی ارائه شده است. بدین منظور، پس از بررسی طرح‌های آزمایش شده، با توجه به نتایج حاصله و ثبت پارامترهای موثر در طرح اختلاط دوغاب دوجزئی، ابتدا هر یک از پارمترها بصورت جداگانه بررسی شده و سپس با توجه به مقدار و اثر هر کدام از آنها، بهترین طرح از نظر فنی انتخاب شده است.

۱،۳،۳. آب‌انداختگی دوغاب

بر اساس تجربیات کسب شده از پروژه‌های قبلی، مقدار آب‌انداختگی جزء A پس از ۴ ساعت باید کمتر از ۵ درصد باشد. معمولاً مقدار بیشتر ممکن است باعث شود که در اثر انتقال جزء A از محل تهیه تا نقطه تزریق، دوغاب تولیدی شده ته‌نشین شود و لوله‌های انتقالی مسدود گردد [۷]. بر اساس نمودارهای ارائه شده در شکل ۴، نتایج نشان می‌دهد که طرح ۲۶ (سیمان ۳۵۰ و بنتونیت ۲۵) این شرایط را تامین نمی‌کنند و طرح ۲۹ (سیمان ۴۰۰ و بنتونیت ۲۵) نیز در شرایط مرزی قرار دارد. لذا این دو طرح نمی‌توانند شرایط لازم برای این پارامتر را فراهم کنند و از این بابت برای ارائه طرح نهایی مناسب تشخیص داده نشد.

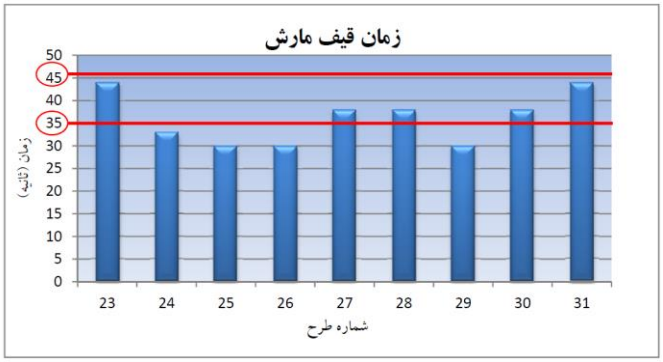


شکل ۴. تغییرات درصد آب‌انداختگی نسبت به زمان در طرح‌های مختلف دوغاب جزء A

۲،۳،۳. ویسکوزیته دوغاب (زمان قیف مارش)

بر اساس تجربیات کسب شده از پروژه‌های قبلی، زمان قیف مارش باید بین ۴۵-۳۵ ثانیه باشد. در این حالت، هر چه زمان قیف مارش کم‌تر باشد، مطلوب‌تر است. ولی از آنجا که کاهش این زمان می‌تواند منجر به افزایش آب‌انداختگی شود، لذا محدوده فوق باید رعایت شود [۷]. با توجه

به آزمایش‌های انجام شده در خصوص زمان قیف مارش، نتایج نشان می‌دهد (شکل ۵) که طرح‌های ۲۴ (سیمان ۳۸۰ و بنتونیت ۳۵)، ۲۵ (سیمان ۳۸۰ و بنتونیت ۲۵)، ۲۶ (سیمان ۳۵۰ و بنتونیت ۲۵) و ۲۹ (سیمان ۴۰۰ و بنتونیت ۲۵) این شرایط را تامین نمی‌کنند. لذا با توجه به اینکه این چهار طرح نمی‌توانند شرایط لازم برای این پارامتر را فراهم کنند، جهت ارائه طرح نهایی مناسب تشخیص داده نشد.

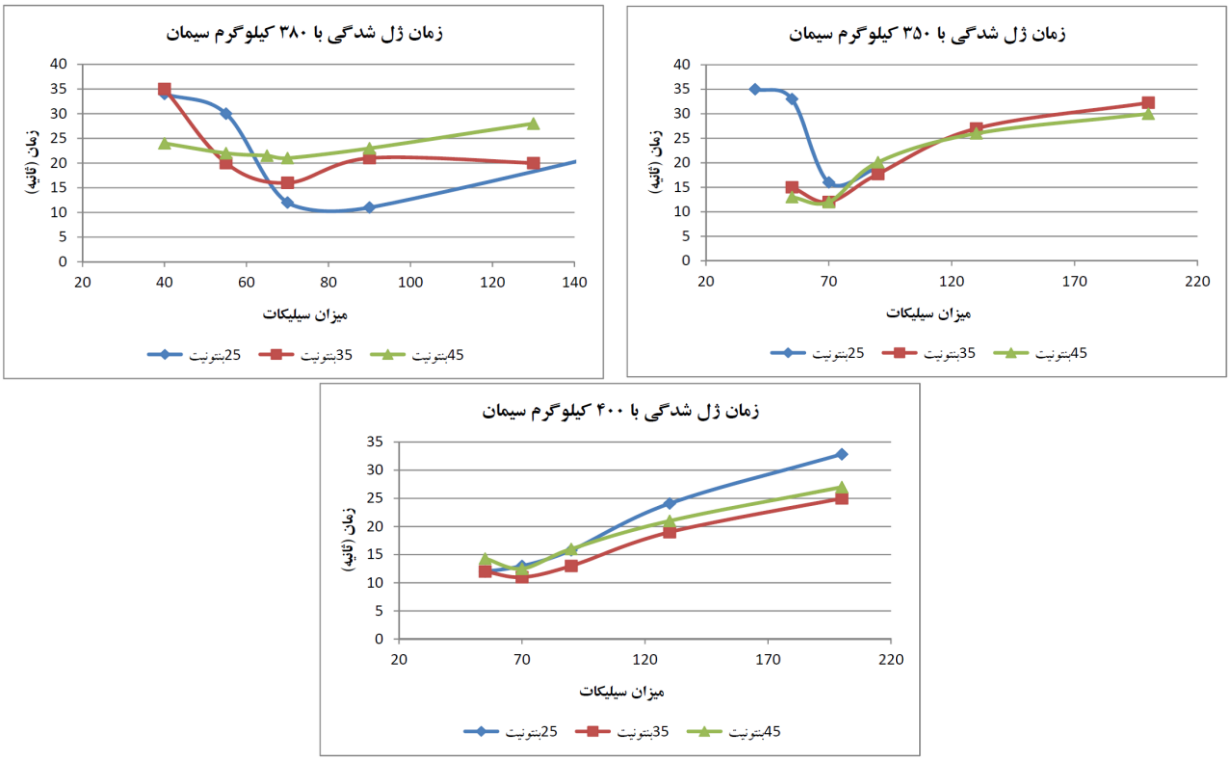


شکل ۵. زمان قیف مارش برای طرح‌های مختلف دوغاب جزء A

۳،۳،۳. زمان ژل‌شدگی

بر اساس تجربیات کسب شده از پروژه‌های قبلی، بسته به نوع و مقدار جزء B، زمان ژل‌شدگی مناسب باید بین ۸-۱۲ ثانیه باشد. در این حالت، اگر زمان ژل‌شدگی کم‌تر از حد توصیه شده باشد، با توجه به اینکه هنگام تزریق دو جزء A و B با هم ترکیب می‌شوند و مقداری از مسیر را در لوله‌های تزریق با هم طی می‌کنند، باعث گیرش سریع شده و در تزریق اختلال ایجاد می‌کند [۷]. از طرفی اگر این زمان بیشتر از حد توصیه شده باشد، پس از تزریق دوغاب دوجزئی به پشت سگمنت در تونل، گیرش و ژل‌شدگی حاصل نمی‌شود، لذا کارآیی دوغاب تزریقی پایین خواهد آمد.

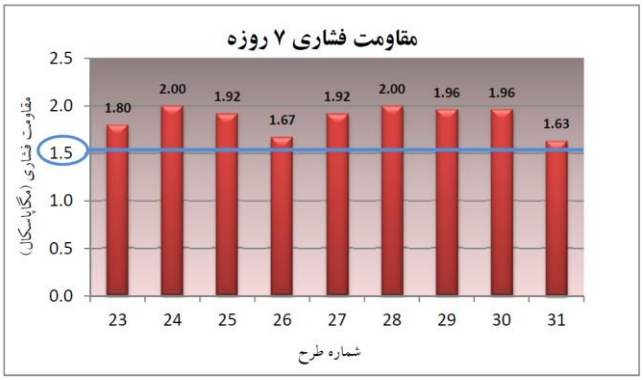
از آنجا که در این تحقیق از سیلیکات سدیم به عنوان جزء B استفاده شده است، لذا مقادیر مختلفی از آن برای هر طرح مورد آزمایش قرار گرفت تا بتوان به زمان ژلشدگی مناسب رسید. نتایج نشان داد که مقدار ۷۰ کیلوگرم سیلیکات سدیم، برای یک مترمکعب دوغاب جزء A، کمترین زمان ژل‌شدگی را حاصل می‌کند. لذا بر این اساس، در مرحله بعد زمان ژل‌شدگی بررسی گردید. با توجه به آزمایش‌های انجام شده در خصوص زمان ژل‌شدگی، نتایج نشان می‌دهد (شکل ۶) که طرح‌های ۲۳ (سیمان ۳۸۰ و بنتونیت ۴۵) طرح‌های ۲۴ (سیمان ۳۸۰ و بنتونیت ۳۵) و ۲۶ (سیمان ۳۵۰ و بنتونیت ۲۵) این شرایط را تامین نمی‌کنند. لذا با توجه به اینکه این سه طرح نمی‌توانند شرایط لازم برای این پارامتر را فراهم کنند، جهت ارائه طرح نهایی مناسب تشخیص داده نشد.



شکل ۶. تغییرات زمان ژل‌شدگی نسبت به زمان در طرح‌های مختلف دوغاب جزء B

۴،۳،۳. مقاومت فشاری

بر اساس تجربیات کسب شده از پروژه‌های قبلی، توصیه شده است که تا یک ساعت پس از تزریق، مقاومت دوغاب به ۰/۱ مگاپاسکال، تا ۲۴ ساعت بعد به ۰/۵ تا ۰/۹ مگاپاسکال و پس از ۷ روز حداقل به ۱/۵ مگاپاسکال، باید رسیده باشد [۷]. با توجه به نتایج بدست آمده و نمودار ارائه شده در شکل ۷، تمام طرح‌های آزمایش شده در این تحقیق، شرایط لازم این پارامتر را تامین می‌کنند.



شکل ۷. مقاومت فشاری ۷ روزه برای طرح‌های مختلف دوغاب جزء B

۵،۳،۳. جمع‌بندی نتایج

در جدول ۸، نتیجه نهایی ارزیابی تمامی پارامترهای موثر بر طرح اختلاط دوغاب دوجزئی مورد بررسی در این تحقیق، ارائه شده است. بر اساس این جدول، از نظر فنی چهار طرح ۲۷، ۲۸، ۳۰ و ۳۱ مناسب برای این پروژه است. مقایسه این طرح‌ها نشان می‌دهد که مقدار سیمان مصرفی برای ساخت یک مترمکعب دوغاب دو طرح ۳۰ و ۳۱ ، ۵۰ کیلوگرم بیشتر از دو طرح ۲۷ و ۲۸ است (جدول ۵). لذا از نظر اقتصادی، باید از این دو طرح صرف‌نظر کرد. همچنین از بین دو طرح ۲۷ و ۲۸، با توجه به اینکه سیمان مصرفی در هر دو مساوی است (جدول ۵)، طرح ۲۷ که مقدار بنتونیت آن کمتر از طرح ۲۸ است، به عنوان طرح اختلاط دوغاب دوجزئی فنی و اقتصادی (بهینه) می‌تواند انتخاب گردد.

جدول ۸. ارزیابی پارامترهای موثر بر انتخاب طرح اختلاط بهینه دوغاب دوجزئی

شماره طرح	آب-انداختگی	زمان قیف مارش	زمان ژل-شدگی	مقامت فشاری	انتخاب
۲۳	×	√	×	√	×
۲۴	×	×	×	√	×
۲۵	√	×	√	√	×
۲۶	×	×	×	√	×
۲۷	√	√	√	√	√
۲۸	√	√	√	√	√
۲۹	×	×	√	√	×
۳۰	√	√	√	√	√
۳۱	√	√	√	√	√

۴. نتیجه‌گیری

پر کردن موثر فضای خالی ایجاد شده پشت پوشش بتنی (سگمنت) با هدف کاهش نشست سطح زمین و آب‌بندی مناسب تونل، از عملیات مهم در حفاری مکانیزه است. تزریق دوغاب با فشار مناسب پشت سگمنت یکی از روش‌های رایج برای پر کردن فضای مذکور در زمان حرکت ماشین

حفاری است. لذا انتخاب درست دوغاب با کارآیی بالا، متناسب با ملزومات اجرایی و شرایط زمین‌شناسی منطقه، بسیار مهم است. این تحقیق با هدف ارائه طرح اختلاط بهینه دوغاب دوجزئی، برای عملیات تزریق پشت سگمنت تونل خط ۷ قطارشهری تهران، انجام شده است. بدین منظور با بررسی آزمایشگاهی طرح‌های مختلف برای اختلاط اجزای دوغاب دوجزئی، ۹ طرح منتخب از نظر میزان آب‌انداختگی، ویسکوزیته (زمان قیف مانش)، زمان ژل‌شدگی و مقاومت فشاری دوغاب با همدیگر مقایسه شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که طرح ۲۷، با میزان ۳۵۰ کیلوگرم سیمان، ۳۵ کیلوگرم بنتونیت، ۳/۵ کیلوگرم دیرگیر، ۸۷۲ کیلوگرم آب و ۷۰ کیلوگرم سیلیکات سدیم برای ساخت یک متر مکعب دوغاب دوجزئی تزریقی دارای بیشترین میزان کارآیی نسبت به دیگر طرح‌های مورد بررسی در این تحقیق است. لذا این طرح به عنوان یک طرح اختلاط فنی و اقتصادی برای ساخت دوغاب دوجزئی بهینه، با هدف تزریق دوغاب برای پرکردن پشت سگمنت در عملیات حفاری مکانیزه تونل، انتخاب گردید.

منابع

[1] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. Xu, S. eds., 2008. Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control. Taylor & Francis. London.

[2] Tuchscherer, W., Gurkan, E., Breuer, J. 1999. Single shell lining with reinforced concrete segments for extreme loads. Tunnel, 5.

[3] Pelizza, S., Peila, D., Borio, L., Dal Negro, E., Schulkins, R., Boscaro, A., 2010, Analysis of the performance of two component back-filling grout in tunnel boring machines operating under face pressure. In ITA-AITES World Tunnel Congress, 14-20.

[4] گزارش تزریق پشت سگمنت به شماره SCE 8710430 UNGR TUN MS RP 015 D.

[5] Pellegrini, L., Perruzza, P., 2009. Sao Paulo Metro Project–Control of Settlements in variable soil conditions through EPB pressure and bicomponent backfill grout. In Proc-Rapid Excav Tunneling Conf, 2, 1137-1153.

[6] Feddema, A., Möller, M., van der Zon, W.H., Hashimoto, T., 2020. ETAC two-component grout field test at Botlek rail tunnel. In Modern Tunneling Science, 809-815.

[7] Peila, D., Borio, L., Pelizza, S., 2011. The behaviour of a two-componenet back-filling grout used in a tunnel-boring machine. ACTA geotechnica Slovenica, 8(1), 5-15.