

## بررسی فنی و اقتصادی تولید بکارگیری نانوفناوری در جهت ارتقای دوام و پایایی تصفیه خانه پروژه بیمارستان ۹۶ تختخوابی لنگرود



### مهندسين مشاور فردافن پارس

سروش عیسی پور - مدیر پروژه - مهندسین مشاور فردافن پارس  
آذین بنفشه افشان - مدیر کارگروه مطالعات و تحقیقات - مهندسین مشاور فردافن پارس  
محمود گلبو لنگرودی - گروه عمران - واحد بندر انزلی - دانشگاه آزاد اسلامی - ایران - کارشناسی ارشد  
سید ادریس جوادین - گروه عمران - واحد بندر انزلی - دانشگاه آزاد اسلامی - ایران - عضو هیات علمی

### چکیده

بیمارستان ۹۶ تختخوابی لنگرود با تعداد ۹۶ تخت اسمی و ۱۳۲ تخت کل هم اکنون با پیشرفت فیزیکی بیش از ۸۵ درصد در مراحل انتهایی عملیات اجرایی قرار دارد. مطابق تفاهنامه سال ۱۳۸۴ مابین وزارت نیرو و وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی مقرر گردید که در کلیه شهرهای فاقد تصفیه خانه جهت آلودگی زدایی فاضلاب بیمارستان نسبت به تعیین و احداث تصفیه خانه اختصاصی در سایت بیمارستان اقدام و خروجی تصفیه شده امکان اتصال به شبکه جمع آوری یا دفع فاضلاب شهری را خواهد داشت. از اینرو با توجه به عدم وجود تصفیه خانه مرکزی در شهرستان لنگرود طراحی و احداث تصفیه خانه با ظرفیت ۱۰۰ متر مکعب در روز در دستور کار پروژه قرار گرفت. اما اثرگذاری عوامل خورنده ورودی از شبکه فاضلاب بیمارستانی و سطح بالای آب زیرزمینی (۰.۵ تا ۱ متر در محل احداث پروژه) بصورت توأمان سبب شده تا ضرورت بکارگیری راهکار مقابله ای جهت تضمین عملکرد سازه در دوره بهره برداری و تامین ملاحظات دوام سازه در برابر نفوذ آب مورد بررسی قرار گیرد.

در این تحقیق با هدف دستیابی به طرح اختلاط بهینه از نظر پارامترهای نفوذپذیری، خواص مکانیکی، کارایی مطلوب و نهایتاً مولفه اقتصادی برنامه آزمایشگاهی بر پایه مقایسه چگونگی کمی و کیفی تغییرات مشخصات بتن در نتیجه راهکارهای کاهش نسبت آب به سیمان، اصلاح دانه بندی مصالح سنگی، بکارگیری دوده سیلیس بصورت مجزا و نهایتاً مصرف توأمان میکرو و نانوسیلیس در هر یک از حالات یاد شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج قابل توجه این مطالعه آن است که اثرگذاری نانو و میکرو سیلیس در حالتی نمود بیشتری خواهد یافت که با کاهش نسبت آب به سیمان و بکارگیری دانه بندی بهینه، منافذ ریزساختار بتن به حداقل اندازه خود کاهش داده شود. در غیر این صورت علی رغم صرف هزینه مستقیم بکارگیری این مواد و هزینه غیرمستقیم مصرف افزودنی فوق روان کننده جهت جبران کاهش کارایی ناشی از حضور ریزپرکننده ها، اثرگذاری موثر این مواد حاصل نخواهد شد.

**کلمات کلیدی:** نفوذپذیری، تصفیه خانه، میکروسیلیس، نانوسیلیس

## ۱. معرفی موضوع و پیشینه تحقیق:

### ۱-۱- طرح مساله:

ارتقای دوام و کاهش نفوذپذیری بتن جهت افزایش عمر خدمت رسانی سازه های بتن مسلح به ویژه در شرایط محیطی خورنده و سازه های هیدرولیکی همواره دغدغه متخصصین تکنولوژی بتن بوده است.

راهکارهای متفاوتی جهت ارتقای عملکرد و افزایش دوام سازه های بتن آرمه در شرایط محیطی خورنده وجود دارد.

- اجرای لایه های پلیمری و پوشش های اپوکسی به عنوان عایقی پیرامون اعضای سازه ای

- نصب تجهیزات حفاظت کاتدی و نگهداری مستمر اعضای سازه ای

- ارتقای عملکرد بتن پایه

تجربیات گذشته نشان داده است گزینه سوم بسیار آسان تر و کم هزینه تر از سایر روشهاست و نیاز به نگهداری و بازرسی مداوم را نیز برطرف می سازد. در این روش با بکارگیری افزودنی ها و مکمل های بتن به ساخت بتنی با دوام پرداخته می شود. در این راستا، راهکارهایی از قبیل کاهش نسبت آب به سیمان، اصلاح دانه بندی سنگدانه ها، بهبود نحوه عمل آوری، استفاده از مواد پوزولانی، ریزپرکننده ها و نانو مواد تاکنون توسط پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است.

علی رغم پژوهش های متعدد صورت پذیرفته در حوزه فواید بتن های پایا و انتشار گزارش های فنی و مقالات علمی در این زمینه، در اکثریت موارد تمرکز مطالعات در روش های ممانعت از نفوذ و انتشار عوامل خورنده مانند یون های کلراید یا سولفات بوده و کاربرد نتایج به استفاده در پروژه های در معرض خوردگی ناشی از آب دریا اختصاص یافته است. این در حالی است که استفاده از نتایج و درصد های بهینه این مطالعات به دلیل تامین سطوح بالاتری از حدود پذیرش دوام و نفوذپذیری بناهای آبی فاقد خطر خوردگی کلرایدی و سولفاتی با هدررفت هزینه های قابل توجه اقتصادی به همراه بوده و در مواردی در نتیجه عدم تامین مقبولیت فنی و اقتصادی در فرایند احداث، بروز چالش های دوره بهره برداری را موجب می گردد.

مطابق نشریه شماره ۳۱۲ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور با عنوان "ضوابط عمومی طراحی سازه های آبی بتنی" به علت حساسیت زیاد سازه های آبی به ملاحظات پایایی و بارگذاری علاوه بر فصل های مندرج در آیین نامه بتن ایران (آبا)، رعایت مفاد پیوست هایی با عناوین واکنش قلیایی سنگدانه ها، کنترل خلازایی، کنترل ترک های حرارتی و جمع شدگی، کنترل ترک های ناشی از خمش و کشش مستقیم و ملاحظات بارگذاری سازه های آبی مورد تاکید قرار گرفته است [۱ و ۲].

علاوه در این نشریه ضرورت محافظت در برابر آثار زیانبار ترکیبات شیمیایی در سازه های بتنی ذیل تشریح شده است:

الف- تاسیسات تصفیه آب و فاضلاب شهر و صنعتی

ب- مخازن ذخیره آب و پس آب

پ- تلمبه خانه ها

ت- مجاری فاضلاب و تاسیسات مربوط

ث- انبار ذخیره مواد شیمیایی

در این خصوص می توان، اکسید شدن سولفور هیدروژن در مجاورت رطوبت و اکسیژن و تشکیل اسید سولفوریک و تشکیل سولفات کلسیم (گچ) پس از ترکیب اسید با آهک (هیدروکسید کلسیم) موجود در بتن را به عنوان یکی از آثار زیانبار و مخرب در سازه های بتنی تاسیسات آب و فاضلاب شهر نام برد که سبب کاهش PH سطحی و خاصیت قلیایی بتن محافظت میگردد شده و خوردگی آن را به همراه دارد.

در نشریه ۲۳۷ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور با عنوان "راهنمای بهره برداری و نگهداری تصفیه خانه های فاضلاب شهری (تصفیه مقدماتی)" با هدف ارتقای آگاهی از فرایند بهره برداری و نگهداری صحیح این تاسیسات، سعی شده است برخی از دشواری های مبتلابه با ذکر چرایی و راهکارهای پیشگیرانه و ترمیمی تشریح گردد [۳].

حوضهای دانه گیری - در تصفیه خانه های فاضلاب حوض دانه گیری اولین واحد ته نشینی می باشد. هدف از ته نشین سازی در این حوض ها جداسازی مواد دانه ای از فاضلاب است. حوضهای دانه گیری که واحد اصلی تصفیه مقدماتی است. به منظور تامین مقاصد تقلیل گرفتگی لوله ها، حفاظت وسایل مکانیکی در مقابل سایش، حفاظت حجم مفید حوض های هوادهی و هاضم های لجن به علت تجمع دانه ها در کف و حفاظت از افشانک های هوادهی برای جلوگیری از گرفتگی آنها احداث می شوند. در نشریه مذکور، بروز خوردگی در بخش های فلزی و بتنی به عنوان یکی از دشواری های بهره برداری در سیستم دانه گیر ذکر شده است که علت وقوع آن عدم تامین تهویه کافی بوده و روش بررسی و بازبینی این آسیب، بررسی تهویه و نمونه برداری از لجن ته نشین شده برای آزمایش سولفید کل و محلول تعیین شده است. همچنین در این نشریه، تامین تهویه بیشتر و تجدید رنگ آمیزی و تعمیرات سالیانه به عنوان راهکار رفع عیب آورده شده است.

حوض ته نشینی - فاضلاب خام حاوی مواد معلقی است که در صورت کاهش سرعت جریان به سادگی ته نشین و شناور می شوند. سرعت جریان فاضلاب در شیکه جمع آوری فاضلاب حدی است که از ته نشین شدن جامدات جلوگیری به عمل می آورد. ذرات معلق را می توان به دو نوع دانه ای یا لخته ای دسته بندی کرد. ذرات دانه ای (شن و ماسه) با سرعت ثابت بدون تغییر در اندازه، شکل با وزن ته نشین می شوند معمولاً چنین ذراتی در واحد دانه گیر حذف می گردند و ذرات لخته ای (مواد آلی، لخته هایی که در اثر عمل انعقاد حاصل می شوند با توده های بیولوژیکی) تمایل دارند در حین ته نشینی به یکدیگر چسبیده و به صورت لخته های درشت درآمده که در اندازه، شکل و وزن مخصوص نسبی آنها تغییر حاصل می شود.

در حوض ته نشینی تصفیه خانه های فاضلاب با بکارگیری روش های شیمیایی لخته سازی و حذف مواد شناور مانند چربی و رویه توسط رویه گیر در فرایند شناورسازی صورت می پذیرد.

اما در بحث ضرورت حفاظت خوردگی حوض ته نشینی، در راهنمای تعمیرات و نگهداری حوض های ته نشینی اولیه، یکی از مشاهدات مبتلابه، خوردگی بیش از حد قسمت های مختلف این قسمت اعلام شده که علت احتمالی آن، فاضلاب گندیده، شاخص بازرسی و یا اندازه گیری این عارضه، بو و رنگ فاضلاب و راه حل مقابله ای، رنگ آمیزی سطوح توسط رنگهای مقاوم در برابر خوردگی و با پوشش های برونی مناسب اعلام شده است.

اهمیت بررسی شاخص های خوردگی بتن در تصفیه خانه های فاضلاب به گونه ای است که در نشریه ۴۹۴ معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور با عنوان "راهنمای اندازه گیری و ثبت پارامترها در تصفیه خانه های فاضلاب و پردازش آن" که با هدف ثبت و پردازش اطلاعات دوره بهره برداری سامانه های تصفیه فاضلاب شهری به منظور تشخیص به موقع خطا، پیشگیری از نقص و توقف در عملکرد سامانه و بهره برداری تدوین و ابلاغ شده است، ردیف های با موضوع بروز خوردگی در قسمت های فلزی و بتنی و ضرورت ثبت و گزارش محل مشاهده و تشریح وضعیت آن در چک لیست های مشاهدات کیفی واحدهای مختلف تصفیه فاضلاب شامل دانه گیر و هاضم بی هوایی ارائه شده است [۴].

موارد فوق الذکر نشان دهنده ضرورت تامین ملاحظات محافظت خوردگی بتن مسلح در سازه تصفیه خانه های فاضلاب به شمار می آید. اهمیت این حفاظت به اختصاص نشریه ۱۵۰ سازمان برنامه و بودجه با عنوان "سازه های بتنی محیط زیست (ترجمه ACI 350R-89)" انجامیده است که در سال ۱۳۷۵ و با محوریت ارائه ضوابط طراحی و اجرای سازه های تصفیه آب و فاضلاب انتشار

یافته است [۵].

همچنین لازم به ذکر است مطابق دسته بندی های مندرج در آیین نامه ملی پایایی و آیین نامه بتن ایران، سازه های نگهدارنده آب و فاضلاب در رده فوق العاده شدید دسته بندی می شوند که نیازمند بکارگیری تمهیدات محافظتی متناسبی خواهند بود [۶].

### ۲-۱- معرفی پروژه بیمارستان ۹۶ تختخوابی لنگرود

بیمارستان ۹۶ تختخوابی لنگرود با تعداد ۹۶ تخت اسمی و ۱۳۲ تخت کل هم اکنون با پیشرفت فیزیکی بیش از ۸۵ درصد در مراحل انتهایی عملیات اجرایی قرار دارد. مطابق تفاهمنامه سال ۱۳۸۴ مابین وزارت نیرو و وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی مقرر گردید که در کلیه شهرهای فاقد تصفیه خانه جهت آلودگی زدایی فاضلاب بیمارستان نسبت به تعبیه و احداث تصفیه خانه اختصاصی در سایت بیمارستان اقدام و خروجی تصفیه شده امکان اتصال به شبکه جمع آوری یا دفع فاضلاب شهری را خواهد داشت. از اینرو با توجه به عدم وجود تصفیه خانه مرکزی در شهرستان لنگرود طراحی و احداث تصفیه خانه با ظرفیت ۱۰۰ متر مکعب در روز در دستور کار پروژه قرار گرفت [۷].



شکل ۱- تصویر پروژه [۷]

### ۳-۱- روش های کاهش نفوذپذیری و ارتقای پایایی بتن

مطابقت ضوابط فنی و مطالعات انتشار یافته راهکارهای متعددی را می توان جهت ارتقای دوام و کاهش نفوذپذیری بتن معرفی کرد.

بکارگیری مصالح با دانه بندی و مدول نرمی مناسب یکی از این راهکارها به شمار می آید. سنگدانه ها در مقابل جمع شدگی خمیر سیمان قید ایجاد می کنند و در نتیجه در وجه مشترک خمیر سیمان و سنگدانه ها (فاز انتقالی) ترک های میکروسکوپی به وجود می آید. هرچه اندازه ی سنگدانه ها افزایش یابد، ترک های بزرگتری ایجاد می گردد، زیرا قید بیشتری در مقابل جمع شدگی به وجود می آید. آیین نامه ملی پایایی بتن در شرایط محیطی خلیج فارس و دریای عمان بدین منظور دانه بندی با حداکثر اندازه ی ۲۰ میلی متر در بتن های مسلح معمولی در این مناطق را مناسب دانسته است. این درحالیست که آیین نامه آبا استفاده از سنگدانه های با حداکثر اندازه ۳۸ میلیمتر را در بتن مسلح مجاز می داند. همچنین در نشریه ی ۱۲۴ سازمان برنامه و بودجه با عنوان مشخصات فنی عمومی مخازن آب زمینی محدوده هایی برای مدول نرمی ماسه آورده شده است [۸]. مطابق این نشریه ماسه مورد استفاده علاوه بر مطابقت با محدوده های دانه بندی ارائه شده، باید دارای مدول نرمی بین ۳/۲ و ۱/۳ باشد.

کاهش نسبت آب به سیمان یکی دیگر از ایده های بنیادین بدین منظور به شمار می آید. C. Georgiou و S. Kolia

گزارش کرده اند که با کاهش نسبت آب به سیمان میزان جذب آب کاهش می یابد. در حالیکه با افزایش حجم خمیر سیمانی میزان جذب به شدت افزایش می یابد. در قسمتی از نشریه ی ۱۲۳ آمده است که با توجه به درجه حرارت هیدراتاسیون بالای بتن های پرسیمان که باعث افزایش انبساط بتن در هنگام گیرش و ایجاد ترک در هنگام سرد شدن می شود، حداکثر مقدار سیمان در بتن مسلح معمولی به ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب محدود می شود [۹]. همچنین در نشریه ی ۳۱۲ با عنوان ضوابط عمومی طراحی سازه های آبی بتنی جهت ساخت بتن های مقاوم در شرایط محیطی متفاوت نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری بتن ها حداکثر و حداقل های وضع نموده است [۱].

تامین عمل آوری مطلوب و متناسب با نیاز طرح اختلاط یکی دیگر از راهکاری شناخته شده ارتقای دوام قلمداد می شود M.F.M. Zain و همکاران اثر نوع عمل آوری نمونه های بتن را بر میزان جذب آب سطحی آنها مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. مطابق نتایج جذب آب نمونه های نگهداری شده در حالت خشک (D28) بیشتر از نمونه های تحت عمل آوری مرطوب (W28) ثبت شده است. علت این تفاوت آن است که هیدراتاسیون سیمان فرایندی آب گیر بوده و در حالتی که آب مورد نیاز در واکنش های هیدراتاسیون تامین نشود، واکنش های هیدراتاسیون متوقف شده و حفراتی که در ریز ساختار بتن سخت شده باید با محصولات واکنش های هیدراتاسیون پر شوند متخلخل باقی می ماند. و نهایتاً نفوذپذیری بیشتر و خصوصیات مکانیکی ضعیف تری را به دست می دهند.

بکارگیری ریزرکننده های پوزولانی ایده دیگر شناخته شده و متداول در جهت کاهش نفوذپذیری بتن محسوب می گردد. Ha-Won Song و همکاران گزارش کرده اند که با جایگزینی دوده ی سیلیس تا ۸ درصد وزنی سیمان، نفوذ آب به شدت کاهش می یابد [۱۱]. با افزایش جایگزینی دوده ی سیلیس از ۸ تا ۱۲ درصد روند کاهشی نفوذپذیری با شدت کمتری ادامه یافته و به حداقل مقدار نمودار می رسد و با افزایش جایگزینی دوده ی سیلیس به مقادیر بالاتر از ۱۲ درصد کاهش بیشتری در این پارامتر پدید نمی آید. اثر دوده ی سیلیسی مشابه با انواع دیگر پوزولان ها منجر به ایجاد ساختاری با حفره های ریزتر و کوچکتر شدن فصل مشترک سنگدانه و سیمان می گردد که در نهایت باعث کاهش نفوذپذیری می گردد. بطور کلی نفوذ پذیری بتن تابع تخلخل و توزیع اندازه ی منافذ در محیط بتن است. منافذ بزرگتر از ۰٫۱ میکرومتر در میزان نفوذپذیری تاثیر بسزایی دارد.

اما بکارگیری از نانوذرات جهت ارتقای پایایی بتن از جدیدترین راهکاهای طرح شده جهت ارتقای مشخصات پایایی بتن به شمار می آید.

Shadi Riahi و Ali Nazari به مطالعه ی اثر ۱ تا ۵ درصد نانو اکسید سیلیسم به عنوان جایگزین سیمان پرداختند و میزان جذب آب نهایی را در سنین متفاوت گزارش کردند [۱۲]. در نتایج گزارش شده برای جذب آب ۲ روزه بهترین نتیجه به معنی کمترین جذب آب را برای طرح شاهد ثبت شده است.

در مطالعه Mostafa Jalal و همکارانش تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده از نمونه ها در سن ۹۰ روز نشان می دهد که در نمونه شاهد حجم قابل توجهی از کریستال های سوزنی شکل هیدروکسید کلسیم وجود دارد در حالیکه در نمونه های حاوی افزودنی، ذل CSH ناشی از واکنش های هیدراتاسیون و واکنش های پوزولانی ساختار ملات متراکمی را بوجود آورده اند. بنابراین علت کاهش نفوذ در طرح های حاوی میکروسیلیس را می توان به ریز ساختار متراکم تر این طرح ها نسبت داد [۱۳]. Khaloo و همکاران در این مطالعه تصاویر تهیه شده بوسیله میکروسکوپ الکترونی، اطلاعات ارزشمندی پیرامون چگونگی

توزیع نانوذرات در ریزساختار بتن را در اختیار می گذارد [۱۴]. مطابق تصاویر، در نتیجه بکارگیری نانوذرات سیلیکا، کاهش منافذ و ترک های میکرومتری بطور چشمگیری مسدود و مرتفع شده است. اما مشاهده ارزشمند دیگری که در نتیجه تهیه تصاویر ریزساختار بتن به وسیله نانوذرات ممکن شد توزیع ناکارآمد نانوذرات در منافذ ماکرومتری بتن می باشد. در این موارد عدم تامین تراکم مطلوب بتن موجب شده که افزودن نانوذرات فاقد اثرگذاری مطلوب گردد.

Jalal و همکاران این مطالعه بررسی چگونگی اثرگذاری نانو سیلیس و دوده سیلیس بصورت مجزا و در طرح های جداگانه با بکارگیری توامان این دو افزودنی بر خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن خودتراکم در دستور کار قرار گرفته است [۱۳]. افزودن ۲٪ نانو سیلیس سبب کاهش جذب آب کوتاه مدت طرح های حاوی ۴۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم سیمان به میزان ۳۵، ۲۸ و ۳۲ درصد شد. افزودن ۱۰٪ دوده سیلیس به ترتیب برای همان طرحها، کاهش ۳۱، ۲۶ و ۳۴ درصدی را رقم زد. استفاده همزمان دو افزودنی سبب کاهش ۴۶، ۴۳ و ۵۰ درصدی این شاخص شد که این نتایج نشان دهنده ی عملکرد مناسب استفاده همزمان دو افزودنی است. نتایج اندازه گیری یون کلراید موجود در پودر استخراج شده از عمق ۵-۱۰ میلی متری نمونه مغروق در آب حاوی سدیم کلرید و اندازه گیری عمق نفوذ آب تحت فشار نیز بطور مشابه حاکی از عملکرد بهتر طرح های حاوی میکروسیلیس و نانو سیلیس بطور همزمان در مقایسه با طرح های جداگانه حاوی هر یک از این مواد بوده است [۱۳].

سند گسترش نانو در افق ۱۴۰۴ طی تصویبنامه هیئت وزیران با شماره ۱۲۱۳۳۳/ت/۵۳۰۶۸ ه مورخ ۱۳۹۶/۰۹/۲۹ به منظور تولید ثروت و بهبود کیفیت زندگی مردم با اهداف ذیل ابلاغ گردید [۱۵]. در این سند تأثیرات این فناوری مانند ارتقای کیفیت و ارزش افزوده محصولات، افزایش عمر تجهیزات و ماشین آلات، افزایش کارایی (راندمان) تولید، صرفه جویی و کاهش هزینه ها، تولید محصولات دوستدار محیط زیست، کاهش اثرات مخرب زیست محیطی و بهبود بهره وری بخش ها و صنایع مورد تاکید قرار گرفته و دستگاه های اجرایی ذیربط موظف شده اند بررسی و تایید محصولات فناوری نانو ساخت داخل با فناوری بومی و خرید هدفمند این محصولات را در اولویت قرار دهند.

مطابق ماده ۳ این سند که به ذکر مأموریت های محوله وزارت نیرو در خصوص متناسب سازی مقررات و خرید محصولات نانو اختصاص دارد، این وزارتخانه در حوزخ صنعت آب و آبفا مکلف شده است نسبت به "بسترسازی برای استفاده از نانو بتن ها، نانو پوشش ها و محصولات مرتبط در سازه های آبی و اجرای آن حداقل در یک طرح آزمونی (پایلوت) تا سال ۱۴۰۰ اقدام نماید.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مواد و مصالح:

در این مطالعه جهت ساخت بتن از ماسه طبیعی رودخانه ای و شن طبیعی شکسته با بزرگترین اندازه اسمی ۲۵ میلی متر استفاده شد. دانه بندی درشت دانه ها با محدوده تعیین شده استاندارد ASTM C33، مقایسه و نمودار دانه بندی ترسیم گردید. ASTM C33 برای درشت دانه های با بزرگترین اندازه اسمی متفاوت، محدوده های بالا و پایین متفاوتی را تعیین کرده است [۱۶]. سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع پرتلند نوع ۴۲۵-۱ تولید شده در کارخانه سیمان تهران بوده که دارای توده ویژه  $3152 \text{ m}^3$  Kg/ و سطح مخصوص  $2900 \text{ cm}^2/\text{gr}$  می باشد. دوده سیلیس تولید شده در کارخانه صنایع فرو آلیاژ ایران (ازنا) به عنوان مواد پوزولانی در همه طرح ها استفاده شده است. توده ویژه دوده سیلیس استفاده شده  $2120 \text{ Kg/m}^3$  می باشد. در این مطالعه از فوق روان کننده با نام تجاری FARCO MENT M60 محصول شرکت شیمی ساختمان بر پایه لیگنوسولفات اصلاح شده استفاده شد. نانو سیلیس مورد استفاده در این مطالعه با اندازه ذرات ۲۰ نانومتر و سطح ویژه  $220 \text{ m}^2/\text{g}$  از شرکت وند شیمی تهیه شده است.

## ۲-۲- طراحی جزئیات مخلوط‌های آزمایشگاهی:

در این تحقیق طرح اختلاط گروه اول و دوم براساس استاندارد ACI 211.1-91 محاسبه گردید [۱۷]. محدوده کارایی موردنظر معادل ۷۵ تا ۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته می شود. مطابق مشخصات مورد نظر جهت کاربری تصفیه خانه ساخت بتن بارده و C30 مدنظر قرار گرفت.

جهت تعیین گروه سوم و چهارم (اصلاح دانه بندی) طرح اختلاط بتن با لحاظ مشخصات سنگدانه های موجود و روش اصلاح دانه بندی از الگوی روش ملی طرح مخلوط بتن موضوع نشریه شماره ۴۷۹ مرکز تحقیقات، راه و شهرسازی (سال ۱۳۹۴) استفاده شد [۱۸].

در این روش مقاومت فشاری متوسط لازم برای طرح مخلوط بتن یا مقاومت هدف طرح اختلاط، به طور معمول به کمک مقاومت مشخصه (مقاومت حداقل) و انحراف معیار مقاومت بتن ساخته شده در کارگاه بدست می آید. در آیین نامه ها با توجه به تئوری خطا و به کمک منحنی خطای نرمال و تعاریف مقاومت مشخصه و ضوابط پذیرش بتن در کارگاه مقاومت هدف طرح بدست می آید.

جدول ۱- مشخصات مصالح سنگی تهیه شده

مخلوط با نسبت ۵-۴۵-۱۵-۳۵	ترکیب ۵۰-۵۰ نخودی و بادامی	شن نخودی	شن بادامی	پودر سنگ	ماسه رودخانه ای	اندازه الک (mm)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۵
۸۸,۱	۸۳	۱۰۰	۶۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۹
۷۰,۲	۵۷,۵	۱۰۰	۱۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۲,۵
۵۹,۴	۳۱,۵	۶۳	۰	۱۰۰	۱۰۰	۹,۵
۴۴,۶	۷,۵	۱۵	۰	۱۰۰	۸۳	۴,۷۵
۲۹,۳	۰	۰	۰	۱۰۰	۵۴	۲,۳۶
۲۱,۲	۰	۰	۰	۱۰۰	۳۶	۱,۱۸
۱۵,۳	۰	۰	۰	۱۰۰	۲۳	۰,۶
۷,۷	۰	۰	۰	۱۰۰	۶	۰,۳
۳	۰	۰	۰	۶۰	۰	۰,۱۵
---	---	۲۷۴۰	۲۷۱۰	۲۶۹۰	۲۶۷۰	وزن مخصوص حقیقی در وضعیت اشباع با سطح خشک (Kg/m <sup>3</sup> )
---	---	۱۶۲۷	۱۶۱۷	---	---	وزن مخصوص ظاهری خشک میله خورده (Kg/m <sup>3</sup> )
---	---	۱۰۰	۸۰	---	---	درصد شکستگی تقریبی
---	---	۱,۲۱	۱,۲۱	۲,۹۴	۱,۶۵	درصد جذب آب
* ۵,۳۱۳	---	---	---	---	۳,۵۳	مدل نرمی

مطابق بند ۲-۲-۳ راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن (تعیین انحراف معیار در صورت عدم دسترسی به اطلاعات آماری) طبق جدول ۲-۳ روش ملی، کارگاه ها بر اساس وضعیت نظارتی و کنترل کیفی کارگاهی تولید بتن به سه دسته تقسیم بندی (رتبه



بندی) می شوند. نحوه سنجش وزنی یا پیمانه کردن حجمی سیمان و سنگدانه و کنترل رطوبت سنگدانه از مهمترین عوامل در رتبه بندی کارگاه ها برای ساخت بتن می باشد. وجود نیروی متخصص در تولید بتن که در ارتباط با نظارت بر تولید و تداوم در آزمایش است نیز از جمله عوامل دیگر میباشد و وجود امکانات آزمایشگاهی می تواند زمینه لازم برای تداوم در آزمایش را فراهم نماید.

در مطالعه حاضر با توجه به استفاده از امکانات آزمایشگاهی، شرایط کارگاه از نظر وضعیت کنترل کیفیت نوع الف تعیین شد. از این روی انحراف معیار برابر ۴ در محاسبات وارد می گردد. شایان ذکر است مقاومت فشاری هدف با توجه به موضوع تحقیق ۳۰ مگاپاسکال در نظر می باشد. بزرگترین مقدار بدست آمده برابر 36.86 MPa مقاومت هدف طرح خواهد بود.

بتن مورد نظر با عنوان درج شده به شرح "ستون و دیوار با روانی رده S3، بتن پمپی ریز، بتن ترمی درشت بافت با رده اسلامپ S4 و بتن تعمیری درشت بافت" مطابقت بیشتری دارد. منحنی مطلوب و محدوده مطلوب دانه بندی با توجه به نما و پمپی بودن بتن در بین A-25 (توان ۰,۶۷) و B-25 (توان ۰,۳۵) قرار دارد اما با توجه به توضیحات راهنما در بتن پمپی ریزدانه کردن زیاد و نزدیکی به منحنی B-25 توصیه نمی شود و بهتر است ترکیب دانه بندی بین منحنی متناظر با n برابر ۰,۵ و ۰,۴ واقع گردد. پس از آزمون و خطا در نسبت های اختلاط مصالح سنگی جهت قرارگیری در محدوده بین دو منحنی n=0.5 و n=0.4 نسبت اختلاط شن بادامی، شن نخودی و ماسه رودخانه ای و پودر سنگ برابر ۳۵-۱۵-۴۵-۵ درصدی منجر به تامین دانه بندی بهینه گردید.

با توجه به تغییرات عیار سیمان، دوده سیلس و نسبت آب به مواد سیمانی، تغییر درصد حجمی مصالح بکار رفته در طرح های اختلاط را به همراه دارد در جدول ذیل پس از کنترل و اصلاح مجموع حجم حاصل از هر یک از طرح ها، بازنویسی مقادیر اجزای اختلاط صورت پذیرفت.

جدول ۲- طرح های اختلاط پس از اصلاح درصد های حجمی

کد طرح	سیمان	آب	شن بادامی	شن نخودی	ماسه رودخانه ای	پودر سنگ	فوق روان کننده	دوده سیلس	نانوسیلیس
CRL50	۳۷۴	۲۰۲	۵۰۰	۴۹۷	۸۰۷	۰	۰	۰	۰
SF-50	۳۵۴	۲۰۲	۴۹۸	۴۹۵	۸۰۲	۰	۱,۲	۲۲	۰
SF-N50	۳۴۸	۲۰۲	۴۹۶	۴۹۴	۸۰۰	۰	۱,۳	۲۲	۴
CRL38	۳۷۴	۱۴۲	۵۴۵	۵۴۱	۸۸۰	۰	۰,۹	۰	۰
SF-38	۳۵۴	۱۴۲	۵۴۳	۵۴۰	۸۷۴	۰	۱,۸	۲۲	۰
SF-N38	۳۴۸	۱۴۲	۵۴۱	۵۳۸	۸۷۲	۰	۱,۹	۲۲	۴
M50	۳۶۳	۱۸۵	۶۵۰	۲۷۹	۸۳۵	۹۲	۰,۷	۰	۰
M-SF50	۳۴۱	۱۸۵	۶۴۶	۲۷۷	۸۳۲	۹۲	۲,۱	۲۲	۰
M-SF-N50	۳۳۷	۱۸۵	۶۴۴	۲۷۶	۸۲۹	۹۲	۲,۳	۲۲	۴
M38	۳۶۳	۱۳۸	۶۹۴	۲۹۷	۸۹۳	۹۸	۱,۱	۰	۰
M-SF38	۳۴۱	۱۳۸	۶۹۰	۲۹۶	۸۸۹	۹۸	۳	۲۲	۰
M-SF-N38	۳۷	۱۳۸	۶۸۸	۲۹۵	۸۸۷	۹۸	۳,۳	۲۲	۴



## ۲-۳- ساخت آزمونه ها و انجام آزمایش ها:

آزمایش روانی اسلامپ بر روی بتن تازه طبق استاندارد ASTM C143 انجام پذیرفت [۱۹]. به منظور بررسی پارامتر مقاومت فشاری، نمونه‌های بتن مکعبی با ابعاد ۱۵\*۱۵\*۱۵ سانتیمتر ساخته شده و نمونه‌ها تا سن آزمایش، در حوضچه‌های آب عمل-آوری می‌گردند. در سن آزمایش، نمونه‌ها طبق ASTM, C39 مورد آزمایش قرار می‌گیرند. جهت بارگذاری بر روی نمونه‌های مکعبی عمود بر جهت بتن ریزی قالب می‌باشد. بارگذاری فشاری بطور پیوسته و با سرعت مشخصی مابین ۰٫۲ تا ۰٫۴ مگاپاسکال بر ثانیه انجام گرفت. تعداد نمونه‌های مورد آزمایش در سنین ۷، ۲۸ و ۴۲ روز ۲ نمونه در نظر گرفته شد [۲۰].

مطابق مفاد ضابطه شماره ۱۲۳ سازمان برنامه و بودجه کشور با عنوان ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی، جهت حصول اطمینان از عملکرد مناسب بتن مخازن تحت شرایط محیطی مختلف و تامین پایایی آن، آزمایش‌های پایایی مطابق جدول ذیل بر روی نمونه‌های کارگاهی انجام شود و نتایج آزمایش‌ها باید با شاخص دوام ارائه شده در جدول همخوان باشد. با توجه به این که علت اصلی آسیب دیدگی بتن در محیط‌های مهاجم نفوذپذیری بتن می‌باشد، جهت حصول اطمینان از نفوذپذیری کاغی بتن مخازن، انجام آزمایش‌های ردیف ۱ در کلیه شرایط الزامی است. لیکن انجام سایر آزمایش‌ها تنها در محیط‌های خورنده شدید توصیه شده است. از این روی در مطالعه پیش رو جهت بررسی میزان کارآمدی هریک از روش‌های آب بندی آزمایش‌های جذب آب حجمی کوتاه مدت و تعیین عمق نفوذ آب صورت می‌پذیرد.

جدول ۳- آزمایش‌های پایایی و تعیین شاخص دوام [۲۱]

ردیف	پارامتر مورد بررسی	آزمایش	هدف	استاندارد	شاخص دوام
۱	نفوذپذیری بتن	جذب آب حجمی کوتاه مدت	تعیین میزان تخلخل و جذب آب حجمی	BS 1881, Part 2	حداکثر ۲ درصد
		تعیین عمق نفوذ آب	عمق نفوذ آب	BS EN 12390, Part 8	حداکثر ۳۰ میلی متر
۲	پایایی در برابر حمله کلرایدی (خوردگی آرماتور)	شاخص الکتریکی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلر (RCPT)	تعیین شار الکتریکی عبوری از آزمونه به منظور ارزیابی نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر	ASTM C 1202	حداکثر ۲۰۰۰ کولمب
۳	پایایی در برابر دوره‌های متناوب ذوب و انجماد	تعیین مقاومت بتن در برابر دوره‌های متناوب ذوب و انجماد	تعیین تعداد دوره‌های ذوب و انجماد، مدول الاستیسیته دینامیکی	ASTM C 666	بیش از ۶۰

نمونه‌های بتنی برای آزمایش نفوذ آب تحت فشار طبق استاندارد BS EN 12390-8:2009، نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵\*۱۵\*۱۵ سانتیمتر می‌باشد. این نمونه‌ها تا سن آزمایش در محلول آب آهک اشباع عمل‌آوری شده و سپس در دستگاه آزمایش نفوذ آب قرار می‌گیرند [۲۲]. در این دستگاه بمدت ۷۲ ساعت (۳ شبانه روز) آب با فشار ۵ بار (۱۰۵\*۵ پاسکال) بر نمونه‌ها اثر می‌کند. نمونه‌های مکعبی پس از سه روز قرار گرفتن در دستگاه نفوذ آب بلافاصله شکسته شده و مقدار نفوذ آب در آن‌ها قرائت می‌گردد. براساس استاندارد، حداکثر عمق نفوذ آب بعنوان نتیجه‌ی آزمایش گزارش می‌گردد. با این حال، با توجه به تجربیات

گذشته، علاوه بر حداکثر نفوذ، میانگین نفوذ آب در طول جبهه‌ی نفوذ نیز با اندازه گیری ۵ نقطه ثبت گردید. آزمایش جذب آب حجمی اولیه کوتاه مدت بر اساس استاندارد BS 1881 بدین صورت که پس از خشک کردن نمونه های مکعبی وزن خشک آنها اندازه گیری و ثبت و سپس با غرقاب کردن نمونه به مدت ۳۰ دقیقه، و خروج و توزین نمونه پس از گذشت این زمان، از تقسیم تفاضل وزن مرطوب و خشک بر وزن خشک جذب آب کوتاه مدت محاسبه می گردد [۲۳]. جذب آب نهایی بتن نیز مشابه با این روند و بر اساس استاندارد BS1881 اندازه گیری می گردد با این تفاوت که نمونه ها تا رسیدن به یک وزن ثابت یعنی بیشترین میزان جذب آب غرقاب می گردند.

### ۳. ارائه نتایج

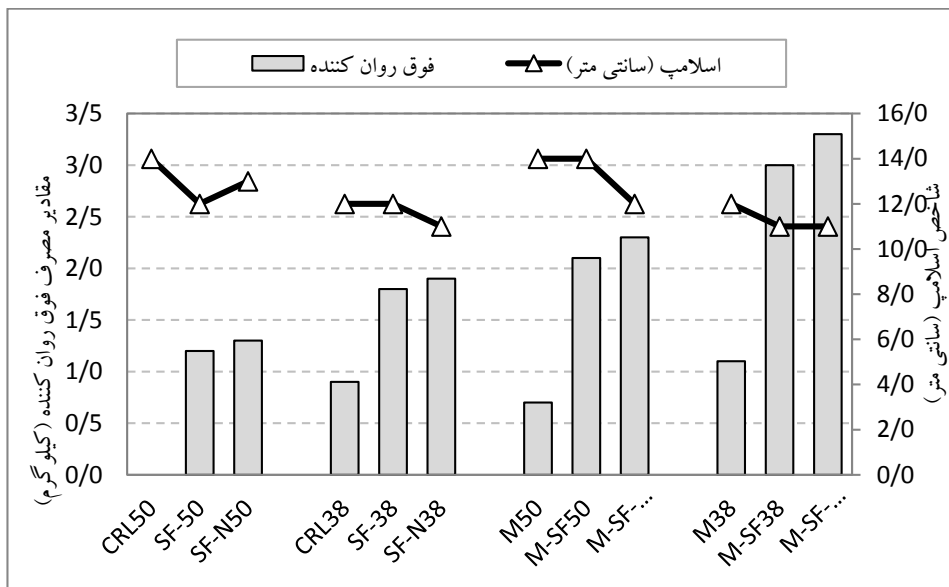
#### ۳-۱- نتایج آزمایش سنجش کارایی:

در برنامه آزمایشگاهی یادشده در جهت پیشگیری از ورود متغیرهای ثانویه سعی شد با ثابت نگاه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی در دو عدد ۰,۳۸ و ۰,۵، تغییرات ناشی اثر گذار در جهت افزایش نیاز آبی با افزودن مقادیر متفاوت فوق روان کننده جبران شد. در این راستا میزان متغیر مصرف فوق روان کننده با هدف حفظ شاخص اسلامپ در محدوده هدف یعنی ۱۰ تا ۱۵ سانتی متر در روند ساخت اختلاط و با افزودن تدریجی مقادیر افزودنی تعیین شد. بر اساس توضیحات ارائه شده مقادیر مصرف فوق روان کننده بطور غیرمستقیم معرف نیاز آبی بیشتر مخلوط تازه می باشد.

بیشترین نیاز آبی برای طرح M-SF-N38 ثبت شده است. تغییر نیاز مصرف فوق روان کننده از ۰ برای طرح شاهد (CRL50) به عدد ۳,۳ کیلوگرم برای این طرح در نتیجه اثر گذاری توامان هر سه پارامتر کاهش کارایی کاهنده نسبت آب به سیمان از ۰,۵ به ۰,۳۸، جایگزینی بخشی از سیمان با ریزرکننده های با ابعاد میکرو یا نانو، افزایش ریزی مصالح با اصلاح دانه بندی می باشد.

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری و شاخص روانی مخلوط تازه

کد طرح	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)				
	فوق روان کننده کیلوگرم	اسلامپ (سانتی متر)	۷ روز	۲۸ روز	۴۲ روز
CRL50	۰	۱۴,۰	۱۹,۷	۲۹,۱	۳۱,۷
SF-50	۱,۲	۱۲,۰	۲۲,۶	۳۱,۵	۳۴,۰
SF-N50	۱,۳	۱۳,۰	۲۲,۳	۳۲,۲	۳۵,۱
CRL38	۰,۹	۱۲,۰	۲۵,۲	۳۲,۲	۳۵,۰
SF-38	۱,۸	۱۲,۰	۲۸,۶	۳۷,۷	۴۰,۵
SF-N38	۱,۹	۱۱,۰	۳۱,۳	۴۰,۵	۴۳,۲
M50	۰,۷	۱۴,۰	۲۱,۲	۳۱,۳	۳۴,۵
M-SF50	۲,۱	۱۴,۰	۲۴,۸	۳۴,۰	۳۹,۶
M-SF-N50	۲,۳	۱۲,۰	۲۸,۳	۳۷,۷	۴۱,۴
M38	۱,۱	۱۲,۰	۳۰,۴	۴۲,۳	۴۵,۱
M-SF38	۳,۰	۱۱,۰	۳۳,۱	۴۶,۹	۵۴,۱
M-SF-N38	۳,۳	۱۱,۰	۳۵,۹	۴۹,۷	۶۰,۶



شکل ۲- نتایج آزمایش جریان اسلامپ و تغییرات مصرف فوق روان کننده

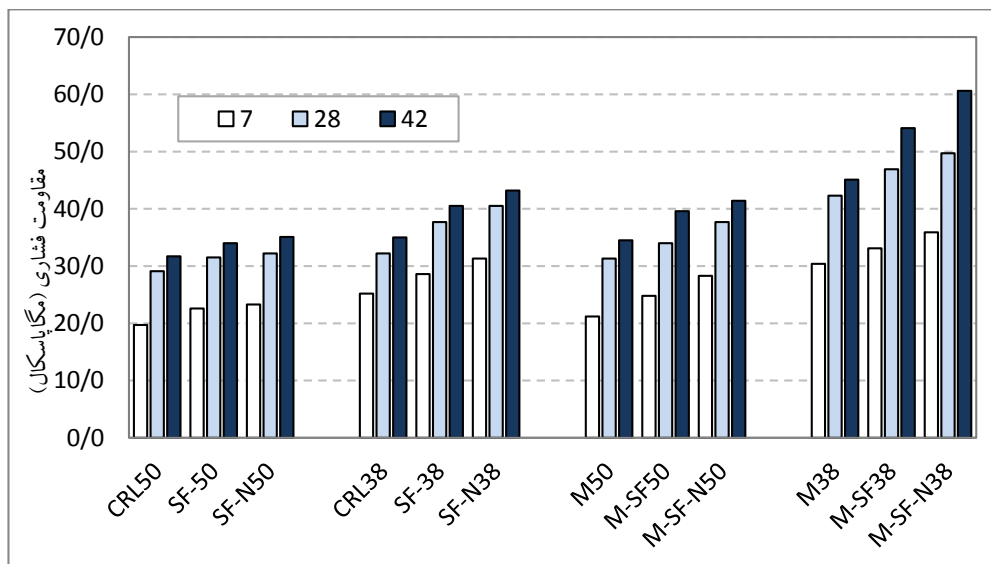
### ۲-۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری:

در گروه اول طرح های اختلاط با افزودن میکرو سیلیس، مقاومت فشاری اولیه و نهایی به ترتیب ۱۴ و ۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می یابد. با افزودن نانو سیلیس به این مخلوط روند افزایشی مقاومت ادامه داشته و به ترتیب به ۱۸ و ۱۰ درصد مقاومت طرح شاهد ارتقا می یابد.

مطابق نتیجه مشاهده می شود که اثرگذاری دوده سیلیس بصورت مجزا و در حالت مصرف همزمان با نانو سیلیس با افزایش قابل ملاحظه ای در سنین اولیه همراه است. اما با افزایش سن عمل آوری از درصد افزایش مقاومت ناشی از این مواد کاسته می شود.

در گروه دوم طرح های اختلاط تنها با تغییر نسبت آب به سیمان از ۰,۵ به ۰,۳۸، مقاومت فشاری ۲۸ روزه از ۳۱,۷ به ۳۴,۵ مگاپاسکال افزایش یافته است.

نکته قابل توجه در نتایج نمونه های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰,۵ و ۰,۳۸ آن است که با کاهش نسبت آب به سیمان اثرگذاری دوده سیلیس و نانوذرات موجب افزایش مقاومت ۱۵ و ۲۳ درصدی در سن ۲۸ روز در مقایسه با طرح CRL38 شده است. این نتیجه به معنی آن است که در نسبت های آب به سیمان پایینتر اثرگذاری مثبت ریزپرکننده های پوزولانی بیشتر است.



شکل ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

اما مقایسه نتایج طرح های گروه سوم موید آن است که تنها با اصلاح دانه بندی مخلوط سنگدانه می توان افزایش حدود ۷ درصدی مقاومت فشاری نهایی را نتیجه داد بطوری که مقاومت ۴۲ روزه طرح شاهد از ۳۱,۷ به ۳۵ مگاپاسکال برای طرح M50 در نتیجه اصلاح دانه بندی و بدون مصرف افزودنی یا کاهش نسبت آب به سیمان افزایش یافته است.

اما در این گروه با افزودن میکرو سیلیس و نانو سیلیس به ترتیب در طرح های M-SF50 و M-SF-N50 مقاومت فشاری از ۳۴,۵ برای طرح M50 به ۳۹,۶ و ۴۱,۴ افزایش یافته است که به معنی افزایش ۱۵ و ۲۰ درصدی می باشد. مقایسه این روند تغییرات با طرح ساخته شده با مصالح سنگی اولیه (گروه اول) نشانگر آن است که اصلاح دانه بندی از طریق بهینه سازی ترکیب مصالح و مصرف ۵ درصدی پودر سنگ با افزایش اثرگذاری ریزپرکننده ها همراه بوده است. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که اصلاح دانه بندی و بهینه سازی ترکیب مصالح به عنوان راهکار ارزان قیمت ایده موثری جهت استفاده کارآمد و اقتصادی از افزودنی ها در جهت ارتقای مشخصات می باشد.

اما در گروه چهارم طرح های اختلاط بکارگیری همزمان ایده کاهش نسبت آب به سیمان و اصلاح دانه بندی منجر به کسب بهترین خواص مکانیکی در سنین اولیه و نهایی شده است. مطابق نتایج مقاومت فشاری طرح M-SF-N38 در مقایسه با طرح شاهد در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب با افزایش مقاومت از ۱۹,۷، ۲۹,۱ و ۳۱,۷ مگاپاسکال به ۳۵,۹، ۴۹,۷ و ۶۰,۶ افزایش مقاومت ۸۲، ۷۱ و ۹۱ درصدی را به دنبال داشته است.

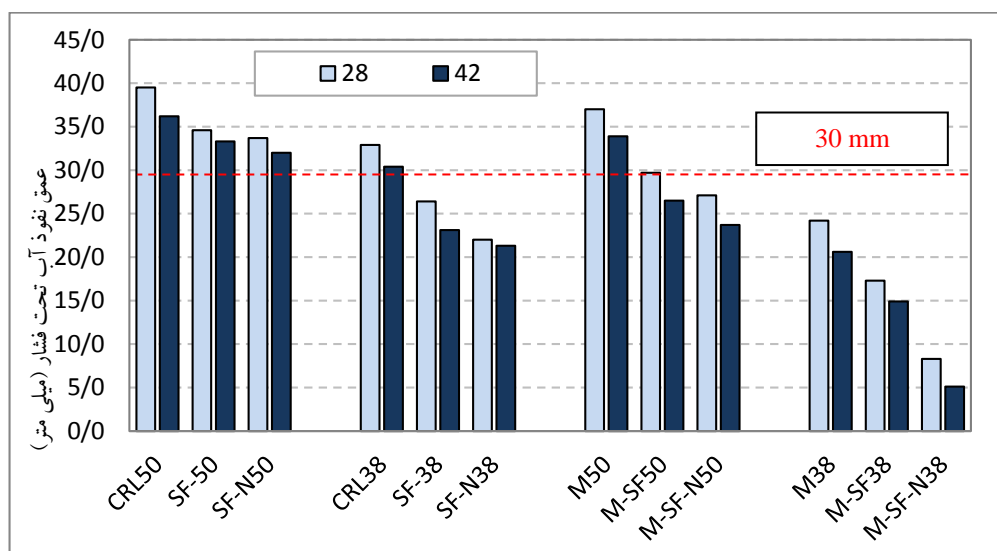
### ۳-۳- نتایج آزمایش اندازه گیری عمق نفوذ آب تحت فشار:

نتایج آزمایش تعیین بیشترین عمق نفوذ آب تحت فشار در آزمون مکعبی بصورت کلی کاهش عمق نفوذ به معنی ارتقای پایایی با گذشت زمان عمل آوری از ۲۸ تا ۴۲ روز را در اختیار می گذارد. این ارتقای مشخصات در طرح های حاوی مواد پوزولانی بیشتر از سایر طرح ها مشهود است. این تغییرات نشانگر اهمیت بالای عمل آوری در طرح های حاوی این مواد را نشان می دهد. از آنجایی که تکمیل واکنش های پوزولانی نیازمند وجود رطوبت و آب جهت شرکت در واکنش می باشد در صورت عدم تامین شرایط عمل آوری موردنیاز ضمن عدم تامین مشخصات هدف، هدررفت هزینه صرف شده قابل پیش بینی می باشد. کمترین میزان نفوذپذیری برای طرح M-SF-N38 معادل ۸,۳ و ۵,۱ میلی متر در سنین ۲۸ و ۴۲ روز اندازه گیری شده است. این نتایج در مقایسه با مقادیر ۳۹,۵ و ۳۶,۲ برای طرح شاهد به ترتیب کاهش تقریبی ۸۰ و ۸۵ درصدی را نشان می دهد.

جدول ۵- نتایج آزمایش نفوذ آب تحت فشار و جذب آب اولیه و نهایی

کد طرح	نفوذ آب تحت فشار (عمق)		جذب آب کوتاه مدت (درصد)		جذب آب نهایی (درصد)	
	روز ۲۸	روز ۴۲	روز ۲۸	روز ۴۲	روز ۲۸	روز ۴۲
CRL50	۳۹,۵	۳۶,۲	۴,۴	۴,۱	۵,۲	۴,۷
SF-50	۳۴,۶	۳۳,۳	۳,۸	۳,۳	۴,۲	۳,۹
SF-N50	۳۳,۷	۳۲	۳,۷	۳,۱	۴,۱	۳,۸
CRL38	۳۲,۹	۳۰,۴	۳,۵	۳,۴	۴,۲	۴,۰
SF-38	۲۶,۴	۲۳,۱	۲,۴	۱,۹	۳,۳	۲,۷
SF-N38	۲۲,۰	۲۱,۳	۲,۰	۱,۶	۲,۸	۲,۱
M50	۳۷,۰	۳۳,۹	۳,۶	۳,۵	۴,۶	۴,۱
M-SF50	۲۹,۷	۲۶,۵	۲,۹	۲,۳	۳,۷	۳,۲
M-SF-N50	۲۷,۱	۲۳,۷	۲,۷	۱,۹	۳,۴	۲,۵
M38	۲۴,۲	۲۰,۶	۱,۹	۱,۷	۴,۰	۳,۵
M-SF38	۱۷,۳	۱۴,۹	۱,۱	۰,۹	۱,۸	۱,۳
M-SF-N38	۸,۳	۵,۱	۰,۶	۰,۴	۱,۰	۰,۸

با توجه به تعیین حد ۳۰ میلی متر جهت حدود پذیرش نشریه ۱۲۳ سازمان برنامه و بودجه کشور جهت کاربری های در معرض نفوذپذیری و خوردگی، مطابق نتایج هیچ یک از طرح های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰,۵ و دانه بندی اصلاح نشده در محدود پذیرش قرار نگرفته اند، بطوری که حتی بکارگیری دوده سیلیس و نانوذرات بصورت توامان نیز کارساز واقع نشده است. همچنین اصلاح دانه بندی اگرچه با کاهش نفوذپذیری از ۳۶,۲ به ۳۳,۹ منجر شده است لیکن تنها با استفاده از مواد پوزولانی تامین حدود پذیرش و کسب شاخص عمق نفوذ ۲۶,۵ و ۲۳,۷ میسر شده است.

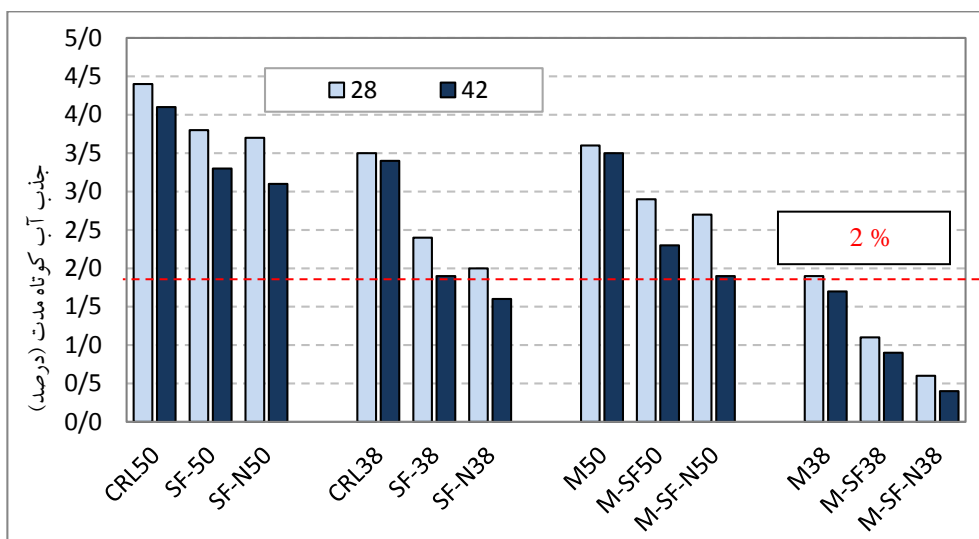


شکل ۴- نتایج آزمایش نفوذ آب تحت فشار

مقایسه دو ایده کاهش نسبت آب به سیمان و اصلاح دانه بندی نشان می دهد که ایده دوم اثرگذاری بیشتری در ارتقای خواص بتن در منظر کاهش نفوذپذیری دارد. در این مقایسه عمق نفوذ از عدد ۳۶,۲ میلی متر برای طرح شاهد در نتیجه کاهش نسبت آب به سیمان به ۰,۳۸ به عدد ۳۰,۴ میلی متر رسیده است در حالیکه با اصلاح دانه بندی عمق نفوذ به ۳۳,۹ میلی متر کاهش می یابد. در کلیه طرح ها بکارگیری دوده سیلیس با کاهش نفوذپذیری همراه است و همچنین بکارگیری توامان دوده سیلیس و نانوذرات کاهش بیشتر نفوذپذیری را موجب می گردد اما تفاوت عملکرد در درصد تغییرات این پامتر در گروه های مختلف طرح اختلاط است. نتایج بطور کلی حاکی از نرخ اثرگذاری بیشتر بکارگیری نانو مواد در طرح های حاوی نسبت آب به سیمان پایینتر و طرح های با دانه بندی اصلاح شده است.

### ۳-۴- نتایج آزمایش اندازه گیری درصد جذب آب کوتاه مدت:

آزمایش اندازه گیری درصد جذب آب کوتاه مدت ساده ترین روش ارزیابی نفوذپذیری بتن سخت شده به شمار می آید. نشریه ۱۲۳ سازمان برنامه و بودجه کشور ویژه مخازن آب زمینی حدپذیرش ۲ درصد را برای این آزمون در کاربری بناهای آبی تعیین کرده است. بهترین نتایج به معنی کمترین درصد جذب آب برای طرح های ساخته شده با دانه بندی اصلاح شده و نسبت آب به سیمان ۰,۳۸ اندازه گیری شده است. در حالیکه مصرف توامان دوده سیلیس و نانوسیلیس در طرح M-SF-N50 منجر به کسب درصد جذب آب ۲,۷ و ۱,۹ درصد در سنین ۲۸ و ۴۲ روز شده است نتایج طرح M38 نشان می دهد که بدون مصرف این افزودنی ها و تنها با کاهش نسبت آب به سیمان و اصلاح دانه بندی میتوان درصد جذب آب به حدود پذیرش رساند بطوری که نتایج این آزمون در سنین ۲۸ و ۴۲ روز برای این طرح به ترتیب ۱,۹ و ۱,۷ درصد ثبت شده است. مطابق نتایج مشاهده می شود با بکارگیری نسبت آب به سیمان ۰,۵ حتی در حالت استفاده از دانه بندی اصلاح شده و مصرف دوده سیلیس کسب حدود پذیرش ۲ درصدی میسر نشده است لیکن مصرف همزمان دوده سیلیس و نانو سیلیکا در سن ۴۲ روز به کاهش این شاخص به ۱,۹ درصد انجامیده است. مقایسه نتایج طرح های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰,۳۸ و طرح های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰,۵ ولی اصلاح دانه بندی موید آن است اثرگذاری عامل کاهش نسبت آب به سیمان بر ارتقای پایایی بتن سخت شده بیش از اصلاح دانه بندی است به عنوان مثال در حالی که در سن ۴۲ روز برای طرح های SF-38 و SF-N38 درصد جذب آب معادل ۴۳,۲ و ۳۶,۴ درصد عدد مربوط به نمونه شاهد رسیده است نتایج مشابه کسب این شاخص برابر ۵۲,۳ و ۴۳,۲ درصد برای طرح های M-SF50 و M-SF-N50 را در اختیار می گذارد. مقایسه نتایج گروه های چهارگانه طرح های اختلاط نشان می دهد که اثرگذاری بکارگیری میکرو و نانوسیلیس در کاهش میزان نفوذپذیری در طرح های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰,۳۸ و بکارگیری دانه بندی اصلاح شده بیشتر از سایر حالات است.



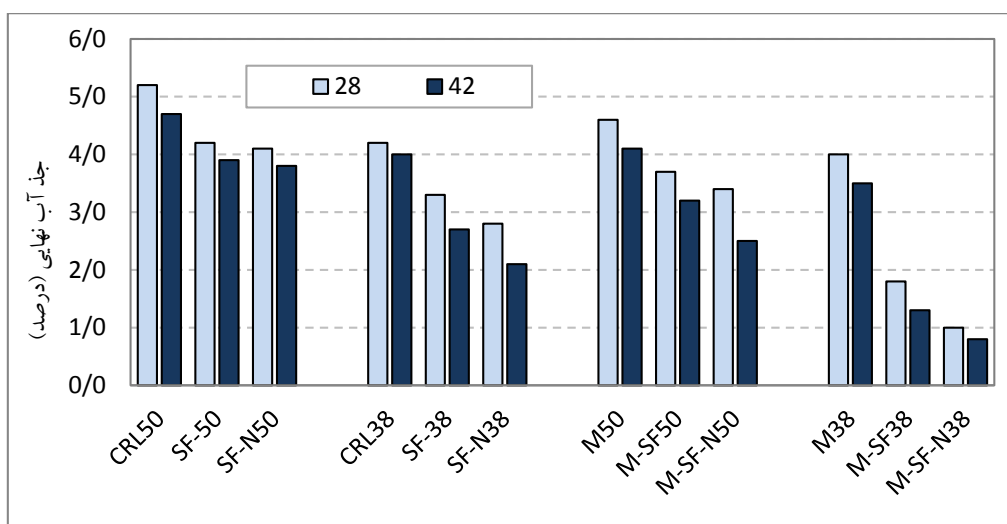
شکل ۵- نتایج آزمایش جذب آب کوتاه مدت

### ۳-۵- نتایج آزمایش اندازه گیری درصد جذب آب نهایی:

نتایج اندازه گیری درصد جذب آب نهایی نمونه های سخت شده مطابق انتظار افزایش میزان جذب آب نسبت به اعداد ثبت شده برای زمان نیم ساعت را نشان می دهد. افزایش مقادیر جذب آب در حالی است که روند تغییرات نتایج ثبت شده برای حالت کوتاه مدت در این حالت نیز حفظ شده است.

مطابق با این نتایج کمترین درصد جذب آب نهایی برای طرح M-SF-N38 معادل رقم ۰.۸ درصد در سن ۴۲ روز اندازه گیری شده است.

بکارگیری توامان چهار ایده کاهش نسبت آب به سیمان، اصلاح دانه بندی مصالح سنگی، بکارگیری ریز پرکننده پوزولانی میکرو سیلیس، مصرف نانوذرات اکسید سیلیسیم موجب شده است که درصد جذب آب نهایی بتن در سنین ۲۸ و ۴۲ روز با کاهش ۸۰ و ۸۳ درصدی از حالت طرح شاهد (CRL50) برابر ۵.۲، ۴.۷ و ۱ درصد به رقم ۰.۸ درصد تقلیل یابند. این تغییرات حاکی اثرگذاری موفق ایده مصرف نانوذرات در ارتقای دوام و کاهش نفوذپذیری بتن می باشند.



شکل ۶- نتایج آزمایش جذب آب نهایی



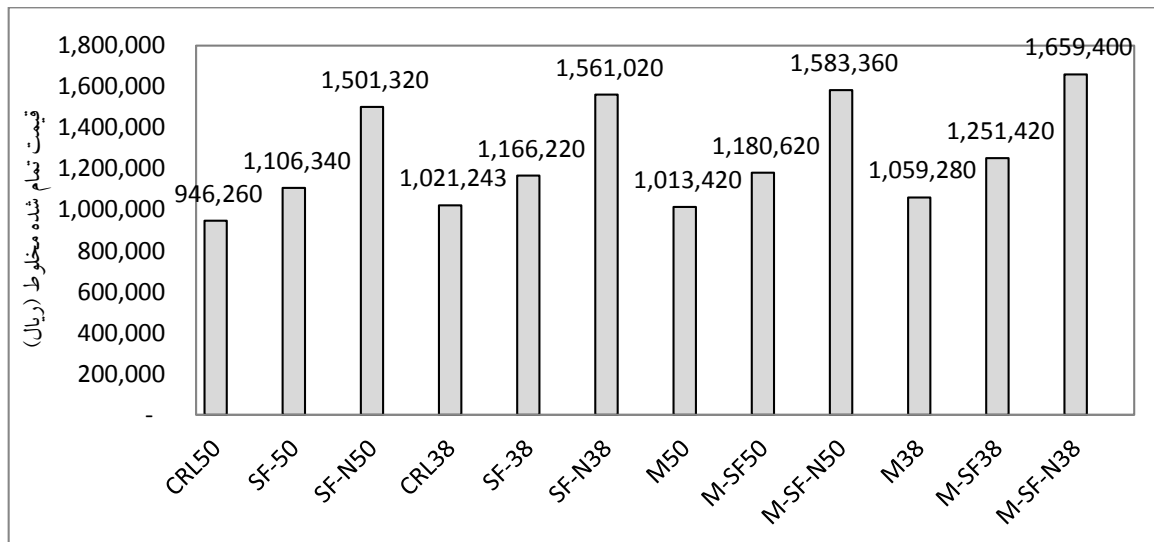
اما گردآوری اطلاعات برنامه آزمایشگاهی این پایان نامه در خصوص میزان اثرگذاری هر یک از ایده های فوق الذکر در کنار گزارش تغییرات هزینه تمام شده مخلوط های بتنی امکان انتخاب موثرترین ایده در عین تامین ملاحظات اقتصادی جهت ارتقای دوام بتن را میسر خواهد ساخت.

نتایج قابل توجه این مطالعه آن است که در حالت بکارگیری نسبت آب به سیمان ۰,۳۸ و دانه بندی اصلاح شده با بکارگیری میکرو و نانو سیلیس درصد جذب آب نهایی از ۳,۵ به ۰,۸ معادل ۷۷ درصد کاهش می یابد این در حالی است که در طرح ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰,۵ بدون اصلاح دانه بندی کاهش درصد جذب آب از ۴,۷ به ۳,۸ درصد معادل ۱۹ درصد کاهش، در طرح ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰,۳۸ بدون اصلاح دانه بندی از ۴ به ۲,۱ درصد معادل ۴۷ درصد کاهش و در طرح های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰,۵ با اصلاح دانه بندی از ۴,۱ به ۲,۵ معادل ۴۰ درصد کاهش اندازه گیری و گزارش شده است. این تغییرات به معنی آن است که اثرگذاری نانو و میکرو سیلیس در حالتی نمود بیشتری خواهد یافت که با کاهش نسبت آب به سیمان و بکارگیری دانه بندی بهینه، منافذ ریزساختار بتن به حداقل اندازه خود کاهش داده شود. در غیر این صورت علی رغم صرف هزینه مستقیم بکارگیری این مواد و هزینه غیرمستقیم مصرف افزودنی فوق روان کننده جهت جبران کاهش کارایی ناشی از حضور ریزپرکننده ها، اثرگذاری موثر این مواد حاصل نخواهد شد.

### ۳-۶- بررسی اقتصادی نسبت های اختلاط با مقایسه قیمت تمام شده مخلوط:

در این بخش به بررسی هزینه تمام شده مخلوط در مقایسه با مشخصات فنی بتن سخت شده پرداخته شده است. مقادیر ریالی هر یک از اجزا از آیین نامه مسابقات بتن خودتراکم اقتصادی که توسط انجمن بتن ایران بطور سالانه برگزار می گردد، گرفته شده است. مطابق نتایج تشریح شده ذیل آزمایش های مقاومت فشاری و آزمایش نفوذپذیری مشاهده گردید که بکارگیری میکروسیلیس بصورت مجزا و یا مصرف همزمان آن با نانو سیلیس در مخلوط های با نسبت آب به سیمان پایین یا دانه بندی نامطلوب و ناپیوسته مصالح سنگی اثرگذاری کارآمدی در جهت ارتقای مشخصات بتن ندارد.

در این بخش به مقایسه ریالی قیمت تمام شده مخلوط ها با یکدیگر پرداخته شده است. با توجه به قیمت بالای افزودنی های ویژه شامل میکروسیلیس، نانو سیلیس و فوق روان کننده در مقایسه با سایر اجزای بتن، نتایج نشان می دهد که علی رغم صرف هزینه یادشده در مصرف این مواد در طرح های SF-38، SF-N38، M-SF50 و M-SF-N50 بکارگیری نسبت آب به سیمان بالا و مصرف مصالح سنگی با دانه بندی ناپیوسته از پتانسل قابل کسب در بهبود مشخصات استفاده نشده است و بخشی از هزینه پرداخت شده به هدر می رود.



شکل ۷- تغییرات قیمت تمام شده مخلوط

#### ۴. جمع بندی

در این تحقیق با هدف دستیابی به طرح اختلاط بهینه از نظر پارامترهای نفوذپذیری، خواص مکانیکی، کارایی مطلوب و نهایتاً مولفه اقتصادی برنامه آزمایشگاهی تنظیم و اجرایی شد. بدین منظور طرح های اختلاط در چهار گروه قابل دسته بندی می باشد. در گروه اول ساخت نمونه با نسبت های پیشنهادی روش طرح اختلاط ACI در دستور کار قرار گرفت. در گروه دوم با کاهش نسبت آب به سیمان در جهت ارتقای خواص بتن اقدام گردید. در گروه سوم با واکاوی مشخصات ظاهری سنگدانه ها و با روش اصلاح دانه بندی مندرج در روش طرح مخلوط ملی ایران، نسبت به بهینه سازی مخلوط مصالح سنگی و اصلاح مدول نرمی مصالح جهت دستیابی به بهترین تراکم سنگدانه ای اقدام شد. در گروه چهارم مجدد با کاهش نسبت آب به سیمان نسبت به طرح اصلاح شده ارتقای مشخصات کیفی بتن مورد تحقیق قرار گرفت.

- در نسبت های آب به سیمان پایینتر اثرگذاری مثبت ریزپرکننده های پوزولانی بیشتر است. این پدیده را با ذکر دلایل ذیل می توان توجیه کرد. در نسبت های آب به سیمان بالاتر منافذ ریزساختار بتن از جهت تعدد و اندازه بیشتر بوده و امکان مسدود ساختن این منافذ با مواد میکرو و نانو میسر نیست. از طرفی با توجه به آنکه واکنش پوزولان ها با فراورده های ناشی از هیدراتاسیون صورت میگیرد، وجود محصولات کمتر ناشی از سطح پایینتر هیدراتاسیون در نسبت های آب به سیمان بالاتر پیشرفت کمتری در واکنش های پوزولانی را به همراه دارد.

- نتایج آزمایش تعیین بیشترین عمق نفوذ آب تحت فشار در آزمون مکعبی بصورت کلی کاهش عمق نفوذ به معنی ارتقای پایایی با گذشت زمان عمل آوری از ۲۸ تا ۴۲ روز را در اختیار می گذارد. این ارتقای مشخصات در طرح های حاوی مواد پوزولانی بیشتر از سایر طرح ها مشهود است. این تغییرات نشانگر اهمیت بالای عمل آوری در طرح های حاوی این مواد را نشان می دهد. از آنجایی که تکمیل واکنش های پوزولانی نیازمند وجود رطوبت و آب جهت شرکت در واکنش می باشد در صورت عدم تامین شرایط عمل آوری موردنیاز ضمن عدم تامین مشخصات هدف، هدررفت هزینه صرف شده قابل پیش بینی می باشد.

- نتایج قابل توجه این مطالعه آن است که اثرگذاری نانو و میکرو سیلس در حالتی نمود بیشتری خواهد یافت که با کاهش نسبت آب به سیمان و بکارگیری دانه بندی بهینه، منافذ ریزساختار بتن به حداقل اندازه خود کاهش داده شود. در غیر این صورت علی رغم صرف هزینه مستقیم بکارگیری این مواد و هزینه غیرمستقیم مصرف افزودنی فوق روان کننده جهت جبران کاهش کارایی ناشی از حضور ریزپرکننده ها، اثرگذاری موثر این مواد حاصل نخواهد شد.
- مطابق نتایج تشریح شده ذیل آزمایش های مقاومت فشاری و آزمایش نفوذپذیری مشاهده گردید که بکارگیری میکروسیلیس بصورت مجزا و یا مصرف همزمان آن با نانوسیلیس در مخلوط های با نسبت آب به سیمان پایین یا دانه بندی نامطلوب و ناپیوسته مصالح سنگی اثرگذاری کارآمدی در جهت ارتقای مشخصات بتن ندارد.
- مجموعه نتایج حاکی از آن است که طرح M38 با قیمت تمام شده ۱،۰۵۹،۲۸۰ ریال با مقاومت فشاری ۴۲ روزه ۴۵،۱ مگاپاسکال، عمق نفوذ آب تحت فشار ۲۰،۶ میلی متر (کمتر از ۳۰ میلی متر) و درصد جذب آب اولیه ۱،۷ (کمتر از ۲ درصد) و درصد جذب آب نهایی ۳،۵ درصد ضمن تامین ملاحظات فنی و حدود پذیرش موردنظر اقتصادی ترین طرح به شمار می آید. طرح M-SF38 با قیمت تمام شده ۱،۲۵۱،۴۲۰ ریال با مقاومت فشاری ۴۲ روزه ۵۴،۱ مگاپاسکال، عمق نفوذ آب تحت فشار ۱۴،۹ میلی متر (کمتر از ۳۰ میلی متر) و درصد جذب آب اولیه ۰،۹ (کمتر از ۲ درصد) و درصد جذب آب نهایی ۱،۳ درصد به لحاظ فنی در اولویت بالاتر ولی پرهزینه تر می باشد. همچنین M-SF-N38 با قیمت تمام شده ۱،۶۵۹،۴۰۰ ریال با مقاومت فشاری ۴۲ روزه ۶۰،۶ مگاپاسکال، عمق نفوذ آب تحت فشار ۵،۱ میلی متر (کمتر از ۳۰ میلی متر) و درصد جذب آب اولیه ۰،۴ (کمتر از ۲ درصد) و درصد جذب آب نهایی ۰،۸ درصد به لحاظ فنی در بالاترین اولویت لیکن پرهزینه ترین طرح محسوب می گردد.

## ۵. مراجع:

- ۱- نشریه شماره ۳۱۲ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، "ضوابط عمومی طراحی سازه های آبی بتنی"
- ۲- آیین نامه بتن ایران "آبا"، تجدید نظر اول نشریه ۱۲۰، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، معاونت امور فنی و تدوین معیارها، ابلاغیه شماره ۵۴/۴۸۵۵-۱۰۵/۶۴۳۷ مورخ ۱۳۷۹/۰۹/۲۹ از نوع گروه اول
- ۳- نشریه ۲۳۷ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، "راهنمای بهره برداری و نگهداری تصفیه خانه های فاضلاب شهر (تصفیه مقدماتی)"
- ۴- نشریه ۴۹۴ معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، "راهنمای اندازه گیری و ثبت پارامترها در تصفیه خانه های فاضلاب و پردازش آن"
- ۵- نشریه ۱۵۰ سازمان برنامه و بودجه با عنوان "سازه های بتنی محیط زیست (ترجمه ACI 350R-89)"
- ۶- مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۴)، "نشریه ی شماره ض-۴۲۸: آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی)"، چاپ اول، تهران، ایران.
- ۷- مدارک فنی پروژه بیمارستان ۹۶ تختخوابی لنگرود
- ۸- نشریه ی ۱۲۴ سازمان برنامه و بودجه که با عنوان مشخصات فنی عمومی مخازن آب زمینی، ۱۳۷۲

9- *The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete, S. Koliyas, C. Georgiou, Cement & Concrete Composites 27 (2005) 211–216*

10- *M.F.M. Zain, Md. Safiuddin, H. Mahmud, Cement and Concrete Research 30 (2000) 1501 – 1505*

- 11- *Estimation of the permeability of silica fume cement concrete, Ha-Won Song, Seung-Woo Pack, Sang-Hyeok Nam, Jong-Chul Jang, Velu Saraswathy, Construction and Building Materials 24 (2010) 315–321*
- 12- *The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete, Ali Nazari, Shadi Riahi, Composites: Part B 42 (2011) 570–578*
- 13- *Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M. and Pouladkhan, A.R., 2012. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> micro and nanoparticles. Materials & Design, 34, pp.389-400.*
- 14- *Alireza Khaloo, Mohammad Hossein Mobini, Payam Hosseini, Influence of different types of nano-SiO<sub>2</sub> particles on properties of high-performance concrete, Construction and Building Materials 113 (2016) 188–201*
- ۱۵- سند گسترش نانو در افق ۱۴۰۴، تصویبنامه هیئت وزیران با شماره ۱۲۱۳۳۳/ت/۵۳۰۶۸ ه مورخ ۱۳۹۶/۰۹/۲۹
- 16- *ASTM C33-03, "Standard Specification for Concrete Aggregates" Approved July 10, 2002, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.*
- 17- *ACI 211.1-91, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete ", Reported by ACI Committee 211, Reapproved 1997*
- ۱۸- روش ملی طرح مخلوط بتن، نشریه شماره ۴۷۹ مرکز تحقیقات، راه و شهرسازی (سال ۱۳۹۴)
- 19- *ASTM C 143/C 143M – 03, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete" Published September 2003. Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.*
- 20- *ASTM, C39. "39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens." ASTM International (2001).*
- ۲۱- نشریه ی ۱۲۳ سازمان برنامه و بودجه، ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی، ۱۳۹۵
- 22- *British Standard EN, Testing Hardened Concrete – Part 8: Depth of Penetration of Water Under Pressure, BS EN 12390-8: 2009, 2009. 7 pp.*
- 23- *BS 1881: Part 122: 1983, Testing concrete, Method for determination of water absorption,*