بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه اراک

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه

بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن خودتراکم الیافی

پژوهشگر

سید احسان حسینی

استاد راهنما

دکتر سید حمید هاشمی

زمستان ۱۳۹۱

بسم ا... الرحمن الرحیم

بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی بتن خودتراکم الیافی

توسط:

سید احسان حسینی

پایان نامه

ارائه شده به مدیریت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی

لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران - سازه

از

دانشگاه اراک

اراک-ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه:

دکتر سید حمید هاشمی (استاد راهنما)..... استادیار

دکتر اصغر لادریان..... استادیار

دکتر علیرضا آذربخت..... استادیار

بهمن ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر عزیز و مادر مهربانم

به پاس تمامی صبرها و تشویق‌ها و فداکاری‌هایشان

تشکر و قدردانی

خداوند را سپاس‌گزارم که مرا نیرو بخشید تا نگارش پایان‌نامه پیش رو را به اتمام برسانم. قبل از هر چیز بر خود لازم می‌دانم کمال تقدیر و تشکر خود را نثار کسانی کنم که در این مسیر پرفراز و نشیب لحظه‌ای از راهنمایی، پشتیبانی و تشویق من دریغ نکرده‌اند. از زحمات بی‌پایان پدر و مادر عزیز و دلسوزم که هر چه دارم از آن‌هاست و در تمام این سال‌ها با فراهم کردن آرامش فکری و آسایش روحی بسیاری از دشواری‌ها را بر من آسان نمودند. از استاد بردبارم، جناب دکتر سید حمید هاشمی، که تمام روزهایی که تحت نظارت ایشان مشغول به کار بودم سرشار از آموختن توأمان علم و اخلاق بود، نهایت تشکر را دارم و در پرتو روحیه پر از امید ایشان بود که تمام دلسردی‌ها رنگ می‌باخت و در سایه وجود خستگی ناپذیرشان، پرسش‌های گاه و بیگاهم پاسخ می‌یافت. بی‌شک بدون کمک‌های بی‌دریغ و دلسوزانه ایشان، انجام این پژوهش امکان پذیر نبود.

چکیده

بتن خودتراکم بتنی بسیار سیال و مخلوطی بسیار همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی را مرتفع نموده و بدون نیاز به هیچ‌گونه لرزاننده داخلی و خارجی تحت اثر وزن خود، متراکم می‌شود. این ویژگی کمک شایانی به اجرای اعضای سازه‌ای با تراکم زیاد میلگرد می‌نماید. از یکسو استفاده از الیاف در بتن سبب افزایش مقاومت سایشی، خمشی و کششی می‌گردد. لذا استفاده از بتنی که خصوصیات بتن خودتراکم و الیافی را با هم داشته باشد کمک شایانی به ساخت سازه‌هایی با عملکرد بالا و با دوام می‌نماید. در این تحقیق آزمایشگاهی به بررسی اثر توأم نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن پرداخته شده است. با سعی و خطا ابتدا بیش از ۵۰ طرح اختلاط اولیه ساخته شد و پارامترهایی از قبیل شکل ظاهری، آزمایش‌های کارایی برای بتن تازه و برای بتن سخت شده، میزان مقاومت فشاری در سن ۷ روز، بررسی و اندازه‌گیری شد. با توجه به طرح‌های آزمایشی اولیه، محدوده مناسبی از پارامترهای موثر در طرح اختلاط به دست آمد، که با توجه به مصالح مصرفی بهینه‌ترین طرح اختلاط بتن خودتراکم فاقد الیاف پلی‌پروپیلن با استفاده از روش عددی تاگوچی در اختیار قرار گرفت. در نهایت طرح اختلاط فوق را با پنج درصد مختلف از الیاف پلی‌پروپیلن تقویت نموده و برای پنج طرح منتخب، نمونه‌های مختلفی ساخته و در شرایط متفاوت نگهداری گردید و خصوصیات مکانیکی از بتن سخت شده در سنین کوتاه مدت و بلند مدت، تا سن ۹۰ روز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

این تحقیق نشان می‌دهد که حضور توأم درصد بهینه الیاف پلی‌پروپیلن و نانوسیلیس موجب بهبودی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن خودمتراکم می‌گردد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱ پیشگفتار ۲

۱-۲ مسئله مورد تحقیق ۴

۱-۳ ساختار پایان نامه ۵

فصل دوم: معرفی بتن خودتراکم الیافی و مفاهیم پایه ۶

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ بتن خودتراکم ۷

۲-۲-۱ تاریخچه ۷

۲-۲-۲ ویژگی‌های بتن خودتراکم تازه ۸

۲-۲-۳ رئولوژی بتن خودتراکم ۸

۲-۲-۴ کارایی بتن خودتراکم ۹

۲-۲-۴-۱ قابلیت جریان و عبور ۹

۲-۲-۴-۲ قابلیت پر کنندگی ۱۱

۲-۲-۴-۳ قابلیت پایداری ۱۴

۲-۲-۵ آزمایش‌های بتن تازه بتن خودتراکم ۱۵

۲-۲-۵-۱ آزمایش جریان اسلامپ و جریان اسلامپ ۵۰ سانتیمتر ۱۶

۲-۲-۵-۲ آزمایش حلقه J ۲۰

۲-۲-۵-۳ آزمایش قیف V شکل و زمان ۵ دقیقه ۲۲

۲-۲-۵-۴ آزمایش جعبه L شکل ۲۵

۲-۲-۵-۵ آزمایش جعبه U شکل ۲۸

۲-۲-۵-۶ آزمایش اوریمت ۳۱

۲-۲-۵-۷ آزمایش GTM ۳۴

۲-۳ بتن الیافی ۳۵

۲-۳-۱ تاریخچه ۳۵

۲-۳-۲ ویژگی بتن الیافی ۳۶

۲-۳-۳ تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر بتن ۳۸
۲-۳-۳-۱ تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر خواص بتن تازه ۳۹
۲-۳-۲-۲ تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر خواص بتن سخت شده ۴۰
۲-۴ نانو تکنولوژی در بتن ۴۱
۲-۵ تاگوچی ۴۳
۲-۶ آزمایش‌های بتن سخت شده ۴۵
۲-۶-۱ مقاومت فشاری بتن ۴۶
۲-۶-۱-۱ آزمایش نمونه‌های مکعبی ۴۷
۲-۶-۱-۲ شکست نمونه‌های فشاری ۴۸
۲-۶-۲ مقاومت کششی بتن ۴۹
۲-۶-۲-۱ آزمایش دو نیم شدن استوانه یا آزمایش برزیلی ۵۰
۲-۶-۲-۲ آزمایش مدول گسیختگی ۵۰
۲-۶-۳ آزمایش انقباض ۵۱
۲-۶-۴ آزمایش مقاومت چسبندگی بتن و میلگرد ۵۲
۲-۶-۵ نمودار تنش-کرنش بتن ۵۴
۲-۶-۶ آزمایش مدول الاستیسیته ۵۶

فصل سوم: مشخصات مصالح مصرفی، برنامه آزمایشگاهی و طرح اختلاط ۵۷

۳-۱ مصالح مصرفی ۵۸
۳-۱-۱ سنگدانه ۵۸
۳-۱-۱-۱ شن ۵۸
۳-۱-۱-۲ ماسه ۵۹
۳-۱-۲ سیمان ۵۹
۳-۱-۳ آب ۶۰
۳-۱-۴ مواد افزودنی ۶۱
۳-۱-۴-۱ فوق روان کننده ۶۱
۳-۱-۴-۲ میکروسیلیس ۶۱
۳-۱-۴-۳ نانوسیلیس ۶۲

۳-۱-۴-۴ الیاف پلی‌پروپیلن ۶۳
۳-۱-۵ فیلر ۶۴
۳-۲ طرح اختلاط ۶۴
۳-۲-۱ الزامات طرح مخلوط بتن خودتراکم ۶۶
۳-۲-۱-۱ عملکرد خمیری بتن خودتراکم ۶۶
۳-۲-۱-۲ عملکرد بتن خودتراکم سخت شده ۶۶
۳-۲-۱-۳ حصول اطمینان از دوام بتن خودتراکم ۶۷
۳-۲-۱-۴ مبانی طراحی مخلوط بتن خودتراکم ۶۷
۳-۲-۲ ترکیب‌های اولیه ۶۸
۳-۲-۳ روش تاگوچی ۷۱
۳-۲-۴ طرح‌های اختلاط نهایی ۷۸
۳-۳ نگهداری بتن ۷۹

فصل: چهارم بررسی‌های آزمایشگاهی و ارزیابی نتایج ۸۱

۴-۱ مقدمه ۸۲
۴-۲ نتایج آزمایش‌های بتن تازه..... ۸۳
۴-۲-۱ آزمایش جریان اسلامپ و جریان اسلامپ ۵۰ سانتیمتر ۸۳
۴-۲-۲ آزمایش حلقه J ۸۴
۴-۲-۳ آزمایش قیف V شکل و زمان ۵ دقیقه ۸۷
۴-۲-۴ آزمایش جعبه L شکل ۹۰
۴-۲-۵ آزمایش جعبه U ۹۲
۴-۳ نتایج آزمایش‌های بتن سخت شده ۹۴
۴-۳-۱ آزمایش تعیین مقاومت فشاری و نتایج آن ۹۴
۴-۳-۲ بررسی جرمی نمونه‌های نگه داری شده در محیط‌های اسیدی ۱۰۹
۴-۳-۳ آزمایش تعیین مقاومت کششی و نتایج آن ۱۱۷
۴-۳-۴ آزمایش تعیین انقباض و نتایج آن ۱۲۶
۴-۳-۵ آزمایش تعیین تنش چسبندگی و نتایج آن ۱۳۳
۴-۳-۶ نتایج آزمایش نمودار تنش-کرنش بتن و مدول الاستیسیته ۱۳۹

فصل پنجم : نتیجه‌گیری کلی و پیشنهاد برای کارهای آتی ۱۴۴

۵-۱ نتیجه گیری کلی ۱۴۵

۵-۲ راهکارهای پیشنهادی برای پروژه‌های آتی ۱۴۷

منابع ۱۴۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ نتایج جریان اسلامپ بتن تازه طبق طبقه بندی موسسه EFNARC ۱۸

جدول ۲-۲ رده‌بندی لزجت بتن خودتراکم در قیف V در طبقه بندی موسسه EFNARC ۲۵

جدول ۳-۱ دانه بندی شن ۵۸

جدول ۳-۲ مشخصات فیزیکی شن ۵۹

جدول ۳-۳ دانه بندی ماسه ۵۹

جدول ۳-۴ مشخصات فیزیکی ماسه ۵۹

جدول ۳-۵ مشخصات فنی سیمان ۶۰

جدول ۳-۶ مشخصات شیمیایی سیمان سیمان تیپ ۶۰

جدول ۳-۷ مشخصات فنی فوق روان کننده PCE ۶۱

جدول ۳-۸ مشخصات فنی میکروسیلیس ۶۲

جدول ۳-۹ مشخصات شیمیایی میکروسیلیس ۶۲

جدول ۳-۱۰ مشخصات فنی محلول نانوسیلیس ۶۳

جدول ۳-۱۱ مشخصات فنی الیاف پلی‌پروپیلن ۶۴

جدول ۳-۱۲ مقاومت فشاری مورد نیاز وقتی که اطلاعات آماری (انحراف معیار) موجود است ۶۶

جدول ۳-۱۳ مقاومت فشاری مورد نیاز وقتی که اطلاعات آماری (انحراف معیار) موجود نیست..... ۶۷

جدول ۳-۱۴ دامنه تغییرات اجزاء کلیدی طرح اختلاط بتن ۶۸

جدول ۳-۱۵ طرح اختلاط اولیه ۵۶ طرح مقدماتی ۶۹

جدول ۳-۱۶ نتایج آزمایش مقاومت فشاری ۷ روزه و جریان اسلامپ ۵۶ طرح مقدماتی ۷۰

جدول ۳-۱۷ سطوح فاکتورهای موثر در روش تاگوچی ۷۲

جدول ۳-۱۸ ورودی اولیه نرم‌افزار Qualitek-4 ..... ۷۲

جدول۳-۱۹ طرح‌های اختلاط اولیه تاگوچی ۷۳

جدول ۳-۲۰ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ۷ روزه ۱۶ طرح اختلاط اولیه تاگوچی ۷۴

جدول ۳- ۲۱ نتایج آزمایش‌های بتن تازه ۱۶ طرح اختلاط اولیه تاگوچی ۷۴

جدول ۳-۲۲ درصد مشارکت موثر هر پارامتر موثر در مقاومت فشاری بیشتر ۷۶

جدول ۳-۲۳ سطح بهینه فاکتورهای انتخابی طرح اختلاط برای بالاترین مقاومت ۷۷

جدول ۳-۲۴ طرح اختلاط نهایی پیشنهادی تاگوچی ۷۸
جدول ۳-۲۵ طرح اختلاط‌های نهایی بتن خودتراکم الیافی ۷۸
جدول ۴-۱ نتایج آزمایش اسلامپ بتن خودتراکم تازه تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن.....۸۳
جدول ۴-۲ نتایج آزمایش حلقه J بتن خودتراکم تازه تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن ۸۵
جدول ۴-۳ نتایج آزمایش قیف V شکل بتن خودتراکم تازه تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن ۸۸
جدول ۴-۴ نتایج آزمایش جعبه L شکل بتن خودتراکم تازه تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن ۹۰
جدول ۴-۵ نتایج آزمایش جعبه U شکل بتن خودتراکم تازه تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن ۹۲
جدول ۴-۶ میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها برای شرایط و سنین مختلف ۹۵
جدول ۴-۷ مرتبه مقاومتی نمونه‌ها برای شرایط و سنین مختلف ۹۶
جدول ۴-۸ درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به قبل از قرار گیری در محیط اسیدی در سنین مختلف ۹۷
جدول ۴-۹ نسبت مقاومت فشاری کسب شده در شرایط اسیدی به شرایط غیر اسیدی ۹۸
جدول ۴-۱۰ آهنگ تغییر مقاومت در فواصل زمانی مشخص برای شرایط مختلف عمل آوری ۹۹
جدول ۴-۱۱ جرم نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ در شرایط اسیدی در سنین مختلف.... ۱۰۹
جدول ۴-۱۲ درصد کاهش جرم نسبت به قبل از قرارگیری در محیط اسیدی ۱۱۰
جدول ۴-۱۳ میزان مقاومت کششی نمونه‌ها برای شرایط و سنین مختلف ۱۱۷
جدول ۴-۱۴ آهنگ تغییر مقاومت در فواصل زمانی مشخص برای شرایط مختلف نگهداری ۱۱۹
جدول ۴-۱۵ نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری متناظر در شرایط d و w ۱۲۴
جدول۴-۱۶ میزان انقباض نمونه‌ها در شرایط نگهداری d ۱۲۶
جدول۴-۱۷ میزان انقباض نمونه‌ها در شرایط نگهداری مرطوب w ۱۲۷
جدول ۴-۱۸ درصد میزان انقباض نمونه‌ها در شرایط w به شرایط d در سنین مختلف ۱۲۷
جدول ۴-۱۹ میزان تنش چسبندگی نمونه‌ها برای شرایط و سنین مختلف ۱۳۲
جدول ۴-۲۰ آهنگ تغییر تنش چسبندگی فواصل زمانی مشخص در شرایط مختلف نگهداری.. ۱۳۵
جدول ۴-۲۱ میزان تنش حداکثر، کرنش حداکثر و مدول الاستیسیته طرح اختلاط‌ها در سن ۹۰ روز در شرایط d و w ۱۳۹
جدول ۴-۲۲ نسبت تنش و کرنش حداکثر و مدول الاستیسیته در شرایط d به شرایط w ۱۴۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱تصویری از مکانیزم انسداد ۱۰

شکل ۲-۲ دستگاه مخروط اسلامپ و صفحه پایه ۱۷

شکل ۲-۳ ابعاد مخروط اسلامپ و صفحه پایه ۱۷

شکل ۲-۴ جداشدگی در آزمایش جریان اسلامپ ۱۹

شکل ۲-۵ دستگاه مخروط اسلامپ و صفحه پایه و حلقه J ۲۰

شکل ۲-۶ ابعاد حلقه J ۲۱

شکل ۲-۷ عبور بتن از میان آرماتورهای حلقهJ ۲۲

شکل ۲-۸ دستگاه قیف V شکل ۲۳

شکل ۲-۹ ابعاد قیف V شکل ۲۳

شکل ۲-۱۰ آب انداختگی بتن خودتراکم روی دستگاه قیف V شکل ۲۴

شکل ۲-۱۱ دستگاه آزمایش جعبه L شکل ۲۶

شکل ۲-۱۲ ابعاد جعبه L شکل ۲۶

شکل ۲-۱۳ رفتار بتن خودتراکم بعد از باز شدن دریچه جعبه L شکل ۲۸

شکل ۲-۱۴ دستگاه آزمایش جعبه U شکل ۲۸

شکل ۲-۱۵ ابعاد جعبه U شکل ۲۹

شکل ۲-۱۶ نحوه قرار گیری بتنی در داخل محفظه U شکل ۳۰

شکل ۲-۱۷ دستگاه آزمایش اوریمت ۳۱

شکل ۲-۱۸ ابعاد دستگاه اوریمت ۳۲

شکل ۲-۱۹ دستگاه ترکیبی اریمت و حلقه J شکل ۳۳

شکل ۲-۲۰ رفتار بتن در آزمایش با دستگاه ترکیبی اریمت و حلقه J شکل ۳۳

شکل ۲-۲۱ دستگاه آزمایش GTM ۳۴

شکل ۲-۲۲ شکست بتن با استحکام بالا ۴۱

شکل ۲-۲۳ شکلهای گسیختگی رضایت بخش نمونه‌های مکعبی آزمایش طبق BS ۱۸۸۱ ..... ۴۹

شکل ۲-۲۴ نحوه بارگذاری نمونه استوانه‌ای در آزمایش کشش به روش برزیلی ۵۰

شکل ۲-۲۵ نحوه قرارگیری پولک‌های فلزی بر روی نمونه‌های منشوری ۵۱

شکل ۲-۲۶ کرنش سنج مورد استفاده در آزمایش‌ها انقباض و تورم ۵۲
شکل ۲-۲۷ نحوه قرارگیری آرماتورها در نمونه‌های بتنی ۵۳
شکل ۲-۲۸ دستگاه کششی آرماتورها از داخل نمونه‌های بتنی ۵۴
شکل ۲-۲۹ منحنی عمومی تنش-کرنش ۵۴
شکل ۲-۳۰ نحوه انجام آزمایش تنش-کرنش و نصب کرنش سنج مکانیکی ۵۵
شکل ۳-۱ ذرات نانوسیلس در زیر میکروسکوپ الکترونی ۶۳
شکل ۳-۲ نمودار روند برقراری خواص مورد نیاز بتن خودتراکم ۶۷
شکل ۳-۳ نمودار خطی آزمایش جریان اسلامپ۱۶ طرح اختلاط اولیه ۷۵
شکل ۳-۴ نمودار خطی فاکتور نسبت آب به مواد پودری بر حسب جریان اسلامپ ۷۵
شکل ۳-۵ نمودار خطی مقاومت فشاری ۷ روزه ۱۶ طرح اختلاط اولیه تاگوچی..... ۷۶
شکل ۴-۱ نمودار تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر قطر جریان اسلامپ ۸۴
شکل ۴-۲ نمودار زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتیمتر جریان اسلامپ ۸۴
شکل ۴-۳ نمودار قطر جریان اسلامپ در آزمایش حلقه J ۸۵
شکل ۴-۴ تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر اختلاف ارتفاع داخل و خارج حلقه در آزمایش حلقه J ۸۶
شکل ۴-۵ رابطه قطر اسلامپ و اختلاف ارتفاع در آزمایش حلقه J ۸۶
شکل ۴-۶ تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر قطر جریان اسلامپ در آزمایش اسلامپ و حلقه J ۸۷
شکل ۴-۷ زمان خارج شدن بتن از قیف V شکل بعد از ۱۰ ثانیه ۸۸
شکل ۴-۸ زمان خارج شدن بتن از قیف V شکل بعد از ۵ دقیقه ۸۹
شکل ۴-۹ زمان خارج شدن بتن از قیف V شکل بعد از ۱۰ ثانیه و بعد از ۵ دقیقه ۸۹
شکل ۴-۱۰ زمان عبور بتن از شاخصه‌های ۲۰ و ۴۰ سانتیمتری جعبه L ۹۱
شکل ۴-۱۱ نسبت ارتفاع خمیر بتن در ابتدا و انتهای جعبه L شکل(h_1/h_2) ۹۱
شکل ۴-۱۲ زمان تخلیه بتن در مجرای دوم جعبه U شکل ۹۳
شکل ۴-۱۳ اختلاف ارتفاع بتن در مجراهای جعبه U شکل ۹۳
شکل۴-۱۴ نمودار خطی تغییرات مقاومت فشاری برحسب زمان در شرایط نگهداری d ۱۰۱
شکل۴-۱۵ نمودار خطی تغییرات مقاومت فشاری برحسب زمان در شرایط نگهداری w ۱۰۱
شکل۴-۱۶ نمودار خطی مقاومت فشاری در شرایط نگهداری مختلف طرح اختلاط SccA ۱۰۲
شکل۴-۱۷ نمودار خطی مقاومت فشاری در شرایط نگهداری مختلف طرح اختلاط SccB ۱۰۲
شکل۴-۱۸ نمودار خطی مقاومت فشاری در شرایط نگهداری مختلف طرح اختلاط SccC ۱۰۳

شکل۴-۱۹ نمودار خطی مقاومت فشاری در شرایط نگهداری مختلف طرح اختلاط SccD ۱۰۳
شکل۴-۲۰ نمودار میله‌ای تغییرات مقاومت فشاری درسن ۲۸ روز برای طرح‌های اختلاط ۱۰۴
شکل۴-۲۱ نمودار میله‌ای تغییرات مقاومت فشاری درسن ۵۶ روز برای طرح‌های اختلاط ۱۰۴
شکل۴-۲۲ نمودار میله‌ای تغییرات مقاومت فشاری درسن ۹۰ روز برای طرح‌های اختلاط ۱۰۵
شکل۴-۲۳ نمودار میله‌ای تغییرات مقاومت فشاری درسن ۲۸ روز برای شرایط نگهداری ۱۰۵
شکل۴-۲۴ نمودار میله‌ای تغییرات مقاومت فشاری درسن ۵۶ روز برای شرایط نگهداری ۱۰۶
شکل۴-۲۵ نمودار میله‌ای تغییرات مقاومت فشاری درسن ۹۰ روز برای شرایط نگهداری ۱۰۶
شکل۴-۲۶ نمودار خطی درصد تغییر مقاومت فشاری در شرایط اسیدی طرح SccA ۱۰۷
شکل۴-۲۷ نمودار خطی درصد تغییر مقاومت فشاری در شرایط اسیدی طرح SccB ۱۰۷
شکل۴-۲۸ نمودار خطی درصد تغییر مقاومت فشاری در شرایط اسیدی طرح SccC ۱۰۸
شکل۴-۲۹ نمودار خطی درصد تغییر مقاومت فشاری در شرایط اسیدی طرح SccD ۱۰۸
شکل ۴-۳۰ نمونه بتنی SccA در شرایط نگهداری S1،S2 وS3 ..... ۱۱۱
شکل ۴-۳۱ نمونه بتنی SccA در شرایط نگهداری wS1، wS2 وwS3 ..... ۱۱۲
شکل۴-۳۲ نمودار خطی درصد کاهش جرم برحسب زمان در شرایط اسیدی طرح SccA ۱۱۳
شکل۴-۳۳ نمودار خطی درصد کاهش جرم برحسب زمان در شرایط اسیدی طرح SccB ۱۱۳
شکل۴-۳۴ نمودار خطی درصد کاهش جرم برحسب زمان در شرایط اسیدی طرح SccC ۱۱۴
شکل۴-۳۵ نمودار خطی درصد کاهش جرم برحسب زمان در شرایط اسیدی طرح SccD ۱۱۴
شکل۴-۳۶ نمودار میله‌ای درصد جرم کاهش یافته درسن ۵۶ روز برای مقایسه طرح‌های ۱۱۶
شکل۴-۳۷ نمودار میله‌ای درصد جرم کاهش یافته درسن ۹۰ روز برای مقایسه طرح‌های ۱۱۶
شکل۴-۳۸ نمودار خطی مقاومت کششی برحسب زمان در شرایط نگهداری d ۱۱۸
شکل۴-۳۹ نمودار خطی مقاومت کششی برحسب زمان در شرایط نگهداری w ۱۱۸
شکل۴-۴۰ نمودار میله‌ای تغییرات مقاومت کششی سنین مختلف برای شرایط نگهداری d ۱۲۰
شکل۴-۴۱ نمودار میله‌ای تغییرات مقاومت کششی سنین مختلف برای شرایط نگهداری w ۱۲۰
شکل۴-۴۲ نمودار میله‌ای مقاومت کششی در شرایط نگهداری مختلف طرح اختلاط SccA ۱۲۱
شکل۴-۴۳ نمودار میله‌ای مقاومت کششی در شرایط نگهداری مختلف طرح اختلاط SccB ۱۲۱
شکل۴-۴۴ نمودار میله‌ای مقاومت کششی در شرایط نگهداری مختلف طرح اختلاط SccC ۱۲۲
شکل۴-۴۵ نمودار میله‌ای مقاومت کششی در شرایط نگهداری مختلف طرح اختلاط SccD..... ۱۲۲

شکل۴-۴۶ نمودار خطی تغییرات مقاومت فشاری- مقاومت کششی در شرایط نگهداری d ۱۲۳
شکل۴-۴۷ نمودار خطی تغییرات مقاومت فشاری- مقاومت کششی در شرایط نگهداری w ۱۲۳
شکل ۴-۴۸ ترک ایجاد شده نمونه استونه‌ای الیافی بعد از آزمایش مقاومت کششی ۱۲۵
شکل ۴-۴۹ شکست نمونه استوانه‌ای فاقد الیاف پلی‌پروپیلن ۱۲۵
شکل ۴-۵۰ نمودار خطی کرنش - زمان برای طرح اختلاط‌های مختلف در شرایط d ۱۲۸
شکل ۴-۵۱ نمودار خطی کرنش - زمان برای طرح اختلاط‌های مختلف در شرایط w ۱۲۸
شکل ۴-۵۲ نمودار خطی کرنش - زمان در شرایط مختلف برای طرح اختلاط SccA ۱۳۰
شکل ۴-۵۳ نمودار خطی کرنش - زمان در شرایط مختلف برای طرح اختلاط SccB ۱۳۰
شکل ۴-۵۴ نمودار خطی کرنش - زمان در شرایط مختلف برای طرح اختلاط SccC ۱۳۱
شکل ۴-۵۵ نمودار خطی کرنش - زمان در شرایط مختلف برای طرح اختلاط SccD ۱۳۱
شکل ۴-۵۶ نمونه‌های شکسته شده بعد از آزمایش مقاومت چسبندگی ۱۳۳
شکل ۴-۵۷ نمودار خطی تنش چسبندگی بر حسب زمان در شرایط d ۱۳۴
شکل ۴-۵۸ نمودار خطی تنش چسبندگی بر حسب زمان در شرایط w ۱۳۴
شکل ۴-۵۹ نمودار میله‌ای تنش چسبندگی بر حسب زمان در شرایط d ۱۳۶
شکل ۴-۶۰ نمودار میله‌ای تنش چسبندگی بر حسب زمان در شرایط w ۱۳۶
شکل۴-۶۱ نمودار خطی تغییرات مقاومت فشاری- مقاومت چسبندگی در شرایط d ۱۳۷
شکل۴-۶۲ نمودار خطی تغییرات مقاومت فشاری- مقاومت چسبندگی در شرایط w ۱۳۷
شکل۴-۶۳ نمودار خطی تغییرات مقاومت کششی- مقاومت چسبندگی در شرایط d ۱۳۸
شکل۴-۶۴ نمودار خطی تغییرات مقاومت کششی- مقاومت چسبندگی در شرایط w ۱۳۸
شکل۴-۶۵ نمودار تنش کرنش طرح اختلاط‌ها در سن ۹۰ روز در شرایط نگهداری d ۱۴۰
شکل۴-۶۶ نمودار تنش کرنش طرح اختلاط‌ها در سن ۹۰ روز در شرایط نگهداری w ۱۴۰
شکل۴-۶۷ نمودار تنش-کرنش در سن ۹۰ روز در شرایط نگهداری مختلف طرح SccA ۱۴۱
شکل۴-۶۸ نمودار تنش-کرنش در سن ۹۰ روز در شرایط نگهداری مختلف طرح SccB ۱۴۱
شکل۴-۶۹ نمودار تنش-کرنش در سن ۹۰ روز در شرایط نگهداری مختلف طرح SccC ۱۴۲
شکل۴-۷۰ نمودار تنش-کرنش در سن ۹۰ روز در شرایط نگهداری مختلف طرح SccD ۱۴۲

فصل اول

مقدمه

فصل ۱- مقدمه

۱-۱- پیشگفتار

بتن به عنوان پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی شناخته می‌شود که استفاده از آن همچنان در حال افزایش است. با گسترش استفاده از بتن، اقتصاد، دوام و کیفیت آن اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. بتن خودمتراکم پدیده جدیدی در علم مصالح ساختمانی است که کمتر از دو دهه از عمر آن می‌گذرد. چنین بتنی بدون نیاز به هیچ لرزاننده‌ای تحت اثر وزن خودتراکم شده و از کارایی بالایی برخوردار است. در اوایل دهه ۸۰ میلادی دوام سازه‌های بتنی از موضوعات مورد علاقه محققین به ویژه محققین ژاپنی قرار گرفت. برای ساخت یک سازه بتنی با دوام، بتن در فاز خمیری باید به خوبی متراکم و نگهداری گردد. وجود مشکلات اجرایی و هزینه بالای نیروی کار در ژاپن باعث تقویت ایده ساخت بتن‌خودتراکم توسط Okamoura در سال ۱۹۸۶ گردید و اولین مدل بتن‌خودتراکم در سال ۱۹۸۸ تکمیل و ساخته شد. این بتن با ویژگی‌های خاص خود، امکانات جدیدی را در اختیار قرار داده که با استفاده از آن می‌توان بر مشکلاتی که ناشی از عدم تراکم مناسب در سازه‌های بتنی می‌باشد از جمله کاهش عمر و دوام سازه‌ها فائق آمد[۱]. امروزه چنین بتنی به خصوص با تولید نسل جدید فوق روان کننده‌ها و افزودنی‌های بتن در بسیاری از پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله مزایای استفاده از بتن خودتراکم می‌توان به افزایش سرعت اجرا، کاهش نیروی انسانی، اطمینان از تراکم کافی بتن در مناطق با تراکم میلگرد بالا، کاهش آلودگی صوتی، بالا رفتن کیفیت نهایی محصول و از همه مهمتر صرفه‌جویی اقتصادی اشاره کرد[۲].

از طرفی بتن خودتراکم از نظر خواص دارای معایبی نیز می‌باشد که از مهمترین معایب آن مقاومت کششی کم آن است، به همین دلیل دارای شکل پذیری کم و تردی زیاد می‌باشد. برای رفع این عیب از تسلیح بتن توسط میلگردهای فولادی استفاده می‌شود. این میلگردها به صورت متمرکز در بتن قرار می‌گیرند و تا حد خیلی زیاد ضعف مقاومت کششی بتن را جبران می‌کند. استفاده از میلگرد در همه جا امکانپذیر نبوده یا باعث هزینه‌های زیادی می‌شود، مانند: پوسته کانال‌های آب، روسازی، فرودگاه‌ها و.... از این‌رو برای رفع این مشکل در چند دهه اخیر از رشته‌های الیاف که به صورت یکنواخت در حجم بتن پراکنده استفاده می‌شود که ایده آن به قرن‌ها قبل مانند استفاده از کاه یا موی دم اسب در خشت‌های

گلی برمی‌گردد. انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ترک‌ها و ریزترک‌ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است. تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریز ترک‌ها می‌شوند و چنین ریز ترک‌هایی در سطح دانه‌های درشت متمرکز می‌شوند. با تأثیر بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریز ترک‌ها در جسم بتن منتشر می‌شود[۳].

استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی به عنوان یک گام موثر در جلوگیری از انتشار ریزترک‌ها و ترک‌ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می‌شود. مهمترین مشخصه بتن الیافی خاصیت جذب انرژی، انعطاف‌پذیری و مقاومت در برابر ضربه است. به همین دلیل امروزه این بتن نقش بسیار جدی در پیشرفت تکنولوژی بتن ایفا کرده و به عنوان یک ماده جدید و اقتصادی در مسائل ساختمانی محسوب شده است[۴]. خاصیت جذب انرژی و طاقت بتن می‌تواند به نحو مطلوبی خطر شکست سازه‌های بتنی به خصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزه‌ای قرار می‌گیرند را کاهش دهد. ناحیه تماس که به اسامی مختلفی مانند لایه مرزی یا منطقه انتقالی نامیده می‌شود، ناحیه مرزی بین خمیر سیمان و سطح سنگدانه با الیاف پدید می‌آید که نقش مهمی در نفوذپذیری و مقاومت بتن دارد. ناحیه تماس دارای میکروساختاری متفاوت با خمیر سیمان بوده و دارای تخلخل و ریزترک‌های بیشتری است. ضخامت ناحیه تماس، تابع نوع الیاف، نوع سیمان، نوع پوزولان مصرفی، نسبت آب به سیمان و سن بتن می‌باشد.

بتن خودتراکم مسلح به الیاف به دلایلی نظیر لزجت مناسب، روانی بالا، بهبود دوام، پایایی و خواص مکانیکی همچون کرنش جمع شدگی و مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی در اهداف گوناگون از جمله نوسازی و بهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حضور الیاف در بتن خودتراکم تا حد زیاد می‌تواند خواص رفتار شناسی و مکانیکی مخلوط را بهبود بخشد، اما افزایش بیش از حد حجم الیاف تا حد زیادی از میزان کارایی و کارپذیری مخلوط می‌کاهد[۵]. این مسئله باعث افزایش حجم هوای محبوس در مخلوط شده و در نتیجه کاهش مقاومت و عمر بهره‌برداری مصالح را در بر خواهد داشت. از این رو دستیابی به مقدار بهینه الیاف در بتن خودتراکم برای رسیدن به ترکیبی پایدار با روانی مناسب و خواص سخت شده قابل قبول از اهمیت زیادی برخوردار است.

در این بررسی آزمایشگاهی برای تقویت ناحیه تماس از نانوسیلیس به عنوان پوزولان مصنوعی بسیار فعال که از محصولات فناوری نانو است استفاده شده است. در سال‌های اخیر، با ورود فناوری نانو دیدگاه‌های جدید در زمینه فناوری بتن ایجاد شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به بهبود دانش و درک فیزیکی و شیمیایی واکنش و ریزساختار بتن و نیز بهبود کیفیت بتن‌های موجود و روش‌های

اجرایی مرتبط با آن با استفاده از مواد جدید در مقیاس نانو یا همان نانو ذرات اشاره کرد. طبق تعریف، نانو ذره به ذره‌ای اطلاق می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. با توجه به ریز ساختار سیمان هیدراته شده و وجود حفراتی در ابعاد نانو در آن، استفاده از نانو ذرات می‌تواند در پر کردن تخلخل‌های بسیار ریز خمیر سیمان و افزایش مقاومت و به خصوص دوام بتن موثر باشد. نتایج تحقیقات انجام شده توسط Qing [۶] ، Collepardi [۷] و Li [۸] این مسأله را تأیید می‌کند. بنابراین وجود نانوسیلیس می‌تواند استحکام فشاری خمیر سخت شده سیمان و استحکام پیوندی سنگدانه با خمیر و همچنین الیاف با خمیر سیمان را افزایش داده و ساختار ناحیه انتقال را به طور موثری بهبود ببخشد.

۱-۲- مسئله مورد تحقیق

هدف از انجـام این پروژه، طراحی، ساخت و بررسی خصوصیات مکانیکی بتن خـودمتراکم دارای محلول نانوسیلیس تقویت شده با الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد. در راستای این مهم، با سعی و خطا ابتدا ۵۶ طرح اولیه ساخته شد و پارامترهایی از قبیل شکل ظاهری، آزمایشات کارایی جریان اسلامپ برای بتن تازه و برای بتن سخت شده، میزان مقاومت فشاری در سن ۷ روز، بررسی و اندازه‌گیری شد. در این ۵۶ طرح اختلاط اولیه از مصالح اولیه شن، ماسه، سیمان، آب، پودر سنگ و فوق روان کننده استفاده شده و افزودنی‌های دیگر از قبیل میکروسیلیس و نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن را درگام‌های بعد به طرح اضافه گشت. سپس بر اساس معیارهای حاصل، محدوده‌ای از سطح فاکتورهای موثر در کارایی بتن تازه و مقاومت فشاری، انتخاب و مشخص گردید. با استفاده از روش آماری تاگوچی بهینه‌ترین طرح اختلاط ممکن برای مقاومت فشاری و کارایی مناسب، با میکروسیلیس و نانوسیلیس و بدون الیاف پلی‌پروپیلن به پیشنهاد تاگوچی بدست آمد. طرح اختلاط نهایی پیشنهادی تاگوچی را با الیاف پلی‌پروپیلن تقویت کرده و تحقیقات تکمیلی بیشتری در مورد بتن تازه و سخت شده صورت گرفت.

پس از بررسی خصوصیات بتن تازه آزمایش‌های جریان اسلامپ، جعبه L، قیف V، جعبه U و حلقه J برای پنج طرح منتخب انجام گرفته، نمونه‌های مختلفی ساخته و در شرایط عمل‌آوری متفاوت نگهداری گردید و خصوصیات مکانیکی متفاوتی از بتن سخت شده مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، انقباض و چسبندگی میان بتن و میلگرد در سنین کوتاه مدت و بلند مدت، تا سن ۹۰ روز مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.