

## کاربرد بتن خود تراکم در پروژه بزرگراه طبقاتی شهید صدر

### و بررسی روش‌های کنترل کیفیت و دوام

جواد فلاح<sup>۱</sup>، موسی نجفی اناری<sup>۲</sup>، محمود اللهیاری<sup>۳</sup>، محمد کرمی مقدم<sup>۴</sup>، محمد حسین خزعلی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>سرپرست کارگاه پل طبقاتی شهید صدر (گروه تخصصی شهید رجایی)

<sup>۲</sup>سرپرست کارخانه تولید قطعات بتنی شهید رجایی (گروه تخصصی شهید رجایی)

<sup>۳</sup>سرپرست واحد اجرا کارخانه تولید قطعات بتنی شهید رجایی

<sup>۴</sup>سرپرست واحد تولید کارخانه تولید قطعات بتنی شهید رجایی

<sup>۵</sup>سرپرست واحد بتن و آزمایشگاه کارخانه تولید قطعات بتنی شهید رجایی

( مولف مرتب: [khazali@aut.ac.ir](mailto:khazali@aut.ac.ir) )

#### چکیده:

پروژه‌ی ساخت بزرگراه طبقاتی شهید صدر را می‌توان یکی از مهمترین و بدیع ترین پروژه‌های شهری دانست. تأمین ظرفیت مازاد به واسطه انتقال بخشی از بار ترافیکی به طبقه فوقانی بزرگراه از طریق ساخت پلی بتنی به طول کلی مسیر ۱۹ کیلومتر صورت می‌پذیرد که به منظور ساخت این پل در حدود ۲۸۳۰۰۰ مترمکعب بتن استفاده گردید.

طراحی سازه این پل به گونه ای برنامه ریزی شده بود تا ساخت شمع ها، فونداسیون ها و ستونها در مسیر احداث پروژه و با استفاده از بتن معمولی و به صورت درجا انجام پذیرد و قطعات سرستون و عرشه بصورت اجزای بتنی پیش ساخته و در کارخانه هایی خارج از محور طرح ساخته شوند. بر این اساس و به منظور تسریع در روند ساخت قطعات، افزایش سطح کیفی و دوام، حصول نتایج مطلوب در پارامترهای مقاومتی و سازه ای و نهایتاً به جهت تامین تراکم متناسب با وجود فشردگی بیش از حد میلگردها، استفاده از بتن خودتراکم در فرآیند تولید در دستور کار قرار گرفت.

بتن خود تراکم نیز همانند دیگر انواع بتن، مزایا، معایب و چالشهای اجرایی خاص خود را دارد. چالشهایی نظیر نوع فیلرمصرفی در طرح، نوع افزودنی، چگونگی کنترل جریان پخش شدگی بتن و افت آن در بازه های زمانی مختلف و ... و مزایایی از قبیل پمپ پذیری آسان، عدم نیاز به ویبره، شکل پذیری بسیار خوب و پرکنندگی قالب علی رغم تراکم آرماتورها و ... از طرفی تأمین این نوع بتن طراحی ویژه ای را در مجموعه تجهیزات و ماشین آلات مختص به تولید مطالبه می‌نمود. در این مقاله سعی شده است تا ضمن معرفی مشخصه‌های بتن خودتراکم مورد استفاده در قطعات پیش ساخته بتنی پروژه شهید صدر، در خصوص روشهای کنترل کیفی در زمینه های مصالح مصرفی، بتن تازه و بتن سخت شده شامل مقاومت فشاری و دوام توضیحاتی ارائه شود و در نهایت با تشریح نتایج بدست آمده از این آزمایشها، انحراف معیار کارگاهی برای حدود ۱۰۰،۰۰۰ مترمکعب بتن خودتراکم تجزیه و تحلیل گردد.

**کلمات کلیدی:** بتن خودتراکم، پروژه بزرگراه طبقاتی شهید صدر، کنترل کیفیت، مقاومت فشاری، دوام، انحراف معیار کارگاهی

## ۱- مقدمه: بتن خودتراکم، تاریخچه و معرفی

بتن خودتراکم مخلوطی با روانی فوق العاده است که ضمن داشتن قابلیت بسیار مطلوب در شکل پذیری، بدون وجود مشکلاتی نظیر پدیده جداسازی دانه ها، در تولید محصولات همگن، با تراکم مناسب و سطوحی یکپارچه مورد استفاده قرار می گیرد. این مخلوط بتنی به خصوص در مواردی که حجم میلگردها مصرفی بسیار بالا باشد با برخورداری از روانی بسیار زیاد در قالب حرکت کرده و ضمن نفوذ در تمامی بخشهای آن، موجب حصول تراکمی در حدود ۱۰۰ درصد در قطعه بتنی می گردد. [۱] ساختار بتن خودتراکم به لحاظ مصالح مصرفی مشابه بتن عادی بوده و ممکن است در ساخت آن مقادیر قابل توجهی از فوق روان کننده ها و همچنین مصالح لزجت دهنده نیز استفاده شود.

پیشنهاد ساخت و بکارگیری بتن خودتراکم برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسط کارشناس ژاپنی به نام Okamura ارائه گردید، چرا که در آن زمان به دلیل کمبود نیروی انسانی ماهر در صنعت ساخت و ساز و همچنین عدم دستیابی به تراکم متناسب در قطعات بتنی به علت تراکم بیش از حد میلگردهای مصرفی، کیفیت سازه ها در حد مطلوبی قرار نمی گرفتند. روش او باعث شد تا با عبور بتن از میان شبکه های انبوه میلگرد، قطعه ای با تراکم و یکپارچه تولید و عملکرد بهتری در رفتار سازه ای بوجود آید. [۲]

بتن خود تراکم یا SCC به بتنی اطلاق می شود که به علت داشتن روانی بسیار زیاد، بدون نیاز به تراکم (ویبراسیون) به راحتی در هر قالبی و با هر تراکمی از آرماتور قرار گرفته و با پرکردن کامل قالب، بتنی با تراکم ایجاد می کند. در واقع بتن خود تراکم مخلوطی با روانی فوق العاده است که قابلیت شکل پذیری بسیار بالایی دارد و بدون به وجود آمدن جداسازی دانه ها و مسائلی از این قبیل می تواند محصولی یک دست و کاملاً متراکم با سطحی کاملاً مناسب به وجود آورد.

## ۲- کاربرد بتن خودتراکم در پروژه پل طبقاتی شهید صدر، پیشنهادات و چالشها

به منظور ساخت پل بزرگراه طبقاتی شهید صدر، سازه ای بتنی و سگمنتال طراحی گردید. این سازه بتنی مبتنی بر تعداد زیادی از قطعات بتنی پیش ساخته می باشد که می بایست در کمترین زمان و با بهترین کیفیت تولید شوند. از طرفی بدلیل استقرار این پل در یک فضای پرتردد شهری، زیبایی ظاهری قطعات نیز دارای اهمیت بود و همچنین طراحی سازه ای، مقاومت مشخصه بتن مصرفی را در سطح بالایی مطالبه می نمود. در نهایت دوام و کیفیت قطعات نیز با حساسیت مورد توجه طراحان و سازندگان قرار گرفت. در چنین شرایطی استفاده از دو گزینه اجتناب ناپذیر می نمود: بتن خودتراکم و بتن توانمند.

بر اساس نظر مشاورین پروژه استفاده از بتن خودتراکم در سطح وسیع به دلیل مشکلات متعدد از قبیل: کمبود نیروی متخصص، تحمیل فشار به قالبهای قطعات تولیدی و امکان خروج بتن از آنها، تامین افزودنی مناسب برای کسب روانی لازم، چگونگی انتخاب و استفاده از فیلر و یا ماده لزجت دهنده، تأمین لزجت مناسب با کاهش عیار سیمان، مشکل تولید این نوع بتن در پیچینگ و حساسیت بالای دانه بندی مصالح سنگی و ... مسائلی بود که ذهن مشاورین را به جای استفاده از این بتن به بتن توانمند ترغیب می نمود. در نهایت ضمن آموزش نیروهای متخصص، مطالعه گسترده در زمینه مصالح مصرفی، طرح های اختلاط، انجام آزمایش های متعدد و تامین تجهیزات مناسب استفاده از بتن خودتراکم علیرغم تمام معضلات و چالشها تولید، در قطعاتی بصورت آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت و نتیجه به قدری مطلوب بود که راه را برای تولید انبوه این محصول هموار ساخت.

## ۳- مصالح مصرفی:

### ۳-۱- سنگدانه ها:

یکی از عوامل مهم برای دستیابی به بتن خودتراکم مورد نظر استفاده از سنگدانه با دانه بندی مناسب می باشد. به گونه ای که کوچکترین تغییر در نمودار دانه بندی می تواند باعث تغییر اساسی در خواص بتن تازه و سخت شده شود. در این پروژه از سه نوع مصالح سنگی استفاده شد که عبارتند از: شن بادامی، شن نخودی و ماسه.

۳-۱-۱- شن بادامی: با توجه به نیاز های طرح اختلاط موجود و میزان تراکم آرماتور قطعات تولیدی، اندازه ی سنگدانه ها که در ردیف این نوع شن قرار می گرفت برابر ۹،۵ تا ۱۹ میلی متر تعیین گردید. همچنین برای رسیدن به مقاومت مورد نظر، حداقل درصد شکستگی این نوع شن برابر ۶۰ درصد تعیین گردید. با توجه به سه جزئی بودن مصالح سنگی و برای رسیدن به یک دانه بندی مخلوط پیوسته از شنی با ۷۰ درصد مانده روی الک ۱/۲ اینچ و بدون مانده روی الک ۴ در نظر گرفته شد.

۳-۱-۲- **شن نخودی:** هدف از استفاده کردن این نوع شن در طرح اختلاط، رسیدن به دانه بندی یکدست و بدون گپ می باشد. همچنین این نوع شن به منظور تسهیل پمپ پذیری بتن، کاملاً طبیعی و گرد گوشه با ابعادی بین ۶ تا ۹,۵ میلی‌متر و با مانده ۸۰ درصد روی الک ۴ انتخاب گردید. یکی دیگر از کاربردهای این نوع از شن نخودی استفاده در طرح اختلاط خاص با حداکثر اندازه سنگدانه ۹,۵ میلی‌متر است که در موقعیت‌های با تراکم آرماتور بسیار زیاد کاربرد دارد.

۳-۱-۳- **ماسه:** ماسه به صورت کاملاً طبیعی و در بازه ابعادی ۰ تا ۶ میلی‌متر و با مدول نرمی متوسط ۳,۵ انتخاب شد تا علاوه بر بهبود پمپ پذیری، به خواص رئولوژی بتن نیز کمک نماید. نقش ماسه در تامین خواص بتن تازه بسیار پررنگ‌تر از دیگر مصالح است. در جدول شماره ۱ نمونه‌ای از دانه بندی مصالح مورد استفاده در پروژه نشان داده شده است.

جدول شماره ۱- دانه بندی مصالح سنگی (ASTM C 33)

اندازه الک	درصد عبوری		
	ماسه	شن بادامی	شن نخودی
الک 3/4"	-	88.6	-
الک 1/2"	-	30.6	97.9
الک 3/8"	100	8.6	73.1
الک 3/16"	94	0.5	1.1
الک # 8	65.1	0.4	0.4
الک # 16	45.8	0	0
الک # 30	27.4	-	-
الک # 50	15.8	-	-
الک # 100	6.3	-	-

### ۳-۱-۴- چالش‌های بهینه سازی کیفیت مصالح سنگی:

بهینه سازی کیفی مصالح سنگی از شروع کار با حضور و بازدید مکرر معدن صورت گرفت. در ابتدا ماسه تولیدی معدن از نوع طبیعی و کم فیله بود که ماسه سایز ۰-۳ شکسته برای جبران کمبود ریزدانه به آن اضافه می‌شد. همچنین ماسه تولیدی به علت روش قدیمی تولیدی ماسه معدن کمی خاک‌دار بود. با کنترل و پیگیری مکرر از کارخانه تولید مصالح و همچنین جلوگیری از وارد شدن مصالح معدن به دپوی کارخانه به مدت حدود ده روز، معدن سریعاً نسبت به راه‌اندازی دو دستگاه جدید تولید ماسه اقدام نمود. دستگاه‌های جدید مانع از بین رفتن ریزدانه می‌شدند و همچنین ماسه تولیدی به مراتب تمیزتر از تولید قبل گردید. لازم به ذکر است که کمبود ریزدانه ماسه باعث افت در خواص رئولوژی بتن تازه می‌گردید و همچنین خاک‌دار بودن و کثیف بودن مصالح علاوه بر تاثیر روی خواص رئولوژی بتن تازه، باعث تغییر رنگ بتن تولیدی و کاهش مقاومت آن می‌گردید. کثیفی شن نخودی یکی از دغدغه‌های کنترل کیفیت بود که با اضافه کردن یک شن‌شور دیگر در مسیر تولید شن این مشکل برطرف گردید.

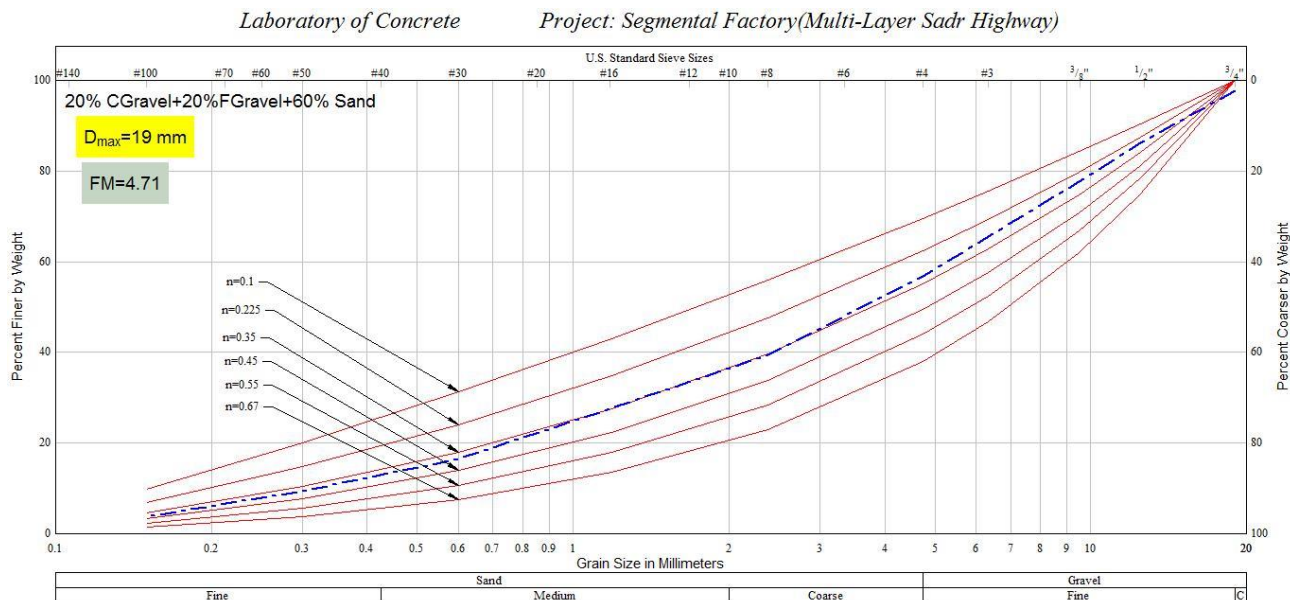
شن بادامی اولیه معدن دارای سایز بزرگتر از ۱۹ میلی‌متر و دارای هم‌پوشانی دانه بندی با شن نخودی بود. این مشکلات باعث عدم حرکت صحیح بتن در قالب با توجه به فاصله آرماتورها و کاورها و همچنین نرسیدن به خواص بتن تازه مورد نظر به علت هم‌پوشانی و افزایش سطح ویژه مصالح می‌گردید. برای رفع مشکلات ذکر شده با تغییر در سرندهای معدن سایز بالاتر از ۱۹ میلی‌متر حذف گردید و همچنین سایز زیر الک ۹,۵ میلی‌متر برای از بین رفتن هم‌پوشانی حذف گردید. پس شن مورد نظر فقط محدوده دو الک ۱۲,۵ میلی‌متر و ۹,۵ میلی‌متر را در بر می‌گرفت. در گام بعد تنظیم دانه بندی مطلوب با تغییر حجم مصالح روی دو الک ذکر شده به گونه ای برنامه‌ریزی گردید که مانده روی الک ۱۲,۵ میلی‌متر حداقل ۷۰ درصد و مابقی مانده روی الک ۹,۵ میلی‌متر باشد.

از دیگر چالش‌های مصالح سنگی در بتن خودتراکم استفاده از مصالح سنگی با درصد رطوبت بالاست که موجب تغییرات زیاد در بتن تازه و نوسان نسبت آب به سیمان می‌گردد که نقش ماسه در این بین بسیار پررنگ تر می‌باشد. بدین منظور تمام مصالح سنگی پس از حمل از معدن در نقطه ای از کارخانه دپو شده تا پس از زهکشی و کاهش رطوبت و همچنین نمونه برداری و کنترل کیفیت، مجوز حمل به پشت بچینگ را پیدا کند. از دیگر تدابیر مهم در قسمت مصالح سنگی بچینگ مسقف کردن و همچنین تعبیه یک مبدل حرارتی بزرگ

در زیر تمام مصالح سنگی است که در فصول سرد با گرم کردن مصالح از یخزدگی آن جلوگیری بعمل می‌آورد و ساخت بتن را در دماهای منفی میسر می‌سازد. این مبدل حرارتی، گرمای بخار را به صورت غیر مستقیم و با مکانیزم تابشی به مصالح منتقل می‌کند در نتیجه تغییری در رطوبت آن ایجاد نمی‌گردد.

گراف مخلوط مصالح در نمودار شماره ۱ ترسیم گردیده است. درصد اختلاط مصالح سنگی به صورت ۶۰٪ ماسه، ۲۰٪ شن نخودی و ۲۰٪ شن بادامی می‌باشد.

### نمودار شماره ۱- دانه بندی مخلوط



### ۳-۲- پودر سنگ (فیلر):

استفاده از پودر سنگ در طرح اختلاط بتن خودتراکم یک راهکار اقتصادی مناسب می‌باشد و خواص تازه این بتن را به نوع پودر سنگ میزان نرمی و درصد عبوری از الک ۲۰۰ وابسته است. در این پروژه با توجه به مسایل اقتصادی و دسترسی آسان تصمیم به استفاده از پودر سنگ (کربنات کلسیم) گردید. برای پذیرش پودر سنگ آهک وارد شده به کارگاه درصد عبوری از الک ۲۰۰ بین ۶۰ تا ۸۰ درصد مورد نظر می‌باشد. آنالیز شیمیایی مربوط به پودر سنگ هم به صورت ماهیانه انجام و تغییرات مورد بررسی قرار گرفته (خلوص کربنات کلسیم بالای ۹۰٪). برای استفاده بهتر و آسان تر از پودر سنگ و همچنین پخش همگن آن در کل حجم بتن مورد نظر استفاده از دستگاه لجن ساز لازم و ضروری می‌باشد. لجن در اصطلاح به مخلوط پودر سنگ آهک، آب و فوق روان کننده گفته می‌شود و هنگام ساخت بتن به سایر مصالح اضافه می‌گردد. میزان آب و فوق روان کننده مصرفی در لجن از طرح اختلاط کسر می‌شود و مابقی در هنگام اختلاط اضافه می‌گردد.

برای دستیابی به یک مخلوط همگن و یکنواخت لجن که دچار ته‌نشینی هم نگردد نمونه‌هایی با نسبت های مختلف آب، پودر سنگ و فوق روان کننده ساخته شده و همگن‌ترین مخلوط مورد استفاده واقع شده است. لازم به ذکر است در صورتی که پودر سنگ به صورت خشک به مصالح اضافه گردد، موجب عدم پخش همگن در مخلوط می‌گردد. نکته دیگر اینکه استفاده از یک مخزن بزرگ به عنوان ذخیره لجن باعث می‌گردد تغییرات در لجن مصرفی به حداقل برسد و این پودر آب لازم برای اشباع شدن را قبل از استفاده در بتن جذب نماید. پودر سنگ نرم تر باعث کاهش مقدار مصرفی روان کننده و پودر سنگ در بتن با یک رئولوژی ثابت می‌گردد.

### ۳-۲-۱- چالش های بهینه سازی کیفیت پودر سنگ :

در بدو تولید پودر سنگ مصرفی تنها از یک معدن تامین می‌گردد. پودر سنگ مصرفی در ابتدا به صورت کیسه ای به کارخانه ارسال می‌شد که باعث ایجاد مشکل برای تخلیه در لجن ساز و مستلزم صرف نیروی انسانی زیادی بود که با افزایش حجم بتن ریزی استفاده از این روش ممکن نبود. با تغییرات در کارخانه تولید پودر سنگ، امکان بارگیری بونکر ایجاد گردید و پودر سنگ پس از حمل توسط بونکر در سیلو با ظرفیت ۲۰۰ تن تخلیه و برای استفاده در لجن ساز آماده گردید. در مرحله بعد با افزایش ظرفیت سیلوهای پودر سنگ به ۵۰۰

تن و تجهیز کارخانه به دو دستگاه لجن ساز مستقل توان تولید بتن کارخانه افزایش یافت. برای کاهش تغییرات در کیفیت لجن تولیدی و جذب آب کامل پودر سنگ قبل از استفاده در بتن چهار مخزن جمعا به ظرفیت ۳۶ مترمکعب با موتور همزن دایم کار، در کنار لجن ساز تعبیه گردید تا در زمان تولید برای حداقل ۵۰۰ متر مکعب بتن لجن آماده و یکدست در دسترس قرار گیرد. در ابتدای کار درصد عبوری از الک ۲۰۰ پودر سنگ مصرفی کمتر از حد مورد نظر بود که این امر باعث کاهش ظرفیت روانی و رئولوژی بتن می گردید و برای رفع آن ناگزیر به مصرف بیشتر پودر سنگ بودیم. برای رفع این مشکل طی ریزنی های مکرر با کارخانه تولید کننده بنا براین شد که پودر سنگ با نرمی مناسب تولید گردد که قاعدتاً نیاز به صرف هزینه بیشتر نیز می گردید. با ورود این پودر مشکل ظرفیت بتن و مصرف پودر سنگ مرتفع گردید.

همزمان با افزایش تولید بتن کارخانه که متعاقباً نیاز به پودر سنگ بیشتر را می طلبید، مشخص گردید که معدن اولیه توانایی تامین این مقدار پودر را با کیفیت لازم ندارد و بنابراین شاهد تغییرات در پودر ارسالی آن معدن بودیم که لازم بود در این مرحله برای افزایش ظرفیت پودر سنگ مورد نیاز کارخانه دوم را شناسایی نماییم لذا با بررسی آنالیز شیمیایی و فیزیکی چند معدن، معدنی که بیشترین شباهت را از نظر آنالیز شیمیایی و کیفیت تولیدی داشت و دارای بعد مسافت قابل قبول بود مورد تایید قرار گرفت و به همین ترتیب تغییرات لازم جهت بارگیری توسط بونکر در کارخانه دوم نیز انجام شد.

### شکل ۱- تجهیزات لجن ساز شامل سیلوی نگهداری پودر، توزین، اختلاط، مخزن ذخیره لجن و پمپ انتقال لجن



### ۳-۳- افزودنی کاهنده آب ( فوق روان کننده):

استفاده از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات در طرح اختلاط بتن خود تراکم متداول است. زیرا دیگر پایه های افزودنی کاهنده آب هم قدرت روانی لازم را ندارند و هم مقاومت اولیه مورد نیاز را تامین نمی کنند. بدلیل قدرت روانی بالا و میزان وزنی کم مصرف آن در یک مترمکعب لازم است افزودنی فوق روان کننده با دقت بالا توزین و مصرف گردد. در صورت مصرف کمتر از میزان مورد نیاز نسبت آب به سیمان تغییر کرده و مستقیماً مقاومت فشاری را کاهش می دهد و در صورتی که از میزان تعیین شده بیشتر مصرف گردد باعث ته نشینی و جداسدگی در بتن تازه می گردد و همچنین خطر گرفتگی در پمپ بتن را نیز افزایش می دهد.

### ۳-۳-۱- چالشهای انتخاب و کنترل کیفیت افزودنی:

در این پروژه برای یافتن افزودنی سازگار با سیمان مصرفی و همچنین دارا بودن بهترین خواص بتن تازه و سخت شده از میان مواد قابل دسترس داخلی و خارجی بر اساس عملکرد و هزینه بهترین گزینه انتخاب و مورد استفاده قرار گرفت. از مهمترین چالش های انتخاب افزودنی سازگاری با سیمان مورد استفاده و عدم هوازایی افزودنی می باشد که می تواند به مقدار قابل توجهی کاهش مقاومت فشاری را به همراه داشته باشد. چالش دیگر موضوع حفظ اسلامپ و مقاومت اولیه بتن است که با توجه به دمای هوا در فصول مختلف باید تغییرات مورد نیاز در افزودنی اعمال گردد چون این دو عامل در تضاد با یکدیگر هستند یعنی به طور معمول هر چه حفظ اسلامپ را افزایش دهیم

مقاومت اولیه کمتری خواهیم داشت پس باید برای تولید قطعات پیش ساخته که زمان باز شدن قالب بسیار حائز اهمیت می باشد نقطه بهینه ای را پیدا کرد. در این پروژه زمان و هزینه زیادی صرف انتخاب و ایجاد تغییرات در افزودنی گردید.

برای کنترل کیفیت مواد وارد شده به کارگاه از هر محموله نمونه گیری شده و طرح اختلاط تکرار و خواص این بتن با بتن مرجع اولیه مقایسه می شد و در صورت مغایرت از قبول آن خودداری می گردید. از دیگر موارد برای کنترل کیفیت میزان ماده خشک می باشد که با محموله مرجع اولیه مقایسه و در صورتی که حداکثر تفاوت کمتر از  $\pm 2\%$  بود قابل پذیرش قرار می گرفت. ضمناً لازم بود نگهداری این مواد در محیط سرپوشیده انجام شود تا از یخ زدگی و دیگر عوامل محیطی جلوگیری به عمل آید.

### ۳-۴-سیمان:

با توجه به تولید قطعات بتنی و پیش ساخته و لزوم کسب مقاومت زودرس از سیمان پرتلند ۴۲۵-۱ استفاده گردید. مشخصات فیزیکی این سیمان به طور کلی در جدول شماره ۲ و نتایج آنالیز انجام شده بر روی یک نمونه سیمان در جدول شماره ۳ قابل مشاهده می باشد.

جدول شماره ۲- مشخصات سیمان مصرفی براساس استاندارد ایران

عنوان آزمایش	چگالی سیمان (gr/cm <sup>3</sup> )	بلین (cm <sup>2</sup> /gr)	غلظت نرمال (w/c)	گیرش اولیه (min)	گیرش نهایی (min)	مقاومت فشاری (MPa)
نتایج	۳/۱۶-۳/۱۲	۳۰۰۰-۳۲۰۰	۰,۲۴-۰,۲۳	۹۰-۱۲۰	۲۴۰-۲۸۰	۴۶-۴۳

جدول شماره ۳- آنالیز شیمیایی سیمان (XRF نیمه کمی)

unit	درصد	unit	درصد
L.O.I	۰,۷	C3S	۴۹,۳۵
Cao	۶۲,۸	C2S	۲۲,۹۷
Sio <sub>2</sub>	۲۱	C3A	۷,۰۴
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴,۷	C4AF	۹,۷
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳,۲		
So <sub>3</sub>	۳,۷		
Mgo	۲,۹		

### ۳-۴-۱- چالش های بهینه سازی کیفیت سیمان:

اصلی ترین مشکل سیمان مصرفی عدم ثبات کیفیت و تغییرات در درصد C2S و C3S آن بود که باعث تغییرات زیاد در مقاومت های سنین اولیه و نهایی می گردید. همچنین این تغییرات کیفیت سیمان می توانست تأثیر منفی در خواص دوامی بتن نیز ایجاد نماید [3]. این تغییرات می تواند ناشی از به هم خوردن ترکیب مواد تشکیل دهنده کلینکر یا استفاده نامتعارف از پوزولان و هر نوع ناخالصی دیگر در سیمان و یا تغییر در میزان فرآیند پخت تولید سیمان باشد. در ابتدا شاهد تغییرات زیادی در مشخصات فنی سیمان های وارده به کارگاه بودیم. با انجام آنالیزهای شیمیایی و آزمایش های مختلف روی سیمان های ورودی و همچنین برگزاری جلسات با مسئولین کارخانه سیمان، از میزان این تغییرات تا حدودی کاسته شد. در اینجا لازم به ذکر است استفاده از سیمان کارخانه های دیگر به علت عدم اطمینان از ظرفیت تولید و ثبات آن، تغییر رنگ قطعات و همچنین بعد مسافت امکان پذیر نبود. از دیگر مشکلات مربوط به سیمان نوسانات بازار و نرسیدن به موقع سیمان به کارگاه ها می باشد که در یک پروژه بزرگ با مصرف سیمان بالا می تواند توقف تولید را به همراه داشته باشد. در ضمن در فصول گرم با تخلیه حجم بالای سیمان و مصرف سریع آن، با مشکل بالا بودن دمای سیمان و نهایتاً دمای بتن مواجه هستیم که باعث مشکلات زیادی در اجرای بتن می گردد و می تواند دمای بتن را آنقدر افزایش دهد که کارگاه را مجبور به توقف بتن ریزی و تولید نماید. به همین منظور راهکاری که در این پروژه مد نظر قرار گرفت، تأمین سیلوهای ذخیره یا واسطه به ظرفیت ۶۰۰۰ تن در محل کارخانه بود که این میزان ذخیره غیر از ۲۰۰۰ تن سیلوهای متصل به بچینگ در نظر گرفته شد. این کار چند حسن داشت و مهمترین آن اینکه به ما اجازه می داد که از یک پخت کارخانه سیمان به صورت یکجا و با حجم بالا در این سیلوها ذخیره نماییم و پس از انجام آزمایش های لازم و خنک شدن سیمان، آن را مصرف نماییم و در نتیجه با نوسانات کمتری در تولید مواجه شویم.

### ۳-۵- آب و چالش های تأمین و کنترل کیفیت آن:

به دلیل حجم بالای آب مورد نیاز برای تولید بتن امکان استفاده از آب شرب وجود نداشت و باید آب شیرین با تانکر جهت استفاده به کارخانه منتقل و در مخازن از پیش تهیه شده ذخیره می‌گردید. در موقعیت تلمبه خانه مرکزی یک سیستم تصفیه آب (RO) و یک سیستم گرمایشی تأمین گردید تا در صورت نیاز با ترکیب آب به صورت درصدی آب تصفیه شده و درصدی آب معمول، ذرات جامد معلق آب در حد قابل قبول نگه داشته شود و همچنین در فصول سرد به کمک سیستم گرمایشی و با تنظیم دمای آب می‌توان دمای بتن تازه را افزایش داد و در دمای قابل قبولی برای استمرار بتن ریزی در طول شبانه‌روز نگه‌داشت.

### ۴- طرح اختلاط :

همانطور که می‌دانیم هدف از طرح اختلاط بتن تعیین کارآمدترین و اقتصادی ترین مخلوط بتنی که ویژگی هایی مانند کارایی و مقاومت و دوام و... را در شرایط مورد نظر برآورده سازد. در همین راستا به طور معمول، در اکثر پروژه هایی که از بتن خود تراکم استفاده میکنند، نکاتی از قبیل استفاده از ماده‌ی پودری به عنوان لزجت دهنده یا استفاده از مواد فوق روان کننده، استفاده از مصالح سه جزئی ( دو جزء شن و یک جزء ماسه) و... در طرح اختلاط رایج و مشترک است.

بعد از انجام آزمایش های تعیین مشخصات مصالح و با در دست داشتن رده بتن مورد نظر طراح (C45)، فرضیه‌های زیر برای دست‌یابی به مخلوط نهایی مورد استفاده برای ساخت قطعات پیش ساخته پروژه بزرگراه طبقاتی شهید صدر در نظر گرفته شد.

۱- کاهش نسبت آب به سیمان به مقادیر کمتر از ۰,۴ ( بدلیل تأمین مقاومت فشاری مورد نیاز و بهبود پارامترهای مرتبط با دوام مانند نفوذ پذیری )

۲- به‌کارگیری پودر سنگ آهک به عنوان ماده لزجت دهنده به‌دلیل تاثیر مثبت بر خواص بتن تازه و با لحاظ کردن جنبه اقتصادی آن و عدم استفاده از افزودنی لزجت دهنده (VMA) به دلیل عدم تولید این محصول در کشور، قیمت بالا این ماده و عدم شناخت دقیق تاثیرات آن بر دوام بتن سخت شده در دراز مدت.

۳- کاهش حداکثری عیار سیمان پرتلند مصرفی با توجه به مسائل فنی، اقتصادی و زیست محیطی و همچنین بهبود جمع شدگی و کاهش ترک‌های خمیری با توجه به ماهیت پیش‌تنیده بودن قطعات.

۴- حفظ اسلامپ بتن برای حداقل ۴۵ دقیقه تا بتواند شرایط اجرا را برآورده سازد.

۵- استفاده از بتن با بیشترین ظرفیت برای بالا بردن آستانه جاداشدگی و کاهش مشکلات اجرایی انتقال بتن با توجه به استفاده از پمپ دکل در بتن ریزی‌ها.

۶- کسب مقاومت اولیه بالا و یا به عبارت بهتر کسب مقاومت فشاری لازم جهت بازکردن قالب تحت کوتاهترین چرخه عمل‌آوری با بخار

۷- با توجه به نوع قطعات و تفاوت در تراکم آرماتور بندی آن‌ها، دو طرح اختلاط با تفاوت در حداکثر اندازه سنگدانه باید مورد بررسی قرار می‌گرفت.

بعد از انجام بالغ بر ۳۰۰ طرح اختلاط و تغییرات مکرر درصدهای مصالح مصرفی در چارچوب فرضیه‌های ذکر شده برای رسیدن به بتن مناسب، طرح اختلاط‌های بهینه بدست آمد که مشخصات آن در جدول شماره ۴ درج گردیده است.

جدول شماره ۴ - طرح اختلاط بتن

مواد سازنده	طرح ۱	طرح ۲
سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	۴۰۰	۴۱۰
ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	۹۵۵	۹۴۰
شن نخودی (kg/m <sup>3</sup> )	۳۵۴	۷۰۰
شن بادامی (kg/m <sup>3</sup> )	۳۵۴	۰
w/c	۰,۳۹	۰,۳۸
پودر سنگ (kg/m <sup>3</sup> )	۱۰۶	۱۱۶

طرح اختلاط ۱ با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ میلیمتر در قطعات با تراکم آرماتور کمتر مانند قطعات سگمنتال "استاندارد"، "دویتور" و "لوکیتور" و از طرح اختلاط ۲ با حداکثر اندازه مصالح سنگی ۱۲ میلیمتر در قطعات با تراکم آرماتور بالا مثل "تیرهای دروازه ای" واقع در محور پروژه، قطعات سگمنتال "سرستون" و "پیر" استفاده می‌گردد.

#### ۵- تولید بتن و اجرا :

در کارخانه تولید قطعات پیش ساخته پروژه شهید صدر بالغ بر ۱۰۰،۰۰۰ متر مکعب بتن خود تراکم تولید و اجرا گردیده است. با توجه به سرعت پروژه میانگین تولید روزانه ۵۰۰ مترمکعب می باشد. همچنین در بعضی بازه های زمانی تولید بسیار فراتر از این مقدار رفت که به عنوان مثال رکورد تولید ۱۰۰۰ متر بتن خودتراکم در ۲۴ ساعت در کارخانه تولید ثبت گردیده است.

#### ۵-۱- تجهیزات و ماشین آلات تولید، جابه جایی و انتقال بتن خودتراکم :

با استفاده از دو دستگاه بچینگ یک متری خودکار با تمام تجهیزات مستقل برای دستیابی به تولید بالا و همچنین اطمینان از عدم توقف بتن ریزی به علت خرابی احتمالی یک دستگاه بچینگ، تجهیز انجام گرفت. هر بچینگ به چهار سیلوی ۲۵۰ تنی سیمان متصل بوده و دارای دیوی مصالح سنگی حجیمی می باشد. دستگاه لجن ساز به طور مستقل به همراه سیلوی ۲۵۰ تنی ذخیره پودرسنگ و دو مخزن ذخیره لجن آماده برای هر بچینگ و در نزدیک ترین نقطه به آن جانمایی و تجهیز گردید. نکته قابل توجه در تولید بتن خودتراکم لزوم افزایش زمان اختلاط بتن در بچینگ است که بازده دستگاه را کمی کاهش داده و استهلاک بیشتر دستگاهها را به همراه خواهد داشت. برای جابه جایی بتن خودتراکم توسط تراک میکسر نمی توانیم از حداکثر ظرفیت تراک استفاده نماییم و باید با توجه به روانی بالا و تراز ایستادن آن در داخل دیگ تراک کمتر از بتن معمول بارگیری گردد که این موضوع مستلزم افزایش تعداد ماشین آلات خواهد شد. با توجه به آزمایش های میدانی انجام شده برای انتقال بتن، بهترین گزینه پمپ دکل از سری S شکل می باشد که توانایی پمپ این نوع بتن را بدون جداشدگی در بتن و گرفتگی لوله ها را دارد. محاسبه تعداد بهینه ماشین آلات مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر بهره‌وری در این پروژه خود از مطالب ارزشمند و قابل توجه می باشد.

#### ۵-۲- حجم بتن قطعات سگمنت سرستون و عرشه:

سرستون ها از ۷ قطعه سگمنتال با حجم بتن ۱۴۷ مترمکعب تشکیل شده است که به دلیل تراکم بسیار زیاد آرماتور از طرح اختلاط شماره دو که دارای حداکثر سائز سنگدانه ۹٫۵ میلیمتر است استفاده شده است. مجموع وزن سبب آرماتورها حدود ۴۶ تن می باشد که در شکل شماره ۲ یک مجموعه سرستون نصب شده در محور پروژه نمایش داده شده است.

شکل ۲- قطعات سگمنتال سرستون نصب شده در محور پروژه



عرشه اصلی پل از چهار نوع قطعه بنام قطعات استاندارد، دویتور، لوکیتور و پیر تشکیل شده است. بیشترین تعداد قطعات سگمنت پیش ساخته با فراوانی ۶۷٪ به قطعات استاندارد مربوط می گردد. این قطعه دارای سبب آرماتوری به وزن ۳٫۵ تن و با حجم بتن ۱۹ مترمکعب می باشد که وزن نهایی قطعه حدود ۴۵ تن می باشد (شکل ۳ بالا سمت راست). قطعه سگمنت دویتور که در یک چهارم دهانه واقع می گردد با فراوانی ۱۳٪ دارای سبب آرماتوری به وزن ۷٫۵ تن و با حجم بتن ۲۶ مترمکعب می باشد که وزن نهایی قطعه تولید شده حدود ۶۵ تن می باشد (شکل ۳ بالا سمت چپ)



کمترین تعداد قطعات سگمنت مربوط به لوکیتور واقع در وسط دهانه با فراوانی ۰.۷٪ و دارای سبب آرماتوری به وزن ۵.۶ تن و همچنین دارای حجم بتن ۲۳ مترمکعب می‌باشد. وزن نهایی قطعه حدود ۵۷ تن است (شکل ۳ پایین سمت راست). سنگینترین و پیچیده‌ترین قطعه سگمنت مربوط به ابتدا و انتهای دهانه می‌باشد که ۱۳٪ فراوانی داشته و سبب آرماتور بسیار متراکم با وزنی در حدود ۱۰.۵ تن دارد. حجم بتن آن ۲۷ مترمکعب و وزن نهایی قطعه حدود ۷۵ تن است. به دلیل فواصل بسیار کم آرماتورها برای تولید این قطعه از طرح اختلاط شماره دو که دارای حداکثر سایز سنگدانه ۹.۵ میلیمتر است استفاده شده است (شکل ۳ پایین سمت چپ).

شکل ۳- قطعات سگمنت تولید شده برای عرشه اصلی پروژه بزرگراه طبقاتی شهید صدر



#### ۶- کنترل کیفیت بتن خودتراکم تازه:

##### ۶-۱- دلایل کنترل کیفیت بتن:

با توجه به حساسیت بالای بتن خودتراکم نسبت به تغییرات مصالح (تغییر دانه بندی، مدول نرمی مصالح، نرمی سیمان، نرمی پودر سنگ، و...) که خود باعث تغییر در خواص بتن تازه و بتن سخت شده می‌شود، نیاز به کنترل هرچه بیشتر عوامل موثر را پررنگ‌تر می‌نماید. به عنوان مثال تغییر دانه‌بندی مصالح و مدول نرمی آن باعث تغییر در جریان پخش شدگی و لزجت بتن می‌گردد. همچنین خطا در میزان رطوبت مصالح سنگی نیز باعث می‌شود که یا روانی بتن کمتر از حد مورد نظر شود و یا باعث آوردن شدن بتن گردد. از موارد مهم در بتن خودتراکم نسبت آب به سیمان است زیرا علاوه بر تاثیر مستقیم بر مقاومت فشاری تاثیر به‌سزایی در مشخصات و لزجت بتن تازه دارد بدین منظور لازم است همواره قبل از شروع ساخت بتن با کنترل درصد رطوبت مصالح، اصلاح وزنی مصالح انجام شده و نتیجه اولین تولید با حساسیت بیشتری کنترل می‌گردد. برای جلوگیری از این موارد حضور کارشناسان واحد بتن در هنگام تولید در بچینگ ضروری می‌باشد.

حساسیت بتن خودتراکم نسبت به تغییرات دمای هوا و گذشت زمان زیاد است و باعث تغییر در خواص رئولوژی بتن می‌گردد. با گرم شدن هوا و متعاقباً افزایش دمای بتن که باعث افت در کارایی بتن می‌گردد تمهیداتی را برای رفع این مسئله را طلب می‌نماید. می‌توان برای رفع این مشکل آب مصرفی بچینگ را تا حد امکان سرد نمود. همچنین زمان تولید بتن تا پر نمودن قالب نباید زیاد به طول

بیانجامد زیرا افزایش زمان باعث شروع زمان گیرش سیمان و افت کارایی بتن می‌گردد که در بتن خودتراکم به خاطر پایین بودن نسبت آب به سیمان و مصرف زیاد تر افزودنی سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

## ۶-۲- روش های کنترل کیفیت بتن خودتراکم :

### ۶-۲-۱ کنترل حین ساخت بتن:

برای کنترل طرح اختلاط مصوب در بچینگ لازم است بچینگ به صورت دوره ای کالیبره گردد تا از خطا در توزین مصالح جلوگیری به عمل آید. همچنین کنترل دائم بتن تولیدی در بچینگ توسط کارشناسان امر می‌تواند گام مهمی در کنترل صحیح طرح اختلاط مصوب باشد. بدین منظور تغییرات احتمالی در طرح اختلاط با توجه به رطوبت موجود سنگدانه‌ها بصورت روزانه و در هر شیفت توسط کارشناسان واحد بتن انجام و طرح اختلاط پس از اصلاح رطوبت به صورت مکتوب به اپراتور بچینگ تحویل داده می‌شود.

### ۶-۲-۲ کنترل خواص بتن تازه تولیدی :

با توجه به چک لیست مورد استفاده در پروژه تمامی تراک میکسر های حامل بتن خودتراکم دقیقی پس از تولید به قسمت آزمایشگاه وارد شده و آزمایش جریان پخش شدگی (اسلامپ فلو)، ثبت T50 و دمای بتن انجام می‌پذیرد. در صورت نیاز نسبت به اصلاح آن اقدام شده و بتن پس از اصلاح، دوباره مورد آزمایش قرار می‌گیرد و مشخصات مجدداً ثبت می‌گردد. در صورت تطابق با محدوده مجاز تعریف شده در چک لیست ها، بتن برای استفاده در قالب ها ارسال می‌گردد.

به صورت تصادفی و در صورت مشاهده تغییری در شکل ظاهری بتن‌های تولیدی دیگر آزمایش های مرسوم بتن خودتراکم از جمله آزمایش های U BOX ، L BOX ، V FUNNEL و درصد هوای بتن نیز انجام می‌شود.

محدوده مجاز برای پذیرش بتن خودتراکم با توجه به نوع کاربرد آن در این کارخانه به شرح ذیل می‌باشد.  
جریان پخش شدگی: ۶۷ تا ۷۰ سانتی متر ، T50 : ۲ تا ۳ ثانیه ، V FUNNEL : ۶ تا ۱۰ ثانیه ، U BOX : ۳ تا ۳ سانتی متر و همچنین L BOX : H2-H1=0 در نظر گرفته شد. ضمناً کنترل چشمی بتن خودتراکم نیز دارای اهمیت می‌باشد که با در اختیار داشتن پرسنل مجرب و با سابقه کمک شایانی به موضوع کنترل کیفیت بتن تازه می‌گردد.

### ۶-۲-۳ کنترل مقاومت فشاری بتن خود تراکم:

جهت کنترل مقاومت فشاری بتن تولید شده از هر تراک میکسر پس از تایید خواص بتن تازه در محل آزمایشگاه ۶ نمونه مکعبی ۱۰\*۱۰\*۱۰ گرفته شده و در سنین ۱، ۳، ۷، ۲۸، و ۹۰ روزه ارزیابی می‌گردد. به دلیل اهمیت مقاومت اولیه بتن در کارخانه های تولید قطعات پیش ساخته نمونه هایی با سن یک روزه مورد آزمایش قرار گرفت تا یک دید سریع و اولیه در مورد بتن ها در اختیار باشد. همچنین برای کنترل هر چه بیشتر بتن های تولیدی از نظر مقاومت فشاری سن ۳ روزه ملاک خوبی برای اشراف به وضعیت مقاومتی بتن می باشد. در صورت بروز هر مشکلی در فرایند تولید حداکثر ظرف ۳ روز می توان مطلع شد و در کوتاهترین زمان موضوع را بررسی کرد. سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز نیز به عنوان روال کارگاهی است که با توجه به اهمیت سن ۲۸ روز ، دو نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول شماره ۵ نتایج مقاومت فشاری در سنین مختلف قابل مشاهده می‌باشد.

جدول شماره ۶- نتایج مقاومت فشاری

نام آزمایش	سنین آزمایش(روز)	میانگین نتایج(MPa)
مقاومت فشاری	۱	۱۵
	۳	۳۲
	۷	۴۳
	۲۸	۵۵
	۹۰	>۶۰

### ۶-۲-۴- کنترل دوام بتن خودتراکم:

در این پروژه شهری برای اولین بار به طور گسترده موضوع بررسی و کنترل دوام در بتن‌های تولیدی در دستور کار قرار گرفت. با توجه به اهمیت این موضوع در تولید ماهانه بتن چندین بار به طور تصادفی از بتن اجرایی کارگاه آزمون‌های دوامی مختلفی اخذ و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

با در اختیار داشتن دو دستگاه شبیه ساز محیطی هوشمند در آزمایشگاه کارخانه (شکل شماره ۴)، محیط‌های دمایی و رطوبتی مختلفی از جمله فصول گرم و سرد و چرخه‌های عمل‌آوری با بخار بر روی نمونه‌های اجرایی اعمال و تاثیر آن نیز بر دوام بتن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. این دستگاه قابلیت کنترل دما از منهای ۲۰ درجه تا مثبت ۱۲۰ درجه و همچنین کنترل رطوبت از ۳۰ الی ۱۰۰ درصد را دارد. به کمک این دستگاه بطور خودکار چرخه‌های ذوب و یخ‌بندان متوالی بتن قابل اجراست که در این پروژه خوردگی سطحی بتن در طی ۵۰ چرخه و بر اساس استاندارد ASTM C 672 برای انواع بتن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

شکل ۴- دستگاه‌های شبیه ساز محیطی هوشمند موجود در آزمایشگاه بتن پروژه بزرگراه طبقاتی شهید صدر



در این پروژه با همکاری مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر، آزمایش‌های دوامی متعددی برای بررسی دوام بتن خودتراکم تولیدی انجام پذیرفت.

آزمایش‌های دوام مانند مقاومت الکتریکی سطحی (FM-578)، آزمایش نفوذ آب (BF EN 12390-8)، آزمایش جذب آب نیم ساعته (BS 1881-122)، آزمایش جذب آب (ASTM C642)، آزمایش جذب آب مویینه، آزمایش (RCMT) یا مهاجرت تسریع شده یون کلراید (NT-BUILD 492) و مقاومت سطحی بتن در برابر چرخه ذوب و یخ‌بندان (ASTM C672) که مختصراً میانگین برخی آزمایش‌های انجام شده در سنین مختلف به شرح ذیل ارایه می‌گردد.

موضوعات تحقیقاتی مختلفی نیز مانند اثر کربناسیون و یون کلراید بطور همزمان بر بتن‌های خودتراکم پروژه، بوسیله دستگاهی که در پروژه ساخته شده است مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت تا موضوع کربناسیون که در پروژه‌های شهری می‌تواند غالب باشد ارزیابی گردد.

جدول ۸- نتایج آزمایش جذب آب مویینه

نام آزمایش	سن (روز)	ضریب جذب مویینه [E <sup>3</sup> -3] (mm/s <sup>1/2</sup> )	
		۲۸ روزه	۹۰ روزه
جذب آب مویینه	۳ ساعته	۱,۶۷	۱,۴۵
	۶ ساعته	۱,۲۲	۱,۱۲
	۲۴ ساعته	۰,۶۳	۰,۵۹
	۴۸ ساعته	۰,۴۶	۰,۴۳
	۷۲ ساعته	۰,۳۸	۰,۳۵

جدول ۷- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

نام آزمایش	سنین آزمایش روز	میانگین نتایج	
		روز	(kΩ*cm)
مقاومت الکتریکی	۱	۴,۵	
	۳	۷	
	۷	۸,۵	
	۲۸	۱۵	
	۹۰	۱۸	

جدول شماره ۱۰- نتایج آزمایش نفوذ آب

نام آزمایش	سنین آزمایش (روز)	میانگین نتایج (mm)
نفوذ آب	۲۸	<۱۰
	۹۰	<۷

جدول شماره ۹- نتایج آزمایش RCMT

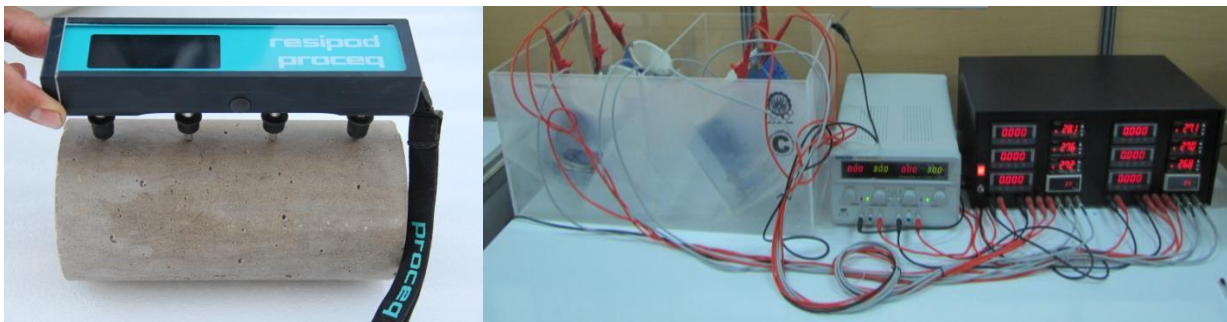
نام آزمایش	سنین آزمایش (روز)	میانگین نتایج m <sup>2</sup> /s*[E <sup>-12</sup> ]
ضریب مهاجرت	۲۸	۱,۲
یون کلراید	۹۰	۱

جدول ۱۱- نتایج آزمایش جذب آب حجمی نیم ساعته

نام آزمایش	سن آزمایش (روز)	میانگین نتایج (%)
جذب آب حجمی	۲۸	۱,۳
نیم ساعته	۹۰	۱

در شکل شماره ۵ تصاویر مربوط به دستگاه آزمایش‌های مهاجرت تسریع شده یون کلراید و مقاومت الکتریکی سطحی و در شکل شماره ۶ دستگاه نفوذ آب با ظرفیت ۱۲ آزمون بطور همزمان را مشاهده می‌نمایید.

شکل ۵- دستگاه‌های مربوط به آزمایش‌های مهاجرت تسریع شده یون کلراید (RCMT) و مقاومت الکتریکی سطحی



شکل ۶- دستگاه آزمایش نفوذ آب با ظرفیت ۱۲ آزمون



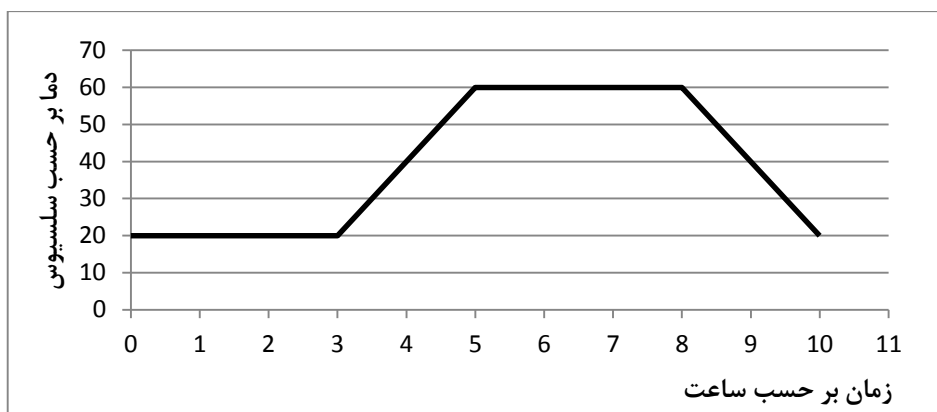
## ۷- عمل آوری بتن با بخار :

به منظور افزایش بهره‌وری و محدودیت تعداد قالب های تولید قطعات بتنی در کارخانه های پیش ساخته لازم است با کسب هر چه سریعتر مقاومت اولیه ، برای بازکردن قالب ها اقدام گردد تا قالب برای تولید بعدی مهیا شود. ناگزیر عمل آوری بتن با بخار باید مورد استفاده قرار گیرد. حال چندین سوال وجود دارد که باید به آن ها پاسخ داده شود.

- (۱) کوتاهترین زمان ممکن برای دستیابی به مقاومت مورد نظر طراح برای باز کردن قالب چقدر است؟
- (۲) از چه دمای حداکثری استفاده کنیم و چند ساعت بعد از اتمام بتن ریزی باید عمل آوری با بخار را آغاز کرد؟
- (۳) آیا این عمل آوری بتن با بخار بر دوام آن تاثیری دارد؟

برای پاسخ به سوالات فوق و روشن شدن دیگر زوایای این موضوع مجموعه آزمایش هایی در ۳۶ حالت مختلف عمل آوری بتن با بخار تعریف گردید و چرخه بهینه از منظر مقاومت فشاری بلافاصله بعد از بخار، دوام بتن، حداقل زمان و صرف حداقل انرژی برای طرح اختلاط پروژه به صورت زیر بدست آمد که در نمودار شماره ۲ نمایش داده شده است. اطلاعات کامل در خصوص چرخه های انجام شده و نتایج آن ها در یک مقاله جداگانه ارایه شده است [۴].

### نمودار شماره ۲- چرخه عمل آوری بتن با بخار در فشار متعارف



## ۸- حفاظت از سطوح بتنی :

با انجام آزمایش های مختلف بر روی مواد آب بند کننده و محافظ سطحی بتن و با توجه به خواسته هایی از قبیل آب گریزی سطوح، عدم تغییر رنگ سطوح و ممانعت از ورود عوامل مهاجم به سطوح بتنی ماده ای بر پایه سیلان سیل اکسید انتخاب گردید. برای انتخاب این ماده آزمایش های متعددی از جمله نفوذ رایلم و جذب آب حجمی انجام گردید. ماده مورد استفاده بر پایه فناوری نانو بوده و قابلیت آب گریزی سطوح زیرین در سطح مولوکولی را داشته و دارای ماندگاری بالا نیز می باشد. از جمله مزیت های این ماده جلوگیری از شوره زدگی ، پوسته شدن ، قارچ ها و کپک ها و کثیف شدگی زود هنگام می باشد. این ماده با نسبت ترکیبی ۱ قسمت ماده با ۱۰ قسمت آب به صورت اسپری بر روی سطوح بتنی استفاده گردید.

قبل از استفاده از این مواد سطح کلیه قطعات با استفاده از ماسه پاشی (SAND BLAST) نظافت و لایه برداری می گردد. مزیت این کار بر داشتن شیرابه های به جا مانده و نظافت روغن قالب از روی سطوح بتنی می باشد و عمق نفوذ این مواد را نیز افزایش می دهد. با توجه به اهمیت زیباسازی در فضای شهری استفاده از این فناوری باعث شد که قطعات نصب شده در محور پروژه پس از وقوع چندین بارندگی بدون کوچکترین تغییر در شکل ظاهری و بدون افتادن خط های آب بر روی دیوار قطعات نمای خوبی را در شهر داشته باشد.

شکل ۷- ماسه پاشی و نظافت قطعات (سمت راست) و اسپری مواد محافظ نمای بتن (سمت چپ)



## ۹- مقاومت فشاری و انحراف معیار پروژه:

اعداد ارایه شده در جدول ذیل میانگین نتایج مقاومت فشاری کارگاهی برای حدود ۰۰۰،۱۰۰ متر مکعب بتن و بیش از ۰۰۰،۱۵ سری آزمون مقاومت فشاری است که با لحاظ کردن تمامی آزمون‌ها نتایج به شرح ذیل می‌باشد:

### جدول شماره ۱۲ - تعداد نمونه ها ، میانگین مقاومت و انحراف معیار

سن آزمون	میانگین مقاومت (MPa)	انحراف معیار (MPa)	درصد رشد مقاومت نسبت به مقاومت ۹۰ روزه
۱ روزه	۱۱	۴	٪۱۸
۳ روزه	۳۳	۶	٪۵۳
۷ روزه	۴۶	۵	٪۷۴
۲۸ روزه	۵۷	۵	٪۹۲
۹۰ روزه	۶۲	۶	٪۱۰۰

بر اساس گزارش ACI 214-02 و جدول‌های ارایه شده جهت تعیین رده کنترل کیفیت در کارگاه‌ها و با توجه به نتایج ارایه شده در جدول فوق تولید بتن خودتراکم در این پروژه از نظر رده بندی کنترل کیفیت در رده "بسیار خوب" واقع می‌گردد که با توجه به اینکه این دسته بندی برای بتن‌های معمولی و با مقاومت فشاری بالاتر از ۳۴،۵ MPa بوده و در این پروژه بتن خودتراکم را مورد مقایسه قرار داده‌ایم و با لحاظ نمودن نوسان زیاد بتن خودتراکم نشان دهنده بالا بودن کنترل کیفیت بتن خودتراکم در این پروژه ملی است.

## ۱۰- نتیجه گیری :

- ۱) برای تولید بتن خودتراکم نیازمند نظارت و کنترل کیفیت بالایی در بخش مصالح مصرفی هستیم.
- ۲) تجهیزات ساخت، حمل، انتقال و نهایتاً قالب‌ها باید متناسب با بتن خودتراکم طراحی و استفاده گرد که برخی تجهیزات مورد نیاز برای تولید این بتن، توسط مجموعه طراحی و ساخته شد.
- ۳) موضوع بسیار مهم در تولید بتن خودتراکم آموزش پرسنل در سطوح مختلف کنترل و بازدید قسمت‌های مرتبط با این امر بصورت دائمی می‌باشد. کوچکترین خطا در توزین و یا پیمانانه کردن مصالح می‌تواند تغییرات زیادی در این بتن ایجاد نماید.
- ۴) تجهیز و بکارگیری از یک مجموعه آزمایشگاه مجهز و پویا در کنار تولید امری لازم و ضروری است.
- ۵) در بتن خودتراکم کنترل کیفیت بتن تازه تولید شده باید بدون استثنا بر روی تمام تراک میکسرهای تولیدی انجام گردد.
- ۶) پژوهش و تحقیقات در حاشیه پروژه به بهبود کیفیت و اشراف بهتر موضوعات مختلف تولید، کمک شایانی خواهد کرد.

## ۱۱- تشکر و قدردانی

نویسندگان در اینجا بر خود لازم می‌دانند از زحمات و همکاری‌های بی‌دریغ مدیر عامل محترم گروه تخصصی شهید رجایی جناب آقای مهندس عباس اکبری، مدیر محترم پروژه بزرگراه طبقاتی شهید صدر آقای مهندس فضل الله نیکمرام و ریاست محترم مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر جناب آقای دکتر علی اکبر رضانیپور کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

## ۱۲- منابع

- [1] رضانیپور، ع.، فراز، س.، رئیس الواعظین، م.، وفا، ج. "کاربرد بتن خودتراکم در برج نمادین میلاد"، دومین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ۱۳۸۸.
- [2] Nagataki, S., Kawai, T., Fujiwara, H., "State of the Art Report on SCC in Japan", 6th International RILEM Symposium on self Compacting Concrete, Montreal, Canada, 2010.
- [3] رضانیپور، ع.، کاظمیان، ع. "مروری بر جایگاه مواد جایگزین سیمان بر دوام بتن خودتراکم"، چهارمین سمینار ملی بتن خودتراکم ایران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، اسفند ۱۳۹۱
- [4] A.A. Ramezaniapour; M.H. Khazali and P. Vosoughi (2013) "Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete" Construction and Building Materials, Volume 49, December 2013, Pages 807–813.