

طرح مخلوط و عمل آوری حرارتی پوشش تونل مکانیزه خط ۶ تهران

همایون ارومچی^۱، محمد مجلل^۲

۱- کارشناس ارشد سازه شرکت آهاب

۲- دانشجوی دکتری دانشکده فنی دانشگاه تهران

عمل آوری بتن یکی از مهمترین فعالیتهای بتن در دستیابی بتن به مقاومت طراحی خود است. برای آنکه بتن با بهترین کیفیت تولید و در مدت زمان کوتاهی به مقاومت اولیه طراحی رسد، نیاز به آن است که فرایند عمل آوری با روش مناسب و در شرایط محیطی مناسب انجام شود. این حقیقت در ساخت تونل به روش مکانیزه، به دلیل نقش تعیین کننده سگمنت های بتنی پیش ساخته، از اهمیت حیاتی برخوردار است. در این مقاله برای تونل در دست ساخت خط ۶ مترو تهران به طول ۱۰/۵ کیلومتر و قطر حفاری ۹/۱۶ متر که ۷/۵ کیلومتر آن به طور کامل ساخته شده، آزمایشهای لازم برای انتخاب دما مناسب برای عمل آوری حرارتی (بدون بخار) و گام های لازم برای انتخاب طرح مخلوط مناسب برای سگمنت های بتنی در آزمایشگاه کنترل کیفیت احداث شده در پروژه، ارائه گردیده است. در این تحقیق، کیفیت قطعات بتنی پیش ساخته برای پوشش تونل، به عنوان جزء مهمی از ساخت تونل، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، عمل آوری حرارتی (بدون بخار) قطعات (سگمنت) بتنی به جهت افزایش نرخ تولید آن توضیح داده شده است. مطابق با نتایج بدست آمده، میانگین مقاومت فشاری ۱۰ ساعته بتن با مصرف ۰/۶ درصد وزن سیمان، مواد افزودنی، بیش از ۱۲ MPa تا ۱۵ MPa گردیده است. این میزان مقاومت، نیاز های طرح برای خروج قطعات بتنی از قالب در بازه زمانی ۱۰ ساعته را فراهم می آورد.

کلمات کلیدی: عمل آوری حرارتی، قطعات پیش ساخته بتنی، طرح مخلوط، خط ۶ مترو تهران

۱- مقدمه

به عنوان اصلی رایج در تونلسازی با دستگاه حفار مکانیزه^۱، تعداد زیادی از قطعات پیش ساخته بتنی، برای کاهش ریسک کمبود سگمنت به دلیل محدود بودن تعداد قالب ها و فضای کارخانه تولید، در محوطه کارگاه دپو می گردد. به طور متوسط در جریان کار شبانه روزی TBM بسته به شرایط زمین و وضعیت دستگاه، تعداد قابل توجهی سگمنت پیش ساخته بتنی مورد استفاده قرار می گیرد. فراهم نمودن قالب های بتنی و فضا و امکانات لازم برای این میزان تولید روزانه، نیازمند سرمایه گذاری هنگفت است. به دلیل آنکه بتن تازه برای رسیدن به مقاومت اولیه به منظور خروج از قالب های فلزی و انتقال به دپو موقت نیاز به زمان مناسب دارند، برای کاهش این زمان، لازم است روش های موثر عمل آوری بتن در پروژه در نظر گرفته شود. عمل آوری بخار به روش ثابت^۲ یا مدولار^۳ بیشترین روش های تجربه شده در پروژه های مختلف تونل سازی هستند.

افزایش دمای عمل آوری بتن منجر به تسریع فرایند شیمیایی هیدراسیون می شود. Verbeck and Helmuth (۱) دریافتند که روند سریع هیدراسیون اولیه در دما های زیاد باعث کند شدن فرایند هیدراسیون در ادامه گردیده و منجر به پخش غیر یکنواخت محصولات هیدراسیون در داخل خمیر سیمان می شود. بنابراین، این توزیع غیر یکنواخت محصولات هیدراسیون، به خودی خود به طور نامطلوبی بر مقاومت اثر خواهد گذاشت (۱۱).

با قرار گرفتن بتن در معرض حرارت زیاد^۴، هیدراسیون تسریع و توزیع مواد ناشی از هیدراسیون به صورت غیر یکنواخت صورت می پذیرد (۳و۲). این پدیده سبب تخلخل بالا گردیده و منجر به کسب مقاومت بالا در سنین پایین و کاهش مقاومت در سنین بالا می شود (۵و۴). حضور مواد معدنی افزودنی پوزولانی طبیعی، خاکستر بادی و یا روباره سیمان می تواند باعث اصلاح فعالیت هیدراسیون، کاهش روند افزایشی حرارت و تولید کلسیم-سیلیکات-هیدرات (CSH) اضافی نماید (۶). در دمای افزایشی، این مواد، در هیدراسیون سیمان تاثیر گذاشته و باعث کاهش بینظمی های بوجود آمده ناشی از افزایش دما می گردند. Videla و همکاران (۷) رفتار سیمان پرتلند و خمیر سیمان را تحت دما های مختلف عمل آوری مورد مطالعه قرار داده (۵، ۲۰ و ۳۰ درجه سانتیگراد) و مشاهده کردند که مقاومت مخلوط سیمان با افزایش دما افزایش می یابد.

فراهم کردن قالب ها و سایر تجهیزات مرتبط مانند جرتقیل های دروازه ای، هوای فشرده، فضای مسقف، دپوی موقت و دپوی دائم بر اساس نرخ پیشروی دستگاه حفار مکانیزه صورت پذیرفته و بلا استفاده ماندن بخشی از این تجهیزات در یک روز کاری علاوه بر تحمیل هزینه های تعمیر و نگهداری و صرف هزینه های گزاف در تهیه قالب ها و تجهیزات، به مفهوم یک سرمایه گذاری غیر ضروری در پروژه است. در این مقاله به منظور استفاده بهینه از تجهیزات و سرمایه گذاری های انجام شده و بهره وری در تولید قطعات پیش ساخته بتنی، برای دو نوبت کاری پیوسته، ترکیب فرایند های مختلف مانند عمل آوری بتن با استفاده از حرارت، کاهش مقدار سیمان در طرح مخلوط و همچنین اضافه نمودن مواد افزودنی مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه، طرح مخلوط قطعات بتنی پیش ساخته به عنوان جزء بزرگی از عملیات ساخت تونل و پیاده سازی فرایند عمل آوری حرارتی سگمنت های بتنی و تاثیر آن بر مقاومت بتن در سنین پایین و در مدت زمان ۲۸ روزه مطالعه شده است.

۲- خصوصیات ژئوتکنیکی پروژه

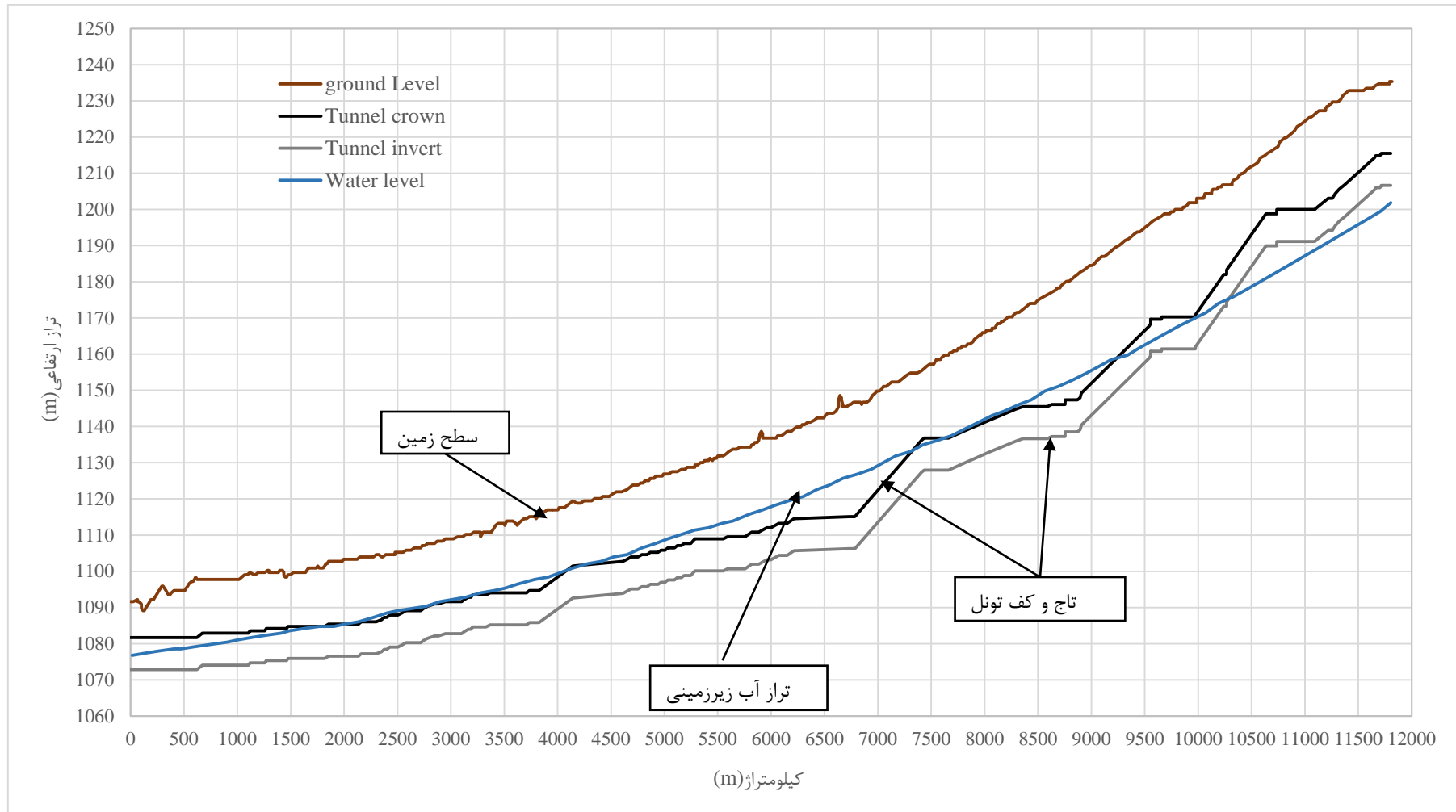
شهر تهران بر روی نهشته های آبرفتی دوران چهارم بنا شده است. ریین (۸) نهشته های آبرفتی تهران را به چهار بخش سازند های A, B, C, D تقسیم کرد. سازند A قدیمی ترین و سازند D جدیدترین سازند محسوب می شود. سازند A به ضخامت حدود ۱۲۰۰ متر و به طور موضعی دارای لایه ها و عدسی های رس و ماسه بوده و عموماً به شکل تپه ها با دره های عمیق است. سازند B، کنگلومرای سخت نشده و ناهمگن شامل قلوه سنگ، شن، ریگ و گاهای قطعات درشت دانه تا چند متر است. سازند C (سازند تهران) آبرفت های مخروط افکنه ای شامل قلوه سنگ، ریگ و شن است. ضخامت این سازند تا ۶۰ متر گزارش شده است. خصوصیات

¹ TBM

² stationary or static steam curing

³ Carousel

⁴ elevated temperature



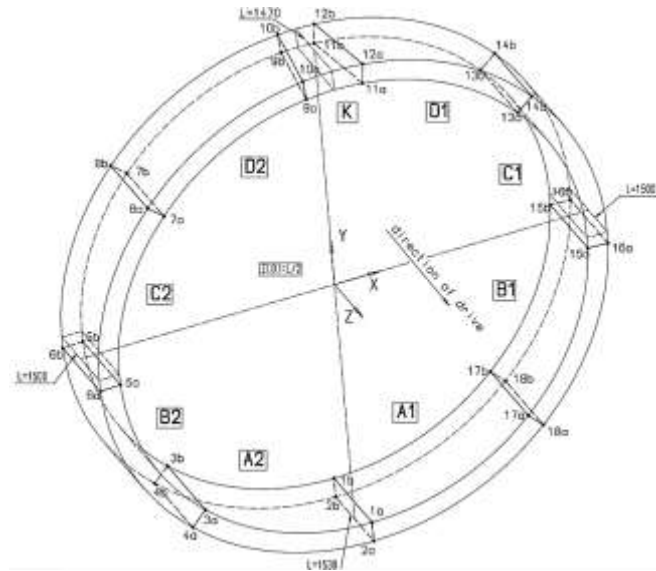
شکل ۱- پروفیل طولی خط ۶ مترو تهران

سیمانی بودن سازند C از A کمتر است. سازند D جوان ترین سازند تهران بوده که شامل محدوده متنوعی از دانه بندی از رس تا قلوه سنگ است.

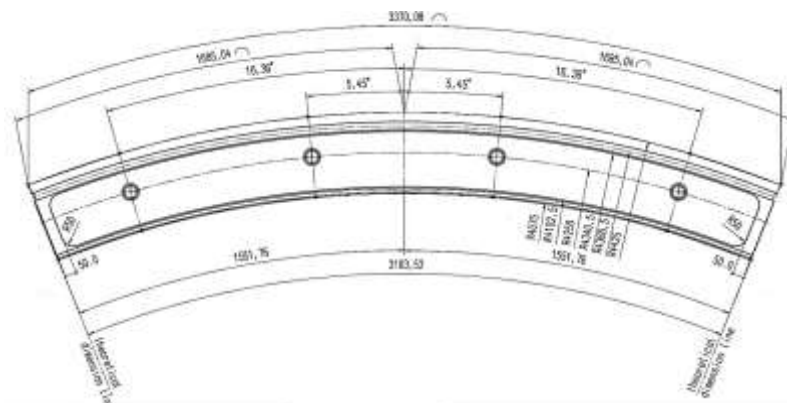
پروژه حاضر در جنوب شرقی تهران (سازند C) قرار گرفته است. در حدود ۳۵۰۰ متر ابتدای تونل خاک های ریز دانه رسی با طبقه بندی CL و CL-ML غالب هستند که البته میان لایه ها و عدسی هایی از لایه های درشت دانه ماسه ای در میان آنها دیده می شود. با حرکت به سمت مرکز تهران، از میزان ریزدانه ها کاسته و خاک به سمت ماسه یا شن رس دار یا شن سیلت دار تغییر می کند. شکل ۱ نشان دهنده پروفیل طول خط ۶، سطح زمین و تراز آب زیرزمینی است.

۳- مشخصات پروژه

فاز اول خط ۶ مترو تهران به طول ۱۰/۵ کیلومتر و قطر حفاری ۹/۱۶ متر بوده که حفاری تونل به روش مکانیزه با دستگاه EPB TBM صورت پذیرفته است. قطر داخلی تونل پس از لاینیگ، ۸/۱۵ متر و ضخامت سگمنت های بتنی ۳۵۰ میلیمتر است. هر رینگ شامل سگمنت بعلاوه یک کلید مطابق با شکل ۲- الف است. شکل ۲- ب به عنوان مثال، قطعه بتنی A2 را نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۲- هندسه قطعات بتنی؛ (الف) - رینگ، (ب) - قطعه بتنی A2

در تولید قطعات بتنی، در طرح مخلوط و روش عمل آوری بتن توجه زیادی صورت پذیرفته تا کیفیت و مقاومت اولیه مناسب برای خروج سریع از قالب به بهترین نحو ممکن تامین گردد.

از روش های متداول عمل آوری قطعات بتن در پروژه های عمرانی می توان به عمل آوری رطوبتی، عمل آوری با بخار و عمل آوری حرارتی (بدون بخار) اشاره کرد. نسل جدید از فوق روان کننده ها که به طور محسوسی نسبت آب به سیمان را کاهش می دهد، باعث شده که استفاده از روش عمل آوری حرارتی (بدون بخار) مناسب تر به نظر برسد.

۴- تولید قطعات بتنی و آزمایش های مرتبط به آن

۴-۱- طرح مخلوط و عمل آوری حرارتی قطعات بتنی

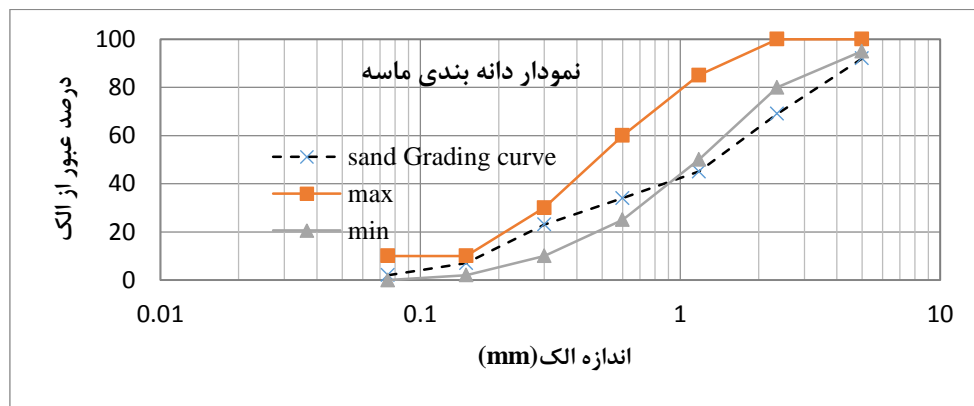
مطابق با نیاز های طراحی و اجرا که به طور خلاصه در قسمت قبل ارائه شد، بتن تولیدی باید دارای مقاومت مشخصه مکعبی $f'_{cu} = 40 \text{ MPa}$ باشد. مشخصات بتن تولیدی مطابق با جدول ۱ است.

جدول ۱. مشخصات بتن برای پوشش تونل خط ۶

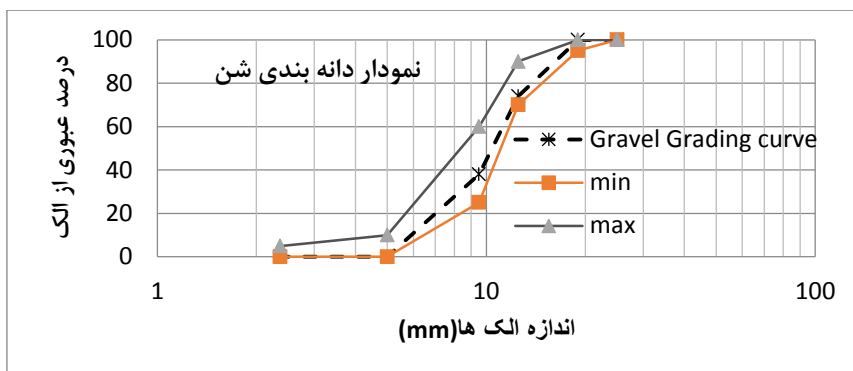
40 MPa	f'_{cu}	مقاومت فشاری مشخصه
27800 MPa	E_C	مدول الاستیسیته
	حد اقل پوشش	پوشش بتن
25 KN/m^3	γ_c	وزن مخصوص بتن

طرح مخلوط بتن پیشنهادی شامل ماسه با دانه بندی تا 8mm و مصالح درشت دانه در محدوده ۹/۵ تا ۱۲ و ۱۲ تا ۱۹ میلیمتر مطابق با نمودار توزیع دانه بندی (شکل ۳) است. چهار طرح مخلوط با مقادیر مختلف عیار سیمان (350 kg/m^3 و 400 kg/m^3)، نسبت های آب به سیمان مختلف (۰/۳۸ و ۰/۵۰) و مقادیر مختلف از مواد افزودنی مطابق با جدول ۲ مورد آزمایش قرار گرفته شد. مقدار حد پایین نسبت آب به سیمان با در نظرگیری میزان روانی و کارایی بتن پس از افزودن فوق روان کننده به صورت تجربی و با انجام چندین تست مختلف تعیین گردید. از سیمان تیپ دو در ساخت قطعات بتنی پوشش نهایی خط ۶ مترو تهران استفاده شده است. دمای عمل آوری با حرارت در سه مرحله کنترل می گردد. با استفاده از ترمومتر در گام اول در موتورخانه و پمپ های انتقال آب، در گام دوم در لوله های انتقال آب و دستگاه تبادل حرارتی (رادیاتور) به کارخانه سگمنت و در گام نهایی در زیر قالب قطعات بتنی که توسط پوشش های پلاستیکی محافظت می شود، دما کنترل میگردد.

برای افزایش راندمان در عملیات تونل سازی نیاز به دو شیفت کاری ۱۰ ساعته برای تولید قطعات بتنی است. بنابراین مقاومت فشاری ۱۰ ساعته مکعبی قطعات بتنی در هنگام خروج از قالب نباید کمتر از ۱۲ MPa گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۳- نمودار دانه بندی؛ (الف) - مصالح ریزدانه (9)، (ب) - مصالح درشت دانه (9)

جدول ۲- طرح های مخلوط خط ۶ مترو تهران

ردیف	عیار سیمان (kg/m ³)	نسبت آب به سیمان (%)	ماسه (SSD) (kg)	شن (SSD) (kg)	مواد افزودنی (%)	اسلامپ (mm)
۱	۴۰۰	۰/۵	۹۰۰	۹۰۰	۷۰
۲	۳۵۰	۰/۳۸	۹۰۰	۹۰۰	۰/۶	۱۷۰
۳	۳۵۰	۰/۳۸	۹۰۰	۹۰۰	۰/۷	۱۸۰
۴	۳۵۰	۰/۳۸	۹۰۰	۹۰۰	۰/۸	۱۷۰

۲-۴- عمل آوری حرارتی در کارخانه سگمنت و نحوه مدل سازی آن در آزمایشگاه

در سیستم مورد استفاده در کارخانه تولید قطعات بتنی خط ۶ مترو تهران، قالب های سگمنت توسط پوشش های پلاستیکی مقاوم پوشانده شده و در زیر قالب از سیستم انتقال حرارت همرفتی^۱ استفاده می گردد. به منظور انتقال مایع با حرارت مناسب از موتورخانه به کارخانه، از سیستم لوله کشی به همراه عایق بندی حرارتی آن استفاده گردیده است. اشکال ۴ تا ۶ بیانگر تجهیزات استفاده شده جهت عمل آوری با حرارت است. مزیت استفاده از پوشش پلاستیکی، جلوگیری از تبخیر رطوبت بتن بوده و هم مانع از اتلاف گرما و ایجاد رطوبت مناسب برای بتن می گردد.



شکل ۴- موتورخانه تامین آب گرم برای عمل آوری بتن

¹ Convection



(ب)

(الف)

شکل ۵- کارخانه ساخت سگمنت؛ (الف) - پوشش های قالب، (ب) - لوله کشی در کف کارخانه سگمنت



شکل ۶- سیستم انتقال حرارت در زیر قالب های سگمنت

به منظور بررسی پارامتر های موثر در کیفیت و عملکرد روش عمل آوری با اعمال حرارت در مقیاس صنعتی و همچنین تاثیر آن در مقاومت سگمنت بتنی تولید شده، از نمونه های بتنی مکعبی با ابعاد $150 \text{ mm} * 150 \text{ mm} * 150 \text{ mm}$ استفاده گردیده است. در ابتدا نمونه های بتنی در دسته های سه تایی در داخل آون^۱ قرار گرفته، در زمان های مختلفی از آون خارج و در دمای محیط سرد می گردد. مقاومت فشاری نمونه ها پس از سرد شدن در یک مدت زمان مشخص، اندازه گیری می گردد. نتایج مقاومت فشاری مکعبی نمونه ها با توجه به مدت زمان فرایند حرارت (حرارت تا 40 درجه سانتیگراد) و سرمایش، در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که با وجود مقاومت فشاری کمتر در بازه زمانی 6 ساعت حرارت و 4 ساعت افت حرارت، بدلیل نزدیک بودن نتایج، این گزینه برای بررسی سایر پارامتر ها در تعیین طرح مخلوط بهینه طرح، انتخاب شده است. به دلیل دو شیفت بودن تولید، مجموع گرمایش و افت حرارت نباید بیش از 10 ساعت به طول انجامد.

جدول ۳. مدت زمان عملیات گرمایش و سرد شدن نمونه مطابق با طرح مخلوط شماره ۱

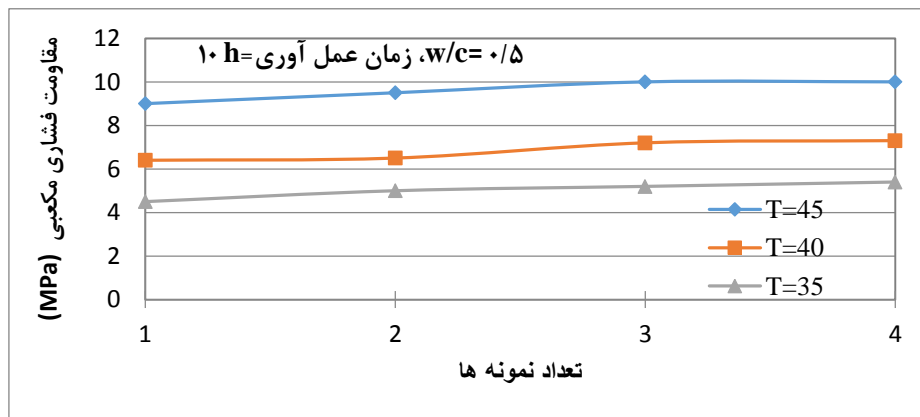
¹ Oven

عمل آوری	مقاومت فشاری مکعبی (MPa)		
دما	مدت زمان حرارت	مدت زمان سرد شدن	۱۰ ساعت
۴۰	۶	۴	۶/۴
۴۰	۷	۳	۶/۵
۴۰	۸	۲	۷/۲
۴۰	۹	۱	۷/۳

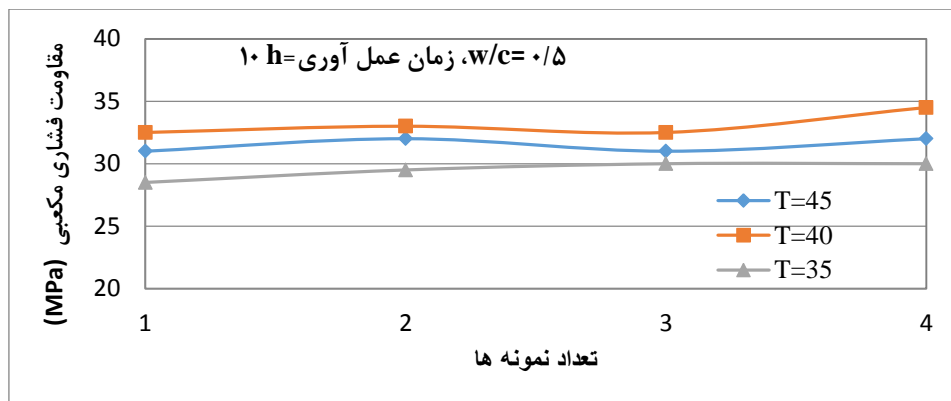
هدف از عمل آوری حرارتی بدون بخار آن است که با صرفه جویی در هزینه های تولید انرژی، دمای متعادل برای عمل آوری به صورت صنعتی بدست آید. برای تعیین مدت زمان حرارت دهی و سرد شدن نمونه بتنی طی طرح مخلوط شماره یک، درجه حرارت ۴۰ درجه به عنوان عددی حد وسط که امکان ایجاد آن به صورت صنعتی برای کارخانه صنعتی با هزینه کم فراهم باشد، انتخاب گردید. تاثیر درجه حرارت در مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف در بخش های بعد بررسی گردیده است.

۴-۳- آزمایش های صورت گرفته به منظور تدقیق میزان W/C و مواد افزودنی

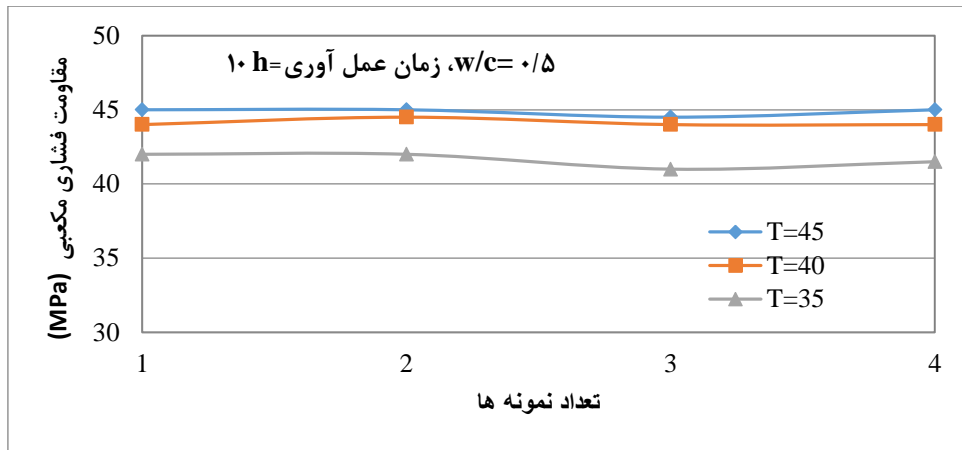
مقاومت فشاری مکعبی ۱۰ ساعته، ۷ روزه و ۲۸ روزه مطابق با استاندارد BS-8110 (۱۰) انجام پذیرفته است. در ابتدا، بتن با مشخصات $w/c = 0/5$ ، عیار سیمان $400 kg/m^3$ بدون هرگونه مواد افزودنی تولید و تحت عمل آوری با حرارت در دمای مختلف ۳۵، ۴۰، ۴۵ درجه سانتیگراد قرار می گیرد. اشکال ۷ تا ۹ نشان دهنده مقاومت فشاری ۱۰ ساعته مکعبی نمونه های بتنی بعد از عمل آوری است.



شکل ۷- مقاومت فشاری ۱۰ ساعته مکعبی نمونه های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و دمای عمل آوری مختلف



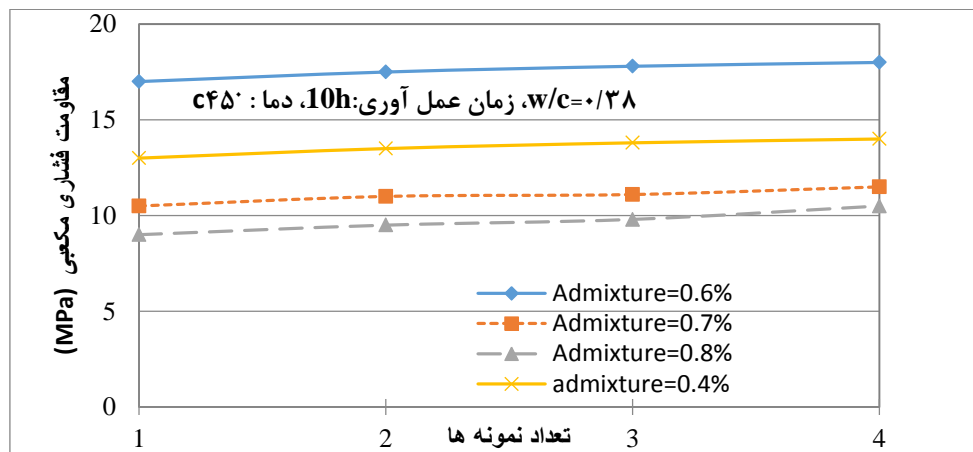
شکل ۸- مقاومت فشاری ۷ روزه مکعبی نمونه های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و دمای عمل آوری مختلف



شکل ۹- مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی نمونه های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و دمای عمل آوری مختلف

مطابق با نتایج بدست آمده، با افزایش حرارت عمل آوری از 35°C به 45°C ، مقاومت فشاری ۱۰ ساعته بتن در حدود ۸٪ تا ۱۰٪ افزایش می یابد. مقاومت فشاری ۷ روزه بتن با دمای عمل آوری 40°C از مقاومت فشاری همان نمونه در دمای عمل آوری 45°C بیشتر است. با این وجود مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در دمای 45°C از 40°C بیشتر است. با توجه به شکل ۷، مقاومت فشاری ۱۰ ساعته مکعبی در سه دمای مختلف عمل آوری به میزان مقاومت لازم برای خروج از قالب (۱۲ MPa) نرسیده است. در نتیجه به منظور کاهش حرارت هیدراسیون و کنترل ترک های عمل آوری با منشا حرارت، کاهش نسبت w/c و افزایش مقاومت اولیه بتن به بیش از ۱۲ MPa، از مواد افزودنی (فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اثر بهینه شده) در طرح مخلوط استفاده شد. برای بدست آوردن میزان مصرف مواد افزودنی در بتن و تاثیر آن در افزایش مقاومت بتن، فوق روان کننده ی فوق در سه میزان مشخص نسبت به وزن سیمان مصرفی، مورد استفاده و بررسی قرار گرفته شد.

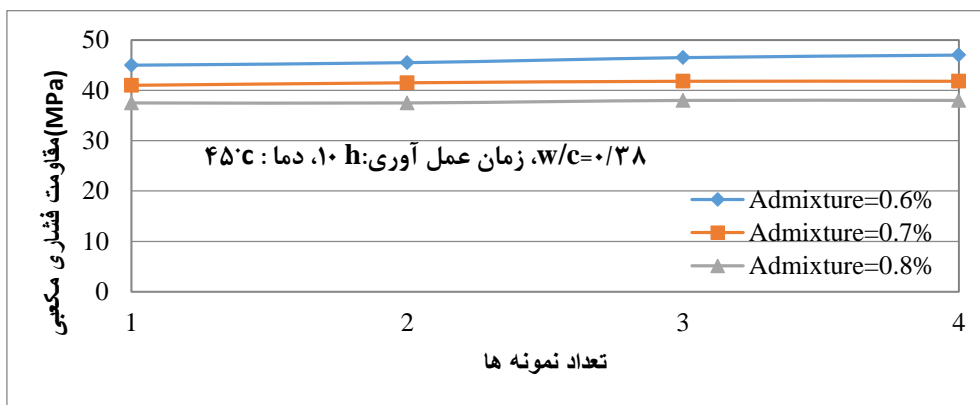
مقاومت فشاری ۱۰ ساعته، ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه های بتن با نسبت $w/c = 0.38$ و عیار سیمان 350 kg/m^3 با عمل آوری حرارتی تا 45°C و میزان مصرف مختلف مواد افزودنی مطابق با اشکال ۱۰ تا ۱۲ بدست آمده است.



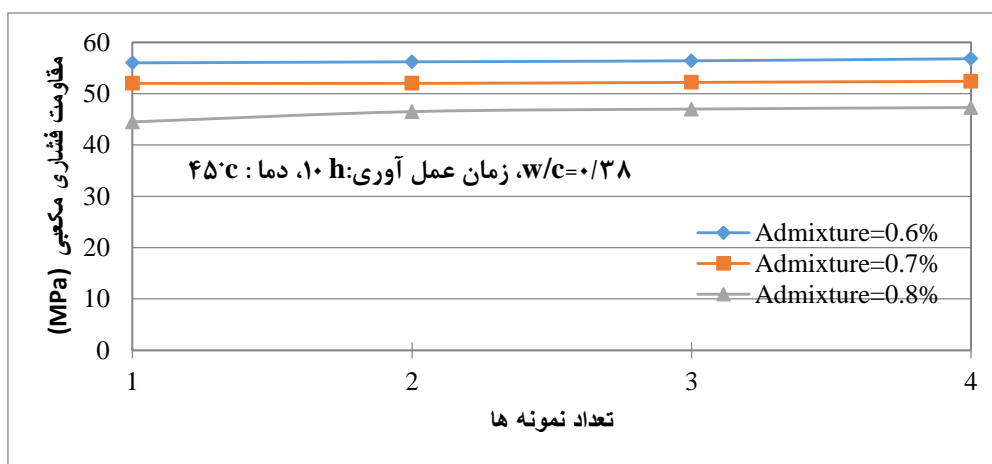
شکل ۱۰- مقاومت فشاری ۱۰ ساعته مکعبی نمونه های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و میزان مختلف مواد افزودنی

همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می گردد، مقاومت فشاری مکعبی ۱۰ ساعته بتن، با افزایش مواد افزودنی از ۰/۴ تا ۰/۶٪ وزن سیمان در حدود ۳ تا ۴ مگا پاسکال افزایش داشته است. به طور میانگین با افزایش میزان مصرف مواد افزودنی در حدود ۰/۷٪ تا ۰/۸٪ وزن سیمان، مقاومت فشاری ۱۰ ساعته بتن ۴۰ تا ۴۵ درصد کاهش می یابد. فوق روان کننده ها، پلیمری های آلی محلول در آب هستند که دارای رشته های دراز مولکولی هستند این رشته های دراز مولکولی به دور ذرات سیمان می پیچند و بار منفی زیادی به آنها می دهند، به طوری که یکدیگر را دفع می نمایند. این امر منجر به پراکندگی و پخش سیمان می گردد

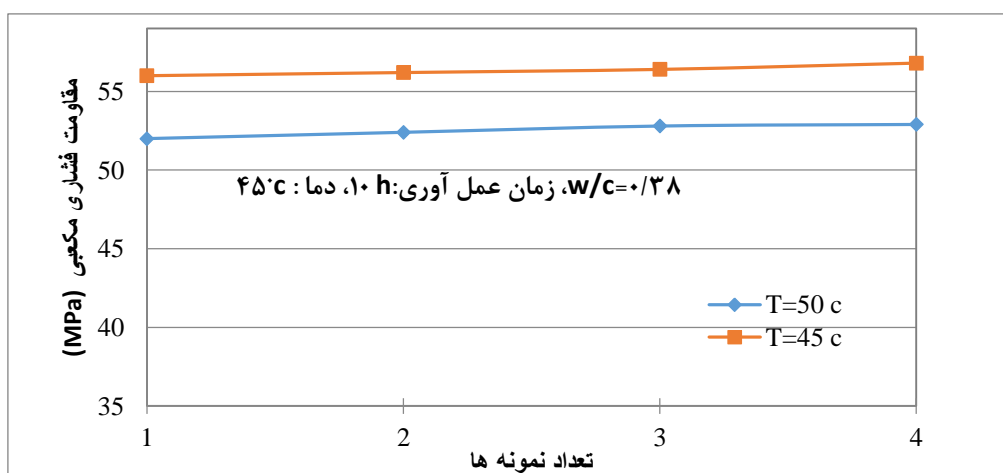
در نتیجه با افزایش فوق روان کننده ها تا حدی افزایش مقاومت را شاهد هستیم و پس از آن به دلیل جدا شدن ژل سیمان از مصالح سنگی و همچنین بروز پدیده آب انداختگی کاهش مقاومت رخ می دهد که متناسب با نتایج شکل ۱۰ است. نتایج نشان داده شده در شکل ۱۲ بیانگر آن است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با مواد افزودنی به مقدار ۰/۶٪ وزن سیمان و عیار سیمان به میزان 350 kg/m^3 و $w/c = 0/۳۸$ جوابگوی طرح و به میزان ۵۵ MPa است.



شکل ۱۱- مقاومت فشاری ۷ روزه مکعبی نمونه های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و میزان مختلف مواد افزودنی



شکل ۱۲- مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی نمونه های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و میزان مختلف مواد افزودنی



شکل ۱۳- مقاومت فشاری ۲۸ روزه مکعبی نمونه های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و دمای عمل آوری مختلف

برای بررسی اثر افزایش دمای عمل آوری حرارتی در طرح مخلوط نهایی (۰/۶٪ مواد افزودنی، $w/c = 0/38$ و عیار سیمان 350 kg/m^3) بتن تولید شده در دو دمای مختلف (45°C و 50°C) عمل آوری گردید (شکل ۱۳). مطابق با نتایج بدست آمده با افزایش دمای عمل آوری از 45°C به 50°C ، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در حدود ۱۰٪ کاهش می یابد.

طرح مخلوط نهایی ساختن قطعات پیش ساخته خط ۶ مترو تهران با دمای بهینه برای عمل حرارتی که از نتایج آزمایش ها بدست آمده است، مطابق با جدول ۴ است. مطابق با جدول مورد نظر، عیار سیمان 350 kg/m^3 ، ماسه و شن 900 kg/m^3 بوده و ۰/۶٪ نسبت به عیار سیمان مصرفی، مواد افزودنی لحاظ گردیده است. دمای مناسب برای عمل آوری با استفاده از حرارت 45°C است.

جدول ۴- طرح مخلوط نهایی و بهینه با توجه به نتایج آزمایش های صورت پذیرفته

ردیف	عیار سیمان (kg/m^3)	نسبت آب به سیمان %	ماسه kg	شن kg	مواد افزودنی %	حداکثر دمای عمل آوری حرارتی درجه سانتیگراد
۱	۳۵۰	۰/۳۸	۹۰۰	۹۰۰	۰/۶	۴۵

۵- نتیجه گیری

تونل مکانیزه پروژه ای چند وجهی و در بر گیرنده تنوع زیادی از تکنیک ها، دانش و تجربیات است که این مجموعه در داخل فضایی به نام زمین به کار گرفته می شود. فراهم نمودن قالب های کافی، فضا و تسهیلات و تجهیزات برای حجم بالایی از مصرف روزانه قطعات بتنی، نیازمند سرمایه گذاری بسیار زیادی است. بدلیل آنکه بتن تازه نیازمند زمان کافی برای عمل آوری و رسیدن به مقاومت فشاری مورد نیاز برای خروج از قالب است (12 MPa)؛ انتخاب روش مناسب عمل آوری برای رسیدن به این هدف و خروج قالب در کوتاهترین زمان ممکن و انتقال آن به دیوی موقت، ضروری است. در این مقاله نه تنها اجرای فرایند عمل آوری قطعات بتنی با حرارت و تاثیر آن بر مقاومت اولیه بتن ارائه گردیده، بلکه اثر پارامتر های مختلف مانند زمان بهینه برای حرارت دهی و بیشترین درجه حرارت لازم در عمل آوری حرارتی (بدون بخار) و روش های کنترل آن ارائه شده است.

در این پژوهش، در گام اول، عمل آوری حرارتی قطعات بتنی با عیار سیمان 400 kg/m^3 بدون مواد افزودنی در سه دما 35°C ، 40°C و 45°C درجه سانتیگراد انجام پذیرفت. نتایج بیانگر آن است که مقاومت فشاری مکعبی بتن ۱۰ ساعته کمتر از میزان مورد نیاز در طرح برای خروج از قالب است (12 MPa). با این وجود، بهترین دمای حرارت برای عمل آوری مطابق با آزمایش های صورت پذیرفته برابر با 45°C انتخاب شد. بنابراین کاهش میزان مصرف سیمان، نسبت آب به سیمان و استفاده از مواد افزودنی (۰/۶٪ وزن سیمان) باعث افزایش مقاومت فشاری متوسط بتن به بیش از 12 MPa گردید که نیاز های طرح را برآورده کرد. همچنین ملاحظه می گردد که مقاومت ۲۸ روزه بتن با میزان مواد افزودنی ۰/۶٪ وزن سیمان و عیار سیمان برابر با 350 kg/m^3 مناسب و در حدود 55 MPa است. می توان مشاهده نمود که میزان مناسب برای مواد افزودنی برابر با ۰/۶٪ وزن سیمان بوده و افزایش آن به ۰/۷٪ تا ۰/۸٪ با یک عیار سیمان ثابت، منجر به کاهش مقاومت بتن از 18 MPa به 7 MPa تا 8 MPa می گردد.

استفاده از عمل آوری حرارتی (بدون بخار) دستیابی به مقاومت فشاری اولیه بالاتری در مقایسه با روش های رایج را امکان پذیر می نماید. این روش علاوه بر کاهش زمان خروج قطعات بتنی از قالب، افزایش تولید و استفاده بهینه از تجهیزات فراهم شده را میسر میسازد.

۶- منابع

[1] Verbeck, George J., and Helmuth, R. A., "Structures and Physical Properties of Cement Pastes," Proceedings, Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, vol. III, The Cement Association of Japan, Tokyo, 1968, page 9.

[2] Escalante-Garcia JI, Sharp JH. The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures. Cem Conc Res 2001;31:695-702.

- [3] Roy DM, Idorn GM. "Hydration, structure, and properties of blast furnace slag cements, mortars, and concrete". ACI J 1982(Nov-Dec):444-57.
- [4] Brooks JJ, Kaisi AF. "Early strength development of Portland and slag cement concretes cured at elevated temperature". ACI Mater J 1990;87(5):503-7.
- [5] Kim J-K, Han SH, Park SK. "Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete, part I: experimental results". Cement Concrete Research 2002; 32:1087-94.
- [6] Ma W, Sample D, Martin R, Brown PW. "Calorimetric study of cement blends containing fly ash, silica fume and slag at elevated temperatures, cement and concrete and aggregates". CCAGPD 1994;16(2):93-9.
- [7] Videla CC, Covarrunbias JPT, Pascal JMD. "Behaviour in extreme climates of concrete made with different types of cement". In: Dhir RK, McCarty MJ, editors. Appropriate concrete technology. London: E and FN Spon; 1996. p. 213-24.
- [8] Rieben, E. H., "Geological observation on alluvial deposits in northern Iran, Geological Survey of Iran". Report No. 9. 1966.
- [9] CSA A23.1-00/A23.2-00. "Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Methods of Test for Concrete". Canadian Standards Association, Toronto, Canada. September 2000.
- [10] BS EN 12390-3. "Testing of hardened concrete - compressive strength of test specimens". London: British Standards Institution; 2002.
- [11] Nevil, AM. "Properties of Concrete". Pitman, 1981.