بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران گرایش سازه

بررسی اندرکنش تهاجم یون کلراید و سولفات در بتن‌های متراکم حاوی نانو رس

استاد راهنما:

دکتر حمید رحمانی

پژوهشگر:

یاسر ایمانی اسبق

شهریور ۱۳۹۳

رساله‌ی حاضر، حاصل پژوهش‌های نگارنده در دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران گرایش سازه است که در شهریور ماه سال ۱۳۹۳ در دانشکده‌ی فنی و مهندسی دانشگاه یاسوج به راهنمایی جناب آقای دکتر حمید رحمانی از آن دفاع شده و کلیه‌ی حقوق مادی و معنوی آن متعلق به دانشگاه یاسوج است.

سپاسگزاری

سپاس و ستایش خداوندی را سزاست که کسوت هستی را بر اندام موزون آفرینش بپوشانید و تجلیات قدرت لایتزالی را در مظاهر و آثار طبیعت نمایان گردانید. بار الها! من با یاد تو، به تو تقرّب می‌جویم و تو را به پیشگاه تو شفیع می‌آورم و از تو خواستارم، به کرمت، مرا به خودت نزدیک گردانی و یاد خود را به من الهام کنی و بر من رحمت آوری و به آنچه بهره و نصیب من ساخته‌ای، خشنودم قرار دهی و در همه حال به فروتنی‌ام وا داری.

از جناب آقای دکتر حمید رحمانی استاد راهنمای محترم پایان‌نامه که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و در همه حال برایشان آرزوی موفقیت و سربلندی را از خداوند منان خواستارم.

همچنین از دوست عزیزم جناب آقای مهندس رودیان که بنده را در به سرانجام رسانیدن این پایان‌نامه یاری نموده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان
آرام بخش آلام زمینی‌ام است...

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم
به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از
دریای بی‌کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.
امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما
ره آوردی گران سنگ‌تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم،
باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگیتان را بزداید.
بوسه بر دستان پرمهرتان

و تقدیم به
برادرم حسام
که با هم آغاز کردیم، در کنار هم آموختیم
و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم.
قلبم سرشار از عشق به توست و موفقیت و خوشبختیت منتهای آرزویم.

فهرست مطالب

عنوان ..... **صفحه**

فصل ۱ کلیات ۱
۱-۱ مقدمه ۱
۱-۲ اهمیت و ضرورت پژوهش ۲
۱-۳ اهداف پژوهش ۳
۱-۴ شیوه پژوهش ۳
۱-۵ مروری بر فصل‌های پایان نامه ۳
فصل ۲ مروری بر پژوهش‌های گذشته ۵
۲-۱ مقدمه ۵
۲-۲ بتن متراکم ۵
۲-۲-۱ پارامترهای مؤثر در ساخت بتن با مقاومت بالا ۶
۲-۲-۲ بتن‌های با مقاومت بالا ۱۰
۲-۲-۳ کاربردهای بتن با مقاومت بالا ۱۱
۲-۳ دوام بتن در برابر تهاجم یون کلراید ۱۲
۲-۳-۱ مکانیزم خوردگی آرماتور در بتن ۱۳
۲-۳-۲ مکانیزم خوردگی آرماتور در حضور یون کلراید ۱۴
۲-۳-۳ یون کلراید آزاد و مقید ۱۶
۲-۳-۴ آزمایش‌های مربوط به تهاجم یون کلر ۱۷
۲-۳-۴-۱ آزمایش نفوذپذیری یون کلراید تسریع شده (RCPT) ۱۷
۲-۳-۴-۲ آزمایش مهاجرت یون کلراید ۱۸
۲-۳-۴-۳ آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی (اهمی) ۱۹
۲-۳-۴-۴ جذب آب موئینه بتن ۱۹
۲-۳-۴-۵ آزمایش نیم پیل ۲۰
۲-۳-۴-۶ آزمایش تعیین پتانسیل و شدت خوردگی گالوانیکی (ASTM G 109) ۲۱
۲-۳-۴-۷ آزمایش تعیین عمق نفوذ یون کلر ۲۱
۲-۳-۴-۸ آزمایش تعیین پروفیل یون کلر و تعیین ضریب نفوذ ۲۲
۲-۳-۴-۹ تعیین مقاومت آرماتور در برابر خوردگی ۲۳
۲-۳-۵ پژوهش‌های انجام شده در خصوص دوام بتن در برابر تهاجم کلراید ۳۰
۲-۴ دوام بتن در برابر تهاجم یون سولفات ۳۱
۲-۴-۱ مکانیزم تهاجم سولفات‌ها ۳۲
۲-۴-۲ پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص تهاجم سولفات‌ها ۳۴
۲-۴-۳ عوامل مؤثر در تهاجم سولفات‌ها ۳۶
۲-۵ اندرکنش میزان تهاجم یون کلراید و سولفات ۳۷

۲-۵-۱ پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص تهاجم اندرکنش یون‌های کلراید و سولفات ۳۷
فصل ۳ مواد و روش‌ها ۴۱
۳-۱ مقدمه ۴۱
۳-۲ مصالح مورد استفاده در این پژوهش ۴۱
۳-۲-۱سنگدانه‌ها ۴۱
۳-۲-۲سیمان ۴۳
۳-۲-۳ فوق روان‌کننده ۴۴
۳-۲-۴ نانوذرات رس ۴۴
۳-۲-۴-۱ روش‌های تولید نانو مواد ۴۶
۳-۲-۴-۲ رس‌ها ۴۶
۳-۲-۴-۳ نانو رس ۴۹
۳-۲-۴-۴ کاربرد نانو رس در بتن ۵۱
۳-۲-۴-۵ مشخصات نانو رس مصرفی ۵۲
۳-۲-۵ محلول‌های مورد استفاده در این پژوهش ۵۳
۳-۳ دانه‌بندی مصالح در بتن متراکم ۵۳
۳-۳-۱ منحنی‌های دانه بندی ایده‌آل ۵۴
۳-۳-۲ تعیین درصدهای اختلاط سنگدانه‌ها جهت دستیابی به دانه‌بندی بهینه ۵۷
۳-۴ برنامه ریزی آزمایش‌ها ۵۸
۳-۴-۱ طرح‌های اختلاط مورد نظر ۵۸
۳-۴-۲ تعیین میزان فوق روان‌کننده مورد نیاز با استفاده از آزمایش اسلامپ ۵۹
۳-۴-۳ ساخت نمونه‌ها ۶۰
۳-۴-۴ آزمایش‌های درنظرگرفته شده ۶۳
۳-۵ شیوه انجام آزمایش‌های درنظرگرفته شده ۶۴
۳-۵-۱ آزمایش مقاومت فشاری ۶۴
۳-۵-۲ آزمایش جذب آب ۶۵
۳-۵-۳ آزمایش تعیین درجه هیدراتاسیون ۶۵
۳-۵-۴ آزمایش تعیین کاهش وزن و تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در محلول سولفات و اندرکنش ۶۶
۳-۵-۵ آزمایش تعیین مقاومت آرماتورهای جاسازی شده در بتن در برابر خوردگی به روش تسریع شده ۶۷
۳-۵-۶ آزمایش تعیین اختلاف پتانسیل آرماتورهای جاسازی شده در بتن در محلول‌های کلراید و اندرکنش ۶۹
فصل ۴ نتایج ۷۰
۴-۱ مقدمه ۷۰
۴-۲ نتایج آزمایش‌های مربوط به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی طرح‌های اختلاط ۷۰
۴-۲-۱ نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۷۰
۴-۲-۲ نتایج آزمایش درصد جذب آب بر روی نمونه‌های مکعبی ۷۳
۴-۳ نتایج آزمایش‌های مربوط به دوام نمونه‌ها ۷۵
۴-۳-۱ نتایج آزمایش تغییرات وزن نمونه‌های مکعبی در محلول‌ها ۷۵
۴-۳-۲ نتایج آزمایش تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در محلول‌ها ۸۲
۴-۳-۳ دافعه بارهای منفی نانوذرات رس ۸۶
۴-۳-۴ نتایج تعیین مقاومت آرماتورهای جاسازی شده در بتن در برابر خوردگی به روش تسریع شده ۸۸

۴-۳-۵ نتایج آزمایش‌های تعیین مقاومت آرماتورهای جاسازی شده در بتن در برابر خوردگی پس از قرارگیری در محلول کلراید به مدت ۶ ماه ۹۱
۴-۳-۶ نتایج آزمایش‌های تعیین مقاومت آرماتورهای جاسازی شده در بتن در برابر خوردگی پس از قرارگیری در محلول اندرکنش به مدت ۶ ماه ۹۴
۴-۳-۷ بررسی تأثیر محیط مخرب بر تغییرات شدت جریان نمونه‌ها ۹۶
۴-۳-۸ نتایج آزمایش تعیین اختلاف پتانسیل آرماتورهای جاسازی شده در بتن در محلول‌های کلراید و اندرکنش ۹۸
فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۰۲
۵-۱ مقدمه ۱۰۲
۵-۲ نتیجه‌گیری ۱۰۲
۵-۳ پیشنهادها ۱۰۴
منابع و مراجع ۱۰۵

فهرست شکل‌ها

عنوان و شماره شکل ..... **صفحه**
شکل ۲-۱ فرایند خوردگی فولاد در بتن ۱۳
شکل ۲-۲ الف) دستگاه آزمایش RCPT، ب) نحوه انجام آزمایشRCPT به صورت شماتیک ۱۸
شکل ۲-۳ نمونه‌های بتنی ساخته شده در پژوهش الطیب ۲۴
شکل ۲-۴ نرخ خوردگی نمونه‌های بتنی در محلول‌های سولفات و کلراید ۲۴
شکل ۲-۵ نمونه و دستگاه جهت آزمایش تعیین مقاومت آرماتور در برابر خوردگی ۲۵
شکل ۲-۶ نحوه برقراری جریان ۴۰ ولت در نمونه با استفاده از منبع تغذیه DC ۲۷
شکل ۲-۷ نمودار جریان-زمان برای همه‌ی طرح اختلاط‌ها به جز PC55 ..... ۲۷
شکل ۲-۸ نمودار جریان-زمان برای طرح اختلاط PC55 ..... ۲۹
شکل ۲-۹ غلظت کلر در عمق نمونه‌های بتنی در سن‌های مختلف در محلول سدیم کلرید ۳/۵ درصد ۳۹
شکل ۲-۱۰ غلظت کلر در عمق نمونه‌های بتنی در سن‌های مختلف برای محلول ترکیبی ۳۹
شکل ۳-۱ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر ۴۲
شکل ۳-۲ الف) چهار وجهی سیلیکا و ورقه چهار وجهی سیلیکا ب) هشت وجهی آلومینا و ورقه هشت وجهی آلومینا (گیبسیت) ۴۷
شکل ۳-۳ الف) کائولینت، ب) ایلیت و ج) مونت موریلونیت ۴۷
شکل ۳-۴ دو لایه از ساختار سه لایه‌ای TOT نانو رس ۴۹
شکل ۳-۵ الف) ساختارهای اتمی کائولینت، ب) ایلیت و ج) مونت موریلونیت ۵۰
شکل ۳-۶ نانو رس مورد استفاده در این پژوهش ۵۲
شکل ۳-۷ توزیع ذرات نانو رس مصرفی ۵۲
شکل ۳-۸ منحنی دانه بندی فولر و تامسون ۵۴
شکل ۳-۹ تأثیر ضرایب توزیع مختلف بر مقدار خمیر و نسبت شن به ریزدانه‌ها ۵۷
شکل ۳-۱۰- مقایسه منحنی دانه‌بندی بهینه ایجادشده و منحنی دانه بندی ایده‌آل ۵۸
شکل ۳-۱۱ الف) مراحل انجام آزمایش اسلامپ، ب) اندازه گیری اسلامپ بتن متراکم در پژوهش حاضر ۶۰
شکل ۳-۱۲- الف) نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر ب) نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰×۱۵ سانتیمتر ۶۱
شکل ۳-۱۳- بازکردن قالب‌ها بعد از ۲۴ ساعت ۶۲
شکل ۳-۱۴- عمل‌آوری نمونه‌ها در وان‌ها، الف)نمونه‌های مکعبی، ب)نمونه‌های استوانه‌ای ۶۲
شکل ۳-۱۵- نحوه‌ی قرارگیری میلگردها و یک فوم در کف قالب‌ها ۶۳
شکل ۳-۱۶- میلگردهای عایق کاری شده با ضد زنگ، نوار تفلون و چسب برق ۶۳
شکل ۳-۱۷ نحوه قرارگیری صفحات برنجی روی نمونه و فیش سوسماری وصل شده به میلگرد ۶۸
شکل ۳-۱۸ دستگاه منبع تغذیهDC ۶۸
شکل ۳-۱۹-آزمایش تعیین مقاومت آرماتور در برابر خوردگی به روش تسریع شده ۶۸
شکل ۳-۲۰ انجام آزمایش اختلاف پتانسیل بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۶۹
شکل ۴-۱ نحوه شکستن نمونه مکعبی تحت آزمایش مقاومت فشاری ۷۱
شکل ۴-۲ منحنی تغییرات مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط نسبت به مدت زمان عمل‌آوری ۷۲

شکل ۴-۳ مقایسه درصد جذب آب نمونه‌های ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری شده پس از ۰/۵ و ۲۴ ساعت ۷۵
شکل ۴-۴ نمودار متوسط درصد تغییرات نسبی وزن نمونه‌های بتنی در محلول سولفات سدیم ۷۸
شکل ۴-۵ نمودار متوسط درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی در محلول سولفات سدیم ۷۹
شکل ۴-۶ نمودار متوسط درصد تغییرات نسبی وزن نمونه‌های بتنی در محلول اندرکنش ۸۰
شکل ۴-۷ درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی در محلول اندرکنش سولفات سدیم و کلراید ۸۱
شکل ۴-۸ مقایسه متوسط درصد کاهش وزن نمونه‌های بتنی در محلول سولفات سدیم و اندرکنش ۸۱
شکل ۴-۹درصد تغییرات مقاومت نسبی نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در محلول سولفات سدیم ۸۳
شکل ۴-۱۰ درصد تغییرات مقاومت نسبی نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در محلول اندرکنش سولفات سدیم و کلراید۸۵
شکل ۴-۱۱ درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۶ ماه قرارگیری در محلول سولفات سدیم و اندرکنش نسبت به مقاومت ۲۸ روزه ۸۶
شکل ۴-۱۲ لایه‌های باردار سطح رس در حضور آب ۸۷
شکل ۴-۱۳ مرز بین مولکول‌های آب آزاد و جهت‌دار ۸۷
شکل ۴-۱۴ تغییرات شدت جریان تحت ولتاژ اعمالی ۴۰ ولت با زمان ۸۸
شکل ۴-۱۵ نمونه استوانه‌ای طرح اختلاط حاوی ۰/۴ درصد نانوذرات رس پس از اعمال ولتاژ ۴۰ ولت به مدت ۲۸ ساعت۸۹
شکل ۴-۱۶ تغییرات شدت جریان تحت ولتاژ اعمالی ۶۰ ولت با زمان ۹۱
شکل ۴-۱۷ تغییرات شدت جریان پس از اعمال ولتاژ ۴۰ ولت برای نمونه‌های استوانه‌ای قرارگرفته در محلول کلراید به مدت ۶ ماه ۹۲
شکل ۴-۱۸ تغییرات شدت جریان پس از اعمال ولتاژ ۶۰ ولت برای نمونه‌های استوانه‌ای قرارگرفته در محلول کلراید به مدت ۶ ماه ۹۳
شکل ۴-۱۹ قابلیت خوردگی با اعمال ولتاژهای ۴۰ و ۶۰ ولت به نمونه‌های استوانه‌ای قرارداده شده در محلول کلراید به مدت ۶ ماه ۹۴
شکل ۴-۲۰ تغییرات شدت جریان پس از اعمال ولتاژ ۴۰ ولت برای نمونه‌های استوانه‌ای قرارگرفته در محلول اندرکنش به مدت ۶ ماه ۹۵
شکل ۴-۲۱ اعمال ولتاژ ۶۰ ولت برای نمونه‌های استوانه‌ای نگه‌داری شده در محلول اندرکنش به مدت ۶ ماه ۹۶
شکل ۴-۲۲ تغییرات اختلاف پتانسیل نمونه‌های قرارگرفته در محلول کلراید نسبت به زمان ۹۹
شکل ۴-۲۳ تغییرات اختلاف پتانسیل نمونه‌های قرارگرفته در محلول اندرکنش نسبت به زمان ۱۰۰

فهرست جدول‌ها

عنوان و شماره جدول ..... **صفحه**
جدول ۲-۱ آزمایش ولتاژ القایی بر نمونه‌های ملاتی ۲۹
جدول ۳-۱ خصوصیات سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش ۴۲
جدول ۳-۲ ترکیبات شیمیایی سیمان تیپ یک(۴۲۵-۱)یاسوج ۴۳
جدول ۳-۳ طرح‌های اختلاط پیش بینی شده در این پژوهش ۵۹
جدول ۳-۴ جزئیات آزمایش‌های درنظرگرفته شده ۶۴
جدول ۴-۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین مختلف ۷۱
جدول ۴-۲ نتایج آزمایش درجه هیدراتاسیون خمیر سیمان ۷۳
جدول ۴-۳ درصد جذب آب نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل آوری ۷۴
جدول ۴-۴ درصد جذب آب نمونه‌ها پس از ۹۰ روز عمل آوری ۷۴
جدول ۴-۵ وزن نمونه‌های مکعبی پس از قرارگیری در محلول سولفات سدیم ۷۶
جدول ۴-۶ وزن نمونه‌های مکعبی قرارگرفته در محلول اندرکنش سولفات سدیم و کلراید ۷۷
جدول ۴-۷ متوسط درصد تغییرات نسبی وزن نمونه‌های بتنی در محلول سولفات سدیم ۷۸
جدول ۴-۸ متوسط درصد تغییرات نسبی وزن نمونه‌های بتنی در محلول اندرکنش ۷۸
جدول ۴-۹ مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در محلول سولفات سدیم ۸۲
جدول ۴-۱۰ درصد تغییرات مقاومت نسبی نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه در محلول سولفات سدیم ۸۳
جدول ۴-۱۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی ۱ و ۲ ماهه در محلول اندرکنش ۸۴
جدول ۴-۱۱ درصد تغییرات مقاومت نسبی نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه در محلول اندرکنش ۸۵
جدول ۴-۱۳ نتایج ولتاژ اعمالی ۴۰ ولت به نمونه‌های استوانه‌ای پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب ۹۰
جدول ۴-۱۴ نتایج ولتاژ اعمالی ۶۰ ولت به نمونه‌های استوانه‌ای پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب ۹۱
جدول ۴-۱۵ نتایج ولتاژ اعمالی ۴۰ ولت به نمونه‌های نگه‌داری شده به مدت ۶ ماه در محلول کلراید ۹۲
جدول ۴-۱۶ نتایج ولتاژ اعمالی ۶۰ ولت به نمونه‌های نگه‌داری شده به مدت ۶ ماه در محلول کلراید ۹۳
جدول ۴-۱۷ نتایج ولتاژ اعمالی ۴۰ ولت به نمونه‌های نگه‌داری شده به مدت ۶ ماه در محلول اندرکنش ۹۵
جدول ۴-۱۸ نتایج ولتاژ اعمالی ۶۰ ولت به نمونه‌های نگه‌داری شده به مدت ۶ ماه در محلول اندرکنش ۹۶
جدول ۴-۱۹ آزمایش ولتاژ ۴۰ ولت بر روی طرح اختلاط شاهد ۹۷
جدول ۴-۲۰ آزمایش ولتاژ ۴۰ ولت بر روی طرح اختلاط با ۰/۲ درصد نانوذرات رس ۹۷
جدول ۴-۲۱ مقادیر استاندارد احتمال خوردگی در آزمایش نیم پیل ۹۸
جدول ۴-۲۲ اختلاف پتانسیل آرماتورهای جاسازی شده در بتن‌های شاهد و نمونه‌های قرارگرفته در محلول کلراید بر حسب میلی‌ولت ۹۸
جدول ۴-۲۳ اختلاف پتانسیل آرماتورهای جاسازی شده در بتن‌های شاهد و نمونه‌های قرارگرفته در محلول اندرکنش بر حسب میلی‌ولت ۱۰۰

فصل اول: کلیات

۱-۱ مقدمه

بتن مصالحی است متشکل از شن، ماسه، سیمان و گاهی مواد افزودنی که با نسبت معین و مناسب باهم ترکیب شده و جسم متراکم سنگ گونه‌ای را پدید می‌آورد. شاخص‌ترین خاصیت بتن، مقاومت فشاری آن می‌باشد، زیرا این مشخصه به دلیل اینکه با ساختار خمیر هیدراته شده سیمان رابطه مستقیمی دارد، یک تصویر کلی از کیفیت بتن را به دست می‌دهد. علاوه بر این مقاومت بتن همیشه یک عامل ضروری در طراحی سازه بوده و به منظور ارزیابی دیگر مشخصات بتن درنظرگرفته می‌شود. مقاومت بتن با نسبت‌های مخلوط معین به صورت خیلی جدی تحت تأثیر کارایی آن واقع می‌شود و بنابراین بسیار مهم است که روانی مخلوط بتنی تازه در حدی باشد که بتوان آن را با سهولت کافی حمل نمود، در جا ریخت، متراکم کرد و سطح آن را پرداخت نمود بدون آن که در خلال این مراحل سنگدانه های ریز و درشت از همدیگر جدا شده و یکنواختی مخلوط به هم بخورد[۱]. خوردگی سازه‌های بتن مسلح توسط یون‌هایی مانند کلراید و سولفات یکی از مهم‌ترین آسیب‌های موجود در صنعت ساختمان‌سازی بوده است و در این میان نفوذپذیری بتن نقش بسزایی در خوردگی آرماتورها و در نهایت تخریب بتن داشته است. نفوذپذیری با تخلخل رابطه مستقیمی دارد، یعنی هر چقدر بتن تخلخل بیشتری داشته باشد نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد و در نتیجه اگر این بتن در معرض یون‌های کلراید و سولفات قرار گیرد موجب خوردگی خواهد شد. نفوذ یون‌های کلراید در بتن و از بین رفتن لایه اکسیدی خودجوش در اطراف آرماتورها، عامل شروع خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی اجرا شده در نواحی ساحلی می‌باشد. نفوذ این یون به عواملی چون شرایط محیطی، ترکیبات و کیفیت اجرای بتن بستگی دارد. به طور کلی مواد مهاجم در آب دریا نسبت به بتن می‌تواند یون‌های کلراید و سولفات به طور همزمان و همچنین کربنات‌ها باشد که هرچه هوا گرم‌تر باشد فعل و انفعالات تشدید می‌شود[۲]. به طور کلی عوامل مخرب بتن مسلح و غیر مسلح مشترک می‌باشد ولی دی‌اکسید کربن موجود در اتمسفر و کلر موجود در محیط اطراف بتن بدون هیچ آسیبی به بتن به داخل بتن نفوذ کرده و موجب زوال و خوردگی آرماتور داخل بتن از طریق زایل کردن لایه محافظ اکسیدی روی فولاد که ثمره محیط قلیایی داخل بتن می‌باشد می‌گردد[۳].

بنابراین با توجه به اینکه یون‌های سولفات و کلراید در آب دریا به اندازه کافی وجود داشته و در صورت نفوذ به داخل بتن مسلح، می‌توانند موجب تشدید خوردگی آرماتورهای فولادی گردند، در این

پژوهش اثر توأم این دو پارامتر مورد بررسی قرارگرفته است. همچنین جهت دستیابی به بتنی با نفوذپذیری پایین از بتن متراکم استفاده شده است. همچنین در این پژوهش از رس در مقیاس نانو استفاده شده است که این ذرات با پر نمودن خلل و فرج بتن باعث کاهش نفوذپذیری بتن گردد. همچنین امکان دفع یون‌های کلر توسط نانو رس با و بدون حضور سولفات در این پژوهش مورد بررسی قرارگرفته است. همچنین با برنامه‌ریزی مناسب آزمایش‌ها دراین پژوهش اندرکنش نفوذ یون‌های کلراید و سولفات در بتن‌های حاوی نانو رس نیز بررسی شده است. جهت این امر بتن‌های متراکم ساخته شده با و بدون نانو رس در معرض همزمان یون‌های کلراید و سولفات قرارگرفته شده و آزمایش‌های مورد نظر بر روی آنها صورت گرفته است.

۱-۲ اهمیت و ضرورت پژوهش

امروزه با پیشرفت صنعت ساختمان‌سازی، بتن‌های توانمند بیشتر مورد نیاز می‌باشند. این نیاز و کاربرد گسترده بتن‌های توانمند لزوم بررسی رفتار و عوامل موثر بر رفتار آنها را آشکار می‌کند. بخش‌های تشکیل دهنده بتن را می‌توان به ۳ فاز تقسیم بندی کرد که فاز اول به عنوان سیمان هیدراته شده (فاز خمیر) و فاز دوم به عنوان دانه‌های سنگی (فاز سنگدانه) می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه فصل مشترک بین سیمان هیدراته شده و سنگدانه‌ها از اهمیت بالایی درخصوصیات بتن برخوردار است، می‌توان این فاز را به عنوان فاز سوم در بتن معرفی کرد[۴].

از طرفی در سال‌های اخیر، خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن به عنوان یکی از مهمترین دلایل اصلی خرابی‌های زود رس در سازه‌های بتن‌آرمه شناخته شده است. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته، پیدایش خوردگی در تأسیسات فاضلابی در دنیا سالیانه هزینه‌ای بالغ بر ۱/۱ بیلیون دلار به بار می‌آورد[۵]. خوردگی لوله‌های بتنی یکی از مشکلات عمده در شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب بشمار می‌آید که سالانه مبالغ هنگفتی را به خود اختصاص می‌دهد[۶]. دلایل فرسودگی مختلفی همانند خوردگی میلگردهای مدفون در بتن در اثر کربناتاسیون یا نفود یون‌های کلراید، ذوب و انجماد، تهاجم سولفات، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و نظایر آن عملکرد این سازه‌ها را به مخاطره می‌اندازد. استفاده از مصالح نامناسب یا طراحی نادرست، کنترل کیفیت نا مناسب، عمل‌آوری نامناسب و نظایر آن عمر سرویس‌دهی سازه‌ها را کم می‌کند و یا منجر به تحمیل تدابیر تعمیری گران با هزینه‌های اقتصادی زیاد می‌گردد[۷].

در محیط های دریایی در حالت کلی انتشار یون کلرید و یون سولفات به داخل بتن و خوردگی ناشی از آن عامل اصلی خرابی‌ها و کاهش عمر مفید سازه های بتن آرمه می‌باشد. شرایط حاکم در خلیج فارس چه از نظر املاح موجود در آب دریا و چه از نظر شرایط اقلیمی حاکم در آن، این محیط را به یکی از مهاجم‌ترین محیط های دریایی از دیدگاه خوردگی آرماتور در سازه های بتنی مبدل ساخته است. خرابی‌های زود رس سازه‌های بتنی منطقه خلیج فارس در اثر خوردگی آرماتور، تا کنون هزینه های تعمیراتی زیادی را به کشورهای منطقه اعمال نموده است. به همین خاطر، تحقیقات زیادی در خصوص پایایی بتن در شرایط محیطی خلیج فارس انجام شده است. همچنین در رویه‌های بتنی به

دلیل استفاده از نمک‌های یخ زدا در زمستان و همچنین به دلیل بارش بارانهای اسیدی در فصل بهار، رویه‌ی بتنی در معرض همزمان نفوذ یونهای کلراید و یونهای سولفات قرارگرفته و به آن آسیب جدی وارد می‌سازد و نیز در شبکه‌های فاضلابی هم یون‌های کلراید و سولفات به طور همزمان به داخل بتن نفوذ می‌کنند که خسارت قابل توجهی به این شبکه‌ها وارد می‌سازند[۸]. با توجه به اینکه پژوهش های انجام شده توسط محققین مختلف اغلب تنها یک مورد از تهاجم یون‌های کلر و یا سولفات را درنظرگرفته است، لذا بررسی وضعیت بتن وقتی که یون‌های کلر و سولفات به طور توأم به بتن حمله می‌کنند ضرورت خواهد داشت.

۱-۳ اهداف پژوهش

در این پژوهش اهداف زیر مورد نظر می‌باشند:

۱- ساخت بتن متراکم در حضور نانو رس.

۲- تعیین میزان تأثیر نانو رس بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن‌های متراکم.

۳- بررسی تأثیر نانو رس مصرفی در میزان تهاجم یون کلراید و سولفات.

۴- تعیین اندرکنش بین نفوذ یون کلراید و سولفات در بتن‌های متراکم با و بدون نانو رس در صورت وجود.

۱-۴ شیوه پژوهش

برای انجام این پژوهش که به صورت آزمایشگاهی انجام شده است، نیاز به ساخت و آزمایش نمونه‌های بتنی با ترکیبات مورد نظر می‌باشد. برای انجام آزمایش‌ها سه محلول شامل: محلول حاوی یون کلراید، محلول حاوی سولفات و محلول حاوی یون کلراید و یون سولفات بطور همزمان تهیه شده است. در طرح اختلاط‌های بتن‌های متراکم از ذرات نانو رس با درصدهای ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ استفاده شده است و با طرح اختلاط شاهد که بدون نانوذرات رس می‌باشد، مقایسه شده‌اند. پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، آنها را در محلول‌های ذکر شده قرار داده و مطابق برنامه زمانی مشخص آزمایش‌ها انجام شده و پس از انجام آزمایش‌ها نتایج ثبت گردیده است. در پایان از روش‌های آماری جهت آنالیز نتایج استفاده شده است. در فصل دوم به جزئیات آزمایش‌های مربوط به تعیین مقاومت در برابر تهاجم یون‌های کلراید و سولفات و اندرکنش آنها اشاره شده است.

۱-۵ مروری بر فصل‌های پایان نامه

در این فصل به کلیات پژوهش حاضر اشاره شد و همچنین اهمیت و ضرورت پژوهش و در نهایت اهداف و شیوه پژوهش ارائه گردید. در فصل دوم بتن‌های متراکم و دوام آنها در برابر تهاجم یون‌های

کلراید و سولفات و همچنین آزمایش‌های مربوط به تهاجم یون‌های کلراید و سولفات مورد بررسی قرارگرفته است. همچنین پژوهش های پیشین درباره‌ی تهاجم یون‌های کلراید و سولفات و همچنین اندرکنش آنها نیز در این فصل ارائه شده است و در نهایت آزمایش‌های انجام شده توسط محققین مختلف درباره مقاومت آرماتورهای جاسازی شده در بتن در برابر خوردگی به روش تسریع شده نیز مورد بررسی قرارگرفته است. در فصل سوم تمامی مواد و مصالحی که در این پژوهش استفاده شده و همچنین آزمایش‌هایی که در این پژوهش صورت گرفته‌اند، به طور مفصل شرح داده شده‌اند و در فصل چهارم، نتایج حاصل از این پژوهش ارائه شده و بررسی نتایج آزمایش‌ها صورت گرفته است. در فصل آخر نتیجه‌گیری حاصل از این پژوهش ارائه شده و پیشنهادهایی جهت انجام پژوهش های بیشتر در راستای موضوع این پژوهش ارائه شده است.

فصل دوم: مروری بر پژوهش‌های گذشته

۲-۱ مقدمه

از اوایل دهه‌ی هشتاد مطالعاتی که بویژه در سواحل خلیج فارس و دریای شمال انگلستان برای استخراج نفت با استفاده از سکوهای بتنی انجام گرفت، نشان دهنده آن بود که اکسید شدن آرماتور به اندازه‌ای زیاد است که یک تورم در درون بتن در اثر زنگ‌زدگی میلگرد به وجود می‌آورد که در اثر این زنگ‌زدگی بین بتن و میلگرد فاصله افتاده و به تدریج تورم زیاد به ترک تبدیل می‌شود. بنابراین عوامل مهاجم از این ترک‌ها به راحتی وارد بتن شده و کم‌کم پوشش بتنی روی میلگردها فرو ریخته و میلگردها بدون پوشش بتنی باقی می‌مانند. در شرایط محیطی گرم و مرطوب و همچنین جاهائیکه غلظت یون کلر و سولفات بیشتر است میزان خوردگی افزایش می‌یابد. بعنوان مثال خوردگی در خلیج فارس نسبت به دریای خزر بیشتر است[۹].

تجربه نشان داده است که در شرایط عادی در صورتیکه از بتنی با کیفیت بالا که دارای پوشش کافی برای آرماتورها باشد، استفاده شود از پدیده‌ی خوردگی جلوگیری می‌شود[۱۰]. همچنین کاهش نفوذپذیری بتن می‌تواند باعث کاهش عوامل مهاجم به بتن شده و در نتیجه نرخ خوردگی نیز به شدت کاهش یابد. در بتن متراکم نیز نفوذپذیری به شدت کاهش یافته و در نتیجه انتظار می‌رود که دوام بتن در برابر محیط‌های مخرب افزایش یابد. پژوهش های زیادی در زمینه‌ی کاهش نفوذپذیری و تهاجم سولفات‌ها و کلرایدها به بتن انجام شده است که در ادامه به این پژوهش های اشاره خواهد شد.

۲-۲ بتن متراکم

مقاومت بتن معمولی بین۲۱ تا Mpa ۴۰ است. برای تولید بتنی با مقاومت بیش از Mpa ۴۰ ، نیاز به کنترل کیفیت دقیق‌تر و همچنین دقت بیشتر در انتخاب مصالح و نسبتهای آن (روان کننده‌ها، مواد افزودنی معدنی، نوع و اندازه سنگدانه‌ها و ...) است. همچنین مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، خصوصیات و ساختار میکروسکوپی بتن با مقاومت بیش از Mpa ۴۰ ، با بتن معمولی فرق دارد. از آنجا که در بتن معمولی، مقاومت فشاری اساس طراحی بتن می‌باشد، لذا طراح باید برای طرح اختلاط بتن‌های با مقاومت بیش از Mpa ۴۰ ، شیوه مخصوصی را مورد عمل قرار

دهد[۱].

۲-۲-۱ پارامترهای مؤثر در ساخت بتن با مقاومت بالا

بر اساس قیمتهای بتن و فولاد که در سال ۱۹۸۲ در شیکاگو[۱] به دست آمده نشان می‌دهد که اقتصادی‌ترین راه برای ساخت ستونهای ساختمانهای بلند، استفاده از روشی است که در آن حداقل مقدار ممکن فولاد مصرف شده و حداکثر مقاومت ممکن نیز به دست آید. مزیت اقتصادی استفاده از بتن با مقاومت زیاد برای ستونها و دیوارهای برشی، در بسیاری از سازه‌های ساخته شده در شیکاگو، نیویورک[۲]، هوستون[۳] و دیگر شهرهای آمریکا به اثبات رسیده است. در ایالت متحده در مدت ۳۲ سال گذشته، در حالت کلی از بتن با مقاومت زیاد برای ساخت سازه‌های بتن آرمه ۳۰ طبقه به بالا استفاده شده است. در یک سوم ارتفاع بالایی ساختمان، ستونها با بتن معمولی ساخته می‌شوند. اما چنانچه در دو سوم پایین ساختمان، ستونها با بتن معمولی ساخته شوند، ابعاد ستونها بسیار بزرگ خواهد شد. مهمترین عاملی که مقاومت بتن را تعیین می‌کند، تخلخل در سه فاز بتن (سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و ناحیه انتقال) می‌باشد[۱۱]. در بتن‌های معمولی مقاومت بتن به مقاومت ملات سیمان و چسبندگی بین ملات و سنگدانه‌ها بستگی دارد. مقاومت سنگدانه‌ها نیز بر مقاومت بتن معمولی موثر است ولی در حالت کلی مقاومت سنگدانه‌ها بیشتر از مقاومت بتن ساخته شده می‌باشد[۱۲]. با توجه به اینکه سنگدانه‌ها به طور کلی سه چهارم از حجم بتن را اشغال می‌کنند یک نقش مهمی را در خصوصیات بتن بازی می‌کند[۱۳]. در بتن های پرمقاومت، مقاومت ملات سیمان بالا بوده و مقاومت بتن به مقاومت ملات سیمان، مقاومت سنگدانه و چسبندگی بین ملات و سنگدانه‌ها بستگی خواهد داشت و مقاومت سنگدانه‌ها و چسبندگی آنها با ملات سیمان حداکثر مقاومت حاصل را تعیین خواهد کرد[۱۱]. ملاحظه می شود که نقش سنگدانه‌ها در مقاومت بتن پر مقاومت بیشتر از بتن معمولی است و مشاهده شده است که در حالت کلی مقاومت خمشی بتن، کمتر ازمقاومت خمشی ملات متناظر می‌باشد ولی از طرف دیگر، مقاومت فشاری بتن بیشتر از مقاومت فشاری ملات است، این امر نمایانگر آن است که قفل و بست مکانیکی سنگدانه‌ها به مقاومت بتن کمک می‌نماید[۱۱]. درادامه به برخی از پارامترهای مؤثر در این خصوص پرداخته می‌شود.

الف- جنس و بافت سنگدانه ها: بافت سطحی سنگدانه بر چسبندگی آنها با خمیر سیمان و همچنین برمقدار آب لازم برای مخلوط تاثیر می گذارد، بطوری که ملات سیمان چسبندگی بهتری با سنگدانه‌های زبر دارد تا سنگدانه‌های صاف و صیقلی. این بافت سطحی در دانه های درشت از اهمیت بیشتری برخوردار است. بافت سطحی سنگدانه‌ها ممکن است نسبتاً صاف با حفرات ریز و یا ناهموار با حفرات ریز و درشت باشد. در نتیجه بافت سطحی و درصد جذب سنگدانه‌ها بر نحوه طرح اختلاط و کارایی بتن تازه موثر خواهند بود. همچنین به منظور افزایش چسبندگی بین ملات و سنگدانه‌ها، سنگدانه‌ها از کانی‌هایی باید انتخاب شوند که چسبندگی شیمیایی نیز با ملات ایجاد کنند. به همین

---

[۱] *Chicago*

[۲] *New York*

[۳] *Houston*

منظور تحقیقاتی با مصالح مصنوعی مثل کلینکر سیمان پرتلند و سیمان آلومینیومی و روباره‌های آهن گدازی صورت گرفته است. هر چند که دوام بلند مدت کلینکر مورد تردید است ولی مقاومت چسبندگی حاصل از آن ممکن است به ۱۹۳ مگا پاسکال هم برسد. اکثر مصالح سیلیسی قابلیت چسبندگی خوبی با سیمان پرتلند دارند[۱۱].

ب- شکل سنگدانه ها: سنگدانه‌ها بسته به ماهیت جنس سنگ مادر و روش شکسته شدن می توانند شکلی گرد گوشه، تیز گوشه و یا نامنظم داشته باشند. سنگدانه های تیزگوشه و آنهایی که سطوحی ناصاف و متخلخل دارند، نسبت به سنگدانه های گرد گوشه آب بیشتری جذب می کنند. برخی از دانه های مناسب ممکن است بدلیل خواص دانه بندی نامناسب یا وجود مقدار زیادی ذرات مسطح و کشیده، به آب بیشتری نیاز داشته باشند. درچنین مواردی برای استفاده از این سنگدانه‌ها می توان برای جلوگیری از افزایش بیش از حد نسبت آب به سیمان و کاهش مقاومت، عیار سیمان را افزایش داد. ذرات با اشکال طویل و پولکی می توانند به نحو نامطلوبی بر دوام بتن اثر بگذارند زیرا دانه های پولکی تمایل به قرار گرفتن در یک جهت دارند و آبی که در اثر آب انداختن بتن بوجود می آید و همچنین منافذ هوا، در زیر این سطوح جمع می شوند[۱۱].

ج- حداکثر بعد سنگدانه ها: هر چه سنگدانه‌ها بزرگتر باشد، مساحت سطحی که باید مرطوب شود در واحد جرم، کمتر می گردد. بنابراین افزایش دانه بندی سنگدانه‌ها به یک حداکثر اندازه دانه بزرگتر، سبب پایین آوردن آب لازم برای مخلوط خواهد شد بطوریکه برای یک کارایی و مقدار سیمان معین می توان نسبت آب به سیمان را پایین آورد و در نتیجه افزایشی در مقاومت حاصل نمود. این عملکرد در آزمایش‌های انجام شده در مورد سنگدانه های با حداکثر اندازه ۳۸/۱ میلیمتر مورد تایید قرارگرفته است.

نتایج تجربیات نشان می دهند که در مورد دانه‌های با حداکثر اندازه بزرگتر از ۳۸/۱ میلیمتر افزایش مقاومت به علت کاهش مقدار آب لازم، به وسیله اثرات نامساعد کاهش سطح چسبندگی و نیز ناپیوستگی‌های ایجاد شده با دانه‌های خیلی درشت و به ویژه درمخلوط‌های پر سیمان خنثی می‌گردد. بتن به مقدار زیادی ناهمگن می‌شود و شاید کاهش مقاومت در بتن مشابه اثر ناشی از افزایش اندازه بلورها و خشن شدن بافت سنگ‌ها می باشد. در حقیقت اثر نامطلوب ناشی از افزایش اندازه بزرگترین دانه‌ها در سرتاسر دامنه اندازه‌ها وجود دارد اما در زیر ۳۸/۱ میلیمتر اثر اندازه بر مقدار کاهش آب لازم برجسته تر است. سنگدانه های خیلی درشت، از آنجایی که ذرات بزرگ سنگدانه سبب ایجاد عدم تجانس در مجموعه می‌گردند نامطلوب می‌باشند. درفصل مشترک و ممکن است بین سنگدانه و خمیر سیمان هیدراته شده ای که آنرا احاطه نموده و از نظر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون و جمع-شدگی و خزش و خواص حرارتی عدم سازگاری وجود داشته باشد. این عدم سازگاری ممکن است به ریز ترک های بیشتری نسبت به زمانی که حداکثر اندازه سنگدانه کوچکتر از ۱۰ یا ۱۲ میلیمتر است منجر گردد. اگرچه هنگامی که حداکثر اندازه سنگدانه‌ها کمتر باشد نیاز به آب بیشتری خواهدبود، ولی این امر وقتی که میزان مصرف فوق روان کننده زیاد و میزان آب مخلوط کم است اهمیت زیادی ندارد[۱۱].

د- دانه‌بندی سنگدانه‌ها: طبق استاندارد آیین نامه بتن آمریکا (ACI) دانه های استفاده شده در بتن باید حداقل ملزومات بیان شده در استاندارد ASTM C33 را تامین نمایند. بعلاوه موارد زیر در رابطه با دانه بندی سنگدانه های بتن قابل ذکراست:

۱- ریزدانه‌ها: در طرح اختلاط بتن، در حالت کلی مصالح ریز دانه نسبت به مصالح درشت دانه تاثیر بیشتری دارند. سنگدانه های ریز باید گردگوشه و با دانه‌های یکنواخت اما نسبتاً درشت باشند زیرا مخلوط های پرسیمان بکار برده شده در بتن پرمقاومت دارای مقدار زیادی از ذرات ریز می باشند. دانه بندی بهینه مصالح ریزدانه در بتن پرمقاومت بجای تراکم فیزیکی عمدتاً بر مبنای مقدار آب مصرفی تعیین می شود. دانه بندی ریزدانه‌ها نقش مهمی در خواص بتن تازه و سخت شده دارد. بعنوان نمونه با افزایش دانه های به قطر ریزتر از ۰/۱۵ میلیمتر، کارایی بتن تازه بیشتر خواهد شد ولی درمقابل خمیر سیمان بیشتری برای پوشاندن سطح دانه‌ها لازم خواهد بود که در نتیجه بتن حاصله غیر اقتصادی می شود و چنانچه برای بیشترکردن خمیرسیمان از آب اضافی استفاده شود مقاومت بتن کاهش می یابد. با کاهش مقدار ریزدانه و افزایش مقدار درشت دانه و مقدار خمیر سیمان لازم کاهش یافته و طرح اقتصادی خواهد شد[۱۱].

۲- درشت دانه‌ها: مطالعات انجام شده نشان می دهند که بتن های پرمقاومت با بزرگترین بعد دانه ۹/۵ میلیمتر تا ۱۲/۷ میلیمتر بیشترین مقاومت فشاری را خواهد داشت. کردون و گیلسپی[1] این افزایش مقاومت را ناشی از کاهش تنش بین ملات و سنگدانه‌ها در اثر افزایش سطح تک تک دانه‌ها می‌دانند. دانه‌های کوچکتر بدلیل کم بودن تمرکز تنش اطراف آنها مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهند. این تمرکز تنش ناشی از اختلاف بین مدول الاستیسیته ملات و سنگدانه‌ها می‌باشد. مقدار و اندازه بهینه مصالح درشت دانه بطور عمده به خواص و ویژگیهای مصالح ریزدانه و بخصوص مدول نرمی آنها بستگی خواهد داشت. توصیه شده است که اگر از مصالح ریزدانه با تخلخل کم استفاده شود مقدار مصالح درشت دانه بیشتر شود و همچنین درصورتیکه ذرات ریزدانه خیلی تیزگوشه باشند و مقدار درشت دانه کاهش داده شود[۱۱].

ذ- مقاومت ذاتی سنگدانه ها: پرواضح است که بتن های پر مقاومت نیازمند سنگدانه‌های مقاوم نیز می‌باشند. تحقیقات نشان می دهند که از یک مرحله به بعد با افزایش عیار سیمان دیگر مقاومت فشاری بتن افزایش نخواهد یافت. این تثبیت مقاومت عمدتاً ناشی از محدودیت مقاومت چسبندگی سیمان و سنگدانه‌ها می باشد. درمجموع سنگدانه ایده آل برای بتن پرمقاومت باید تمیز، مکعبی، تیزگوشه و ۱۰۰٪ شکسته با حداقل ذرات مسطح و کشیده باشد. همچنین سنگدانه‌های پولکی و کشیده با بافت سطحی صاف و صیقلی مقاومت فشاری بتن را کاهش می دهند. همچنین بااستفاده از دانه بندی گسترده‌تر و کاهش ابعاد سنگدانه‌ها مقاومت فشاری بتن بیشترخواهد شد[۱۱].

ر- شیوه مخلوط کردن بتن: برای بتن پرمقاومت روش اختلاط نیز اهمیت قابل توجهی دارد. این اهمیت در مورد بتن هایی که مقدار مادهٔ سیمانی کمتری دارند به اوج خود می‌رسد. بتنی که به صورت مناسب مخلوط نشده است، نه تنها دارای کارایی خوبی نمی‌باشد بلکه مشخصات مهندسی و فیزیکی آن نیز به طور نامطلوب از این اختلاط ضعیف متاثر خواهند شد. ترتیب اختلاط برحسب

[1] *Cordon and Gillespie*

خواص مورد انتظار از بتن حاصله ممکن است تغییر کند. برخی محققین روشهای اختلاط در کشورهای مختلف را گرد آوری و مورد بررسی قرار داده اند. نتیجه گرفته شده است که اختلاط اولیهٔ مواد سیمانی و سپس اضافه کردن سنگدانه، مقدار آب و سیمان مورد نیاز را کاهش داده و منجر به افزایش ٪۱۰ الی ٪۲۰ مقاومت بتن می شود. البته نوع مخلوط کن نیز تاثیر قابل توجهی در تولید بهینه و یکنواخت بتن دارد. در ادبیات فنی تاثیر ترتیب اختلاط در خواص بتن توانمند با روانی زیاد، کمتر مورد توجه قرارگرفته است. یکی از افزودنیهای اصلی در بتن های توانمند، فوق روان کننده می‌باشد که تاثیر نحوهٔ افزودن آن کمتر بررسی شده است[۱۴].

ز- کارایی و نسبت آب به سیمان: برای تولید بتن با مقاومت زیاد اثر متضاد نسبت آب به سیمان بر روی قوام و مقاومت بتن نمی‌تواند بدون استفاده از مواد افزودنی کاهنده آب، هماهنگ شود. به همین دلیل، در ۱۸ سال اخیر استفاده از مواد فوق روان کننده نقش به سزایی در تولید بتن با مقاومت زیاد داشته است. در حقیقت، بدون وجود کارایی فوق العاده مناسب که با استفاده از فوق روان کننده‌ها به دست می‌آید، عملاً تولید بتن با مقاومت فوق العاده زیاد (بیش از ۷۰ Mpa) و نسبت آب به سیمان ۰/۳ غیرممکن است[۱]. همچنین توصیه شده است که به منظور تامین کارایی مناسب، اسلامپ بتن پرمقاومت قبل از افزودن فوق روان کننده ۲/۵ تا ۵ سانتیمتر و بعد از افزودن فوق روان کننده ۵ تا ۱۰ سانتیمتر باشد، به طوری که جداشدگی دانه‌ها رخ ندهد. زمان و چگونگی اختلاط این افزودنیها باید مطابق دستورالعمل شرکت تولیدکنندهٔ آن صورت گیرد که عمدتاً برحسب درصدی از مواد سیمانی بیان می شود. برخی از دستورالعمل‌ها توصیه کرده اند که مواد فوق الذکر به همراه آب اختلاط به بتن اضافه شوند و برخی دیگر پیشنهاد نموده اند که این افزودنیها در مراحل مجزا به بتن اضافه شوند[۱۴].

در صورتی که کارایی بتن مناسب باشد، به نظر می‌رسد که نسبت آب به سیمان تعیین کننده میزان تخلخل خمیر سیمان هیدراته شده و ناحیه انتقال باشد[۱]. میزان آب حجمی در مخلوط بتنی به طور زیادی در ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده تاثیر می‌گذارد به این معنی که یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار روی کنترل کیفیت در تولید بتن می‌باشد. همچنین در نسبتهای کم آب به سیمان مشاهده شده است که با کاهش اندک نسبت آب به سیمان، مقاومت بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. برای مثال، نتایج حاصل از پژوهش های نشان می‌دهد که با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸، ۰/۳۶ و ۰/۳۴ می‌توان به ترتیب به مقاومت‌های فشاری ۴۰، ۵۰ و ۶۰ Mpa دست یافت. با این وجود، با کاهش نسبت آب به سیمان، متراکم کردن و جای دادن بتن تازه، مشکلتر می‌شود[۱].

ی- ناحیه انتقال سنگدانه‌ها: اصولا ناحیه انتقال ضعیف‌ترین قسمت در بتن با وزن معمولی و ساخته شده با سنگدانه‌های مقاوم با حداکثر اندازه ۱۲mm تا ۲۰mm و نسبت آب به سیمان بین ۰/۴ تا ۰/۷ می‌باشد. به ازای یک نسبت آب به سیمان معین، با کاهش حداکثر اندازه سنگدانه‌های درشت، می‌توان مقاومت بتن را به میزان زیادی افزایش داد، زیرا بر اثر این کار، مقاومت ناحیه انتقال بهبود می‌یابد. بنابراین در طرح اختلاط بتن با مقاومت زیاد، در حالت کلی حداکثر اندازه سنگدانه‌ها را ۱۹ میلیمتر یا کمتر در نظر می‌گیرند. در صورت نیاز به نسبت آب به سیمان کمتر و استفاده از سنگدانه‌های با اندازه کوچک، مقدار سیمان مصرفی به بیش از ۳۸۵ kg/m^3 افزایش می‌یابد. در این