





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن

ارایه طرح اختلاط مناسب به منظور تزریق تماسی در پروژه تونل کمکی کانال
ابوذر تهران

سعید غفاری

اساتید راهنما :

دکتر حسین میرزائی نصیرآباد
دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

اساتید مشاور :

دکتر امید فروغ

شهریورماه ۱۳۹۲



مدیریت تحصیلات تکمیلی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

بسمه تعالی

فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سعید غفاری رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان "ارایه طرح اختلاط مناسب به منظور تزریق تماسی در پروژه تونل کمکی کانال ابوذر تهران" که در تاریخ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه : امتیاز) دفاع مجدد مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر حسین میرزایی نصیرآباد	استادیار	
۲- استاد راهنما	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر احمد رمضان زاده	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر شکرا... زارع	استادیار	

تأیید رئیس دانشکده

تقدیم

به

خانوداه صبورم

سپاس و تقدیر

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و مورد بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان و امدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز ...

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین. بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق" از پدر و مادر عزیزم این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یآوری بی‌چشم داشت برای من بوده‌اند.

از اساتید با کمالات و شایسته؛ جناب آقایان دکتر حسین میرزایی نصیر آباد و دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند.

از استاد صبور و با تقوا: جناب آقای دکتر امید فروغ که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید و از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقایان دکتر احمد رمضان‌زاده و دکتر شکرالله زارع که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گویم.

تعهد نامه

اینجانب سعید غفاری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **ارایه طرح اختلاط مناسب به منظور تزریق تماسی در پروژه تونل کمکی کانال ابوذر تهران** تحت راهنمایی دکتر حسین میرزائی نصیرآباد و دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می‌شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

با توسعه روزافزون مناطق شهری و گسترش شهرها و نیاز این جوامع به تأسیسات زیربنایی از قبیل تونل‌های حمل و نقل شهری، تونل‌های انتقال آب و...، نیاز به احداث سازه‌های زیرزمینی در این مناطق افزایش یافته است. یکی از روش‌های حفاری تونل، استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع (TBM) است. به منظور مقابله با نشست زمین، حفظ پایداری فضای حفر شده، جلوگیری از ورود آب زیرزمینی به داخل تونل و سایر مسائل اجرایی مانند سرعت بخشیدن به پیشروی پروژه، حفاری همزمان با نصب سگمنت‌های بتنی انجام می‌شود. به دلیل اختلاف قطر حفاری با قطر خارجی قطعات پیش ساخته بتنی، لازم است فضای خالی بین سگمنت و دیواره حفاری شده بلافاصله با مواد مناسب پر شود تا از مشکلات آتی مانند نشست و یا نشست آب به داخل تونل جلوگیری شود که از این عملیات با اصطلاح تزریق تماسی یاد می‌شود. مواد پرکننده معمولاً به صورت دوغاب به پشت سگمنت پمپ می‌شود. هدف اصلی در این تحقیق ارائه طرح اختلاط مناسب دوغاب تزریق تماسی در پروژه تونل کمکی کانال ابودر می‌باشد. دوغاب استفاده شده مخلوطی از موادی مانند سیمان، ماسه، بنتونیت، آب و مواد دیگر که هر کدام به نسبت خاصی به دوغاب اضافه می‌شوند، تولید می‌شود. دوغاب مناسب دوغابی خواهد بود که تمامی ملزومات اجرایی، فنی و اقتصادی را به خوبی تأمین نماید. دوغاب تهیه شده باید با در نظر گرفتن امکانات موجود پروژه قابلیت اجرایی داشته باشد، مقاومت و ویژگی‌های دیگر همچون آب اندازی و قابلیت پمپاژ، افت دوغاب تولید شده و روانی قابل قبول از نظر فنی حایز اهمیت می‌باشد و همچنین مصرف حداقل مصالحی که تعیین کننده قیمت تمام شده دوغاب هستند در به صرفه بودن دوغاب تهیه شده امری انکارناپذیر است. بنابراین دستیابی به معیارهای اقتصادی، اجرایی و فنی هم‌چون رسیدن به مقاومت مناسب، مقدار مطلوب آب اندازی و افت دوغاب نیازمند ارائه طرح اختلاط مناسب با توجه به شرایط پروژه می‌باشد. بدین منظور آزمایشات مختلفی انجام شد تا مصالح مورد استفاده در دستیابی به این معیارها به نحو بهینه انتخاب شوند. در این پژوهش ۴۲ نمونه

آزمایشگاهی (طرح اختلاط دوغاب) مختلف با نسبت‌های متفاوت مصالح تشکیل دهنده دوغاب تهیه شده است. برای هر نمونه مقاومت تراکمی تک محوره ۲۴ ساعته، ۷ روزه، درصد آب‌انداختگی و درصد افت دوغاب تعیین شده است. و در نهایت با ارزیابی نتایج حاصل از این آزمایشات طرح اختلاط مناسب دوغاب تماسی برای تونل کمکی کانال ابودر ارایه شده است. با بررسی‌های فنی و اقتصادی که انجام شد مقادیر مصالح سیمان، بنتونیت، ماسه بادی و آب به ترتیب ۳۴۰، ۱۰، ۱۱۰۰ و ۴۹۰ کیلوگرم در مترمکعب دوغاب تعیین شد.

کلمات کلیدی : تونل کمکی کانال ابودر، تونل‌سازی سپری مکانیزه، تزریق تماسی، طرح اختلاط

دوغاب، مقاومت تک محوره، آب‌انداختگی دوغاب، افت دوغاب

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول : مقدمه.....
۲	۱-۱ کلیات.....
۳	۲-۱ اهداف پایان نامه.....
۴	۳-۱ ضرورت انجام پایان نامه.....
۴	۴-۱ روش انجام تحقیق.....
۵	۵-۱ ساختار پایان نامه.....
۶	فصل دوم : فرآیند تزریق.....
۷	۱-۲ مقدمه.....
۱۱	۲-۲ هدف از تزریق پرکننده و الزامات آن.....
۱۴	۳-۲ مصالح مورد استفاده در دوغاب پرکننده.....
۱۵	۱-۳-۲ سیمان.....
۱۶	۱-۳-۲-۱ مواد شیمیایی موجود در سیمان.....
۱۶	۲-۳-۲-۱ انواع سیمان های استاندارد (پرتلند).....
۱۸	۳-۳-۲-۱ مزایا و معایب تغییر کمی سیمان در دوغاب.....
۲۰	۲-۳-۲ آب.....
۲۱	۳-۳-۲ مصالح دانه ای.....
۲۲	۴-۳-۲ افزودنی ها.....
۲۲	۱-۴-۳-۲ افزودنی های معدنی.....
۲۳	۲-۴-۳-۲ افزودنی های شیمیایی.....

۲۴	..... ۳-۴-۳-۲ سایر افزودنی‌ها.
۲۶	..... ۴-۲ انواع دوغاب‌ها (ملات‌ها).
۲۶	..... ۱-۴-۲ ملات بدون سیمان.
۲۶	..... ۲-۴-۲ ملات با سیمان کم.
۲۷	..... ۳-۴-۲ دوغاب پایه سیمانی.
۲۷	..... ۴-۴-۲ دوغاب دو جزئی.
۲۹	..... ۵-۲ کنترل کیفیت و فرآیند تزریق.
۳۱	..... ۱-۵-۲ حجم تزریق.
۳۲	..... ۲-۵-۲ فشار تزریق.
۳۴	..... ۶-۲ جمع‌بندی.
۳۶	..... فصل سوم : پروژه تونل کمکی کانال ابوذر.
۳۷	..... ۱-۳ مقدمه.
۳۸	..... ۲-۳ زمین‌شناسی منطقه.
۴۰	..... ۳-۳ واحدهای زمین‌شناسی.
۴۰	..... ۱-۳-۳ بخش دولومیتی سازند الیکا TR_e^d .
۴۰	..... ۲-۳-۳ سازند تیزکوه واحد K_1^I .
۴۰	..... ۳-۳-۳ واحد K_2^I .
۴۰	..... ۴-۳-۳ واحد E_r^t .
۴۱	..... ۴-۳ ویژگی‌های آبرفت‌های تهران و مسیر تونل.
۴۲	..... ۵-۳ روش حفر و سیستم نگهداری.
۴۵	..... ۶-۳ تزریق پرکننده در تونل ابوذر.

۴۷	..... جمع‌بندی..... ۷-۳
فصل چهارم : مرور مطالعات قبلی برای تعیین طرح اختلاط مناسب در تزریق	
۴۹	..... پرکننده.....
۵۰	..... ۱-۴ مقدمه.....
۵۱	..... ۲-۴ پروژه‌های اجرا شده در مناطق مختلف جهان.....
۵۱	..... ۱-۲-۴ دوغاب‌های دوجزیبی.....
۵۱	..... ۱-۱-۲-۴ پروژه خط C متروی رم.....
۵۲	..... ۲-۱-۲-۴ پروژه OMSHD در کشور نیوزلند.....
۵۳	..... ۳-۱-۲-۴ پروژه خط مترو صوفیه (بلغارستان).....
۵۴	..... ۲-۲-۴ دوغاب‌های تک جزیبی.....
۵۴	..... ۱-۲-۲-۴ خط یک متروی تورین (ایتالیا).....
۵۶	..... ۲-۲-۲-۴ متروی شیراز.....
۵۸	..... ۳-۴ جمع‌بندی.....
۶۰	فصل پنجم : تعیین طرح اختلاط مناسب تزریق پرکننده تونل کمکی کانال ابوذر...
۶۱	..... ۱-۵ مقدمه.....
۶۲	..... ۲-۵ اجزای استفاده شده در تهیه دوغاب.....
۶۲	..... ۱-۲-۵ سیمان.....
۶۴	..... ۲-۲-۵ بنتونیت.....
۶۷	..... ۳-۲-۵ سنگ‌دانه‌ها.....
۶۷	..... ۴-۲-۵ آب.....
۶۷	..... ۳-۵ پارامترهای کنترلی برای انتخاب طرح اختلاط مناسب.....

۶۸	..... ۱-۳-۵ مقاومت فشاری دوغاب
۷۱	..... ۲-۳-۵ آب‌انداختگی دوغاب
۷۲	..... ۳-۳-۵ افت یا انقباض دوغاب
۷۳	..... ۴-۳-۵ روانی دوغاب
۷۴	..... ۴-۵ نحوه تهیه دوغاب با طرح اختلاط مد نظر
۷۷	..... ۵-۵ بررسی اثر تغییر مقدار سیمان و بنتونیت بر افت و آب‌اندازی دوغاب
۷۹	..... ۶-۵ انتخاب سنگ‌دانه مناسب برای تهیه دوغاب پرکننده
۸۰	..... ۱-۶-۵ دوغاب‌های تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه ۰۲
۸۴	..... ۲-۶-۵ دوغاب‌های تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه بادی
۸۷	..... ۳-۶-۵ دوغاب‌های تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه بادی و پودر سنگ
۹۱	..... ۴-۶-۵ طرح اختلاط‌های تکمیلی با سنگ‌دانه ماسه بادی
۹۴	..... ۷-۵ ارائه طرح اختلاط مناسب دوغاب پرکننده
۹۵	..... ۸-۵ مقایسه مصرف سیمان در طرح اختلاط انتخابی با طرح پیشین
۹۵	..... ۹-۵ جمع‌بندی
۹۷	..... فصل ششم : بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۸	..... ۱-۶ مقدمه
۹۹	..... ۲-۶ نتیجه‌گیری
۱۰۱	..... ۳-۶ پیشنهادات
۱۰۳	..... منابع مأخذ

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: چال‌های تعبیه شده روی سگمنت‌ها جهت تزریق دوغاب..... ۹
- شکل ۲-۲: نمونه‌ای از تزریق از چال‌های روی سگمنت‌ها (تزریق شعاعی)..... ۱۰
- شکل ۳-۲: تقسیم‌بندی قسمت‌های مختلف تزریق از انتهای سپر (تزریق محوری)..... ۱۰
- شکل ۴-۲: شکل شماتیک فضای خالی بین لاینینگ تونل..... ۱۲
- شکل ۵-۲: نمونه‌ای از پرکردن فضای خالی بین پوشش بتنی و مقطع حفاری..... ۱۳
- شکل ۶-۲: نمودار مفهومی نشست سطح زمین در حفاری با سپر تعادلی فشار زمین..... ۱۴
- شکل ۷-۲: منحنی نشست در مسیر خط ۷ متروی تهران..... ۱۴
- شکل ۸-۲: نمونه‌ای از برس‌های خورده شده در اثر تماس با مخلوط دارای سیمان بالا..... ۱۹
- شکل ۹-۲: از بین رفتن خاصیت آب‌بند کنندگی برس در اثر کنده شدن تکه‌ای از آن..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲: نمونه از طرح اختلاط یک دوغاب پایه سیمانی..... ۲۸
- شکل ۱۱-۲: نمونه‌ای از طرح اختلاط یک دوغاب دو جزئی..... ۲۸
- شکل ۱۲-۲: فشار تزریق پر کردن دوغاب..... ۳۴
- شکل ۱-۳: موقعیت مسیر تونل در بخشی از نقشه تهران..... ۳۷
- شکل ۲-۳: تصویر رقومی نواحی کوهپایه‌ای تهران (مسیر تونل با خط آبی مشخص شده است). ۳۹
- شکل ۳-۳: چینه‌شناسی آبرفت‌های تهران..... ۴۲
- شکل ۴-۳: ماشین حفاری مورد استفاده در حفاری تونل کمکی کانال ابودر..... ۴۳
- شکل ۵-۳: اجزا و نمایی از پوشش سگمندی تونل..... ۴۵
- شکل ۶-۳: موقعیت مخزن و پمپ‌های تزریق بر روی سیستم پشتیبانی..... ۴۶
- شکل ۱-۴: نمونه‌ای از پرکننده فضای بین پوشش سگمندی و مقطع حفاری در تونل مترو رم... ۵۲
- شکل ۲-۴: نمایی از شیلد مورد استفاده در حفاری خط یک متروی تورین..... ۵۴

- شکل ۳-۴ : نمودار دانه‌بندی خاک خط یک متری تورین..... ۵۵
- شکل ۴-۳ : فلوجارت از مدار تزریق تک جزئی در مترو..... ۵۸
- شکل ۱-۵ : نمودار نتایج آزمایشات مقایسه مقاومت ۲۴ ساعته سیمان‌های تیپ ۲ و ۵..... ۶۳
- شکل ۲-۵ : نمودار نتایج آزمایشات مقایسه مقاومت ۷ روزه سیمان‌های تیپ ۲ و ۵..... ۶۴
- شکل ۳-۵ : عمل‌آوری بنتونیت با همزن دور بالا..... ۶۵
- شکل ۴-۵ : آزمایش اندازه‌گیری حد روانی بنتونیت..... ۶۶
- شکل ۵-۵ : مراحل مختلف تهیه نمونه برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری دوغاب..... ۷۰
- شکل ۶-۵ : بارگذاری نمونه‌های دوغاب..... ۷۱
- شکل ۷-۵ : اندازه‌گیری مقدار آب‌اندازی دوغاب..... ۷۲
- شکل ۸-۵ : اندازه‌گیری افت دوغاب..... ۷۳
- شکل ۹-۵ : مراحل تهیه و اندازه‌گیری وزن مخصوص دوغاب..... ۷۶
- شکل ۱۰-۵ : نمودار تأثیر تغییر مقدار سیمان و بنتونیت بر روی افت دوغاب..... ۷۷
- شکل ۱۱-۵ : نمودار تأثیر تغییر مقدار سیمان و بنتونیت بر روی آب‌اندازی دوغاب..... ۷۷
- شکل ۱۲-۵ : تأثیر نسبت آب به سیمان بر آب‌اندازی و افت دوغاب..... ۷۹
- شکل ۱۳-۵ : تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت تراکمی دوغاب..... ۷۹
- شکل ۱۴-۵ : مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته دوغاب تهیه شده از ماسه ۰۲ به ازای
مقادیر مختلف سیمان و بنتونیت..... ۸۲
- شکل ۱۵-۵ : مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه دوغاب تهیه شده از ماسه ۰۲ به ازای مقادیر
مختلف سیمان و بنتونیت..... ۸۲
- شکل ۱۶-۵ : مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته دوغاب تهیه شده از ماسه بادی به ازای
مقادیر مختلف سیمان و بنتونیت..... ۸۵
- شکل ۱۷-۵ : مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه دوغاب تهیه شده از ماسه بادی به ازای مقادیر

-
- ۸۵مختلف سیمان و بنتونیت.
- شکل ۵-۱۸ : مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته دوغاب تهیه شده از ماسه بادی و پودرسنگ
- ۸۸به ازای مقادیر مختلف سیمان.
- شکل ۵-۱۹ : مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه دوغاب تهیه شده از ماسه بادی و پودرسنگ
- ۸۸به ازای مقادیر مختلف سیمان.
- شکل ۵-۲۰ : مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته طرح‌های تکمیلی با ماسه بادی به ازای
- ۹۳مقادیر مختلف سیمان و بنتونیت.
- شکل ۵-۲۱ : مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه طرح‌های تکمیلی با ماسه بادی به ازای مقادیر
- ۹۳مختلف سیمان و بنتونیت.

فهرست جداول

۱۵	جدول ۱-۲ : مواد عمده تشکیل دهنده سیمان.....
۲۰	جدول ۲-۲ : معیار تأیید آب مشکوک برای تهیه ملات تزریق.....
۲۰	جدول ۳-۲ : محدودیت آب مورد استفاده از نظر ترکیب شیمیایی (ASTM C94).....
۲۱	جدول ۴-۲ : محدوده دانه بندی ماسه مطابق ASTM C33.....
۴۴	جدول ۱-۳ : مشخصات کلی سیستم‌های چیدمان.....
۵۲	جدول ۱-۴ : طرح اختلاط دوغاب دوجزئی استفاده شده در خط C متروی رم.....
۵۳	جدول ۲-۴ : طرح اختلاط دوغاب دوجزئی استفاده شده در پروژه OMSHD.....
۵۴	جدول ۳-۴ : طرح اختلاط دوغاب دوجزئی استفاده شده در متروی صوفیه.....
۵۵	جدول ۴-۴ : مشخصات TBM های مورد استفاده در خط یک متروی تورین.....
۵۵	جدول ۵-۴ : طرح اختلاط دوغاب استفاده شده در خط یک متروی تورین.....
۵۷	جدول ۶-۴ : طرح اختلاط دوغاب استفاده شده در متروی شیراز.....
۵۷	جدول ۷-۴ : نمونه‌هایی از طرح اختلاط استفاده شده در پروژه‌های ایران.....
۵۸	جدول ۸-۴ : نمونه‌هایی از طرح اختلاط تک چزبی پروژه‌های مختلف جهان.....
۷۵	جدول ۱-۵ : جدول طرح اختلاط دوغاب.....
	جدول ۲-۵ : مقدار مصالح مصرفی و پارامترهای کنترلی در طرح اختلاط‌های مختلف دوغاب
۸۱	تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه ۰۲ (در یک مترمکعب از دوغاب).....
	جدول ۳-۵ : مقدار مصالح مصرفی و پارامترهای کنترلی در طرح اختلاط‌های مختلف دوغاب
۸۴	تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه بادی (در یک مترمکعب از دوغاب).....
	جدول ۴-۵ : مقدار مصالح مصرفی و پارامترهای کنترلی در طرح اختلاط‌های مختلف دوغاب
۸۷	تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه بادی و پودر سنگ (در یک مترمکعب از دوغاب).....

-
- جدول ۵-۵ : طرح‌های اختلاط مناسب انتخاب شده بر مبنای نتایج کاربرد سه نوع سنگ-
دانه..... ۹۰
- جدول ۶-۵ : مقدار مصالح مصرفی و پارامترهای کنترلی در طرح اختلاط‌های تکمیلی دوغاب
تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه بادی (در یک مترمکعب از دوغاب)..... ۹۲
- جدول ۷-۵ : مشخصات طرح اختلاط مناسب انتخابی..... ۹۵

فصل اول

مقدمه

فصل اول

مقدمه

۱-۱ کلیات

توسعه روزافزون مناطق شهری و گسترش شهرنشینی و به سبب آن گسترش شهرها، نیاز این جوامع را به احداث تاسیسات زیربنایی افزایش داده است. احداث فضاهای زیربنایی از قبیل تونل‌های حمل و نقل شهری، تونل‌های انتقال آب و... در سال‌های اخیر پیشرفت‌های شایانی کرده به نحوی که روش‌های نوین جایگزین روش‌های سنتی شده است. یکی از تکنولوژی‌های نوین استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع^۱ (TBM) است. حفر فضاهای زیرزمینی چه به روش‌های سنتی و چه به روش‌های مکانیزه نوین همواره با مشکلاتی از قبیل نشست زمین، حفظ پایداری فضای حفر شده، ورود آب زیرزمینی به داخل تونل روبرو بوده است. به منظور مقابله با مشکلات ذکر شده و سایر مسائل اجرایی مانند سرعت بخشیدن به پیشروی پروژه، حفاری همزمان با نصب پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته^۲ انجام می‌شود. با نصب پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته فضای خالی پیش این پوشش‌ها به دلیل اختلاف قطر حفاری با قطر خارجی قطعات پیش‌ساخته بتنی باقی می‌ماند که لازم است این فضای خالی بلافاصله با مواد مناسب پر شود تا از مشکلات آتی مانند نشست و یا نشت آب به داخل تونل جلوگیری شود. مواد پرکننده معمولاً به صورت دوغاب به پشت سگمنت تزریق می‌شوند. دوغاب استفاده شده از مخلوط موادی مانند سیمان، ماسه، بنتونیت، آب و مواد دیگر تولید می‌شود. مقاومت و ویژگی‌های دیگر همچون آب‌اندازی، قابلیت پمپاژ و افت دوغاب تولید شده حایز اهمیت می‌باشند. دستیابی به مقاومت مناسب، مقدار مطلوب آب‌اندازی و افت دوغاب نیازمند ارائه طرح اختلاط مناسب است.

حفاری تونل سبب رهاسازی تنش‌های برجا زمین و در نتیجه جابجایی پیرامون محیط تونل می‌-

¹ Tunnel Boring Machine (TBM)

² Segment

شود. در حقیقت ایجاد فضای خالی به صورت لحظه‌ای و تهیه پوشش صلب برای پر کردن دقیق این فضای خالی ممکن نمی‌باشد. بنابراین مقدار مشخصی نشست زمین اتفاق خواهد افتاد. مهم‌ترین قسمت نشست بلافاصله پس از حفاری تونل (نشست آبی) اتفاق می‌افتد که عوامل مختلفی چون : پایداری جبهه کار تونل، نرخ پیشروی، زمان لازم برای نصب سیستم نگهداری تونل و زمان لازم برای پر کردن فضای خالی پشت سیستم نگهداری (تونل سازی مکانیزه) در آن دخیل هستند. یکی از راه‌های کارآمد و در دسترس، تزریق دوغاب تماسی^۱ در فضای خالی پشت سر، در حداقل زمان پس از حفاری، برای مقابله با نشست‌های شعاعی آبی می‌باشد که تا حدی نشست‌ها متوقف می‌شوند.

۱-۲ اهداف پایان‌نامه

تونل کمکی کانال ابوذر در بخش شرقی بلوار ابوذر و در مجاورت کانال سرخه‌حصار حد فاصل پل دوم تا بزرگراه افسریه احداث می‌شود. این تونل باهدف انتقال بخشی از آب کانال سرخه‌حصار و به منظور کاهش خطرات ناشی از عبور جریان آب کانال در دوره‌های سیلابی طراحی و اجرا می‌شود. طول این تونل حدود ۴۰۰۰ متر بوده و به صورت مکانیزه توسط یک دستگاه TBM فشار تعادلی زمین^۲، حفاری می‌شود. قطر حفاری آن ۴/۳۵ متر و قطر تمام شده آن ۳/۷ متر است.

انتخاب دوغاب^۳ مناسب برای انجام عملیات تزریق به پارامترهایی چون اهداف تزریق، مشخصات محیطی که تزریق در آن صورت می‌گیرد، خصوصیات مربوط به حمل و جابجایی دوغاب و ... بستگی دارد. علاوه بر این یکی از عمده‌ترین پارامترها برای انتخاب مواد برای تهیه دوغاب، در دسترس بودن آن مواد یا مسایل اقتصادی است. این دوغاب‌ها همواره شامل سیمان پرتلند یا یک سیمان ویژه و آب هستند و همچنین می‌توانند شامل مواد سیمانی اضافی، پرکننده‌ها و یک یا چند افزاینده اصلاح‌کننده خاصیت دوغاب باشند. مخلوطی که تولید می‌شود باید دارای آب‌اندازی کم و قابلیت پمپاژ خوبی باشد تا به خوبی و بدون ایجاد انسداد در سیستم‌های پمپاژ و انتقال، فضای خالی ایجاد شده را پر کند و

^۱ Contact grouting

^۲ Earth Pressure Balance

^۳ Grout

توانایی لازم جهت تحمل فشارهای وارده را داشته باشد. در مناطق اشباع از آب، دوغاب تولید شده باید پس از رسیدن به گیرش اولیه در برابر آب بردگی (شستوشوی دوغاب توسط آب‌های اطراف) مقاومت کرده و نگهداری نصب شده را در برابر هجوم آب‌های موجود به درون فضای حفر شده آب‌بند نماید. همچنین باید مقاومت دوغاب تزریقی مساوی یا بیشتر از محیط احاطه کننده باشد.

هدف اصلی در این تحقیق ارائه طرح اختلاط مناسب دوغاب پرکننده برای پر کردن فضای خالی بین قطعات پیش‌ساخته و مقطع حفاری است، تا بتوان بهترین نسبت مواد تشکیل‌دهنده دوغاب تعیین شود، به طوری که دوغاب تهیه شده بتواند پارامترهای کنترلی (مقاومت تراکمی تک محوره ۲۴ ساعته و ۷ روزه، افت، آب‌اندازی و روانی) را ارضاء نماید و درعین حال از نظر اقتصادی و دسترسی به مواد تشکیل‌دهنده و ... مناسب شرایط پروژه باشد.

۳-۱ ضرورت انجام پایان‌نامه

در اکثر پروژه‌های عمرانی تلاش بر این است که عملیات مختلف از نظر فنی و اقتصادی اهداف مد نظر را تأمین نماید. یکی از عملیات مهم در بحث تونل‌سازی مکانیزه در محیط‌های شهری تزریق دوغاب تماسی (تزریق دوغاب پشت سگمنت) است. در تزریق تماسی پشت سگمنت باید از ماده پرکننده (دوغاب) مناسب استفاده شود تا بتواند در عین حال که اهداف فنی تزریق را تضمین می‌کند اهداف اقتصادی را نیز تأمین نماید. بنابراین ضرورت دارد طرح اختلاط مناسبی تزریق طوری انتخاب شود که علاوه بر تأمین معیارهای فنی و اقتصادی، با شرایط محیطی سازگار بوده و از مشکلات ناشی از تونل‌سازی در محیط بکاهد (مقدار نشست را کاهش دهد).

۴-۱ روش انجام تحقیق

به منظور بررسی کیفیت مصالح مورد استفاده در آزمایش‌های طرح اختلاط دوغاب، هر کدام از مصالح براساس استاندارد (ASTM)^۱ مربوط به آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از این که کیفیت

¹ American Society for Testing and Material

مصالح بررسی شد و کیفیت آن‌ها مورد تأیید قرار گرفت، طرح اختلاط‌های مختلف برطبق شرایط پروژه ارایه شده است. طرح اختلاط‌ها به گونه‌ای ارایه شد که در کنار انتخاب مصالح اصلی، نسبت این مصالح در طرح اختلاط‌ها به نحوی تعیین شوند که پارامترهای طراحی دوغاب را ارضاء نمایند.

آزمایشات مربوط به تعیین هر یک از پارامترهای کنترلی که عبارت‌اند از : مقاومت تراکمی تک محوره (UCS)^۱ ۲۴ ساعته، مقاومت تراکمی تک محوره ۷ روزه، آب‌اندازی^۲، افت دوغاب و پمپ‌پذیری و روانی دوغاب برای هر طرح پیشنهادی انجام گرفت. در نهایت طرح اختلاطی که با توجه به شرایط پروژه قابل قبول بوده و پارامترهای کنترلی را ارضاء نمود به عنوان طرح اختلاط مناسب دوغاب تماسی در پروژه تونل کمکی ابوذر انتخاب گردید.

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر در ۵ فصل تدوین شده است :

در فصل اول کلیات، اهداف و ضرورت پایان‌نامه و روش انجام تحقیق بیان شده است. در فصل دوم فرآیند تزریق پرکننده در تونل‌های حفر مکانیزه، هدف تزریق پرکننده، مصالح مورد استفاده، معیارهای انتخاب طرح اختلاط و کنترل کیفیت فرآیند تزریق توضیح داده شده است. در فصل سوم به معرفی تونل کمکی کانال ابوذر تهران، زمین‌شناسی منطقه، روش حفر، سیستم نگهداری و تزریق پرکننده تونل پرداخته شده است. در فصل چهارم مطالعات موردی انجام شده برای تعیین طرح اختلاط در تونل سازی مکانیزه مرور و ارزیابی شده است. در فصل پنجم نتایج آزمایش‌های انجام شده برای تعیین طرح اختلاط مناسب دوغاب پرکننده تونل کمکی ابوذر ارایه شده و با ارزیابی نتایج حاصل از طرح‌های انجام گرفته طرح اختلاط مناسب ارائه شده است. در نهایت در فصل ششم، نتایج و یافته‌های تحقیق بحث شده و پیشنهادهایی برای تحقیقات بعدی ارائه شده است.

^۱ Uniaxial Compressive Strength (UCS)

^۲ Bleeding

فصل دوم

فرآیند تزریق پرکننده

فصل دوم

فرآیند تزریق پرکننده

۱-۲ مقدمه

عملیات تزریق غالباً بخشی از فعالیتهای اجرایی در پروژههای زیرزمینی مهندسی عمران و معدن کاری می باشد. نوع و پارامترهای اجرایی سازوکار فضای زیرزمینی، شرایط زمین شناسی و آب زیرزمینی حاکم بر محل، تعیین کننده روش عملیات تزریق بوده که می تواند هزینه و برنامه زمان بندی را تحت تأثیر قرار دهد. در حال حاضر تکنولوژی تزریق سازه های زیرزمینی موجود در خاک و سنگ به حدی گسترش یافته که مسائلی همچون طراحی عملیات تزریق، انتخاب تجهیزات و انتقال مصالح مناسب، مدنظر گرفته می شود.

تزریقی که در ارتباط با سازه های مهندسی نظیر تونل ها، اتاقک ها و عملیات معدنی بکار می رود، از لحاظ چارچوب اجرایی با عملیات تزریق که از سطح زمین انجام می گیرد مشابه است. در هر دو مورد عملیات تزریق برای پر کردن حفرات، شکاف ها یا فضاهای خالی کوچک موجود در مصالح زمین شناسی میزبان انجام گرفته تا ضمن اینکه مقدار نشست را کاهش می دهند، مصالح شالوده را نیز تقویت و تحکیم نموده و همچنین اندرکنش زمین- سازه را نیز بهبود بخشند [۱].

تزریق در خاک را می توان از سطح یا از همان فضای زیرسطحی انجام داد. تزریق زیرسطحی عموماً در سینه کار تونل انجام می شود و عوامل محیطی همچون دانه بندی خاک، تراز آب زیرزمینی، عمق سازه از سطح زمین و دسترسی سطحی به تجهیزات تزریق، تعیین کننده روش تزریق در پروژه هستند.

روش های تزریق در حفاری مکانیزه شامل تهیه و انتقال ملات تزریق به دستگاه حفاری و تزریق از طریق پمپ ها و لوله های خود دستگاه است. انواع روش های تزریق شامل تزریق در خاک، تزریق در

سنگ و تزریق سازه‌ای می‌باشند. تزریق سازه‌های زیرزمینی موجود در سنگ را می‌توان از سطح به طرف سازه و همچنین برعکس انجام داد. عواملی همچون زمین‌شناسی منطقه، عمق سازه تا سطح زمین، سطح آب زیرزمینی، نوع سنگ دربرگیرنده سازه، نوع روش حفاری و همچنین تجهیزات و هزینه تزریق از جمله عوامل تعیین کننده انتخاب روش تزریق در اینگونه سازه‌ها می‌باشند.

تزریق در سنگ به دو صورت تزریق تحکیمی و تزریق آب‌بند انجام می‌شود. تزریق در خاک را می‌توان از سطح و یا از همان فضای زیرسطحی انجام داد. تزریق در خاک به صورت تزریق با فشار بالا، تزریق تراکمی و تزریق نفوذی می‌باشد. از تزریق سازه‌ای برای بهبود سطح مشترک بین سازه و زمین استفاده می‌شود.

در حین انجام تزریق سازه‌ای هرگونه فضای خالی خاک که هنگام عملیات اجرایی باقی گذاشته شده، پر خواهد شد و به این ترتیب اطمینان لازم از تماس کامل سازه با زمین حاصل می‌گردد و از این رو انتقال بارهای بین مصالح تشکیل دهنده شالوده و سازه به حداکثر مقدار خود خواهد رسید [۱].

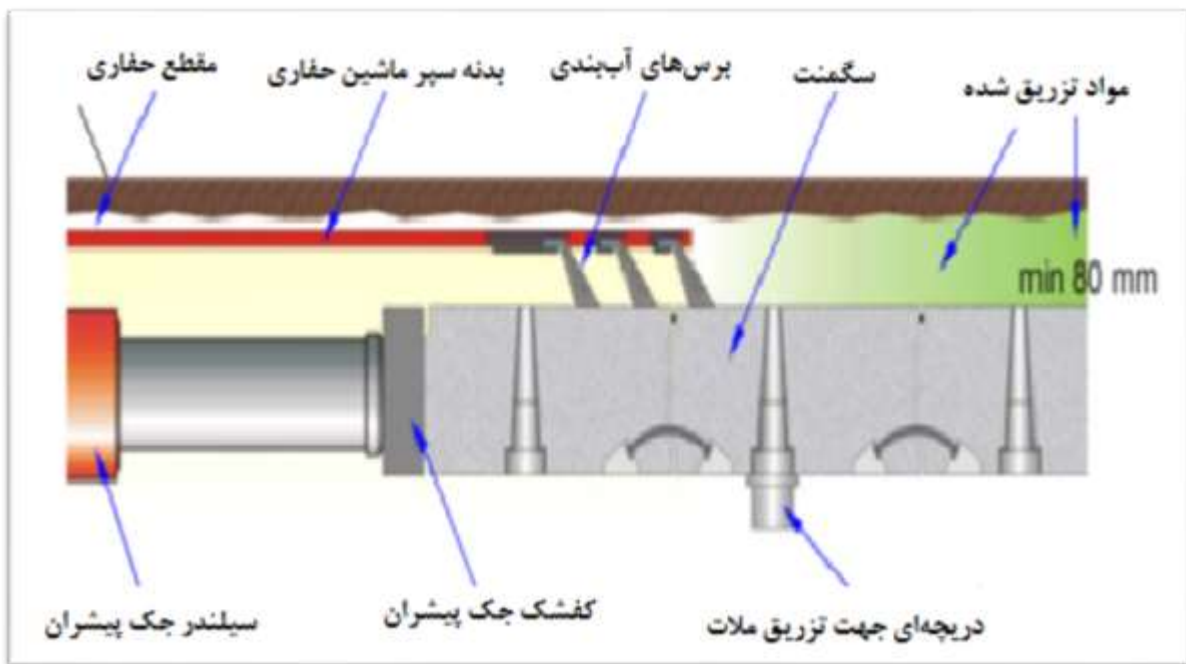
به دلیل اختلاف قطر حفاری و قطر خارجی پوشش تونل، فضای پیرامون پوشش تونل پس از عبور سپر، خالی باقی می‌ماند. عملیات لازم برای پر کردن این فضا تزریق پرکننده^۱ نامیده می‌شود. معمولاً به دلیل کاهش حجم^۲ مواد تزریق شده در اثر خشک شدن، مجدداً در قسمت فوقانی مقطع تونل فضای خالی ایجاد می‌شود. عملیات تکمیلی برای پر کردن این فضا نیز تزریق تماسی نامیده می‌شود.

روش‌های مختلفی برای پر کردن فضای خالی پشت سگمنت‌ها در حفاری به وسیله TBM وجود دارد. به طور کلی تزریق پشت پوشش سگمنتی تونل به دو روش تزریق طولی از انتهای سپر همزمان با پیشروی دستگاه و تزریق به صورت شعاعی از داخل سگمنت تقسیم‌بندی می‌شود. شکل‌های (۲-۱)، (۲-۲) و (۳-۲) نشان دهنده دو روش اشاره شده (طولی و شعاعی) تزریق پشت پوشش سگمنتی

^۱ Backfill grouting

^۲ Shrinkage

هستند. روش اول که تزریق طولی از انتهای سپر می‌باشد، بیش‌تر در مورد حفاری زمین‌های سست و توده سنگ‌های ریزشی و یا محیط‌های شهری که مساله نشست سطح زمین از اهمیت بالایی برخوردار است، کاربرد پیدا می‌کند که بلافاصله پس از خارج شدن رینگ سگمندی از داخل شیلد انتهایی دستگاه، قبل از ریزش مصالح داخل فضای خالی پشت سگمنت و پر شدن آن و یا نشست زمین، این فضا باید پر گردد. بدین منظور، لوله‌های داخل سپر انتهایی^۱ و سایر تجهیزات لازم در دستگاه تعبیه می‌شود. اما در مورد اکثر تونل‌های سنگی و حفاری در زمین‌های سخت‌تر، روش دوم بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد که مصالح از طریق سوراخ‌های تعبیه شده در سگمنت تزریق می‌گردد[۲].

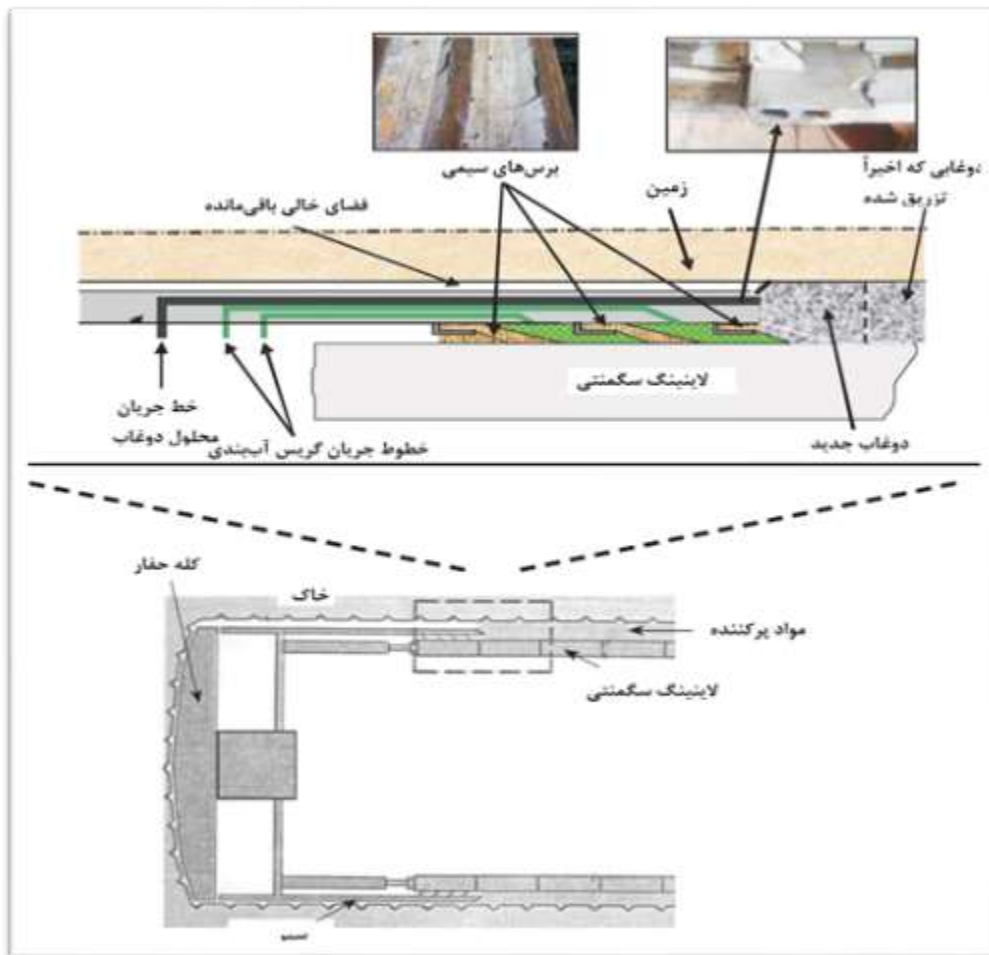


شکل ۱-۲: چال‌های تعبیه شده روی سگمنت‌ها برای تزریق دوغاب[۳]

¹ Tail shield



شکل ۲-۲ : نمونه‌ای از تزریق از چال‌های روی سگمنت‌ها (تزریق شعاعی) [۳]



شکل ۲-۳ : تقسیم‌بندی قسمت‌های مختلف تزریق از انتهای سپر (تزریق محوری) [۴]

در یک تقسیم‌بندی دیگر، روش‌های تزریق پرکننده پشت سگمنت را می‌توان بر حسب نوع و ترکیب مصالح مورد استفاده، تقسیم‌بندی نمود. جهت انجام عملیات تزریق پرکننده پشت سگمنت،

ترکیب‌های مختلفی از مصالح می‌توان بکار برد که نسبت و نوع این مواد بسته به اهداف و کاربرد تزریق، در دسترس بودن مصالح و اقتصادی بودن عملیات دارد. تزریق جداگانه شن نخودی و دوغاب و یا تزریق ملات دو روش متداول پر کردن فضای پشت سگمنت‌ها می‌باشند [۲].

۲-۲ هدف از تزریق پرکننده و الزامات آن

اختلاف اندازه بین حداقل شعاع سپر در ماشین تونل‌زنی (TBM) و شعاع بیرونی پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته تونل، بسته به اندازه سپر و حداقل قطر بیرونی پوشش بتنی در حدود ۱۵۰ تا ۳۷۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل (۲-۴) فضای خالی بین پوشش سگمنتی و مقطع حفاری و شکل (۲-۵) نمونه‌های پر شده از این فضای خالی را نشان می‌دهد.

پر کردن فضای خالی پشت سگمنت در فرآیند تونلسازی امری ضروری است که به عنوان فعالیت شاخص محسوب شده و با هدف تحقق موارد اساسی زیر انجام می‌شود :

- کاهش نشست سطحی در بالای تونل، در صورتی که فضای خالی پشت پوشش بتنی به دقت با دوغاب مناسب پر نشود، حرکت و ریزش زمین به داخل این فضای خالی باعث نشست سطحی خواهد شد. با توجه به قطر حفاری و قطر خارجی پوشش بتنی، حجم فضای بین زمین و سگمنت‌ها، در حدود ۷ درصد فضای حفاری است و در صورتی که به طور مؤثر پر نشود، در نهایت باعث نشست قابل‌توجه زمین خواهد شد. شکل (۲-۶) نمودار مفهومی نشست سطح زمین در حفاری با سپر تعادلی فشار زمین و شکل (۲-۷) منحنی نشست در مسیر متروی خط ۷ را نشان می‌دهد که با توجه به اشکال مذکور می‌توان به این نتیجه رسید که تقریباً بیش‌ترین مقدار نشست به بحث عدم تزریق صحیح و به موقع فضای خالی پشت سگمنت مربوط می‌شود.

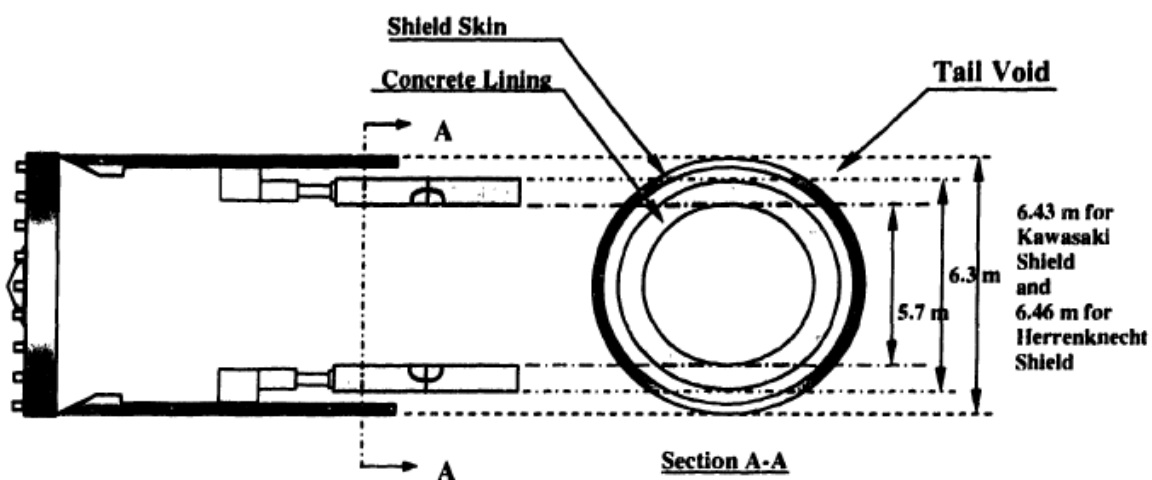
- با پر شدن کامل فضای خالی پشت سگمنت‌ها و در نتیجه ایجاد سطح تماس یکنواخت بین پوشش تونل و زمین، از اعمال فشارهای نقطه‌ای بر روی پوشش سگمنتی جلوگیری می‌شود.

• تثبیت و حفظ رینگ در محل خود پس از پیشروی سپر، اگر پوشش بتنی به وسیله مواد تزریق احاطه شود، باعث کاهش جابجایی و صدمه به پوشش بتنی خواهد شد.

• تکمیل آب بندی تونل، در صورتی که به دلایلی همچون خراب شدن گسکت‌های آب‌بندی یا پله دار شدن سگمنت‌ها در هنگام نصب (و در نتیجه عملکرد نامناسب گسکت‌ها) و دلایلی از این قبیل، آب‌بندی سگمنت‌ها تأمین نمی‌شود و بدین ترتیب نمی‌توان به یکی از اهداف اصلی تزریق در محیط‌هایی که با هجوم آب روبرو است رسید. تزریق مناسب و صحیح دوغاب و پر کردن کامل پشت سگمنت‌ها، این مشکل را برطرف می‌کند [۵].

بنابراین تزریق و پر کردن مؤثر، مناسب و کامل فضای خالی پشت سگمنت‌ها باعث به حداقل رسیدن نشست سطحی، تثبیت حلقه سگمنتی در جای خود و تأمین پایداری پوشش تونل در بلندمدت خواهد شد.

با توجه به مطالب فوق، از نظر تئوری تزریق پرکننده نقشی در تحکیم یا بهسازی زمین پیرامون تونل نداشته و از لحاظ سازه‌ای نیز سهمی از باربری پوشش تونل ندارد. اگرچه ممکن است در عمل چنین نقشی نیز ایفا کند.



شکل ۲-۴ : فضای خالی بین پوشش نگهداری و مقطع حفاری تونل [۶]

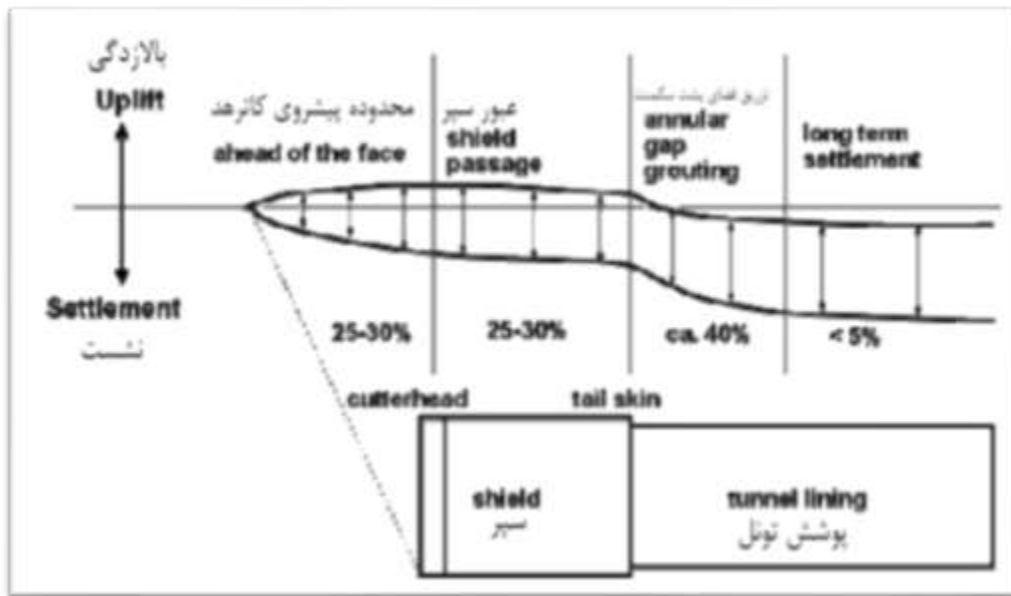


شکل ۲-۵: نمونه‌ای از پرکردن فضای خالی بین پوشش بتنی و مقطع حفاری [۴]

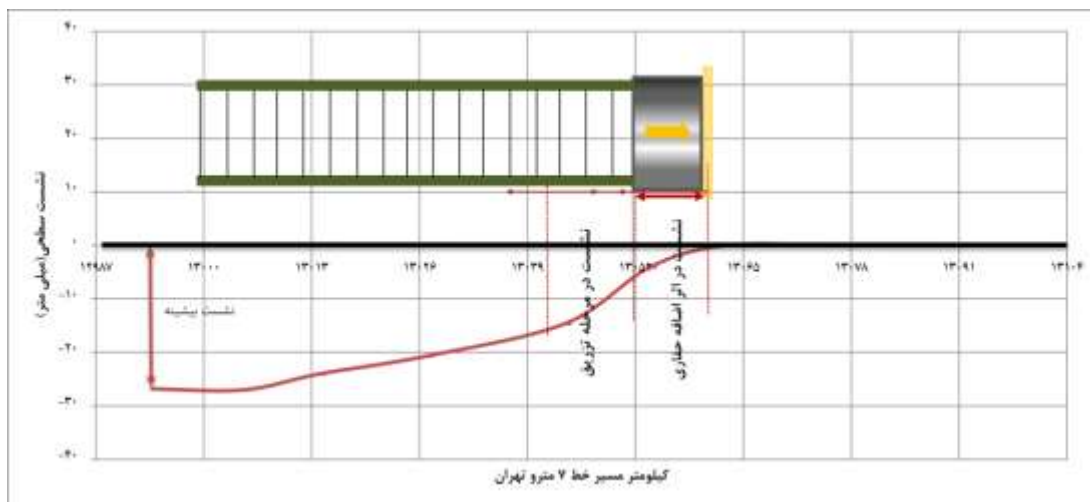
با توجه به نقش دوغاب به عنوان پرکننده بین زمین و پوشش تونل، ویژگی‌های عمده آن از

جهت سازه‌ای عبارتند از :

- پیشگیری از بالازدگی و شناوری رینگ‌ها.
- پیشگیری از نشست.
- ممانعت از انحراف رینگ‌ها.
- انتقال بار زمین به پوشش تونل به صورت یکنواخت.
- کمک به آب‌بندی تونل.



شکل ۲-۶: نمودار مفهومی نشست سطح زمین در حفاری با سپر تعادلی فشار زمین [۷]



شکل ۲-۷: منحنی نشست در مسیر خط ۷ متروی تهران [۸]

۲-۳ مصالح مورد استفاده در دوغاب تزریق پرکننده

در تهیه دوغاب تزریق پرکننده مصالح مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در ادامه به معرفی و تشریح مصالح مورد استفاده در تهیه دوغاب پرداخته خواهد شد.

۲-۳-۱ سیمان

به هر ماده چسبنده‌ای سیمان ۱ اطلاق می‌شود. لیکن به ماده چسباننده مصالح سنگی در بتن یا دوغاب، سیمان هیدرولیکی و اصطلاحاً سیمان گویند. سیمان، چسبی است که از مخلوط با آب به صورت دوغاب سیمان یا خمیر سیمان دور دانه‌ها را آغشته و آن‌ها را به هم می‌چسباند. مواد اولیه سیمان عمدتاً از خاک رس و آهک تشکیل می‌شود که مواد عمده تشکیل دهنده سیمان در جدول (۱-۲) درج شده است :

جدول ۱-۲ : مواد عمده تشکیل دهنده سیمان [۹]

نام (ماده اولیه)	ترکیب شیمیایی	درصد
آهک	CaO	حدود ۶۳ درصد
سیلیس	SiO ₂	حدود ۲۰ درصد
آلومین	Al ₂ O ₃	حدود ۶ درصد
اکسید آهن	Fe ₂ O ₃	حدود ۳ درصد
اکسید منیزیم	MgO	حدود ۱/۵ درصد

سیلیس، آلومین، اکسید آهن و اکسید منیزیم در خاک رس وجود دارند. برای ساخت سیمان در کشور ما یا از گل‌آهک استفاده می‌شود، یا از آهک و خاک رس که آن‌ها را به نسبت مناسب باهم مخلوط می‌کنند. معمولاً سیمان را با یکی از دو روش تر یا خشک تهیه می‌کنند، در روش تر مواد اولیه را به نسبت مناسب با ۵۰ درصد آب مخلوط کرده و آن‌ها را به صورت لجن در کوره دوار استوانه‌ای تحت حرارت ۱۱۰۰ الی ۱۲۰۰ درجه قرار می‌دهند تا کلینکر تشکیل شود. در نهایتاً کلینکر را آسیاب کرده و سیمان تولید می‌شود. در روش خشک مواد تشکیل دهنده سیمان را ابتدا آسیاب کرده و سپس با ۱۲ درصد وزنی به آن آب اضافه می‌کنند و مخلوط حاصل را در کوره حرارت می‌دهند تا کلینکر تشکیل شود [۹].

¹ Cement

لازم به ذکر است که در هر دو روش تر و خشک کلینکر حاصل را به همراه ۲ الی ۳ درصد سنگ گچ آسیاب می‌کنند. اضافه کردن گچ به این دلیل است که از گیرش سریع سیمان در مرحله اول ساخت بتن جلوگیری شده و فرصت کافی جهت مصرف بتن ایجاد کند.

۲-۳-۱-۱ مواد شیمیایی موجود در سیمان

- تری کلسیم سیلیکات ($3CaO, SiO_2$) : این ماده سریعاً وارد واکنش شیمیایی شده و بتن را سفت می‌کند و در هنگام ترکیب با آب گرمای زیادی تولید می‌کند. (۱۲۰ کالری بر گرم) علامت اختصاری این ماده C_3S می‌باشد.
- دی کلسیم سیلیکات ($2CaO, SiO_2$) : خصوصیات این ماده برخلاف C_3S می‌باشد، بدین معنی که گیرش اولیه دی کلسیم سیلیکات کم است و بعد از ۲ تا ۷ روز و حتی تا یک ماه، به تدریج وارد عملیات شیمیایی می‌شود. (به عبارت دیگر دیرگیر است) این ماده در هنگام گرفتن گرمای کمی تولید می‌کند. (۶۲ کالری بر گرم) علامت اختصاری این ماده C_2S است.
- تری کلسیم آلومینات ($3CaO, Al_2O_3$) : این ماده همان خواص C_3S را دارد بدین معنی که در گیرش اولیه سیمان دخالت می‌کند و از طرفی مقاومت بتن را در برابر حمله سولفات‌ها می‌کاهد. در هنگام گیرش گرمای بیشتری نسبت به سایر اجزای سیمان تولید می‌کند. (۲۱۰ کالری بر گرم) علامت اختصاری این ماده C_3A است.
- تترا کلسیم آلومینوفریت ($3CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$) : از نظر گیرش حد متوسط را دارد و در حدود ۱۰۰ کالری بر گرم گرما آزاد می‌کند.

۲-۳-۱-۲ انواع سیمان‌های استاندارد (پرتلند)

- ۱- سیمان تیپ یک (I) : همان سیمان معمولی بوده و در شرایط آب و هوای عادی مصرف می‌شود. همچنین در جایی به کار می‌رود که از نظر سولفات مشکلی وجود نداشته باشد.

۲- سیمان تیپ دو (II) : این سیمان از نظر خواص متوسط است، بدین معنی که تا حدی کندگیر بوده و نیز تا حدی در مقابل حمله سولفات‌ها مقاوم است. برای ساخت این سیمان سعی می‌شود تا حد ممکن از مقدار (C_3A, C_3S) کاسته و (C_2S) را افزایش می‌دهند.

۳- سیمان تیپ سه (III) : این سیمان تقریباً اجزای اولیه سیمان تیپ (I) را دارد، با این تفاوت که به شدت ریزتر آسیاب شده و به همین جهت گیرش سریعی دارد. از این نوع سیمان می‌توان در هوای سرد، در تعمیرات فوری و جاهایی که به دلیل محدودیت امکانات قالب، بخواهند قالب‌ها را زود باز کنند استفاده نمود.

۴- سیمان تیپ چهار (IV) : این سیمان کندگیر بوده و در هنگام گیرش حرارت کمی تولید می‌کند. مقدار C_3A و C_3S موجود در این نوع سیمان در مقایسه با انواع دیگر سیمان، کمتر بوده و در مقابل C_2S زیادتری به کار برده شده است. این سیمان برای استفاده در هوای گرم مناسب می‌باشد.

۵- سیمان تیپ پنج (V) : در ساخت این سیمان سعی می‌شود حتی‌الامکان C_3A و C_3S را به حداقل برسانند و در مقابل C_2S بیشتری مصرف نمایند. این سیمان برای مصرف در بتن‌هایی که در معرض حمله سولفات‌ها قرار دارند مناسب است [۹].

به طور کلی برای تهیه ملات تزریق دو نوع سیمان پرتلند و فوق ریزدانه استفاده می‌شود. از بین انواع سیمان‌های پرتلند نیز در اغلب پروژه‌ها از تیپ‌های I، II و III برای تهیه ملات یا دوغاب تزریق استفاده می‌شود.

در شرایطی که ملات در معرض عوامل مخرب مانند آب یا خاک سولفات‌ها یا دمای غیرقابل قبول ناشی از هیدراسیون سیمان نباشد، استفاده از سیمان تیپ I متداول است. سیمان تیپ II دارای سرعت و دمای هیدراسیون کمتری نسبت به تیپ I است. در شرایطی که میزان سولفات آب بیش از حد معمول است، این نوع سیمان استفاده می‌شود. سیمان تیپ III از نظر شیمیایی مشابه تیپ I است. با این تفاوت که دانه ریزتر بوده و در زمان کمتری به مقاومت بالا می‌رسد.

در برخی تزریق‌های پرکننده خاص از سیمان خیلی ریزدانه استفاده می‌شود. این نوع را می‌توان با آسیاب کردن انواع سیمان‌های پرتلند تهیه کرد.

۲-۳-۱-۳ مزایا و معایب تغییر نسبت سیمان بر روی دوغاب

وجود سیمان بیش‌تر در مخلوط دارای معایب و مزایای خاصی است. استفاده از سیمان بیشتر در مخلوط باعث می‌شود که مقاومت نهایی مخلوط بالاتر رفته و همچنین زمان‌گیرش دوغاب کاهش یابد. همچنین استفاده از درصد سیمان بالاتر در مخلوط علاوه بر این که قابلیت پمپاژ آن را بالا می‌برد، میزان آب‌اندازی آن را نیز کاهش می‌دهد. ولی هر چه میزان سیمان در مخلوط بالاتر رود علاوه بر این که قیمت تمام شده دوغاب افزایش می‌یابد، دارای تأثیرات بدی بر روی برس‌های آب‌بند کننده TBM است. هر چه درصد سیمان در مخلوط زیادتر باشد باعث گیرش سریع‌تر مخلوط شده و این گیرش سریع‌تر باعث می‌شود که آن قسمت مخلوط که در تماس با برس‌های آب‌بند کننده قرار دارد، در مواقع توقف دستگاه با نفوذ به درون منافذ برس‌ها و در نهایت گیرش یافتن آن، باعث کندن این برس‌ها شود که حتی کنده شدن یک تکه کوچک از این برس‌ها باعث می‌شود که برس به طور کلی خاصیت آب‌بند کنندگی خود را در ناحیه‌ای از تونل حفر شده از دست بدهد. همچنین با نفوذ این دوغاب به درون برس‌های سیمی آب‌بند کننده و اشغال فضاهای خالی بین این برس‌ها و گیرش آن، باعث می‌شود گریسی که جهت آب‌بند کردن این برس‌ها به درون این برس‌ها تزریق می‌شود اجازه ورود نیافته و برس خاصیت آب‌بند کنندگی خود را از دست بدهد و مخلوط با عبور از روزنه‌های ایجاد شده در این برس‌ها به سمت جبهه کار فرار کند. تمیز کردن و یا تعویض این برس‌های آب‌بند کننده بسیار مشکل‌آفرین و هزینه‌بر است که سعی می‌شود از برخورد با این‌چنین مشکلی جلوگیری شود [۲]. در برخی پروژه‌ها از جمله متروی شیراز در عملیات تزریقی که انجام گرفته با چنین مشکلی برخورد شده است که در شکل‌های (۲-۸) و (۲-۹) نمونه‌هایی از برس‌های خرد شده یا کنده شده نشان داده شده است.



شکل ۲-۸ : نمونه‌ای از برس‌های خورده شده در اثر تماس با مخلوط دارای سیمان بالا



شکل ۲-۹ : از بین رفتن خاصیت آب‌بند کنندگی برس در اثر کنده شدن تکه‌ای از آن

به علت نبود آب در فضای خالی ایجاد شده و گیرش سریع‌تر مخلوط در اثر جذب سریع‌تر آب دوغاب به وسیله محیط پیرامون آن، مشکلات یاد شده در محیط‌های خشک بیشتر بروز می‌کند.

در حقیقت مهم‌ترین انتظار از مخلوط تهیه شده و به خصوص در محیط‌های 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 مقاومتی در حد مصالح احاطه کننده فضای خالی حلقوی، نیاز مقاومتی دوغاب را برآورده می‌کند.

۲-۳-۲ آب

به طور کلی هر آب قابل شربی که طعم و بوی خاصی نداشته و PH آن بین ۶ تا ۸ باشد، برای تهیه دوغاب و ملات تزریق قابل استفاده است. گاهی اوقات آب غیرقابل شرب نیز برای این منظور قابل استفاده است. مشروط به اینکه مقاومت ۷ روزه نمونه تهیه شده با این آب حداقل ۹۰ درصد مقاومت ۷ روزه نمونه تهیه شده با آب قابل شرب یا آب مقطر باشد. علاوه بر این زمان گیرش ملات نیز نباید بیش از یک ساعت زودتر یا یک ساعت و نیم دیرتر از ملات تهیه شده با آب قابل شرب باشد. برخی محدودیت‌های آب مورد استفاده برای تهیه دوغاب یا ملات تزریق در جداول (۲-۲) و (۳-۲) براساس استاندارد ASTM C94 ارائه شده است [۱۰].

جدول ۲-۲: معیار تأیید آب مشکوک برای تهیه ملات تزریق

روش آزمایش		
*C109	۹۰ درصد	حداقل مقاومت فشاری 7 روزه نسبت به مقاومت ملات تهیه شده با آب شرب
*C191	از ۱ ساعت زودتر تا ۱:۳۰ دیرتر	زمان گیرش، حداکثر اختلاف با زمان گیرش ملات تهیه شده با آب شرب

* مقایسه باید با ترکیب ثابت و مقدار آب مشابه انجام شود.

جدول ۳-۲: محدودیت آب مورد استفاده از نظر ترکیب شیمیایی (ASTM C94) [۱۰]

روش آزمایش	حداکثر مقدار مجاز (ppm)	
ASTM D512	۱۰۰۰	یون‌های کلرید (Cl^-) *
ASTM D516	۳۰۰۰	یون‌های سولفات (So_4^-)
	۶۰۰	قلیایی معادل (شامل Na_2O و K_2O)
AASHTO T26	۵۰۰۰	کل نمک‌ها

* به جز در مواردی که $CaCl_2$ به عنوان افزودنی اضافه شود.

۲-۳-۲ مصالح دانه‌ای

ماسه متداول‌ترین مصالح مورد استفاده در تزریق تماسی و پرکننده است. مصالح درشت دانه‌تر برای پر کردن پیرامون پنستاک و تونل‌های فشار استفاده می‌شود. از ماسه به عنوان پرکننده برای تأمین حجم ملات مورد نیاز به ویژه در جاهایی که حجم فضای خالی که باید پر شود زیاد است، با توجه به قیمت کمتر نسبت به سیمان، استفاده می‌شود. علاوه بر ملاحظات اقتصادی، ماسه نقش زیادی در کاستن از اثر کاهش حجم دوغاب در زمان گیرش دارد. همچنین در صورت دانه‌بندی مناسب، ماسه باعث افزایش مقاومت برشی ملات می‌شود. دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در ملات تزریق با توجه به استاندارد ASTM C33، مطابق جدول (۲-۴) است. با این حال هر نوع ماسه با هر نوع دانه‌بندی که کیفیت مناسب دوغاب را به دست دهد، قابل استفاده است [۱۱].

جدول ۲-۴ : محدوده دانه‌بندی ماسه مطابق ASTM C33 [۱۱]

اندازه الک	درصد عبوری (وزنی)
۹/۵mm	۱۰۰
۴/۷۵mm	۹۵-۱۰۰
۲/۳۶mm	۸۰-۱۰۰
۱/۱۸mm	۵۰-۸۵
۶۰۰ μ m	۲۵-۶۰
۳۰۰ μ m	۱۰-۳۰
۱۵۰ μ m	۲-۱۰

مهم‌ترین مشکل استفاده از ماسه در ترکیب دوغاب، سایندگی بالای آن است که باعث افزایش فرسایش پمپ‌ها و تجهیزات تزریق می‌شود.

۲-۳-۴ افزودنی‌ها

افزودنی‌ها شامل سایر مصالحی است که علاوه بر آب، سیمان و سنگ‌دانه برای تهیه بتن یا دوغاب استفاده می‌شود. این افزودنی‌ها شامل مواد معدنی و شیمیایی است [۱۲].

۲-۳-۴-۱ افزودنی‌های معدنی

مواد معدنی عموماً به عنوان پرکننده (برای کاهش مقدار سیمان مصرفی)، برای کاهش میزان انقباض، افزایش قابلیت پمپ شدن، کاهش یا افزایش دانسیته ملات یا تأمین ویژگی‌های خاصی در آن استفاده می‌شود. از جمله افزودنی‌هایی که بیش‌ترین استفاده را در تهیه ملات تزریق دارد بنتونیت، ورمیکولیت و خاکستر بادی^۱ است. در کشورهای مختلف با توجه به قابلیت دسترسی، ممکن است مواد دیگری نیز استفاده شود. در ایران از پودر سنگ نیز در برخی پروژه‌ها استفاده می‌شود [۱۳].

(۱) بنتونیت

بنتونیت یک رس کلئیدی از گروه مونت‌موریلونیت‌ها است. درصد جذب آب بنتونیت بسیار زیاد بوده و بیش از ۵ برابر وزن خود، آب جذب می‌کند. بنتونیت به منظور تثبیت ملات یا دوغاب (کاهش آب-انداختگی دوغاب سیمان و ملات) به آن افزوده می‌شود. بنتونیت باعث کاهش ویسکوزیته و چسبندگی ملات می‌شود. علاوه بر این باعث افزایش قابلیت جریان و پمپ شدن ملات و دوغاب می‌شود. افزایش بنتونیت به ملات باعث کاهش مقاومت آن خواهد شد [۱۴].

(۲) خاکستر

خاکستر محصول فرعی سوخت زغال سنگ است. اندازه ذرات این خاکستر بین ۱ تا ۱۰۰ میکرون و به طور غالب زیر ۲۰ میکرون است. خاکستر بادی شامل سیلیس، آلومین و اکسیدهای آهن و کلسیم است و در ترکیب ملات یا دوغاب تزریق به جای سیمان یا بخشی از آن استفاده می‌شود. خاکستر در انواع C و F وجود دارد و نوع C خاکستر بادی به دلیل دارا بودن بیش از ۱۰ درصد اکسید کلسیم خاصیت سیمانی شدن دارد که به آن خاکستر فعال نیز می‌گویند. افزودن خاکستر بادی نوع F باعث دستیابی به مقاومت کوتاه مدت بیش‌تر و سریع‌تری نسبت به ملات بدون خاکستر می‌شود.

¹ Fly ash

افزودن خاکستر بادی به ملات باعث کاهش دمای هیدراسیون می‌شود که در تزریق‌های پرکننده و تماسی که آزاد شدن گرما با محدودیت مواجه است حائز اهمیت می‌باشد [۱۳].

۳) ورمیکولیت

ورمیکولیت^۱ نام عمومی گروهی از آلومینوسیلیکات‌های آب‌دار آهن و منیزیم است که در ظاهر شبیه میکا است. این کانی از دگرسانی یا هوازدگی کانی‌های بیوتیت و فلوگوپیت ایجاد می‌شود. افزایش این کانی به دوغاب و ملات تزریق باعث کاهش دانسیته و افزایش تراکم پذیری آن می‌شود. تراکم پذیری ملات تزریق گاهی اوقات برای استفاده در مناطق لرزه‌خیز یا در زمین‌های مچاله شونده لازم است [۱۳].

۲-۳-۴-۲ افزودنی‌های شیمیایی

۱) عوامل کاهنده آب و روان کننده

این گروه یکی از مهم‌ترین افزودنی‌های شیمیایی هستند. روان کننده‌ها، کاهنده آب نیز هستند ولی همه کاهنده‌های آب لزوماً روان کننده نیستند. میزان انقباض، مقاومت و پایایی دوغاب و ملات تابع نسبت آب به سیمان است. حداقل نسبت آب به سیمان (وزنی) برای هیدراسیون سیمان ۰/۲۵ : ۰/۲۲ است. در صورتی که نسبت آب به سیمان بیشتر از این مقدار باشد، مقاومت ملات کاهش خواهد یافت. با این حال برای افزایش قابلیت پمپ شدن و تزریق ملات نیز مقدار بیشتری آب لازم است. بنابراین این مقدار آب اضافی باعث کاهش مقاومت ملات خواهد شد. عوامل روان کننده و کاهنده آب باعث کاهش مقدار آب مورد نیاز، بدون کاستن از قابلیت انتقال و تزریق خواهد شد [۱۳].

¹ Vermiculite

۲) عوامل کنترل کننده هیدراسیون و کندگیر کننده

این گروه باعث افزایش زمان قابل استفاده بودن ملات و دوغاب می‌شود که اغلب در هنگام تزریق تزریق در تونل لازم است. حمل در مسافت طولانی و زمان لازم برای آماده سازی برای تزریق و توقفات احتمالی در حین تزریق اغلب مستلزم این است که زمان گیرش سیمان افزایش یابد. کندگیر کننده‌های معمولی زمان گیرش را در حدود ۳ تا ۴ ساعت افزایش می‌دهد. این مواد باعث تأخیر در هیدراسیون یکی از چهار بخش شیمیایی سیمان می‌شود. افزایش بیش از اندازه این مواد نیز ممکن است باعث شود ملات در زمان مطلوب به گیرش مورد نظر نرسد یا باعث گیرش آنی سیمان گردد [۱۳].

عوامل کنترل کننده هیدراسیون باعث تأخیر در واکنش هر چهار بخش سیمان شده و برای کنترل زمان گیرش تا بیش از ۷۲ ساعت قابل استفاده است.

۳) تندگیر کننده

انواع مختلفی از تندگیر کننده‌ها یا شتاب‌دهنده‌ها برای کاهش زمان گیرش دوغاب یا ملات استفاده می‌شود. شتاب‌دهنده‌ها اغلب با پایه کلرید کلسیم، تیوسیانات سدیم یا شتاب‌دهنده‌های شاتکریت مانند سیلیکات سدیم و سولفات آلومینیوم است. لازم به ذکر است که برخی از این شتاب‌دهنده‌ها دارای آثار منفی بر روی بتن در بلندمدت هستند [۱۳].

۲-۳-۴-۳ سایر افزودنی‌ها

علاوه بر موارد ذکر شده، افزودنی‌های دیگری نیز وجود دارند که برای مواردی همچون کاهش انقباض، افزایش مقاومت در برابر حملات سولفاته، افزایش پایایی، بهبود ویسکوزیته و مقاومت در برابر آب شستگی و کاربردهایی دیگر متناسب با نیاز، استفاده می‌شوند که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

۱) ضد آب شستگی / بهبود دهنده ویسکوزیته

در صورت وجود آب راکد در فضای پیرامون سگمنت‌ها، معمولاً هنگام تزریق تماسی و پرکننده، آب در حین تزریق با ملات جایگزین شده و از این فضا رانده می‌شود. در صورتی که جریان آب وجود داشته باشد، ممکن است مشکلاتی مانند رقیق شدن دوغاب / ملات و یا آب شستگی و شسته شدن آن بروز کند. برای رفع این مشکلات از افزودنی‌های ضد آب شستگی استفاده می‌شود [۱۳].

۲) ضد انقباض

رفع یا کاهش انقباض ملات هنگام سخت شدن با استفاده از افزودنی‌های ضد انقباض یا مواد منبسط شونده امکان‌پذیر است. مواد منبسط شونده به مرور باعث افزایش حجم مخلوط دوغاب متناسب با انقباض در حین سخت شدن می‌گردد و در واقع کاهش حجم ناشی از انقباض را تا حدودی جبران می‌کنند. مواد ضد انقباض نیز می‌تواند انقباض ناشی از سخت شدن را تا حد زیادی کاهش دهند با این حال کاهش حجم را به طور کامل برطرف نمی‌کنند [۱۳].

۳) کف سازها

کف سازها به منظور ایجاد تخلخل در بتن و ملات استفاده می‌شود. مزایای این نوع نسبت به ملات معمولی به شرح زیر است :

- قیمت واحد کمتر نسبت به دوغاب یا ملات با دانسیته بالاتر.
- قابلیت پمپ شدن بالاتر.
- جریان پذیری بالاتر که باعث می‌شود فضاهای خالی بهتر پر شود.
- دانسیته متغیر. با تغییر مقدار هوا می‌توان به دانسیته‌های مختلف دست یافت.

- قابلیت تراکم بالاتر. در شرایطی که نیاز به مستهلک کردن انرژی در مواد پرکننده باشد مانند زون‌های فعال گسله و مناطق لرزه‌خیز، این خاصیت مفید است.
- سرعت جابجایی بالاتر. این نوع ملات علاوه بر سهولت پمپ کردن، سرعت پمپ کردن بالاتری نیز دارند. در شرایطی که سرعت پیشروی بالا باشد، این خاصیت مفید خواهد بود [۱۳].

۴-۲ انواع دوغاب‌ها (ملات‌ها)

ملات‌هایی که برای تزریق پرکننده در تونل‌های مختلف معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد به چهار نوعی که در ادامه آورده شده تقسیم می‌شود.

۱-۴-۲ ملات بدون سیمان

این نوع ملات اساساً فاقد سیمان بوده و سخت شدن آن به دلیل موادی مانند خاکستر بادی نوع c (خاکستر بادی فعال)، آهک هیدراته، سیلیکافوم و سایر سیمان‌های طبیعی است. گیرش این نوع ملات معمولاً کند بوده و به همین دلیل، کارایی بالایی دارد. نگهداری رینک توسط این نوع ملات بیشتر به خاطر مقاومت برشی بالای ناشی از نوع و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها است. در پروژه‌هایی نظیر مترو قاهره، تونل گروین هارت^۱ هلند و ایول^۲ فرانسه از این نوع ملات در تزریق تماسی استفاده شده است [۱۹].

۲-۴-۲ ملات با سیمان کم

در صورت عدم دسترسی به سیمان‌های طبیعی، برای دستیابی به حداقل مقاومت و زمان گیرش اولیه، از سیمان استفاده می‌شود. تفاوت این دسته با دوغاب‌های با پایه سیمانی مقدار سیمان مورد استفاده است. در پروژه‌هایی همچون تونل سنپترزبورگ، پورتو پرتقال و تورین ایتالیا از این نوع ملات

¹ Groene Hart

² Eole

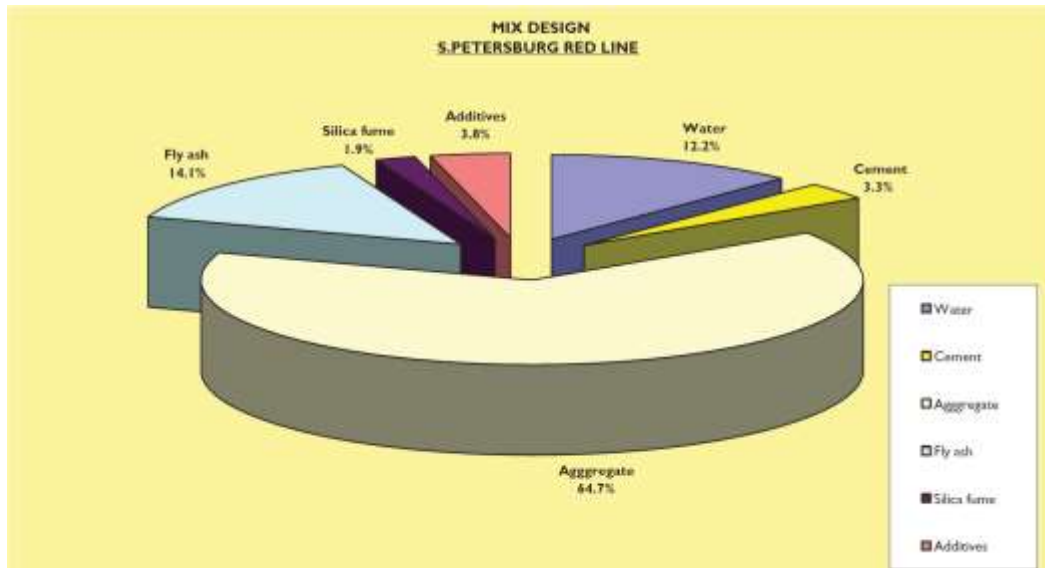
جهت تزریق استفاده شده است [۱۹].

۲-۴-۳ دوغاب پایه سیمانی

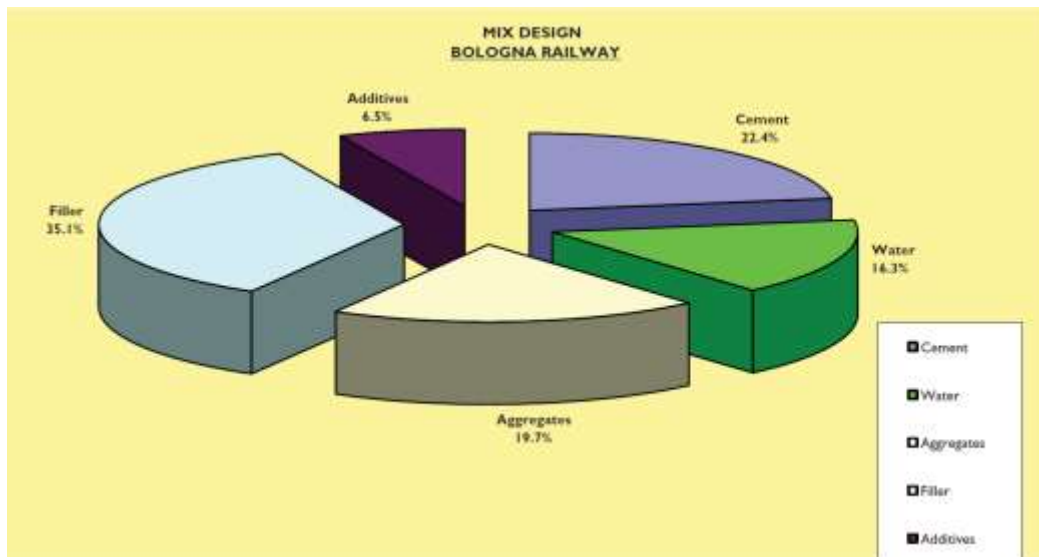
دوغاب با پایه سیمان و گیرش سریع برای تزریق در نرخ پیشروی بالا، برای دستیابی به حداقل مقاومت مورد نظر در کوتاه مدت و نگهداری مؤثر رینگ سگمندی مناسب است. با این حال این نوع دوغاب دارای معایبی از جمله نیاز به شستشوی متناوب مجاری تزریق و پتانسیل بالای گرفتن لوله‌ها و سایر قسمت‌های سیستم تزریق است. در دو قطعه از خط شمال شرق مترو سنگاپور، تونل فاضلاب فلوریدا و تونل راه‌آهن سریع‌السیر بولونیای ایتالیا از این نوع ملات در تزریق تماسی استفاده شده است [۱۹]. شکل (۲-۱۰) یک نمونه از طرح اختلاط ملات‌ها پایه سیمانی که در تزریق تماسی مورد استفاده قرار گرفته را نشان می‌دهد.

۲-۴-۴ دوغاب دوجزئی

طبق تجربیات موجود، این سیستم تزریق، کارآیی بیشتری در پیشروی تونل با نرخ نفوذ بالا دارد (هر چند خطر گرفتگی در نقطه تزریق وجود دارد). چراکه با استفاده از این سیستم امکان کنترل بیشتری بر روی عملیات تزریق و کنترل نشست مخصوصاً در محیط‌های شهری وجود دارد. دوغاب‌های دو جزئی شامل دو جزء A و B هستند. جزء A معمولاً از سیمان، بنتونیت، آب و مواد افزودنی شامل روان‌کننده و دیرگیر تشکیل شده است و جزء B به عنوان زودگیر عمل می‌کند که معمولاً از سیلیکات سدیم به علت کارآیی، در دسترس بودن و قیمت مناسب استفاده می‌شود [۱۹]. در شکل (۲-۱۱) یک نمونه از طرح اختلاط جزء A دوغاب دوجزئی آورده شده است.



شکل ۲-۱۰ : نمونه از طرح اختلاط یک دوغاب پایه سیمانی [۵]



شکل ۲-۱۱ : نمونه‌ای از طرح اختلاط یک دوغاب دو جزئی [۵]

۵-۲ کنترل کیفیت و فرآیند تزریق

در کل دو روش برای کنترل تزریق‌های پرکننده وجود دارد که در زیر به شرح آن‌ها پرداخته می‌شود :

۱- تنظیم کردن میزان خوردند.

۲- تزریق دوغاب، معادل با حجم فضای خالی [۱].

میزان ملات تزریقی تقریباً باید بیش از حجم فضای خالی باشد تا این که بتوان میزان نشست و جابجایی خاک را کنترل و همچنین از وجود یک لایه پرکننده با مقاومت بالا مطمئن شد، مکانیزم تزریق تماسی و پرکننده نسبت به بقیه روش‌های تزریق ساده‌تر به نظر می‌رسد ولی برخلاف آنچه که به نظر می‌رسد تزریق‌های تماسی و پرکننده در اکثر پروژه‌های مهندسی به دلایل زیر بسیار مهم و حیاتی می‌باشند :

۱- در موردی که به غارها و فضاهای زیرزمینی برخورد می‌شود باید توسط عملیات تزریق پرکننده آن‌ها را پر کرد.

۲- در هنگام حفاری در نقاط مختلفی از تونل به دلیل تغییر در جنس خاک‌ها احتمال ریزش وجود دارد که این خود باعث تولید حفره‌های بزرگ و کوچک می‌شود که باید با روش درست تزریق تماسی پر شود.

۳- در تونل‌هایی که در زیرسطح ایستایی حفر می‌شوند عمل تزریق پرکننده به عنوان تزریق آب-بند نیز محسوب می‌شود که این خود در پایداری تونل بسیار مهم می‌باشد، همچنین اگر عملیات تزریق به درستی انجام نگرفته باشد باعث نفوذ آب به داخل تونل شده و مشکلات عدیده‌ای را به بار می‌آورد.

۴- برای کنترل میزان نشست، چگونگی انجام عمل تزریق پرکننده و طرح اختلاط مواد تزریق بسیار مهم است.

۵- از آنجا که احتمال وقوع زلزله در منطقه و محوطه تونل وجود دارد، نقش ملات تزریق در اطراف تونل بسیار مهم است، زیرا ملات تزریق باید همانند یک ماده شبه پلاستیکی عمل کند و شکسته نشود و یا در صورت ایجاد ترک در آن بلافاصله بسته شود تا بدین ترتیب سازه مورد نظر در برابر زلزله ایمن باشد [۱].

در مواردی که زمان گیرش ملات تزریق مناسب نباشد، به دلیل این که در فواصل دورتر از جبهه کار که قبلاً سگمنت گذاری شده است، تکیه‌گاه سگمنت‌ها، ملات تزریق کاملاً سفت شده می‌باشد و در اولین رینک در سمت جبهه کار، سگمنت‌ها توسط فشار جک‌های ماشین حفاری نگه داشته شده‌اند، حال در فاصله میان آخرین تکیه‌گاه و اولین تکیه‌گاه عملاً وزن سگمنت‌ها توسط عامل اتصال و ملات تزریق تحمل می‌شود و با زیادتر شدن فاصله اولین تکیه‌گاه با آخرین تکیه‌گاه این عامل بیشتر و مشهودتر می‌شود که این می‌تواند به مقدار بسیار کمی بر روی نشست تونل و فرار ملات تزریق در صورت سفت نشدن آن تأثیرگذار باشد.

پارامترهای مختلفی از فرآیند تزریق به صورت سیستماتیک قابل اندازه‌گیری و ثبت است که با مقادیر طراحی مقایسه می‌شود. فرآیند رفتار نگاری^۱ و کنترل فرآیند تزریق به منظور به حداقل رساندن خطرات احتمالی همچون نشست و ... انجام می‌گیرد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

۱- کنترل حجم تزریق

۲- کنترل فشار تزریق

۳- کنترل مشخصات ملات تزریقی با توجه به مشخصه‌های طراحی

حال به توضیح درباره سه مشخصه کنترلی ذکر شده پرداخته می‌شود [۵].

¹ Monitoring

۲-۵-۱ حجم تزریق

حجم دوغاب تزریق شده به ازای هر رینگ پیشروی ماشین باید متناسب با حجم تئوری فضای پیرامون پوشش تونل باشد. این حجم برابر است با :

$$V_{VOID} = \left(\frac{D_{EXC}^2}{4} \cdot \pi - \frac{D_{EX-LIN}^2}{4} \cdot \pi \right) \cdot L_{RING} \quad (1-2)$$

V_{VOID} : حجم فضای خالی باقی مانده.

D_{EXC} : قطر مقطع حفاری شده.

D_{EX-LIN} : قطر مقطع لاینینگ شده.

L_{RING} : طول رینگ حفاری (موازی با محور تونل) [۵].

بررسی پیوسته حجم تزریق برای کنترل نشست سطحی بسیار مهم است. مقدار دوغاب لازم برای پرکردن پشت سگمنت‌ها در مقاطع مختلف متغیر بوده و تابع پارامترهای زیر است :

۱- گام واقعی پیشروی که معمولاً چند سانتیمتر با گام تئوری (طول رینگ سگمنتی) اختلاف دارد.

۲- نفوذپذیری زمین پیرامون و دوغاب تزریق. نفوذپذیری زمین با توجه به سیالیت و روانی دوغاب، باعث افزایش حجم دوغاب مورد نیاز می‌شود.

۳- مقدار سایش ابزارهای محیطی (قطر واقعی حفاری) سایش ابزارهای حفاری محیطی باعث کاهش قطر حفاری و در نتیجه حجم فضای خالی پیرامون پوشش تونل می‌شود [۵].

در عمل حجم دوغاب مورد نیاز برای پرکردن پیرامون لاینینگ بیشتر از حجم تئوری است، که ممکن است به دلیل اضافه حفاری یا نفوذ دوغاب به داخل حفرات طبیعی یا مصنوعی موجود در زمین اطراف تونل باشد. با توجه به نفوذپذیری خاک، سیالیت، قابلیت نفوذ دوغاب، اضافه حفاری و

سایر عوامل مؤثر مانند فشار تزریق، حجم تزریق ممکن است به ۱۵۰ تا ۲۰۰ درصد حجم تئوری پیرامون سگمنت‌ها برسد [۱۵].

برای کنترل حجم تزریق، باید محدوده هشدار اولیه و اعلام خطر در نظر گرفته شود. در صورتی که حجم دوغاب تزریقی به محدوده هشدار اولیه رسید، اپراتور باید به مسئول شیفت اطلاع دهد. در صورتی که به مرحله اعلام خطر رسید، حفاری باید تحت شرایط ویژه ادامه یابد. محدوده‌های هشدار و اعلام خطر (حد پایین و بالا) نسبت به حجم تئوری به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

- حد بالای هشدار : ۱۲۰ درصد.
- حد پایین هشدار : ۹۰ درصد.
- حد بالای خطر : ۱۵۰ درصد.
- حد پایین خطر : ۷۰ درصد [۱۶].

۲-۵-۲ فشار تزریق

فشار تزریق باید متناسب با فشار زمین پیرامون باشد. فشار تزریق باید به طور پیوسته کنترل و با مقادیر طراحی مقایسه شود. بنابراین پارامترهای کنترلی سیستم تزریق علاوه بر حجم تزریق، باید در برگیرنده فشار تزریق نیز باشد. فشار تزریق به طور ایده آل باید در نقطه تزریق اندازه‌گیری شود ولی در عمل معمولاً در مسیر تزریق در داخل سپر اندازه‌گیری می‌شود.

کمترین و بیش‌ترین مقدار فشار تزریق، در صورت همگن بودن زمین مسیر تونل، متناسب با فشار نگهداری جبهه کار تنظیم می‌شود. برای نازل‌های مختلف تزریق، با توجه به موقعیت، ممکن است فشارهای متفاوتی در نظر گرفته شود. به طور کلی مقدار فشار تزریق حدود ۰/۵ تا ۱ بار بیشتر از فشار EPB در نظر گرفته می‌شود [۱۷].

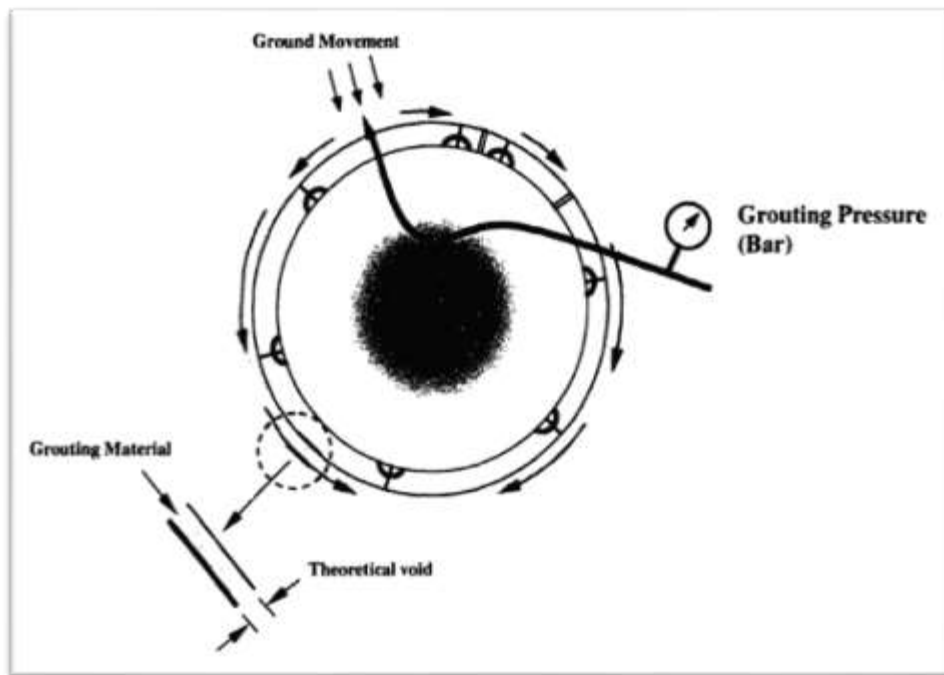
تزریق پرکننده همیشه باید به طور همزمان با پیشروی ماشین حفاری انجام گیرد و باید از معیارهای دیکته شده پیشرفت پروژه پیروی کند. مخصوصاً ضروری است با سرعت پیشروی ماشین حفاری تنظیم و تطبیق یابد و به عبارت دیگر باید محدوده فشار پیش‌بینی شده در سطوح طراحی مورد ملاحظه واقع شود.

مقدار حداقل و حداکثر فشار تزریق بسته به شرایط محیط متفاوت خواهد بود ولی این فشار با فشار سینه کار در ارتباط است، مقادیر مختلف فشار تزریق بسته به نحوه قرارگیری نازل و کنتور سپر گزارش شده است. مقادیر فشار ارزیابی شده با توجه به فشار بار لیتواستاتیکی با در نظر گرفتن عمق و وجود فشار آب منفذی محاسبه می‌شود [۷].

مقدار فشار تزریق با توجه به فشار روباره زمین و فشار آب محاسبه می‌شود. در صورتی که در حین حفاری، فشار به یکی از محدوده‌های مرزی مجاز (بیش‌ترین و کم‌ترین فشار طراحی شده) برسد، کیفیت تزریق باید با نمونه‌گیری کنترل شود.

یکی از محدودیت‌های فشار تزریق، سیستم آب‌بندی انتهای سپر است. در صورتی که فشار تزریق بیش از این مقدار باشد، ملات وارد سپر شده و باعث آسیب دیدن برس‌های سیستم آب‌بندی می‌شود.

فشار تزریق باید به اندازه کافی بالا باشد تا جریان مواد دوغاب و پایداری را ضمانت کند، حرکت زمین داخل فضای خالی در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است. عملیات تونل‌سازی با فشار تزریق بالا و درصد بالای پر کردن دوغاب، باعث کاهش نسبتاً بالای نشست سطح پس از گذر شیلد می‌شود.



شکل ۲-۱۲ : مقابله فشار تزریق با حرکت زمین به سمت فضای خالی بین پوشش بتنی و مقطع حفاری [۷]

۶-۲ جمع بندی

عملیات تزریق غالباً بخشی از فعالیتهای اجرایی در پروژههای زیرزمینی مهندسی عمران و معدن کاری می باشد. نوع و پارامترهای اجرایی سازوکار فضای زیرزمینی، شرایط زمین شناسی و آب زیرزمینی حاکم بر محل، تعیین کننده روش عملیات تزریق بوده که می تواند هزینه و برنامه زمان بندی را تحت تأثیر قرار دهد.

انواع روش های تزریق شامل تزریق در خاک، تزریق در سنگ و تزریق سازه ای می باشند. تزریق سازه های زیرزمینی موجود در سنگ را می توان از سطح به طرف سازه و همچنین برعکس انجام داد. عواملی همچون زمین شناسی منطقه، عمق سازه تا سطح زمین، سطح آب زیرزمینی، نوع سنگ دربرگیرنده سازه، نوع روش حفاری و همچنین تجهیزات و هزینه تزریق از جمله عوامل تعیین کننده انتخاب روش تزریق در این گونه سازه ها می باشند.

اهداف تزریق پرکننده در تونل های حفر شده در مناطق شهری به شرح ذیل می باشد :

- کاهش نشست سطحی در بالای تونل.
- ایجاد سطح تماس یکنواخت بین پوشش تونل و زمین.
- جلوگیری از وارد شدن بارهای نقطه‌ای بر پوشش نگهداری تونل.
- تثبیت و حفظ رینگ در محل خود پس از پیشروی سپر.
- تکمیل آب بندی تونل.

مصالحی که در تهیه دوغاب پرکننده مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از : سیمان، سنگ‌دانه، آب، بنتونیت و در برخی موارد مواد افزودنی که جهت ایجاد ویژگی‌های مد نظر به آن اضافه می‌شود. این مواد با نسبت مشخص باهم مخلوط شده و به منظور تأمین اهدافی که در بالا ذکر شد به فضای پشت سگمنت تزریق می‌شود.

جهت کنترل فرآیند تزریق لازم است تا پارامترهایی که در عملیات تزریق تعیین کننده هستند به طور پیوسته کنترل شوند، این پارامترها عبارت‌اند از حجم، فشار و مصالح تزریق.

فصل سوم

معرفی پروژه تونل کمکی

کانال ابوذر تهران

فصل سوم

معرفی پروژه تونل کمکی کانال ابوذر تهران

۱-۳ مقدمه

تونل کمکی کانال ابوذر در بخش شرقی بلوار ابوذر و در مجاورت کانال سرخه حصار حد فاصل پل دوم تا بزرگراه افسریه احداث می‌شود. این تونل باهدف انتقال بخشی از آب کانال سرخه حصار و به منظور کاهش خطرات ناشی از عبور جریان آب کانال در دوره‌های سیلابی طراحی و اجرا می‌شود. طول این تونل حدود ۴۰۰۰ متر بوده و به صورت مکانیزه توسط یک دستگاه TBM، حفاری می‌شود. قطر حفاری آن ۴/۳۵ و قطر تمام شده آن ۳/۷ متر می‌باشد. پوشش نهایی تونل شامل قطعات پیش‌ساخته بتنی خواهد بود. در شکل (۱-۳) موقعیت مسیر تونل در بخشی از نقشه تهران نشان داده شده است [۱۸].



شکل ۱-۳ : موقعیت مسیر تونل در بخشی از نقشه تهران [۱۸]

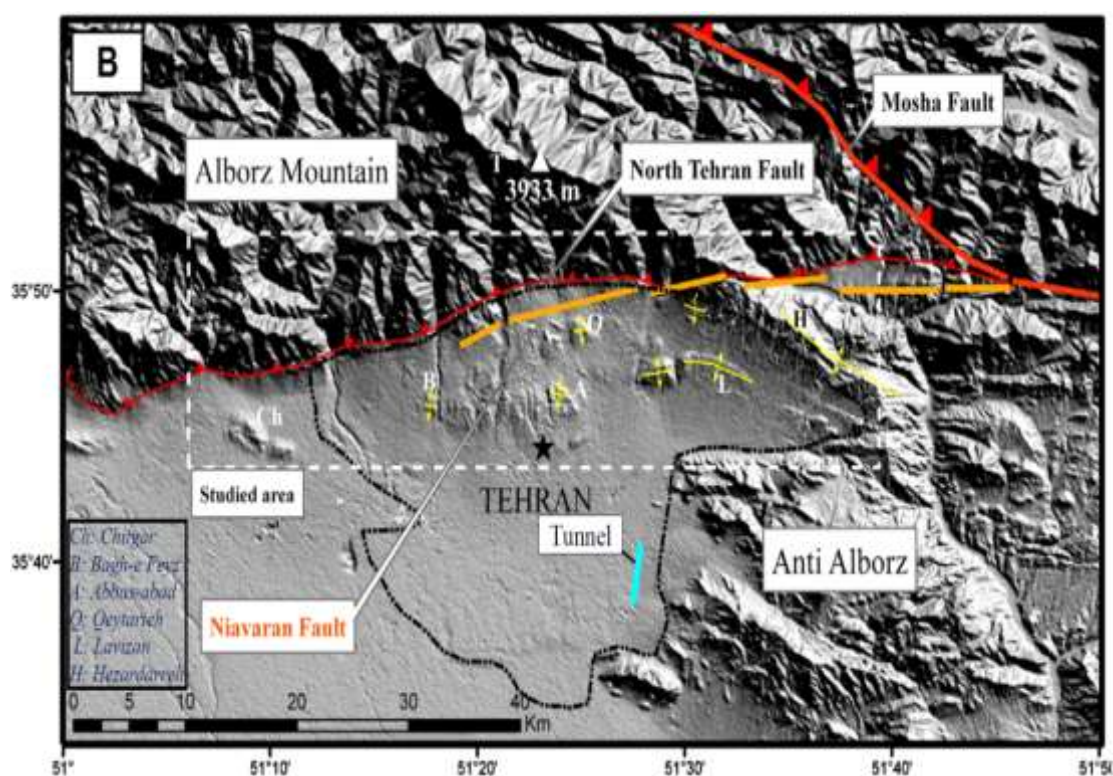
۲-۳ زمین‌شناسی منطقه

گستره مورد مطالعه در شمال ایالت زمین‌ساختی ایران مرکزی و مجاور ارتفاعات چین خورده البرز، که هر دو جزو بلوک‌های شمالی گندوانی و بخشی از سیستم فعال و متحرک آلپ-همالیا در بین صفحات اوراسیای شمالی و عربستان می‌باشند، قرار گرفته است. فشارهای تکتونیکی، حرکات و عکس‌العمل بلوک‌های تشکیل دهنده دگرشکلی‌ها و جابجایی‌های مختلف در این منطقه وجود داشته است که در زمان حال تعیین کننده چهارچوب تکتونیکی و سائزموکتونیکی آن به همراه تاثیری از ساختارهای قدیمی‌تر تکتونیکی می‌باشد. حوضه آبریز دشت تهران از دیدگاه زمین‌شناختی در گستره مرکزی منطقه البرز قرار دارد. این گستره از شمال به جنوب به چهار بخش، به شرح ذیل، تقسیم می‌گردد :

- (۱) البرز مرتفع : ارتفاعات واقع در شمال تهران بخشی از ارتفاعات البرز است که به نام البرز مرکزی نامیده می‌شود. این ارتفاعات از سری سنگ‌های چین‌خورده و رانده شده پالئوزوییک و مزوزوییک و ترشیری است، که به واسطه فازهای مختلف کوه‌زایی، چین‌خوردگی‌های شدیدی در آن‌ها صورت پذیرفته و روی هم رانده شده‌اند و به همین دلیل این بخش از ارتفاع زیادی برخوردار است.
- (۲) چین‌های حاشیه‌ای : به طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی آذر آواری سازند کرج متعلق به ائوسن تشکیل یافته است. گسل مشافشم مرز البرز مرتفع و چین‌های حاشیه‌ای محسوب می‌گردد. سنگ‌های بخش چین‌های حاشیه‌ای به آرامی چین خورده و در امتداد روراندگی شمال تهران بر روی بخش کوهپایه و دشت رانده شده‌اند.
- (۳) کوهپایه و دشت : در اواخر دوران سوم برپایی ارتفاعات البرز (در اثر نیروهای تکتونیکی)، که با فرسایش شدید این کوه‌ها همراه بوده است، سبب انباشته شدن حجم عظیمی از نهشته‌های آبرفتی در پای ارتفاعات گردیده است. این آبرفت‌ها بخش واسط بین کوه‌های البرز و دشت

تهران را تشکیل می‌دهند. حد شمالی کوهپایه‌های تهران بر گسل رورانده شمال تهران منطبق است ولی مرز جنوبی آن با دشت تهران کامل تدریجی است. بخش کوهپایه‌ای تهران شامل مصالح دانه درشت رودخانه‌ای است و با شیب نسبتاً قابل ملاحظه‌ای به دشت تهران ختم می‌شود.

(۴) آنتی البرز : این بخش به تپه ماهورها و کوه‌های کم ارتفاع شرق تهران مانند ارتفاعات سه پایه اطلاق می‌گردد. قرار دادن این ارتفاعات در بخشی مجزا به دلیل پیچیدگی مرز جنوبی البرز با ایران مرکزی می‌باشد. در این ناحیه علاوه بر چین خوردگی شدیدی که دوران سنوزوئیک تحمل کرده، دو فاز چین خوردگی دیگر در کرتاسه نیز قابل تشخیص است که هیچ یک از آنها در البرز شناخته نشده‌اند، ولی در ایران مرکزی قابل شناسایی است. در واقع بخش آنتی البرز نسبت به سایر قسمت‌های البرز چین خورده‌تر است (شکل ۳-۲) [۱۸].



شکل ۳-۲: تصویر رقومی نواحی کوهپایه‌ای تهران (مسیر تونل با خط آبی مشخص شده است) [۱۸]

۳-۳ واحدهای زمین‌شناسی

بر اساس نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ که توسط سازمان زمین‌شناسی تهیه شده است واحدهای زمین‌شناسی موجود در گستره مورد مطالعه به شرح ذیل می‌باشند :

۱-۳-۳ بخش دولومیتی سازند الیکا TR_e^d

این سازند که در کوه بی بی شهربانو دیده می‌شود شامل سنگ‌های دولومیتی و آهک دولومیتی ضخیم لایه تا توده‌ای قهوه‌ای رنگ روشن و خاکستری به همراه رگه‌های کلسیتی متقاطع می‌باشد که صخره‌های پرشیبی را تشکیل داده‌اند. ضخامت آن‌ها به حدود ۲۰۰-۱۵۰ متر می‌رسد.

۲-۳-۳ سازند تیزکوه واحد K_1^I

دو برونزد کوچک از این سازند با راستای شمال خاوری، خاوری-جنوب باختری، باختری در شمال غربی کوه بی بی شهربانو دیده می‌شوند. این واحد شامل سنگ‌های آهکی به رنگ خاکستری تیره است و رگه سفید کلسیتی در این واحد دیده می‌شوند. ضخامت آهک‌ها به حدود ۳۰ متر می‌رسد.

۳-۳-۳ واحد K_2^I

این واحد را در شمال غربی کوه بی بی شهربانو و شرق تهران می‌توان دید که شامل سنگ‌های آهکی توده‌ای تا ضخیم لایه با سطح شکست خاکستری رنگ و سطح هوا زده روشن رنگ با سن کرتاسه (سنومانین) می‌باشد.

۴-۳-۳ واحد E_7^t

این واحد در شمال کوه‌های بی بی شهربانو برونزد دارد. سنگ‌های آن بیشتر از نوع تراکیت-تراکی آندزیت بوده و بلورهای درشت پلاژیوکلاز در آن‌ها به چشم می‌خورد. این سنگ‌ها بافت جریانی نشان می‌دهند. سنگ‌های آتشفشانی این واحد در عمق کم، محیط اکسیدکننده و قاره‌ای تشکیل

یافته و دارای رنگ خاکستری متمایل به بنفش و قرمز دارند [۱۸].

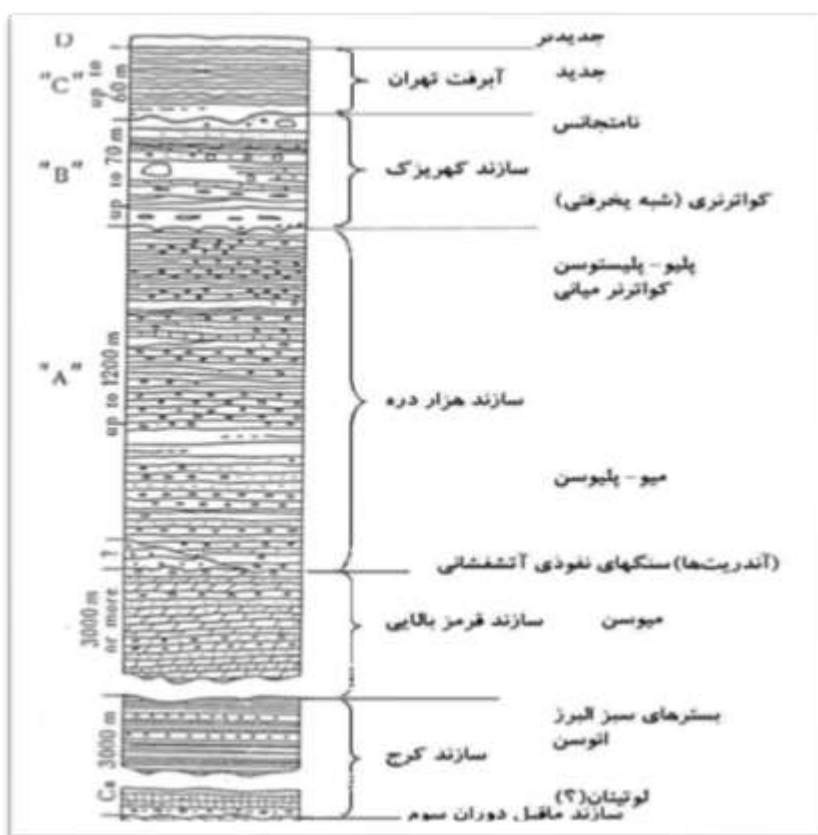
۳-۴ ویژگی‌های آبرفت‌های تهران و مسیر تونل

از آنجایی که مسیر تونل کمکی کانال ابوذر در آبرفت‌های کواترنری تهران جا نمایی شده است، در این جا به معرفی مختصر واحدهای آبرفتی و مشخصه‌های زمین‌شناسی آن‌ها پرداخته می‌شود. پژوهش‌های زیادی بر روی آبرفت‌های تهران انجام شده است؛ ریبِن^۱ در تحقیقات خود رسوبات جوان اطراف تهران را از نظر سن نسبی به چهار سازند A، B، C و D تقسیم نموده و آن‌ها را به ترتیب سازند هزار دره، سازند کهریزک، آبرفت تهران و آبرفت جدید (آبرفت هولوسن) نامیده است که در بین آن‌ها رسوبات و نهشته‌های سازند A قدیمی‌ترین و نهشته‌های سازند D جدیدترین سری محسوب می‌شوند. ستون چینه شناسی آبرفت‌های پوشاننده تهران براساس تقسیم‌بندی ریبِن در شکل (۳-۳) نشان داده است [۱۸].

دشت آبرفتی به نواحی‌ای اطلاق می‌شود که در آن‌ها شیب زمین کم است و رودخانه به صورت یک کانال دیده می‌شود که در کنار آن دشتی به وجود می‌آید. دشت مجاور رودخانه که با رسوبات درشت‌دانه و رسی حاصل از طغیان رودخانه پوشیده شده است را دشت آبرفتی^۲ می‌نامند. این وضعیت در محدوده تونل ابوذر دیده می‌شود که به واسطه شیب کم بستر رودخانه و طغیان‌های متعدد آن ایجاد شده است؛ شواهد وجود دشت آبرفتی، در گمانه‌های اکتشافی مسیر تونل نیز قابل مشاهده می‌باشند [۱۸].

¹ Riben

² Alluvial Plain



شکل ۳-۳ : چینه‌شناسی آبرفت‌های تهران [۱۸]

۳-۵ روش حفر و سیستم نگهداری

تونل‌سازی در زمین‌های نرم در ساخت و سازهای شهری در اعماق نسبتاً کم انجام گرفته و در اغلب شهرها نیز دیده می‌شود. به طور کلی تونل‌سازی در زمین‌های سست از پیچیدگی و حساسیت خاصی برخوردار است. در واقع تونل‌سازی در زمین‌های نرم یک هنر است. طبیعت عملیات تونل‌سازی در زمین‌های سست شامل حفاری با نیروی زیاد، نصب سریع سیستم نگهداری و اجرای عملیات تحت شرایط فوق‌العاده می‌باشد. در مقایسه با تونل‌سازی در محیط سنگی، تونل‌های موجود در زمین‌های نرم جهت حفظ فضای ایجاد شده کمابیش به نگهداری آنی نیاز دارند [۱۹].

تونل‌سازی در زمین‌های نرم در قدیم با روش‌های سنتی و حفاری دستی انجام می‌شد. با پیشرفت تکنولوژی در عرصه‌های مختلف، فن تونل‌سازی نیز از این امر مستثنا نبود و تحولات عمده‌ای در آن صورت یافت، هرچند که هنوز هم روش‌های سنتی کاربرد وسیعی در این زمینه دارند ولی در هر جا

که امکان استفاده از ماشین‌آلات حفاری وجود داشته باشد از آن‌ها برای حفاری کمک گرفته می‌شود. یکی از ماشین‌آلات حفاری مورد استفاده در این نوع زمین‌ها، ماشین حفاری تمام مقطع می‌باشد. در کنار استفاده از این ماشین، به منظور جلوگیری از نشست زمین و ورود جریان آب به داخل تونل حفر شده و نگهداری ماشین و تجهیزات مربوط به آن و تسریع انجام پروژه، در حین حفاری از سگمنت‌های پیش‌ساخته بتنی استفاده می‌شود [۱۹].

همان‌گونه که در مطالب بالا اشاره شد، از آن جایی که پروژه تونل کمکی کانال ابوذر در زمین‌های سست شهری حفاری می‌شود، استفاده از روش‌های حفر مکانیزه امری تقریباً ضروری به نظر می‌رسد، لذا براساس ضرورت و مطالعات انجام گرفته ماشین حفاری تمام مقطع برای حفاری تونل انتخاب شده است. دستگاه استفاده شده در این پروژه محصول سال ۱۹۹۷ شرکت لوات^۱ کانادا بوده و از نوع متعادل‌کننده فشار زمین است. این ماشین حفاری قبل از استفاده حفاری این تونل در پروژه دیگری مورد استفاده قرار گرفته این دومین تونلی است که توسط این ماشین در ایران حفر می‌شود. شکل (۳-۴) ماشین حفاری مربوط به این پروژه را نشان می‌دهد.

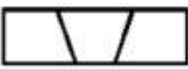
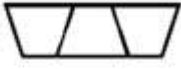




شکل ۳-۴ : ماشین حفاری مورد استفاده در حفاری تونل کمکی کانال ابوذر [۲۰]

^۱ LOVAT

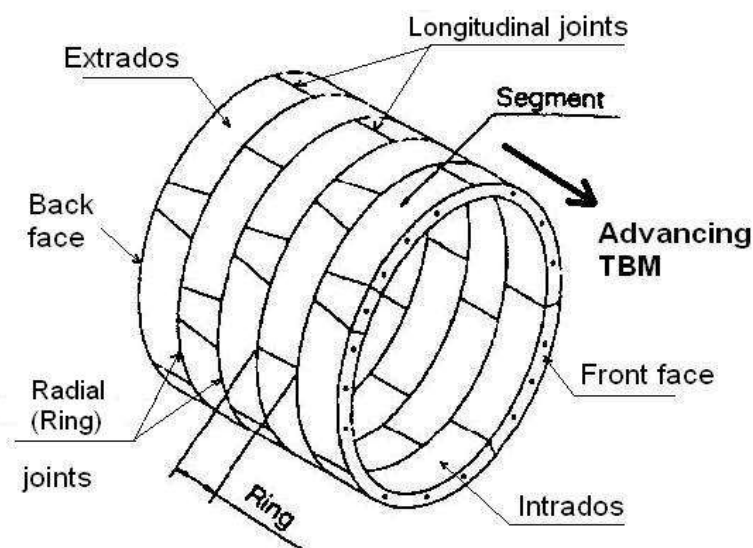
نگهداری دائم بتنی اغلب در تونل‌های زیرزمینی در سنگ‌های نرم در مناطق شهری، تونل‌های انتقال آب در سنگ سخت، تونل‌های راه‌آهن در سنگ‌های نرم و سخت، تونل‌های روزمینی و زیرزمینی برای انتقال فاضلاب و ... بکار می‌رود. پوشش دائم در سیستم حفاری مکانیزه اصطلاحاً پوشش سگمنتال نامیده می‌شود (شکل ۳-۵) و متشکل از قطعات پیش‌ساخته در شرایط خاص است. به لحاظ هندسی و نحوه کنار هم قرار گرفتن آن‌ها جهت تشکیل یک حلقه کامل سگمنت به سیستم‌های چیدمان مستطیلی، دوزنقه‌ای، لوزی شکل (متوازی‌الاضلاع)، شش ضلعی تقسیم می‌شوند. سه سیستم اول به صورت حلقه به حلقه (رینگ به رینگ) و سیستم آخر به صورت پیوسته اجرا می‌گردد. جهت تکمیل کردن حلقه و ایجاد اتصال فشاری میان قطعات سگمنت و ایجاد چفت و بست در سیستم از یک قطعه تکمیلی سگمنت به نام کلید استفاده می‌شود که با توجه جدول (۳-۱) برای سیستم‌های ۱ و ۳ لازم است. برای آب‌بندی بین هر سگمنت از گسکت‌ها استفاده می‌شود [۱۹].

جدول ۳-۱ : مشخصات کلی سیستم‌های چیدمان [۱۹]

هندسه سگمنت	سیستم متعارف مستطیلی (با کلید)	سیستم دوزنقه ای	سیستم لوزی شکل	سیستم شش ضلعی
هندسه				
مراحل نصب	حلقه به حلقه - ناپیوسته	حلقه به حلقه - ناپیوسته	حلقه به حلقه - ناپیوسته	پیوسته
سگمنت کلید	دارد	ندارد	دارد	ندارد
اجرای قوس و اصلاح مسیر	نیاز به سگمنت های خاص یا دوزنقه ای (سیستم حلقه جهانی)	نیاز به سگمنت های خاص یا دوزنقه ای (سیستم حلقه جهانی)	نیاز به سگمنت های خاص یا دوزنقه ای (سیستم حلقه جهانی)	نیازمند المان های خاص نیست - بازشدگی های درزهای پیرامونی محدود می گردد
آبندی درز	درزهای باز یا گسکت	درزهای باز یا گسکت	درزهای باز یا گسکت	درز باز یا دز گیری شده

سیستم نگهداری در پروژه تونل کمکی کانال ابوذر سیستم نگهداری سگمنتال می‌باشد که بلافاصله بعد از هر گام پیشروی ماشین حفاری برای ایجاد نگهداری مطمئن نصب می‌شود. سگمنت‌های مورد استفاده در این پروژه از نوع مستطیلی می‌باشند و ضخامت هر سگمنت تقریباً ۲۵ سانتیمتر است. در هر رینگ چهار نوع سگمنت مورد استفاده قرار می‌گیرد که سگمنت A و B هر کدام دوتا و

سگمنت C و K هرکدام یک عدد مورد استفاده قرار می‌گیرد (سگمنت K همان کلید می‌باشد، سگمنت‌های A، B و C تنها از نظر ابعادی تفاوت اندکی در لبه‌های اتصال باهم دارند).



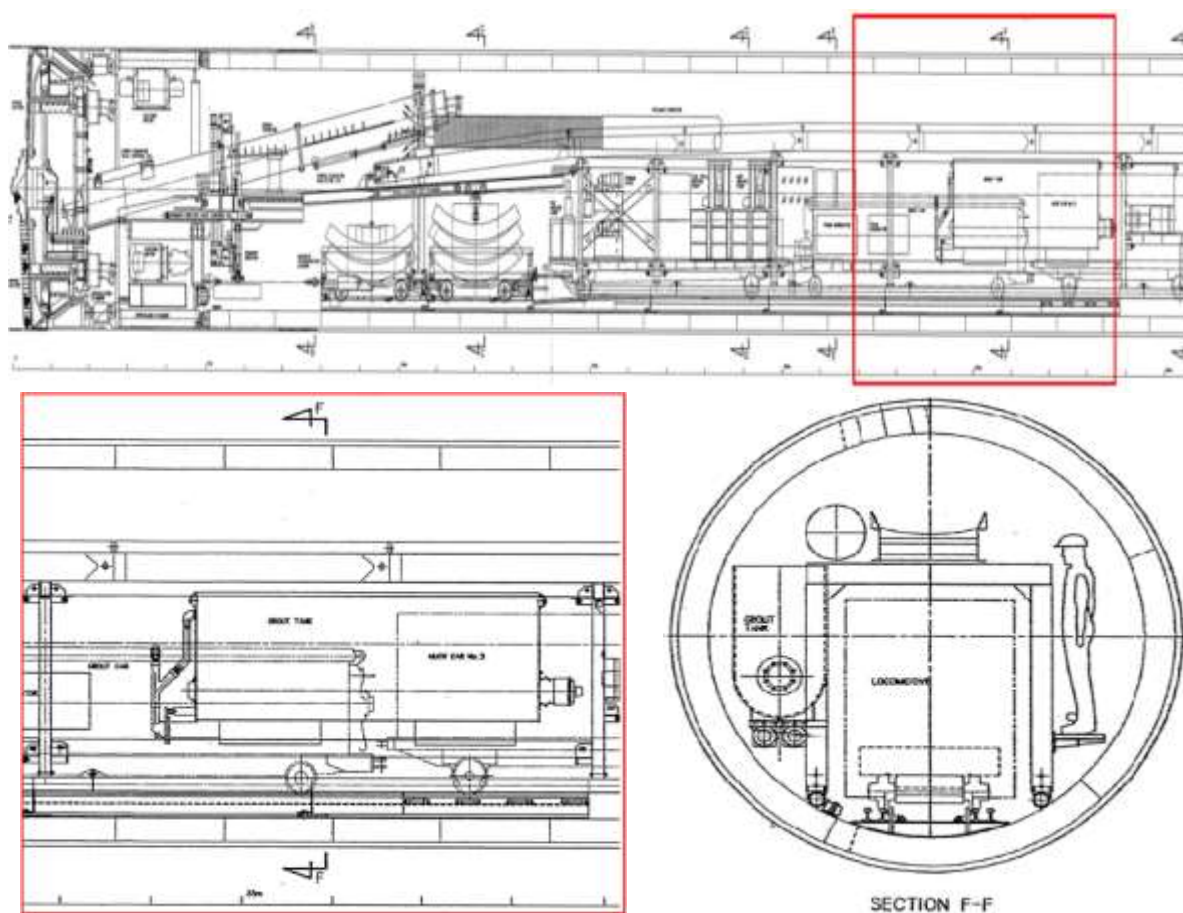
شکل ۳-۵: اجزا و نمایی از پوشش سگمنتی تونل [۳]

۳-۶ تزریق پرکننده در تونل ابوذر

همان‌طور که اشاره شد، یکی از اجزای حیاتی و لاینفک پیشروی تونل به ویژه در محیط‌های شهری، پر کردن فضای خالی پشت سگمنت‌ها است. اهداف اساسی از این عملیات به شرح زیر است :

- کاهش نشست سطحی در بالای تونل.
- ایجاد سطح تماس یکنواخت بین پوشش تونل و زمین.
- تثبیت و حفظ رینگ سگمنتی در محل خود پس از عبور سپر.
- تکمیل آب‌بندی تونل.

روشی که در این تونل جهت تزریق پرکننده مورد استفاده قرار گرفته تزریق شعاعی (تزریق از چال‌های تعبیه شده در سگمنت‌ها) می‌باشد به طوری که پس از خروج سگمنت از سپر تزریق پشت آن رینک تا پر شدن و رسیدن فشار تزریق به ۴ بار ادامه می‌یابد. در شکل (۳-۶) موقعیت مخزن و پمپ‌های تزریق بر روی سیستم پشتیبانی آورده شده است.



شکل ۳-۶: موقعیت مخزن و پمپ‌های تزریق بر روی سیستم پشتیبانی [۱۶]

۷-۳ جمع‌بندی

تونل کمکی کانال ابوذر در بخش شرقی بلوار ابوذر و در مجاورت کانال سرخه حصار حد فاصل پل دوم تا بزرگراه افسریه احداث می‌شود. این تونل با هدف انتقال بخشی از آب کانال سرخه حصار و به منظور کاهش خطرات ناشی از عبور جریان آب کانال در دوره های سیلابی طراحی و اجرا می‌شود.

طول این تونل حدود ۴۰۰۰ متر بوده و به صورت مکانیزه توسط یک دستگاه TBM، حفاری می‌شود. قطر حفاری آن ۴/۳۵ و قطر تمام شده آن ۳/۷ متر می‌باشد.

مسیر تونل کمکی کانال ابودر در کوه‌پایه جنوبی رشته کوه البرز و شرق کوه‌های جنوب شرقی تهران (بی‌بی شهربانو) قرار گرفته است و با توجه به نقشه ریخت‌شناسی تهران در دشت آبرفتی قرار گرفته است. مسیر تونل کمکی کانال ابودر در آبرفت‌های کوتاه‌تری تهران قرار گرفته که بر اساس نقشه زمین شناسی تهیه شده، در محدوده واحد های آبرفتی D تهران واقع شده است.

پروژه تونل کمکی کانال ابودر در زمین‌های سست شهری توسط ماشین حفاری تمام مقطع TBM حفاری می‌شود که ماشین حفاری در این پروژه محصول سال ۱۹۹۷ شرکت لووت کانادا بوده و از نوع متعادل کننده فشار زمین است. سیستم نگهداری در پروژه تونل کمکی کانال ابودر سیستم نگهداری سگمنتال می‌باشد که بلافاصله بعد از هرگام پیشروی ماشین حفاری برای ایجاد نگهداری مطمئن نصب می‌شود. سگمنت‌های مورد استفاده در این پروژه از نوع مستطیلی می‌باشند و ضخامت هر سگمنت تقریباً ۲۵ سانتیمتر است.

براساس امکانات موجود و ملاحظات فنی و اقتصادی انجام شده روشی که در پروژه تونل کمکی کانال ابودر جهت تزریق تماسی مورد استفاده قرار گرفته تزریق شعاعی (تزریق از چال‌های تعبیه شده در سگمنت‌ها) می‌باشد به طوری که پس از خروج سگمنت از سپر، تزریق پشت آن رینک تا پر شدن و رسیدن فشار تزریق به ۴ بار ادامه می‌یابد.

همان‌گونه که اشاره شد برای جلوگیری از مشکلات ناشی از حفاری فضای زیرزمینی پرکردن فضای ایجاد شده بین پوشش بتنی و مقطع حفاری امری ضروری است. بدین منظور لازم است تا ماده پرکننده مناسب که از نظر فنی و اقتصادی قابل توجه باشد انتخاب شود. ماده‌ای که به عنوان پرکننده استفاده می‌شود به صورت دوغاب (ملات) می‌باشد، برای این‌که دوغاب استفاده شده برای پرکردن فضای خالی از منظر فنی مطلوب و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد باید دارای طرح

اختلاطی مناسب باشد تا اهداف فنی و اقتصادی را تأمین نماید. در فصل بعد با انجام آزمایش‌های مختلف طرح اختلاط مناسب برای تزریق تماسی در پروژه تونل کمکی ابوذر تهران انتخاب خواهد شد.

فصل چهارم

مرور مطالعات قبلی برای تعیین

طرح اختلاط مناسب در تزریق

پراکنده

فصل چهارم

مرور مطالعات قبلی برای تعیین طرح اختلاط مناسب در تزریق پرکننده

۱-۴ مقدمه

پر کردن فضای حلقوی که در پشت پوشش بتنی و فضای خالی ایجاد شده در طی پیشروی ماشین حفاری ایجاد می‌شود یکی از عملیات مهم در حفاری مکانیزه محسوب می‌شود. هدف اصلی از این کار به حداقل رساندن جابجایی سطح زمین به سبب حفاری و ایجاد فضای خالی در مسیر ماشین حفاری می‌باشد. برای رسیدن به این هدف پر کردن همزمان با حفاری، فضای خالی ایجاد شده و تزریق مواد با یک روشی خوب، عملیاتی و کارا لازم است [۱۵].

روش‌های مختلفی برای پر کردن فضای خالی پشت سگمنت‌ها در حفاری به وسیله TBM وجود دارد. به طور کلی تزریق پشت پوشش سگمنتی تونل به دو روش تزریق طولی از انتهای سپر همزمان با پیشروی دستگاه و تزریق به صورت شعاعی از داخل سگمنت تقسیم‌بندی می‌شود.

در تزریق محوری دوغاب از خطوط تعبیه‌شده در انتهای پوسته سپر به فضای خالی پشت سگمنت تزریق می‌شود. در این روش مشکل شایعی که با آن روبرو می‌شوند، انسداد خطوط تزریق است لذا باید در انتخاب طرح اختلاط مربوط به این روش بر روانی، پمپ‌پذیری بالا و زمان گیرش توجه بیشتری شود تا با مشکل انسداد مجاری تزریق روبرو نشود.

در روش دوم که تزریق از چال‌های تعبیه‌شده در سگمنت‌ها در حین ساخت انجام می‌گیرد. مواد با پکری که بر روی این چال‌ها بسته می‌شود به داخل فضای خالی پشت سگمنت‌ها تزریق می‌شود. در این روش می‌توان هم از ملات‌های دوجزئی و هم از ملات‌های تک جزئی جهت دوغاب پرکننده استفاده نمود.

استفاده از طرح اختلاط مناسب دوغاب برای تزریق امر مهمی است و لازم است تا دوغاب تهیه شده برای تزریق تماسی دارای کیفیت لازم جهت تزریق باشد. منظور از کیفیت مناسب دوغاب دارا بودن چندین ویژگی می باشد که عبارتند از : رسیدن به مقاومت اولیه در کمترین زمان با توجه به شرایط محیطی پروژه، دارا بودن روانی مناسب به طوری که برای پمپاژ و انتقال آن با مشکل روبرو نشود و حداقل بودن میزان افت و آباندازی دوغاب تزریقی برای جلوگیری از ایجاد فضای خالی پس از تزریق.

۲-۴ پروژه‌های اجرا شده در مناطق مختلف جهان

در این بخش چند مورد از پروژه‌های مختلف که در نقاط مختلف جهان اجرا شده و طرح اختلاط مناسب دوغاب در آن‌ها تعیین شده است با تفکیک دوغاب‌های دوجزبی و تک جزبی معرفی می شود و طرح اختلاط مربوط به هر پروژه توضیح داده می شود.

۱-۲-۴ دوغاب‌های دوجزبی

همان طور که در فصل دوم توضیح داده شد این نوع دوغاب‌ها از دوجزء تشکیل می شود که در اینجا به چندین پروژه که در آن‌ها از دوغاب دوجزبی استفاده شده اشاره می شود.

۱-۱-۲-۴ خط C متروی رم

پروژه خط C متروی رم شامل دو تونل دوقلو می باشد که توسط دو دستگاه TBM، EPB به قطر ۶/۷ متر حفاری شده است، طول تقریبی این تونل‌ها ۴ کیلومتر می باشد. محیطی که این تونل‌ها از آن عبور کرده خاک نرم بوده و جنس آن از ماسه با مقداری رس در زیر سطح ایستابی می باشد [۲۱]، طبق آزمایشات نفوذپذیری که بر روی خاک محیط انجام شده میزان نفوذپذیری خاک بالا ارزیابی شده است [۱۵].

نوع دوغاب تزریقی که در این پروژه در نظر گرفته شده تزریق دوجزئی بوده است. چندین فاکتور در طرح اختلاط آن در نظر گرفته شده که مهم ترین آن پمپ پذیری بالا و آب اندازی حداقل بوده زیرا سیستم انتقال مواد به جبهه کار سیستم انتقال توسط خط لوله و پمپاژ می باشد. طی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و کنترل خصوصیات مکانیکی دوغاب، طرح اختلاط مناسب دوغاب برای تهیه یک مترمکعب در این پروژه در جدول (۱-۴) آورده شده است. شکل (۱-۴) نمونه ای از پرکننده فضای بین پوشش سگمنتی و مقطع حفاری در تونل مترو رم ایتالیا را نشان می دهد [۱۵].

جدول ۱-۴ : طرح اختلاط دوغاب دوجزئی استفاده شده در خط C متروی رم (مقادیر برای یک مترمکعب) [۱۵]

آب (کیلوگرم)	بنتونیت (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	دیرگیر (لیتر)	زودگیر (لیتر)
۷۷۰-۸۲۰	۳۰-۶۰	۳۱۰-۳۵۰	۳-۷	۵۰-۱۰۰



شکل ۱-۴ : نمونه ای از پرکننده فضای بین پوشش سگمنتی و مقطع حفاری در تونل مترو رم ایتالیا [۱۵]

۲-۱-۲-۴ پروژه OMSHD^۱ در کشور نیوزلند

پروژه OMSHD نیوزلند با شیلد ترکیبی به قطر ۴/۳ متر حفاری شده است. به طور متوسط در این پروژه ۱۱۴ متر در هفته حفاری و پوشش بتنی نصب می شد. در این پروژه برای مصالح پرکننده

^۱ Oraki Main Sewer Hobson Diversion

فضای پشت پوشش بتنی خصوصیات ویژه‌ای در نظر گرفته شده است. بنابراین برای دوغاب تهیه شده در این پروژه، مقاومت $0/1 \text{ Mpa}$ بعد از نیم ساعت و 5 Mpa بعد از ۲۸ روز مد نظر بوده است. ضمناً دوغاب مورد استفاده جهت تزریق تماسی در این پروژه به صورت دوجزئی بوده است. طی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و کنترل خصوصیات مکانیکی دوغاب، طرح اختلاط مناسب دوغاب برای تهیه یک مترمکعب در این پروژه در جدول (۴-۲) ارایه شده است [۱۵].

جدول ۴-۲ : طرح اختلاط دوغاب دوجزئی استفاده شده در پروژه OMSHD (مقادیر برای یک مترمکعب) [۱۵]

آب (کیلوگرم)	بنتونیت (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	دیرگیر (لیتر)	زودگیر (لیتر)	فوق روان کننده (لیتر)
۷۳۰	۳۰	۴۸۰	۱	۵۰	۵

از آنجایی که مقدار مقاومت بالا مد نظر بوده بنابراین میزان سیمان مورد استفاده نیز مقدار بالایی (۴۸۰ کیلوگرم) می‌باشد. دوغاب تهیه شده با این مقدار سیمان قابلیت پمپاژ نداشت بنابراین ناگزیر از سوپر پلاستیزر در طرح اختلاط دوغاب استفاده شده است. با اضافه نمودن فوق روان کننده به طرح دوغاب به پمپ‌پذیری مطلوب رسیده و مقدار آن طوری تعیین شده تا از نظر مقاومت دوغاب تازه نیز بتوان به اهداف مورد نظر دست یافت [۱۵].

۴-۲-۱-۳ مترو صوفیه (بلغارستان)

پروژه متروی صوفیه شامل دو تونل به طول $3/47$ کیلومتر می‌باشد که توسط ماشین EPB حفاری شده است. این پروژه در اوایل سال ۲۰۰۹ تکمیل شده است. قطر ماشین‌هایی که برای حفاری این تونل مورد استفاده قرار گرفته $5/82$ متر می‌باشند. از نظر زمین‌شناسی محیط تونل‌ها آبرفتی بوده و در نواحی مختلف دامنه تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی گوناگون بوده است. طی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و کنترل خصوصیات مکانیکی دوغاب، طرح اختلاط مناسب دوغاب برای تهیه یک مترمکعب در این پروژه در جدول (۴-۳) آورده شده است [۱۵].

جدول ۳-۴ : طرح اختلاط دوغاب دوجزئی استفاده شده در خط متروی صوفیه (مقادیر برای یک مترمکعب) [۱۵]

آب (کیلوگرم)	بنتونیت (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	دیرگیر (لیتر)	زودگیر (لیتر)
۷۹۵	۲۵	۲۹۰	۲/۵	۷۵

دوغاب تهیه شده در مدت ۱۲ ثانیه حالت ژله‌ای پیدا می‌کند و طی یک ساعت مقاومت آن به $0.3/0$ Mpa و در ۲۴ ساعت مقاومت آن به $1/5$ Mpa می‌رسید. میزان تزریق دوغاب در هر گام پیشروی در این پروژه در حدود ۱۳۰-۱۲۰ درصد مقدار تئوری برآورد شده می‌باشد.

۲-۲-۴ دوغاب‌های تک جزیی

در این قسمت به معرفی طرح اختلاط چند پروژه که در آن‌ها از دوغاب تک جزیی استفاده شده اشاره می‌شود.

۱-۲-۲-۴ خط یک متروی تورین (ایتالیا)

خط ۱ متروی تورین توسط ۳ ماشین EPB ساخت شرکت لوات کانادا در سال ۲۰۰۳ حفاری شده است (شکل ۲-۴). عمق متوسط تونل ۲۸ متر و طول آن ۹/۵ کیلومتر می‌باشد که شامل ۱۵ ایستگاه است. جدول (۴-۴) مشخصات ماشین‌های حفاری استفاده شده در این پروژه را نشان می‌دهد [۲۲].

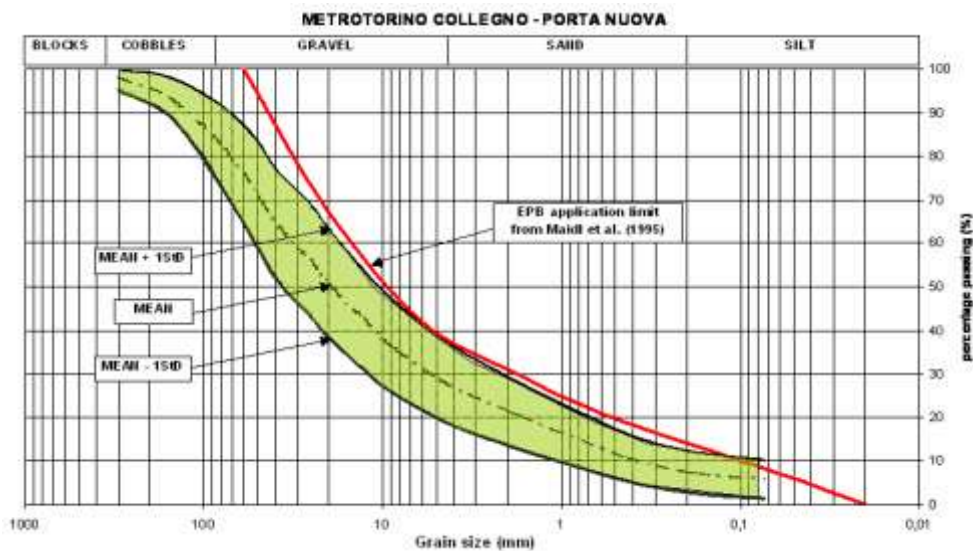


شکل ۲-۴ : نمایی از شیلد مورد استفاده در حفاری خط یک متروی تورین [۲۲]

جدول ۴-۴ : مشخصات TBM های مورد استفاده در خط یک متروی تورین [۲۲]

TBM ها	قطر حفاری (میلی متر)	توان کله حفار (کیلووات)	نیروی پیشران (کیلو نیوتن)	طول سپر (متر)	طول بک آپ (سیستم پشتیبانی) (متر)
Lot 3,4	۷۸۰۲	۲۱۰۰	۲۰۴۰۰	۱۰/۰	۹۸
Lot 5	۸۰۳۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰۰	۹/۱	۱۰۰

به دلیل عدم وجود ذرات زیر ۲ میلی متر توزیع دانه بندی زمین غیرعادی بوده و با پیش بینی طراحی متمایز می باشد. احتمال وجود سنگ و بولدر در مسیر بسیار بالا بوده لذا طبق آزمایش توزیع دانه بندی کارآیی ماشین حفاری مدل EPB بسیار بالا نخواهد بود و با مشکلاتی مواجه خواهد بود. نمودار دانه بندی خاک مسیر متروی تورین در شکل (۳-۴) آورده شده است.



شکل ۳-۴ : نمودار دانه بندی خاک خط یک متروی تورین [۲۲]

طی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده و کنترل خصوصیات مکانیکی دوغاب، طرح اختلاط مناسب دوغاب برای تهیه یک مترمکعب در جدول (۴-۵) آورده شده است.

جدول ۴-۵ : طرح اختلاط دوغاب استفاده شده در خط یک متروی تورین (مقادیر برای یک مترمکعب) [۱۵]

آب (کیلوگرم)	بنتونیت (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	خاکستر آتش فشانی (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	گچ (کیلوگرم)
۳۰۰	۲۵	۲۰۰	۴۰۰	۱۰۰۰	۵۰

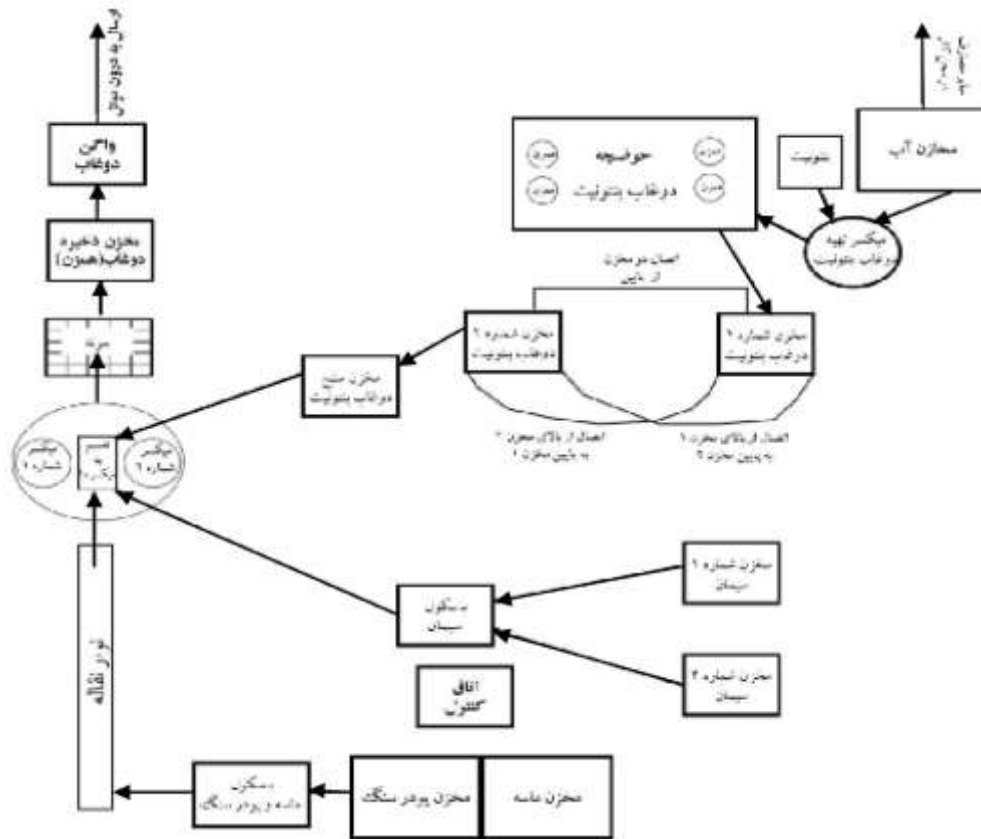
۴-۲-۲-۲ متروی شیراز

شهر شیراز بر روی آبرفت‌های جوان دوران چهارم توسعه‌یافته و منشأ این آبرفت‌ها تابع حمل رسوب توسط رودخانه خشک و رسوب‌گذاری در دریاچه مهارلو است. آبرفت‌های دوران چهارم دشت شیراز از رسوبات دانه‌درشت واریزه‌ای و مخروط افکنه‌ها در حاشیه ارتفاعات، تا رسوبات دانه‌ریز دریاچه‌ای در کنار دریاچه مهارلو متغیر است.

۱۳ کیلومتر از طرح تونل‌ها قطار شهر مترو شیراز توسط دو دستگاه EPB TBM با قطر حفاری ۶/۸۸ متر در حال حفاری است. که قطر خارجی رینگ‌های بتنی نصب شده ۶/۶ متر است. ۱۴ سانتی-متر فضای خالی بین رینگ‌های بتنی و خاک وجود دارد که توسط دوغاب پر می‌شود ۱۱ کیلومتر از مسیر محیط حفاری اشباع بوده و یکی از مهم‌ترین انتظارات از دوغابی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، داشتن خاصیت آب‌بند کنندگی برای نگهداری سگمنت نصب شده لازم است.

مصالحی که در کارگاه قطار شهری شیراز جهت تهیه دوغاب استفاده می‌شود شامل سنگ‌دانه (ماسه بادی و پودر سنگ)، سیمان پرتلند نوع ۲ بتونیت و آب 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 تونل‌های مترو در محیطی اشباع حفر می‌شده است و لذا جهت جلوگیری از نفوذ آب به محیط تونل و آب‌بند کردن دیواره نگهداری نصب شده، به مخلوطی نیاز است که دارای خاصیت آب-بند کنندگی بالا باشد [۲۳].

در جدول (۴-۶) طرح اختلاط ارایه شده برای تونل متروی شیراز و در شکل (۴-۳) مدار تهیه و تزریق دوغاب این پروژه نشان داده شده است [۲۳].



شکل ۳-۴ : فلوچارت مدار تزریق تک جزئی در مترو [۲۳]

جدول ۴-۶ : طرح اختلاط دوغاب استفاده شده در متروی شیراز (مقادیر برای یک مترمکعب) [۲۳]

آب (لیتر)	بنتونیت (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	پودر سنگ (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)
۴۵۰	۱۳/۵	۷۵	۱۰۰	۱۰۷۰

نتایج مربوط به مطالعات تعیین طرح اختلاط مناسب تزریق در دو پروژه متروی اصفهان در جدول

(۷-۴) خلاصه شده است.

جدول ۴-۷ : نمونه‌هایی از طرح اختلاط استفاده شده در پروژه‌های ایران [۲۴]

مواد سازنده	فوق روان کننده (لیتر)	پودر سنگ (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	بنتونیت (کیلوگرم)	آب (کیلوگرم)
متروی اصفهان	۴	۳۵۰	۱۲۰۰	۱۰۰	۱۲	۲۷۰

در ادامه در جدول (۴-۸) طرح اختلاط دوغابی که در تزریق پرکننده چند مورد از پروژه‌های مختلف جهان استفاده شده آورده شده است.

جدول ۴-۸ : نمونه‌هایی از طرح اختلاط تک جزئی پروژه‌های مختلف جهان [۲۳]

پروژه	اجزای دوغاب	زمین‌شناسی منطقه
Toulouse Metro Lot 2, 2002	سیمان نوع ۲ : $60 (kg/m^3)$ خاکستر آتشفشانی : $120 (kg/m^3)$ ماسه : $1430 (kg/m^3)$ آب : $240 (lit)$ بنونیت : $16 (kg/m^3)$ پودر سنگ : $150 (kg/m^3)$	رس با پتانسیل کلوخه شونده‌گی بالا
Milano, 2003	سیمان نوع ۴ : $240 (kg)$ پودر سنگ : $450 (kg)$ ماسه : $1200 (kg)$ آب : $300 (Lit)$	خاک متخلخل و آبدار، شن به همراه ماسه و مقداری لای ضعیف
Nodo di Bologna, 2003	سیمان نوع ۴ : $160 (kg)$ پودر سنگ : $230 (kg)$ خاکستر آتشفشانی : $330 (kg)$ ماسه : $900 (kg)$ آب : $300 (Lit)$	لای_شن ماسه_رس
Hastings, UK, 2003	سیمان : $110 (kg/m^3)$ خاکستر آتشفشانی : $330 (kg/m^3)$ ماسه : $1305 (kg/m^3)$ آب : $255 (lit)$ بنتونیت : $10 (kg/m^3)$	شرایط مختلف زمین‌شناسی از ماسه روان با سطح آب زیرزمینی بالا

۴-۳ جمع‌بندی

همان طور که اشاره شد به طور کلی دو روش تزریق در تونل‌های حفر مکانیزه شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارت‌اند از : تزریق محوری و تزریق شعاعی. دوغاب‌هایی (ملات‌هایی) که در هر یک از روش‌های محوری یا شعاعی جهت تزریق استفاده می‌شود، به طور عمده به دو نوع تک جزئی و دو جزئی تقسیم می‌شود.

جهت انجام عملیات تزریق پر کننده پشت سگمنت، ترکیب‌های مختلفی از مصالح می‌توان بکار برد که نسبت و نوع این مواد بسته به اهداف و کاربرد تزریق، در دسترس بودن مصالح و اقتصادی بودن عملیات دارد. جهت تعیین طرح اختلاط دوغاب تزریقی باید آزمایش‌های مختلفی انجام شود تا طرح اختلاط مناسب دوغاب تعیین شود.

با دقت در پروژه‌هایی که در این فصل به طرح اختلاط آن‌ها اشاره شد به این نتیجه می‌توان رسید که لازم است طرح اختلاط پیشنهادی بسته به روش تزریق (محوری یا شعاعی) و همچنین پارامترهای مختلف مدنظر (مقاومت اولیه، میزان افت و آب‌انداختگی دوغاب و ...) که شرایط زمین-شناسی منطقه القا می‌کنند انتخاب شود.

فصل پنجم

تعیین طرح اختلاط مناسب تزریق

پرکننده تونل کمکی کانال ابوذر

فصل پنجم

تعیین طرح اختلاط مناسب پرکننده تماسی تونل کمکی کانال ابوذر

۵-۱ مقدمه

همان‌گونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، عملیات تزریق پرکننده در حفاری تونل‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. این عملیات را می‌توان به سه بخش تهیه دوغاب، انتقال دوغاب تا محل تزریق و تزریق تقسیم کرد. هر یک از بخش‌های اشاره شده در عملیات تزریق دارای اهمیت بوده و باید با دقت لازم اجرا شوند.

دوغاب مناسب تهیه شده برای تزریق پرکننده لازم است تا معیارهای مختلف فنی، اقتصادی و اجرایی را داشته باشد. از نظر اجرایی لازم است دوغاب داری روانی مطلوب و قابلیت پمپ‌پذیری خوب در حین تزریق باشد. از نظر فنی نیز دارا بودن مقاومت مناسب بسته به شرایط اجرای پروژه، رسیدن به حد مطلوب مقاومت در زمان مناسب، عدم افت آن (کاهش حجم) پس از تزریق، مقدار آب‌اندازی حداقل و دارا بودن روانی مطلوب امری ضروری است. از نظر اقتصادی نیز دوغاب باید طوری طراحی شود که علاوه بر تأمین معیارهای فنی و اجرایی دارای صرفه اقتصادی یعنی مصرف کمترین مقدار سیمان که در تعیین قیمت تمام شده دوغاب نقش اساسی دارد، باشد.

برای تزریق تک جزیی در این پروژه سه گزینه استفاده از دوغاب‌های بدون سیمان، کم سیمان و پایه سیمانی بود که دو گزینه اول (دوغاب‌های بدون سیمان و کم سیمان) به دلیل نیاز به دستیابی به مقاومت اولیه بالا در کوتاه مدت، سرعت بالای پیشروی و عدم دسترسی به سیمان‌های طبیعی مانند خاکستر آتشفشانی قابل استفاده نبود لذا از دوغاب پایه سیمانی برای تزریق پرکننده انتخاب شد که در این فصل طرح اختلاط آن تعیین می‌شود.

بدیهی است در صورتی که دوغاب تهیه شده هر کدام از معیارهای اشاره شده را دارا نباشد،

عملیات تزریق اهداف تزریق پرکننده را به خوبی تأمین نخواهد کرد و بنابراین مشکلاتی از جمله نشست (بالا بودن افت دوغاب باعث ایجاد فضای خالی و در نتیجه آن نشست در سطح زمین خواهد شد)، گرفتگی مجاری تزریق (عدم دارا بودن روانی مطلوب دوغاب باعث گرفتگی و انسداد لوله‌های تزریق و همچنین هدر رفتن سرمایه در حین شست‌وشوی لوله‌های تزریق و ماشین‌آلات انتقال دوغاب می‌شود) را به بار خواهد آورد که با دقت در طراحی دوغاب مناسب می‌توان این مشکلات را به حداقل رسانید و عملیات تزریق و در کل عملیات اجرایی موفقیت‌آمیزی داشت.

چهار سری آزمایش در این فصل انجام شده است. سه سری اول جهت انتخاب سنگدانه مناسب برای دوغاب بوده است و سری چهارم باهدف تعیین مقدار دقیق اجزا و به حداقل رساندن مصرف سیمان در طرح اختلاط انتخابی برای تزریق تماسی انجام شده است. بدین منظور در این فصل به ارائه نتایج آزمایشات انجام شده برای تعیین طرح اختلاط مناسب دوغاب پرداخته شده و با ارزیابی طرح اختلاط‌های انجام شده در آزمایشگاه و بررسی نتایج به دست آمده از این ارزیابی‌ها، طرح اختلاط مناسب دوغاب تزریق تماسی برای پروژه تونل کمکی کانال ابوذر معرفی شده است.

۵-۲ اجزای استفاده شده در تهیه دوغاب

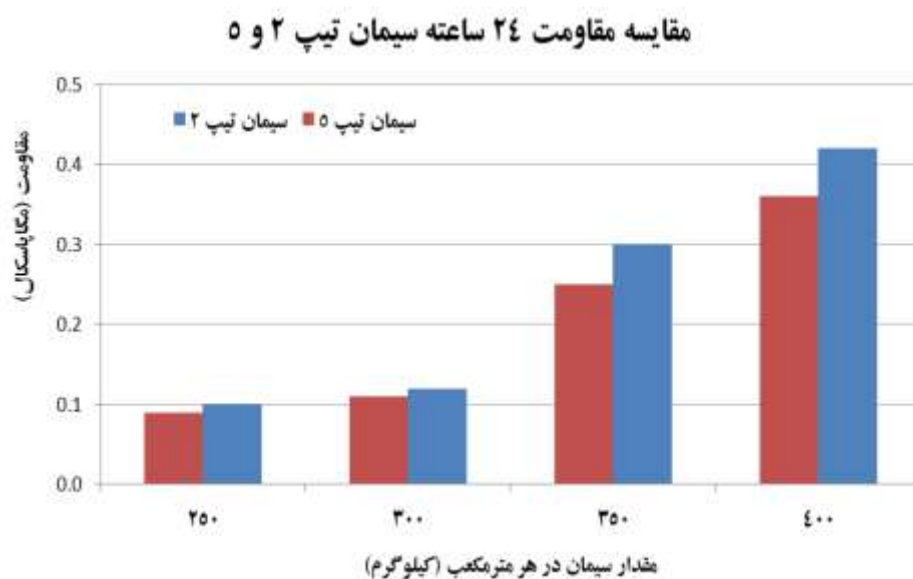
در تزریق پرکننده پروژه تونل کمکی ابوذر برای تهیه دوغاب از مصالح سیمان، بنتونیت، آب و سنگ‌دانه (ماسه ۰.۲، ماسه بادی و پودر سنگ) استفاده می‌شود که جزئیات مربوط به هر یک از این اجزا در ادامه توضیح داده می‌شود.

۵-۲-۱ سیمان

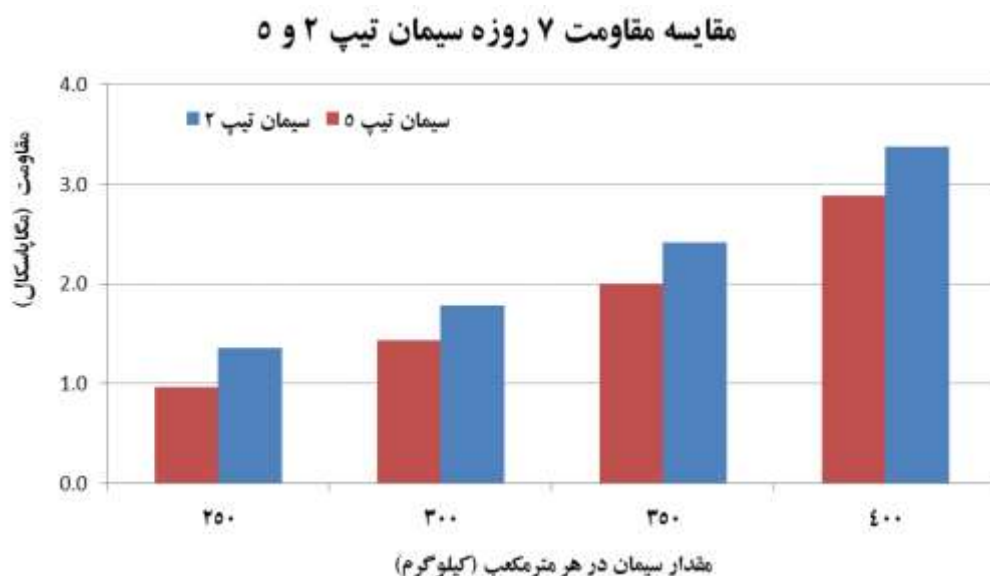
همان‌گونه که قبلاً اشاره شد معمولاً ۵ نوع سیمان پرتلند در تهیه بتن استفاده می‌شود. از میان سیمان‌های پرتلند موجود دو نوع سیمان تیپ ۲ و ۵ که در دسترس بوده و با توجه به موقعیت و شرایط پروژه برای تهیه دوغاب مناسب بودند، برای انتخاب سیمان مناسب مد نظر قرار گرفتند. از آن-

جا که معیار اصلی برای انتخاب سیمان مقاومت اولیه (۲۴ ساعته) و مقاومت نهایی (۷ روزه) دوغاب می‌باشد بنابراین دو سری نمونه با استفاده از نسبت‌های وزنی مختلف سیمان‌های تیپ ۲ و تیپ ۵ تهیه شد و مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه آن‌ها تعیین و باهم مقایسه گردید. سایر اجزاء دوغاب در تمامی نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد.

مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته و ۷ روزه برای نمونه‌های تهیه شده از سیمان تیپ ۲ و تیپ ۵ به ازای مقادیر مختلف وزنی سیمان‌ها به ترتیب در شکل (۵-۱) و شکل (۵-۲) نشان داده شده است. ارزیابی نتایج این دو شکل بیانگر این است که همواره مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه نمونه‌های تهیه شده از سیمان تیپ ۲ بیش‌تر از سیمان تیپ ۵ است. با توجه به این نتایج سیمان تیپ ۲ برای تهیه دوغاب تزریق تماسی در پروژه کانال ابوذر انتخاب گردید.



شکل ۵-۱: نمودار نتایج آزمایشات مقایسه مقاومت ۲۴ ساعته سیمان‌های تیپ ۲ و ۵ [۱۷]



شکل ۵-۲: نمودار نتایج آزمایشات مقایسه مقاومت ۷ روزه سیمان‌های تیپ ۲ و ۵ [۱۷]

۲-۲-۵ بنتونیت

همان طور که در بخش‌های قبل بیان شد، درصد جذب آب بنتونیت بسیار زیاد بوده و بسته به شرایط استفاده از آن، می‌تواند بیش از ۵ برابر وزن خود، آب جذب کند. این خاصیت بنتونیت را حد روانی گویند که طبق استاندارد ASTM D4318 قابل اندازه‌گیری است. بنتونیت به منظور تثبیت ملات یا دوغاب (کاهش آب اندازی دوغاب سیمان) به آن افزوده می‌شود.

اضافه کردن بنتونیت به مخلوط باعث می‌شود که مخلوط حاصل حالت سوسپانسیونی داشته و در نتیجه قابلیت جریان یابی و پمپاژ مخلوط افزایش می‌یابد. ولی افزایش بیش از حد بنتونیت به مخلوط علاوه بر غلیظ کردن بیش از حد مخلوط، به علت خاصیت جذب آب آن، باعث می‌شود که آب کافی جهت هیدراته شده سیمان موجود در ترکیب باقی نمانده و در نتیجه مقاومت نهایی مخلوط به شدت کاهش یابد.

برای استفاده از بنتونیت در مخلوط دوغاب، باید بنتونیت عمل‌آوری شود. در این تحقیق جهت عمل‌آوری بنتونیت از همزن دور بالا استفاده شد بدین ترتیب که ابتدا بنتونیت و آب با نسبت ۱:۸ (۸ واحد وزنی آب و یک واحد وزنی بنتونیت) در داخل سطلی ریخته شده و سپس با استفاده از مته و

همزن متصل به آن آب و بنتونیت با دور بالای مته کاملاً مخلوط شدند. پس از هم زدن این مخلوط، بنتونیت عمل آوری شده به رنگ شیری و به صورت ژله‌ای ایجاد می‌شود. در شکل (۳-۵) یک نمونه از فرآیند عمل آوری بنتونیت نشان داده شده است. بنتونیتی که عمل آوری شده طبق استاندارد باید ۲۴ ساعت بعد از عمل آوری به مصرف برسد و تا ۷۲ ساعت بعد از عمل آوری می‌توان از آن استفاده نمود.



شکل ۳-۵ : عمل آوری بنتونیت با همزن دور بالا

بعد از عمل آوری بنتونیت، حد روانی آن با استفاده از استاندارد ASTM D4318 تعیین گردید. برای انجام این کار مطابق شکل (۴-۵) با استفاده از دستگاه کاساگرانده حد روانی بنتونیت را تعیین می‌کنند. بدین منظور حدود ۲۵۰ گرم بنتونیت انتخاب کرده و چندین ساعت در مجاورت رطوبت قرار می‌دهند تا کاملاً اشباع شود. پس از اطمینان از اشباع کامل بنتونیت آن را با کاردک ورز داده و سپس به شکل کروی در می‌آورند و از دستی به دست دیگر پرتاب می‌کنند تا در حد امکان حفرات هوا که داخل آن است خارج گردد. مقداری از نمونه را برای آزمایش حد خمیری جدا می‌کنند (به اندازه حجم گردو) و در محل برنجی دستگاه کاساگرانده قرار داده و با

استفاده از کاردک سطح خمیر را به صورت افقی و هم تراز لبه پایین جام پرداخت می‌کنند (به صورتی که حداکثر عمق بنتونیت ۸ میلی‌متر شود). با استفاده از شیار کش شیاری در طول محور تقارن جام ایجاد می‌کنند. دستگاه به گونه‌ای تنظیم می‌شود که جام با سرعت ثابت بالا رفته و از ارتفاع ۱۰ میلی‌متری پایین می‌افتد. با این کار نمونه در داخل جام از دو طرف شروع به جریان یافتن به مرکز جام شده و باعث بسته شدن شیار می‌شود. تعداد ضرباتی (N) که لازم است تا شیار به اندازه ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) بسته شود یادداشت می‌شود. اگر مقدار (N) بین ۲۰ تا ۳۰ بود یک نمونه از بنتونیت را جدا کرده و درصد رطوبت آن تعیین می‌شود. بدین ترتیب مقدار حد روانی با مشخص شدن درصد رطوبت و قرار دادن در رابطه (۵-۱) تعیین می‌شود.

$$LL = W_n(\%) * \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad (۵-۱)$$

LL : حد روانی

W_n : درصد رطوبت

N : تعداد ضربات



شکل ۵-۴ : آزمایش اندازه‌گیری حد روانی بنتونیت

۳-۲-۵ سنگ‌دانه‌ها

انتخاب سنگ‌دانه‌ها به علت اینکه ۶۰ تا ۸۰ درصد حجم دوغاب را تشکیل می‌دهند از اهمیت اساسی برخوردار بوده و اثر مهمی در مقاومت نهایی دوغاب و سایر خواص آن خواهد داشت. دانه-بندی سنگ‌دانه‌ها در مقدار مصرف سیمان، مقاومت نهایی و قابلیت پمپاژ دوغاب تأثیر دارد. بنابراین انتخاب سنگ‌دانه مناسب برای تهیه دوغاب تزریق از اهمیت بالایی برخوردار است.

در فاز آزمایشگاهی تعیین طرح اختلاط دوغاب تماسی تونل کمکی کانال ابوذر، از ماسه بادی، ماسه ۰۲، پودرسنگ و ترکیبی از آن‌ها برای تهیه دوغاب استفاده شده است. در تمامی طرح اختلاط‌ها بیش از ۵۰ درصد دوغاب را سنگ‌دانه تشکیل داده است. بنابراین با انجام آزمایش‌های مختلف سنگ‌دانه مناسب برای تهیه دوغاب تزریق تماسی تعیین شده است که در بخش‌های بعدی نتایج به دست آمده ارزیابی خواهد شد.

۴-۲-۵ آب

کیفیت آب در ساخت دوغاب بسیار حائز اهمیت است نامناسب بودن کیفیت آن ممکن است موجب تأخیر زمان گیرش سیمان و بالتبع آن تولید دوغاب دیرگیر شود و همچنین باعث افت مقاومت نهایی دوغاب می‌گردد.

در طرح اختلاط دوغاب آب مناسب، آبی است که پاک و عاری از هر گونه ناخالصی باشد، یا به عبارت دیگر قابل شرب باشد. در اختلاط دوغاب‌های تهیه شده در این پژوهش نیز آب شرب مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۵ پارامترهای کنترلی فنی برای انتخاب طرح اختلاط مناسب

در مطالعات مختلف برای تعیین طرح اختلاط مناسب دوغاب، عموماً چهار معیار فنی مقاومت فشاری (مقاومت فشاری ۲۴ ساعته و مقاومت فشاری ۷ روزه)، افت دوغاب، میزان آب‌اندازی

دوغاب و روانی دوغاب مد نظر قرار می‌گیرد. در این مطالعه نیز برای تعیین طرح اختلاط مناسب دوغاب تماسی در پروژه تونل کمکی کانال ابوذر از چهار معیار فنی فوق استفاده شده است. در این بخش ابتدا معیارهای مورد اشاره تعریف می‌شود سپس مقدار یا محدوده مجاز هر یک از معیارها برای دوغاب مورد نیاز در پروژه ارایه می‌شود. در نهایت نحوه تعیین یا اندازه‌گیری هر یک از معیارها برای دوغاب تهیه شده، شرح داده می‌شود.

در طراحی طرح اختلاط مناسب تزریق تماسی تونل ابوذر استفاده از مواد افزودنی دوغاب (روان-کننده و ...) به دلیل سیاست حاکم بر پروژه حاضر و دسترسی دشوار به این مواد، ممکن نبود، همان گونه که قبلاً بیان شد، برای تقویت روانی دوغاب دو راه وجود دارد، یکی استفاده از مواد افزودنی (روان‌کننده) و دیگری افزایش نسبت آب به سیمان با افزایش میزان آب طرح، که با توجه به مطالب بیان شده افزایش نسبت آب به سیمان راه حل پیش رو برای تقویت روانی و کارایی دوغاب است.

۵-۳-۱ مقاومت فشاری

مقاومت فشاری یکی از پارامترهای فنی مهم به حساب می‌آید. برای ارزیابی مقاومت دوغاب می‌توان دو مقاومت فشاری ۲۴ ساعته و ۷ روزه آن را مد نظر قرار داد. از آنجایی که از تزریق تماسی در محیط شهری مقاومت بالایی مورد انتظار نیست و فقط داشتن مقاومتی در حد مقاومت خاک محیط در برگیرنده تونل کافی است لذا اندازه‌گیری مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه نمونه‌ها در بررسی شرایط مقاومتی دوغاب کافی بوده و نیازی به ارزیابی مقاومت ۲۸ روزه نمی‌باشد.

در این پروژه مقدار مقاومتی که لازم است تا نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت و ۷ روز داشته باشند به ترتیب ۰/۲ و ۲ مگاپاسکال است (شرایط کارفرما). بنابراین هر طرحی که بتواند این شرایط را تأمین نماید از نظر مقاومت فشاری طرح مناسبی برای طرح اختلاط دوغاب تماسی خواهد بود.

برای تعیین مقاومت فشاری دوغاب از استاندارد ASTM C109 استفاده می‌شود. طبق این

استاندارد نمونه‌هایی با شکل مکعب مربع و با ابعاد ۵۰ میلی‌متر تهیه و تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد. بنابراین مطابق شکل (۵-۵ الف) از قالب مخصوص تهیه نمونه‌های مکعبی استفاده گردید. برای تهیه نمونه‌ها همان‌طور که در شکل (۵-۵ ب) نشان داده شده، دوغاب مورد آزمایش در داخل قالب‌ها ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در داخل آن باقی می‌ماند تا خشک شود. بعد از این مدت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها از قالب جدا می‌گردد. یکی از نمونه‌ها برای تعیین مقاومت فشاری ۲۴ ساعته، تحت بارگذاری محوری قرار می‌گیرد و نمونه یا نمونه‌های دیگر مطابق شکل (۵-۵ ج) در داخل حوضی که با آب آهک پر شده قرار داده می‌شود و پس از ۷ روز برای تعیین مقاومت فشاری ۷ روزه مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در شکل (۵-۵ د) چند نمونه تهیه شده برای آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده است.



شکل ۵-۵: مراحل مختلف تهیه نمونه برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری دوغاب: الف) قالب مخصوص تهیه نمونه‌های مکعبی، ب) تهیه نمونه‌ها برای تست مقاومت فشاری، ج) نمونه‌های تازه قرار داده شده در محفظه مخصوص برای خشک کردن آن‌ها، د) چند نمونه از دوغاب‌های تهیه شده

در این مطالعه برای انجام آزمایش فشاری تک محوره نمونه‌های مختلف، در آزمایشگاه کارخانه سگمنت موسسه عمران قرارگاه خاتم‌الانبیاء از دستگاه جک تک محوره با ظرفیت اسمی ۳۰ تن که ساخت شرکت تک آزما است، استفاده شده است. دستگاه بارگذاری فشاری تک محوره مورد استفاده در شکل (۵-۶ الف) و نشان‌گر دستگاه در شکل (۵-۶ ب) نشان داده شده است.



شکل ۵-۶: بارگذاری نمونه‌های دوغاب: الف) دستگاه بارگذاری استفاده شده، ب) نشان‌گر دیجیتالی دستگاه بارگذاری

۵-۳-۲ آب‌اندازی دوغاب

آب سبک‌ترین جزء دوغاب است. به طور طبیعی در اثر نیروی ثقل، مواد تمایل به حرکت به سمت پایین دارند. بنابراین در دوغاب که حاوی شیره آب و سیمان و ذرات بسیار ریز ماسه است نوعی جدایش موسوم به آب‌اندازی دوغاب ایجاد می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده آب‌اندازی دوغاب عبارت است از حرکت آب به سمت سطح دوغاب تازه که در اثر ته نشینی مواد جامد دوغاب اتفاق می‌افتد.

برای اندازه‌گیری آب‌اندازی دوغاب از استاندارد ASTM C960 استفاده می‌شود طبق این استاندارد میزان حجم آب جمع شده بر روی مخلوط نمونه را پس از ۴ ساعت اندازه می‌گیرند و با تقسیم این حجم بر حجم اولیه مخلوط درصد آب‌اندازی اندازه‌گیری می‌شود. در شکل (۵-۷) نحوه اندازه‌گیری آب‌اندازی دوغاب در آزمایشگاه پروژه تونل کمکی کانال ابوذر نشان داده شده است. محدوده مجاز آب‌انداختگی دوغاب ۳ درصد است. در طرح اختلاط‌های مختلف مطالعه شده در این تحقیق با توجه به مقدار سیمان و بنتونیت مصرفی در دوغاب، آب‌اندازی دوغاب در محدوده

۰/۳ تا ۲/۲ درصد اندازه‌گیری شدند. با توجه به محدوده مجاز این پارامتر همه طرح‌ها از این نقطه‌نظر قابل قبول بودند.



شکل ۵-۷: اندازه‌گیری مقدار آب‌اندازی

۳-۳-۵ افت یا انقباض دوغاب

افت یا انقباض دوغاب عبارت است از جمع شدگی یا کاهش حجم نمونه که با از دست دادن آب جذب‌شده در ساختار خمیر سیمان از دوغاب اتفاق می‌افتد. این پدیده از لحظات اولیه شروع گیرش دوغاب آغاز و در طول زمان سفت شدن نمونه ادامه دارد. افت دوغاب در حقیقت یک کاهش حجم است که در طول زمان اتفاق می‌افتد.

برای طرح اختلاط‌های مختلف با روشی که قبلاً توضیح داده شد، نمونه‌های مکعب مربعی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر تهیه گردید و پس از گذشت ۷ روز از نمونه‌گیری، ابعاد مکعب مطابق شکل (۵-۸) اندازه‌گیری و حجم ثانویه تعیین شد. نسبت تغییر حجم به حجم اولیه نمونه برحسب درصد افت حجم دوغاب را نشان می‌دهد مقدار مجاز افت دوغاب حدود ۲ درصد است.

اُفت دوغاب را پس از نمونه‌گیری از هر طرح (نمونه‌های مکعبی با طول ضلع ۵۰ میلی‌متری) و پس از گذشت زمان می‌توان اندازه‌گیری کرد. در تمامی طرح‌های انجام شده مقدار اُفت دوغاب بعد از ۷ روز اندازه‌گیری شد که مقدار آن کمتر از ۱/۵ درصد می‌باشند. از آنجایی که مقدار مجاز این پارامتر ۲ درصد است بنابراین این معیار نیز برای طرح‌های آزمایش شده مورد تأیید است.



شکل ۵-۸ : اندازه‌گیری اُفت دوغاب

۵-۳-۴ روانی دوغاب

بر طبق تعریف انجمن بتن آمریکا^۱ روانی دوغاب (ملات) عبارت است از قابلیت دوغاب یا ملات تازه مخلوط شده برای جریان یافتن است. در اکثر موارد روانی و کارایی دوغاب با یک معنی استفاده می‌شود. اما در حقیقت کلمه کارایی به سهولت در ریختن، قابلیت تراکم، سهولت در پرداخت دوغاب و مقاومت در برابر جداشدگی اطلاق می‌شود و با روانی تفاوت دارد. متأسفانه تاکنون هیچ آزمایشی که بتواند مستقیماً کارایی را به صورت کامل بیان نماید توسعه نیافته است ولی کوشش شده کارایی را با بعضی از خصوصیات فیزیکی آسان‌تر سنجش نمود. بهترین و

¹ American Concrete Institute

پرکاربردترین روش‌های ارزیابی روانی برای ارزیابی قابلیت پمپ کردن دوغاب ساخته شده قیف مارش و باکس L شکل است.

با توجه به محدودیت ابعاد ذرات (۲ میلی‌متر) مورد استفاده برای پمپ کردن عملاً از باکس L شکل نمی‌توان استفاده کرد. طبق استاندارد ASTM C939 اندازه‌گیری زمان قیف مارش برای طرح اختلاط-های انجام شده با توجه به نوع سنگ‌دانه‌های موجود در هر طرح میسر نبود. لذا حد روانی و کارایی به صورت چشمی مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۵ نحوه تهیه دوغاب با طرح اختلاط مد نظر

هر طرح اختلاطی که ارایه می‌شود برای تهیه یک مترمکعب دوغاب است و مقادیر اجزا به گونه‌ای است که مقدار دوغاب تهیه شده یک مترمکعب باشد. بدین منظور کافی است که وزن مخصوص هر یک از اجزای دوغاب مشخص باشد تا با استفاده از آن نسبت مواد و مقداری وزنی آن‌ها تعیین شود. به منظور کاربرد نتایج آزمایشگاهی در عمل، در این تحقیق جهت تهیه مخلوط‌های آزمایشگاهی تلاش شد تا همه شرایط با شرایط ساخت دوغاب یکسان باشد. از آنجایی که برای اندازه‌گیری پارامترهای کنترلی طراحی مد نظر (مقاومت تراکمی تک محوره، آب‌اندازی و افت دوغاب) تهیه مقدار ۲ لیتر کافی بود بنابراین نمونه‌های آزمایشگاهی که تهیه می‌شد دارای حجم ۲ لیتر بودند. در جدول (۵-۱) یک نمونه طرح اختلاط هم برای تهیه یک مترمکعب و هم برای تهیه نمونه آزمایشگاهی (۲ لیتر) آورده شده است (برای تعیین مقدار هر جزء در طرح اختلاط از این جدول استفاده شده است).

جدول ۵-۱: جدول طرح اختلاط دوغاب

مصلح	وزن مخصوص	مقادیر مورد نیاز (Kg)	(برای ۲ لیتر دوغاب) (gr)
سیمان	۳۱۸۰	۳۰۰	۶۰۰
بنتونیت	۲۶۶۰	۳۰	۶۰
پودر سنگ	۲۳۵۰	۰	۰
روان کننده	۱۱۰۰	۰	۰
ماسه بادی	۲۷۵۰	۱۱۰۰	۲۲۰۰
آب	۱۰۰۰	۴۹۵	۹۹۰
مقدار دوغاب (L)		۱۰۰۰/۶۲	۲/۰۰

براساس وزن مخصوص هر کدام از مواد مقدار آن‌ها طوری تعیین می‌شود که حجم نهایی دوغاب یک مترمکعب (هزار لیتر) باشد، سپس براساس این مقادیر، مقدار هر یک از مصالح برای تهیه نمونه آزمایشگاهی (۲ لیتر) مشخص می‌گردد.

بعد از مشخص شدن درصد وزنی هر یک از اجزاء تشکیل دهنده دوغاب، دوغاب تهیه می‌شود. بدین منظور در مرحله اول آب و بنتونیت در مخزن میکسر باهم مخلوط می‌شوند، پس از اختلاط کامل این دو جزء باهم در مرحله بعد سیمان به مخلوط آب و بنتونیت اضافه می‌شود بعد از این که سیمان به مخلوط اضافه شد دوباره مخلوط به‌طور کامل هم زده می‌شود تا دوغاب سیمانی تولید شود. در مرحله آخر اختلاط، سنگ‌دانه به دوغاب سیمان اضافه می‌گردد. در این مرحله به صورت تدریجی هم زمان با کار کردن میکسر، سنگ‌دانه به دوغاب سیمانی افزوده می‌شود. پس از آماده شدن دوغاب (ملات)، طبق استانداردهای توضیح داده شده، نمونه‌هایی از آن تهیه می‌شود تا معیارهای کنترلی اندازه‌گیری شده و طرح اختلاط در نظر گرفته شده ارزیابی گردد.

برای یکی از طرح اختلاط‌های آزمایش شده، مراحل مختلف اختلاط در شکل (۵-۹) نشان داده شده است. در شکل (۵-۹ الف) مرحله اول (اختلاط آب با بنتونیت عمل‌آوری شده)، در شکل (۵-۹ ب) مرحله دوم اختلاط یعنی اختلاط سیمان با مخلوط آب و بنتونیت، در شکل (۵-۹ ج) مرحله آخر یعنی اضافه کردن سنگ‌دانه به دوغاب سیمان و در شکل (۵-۹ د) نحوه اندازه‌گیری

وزن مخصوص دوغاب تهیه شده نشان داده شده است.



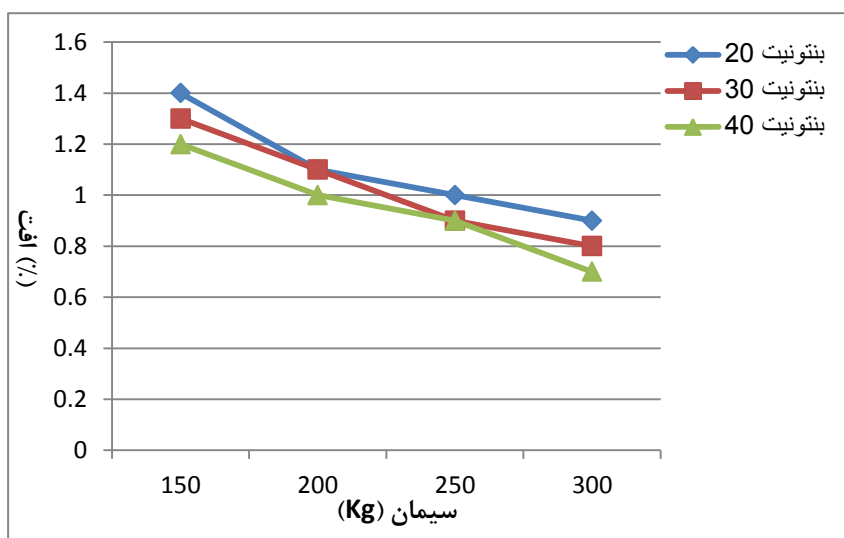
شکل ۵-۹ : مراحل تهیه و اندازه گیری وزن مخصوص دوغاب : الف) اختلاط آب با بنتونیت عمل آوری شده، ب) اختلاط سیمان با مخلوط آب و بنتونیت، ج) اضافه کردن سنگدانه به دوغاب سیمان و تهیه مخلوط نهایی، د) اندازه گیری وزن مخصوص دوغاب.

در نتایج ۴۲ طرح اختلاط مختلف آزمایش شده برای انتخاب طرح اختلاط مناسب دوغاب تزریق تماسی ارایه می شود و نتایج مربوط به طرح های انجام شده ارزیابی می شود.

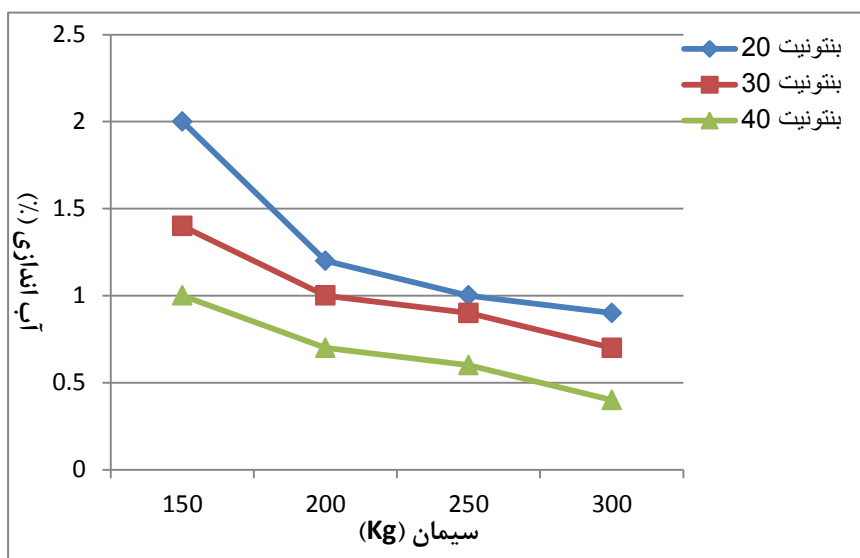
۵-۵ بررسی اثر تغییر مقدار سیمان و بنتونیت بر افت و آباندازی دوغاب

برای بررسی تأثیر تغییر مقادیر سیمان و بنتونیت بر روی فاکتورهای طراحی افت و آباندازی

دوغاب به ترتیب نمودار شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) رسم شده‌اند.



شکل ۵-۱۰: نمودار تأثیر تغییر مقدار سیمان و بنتونیت بر روی افت دوغاب



شکل ۵-۱۱: نمودار تأثیر تغییر مقدار سیمان و بنتونیت بر روی آباندازی دوغاب

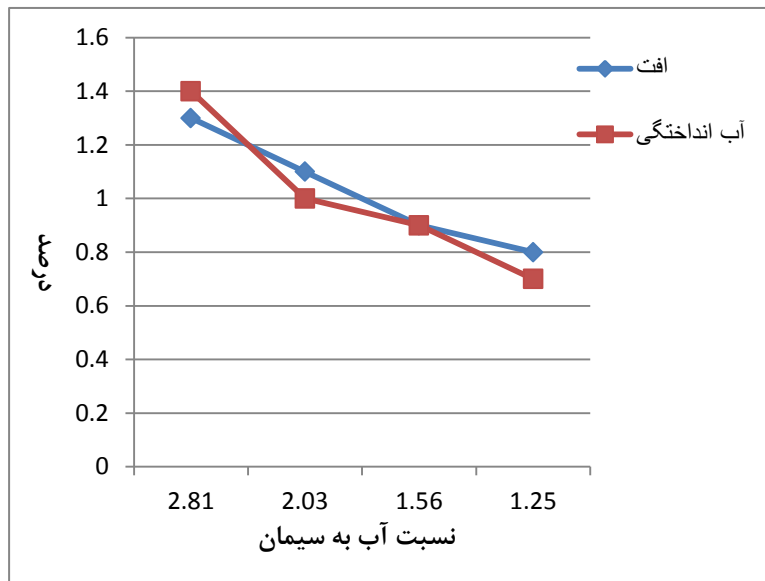
با توجه در نمودار شکل (۵-۱۰) تأثیر تغییر مقدار سیمان بر روی درصد افت (کاهش حجم)

دوغاب مشاهده می‌شود به طوری که هر چه مقدار سیمان در مخلوط دوغاب افزایش می‌یابد

درصد افت نمونه‌ها نیز کاهش می‌یابد. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد افت دوغاب بر اثر از دست دادن آب جذب شده در خمیر سیمان ایجاد می‌شود، بنابراین با افزایش مقدار سیمان مقدار کم-تری از آب جذب شده از بین می‌رود و در نتیجه درصد افت دوغاب کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به تأثیر مقادیر مختلف بنتونیت در میزان افت دوغاب، مشاهده می‌شود با افزایش مقدار بنتونیت درصد افت دوغاب کاهش می‌یابد که این پدیده را با خاصیت جذب آب بنتونیت می‌توان توجیه کرد. بنابراین کاهش افت دوغاب با افزایش مقادیر بنتونیت و سیمان در مخلوط دوغاب قابل پیش‌بینی و توجیه است.

برای بررسی اثر تغییر مقادیر سیمان و بنتونیت بر آب‌اندازی بنتونیت از نمودار شکل (۵-۱۱) می‌توان استفاده نمود. همانند افت، درصد آب‌اندازی دوغاب نیز با افزایش مقادیر سیمان و بنتونیت در مخلوط دوغاب کاهش می‌یابد که در توجیه این پدیده نیز می‌توان به تعریف آب‌اندازی دوغاب که در بخش‌های قبل بیان شد اشاره کرد. افزایش مقدار سیمان در مخلوط دوغاب باعث می‌شود تا در خمیر سیمان آب بیش‌تری مصرف شود (آب بیش‌تری در خمیر سیمان درگیر باشد) بنابراین مقدار آب-اندازی دوغاب کاهش یابد. افزایش مقدار بنتونیت در دوغاب نیز به دلیل جاذب آب بودن بنتونیت باعث کاهش درصد آب‌اندازی دوغاب می‌گردد.

معمولاً نسبت آب به سیمان در دوغاب‌های غلیظ کمتر از ۲ می‌باشد. در این تحقیق نیز براساس نتایج به دست آمده از طرح اختلاط‌های مختلف انجام شده نسبت آب به سیمان مناسب برای دوغاب مورد استفاده تقریباً بین $1/6$ و $1/4$ به دست آمده که مطابق نتایج شکل‌های (۵-۱۲) و (۵-۱۳) این مطلب قابل مشاهده است.



شکل ۵-۱۲: تأثیر نسبت آب به سیمان بر آب اندازی و افت دوغاب



شکل ۵-۱۳: تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت تراکمی دوغاب

۵-۶ انتخاب سنگدانه مناسب برای تهیه دوغاب تزریق تماسی

همان طور که اشاره شد هر یک از اجزای تشکیل دهنده دوغاب تأثیر بسزایی در پارامترهای فنی آن و شرایط اجرایی و اقتصادی طرح اختلاط دارند. در این قسمت سنگدانه مناسب برای تهیه دوغاب تزریق با ارزیابی طرح اختلاطهای مختلف انتخاب گردیده است. بدین منظور سه نوع سنگدانه ماسه ۰.۲، ماسه بادی و ترکیب ماسه بادی و پودرسنگ مورد آزمایش قرار گرفته است.

از آنجایی که از معیارهای فنی مد نظر، دو معیار آباندازی و افت دوغاب در تمامی طرح‌های اختلاط مطالعه شده مقدار مطلوبی داشته‌اند، لذا تأثیر نوع سنگ‌دانه در تهیه دوغاب فقط بر مبنای مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه نمونه‌ها ارزیابی شده است.

با توجه به این که مقدار سیمان و بنتونیت مصرفی در دوغاب بیش‌ترین تأثیر را در پارامترهای طراحی دوغاب تزریق دارند، لذا در این بخش برای هر یک از سه نوع سنگ‌دانه، مقدار سنگ‌دانه مصرفی در دوغاب ثابت (اندکی متغیر) نگه داشته شده و به ازای مقادیر مختلف بنتونیت و سیمان مصرفی دوغاب، مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه طرح اختلاط‌های مختلف ارزیابی و باهم مقایسه شده است تا سنگ‌دانه مناسب انتخاب گردد. در ادامه نتایج ارزیابی هر یک از سه نوع سنگ‌دانه ارایه و بحث شده است.

۵-۶-۱ دوغاب‌های تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه ۰۲

برای ارزیابی سنگ‌دانه ماسه ۰۲ و تأثیر تغییرات مقدار سیمان و بنتونیت در کیفیت دوغاب، ۲۱ طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفته است. بدین منظور مقدار سنگ‌دانه در تمامی طرح اختلاط‌ها ۱۳۰۰ کیلوگرم در مترمکعب دوغاب در نظر گرفته شده است. برای سیمان مقدار ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ و ۱۷۵، ۲۲۵ و ۲۷۵ کیلوگرم در مترمکعب دوغاب و برای بنتونیت سه مقدار ۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوگرم در مترمکعب دوغاب در نظر گرفته شده است. برای هر یک از طرح اختلاط‌های تهیه شده با شیوه‌ای که قبلاً ذکر شده پارامترهای طراحی درصد افت، درصد آب‌اندازی، مقاومت ۲۴ ساعته و مقاومت ۷ روزه نمونه‌ها تعیین شده است.

مقدار مصالح تشکیل دهنده دوغاب و مقدار پارامترهای کنترلی برای طرح اختلاط‌های مختلف در جدول (۵-۲) درج شده است.

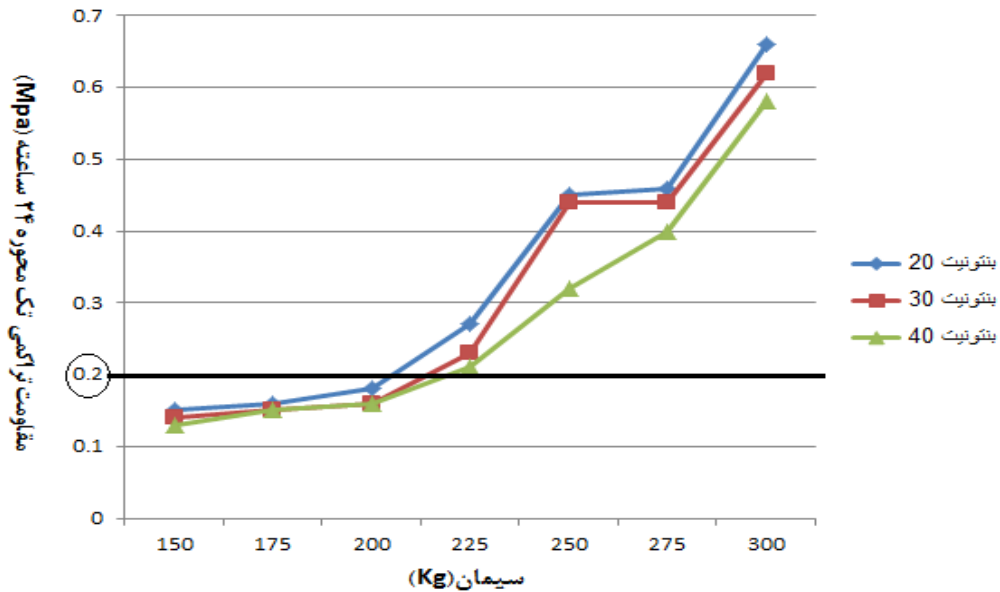
جدول ۵-۲: مقدار مصالح مصرفی و پارامترهای کنترلی در طرح اختلاطهای مختلف دوغاب تهیه شده با

سنگدانه ماسه ۰۲ (در یک مترمکعب از دوغاب)

شماره	سیمان (Kg)	بنتونیت (Kg)	ماسه ۰۲ (Kg)	آب (Lit)	مقاومت ۲۴ ساعته (Mpa)	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	افت (%)	آب اندازی (%)
۱	۱۵۰	۲۰	۱۳۰۰	۴۲۵	۰/۱۵	۰/۹	۱/۴	۲
۲	۱۵۰	۳۰	۱۳۰۰	۴۲۲	۰/۱۴	۰/۶۸	۱/۳	۱/۴
۳	۱۵۰	۴۰	۱۳۰۰	۴۱۸	۰/۱۳	۰/۴۷	۱/۲	۱
۴	۱۷۵	۲۰	۱۳۰۰	۴۱۷	۰/۱۶	۱/۰۱	۱/۲	۱/۴
۵	۱۷۵	۳۰	۱۳۰۰	۴۱۳	۰/۱۵	۰/۸۱	۱/۱	۱/۳
۶	۱۷۵	۴۰	۱۳۰۰	۴۰۹	۰/۱۵	۰/۶۳	۱/۱	۱/۳
۷	۲۰۰	۲۰	۱۳۰۰	۴۱۰	۰/۱۸	۱/۱۵	۱/۱	۱/۲
۸	۲۰۰	۳۰	۱۳۰۰	۴۰۶	۰/۱۶	۱/۱۲	۱/۱	۱
۹	۲۰۰	۴۰	۱۳۰۰	۴۰۲	۰/۱۶	۰/۸۲	۱	۰/۷
۱۰	۲۲۵	۲۰	۱۳۰۰	۴۰۴	۰/۲۷	۱/۹۶	۱	۱/۱
۱۱	۲۲۵	۳۰	۱۳۰۰	۴۰۰	۰/۲۳	۱/۹۳	۱	۱/۰
۱۲	۲۲۵	۴۰	۱۳۰۰	۳۹۶	۰/۲۱	۱/۶	۰/۹	۰/۷
۱۳	۲۵۰	۲۰	۱۳۰۰	۳۹۴	۰/۴۵	۳/۵	۱	۱
۱۴	۲۵۰	۳۰	۱۳۰۰	۳۹۰	۰/۴۴	۳/۱۱	۰/۹	۰/۹
۱۵	۲۵۰	۴۰	۱۳۰۰	۳۸۷	۰/۳۲	۱/۹۳	۰/۹	۰/۶
۱۶	۲۷۵	۲۰	۱۳۰۰	۳۸۵	۰/۴۶	۳/۹۲	۰/۸	۰/۹
۱۷	۲۷۵	۳۰	۱۳۰۰	۳۸۱	۰/۴۴	۳/۴۱	۰/۷	۰/۷
۱۸	۲۷۵	۴۰	۱۳۰۰	۳۷۸	۰/۴۰	۲/۵۶	۰/۷	۰/۵
۱۹	۳۰۰	۲۰	۱۳۰۰	۳۷۸	۰/۶۶	۴/۳۵	۰/۹	۰/۹
۲۰	۳۰۰	۳۰	۱۳۰۰	۳۷۵	۰/۶۲	۴/۲۷	۰/۸	۰/۷
۲۱	۳۰۰	۴۰	۱۳۰۰	۳۷۱	۰/۵۸	۳/۰۹	۰/۷	۰/۴

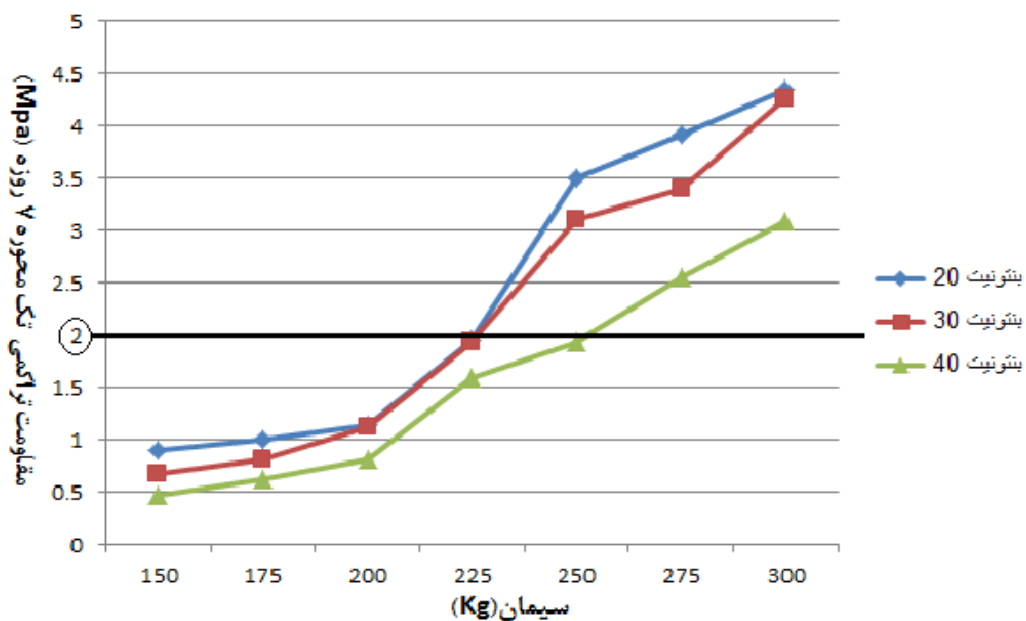
مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه دوغاب تهیه شده با سنگدانه ماسه ۰۲، به ازای مقادیر مختلف

مصالح سیمان و بنتونیت به ترتیب در شکل‌های (۵-۱۴) و (۵-۱۵) نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۴: مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته دوغاب تهیه شده از ماسه ۰۲ به ازای مقادیر مختلف سیمان و

سیمان و بنتونیت



شکل ۵-۱۵: مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه دوغاب تهیه شده از ماسه ۰۲ به ازای مقادیر مختلف سیمان و

بنتونیت

با توجه به نمودار شکل (۵-۱۴) با افزایش مقادیر سیمان مقدار مقاومت فشاری ۲۴ ساعته دوغاب نیز افزایش یافته است. مطابق نمودار مقاومت ۲۴ ساعته نمونه‌هایی که در آن‌ها مقدار سیمان کمتر از ۲۲۵ کیلوگرم است کمتر از ۰/۲ مگا پاسکال می‌باشد، از آنجایی که مقاومت ۲۴ ساعته نباید کمتر از

۰/۲ مگا پاسکال باشد، بنابراین نمونه‌هایی که در آن‌ها مقدار سیمان کمتر از ۲۲۵ کیلوگرم است نمی‌توانند پارامتر مقاومت ۲۴ ساعته را ارضا کنند. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد با افزایش سیمان زمان گیرش دوغاب پایین می‌آید در نمودار شکل (۵-۱۴) نیز مشاهده می‌شود که افزایش سیمان باعث پایین آمدن زمان گیرش شده و نمونه‌ها به مقاومت بالاتری در طی ۲۴ ساعت رسیده‌اند. با توجه به نتایج مربوط به مقادیر مختلف بنتونیت در دوغاب (۲۰، ۳۰ و ۴۰ کیلوگرم در یک مترمکعب دوغاب) می‌توان نتیجه گرفت که هر چه مقدار بنتونیت در دوغاب بیشتر باشد مقاومت ۲۴ ساعته دوغاب کاهش می‌یابد. لذا نتایج این بخش از مطالعه بیان‌گر این است که افزایش مقدار سیمان تأثیر مثبت روی مقاومت ۲۴ ساعته دوغاب دارد ولی افزایش مقدار بنتونیت اثری منفی روی مقاومت ۲۴ ساعته دوغاب خواهد داشت.

با توجه به نمودار شکل (۵-۱۵) با افزایش مقدار سیمان در مخلوط دوغاب، مقدار مقاومت ۷ روزه دوغاب افزایش می‌یابد. مطابق نمودار نمونه‌هایی که مقدار سیمان آن‌ها کمتر از ۲۵۰ کیلوگرم است، دارای مقاومت ۷ روزه کمتر از ۲ مگا پاسکال هستند، با توجه به این‌که مقاومت ۷ روزه دوغاب نباید کمتر از ۲ مگا پاسکال باشد، بنابراین نمونه‌هایی که در مخلوط آن‌ها مقدار سیمان کمتر از ۲۵۰ کیلوگرم است نمی‌توانند پارامتر مقاومت ۷ روزه را تأمین کنند. لذا نتایج این بخش از مطالعه بیان‌گر این است که نمونه‌هایی که دارای مقدار بنتونیت بیشتری هستند دارای مقاومت ۷ روزه کمتری‌اند. بنابراین افزایش مقدار بنتونیت در مخلوط دوغاب باعث کاهش مقاومت ۷ روزه دوغاب خواهد شد.

به طور کلی افزایش مقدار سیمان در دوغاب مقاومت دوغاب را افزایش خواهد داد اما براساس مطالبی که قبلاً گفته شد افزایش سیمان در دوغاب تأثیرات منفی بر روی سیستم آب‌بندی خواهد گذاشت، بنابراین افزایش سیمان در دوغاب نه تنها از نظر اقتصادی مطلوب نخواهد بود بلکه از نظر برخی شرایط فنی مطلوب ارزیابی نمی‌شود. با توجه به ملاحظات فنی و اقتصادی در

دوغاب تهیه شده از سنگدانه ماسه ۰.۲، طرح اختلاطی که در آن مقدار سیمان و بنتونیت به ترتیب ۲۵۰ و ۲۰ کیلوگرم است برای تزریق تماسی خوب ارزیابی می‌شود.

۵-۶-۲ دوغاب‌های تهیه شده با سنگدانه ماسه بادی

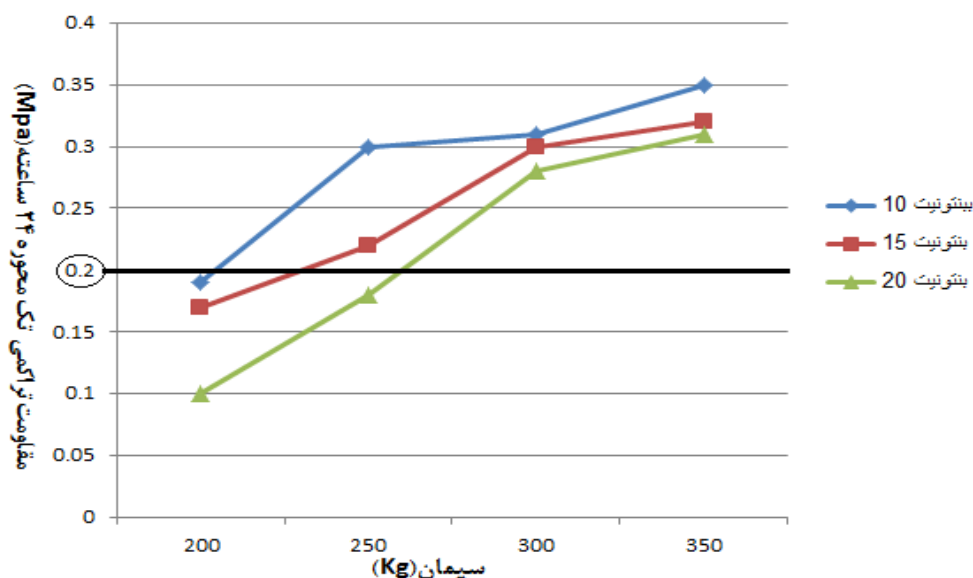
برای ارزیابی کیفیت دوغاب تهیه شده با سنگدانه ماسه بادی و مطالعه تأثیر تغییرات مقدار سیمان و بنتونیت در پارامترهای کنترلی طرح اختلاط، ۱۳ طرح اختلاط تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار مصالح مصرف شده برای تهیه دوغاب و مقدار پارامترهای کنترلی طرح اختلاط‌های مختلف در جدول (۵-۳) درج شده است. مطابق جدول مقدار ماسه بادی ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ کیلوگرم در مترمکعب دوغاب تعیین شده و با توجه به این که مقدار بیش‌تر بنتونیت تأثیر منفی در مقاومت دوغاب نشان می‌دهد، مقدار بنتونیت ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم در یک مترمکعب دوغاب در نظر گرفته شده است.

جدول ۵-۳: مقدار مصالح مصرفی و پارامترهای کنترلی در طرح اختلاط‌های مختلف دوغاب تهیه شده با سنگدانه

ماسه بادی (در یک مترمکعب از دوغاب)

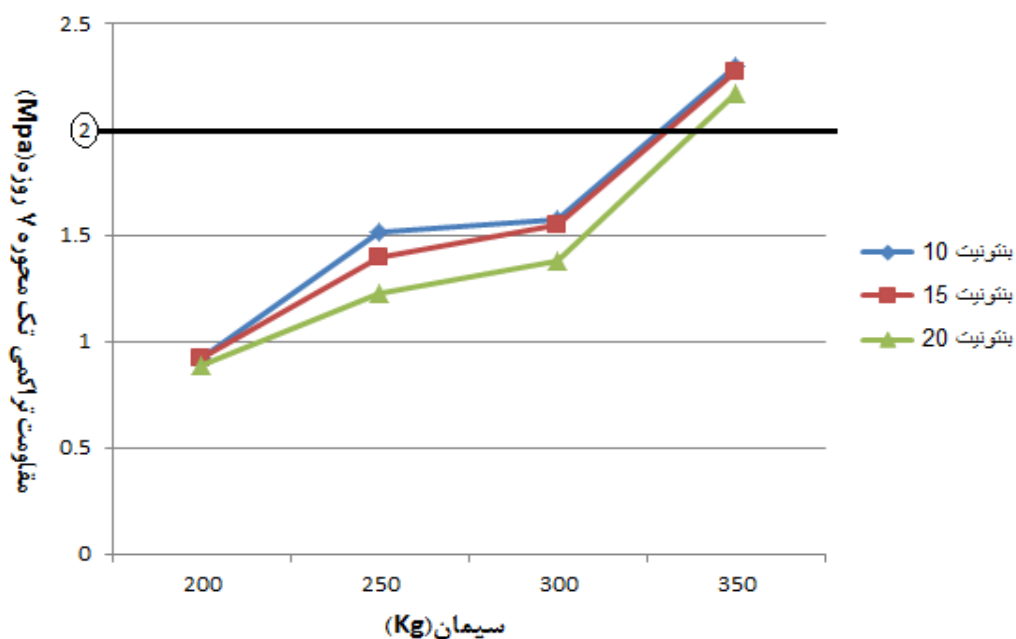
شماره	سیمان (Kg)	بنتونیت (Kg)	ماسه بادی (Kg)	آب (Lit)	مقاومت ۲۴ ساعته (Mpa)	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	افت (%)	آب انداختگی (%)
۱	۲۰۰	۱۰	۱۲۰۰	۴۹۷	۰/۱۹	۰/۹۲	۰/۹	۱/۱
۲	۲۰۰	۱۵	۱۲۰۰	۴۹۵	۰/۱۷	۰/۹۲	۰/۶	۰/۹
۳	۲۰۰	۲۰	۱۲۰۰	۴۹۳	۰/۱	۰/۸۹	۰/۶	۰/۹
۴	۲۵۰	۱۰	۱۲۰۰	۴۸۱	۰/۳	۱/۵۲	۰/۹	۱
۵	۲۵۰	۱۵	۱۲۰۰	۴۷۹	۰/۲۲	۱/۴	۰/۹	۰/۹
۶	۲۵۰	۲۰	۱۲۰۰	۴۷۷	۰/۱۸	۱/۲۳	۰/۸	۰/۷
۷	۳۰۰	۱۰	۱۲۰۰	۴۶۶	۰/۳۱	۱/۵۸	۰/۹	۱
۸	۳۰۰	۱۵	۱۲۰۰	۴۶۴	۰/۳۰	۱/۵۵	۰/۹	۱
۹	۳۰۰	۲۰	۱۱۰۰	۴۹۸	۰/۲۸	۱/۳۸	۰/۷	۰/۸
۱۰	۳۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۴۹۴	۰/۲۲	۱/۳۲	۰/۶	۰/۷
۱۱	۳۵۰	۱۰	۱۱۰۰	۴۶۷	۰/۳۵	۲/۳	۰/۸	۰/۹
۱۲	۳۵۰	۱۵	۱۱۰۰	۴۶۵	۰/۳۲	۲/۲۷	۰/۷	۰/۹
۱۳	۳۵۰	۲۰	۱۱۰۰	۴۶۳	۰/۳۱	۲/۱۷	۰/۵	۰/۷

همانند طرح‌های قبلی دو پارامتر درصد افت و درصد آب‌انداختگی دوغاب مطلوب بوده و طرح اختلاط‌های مختلف فقط بر مبنای مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه نمونه‌ها ارزیابی می‌گردد. مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه دوغاب‌های تهیه شده بر مبنای ۱۳ طرح اختلاط فوق‌الذکر به ترتیب در شکل‌های (۱۶-۵) و (۱۷-۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۶-۵: مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته دوغاب تهیه شده از ماسه بادی به ازای مقادیر مختلف سیمان و

بنتونیت



شکل ۱۷-۵: مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه دوغاب تهیه شده از ماسه بادی به ازای مقادیر مختلف

سیمان و بنتونیت

با توجه به شکل (۵-۱۶) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار سیمان در مخلوط دوغاب مقدار مقاومت ۲۴ ساعته دوغاب نیز افزایش می‌یابد، به طوری که وقتی مقدار سیمان در دوغاب‌ها (میزان بنتونیت استفاده شده در این دوغاب‌ها ۱۰ و ۱۵ کیلوگرم است)، بین ۲۰۰ کیلوگرم و ۲۵۰ کیلوگرم است محدوده مجاز مقاومت ۲۴ ساعته را (0.2 Mpa) ارضا می‌کنند. همچنین با توجه به نتایج مربوط به مقادیر مختلف بنتونیت (۱۰ و ۱۵ کیلوگرم) با افزایش مقدار بنتونیت در مخلوط دوغاب مقاومت ۲۴ ساعته نمونه‌ها کاهش یافته است، بنابراین به نظر می‌رسد طرح اختلاطی که مقدار سیمان و بنتونیت به ترتیب در آن ۲۵۰ و ۱۰ کیلوگرم است، معیار مقاومت ۲۴ ساعته را داراست. البته قابل ذکر است که باید مقاومت ۷ روزه نیز بررسی شود که در شکل (۵-۱۷) نتایج مربوط به مقاومت ۷ روزه بررسی شده و نتیجه آن بیان خواهد شد.

با توجه به نتایج شکل (۵-۱۷) نیز مشخص می‌شود که با افزایش مقدار سیمان مقدار مقاومت ۷ روزه دوغاب نیز افزایش یافته است. همچنین مقاومت نمونه‌های تهیه شده از دوغاب با مقدار بنتونیت ۱۰ و ۱۵ کیلوگرم در مترمکعب بیش‌تر از مقاومت نمونه‌های دوغاب با مقدار بنتونیت ۲۰ کیلوگرم است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دوغاب برای همه مقادیر بنتونیت، به ازای مقادیر سیمان بیش‌تر از ۳۰۰ کیلوگرم، مقاومت ۷ روزه دوغاب از مقدار مورد نظر (۲ مگا پاسکال) بیش‌تر است، بنابراین با توجه به نمودارهای شکل (۵-۱۷) و (۵-۱۶) طرح اختلاطی که مقدار سیمان در ترکیب آن ۳۵۰ کیلوگرم می‌باشد هم از نظر مقاومت ۲۴ ساعته (0.2 مگا پاسکال) و هم از نظر مقاومت ۷ روزه (۲ مگا پاسکال) مناسب ارزیابی شده و برای تزریق تماسی از نظر فاکتور مقاومت فشاری مطلوب هستند.

با مقایسه نتایج به دست آمده از طرح‌های انجام شده در دو سری اول و دوم (سنگ‌دانه ماسه ۰.۲ و ماسه بادی) به این نتیجه می‌توان رسید که طرح اختلاط‌های سری اول به دلیل دانه‌بندی‌ای که ماسه ۰.۲ دارد (دانه درشت‌تر از ماسه بادی)، دارای مقاومت فشاری بیش‌تری نسبت به طرح اختلاط-

های سری اول می‌باشند. بنابراین دانه درشت بودن سنگ‌دانه تا حدودی مقاومت دوغاب را بالا می‌برد اما در استفاده از هر جزء باید ملاحظات فنی، اقتصادی و اجرایی در نظر گرفته شود.

۵-۶-۳ دوغاب‌های تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه بادی و پودر سنگ

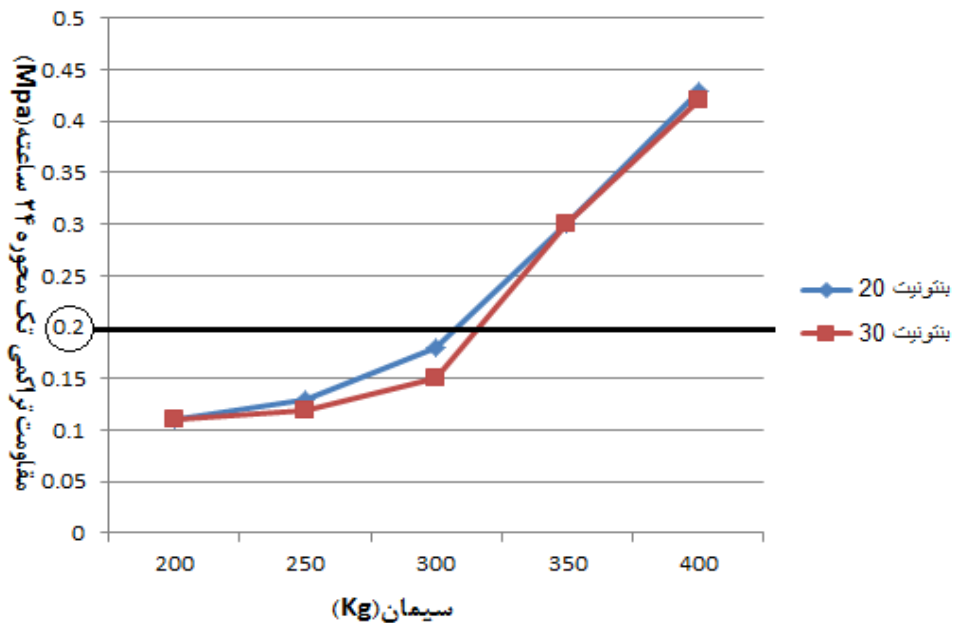
برای ارزیابی کیفیت دوغاب تهیه شده از ترکیب سنگ‌دانه ماسه بادی و پودر سنگ و مطالعه تأثیر تغییرات مقدار سیمان و بنتونیت در پارامترهای کنترلی طرح اختلاط، ۱۰ طرح اختلاط تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار مصالح مصرف شده برای تهیه دوغاب و مقدار پارامترهای کنترلی طرح اختلاط‌های مختلف در جدول (۴-۵) درج شده است. مطابق جدول مقدار ماسه بادی ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ و مقدار پودر سنگ ۱۵۰ کیلوگرم در مترمکعب دوغاب در نظر گرفته شده و با توجه به این که هدف اصلی انتخاب نوع سنگ‌دانه مصرفی در دوغاب می‌باشد مقدار بنتونیت در دوغاب ۲۰ و ۳۰ کیلوگرم در یک مترمکعب دوغاب در نظر گرفته شده است و مقادیر سیمان متغیر است.

جدول ۴-۵: مقدار مصالح مصرفی و پارامترهای کنترلی در طرح اختلاط‌های مختلف دوغاب تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه بادی و پودر سنگ (در یک مترمکعب از دوغاب)

شماره	سیمان (Kg)	بنتونیت (Kg)	ماسه بادی (Kg)	پودر سنگ (Kg)	آب (Lit)	مقاومت ۲۴ ساعته (Mpa)	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	افت (%)	آب انداختگی (%)
۱	۲۰۰	۳۰	۱۱۰۰	۱۵۰	۴۶۶	۰/۱۱	۰/۷۴	۰/۴	۰/۸
۲	۲۰۰	۲۰	۱۱۰۰	۱۵۰	۴۷۰	۰/۱۱	۰/۸۱	۰/۶	۰/۹
۳	۲۵۰	۳۰	۱۱۰۰	۱۵۰	۴۵۰	۰/۱۲	۱/۳۶	۰/۵	۱
۴	۲۵۰	۲۰	۱۱۰۰	۱۵۰	۴۵۵	۰/۱۳	۱/۵۴	۰/۷	۱/۱
۵	۳۰۰	۳۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۴۷۱	۰/۱۵	۱/۷۸	۰/۶	۱
۶	۳۰۰	۲۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۴۷۶	۰/۱۸	۱/۷۸	۰/۷	۱/۳
۷	۳۵۰	۳۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۴۵۵	۰/۳	۲/۴۱	۰/۴	۱/۲
۸	۳۵۰	۲۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۴۵۹	۰/۳	۲/۶۸	۰/۶	۱/۱
۹	۴۰۰	۳۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۴۳۹	۰/۴۲	۳/۳۷	۰/۴	۱
۱۰	۴۰۰	۲۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۴۴۳	۰/۴۳	۳/۴۰	۰/۵	۱/۲

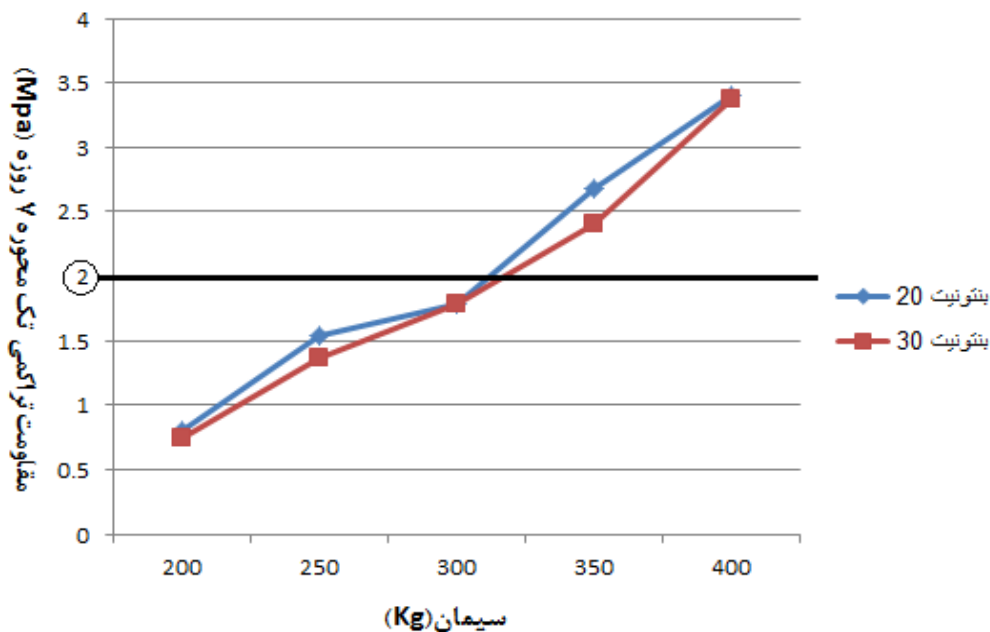
همانند طرح‌های دو سری قبلی دو پارامتر درصد افت و درصد آب‌اندازی دوغاب مطلوب بوده

و طرح اختلاط‌های مختلف فقط بر مبنای مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه نمونه‌ها ارزیابی می‌گردد. مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه دوغاب‌های تهیه شده بر مبنای ۱۰ طرح اختلاط فوق‌الذکر به ترتیب در شکل‌های (۱۸-۵) و (۱۹-۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۵: مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته دوغاب تهیه شده از ماسه بادی و پودرسنگ به ازای مقادیر مختلف

سیمان



شکل ۱۹-۵: مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه دوغاب تهیه شده از ماسه بادی و پودرسنگ به ازای مقادیر

مختلف سیمان

با توجه در نمودار شکل (۵-۱۸) مشاهده می‌شود در طرح‌های این سری نیز همانند طرح‌های سری‌های قبل با افزایش مقدار سیمان در مخلوط دوغاب مقاومت ۲۴ ساعته دوغاب افزایش یافته است. به طوری که وقتی مقدار سیمان بین ۳۰۰ کیلوگرم و ۳۵۰ کیلوگرم است. مقاومت ۲۴ ساعته دوغاب مقدار مورد نیاز ۰/۲ را تأمین کرده است در نتیجه مقاومت ۲۴ ساعته (۰/۲) مگا پاسکال در طی (۲۴ ساعت) مطلوب را کسب کرده است. بنابراین با توجه به نمودار و معیار مقاومتی که برای مقاومت ۲۴ ساعته دوغاب بیان شده دوغابی که در آن مقدار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم می‌باشد می‌تواند طرح انتخابی باشد البته باید مقاومت ۷ روزه نیز بررسی شود که در ادامه درباره آن بحث خواهد شد.

همان‌گونه که قبلاً هم اشاره شد زمان گیرش دوغاب خیلی مهم است زیرا زمان گیرش هم در مسایل اجرایی تأثیر می‌گذارد و هم در مسایل فنی. اگر در نمودار شکل (۵-۱۸) دقت شود مشاهده می‌شود که در مقادیر سیمان کمتر (۲۰۰ کیلوگرم تا ۳۰۰ کیلوگرم) نمودار دارای شیب کم‌تری است که دلیل آن را چنین می‌توان ارزیابی کرد که دوغاب در این محدوده دارای زمان گیرش بیش‌تری بوده و بنابراین دیرتر به مقاومت مطلوب می‌رسد یعنی میزان سیمان موجود در دوغاب تأثیر زیادی در زمان گیرش دوغاب دارد و هر چه مقدار آن در مخلوط بیش‌تر می‌شود زمان گیرش دوغاب کاهش یافته و دوغاب زودتر به مقاومت مطلوب می‌رسد.

با توجه به نتایج شکل (۵-۱۹) مشاهده می‌شود افزایش مقدار سیمان در مخلوط دوغاب باعث افزایش مقاومت ۷ روزه دوغاب شده است. اگر به نمودار شکل (۵-۱۹) توجه شود مشاهده می‌شود که در مقدار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم مقاومت نمونه بیش‌تر از ۲ مگا پاسکال است. بنابراین مخلوط دوغابی که مقدار سیمان در آن ۳۵۰ کیلوگرم است، فاکتور مقاومت ۷ روزه (۲ مگا پاسکال) را تأمین می‌کند و به عنوان طرحی که معیار مقاومت فشاری (۲۴ ساعته و ۷ روزه) را داراست انتخاب می‌شود.

با توجه به نتایج حاصل از کاربرد سه نوع سنگ‌دانه در تهیه دوغاب و ارزیابی تأثیر تغییرات مقدار سیمان و بنتونیت در مقاومت فشاری ۲۴ ساعته و ۷ روزه نمونه‌ها در هر یک از انواع سنگ‌دانه‌ها سه طرح اختلاط مناسب انتخاب شده و در جدول (۵-۵) نشان داده شده است.

جدول ۵-۵: طرح‌های اختلاط مناسب انتخاب شده بر مبنای نتایج کاربرد سه نوع سنگ‌دانه

آب (لیتر)	پودر سنگ (کیلوگرم)	ماسه بادی (کیلوگرم)	ماسه ۰۲ (کیلوگرم)	بنتونیت (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)
۳۹۴	۰	۰	۱۳۰۰	۲۰	۲۵۰
۴۶۷	۰	۱۱۰۰	۰	۱۰	۳۵۰
۴۵۹	۱۵۰	۱۰۰۰	۰	۲۰	۳۵۰

همان طور که بحث شد بر مبنای ملاحظات فنی و معیارهای کنترلی افت، آب‌انداختگی دوغاب، روانی مطلوب و مقاومت فشاری ۲۴ ساعته و ۷ روزه نمونه‌ها، هر یک از سه طرح جدول (۵-۵) برای تزریق تماسی در پروژه تونل کمکی کانال ابوذر مناسب می‌باشند.

بدیهی است ملاحظات فنی به تنهایی در ارزیابی یک طرح اختلاط کافی نمی‌باشد و طرح اختلاط انتخابی علاوه بر دارا بودن ملاحظات فنی از نظر اقتصادی و اجرایی نیز باید مطلوب باشد. از نظر اقتصادی طرح اختلاط مناسب طرحی است که تهیه اجزای تشکیل دهنده دوغاب با کمترین هزینه امکان‌پذیر بوده و همچنین تجهیزات تهیه، انتقال و تزریق دوغاب نیز با کمترین هزینه قابل تأمین و اجرا باشد یعنی عملیات تزریق با بهترین کیفیت و کمترین هزینه انجام شود. کاهش هزینه تمام شده دوغاب با کاهش مصرف سیمان و بنتونیت امکان‌پذیر است زیرا این دو جزء بیشترین هزینه را به طرح تحمیل می‌کنند. بنابراین مطابق جدول (۵-۵) طرح اختلاط اول با سنگ‌دانه ماسه ۰۲ به علت مصرف کمتر سیمان و بنتونیت، طرح مناسب می‌باشد و اگر از نظر اجرایی محدودیتی وجود نداشته باشد به عنوان طرح انتخابی پیشنهاد می‌شود.

قابلیت اجرای طرح عامل مهم دیگر در انتخاب طرح اختلاط مناسب می‌باشد. انتقال دوغاب تهیه شده و تزریق آن با پمپ، اجرای طرح را شامل می‌شوند. در پروژه تونل کمکی کانال ابوذر سیستم

حمل و نقل تونل ریلی است و بنابراین از نظر انتقال هیچ یک از طرح اختلاطها با محدودیتی همراه نیستند ولی پمپ مورد استفاده در این پروژه دارای محدودیت تزریق ذرات بزرگتر از ۲ میلی‌متر می‌باشد یعنی ابعاد ذرات مورد استفاده در دوغاب نباید ۲ میلی‌متر یا بزرگتر از ۲ میلی‌متر باشد و این محدودیت باعث می‌شود طرح بهینه جدول (۵-۵) با سنگ‌دانه ماسه ۰۲ به خاطر مشکل اجرایی (مشکل تزریق) مطلوبیت خود را در این پروژه از دست بدهد. لازم به ذکر است در صورت تعویض پمپ و تهیه پمپ با قابلیت تزریق ذرات درشت طرح اول جدول (۵-۵) با سنگ‌دانه ماسه ۰۲ به عنوان طرح مناسب پیشنهاد می‌شود.

از بین طرح‌های اختلاط سری دوم و سوم که با استفاده از سنگ‌دانه ماسه بادی و ترکیب ماسه بادی و پودرسنگ تهیه شده‌اند اگر مقایسه‌ای بین مقاومت نمونه‌های دو سری انجام گیرد تفاوت چندانی مشاهده نخواهد شد بنابراین استفاده از پودرسنگ در طرح اختلاط دوغاب توجیه فنی نداشته، همچنین استفاده از پودرسنگ از نظر اقتصادی و اجرایی نیز مطلوب نیست زیرا تهیه و تأمین دو جزء نسبت به یک جزء با مشکلات بیشتری همراه است و همچنین هر جزء به مخزن و سیستم توزین جداگانه نیاز دارد.

بنابراین با توجه به تمامی عوامل فنی، اقتصادی و اجرایی موجود در پروژه و با توجه به بحث‌های ارایه شده ماسه بادی به عنوان سنگ‌دانه مناسب دوغاب تزریق انتخاب می‌گردد. در ادامه طرح‌های تکمیلی (سری چهارم) ارایه می‌شود که با هدف تعیین میزان دقیق سیمان و بنتونیت مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

۵-۶-۴ طرح‌های اختلاط تکمیلی با سنگ‌دانه ماسه بادی برای تعیین

مقدار دقیق اجزای تشکیل دهنده دوغاب

همان طور که از نتایج و مباحث قبل مشخص شد ماسه بادی با توجه به شرایط موجود در

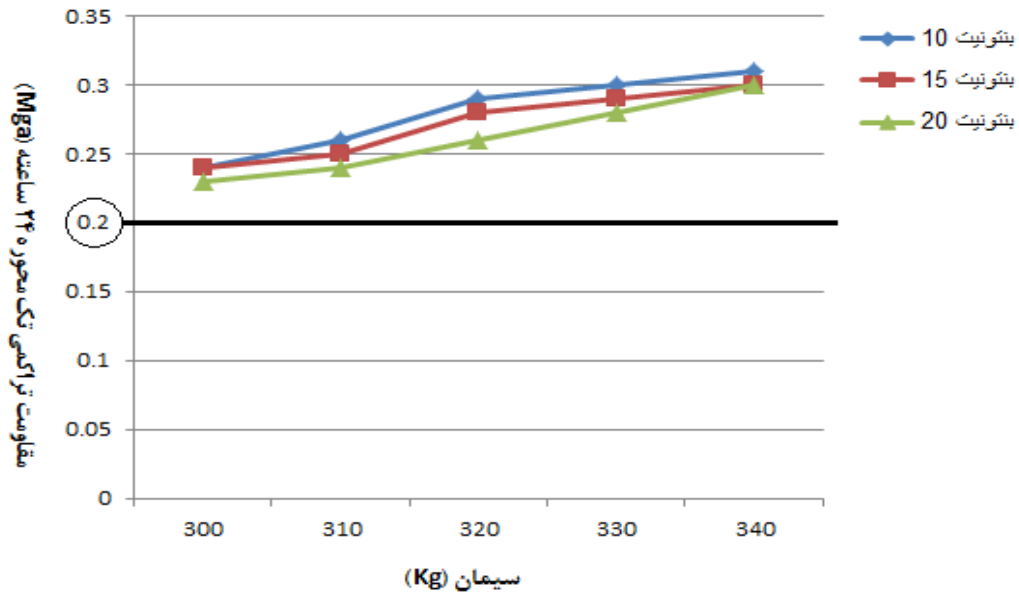
پروژه به عنوان سنگدانه مورد استفاده در طرح اختلاط دوغاب انتخاب شد. در این مرحله برای تعیین میزان دقیق اجزای تشکیل دهنده دوغاب، طرح اختلاط‌های مختلفی با سنگدانه ماسه بادی آزمایش و ارزیابی می‌شود. بدین منظور بازه تغییرات مقدار سیمان و بنتونیت در دوغاب کاهش داده شده و میزان تغییرات سیمان و بنتونیت در طرح‌های اختلاط به ترتیب ۱۰ کیلوگرم و ۵ کیلوگرم در یک مترمکعب دوغاب در نظر گرفته شده است. بنابراین ۱۷ طرح اختلاط مختلف با درصدهای وزنی متفاوت ماسه بادی، سیمان، بنتونیت و آب تهیه شده و برای اندازه‌گیری پارامترهای کنترلی مورد آزمایش قرار گرفته است. مقدار مصرفی هر یک از اجزای تشکیل دهنده دوغاب و پارامترهای کنترلی متناظر برای ۱۷ طرح اختلاط این مرحله در جدول (۵-۶) نشان داده شده است.

جدول ۵-۶: مقدار مصالح مصرفی و پارامترهای کنترلی در طرح اختلاط‌های تکمیلی دوغاب تهیه شده با سنگدانه

ماسه بادی (در یک مترمکعب از دوغاب)

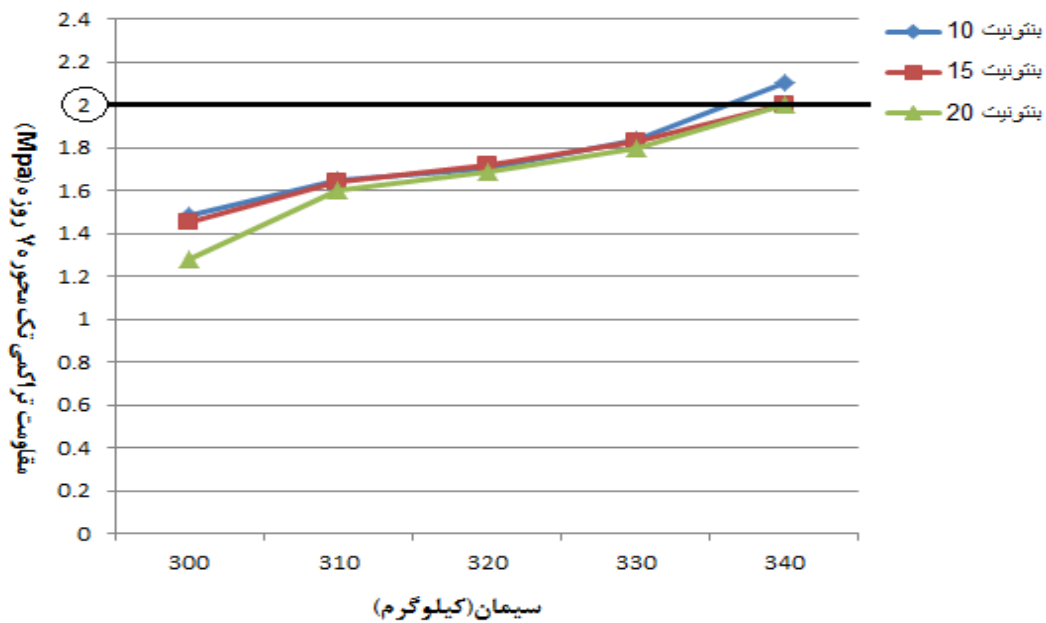
شماره	سیمان (Kg)	بنتونیت (Kg)	ماسه بادی (Kg)	آب (Lit)	مقاومت ۲۴ ساعته (Mpa)	مقاومت ۷ روزه (Mpa)	افت (%)	آب اندازی (%)
۱	۳۰۰	۱۰	۱۲۰۰	۴۶۶	۰/۲۴	۱/۴۸	۱	۰/۹
۲	۳۰۰	۱۵	۱۲۰۰	۴۶۴	۰/۲۴	۱/۴۵	۱	۱/۱
۳	۳۰۰	۲۰	۱۱۰۰	۴۹۸	۰/۲۳	۱/۲۸	۱/۲	۱/۱
۴	۳۱۰	۱۰	۱۱۵۰	۴۸۱	۰/۲۶	۱/۶۵	۱	۰/۹
۵	۳۱۰	۱۵	۱۱۵۰	۴۷۹	۰/۲۵	۱/۶۴	۱	۰/۸
۶	۳۱۰	۲۰	۱۱۵۰	۴۷۷	۰/۲۴	۱/۶	۰/۸	۰/۸
۷	۳۲۰	۱۰	۱۱۲۰	۴۸۹	۰/۲۹	۱/۷	۱	۱/۱
۸	۳۲۰	۱۵	۱۱۲۰	۴۸۷	۰/۲۸	۱/۷۲	۰/۹	۰/۷
۹	۳۲۰	۲۰	۱۱۲۰	۴۸۵	۰/۲۶	۱/۶۹	۰/۷	۰/۷
۱۰	۳۳۰	۱۰	۱۱۰۰	۴۹۳	۰/۳	۱/۸۴	۱/۱	۱/۲
۱۱	۳۳۰	۱۵	۱۱۰۰	۴۹۱	۰/۲۹	۱/۸۳	۰/۷	۰/۸
۱۲	۳۳۰	۲۰	۱۱۰۰	۴۸۹	۰/۲۸	۱/۸	۰/۷	۰/۶
۱۳	۳۴۰	۱۰	۱۱۰۰	۴۹۰	۰/۳۱	۱/۲	۱	۱/۱
۱۴	۳۴۰	۱۵	۱۱۰۰	۴۸۸	۰/۳	۲	۱	۰/۹
۱۵	۳۴۰	۲۰	۱۱۰۰	۴۸۶	۰/۳	۲	۰/۹	۰/۸
۱۶	۳۵۰	۲۰	۱۲۰۰	۴۴۶	۰/۲۸	۲/۲	۰/۷	۱
۱۷	۴۰۰	۲۰	۱۱۰۰	۴۶۷	۰/۲۹	۲/۸۱	۰/۷	۰/۹

مقاومت ۲۴ ساعته و ۷ روزه طرح‌های تکمیلی دوغاب تهیه شده با سنگ‌دانه ماسه بادی، به ازای مقادیر مختلف مصالح سیمان و بنتونیت به ترتیب در شکل‌های (۲۰-۵) و (۲۱-۵) نشان داده شده است.



شکل ۲۰-۵: مقاومت فشاری تک محوره ۲۴ ساعته طرح‌های تکمیلی با ماسه بادی به ازای مقادیر مختلف سیمان و

بنتونیت



شکل ۲۱-۵: مقاومت فشاری تک محوره ۷ روزه طرح‌های تکمیلی با ماسه بادی به ازای مقادیر مختلف سیمان و

بنتونیت

با توجه به نتایج شکل (۵-۲۰) مشاهده می‌شود که همانند نتایج قبلی با افزایش مقدار سیمان مقاومت ۲۴ ساعته نمونه‌ها افزایش می‌یابد. تمامی طرح‌های انجام شده دارای مقاومت ۲۴ ساعته مطلوب هستند و از نظر دستیابی به مقاومت ۰/۲ مگا پاسکال در طی ۲۴ ساعت مشکلی مشاهده نمی‌شود. بنابراین تنها رسیدن به مقاومت ۲ مگا پاسکال در مدت ۷ روز است که باید بررسی شود.

با توجه به شکل (۵-۲۱)، همانند مراحل قبل با افزایش مقدار سیمان مقاومت ۷ روزه افزایش می‌یابد و همچنین با کاهش مقدار بنتونیت در دوغاب مقاومت ۷ روزه نمونه‌ها افزایش می‌یابد. ارزیابی نتایج بیان‌گر این است که فقط به ازای مقدار سیمان ۳۴۰ کیلوگرم در یک مترمکعب دوغاب و بیش‌تر از آن و مقدار بنتونیت ۱۰ کیلوگرم مقاومت ۷ روزه ۲ مگا پاسکال قابل دستیابی است. بنابراین در طرح اختلاط انتخابی مقدار سیمان ۳۴۰ کیلوگرم و مقدار بنتونیت ۱۰ کیلوگرم در یک مترمکعب دوغاب به دست می‌آید.

۵-۷ ارائه طرح اختلاط مناسب دوغاب تزریق تماسی

با توجه به نتایجی که در بخش ۵-۵ ارائه شد می‌توان طرح اختلاط مناسب دوغاب را برای تزریق تماسی در پروژه تونل کمکی کانال ابوذر ارائه نمود. بر طبق پارامترهای طراحی دوغاب لازم بود تا طرح اختلاط دوغاب ارائه شده از نظر مقاومتی دارای حداقل مقاومت فشاری ۲۴ ساعته برابر با ۰/۲ مگا پاسکال و ۷ روزه ۲ مگا پاسکال باشد که طرح‌های مختلفی مورد آزمایش قرار گرفت و در نهایت طرح اختلاط مناسب انتخاب گردید.

در جدول (۵-۷) مشخصات کامل طرح اختلاط مناسب انتخاب شده ارائه شده است. با توجه به این جدول، طرح اختلاط ارائه شده تمامی پارامترهای طراحی دوغاب را دارا است بنابراین از نظر فنی مشکلی برای تزریق ندارد همچنین از نظر اقتصادی نیز بهترین طرح اختلاط ممکن با توجه به شرایط و امکانات پروژه است و قابل اجرا با شرایط حاکم نیز است.

جدول ۵-۷ : مشخصات طرح اختلاط مناسب انتخابی

مصلح	مقدار برای یک مترمکعب	پارامتر	مقدار	شرایط محیطی	مقدار
سیمان	۳۴۰ kg	آب‌انداختگی ۴ ساعته	٪ ۱/۱	دمای دوغاب	۲۱ °C
ماسه بادی	۱۱۰۰ kg	افت دوغاب ۷ روزه	٪ ۱/۰	دمای محیط	۲۲ °C
بنتونیت	۱۰ kg	مقاومت ۲۴ ساعته	۰/۳۱ Mpa	دانسیته دوغاب	۱۸۱۵ kg/m ³
آب	۴۹۰ Lit	مقاومت ۷ روزه	۲/۱ Mpa		

۵-۸ مقایسه مصرف سیمان در طرح اختلاط انتخابی با طرح پیشین

مقدار سیمان طرح اختلاطی که در حال حاضر در پروژه تونل کمکی کانال ابوذر برای تهیه دوغاب استفاده می‌شود برابر ۳۵۰ کیلوگرم در مترمکعب دوغاب است. همان‌گونه که در بخش قبل بیان شد در طرح انتخابی در این تحقیق میزان مصرف سیمان در یک متر مکعب دوغاب برابر ۳۴۰ کیلوگرم می‌باشد. با مقایسه این دو مقدار تفاوت ۱۰ کیلوگرمی در مقدار سیمان مشاهده می‌شود.

با توجه به این‌که طول دقیق تونل ۳۹۶۰ متر است و مقدار دوغابی که به ازای یک متر طول تونل لازم است تقریباً یک مترمکعب است (حجم فضای خالی بین مقطع حفاری و پوشش سگمندی در یک متر طول تونل برابر ۱/۰۲ مترمکعب می‌باشد)، بنابراین در صورت استفاده از طرح اختلاط پیشنهادی این تحقیق مقدار سیمانی که در کل طول تونل قابل صرفه جویی است تقریباً ۴۰ تن می‌باشد.

۵-۸ جمع‌بندی

مصلحی که در تهیه دوغاب تزریق پرکننده معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از سیمان، سنگدانه، آب، بنتونیت و برخی افزودنی‌ها. هر کدام از مصالح بر طبق طرح اختلاط تعیین شده به مقدار مشخص در اختلاط دوغاب استفاده می‌شوند.

مبنای انتخاب سیمان مورد استفاده در طرح اختلاط مقاومت بوده به نحوی که از بین دو نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ و ۵ سیمان پرتلند تیپ ۲ به دلیل دارا بودن مقاومت تراکمی ۲۴ ساعته و ۷ روزه بیش‌تر از سیمان تیپ ۵ به عنوان سیمان مناسب انتخاب گردید.

طرح اختلاط‌های مختلف با استفاده از سنگدانه‌های ماسه ۰۲، ماسه بادی، ماسه بادی و ترکیب پودرسنگ با نسبت‌های مختلف سیمان و بنتونیت تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. برای هر طرح، پارامترهای کنترلی طراحی دوغاب شامل مقاومت فشاری ۲۴ ساعته و ۷ روزه، افت دوغاب، درصد آب‌اندازی دوغاب و روانی دوغاب تعیین و طرح‌هایی که از نظر پارامترهای طراحی دوغاب مطلوب بودند مشخص شدند. پس از بررسی جوانب مختلف طرح مناسب انتخاب شد که مقدار سیمان، بنتونیت، ماسه بادی و آب در ترکیب آن به ترتیب ۳۴۰، ۱۰، ۱۱۰۰ و ۴۹۰ کیلوگرم در مترمکعب دوغاب می‌باشد.

در انتخاب طرح پیشنهادی عوامل مختلفی از جمله عوامل فنی، اقتصادی و محیطی تأثیرگذار بودند برای مثال با این که طرح اختلاطی که دارای سنگدانه ماسه ۰۲ بود از نظر فنی و اقتصادی مناسب بود ولی شرایط پروژه و محدودیت امکانات اجازه استفاده از این طرح اختلاط را نمی‌داد لذا باید بیان کرد که طرح ارائه شده با امکانات و شرایط موجود بهترین طرح می‌باشد.

هر کدام از مصالح مورد استفاده در طرح اختلاط دوغاب اثرات متفاوتی روی پارامترهای طراحی دوغاب دارند که این اثرات هم سو باهم نیستند و در قسمت‌های مختلف در تقابل باهم هستند که این موضوع انتخاب مقدار هر کدام از مصالح در طرح اختلاط را با چالش روبرو می‌سازد اما به طور کلی در انتخاب طرح به این نکته باید توجه کرد که طرح انتخابی از نظر فنی و اقتصادی توجیه پذیر باشد.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۶ مقدمه

هدف از این تحقیق ارائه طرح اختلاط مناسب دوغاب تزریق پرکننده تونل کمکی کانال ابوذر تهران بود. بدین منظور در آزمایشگاه سناریوهای مختلف طرح اختلاط مورد آزمایش قرار گرفت، تا طرح اختلاط مناسب دوغاب برای تزریق پرکننده تعیین شود. در این راستا حدود ۵۰ طرح اختلاط ارائه (در گزارش نتایج ۴۲ طرح ارایه و ارزیابی شده) و در آزمایشگاه نمونه‌هایی تهیه شد و برای هر نمونه پارامترهای طراحی دوغاب که شامل مقاومت تراکمی (فشاری) ۲۴ ساعته و ۷ روزه، آب-انداختگی، افت و روانی دوغاب هستند، مورد بررسی قرار گرفت. به جز پارامتر آخر (روانی) که به صورت کیفی (چشمی) بررسی شد، پارامترهای دیگر به صورت کمی بررسی شد و مقادیر هر پارامتر برای هر طرح به طور جداگانه ثبت گردید.

نمونه آزمایشگاهی هر طرح اختلاط به حجم دو لیتر تهیه و برای تعیین هر معیار تحت آزمایش قرار گرفت و در نهایت معیارهای کنترلی طرح های مختلف ارزیابی و با هم مقایسه شدند تا طرح اختلاطی که از نظر فنی و اقتصادی مطلوب بود تعیین گردد.

مصالحی که در تهیه ملات تزریق پرکننده مورد استفاده قرار گرفت عبارت‌اند از : سیمان تیپ ۲، بنتونیت، ماسه بادی، ماسه ۰۲، پودر سنگ و آب. مصالح ذکر شده در هر طرح اختلاط به نسبت‌های مختلف باهم مخلوط شد و پس از تهیه ملات (دوغاب) مقاومت ترکمی ۲۴ ساعته و ۷ روزه، آب-انداختگی و افت دوغاب تهیه شده اندازه‌گیری شد.

در این فصل نتایج به دست آمده از تحلیل نتایج آزمایش‌های مختلف بر مبنای پارامترهای فنی و اقتصادی ارائه شده و در نهایت نیز پیشنهادهایی برای ادامه پژوهش‌های مشابه ارائه می‌شود.

۲-۶ نتیجه‌گیری

مصالحی که برای تهیه دوغاب تزریق پرکننده در پروژه تونل کمکی کانال ابوذر انتخاب شدند سیمان، بنتونیت، ماسه بادی و آب می‌باشند.

از بین سیمان‌های پرتلند دو نوع سیمان تیپ ۲ و ۵ برای استفاده در ترکیب دوغاب تماسی در دسترس بودند که بر مبنای مقاومت فشاری، سیمان مناسب برای استفاده در ترکیب دوغاب انتخاب گردید. بنابراین با توجه به این که مقاومت اولیه و نهایی سیمان تیپ ۲ در نمونه‌های آزمایشگاهی تهیه شده به مراتب بیشتر از سیمان تیپ ۵ بود، لذا سیمان تیپ ۲ انتخاب و در ترکیب طرح‌های اختلاط از آن استفاده شد.

در یک ارزیابی کلی از نتایج طرح‌های مختلف اختلاط دوغاب تزریق پرکننده چنین می‌توان بیان کرد که افزایش سیمان در طرح اختلاط اثری مثبت بر روی پارامترهای فنی طراحی دوغاب دارد اما از نظر اقتصادی بالا بودن سیمان مطلوب نیست چرا که قیمت سیمان تقریباً قیمت تمام شده دوغاب را تعیین می‌کند و همچنین بالا بودن سیمان باعث تخریب برس‌های ماشین شده که این باعث آسیب دیدن سیستم آب‌بندی ماشین و در نهایت توقف عملیات و هزینه‌های بالای تعویض برس‌های سیمی می‌گردد.

تأثیری که وجود بنتونیت روی دوغاب دارد از دو بعد می‌توان مورد بررسی قرار داد، اگر از بعد مثبت به قضیه توجه شود می‌توان تأثیر مثبت افزایش آن روی آب‌انداختگی و افت دوغاب را بیان کرد ولی از بعد مقاومتی ثابت شد که تأثیری منفی روی مقاومت دارد. چنین به نظر می‌رسد که باید با چندین بار آزمون مقدار بهینه بنتونیت در طرح اختلاط تعیین شود. ضمناً باید یادآور شد که افزایش

بنتونیت بر روی روانی و کارایی دوغاب نیز تأثیری مثبت دارد از آنجایی که این پارامتر به صورت چشمی در طرح‌ها پایش شد امکان ارائه نتایج کمی نبود ولی مشاهده شد که افزایش بنتونیت در طرح اختلاط روانی دوغاب را تقویت می‌کند.

در بررسی اثر سنگ‌دانه‌ها مخصوصاً دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها هم به این نتیجه دست یافته شد که تا حدود زیادی دانه‌بندی روی پارامترهای کنترلی تأثیرگذار است. برای مثال مطالعات نشان می‌دهد هرچه به سمت استفاده از سنگ‌دانه ریزتر هدایت شود مقدار افت دوغاب بالا می‌رود و مقاومت فشاری دوغاب نیز پایین می‌آید اما از طرفی استفاده از سنگ‌دانه‌های درشت دانه نیز مشکلات خاص خود را دارد.

با توجه به شرایط سیستم ماشین تزریق و محدودیت پمپ تزریق در تزریق ذرات بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر استفاده از ماسه ۰۲ در طرح اختلاط تزریق با محدودیت روبرو شد و خودبه‌خود استفاده از این سنگ‌دانه در طرح اختلاط دوغاب منتفی گردید.

استفاده از پودرسنگ نیز از آنجایی که طبق نتایج حاصل از طرح‌ها تأثیر بسزایی در پارامترهای کنترلی طراحی دوغاب نشان نداد از طرح اختلاط دوغاب حذف شد البته دلایل دیگری از جمله دلایل فنی و اقتصادی نیز در حذف آن از طرح اختلاط دوغاب دخیل بود، زیرا قیمت پودر سنگ نسبت به ماسه بالاتر است.

به منظور بالا بردن روانی دوغاب می‌توان از روان‌کننده‌ها استفاده نمود. استفاده از روان‌کننده در پروژه حاضر به دلیل مشکلی که در تأمین و تهیه روان‌کننده مناسب پیش روی پیمانکار بود از طرح‌ها حذف شد، زیرا به دلیل تحریم‌های موجود تأمین روان‌کننده مناسب با مشکل روبرو بود و روان‌کننده‌های تولید داخل دارای کیفیت مناسب نبودند. بنابراین با بالا بردن نسبت آب به سیمان روانی مورد نیاز دوغاب تأمین شد.

طرح اختلاط دوغاب مناسب با توجه به پارامترهای کنترلی، ارزیابی اقتصادی و محدودیت‌های اجرایی برای تزریق تماسی در تونل کمکی کانال ابوذر انتخاب گردید. در ترکیب طرح اختلاط پیشنهادی مقادیر مصالح سیمان، بنتونیت، ماسه بادی و آب به ترتیب ۳۴۰، ۱۰، ۱۱۰۰ و ۴۹۰ کیلوگرم در مترمکعب دوغاب طراحی شدند.

۳-۶ پیشنهادات

با توجه به تجربیات حاصل از این مطالعه و محدودیت‌های موجود، برای بهینه بودن مطالعات بعدی در حوزه تزریق دوغاب و تعیین طرح اختلاط مناسب هر پروژه، پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

- ۱) در تعیین طرح اختلاط دوغاب باید کیفیت مصالح مورد استفاده در دوغاب به طور جدی بررسی شود. زیرا کیفیت مصالح مورد استفاده در اختلاط دوغاب تأثیر زیادی روی کیفیت دوغاب دارند.
- ۲) در حین تزریق تماسی دوغاب حجم دوغابی که برای هر حلقه از پوشش بتنی تزریق می‌شود با حجم تئوری فضای خالی محاسبه شده مقایسه شود تا از فرار دوغاب یا وجود فضاهای خالی احتمالی در مسیر مطلع شد.
- ۳) در تعیین مصالح دوغاب بخصوص سیمان که در تعیین قیمت نهایی ملات تزریق نقش اساسی دارد دقت شود.
- ۴) قبل از اجرای هر پروژه برای تعیین طرح اختلاط و مقدار دقیق مصالح طرح، مطالعات دقیق آزمایشگاهی انجام گیرد تا بتوان با استفاده از نتایج تحقیقات، مناسب‌ترین طرح اختلاط را در اجرای پروژه به کار گرفت.
- ۵) به نظر می‌رسد با توجه به نبود ابزار مناسب برای تعیین روانی این نوع دوغاب‌ها، لازم است تلاش شود تا ابزاری مناسب بدین منظور تعیین شود تا بتوان به طور کیفی روانی دوغاب را تعیین کرد.

۶) با توجه به اینکه در صورت استفاده از ماسه ۰۲ به عنوان سنگ‌دانه، مقدار سیمان مورد استفاده در ترکیب دوغاب ۲۵۰ کیلوگرم در متر مکعب دوغاب است لذا با برآورد میزان سیمان مصرفی در کل طول تونل مشخص می‌شود که ۴۰۰ تن سیمان صرفه جویی می‌شود که هزینه تهیه این مقدار سیمان تقریباً ۹۶۰۰۰۰۰۰۰ ریال است. با مقایسه این مقدار با قیمت پمپ که تقریباً برابر ۱۵۰۰۰۰۰۰۰ ریال است پیشنهاد تعویض پمپ داده می‌شود.

منابع

۱. خسرو تاش، م، (۱۳۹۰)، " طراحی یک سیستم تولید و انتقال دوغاب به دستگاه حفار مکانیزه " نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل.
۲. حیدری شیبانی، ر، (۱۳۹۰)، سمینار کارشناسی ارشد " بررسی روش های تاثیر فشار سینه کار و فشار تزریق در تونلسازی مکانیزه شهری"، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک ، دانشگاه صنعتی شاهرود.
3. Peila D, Pelozza S. Back filling. Course in Tunnelling and Tunnel Boring Machine.
4. Peila D, Borio L, Pelizza S. (2011). The Behaviour of a Two-Component Backfilling Grout Used in a Tunnel-Boring Machine. **ACTA GEOTECHNICA SLOVENICA**.
5. Guglielmetti.V, Grasso.P, Mahtab . A, Xu . S. (2008). Mechanized Tunneling In Urban Areas, Taylor & Francis, London.
6. Herbert H. Einstein. (2006). Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling; Tunnelling and Underground Space Technology;
7. Thewes M., Budach C. (2009). Grouting of The Annular Gap in Shield Tunneling– An Important Factor for Minimisation of Settlements and Production Performance
۸. شریعتی و، شیرازی اصل س ع، موسوی س ا، (۱۳۹۰)، "عملکرد دوغاب دوجزئی در حفاری با TBM در زمین های نرم"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل.
۹. مستوفی نژاد د، (۱۳۸۹)، **تکنولوژی و طرح اختلاط بتن؛ چاپ بیست و یکم**، انتشارات ارکان دانش، اصفهان، ص ۱ تا ۱۰.
10. ASTM. (2002). Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. C94.
11. ASTM. (2002). Standard Specification for Concrete Aggregates, C33.
12. Thomas Dalmalm, (2004), Choice of Grouting Method for Jointed Hard Rock based on Sealing Time Predictions, Page 74-77.
13. Paul Guyer, P.E., R.A, (2009), An Introduction to Soil Grouting, page 6-10.

14. EFNARC, (2005), Specification and Guidelines for the use of specialist products for Mechanised Tunnelling (TBM) In Soft Ground And Hard Rock. Page 17-19.
15. Pelizza D, Peila L, Borio E, Dal Negro, R. Schulkins, A. Boscaro, (2010). "Analysis of the Performance of Two Component Back-filling Grout in Tunnel Boring; Machines Operating under Face Pressure". ITA-AITES World Tunnel Congress.
۱۶. مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۹۰)، گزارش طرح اختلاط دوغاب پشت سگمنت تونل کمکی کانال ابودر.
۱۷. مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۹۰)، گزارش تزریق دوغاب پشت سگمنت تونل کمکی کانال ابودر.
۱۸. مهندسین مشاور ساحل، (۱۳۹۰)، گزارش زمین‌شناسی مسیر تونل کمکی کانال ابودر.
۱۹. زرین ا، (۱۳۹۱)، سمینار کارشناسی ارشد " عملیات حفاری مکانیزه در مناطق شهری و نقش دوغاب در آن "، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۲۰. قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا، قرب قائم، موسسه عمران، (۱۳۹۱)، گزارش اورهال ماشین حفاری تونل کمکی کانال ابودر.
21. Lunardi P, Leoni F, Valente A. (2000). Full scale test of grouting and freezing for new extension of rome underground, line B1.
22. Nguyen Duc Toan. (2006). TBM And Lining Essential Interfaces; pages 65-70.
۲۳. معصومی فشانی، حجت الله، (۱۳۹۱)، طرح بهینه اختلاط دوغاب در منطقه خشک مسیر حفاری TBM EPBs متروی شیراز، نشریه علمی_پژوهشی مهندسی معدن.
۲۴. کاظمی، ح، (۱۳۸۴)، بررسی خواص ژئوتکنیکی خاک‌های مسیر قطار شهری شیراز با تکیه بر تزریق پذیری آن‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان.

Abstract

With the increasing development of urban areas and the need for communities to urban transport infrastructure such as tunnels, water tunnels, and other underground structures need to be constructed in these areas. Mechanized tunnelling by Tunnel Boring Machines (TBM) is one of tunnel excavation methods. In order to encounter the settlement, maintain the stability of excavated space, preventing the entry of water into the tunnel and etc the tunnel excavation is done simultaneous with installing concrete segments. Due to differences between excavating diameter and precast concrete components diameter, it's necessary to filling the gap between those. This operation is named "Contact grouting". filler material has usually pumped slurry type into the gap. This thesis has found suitable mix design contact grouting in Auxiliary Channel Tunnel is Aboozar.

Cement, sand, bentonite and water are main material of contact grouting. Stability, bleeding, shrinkage and efficiency are more important factors in grout providing. In order to reach to the suitable mix design, it has provided 42 samples with different weight ratio of grout material. For each sample, it has taken 24 hours and 7 days Uniaxial Compressive Strength (UCS) test and it has determined grout bleeding and shrinkage percent. Finally it has exhibited suitable mix design for auxiliary channel of Aboozar tunnel. It has determined suitable mix design material as 340, 10, 1100 and 490 kg per cubic meter for cement, bentonite, sand, and water, respectively.

Keywords: Mechanized shield tunneling, Contact grouting, Grout mix design, Tunnel Aboozar, Uniaxial Compressive Strength, Bleeding and Shrinkage.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.S. Thesis

**Design of a suitable combination pattern for contact grouting in
Aboozar channel auxiliary tunnel - Tehran**

Saeid Ghaffari

Supervisors:

Dr. Hossein Mirzaie Nasirabad

Dr. Seyed Mohammad Esmail Jalali

Advisor

Dr. Omid Froogh

September 2013