

بررسی طرح مخلوط بتن قطعاتی از خطوط ۳ و ۴ متروی تهران کد F ۹۱

مهدی رئیس‌الواعظین^۱، مدیر واحد بتن و ژئوتکنیک شرکت بلندپایه،

Email: m_raissolvaezin@yahoo.com

زهرة عاشوری^۲، کارشناس بتن شرکت بلندپایه،

Email: apb798@yahoo.com

چکیده

برای عملیات بتن‌ریزی قطعاتی از خطوط ۳ و ۴ متروی تهران مشتمل بر شمع، لاینینگ مقطع تحتانی و فوقانی تونل، ایستگاه و روسازی مسیر و همچنین بتن پاشیده جهت پایدارسازی دیواره تونل حفاری شده، پنج طرح اختلاط بتن توسط واحد تکنولوژی بتن و ژئوتکنیک مستقر در ستاد پیمانکار ارائه گردید. برای بتن شمع و مقطع تحتانی تونل به میزان ۱۰۰ هزار مترمکعب یک طرح با رده مقاومتی ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نمونه استوانه‌ای و عیار سیمان ۳۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، برای بتن مقطع فوقانی تونل و ایستگاه به میزان ۳۷۰ هزار مترمکعب یک طرح با رده مقاومتی ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نمونه استوانه‌ای و عیار سیمان ۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، برای بتن روسازی مسیر به میزان ۴۰ هزار مترمکعب دو طرح با رده مقاومتی ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نمونه استوانه‌ای با استفاده و بدون استفاده از فوق روان کننده به ترتیب با عیارهای سیمان ۳۸۰ و ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و برای بتن پاشیده به میزان ۵۳۰ هزار مترمربع یک طرح با رده مقاومتی ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نمونه استوانه‌ای و عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ارائه گردید. در این مقاله نحوه محاسبه و ملاحظات اجرایی پنج طرح اختلاط بتن شامل دو طرح برای سازه تونل (لاینینگ) و ایستگاه، دو طرح برای روسازی مسیر و یک طرح برای بتن پاشیده (شاتکریت) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: طرح اختلاط بتن، بتن پاشیده، متروی تهران

۱- مقدمه

عملیات احداث قطعاتی از خطوط ۳ و ۴ متروی تهران مشتمل بر ۱۷ کیلومتر تونل‌سازی، ۴۰ کیلومتر ریل‌گذاری در دو سمت مسیر، ۱۶ ایستگاه زیرزمینی، ۱۱ هواکش میان تونلی، سه سازه سهراهی و یک سازه پارکینگ طبقاتی از سال ۱۳۸۸ توسط شرکت بلندپایه آغاز شده است و هم اکنون درصد پیشرفت معادل در تونل‌سازی حدود ۹۸ درصد و در ایستگاه‌ها تا ابتدای سال ۹۵، حدود ۹۰ درصد می‌باشد. شکل ۱، نمایی از تونل احداث شده خط ۳ متروی تهران را نشان می‌دهد. مقدار کل بتن سازه‌ای مورد استفاده در این قطعات حدود ۵۰۰ هزار مترمکعب و شاتکریت جهت پایدارسازی دیواره‌های تونل حدود ۵۳۰ هزار مترمربع بوده است (جدول شماره یک). [۱]

جدول ۱ مقدار عملیات بتن‌ریزی در اجزای مختلف پروژه‌های مترو شرکت بلندپایه

اجزای پروژه	حجم تقریبی بتن	واحد	رده مقاومتی نمونه استوانه‌ای (kg/cm^2)
ایستگاه	۲۰۱,۶۰۰	مترمکعب	۲۵۰
مقطع فوقانی و تحتانی تونل	۲۰۵,۶۰۰	مترمکعب	۲۵۰
شمع‌ها	۶۰,۰۰۰	مترمکعب	۲۱۰
روسازی	۴۰,۰۰۰	مترمکعب	۲۵۰
شاتکریت تونل	۳۷۱,۰۴۰	مترمربع	۲۵۰
شاتکریت ایستگاه	۱۶۳,۲۵۱	مترمربع	۲۵۰



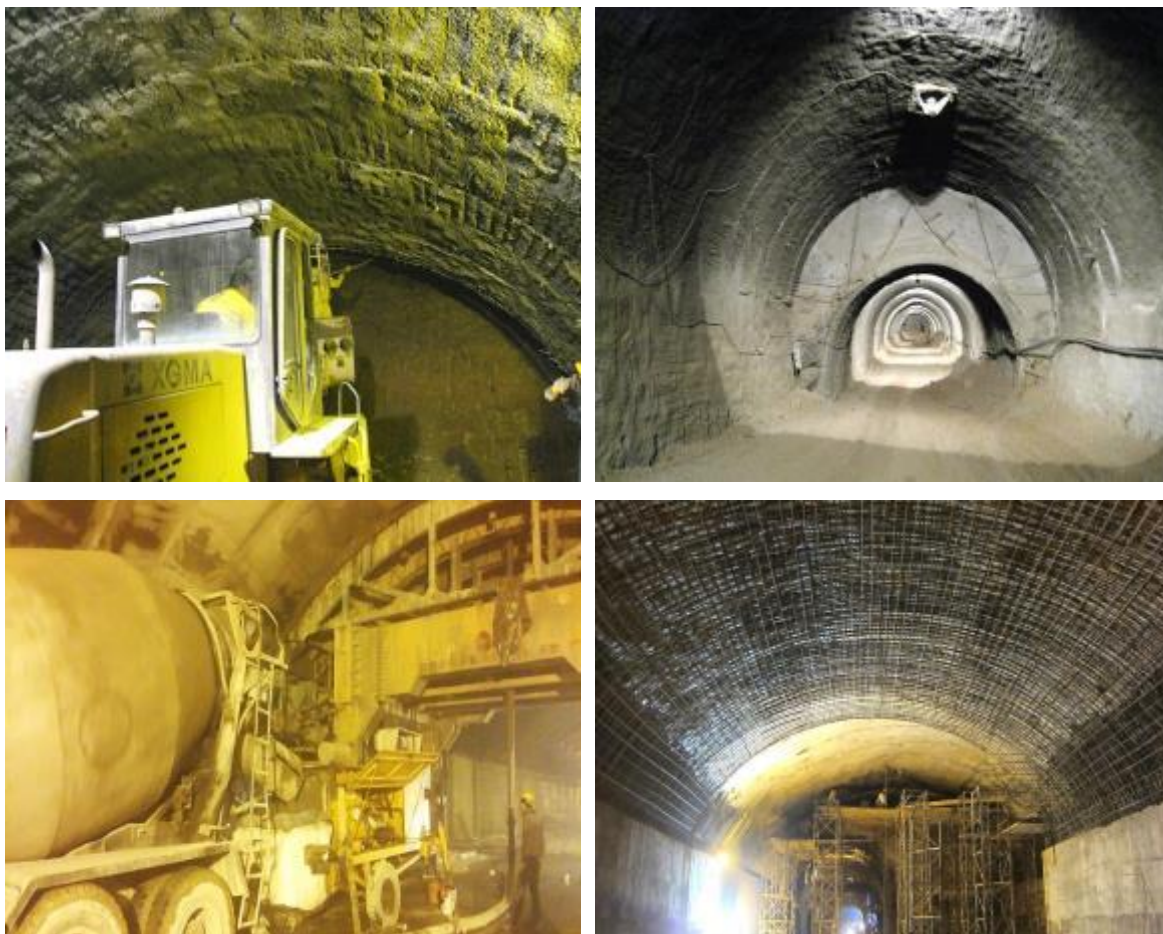
شکل ۱ نمایی از تونل احداث شده خط ۳ متروی تهران

۲- اصول کلی طرح مخلوط بتن و روش اجرا

طرح‌های اختلاط بتن مربوط به هر رده با توجه به مشخصات مورد نیاز، بر اساس روش ملی طرح مخلوط بتن تهیه شده است. همچنین جهت بررسی سازگاری مواد فوق روان کننده و سیمان، میزان استفاده و اقتصادی بودن آنها، ابتدا طرح‌های آزمایشی با مواد افزودنی مختلف ساخته شده و ماده مناسب انتخاب می‌شود.

استفاده از مواد فوق روان کننده در طرح اختلاط بتن به دلیل تسهیل در پمپاژ بتن و انتقال آن، کاهش آب مورد نیاز بتن و دستیابی به مقاومت و دوام مطلوب می‌باشد. در بتن پاشیده برای کاهش ریزش بتن در حین عملیات پاشیدن، از مواد افزودنی زودگیر کننده استفاده گردید. برای طرح بتن روسازی مسیر با توجه به نحوه اجرا و بتن‌ریزی (با شوت و یا پمپ بتن)، از دو طرح اختلاط با استفاده از مواد افزودنی و بدون استفاده از آن ارائه گردید. توالی عملیات اجرایی تونل‌سازی بدین صورت است که ابتدا عملیات خاکبرداری مقطع فوقانی با طول یک الی سه متر بسته به جنس خاک انجام گرفته، سپس برای نگهداری موقت تونل‌های حفاری شده، ابتدا با استفاده از سازه فلزی نگهدارنده (موسوم به لتیس) به عرض ۲۵ سانتیمتر دیواره تونل در ابتدا و انتهای طول حفاری شده پایدار گردیده، سپس فواصل بین لتیس‌ها با شبکه مش پوشانده شده و بتن پاشیده (شاتکریت) به ضخامت تقریبی ۳۰ سانتیمتر روی آنها پاشیده می‌شود. روی بتن پاشیده با ژئوتکستایل و ژئوممبرین جهت عایق‌بندی پوشانده شده، و در نهایت عملیات آرماتوربندی و اجرای بتن اصلی پوشش داخلی تونل (موسوم به لاینینگ) با ضخامت حدود ۵۰ سانتیمتر روی بتن پاشیده انجام می‌شود. مقاطع تحتانی تونل نیز همانند مقاطع فوقانی آن حفاظت موقت شده و در نهایت قالب‌بندی، آرماتوربندی و بتن‌ریزی در آن انجام می‌گردد. شکل شماره ۲ نمایی از عملیات اجرایی در تونل‌سازی مترو را نشان می‌دهد.

گزارش نهایی طرح اختلاط بتن توسط واحد تکنولوژی بتن و ژئوتکنیک مستقر در دفتر مرکزی شرکت پیمانکار بصورت متمرکز تهیه شد و برای اجرا به کلیه کارگاه‌های ذیربط مترو ارجاع گردید. جهت کنترل کیفیت بتن، آزمایشگاه مستقلی (بغیر از آزمایشگاه مشاور کارفرما)، توسط پیمانکار و با مدیریت واحد تکنولوژی بتن دفتر مرکزی بر عملیات ساخت و اجرای بتن نظارت داشت.



شکل ۲. نمایی از عملیات اجرایی تونل‌سازی در پروژه‌های مترو شرکت بلندپایه

۳- تعیین انحراف معیار و مقاومت متوسط فشاری هدف

با توجه به اختلافی که از لحاظ دقت ساخت بتن در آزمایشگاه و بچینگ پلانت وجود دارد و یکی از مهم‌ترین دلایل اختلاف میزان مقاومت فشاری میباشد، لازم است حاشیه ایمنی در هنگام ارائه طرح اختلاط در آزمایشگاه اعمال شود. این حاشیه ایمنی بر اساس انحراف معیار تعیین و به مقاومت مشخصه بتن اضافه می‌گردد که مقاومت فشاری متوسط طرح اختلاط یا همان مقاومت متوسط هدف بدست می‌آید. انحراف معیار بر اساس نحوه کنترل کیفی مصالح و دقت در ساخت بتن در کارگاه تعیین می‌گردد. با توجه به استقرار آزمایشگاه بتن در کارگاه، ساخت بتن توسط بچینگ پلانت اتوماتیک و به‌مراه کنترل کامل بر روی تولید شن و ماسه، انحراف معیار بر اساس رتبه‌بندی کارگاه‌های متوسط در روش طرح مخلوط ملی بتن [۳] و با در نظر گرفتن مقاومت مشخصه بتن مطابق جدول ۲-۳ روش طرح مخلوط ملی به میزان پنج مگاپاسکال تعیین می‌گردد. سپس مقاومت متوسط فشاری هدف بتن بزرگترین مقدار از دو رابطه ذیل تعیین می‌گردد. [۱]

که در آن:

f_{cm} : مقاومت فشاری متوسط بتن (مقاومت فشاری هدف)

f_c : مقاومت فشاری مشخصه بتن

S: انحراف معیار

$$f_{cm} = f_c + 1.34s + 1.5$$

$$f_{cm} = f_c + 2.33s - 4.0$$

۳-۱- تعیین مقاومت متوسط فشاری هدف بتن شمع و مقطع تحتانی تونل

$$f_{cm} = 21 + (1.34 \times 5) + 1.5 = 29.2 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 21 + (2.33 \times 5) - 4 = 28.65 \text{ MPa}$$

مقاومت متوسط فشاری هدف بتن مورد استفاده در شمع‌ها و کف‌بندها با رده $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ برابر ۲۹ مگاپاسکال در نمونه استوانه‌ای بوده که معادل مقاومت فشاری ۳۴۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع در نمونه مکعبی می‌باشد.

۳-۲- تعیین مقاومت متوسط فشاری هدف بتن تونل، ایستگاه و روسازی

$$f_{cm} = 25 + (1.34 \times 5) + 1.5 = 33.5 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = 25 + (2.33 \times 5) - 4 = 32.65 \text{ MPa}$$

مقاومت متوسط فشاری هدف بتن شمع ۳۳٫۵ مگاپاسکال در نمونه استوانه‌ای بوده که معادل مقاومت فشاری ۳۸۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع در نمونه مکعبی می‌باشد.

۳-۳- تعدیل انحراف معیار و مقاومت فشاری متوسط طرح اختلاط بتن

پس از ساخت بتن در کارگاه بر اساس طرح اختلاط نهایی و تهیه حداقل ۳۰ نتیجه متوالی مقاومتی، می‌توان انحراف معیار تصحیح شده را بدست آورد و در صورتی که تفاوت فاحشی بین انحراف معیار مفروض و انحراف معیار واقعی کارگاهی مشاهده گردد، لازم است مقاومت فشاری هدف طرح اختلاط مجدداً بر اساس انحراف معیار جدید بدست آید و طرح اختلاط جدید و بهینه شده محاسبه گردد.

[۲]

۴- مشخصات مصالح مصرفی در بتن

۴-۱- مشخصات سیمان مورد استفاده

نظر به اهمیت سازگاری فیزیکی و شیمیایی سیمان با مواد افزودنی، سیمان تولید شده در کارخانه‌های تهران و کاشان مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به گزارش ژئوتکنیک و میزان کلر و سولفات خاک، سیمان تیپ II جهت مصرف در پروژه مناسب تشخیص داده شد. [۱]

جداول شماره ۲ و ۳ نتایج آزمایش‌های شیمیایی و فیزیکی سیمان کارخانه تهران را نشان می‌دهد. [۴]

جدول ۲ نتایج آزمایش‌های شیمیایی سیمان تهران

میزان استاندارد	میزان بدست آمده	روش آزمایش	واحد	آزمایش
Min 20	20.95	ASTM C114	%	SiO ₂
Max 6	3.96	ASTM C114	%	Fe ₂ O ₃
Max 6	4.59	ASTM C114	%	Al ₂ O ₃
Max 6	3.2	ASTM C114	%	MgO
Max 8	1.73	ASTM C114	%	SO ₃
Nil	63	ASTM C114	%	CaO
Nil	0.7	ASTM C114	%	Na ₂ O
Nil	0.89	ASTM C114	%	K ₂ O
Max 3	0.7	ASTM C114	%	Loss on Ignition
Max 0.75	0.61	ASTM C114	%	Insoluble Residue

جدول ۳ نتایج آزمایش‌های فیزیکی سیمان تهران

میزان استاندارد	میزان بدست آمده	روش آزمایش	واحد	آزمایش
Max 6	95	ASTM C191	min	Initial Setting Time
Max 6	143	ASTM C191	min	Final Setting Time
----	2900	ASTM C204	m ² /kg	Blain
Max 6	152	ASTM C109	kg/cm ²	Compressive Strength-3day
Max 8	210	ASTM C109	kg/cm ²	Compressive Strength-7day

۲-۴- مشخصات آب مورد استفاده

به آبی که در زمان گیرش اولیه بتن در خمیر سیمان و سطح خارجی سنگدانه‌ها وجود دارد، آب آزاد می‌گویند. آب آزاد کارایی خمیر سیمان را در بتن تأمین نموده و ساختار اولیه خمیر سیمان را به وجود می‌آورد. لذا کیفیت آب بتن از جمله مواردی است که بر مقاومت و دوام بتن تأثیر مستقیم دارد. ناخالصی‌های موجود در آب ممکن است در گیرش سیمان اثر منفی گذاشته و همچنین آب نامناسب ممکن است روی مقاومت بتن اثر نامطلوب داشته و سبب بروز لکه‌هایی در سطح بتن و حتی خوردگی آرماتور گردد. لذا انجام آزمایش‌های pH، مواد نامحلول، میزان کلر و سولفات آب ضروری است. در جدول شماره ۴ نتایج آزمایش‌های انجام شده روی آب ارائه گردیده است. [۲]

جدول ۴ نتایج آزمایش‌های شیمیایی آب بکار رفته در بتن

میزان استاندارد	میزان بدست آمده	واحد	روش آزمایش
1000	Nil	ppm	Suspended Solids
5~8.5	7.77	---	pH
1000	112	ppm	(SO ₄) ⁻²
500	92.7	ppm	Cl ⁻

۳-۴- مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

بر اساس بررسی انجام گرفته بر روی معادن شن و ماسه اطراف پروژه، نمونه‌های آزمایشی از معادن ذیل تهیه گردید و تحت آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی قرار گرفت.

- معدن متوساک با تولیدات: ماسه با اندازه اسمی ۰-۸ میلی‌متر و شن با اندازه اسمی ۱۰-۱۹ میلی‌متر

- معدن کوثرنوبین با تولیدات: ماسه با اندازه اسمی ۰-۸ میلی‌متر و شن با اندازه اسمی ۱۰-۱۹ میلی‌متر

- معدن صنعت سازه با تولیدات: ماسه با اندازه اسمی ۰-۸ میلی‌متر و شن با اندازه اسمی ۱۰-۱۹ میلی‌متر

- معدن شنما با تولیدات: ماسه با اندازه اسمی ۰-۸ میلی‌متر و شن با اندازه اسمی ۱۰-۱۹ میلی‌متر

- معدن رضی آباد با تولیدات: ماسه با اندازه اسمی ۰-۸ میلی‌متر و شن با اندازه اسمی ۱۰-۱۹ میلی‌متر

پس از بررسی نتایج آزمایش‌ها، کیفیت مصالح، مقدار تولید و فاصله حمل، مصالح معدن متوساک و رضی آباد مناسب تشخیص داده شد.

پارامترهای مؤثر در دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای شامل کسب تراکم مناسب بتن، استفاده از حداقل مقدار سیمان و پمپ‌پذیری می‌باشد. آزمایش‌های تعیین میزان کلراید و سولفات موجود در مصالح سنگی نیز انجام شد که نشان‌دهنده میزان مجاز این املاح در

مصالح سنگی می‌باشد (جدول شماره ۵). [۲]

جدول ۵ نتایج آزمایش‌های شیمیایی مصالح بکار رفته در بتن

معدن	نوع مصالح	سولفات محلول در آب (%)	کلر (%)
متوساک	شن	0.001	0.020
	ماسه	0.001	0.016
رضی آباد	شن	0.002	0.022
	ماسه	0.002	0.020

اشکال شماره ۳ تا ۵ نمودار دانه‌بندی شن، ماسه و مخلوط سنگدانه معدن متوساک را (که در ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفتند) نشان می‌دهد. شایان ذکر است به علت کمبود فضا در محل استقرار بچینگ پلانت در برخی از کارگاه‌ها، مصالح درشت دانه بادامی و نخودی بصورت مجزا استفاده نشده و مخلوط درشت دانه بکار رفته است.

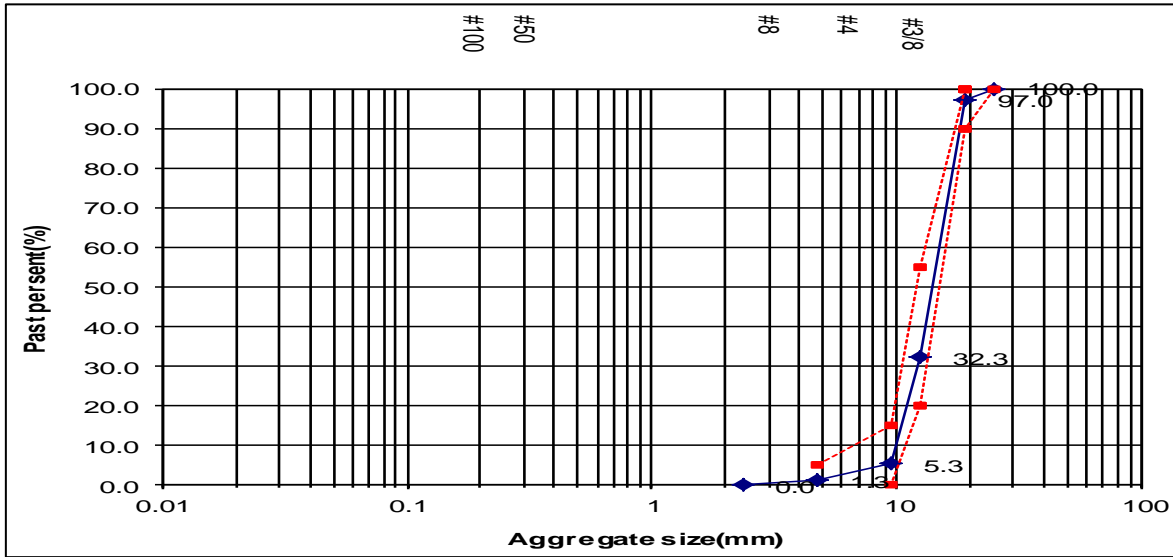
۴-۴ مواد افزودنی مورد استفاده

مواد افزودنی فوق روان‌کننده با کاهش نسبت آب به سیمان سبب افزایش مقاومت بتن و کاهش حرارت تولیدی می‌گردد. با توجه به مقاومت فشاری طرح و نسبت آب به سیمان در نظر گرفته شده، استفاده از مواد افزودنی امری اجتناب ناپذیر است. در این مرحله از شرکت‌های تولید کننده مختلف نمونه اخذ گردید و جهت مقایسه عملکرد مواد افزودنی، برای هر رده بتن، مواد مذکور در یک طرح اختلاط ثابت مورد استفاده قرار گرفتند. پس از بدست آمدن نتایج مقاومت فشاری، کارایی، سازگاری مواد افزودنی با سیمان، میزان مورد استفاده و اقتصادی بودن ماده مورد نظر برای هر رده انتخاب شد.

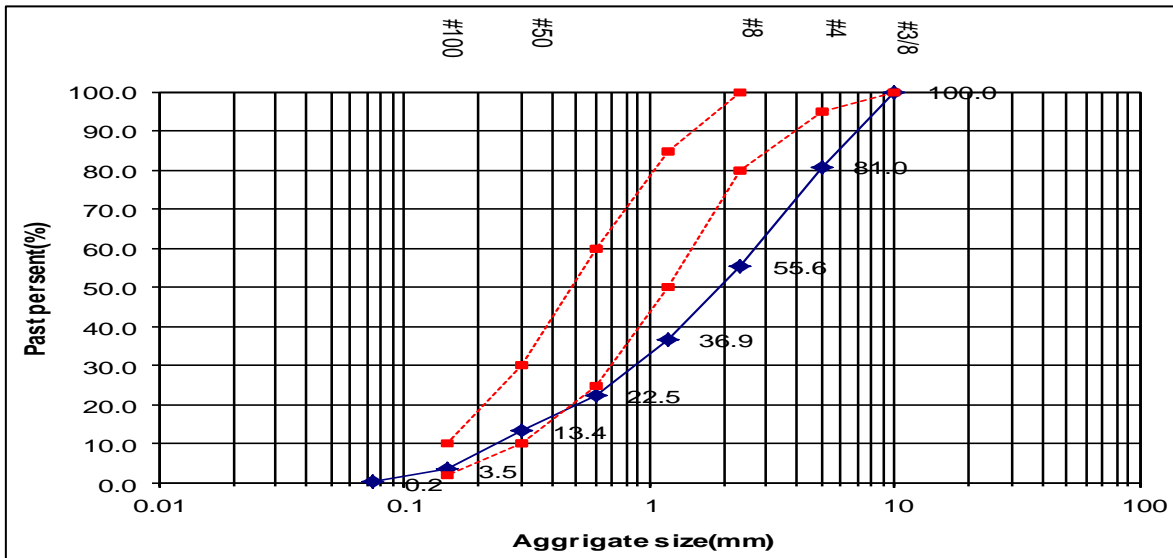
۵- طرح‌های اختلاط بتن

۵-۱ طرح اختلاط بتن شمع، تونل و ایستگاه

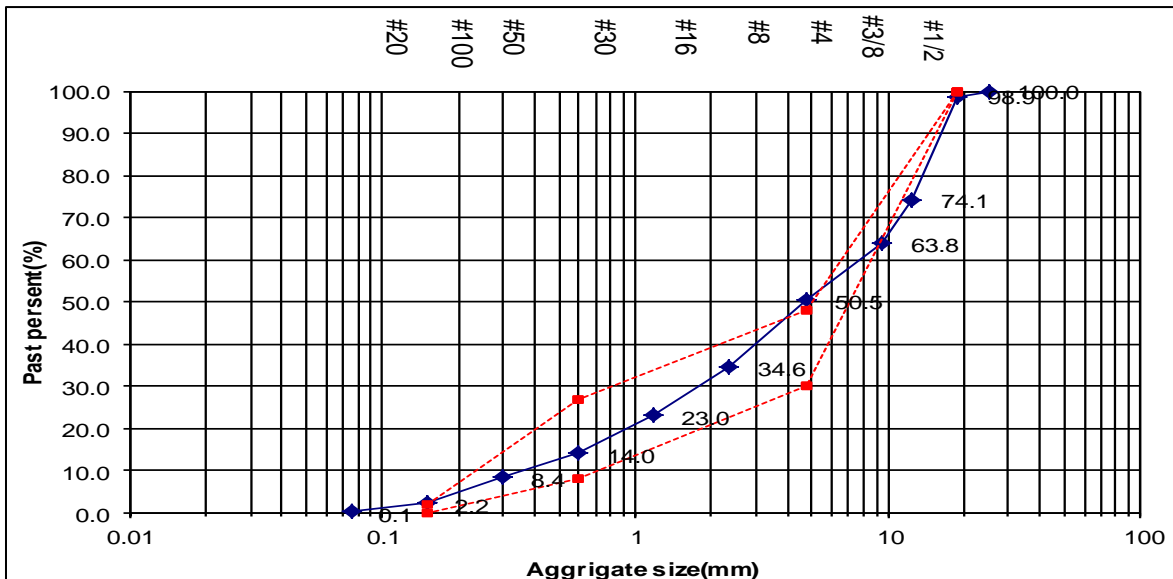
بتن مورد استفاده در شمع، مقطع فوقانی تونل و ایستگاه با رده‌های $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ و $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ بوده و با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلیمتر طراحی شده است. به منظور مقایسه عملکرد ماده فوق روان‌کننده‌ها با پایه پلی‌نفتالین، نمونه‌هایی با استفاده از مواد شرکت‌های تولیدکننده A، B و C و با یک طرح اختلاط ثابت مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به عملکرد و مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های ساخته شده، ماده فوق روان‌کننده محصول هر سه شرکت مورد تأیید بود. طرح اختلاط آزمایشی مورد استفاده در جدول شماره ۶ و نتایج بدست آمده در جدول شماره ۷ نشان داده شده است.



شکل ۳ نمودار دانه‌بندی شن



شکل ۴ نمودار دانه‌بندی ماسه



شکل ۵ نمودار دانه‌بندی مخلوط

لازم به ذکر است که با توجه به نزدیک بودن مقاومت فشاری رده‌های فوق‌الذکر، برای هر دو رده از یک روش واحد برای انتخاب مواد فوق‌روان‌کننده استفاده گردید. سپس بعد از انتخاب فوق‌روان‌کننده مورد نظر، طرح با مقادیر سیمان‌های متفاوت ساخته شد. با بدست آمدن نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ساخته شده، طرح اختلاط متناسب با هر رده انتخاب شد.

جدول ۶ طرح اختلاط آزمایشی بتن شمع، تونل، ایستگاه و روسازی جهت بررسی عملکرد مواد افزودنی

سیمان (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن ۳/۴ (kg/m ³)	آب آزاد (lit/m ³)	آب کل (lit/m ³)	w/c	اسلامپ هدف (cm)	مواد افزودنی (lit/m ³)
400	1100	700	160	180	0.4	12	3.2

جدول ۷ مقایسه نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشی بتن با استفاده از طرح اختلاط مندرج در جدول شماره ۶

نام شرکت	میزان مصرف (lit/m ³)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه (kg/cm ²)	متوسط مقاومت ۲۸ روزه (kg/cm ²)	اسلامپ (cm)
A	3.6	413	437	10
		462		
B	3.6	448	446	7
		444		
C	3.6	488	481	11
		475		



شکل ۶ نمایی از عملیات بتن‌ریزی



شکل ۷ نمایی از بچینگ پلانت مستقر در کارگاه ایستگاه صیاد شیرازی (۱۳۳)

با توجه به نتایج مقاومتی حاصل از نمونه‌ها و همچنین مقاومت فشاری هدف، نمونه‌های بتن با عیار سیمان ۳۰۰، ۳۴۰ و ۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب با استفاده از طرح اختلاط متناسب ساخته شد (جدول شماره ۸) که نتایج آن در جدول شماره ۹ ارائه گردیده است. با استناد به نتایج مقاومت فشاری بتن، برای مقاومت فشاری ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع نمونه استوانه‌ای، از طرح اختلاط با عیار سیمان ۳۴۰ و برای مقاومت فشاری ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع نمونه استوانه‌ای، از طرح اختلاط با عیار سیمان ۳۸۰ استفاده گردید (جدول شماره ۱۰).

جدول ۸ مقادیر طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشی با مقادیر مختلف سیمان

کد طرح	سیمان (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن ۳/۴ (kg/m ³)	آب آزاد (lit/m ³)	آب کل (lit/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)
T1	300	1215	715	120	160	2.85
T2	340	1180	695	136	174	3.40
T3	380	1145	675	152	190	3.61

جدول ۹ نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مندرج در جدول شماره ۸

کد طرح	شرکت تولید کننده	عیار سیمان (kg/m ³)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)	اسلامپ (cm)
T1-1	C	300	318	317	10
			316		

12	300	308	300	B	T2-1
		292			
10	265	267	300	A	T3-1
		263			
12	366	361	340	C	T1-2
		371			
10	351	351	340	B	T2-2
		350			
8	343	343	340	A	T3-2
		343			
12	445	445	380	C	T1-3
		446			
12	420	421	380	B	T2-3
		419			
11	428	430	380	A	T3-3
		425			

جدول ۱۰ طرح اختلاط نهایی بتن با رده ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع

سیمان (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن ۳/۴ (kg/m ³)	آب آزاد (lit/m ³)	آب کل (lit/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)
340	1190	720	136	175	3.4

جدول ۱۱ طرح اختلاط نهایی بتن با رده ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع

سیمان (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	شن ۳/۴ (kg/m ³)	آب آزاد (lit/m ³)	آب کل (lit/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)
380	1140	700	152	189	3.61

۵-۲- نحوه تهیه طرح اختلاط بتن پاشیده و ملاحظات اجرایی

عمل پاشش بتن توسط فشار هوا به دو روش خشک و تر انجام می‌شود. در روش خشک، مصالح سنگی و سیمان در داخل مخزن دستگاه مخلوط شده و آب مورد نیاز در قسمت نازل که آخرین قسمت دستگاه است اضافه می‌شود ولی در روش تر، مصالح سنگی، سیمان و آب در داخل مخزن مخلوط شده و سپس بتن آماده توسط فشار هوا پاشیده می‌شود. جهت تحکیم دیواره‌های تونل حفاری شده معمولاً از روش خشک استفاده می‌شود. در شاتکریت پروژه‌های مورد مطالعه از سیمان تیپ II استفاده شده و جهت بهبود عملکرد و جلوگیری از ریزش بتن، حداکثر سائز مصالح سنگی محدود گردید. همچنین جهت افزایش چسبندگی ملات ساخته شده، از ماسه شکسته (به دلیل وجود پودر سنگ) با ۳ تا ۶ درصد رطوبت و همچنین مواد افزودنی زودگیر کننده استفاده شد. در ضمن برای بتن پاشیده از هر نوع آب مناسب برای ساخت بتن می‌توان استفاده نمود. در طرح بتن مربوط به شاتکریت عموماً عیار سیمان بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم در مترمکعب در نظر گرفته می‌شود. مقاومت فشاری طرح بتن پاشیده ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع نمونه استوانه‌ای بود. برای بررسی مقاومت فشاری ملات دو طرح اختلاط به شرح جدول شماره ۱۲ ساخته شد و با توجه به نتایج مقاومت فشاری بدست آمده، طرح اختلاط شاتکریت با عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تأیید شد.

جدول ۱۲ طرح‌های اختلاط بتن پاشیده

کد طرح	سیمان (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب کل (lit/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)
T1	350	1750	185	1.2
T2	400	1650	200	1.5

۵-۲-۱- ملاحظات اجرایی بتن پاشیده

فشار مناسب هوا جهت عمل پاشش برابر سه اتمسفر می‌باشد ولی اگر طول شلنگ بلندتر از ۳۰ متر باشد به ازای هر ۱۵ متر افزایش طول، فشار هوا به میزان ۰/۳۵ اتمسفر افزایش می‌یابد. لیکن در هیچ حالت نباید فشار هوا از ۵/۲۵ اتمسفر بالا رود. ضخامت لایه پاششی می‌بایست در سطوح قائم و سقفی به ۲۵ میلیمتر و در سطوح افقی کف به ۷۵ میلیمتر محدود گردد. فاصله زمانی بین بتن پاششی لایه‌های متوالی حداقل ۳۰ دقیقه باشد. عمل‌آوری بتن پاشیده حداقل باید پنج روز ادامه یابد. به علت سرعت زیاد جت برخوردکننده، تمام بتن پاشیده شده بر روی سطوح باقی نمی‌ماند و قسمتی از آن خصوصاً ذرات درشت موجود در مخلوط برمی‌جهد. بنابراین بتن پاشیده در عمل پر سیمان‌تر از مخلوطی است که نسبت‌های آن پیمانه شده‌اند. این امر ممکن است باعث افزایش کمی در جمع شدگی بتن گردد. جهندگی مواد در اولین لایه بتن پاشیده بیشترین مقدار را دارد و با ضخیم شدن لایه خمیری بتن پاشیده مقدار آن کمتر می‌شود.



شکل ۸ - نمایی از عملیات اجرای بتن پاشیده

۵-۲-۲- معیار پذیرش بتن پاشیده

علاوه بر اعمال کنترل‌های مربوط به مصالح سنگی و سیمان و مخلوط مصالح، جهت کنترل مقاومت فشاری به دو روش عمل می‌گردد: روش اول) مغزه‌گیری از بتن سفت شده به تعداد سه نمونه به قطر ۷۵ میلیمتر که متوسط مقاومت فشاری آنها نباید از $0.85f_c$ کمتر باشد و همچنین مقاومت هیچ یک از مغزه‌ها نباید از $0.75f_c$ کمتر باشد. روش دوم) با استفاده از قالب‌های مکعبی

۳۰۰×۳۰۰ میلیمتر که توسط نازل شاتکریت پر می‌شود نمونه‌های آزمایشی تهیه شده و سپس در سنین ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار می‌گیرد.

۵-۳- طرح اختلاط بتن روسازی

تجربه اجرایی هر طرح اختلاط بتن و اطلاع از نتایج و مشخصات مورد نیاز پروژه با توجه به بتن‌های اجرا شده در هر کارگاه، بهترین معیار و شاخصه برای ارزیابی کیفیت بتن می‌باشد. در تهیه طرح اختلاط بتن روسازی پروژه‌های مورد مطالعه نیز با توجه به حجم عظیم بتن اجرا شده در دیگر اجزای پروژه و آگاهی از نتایج مقاومت آنها و همچنین یکسان بودن مقاومت مشخصه بتن روسازی با بتن بکار رفته در تونل، طرح اختلاط بتن تونل به عنوان مبنا در نظر گرفته شد و با توجه به نحوه اجرا، اصلاحاتی جزئی مانند تغییر در روانی بتن و تغییر در مقدار ماده افزودنی اعمال گردید. سپس یک طرح آزمایشی با استفاده از بچینگ‌های مستقر در پروژه ساخته شد و پس از حصول اطمینان از کسب نتایج مطلوب به عنوان مبنای طرح اختلاط بتن روسازی در نظر گرفته شد.

طرح اختلاط بتن روسازی بخش شمالی خط ۳ متروی تهران با مقاومت فشاری نمونه مکعبی ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع، دانه‌بندی ماسه ۰-۸ میلیمتر و دانه‌بندی شن ۲۴-۸ میلیمتر با توجه به نمودار دانه بندی مصالح سنگی و مخلوط آنها می‌باشد. طرح اختلاط بتن روسازی در صورتی که اجرای بتن با شوت میکسر باشد با اسلامپ حدود ۷ تا ۸ سانتیمتر و بدون استفاده از مواد افزودنی امکانپذیر است. لازم به ذکر است در صورت عدم استفاده از مواد افزودنی باید از سیمان بیشتری در طرح بتن استفاده شود تا مقاومت فشاری تأمین گردد. برای طرح بتن با استفاده از پمپ، از مواد افزودنی استفاده گردید.



شکل ۹ آزمایش اسلامپ طرح اختلاط بتن روسازی با استفاده از فوق روان کننده (بالا) و بدون استفاده از آن (پایین)

جدول ۱۳ طرح اختلاط نهایی بتن روسازی با شوت میکسر (بدون فوق روان کننده)

متوسط مقاومت فشاری ۴۲ روزه (kg/cm ²)	متوسط مقاومت فشاری ۴۲ روزه (kg/cm ²)	اسلامپ هدف (cm)	آب آزاد (lit/m ³)	شن ۳/۴ (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)
472	470	8	190	880	940	420
	474					

جدول ۱۴ طرح اختلاط نهایی بتن روسازی با پمپ (با فوق روان کننده)

متوسط مقاومت فشاری ۴۲ روزه (kg/cm ²)	متوسط مقاومت فشاری ۴۲ روزه (kg/cm ²)	اسلامپ هدف (cm)	فوق روان کننده (kg/m ³)	آب آزاد (lit/m ³)	شن ۳/۴ (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)
488	496	16	3	186	1096	736	380
	479						

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

برای عملیات بتن ریزی قطعاتی از خطوط ۳ و ۴ متروی تهران مشتمل بر شمع، لاینینگ مقطع تحتانی و فوقانی تونل، ایستگاه و روسازی مسیر و همچنین بتن پاشیده جهت پایدارسازی دیواره تونل حفاری شده، پنج طرح اختلاط بتن توسط واحد تکنولوژی بتن و ژئوتکنیک مستقر در ستاد پیمانکار ارائه گردید. برای بتن شمع و مقطع تحتانی تونل به میزان ۱۰۰ هزار مترمکعب یک طرح با رده مقاومتی ۲۱۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نمونه استوانه‌ای و عیار سیمان ۳۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، برای بتن مقطع فوقانی تونل و ایستگاه به میزان ۳۷۰ هزار مترمکعب یک طرح با رده مقاومتی ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نمونه استوانه‌ای و عیار سیمان ۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب، برای بتن روسازی مسیر به میزان ۴۰ هزار مترمکعب دو طرح با رده مقاومتی ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نمونه استوانه‌ای با استفاده و بدون استفاده از فوق روان کننده به ترتیب با عیارهای سیمان ۳۸۰ و ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب و برای بتن پاشیده به میزان ۵۳۰ هزار مترمربع یک طرح با رده مقاومتی ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع نمونه استوانه‌ای و عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب ارائه گردید. اجزای تشکیل دهنده طرح‌های اختلاط بتن در جداول ۱۵ تا ۱۹ نشان داده شده است.

جدول ۱۵ طرح اختلاط نهایی بتن شمع و مقطع تحناتی تونل بارده مقاومتی (kg/cm^2) ۲۱۰ نمونه استوانه‌ای

سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن ۳/۴ (kg/m^3)	آب آزاد (lit/ m^3)	آب کل (lit/ m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)
340	1190	720	136	175	3.4

جدول ۱۶ طرح اختلاط نهایی بتن مقطع فوقانی تونل و ایستگاه بارده مقاومتی (kg/cm^2) ۲۵۰ نمونه استوانه‌ای

سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن ۳/۴ (kg/m^3)	آب آزاد (lit/ m^3)	آب کل (lit/ m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)
380	1140	700	152	189	3.61

جدول ۱۷ طرح اختلاط نهایی بتن روسازی بارده مقاومتی (kg/cm^2) ۲۵۰ نمونه استوانه‌ای و اجرا با شوت میکسر (بدون فوق روان کننده)

سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن ۳/۴ (kg/m^3)	آب آزاد (lit/ m^3)	اسلامپ هدف (cm)	متوسط مقاومت فشاری ۴۲ روزه (kg/cm^2)	متوسط مقاومت فشاری ۴۲ روزه (kg/cm^2)
420	940	880	190	8	470	472
					474	

جدول ۱۸ طرح اختلاط نهایی بتن روسازی بارده مقاومتی (kg/cm^2) ۲۵۰ نمونه استوانه‌ای و اجرا توسط پمپ (با فوق روان کننده)

سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	شن ۳/۴ (kg/m^3)	آب آزاد (lit/ m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	اسلامپ هدف (cm)	متوسط مقاومت فشاری ۴۲ روزه (kg/cm^2)	متوسط مقاومت فشاری ۴۲ روزه (kg/cm^2)
380	736	1096	186	3	16	496	488
						479	

جدول ۱۹ طرح اختلاط نهایی بتن پاشیده بارده مقاومتی ۲۵۰ کیلوگرم بر سانتیمترمربع

سیمان (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	آب کل (lit/ m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)
400	1650	200	1.5

۷- منابع و مراجع

۱- گزارش‌های طرح اختلاط بتن پروژه قطعاتی از خطوط ۳ و ۴ متروی تهران، شرکت بلندپایه (۱۳۹۳)

۲- آیین نامه بتن ایران (آبا)، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، نشریه شماره ۱۲۰

۳- روش ملی طرح مخلوط بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ض-۴۷۹

۴- آیین نامه بتن آمریکا

هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران - ۱۵ مهرماه ۱۳۹۵