

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تبریز

دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی عمران

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران

گرایش مدیریت ساخت

عنوان:

تأثیر اندازه و نوع الیاف بر خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن خود

تراکم اجرا شده در لایه های مجزا

استاد راهنما:

دکتر رضا صالح اهری

نگارش:

میثم خلیل زاده

بهار ۹۹

تقديم به:

سپاسگزاری:

چکیده

در بتن ریزی های با حجم بالای بتن خود متراکم مانند پی ها و دیوارهای طویل ریختن بتن در لایه های با فاصله زمانی در برخی مواقع اجتناب ناپذیر می باشد. بررسی های پیشین نشان داده است که این موضوع میتواند سبب عدم یکپارچگی مکانیکی در لایه های بتن های ریخته شده با فاصله زمانی زیاد شود. از این رو خواص مکانیکی و نفوذ ناپذیری این نوع از بتن ریزی ها تحت تاثیر درز ایجاد شده در لایه های متعاقب بتن ریزی قرار گیرد.

استفاده از الیاف در بتن های خود متراکم مزایا و معایبی در پی دارد. از مزایای آن میتوان به افزایش شکل پذیری بتن و بهبود خواص مکانیکی آن اشاره نمود. همچنین استفاده از الیاف میتواند خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن خود متراکم اجرا شده در لایه های مجزا را تحت تاثیر قرار دهد.

در تحقیق حاضر از دو نوع الیاف شیشه ای و فولادی در ترکیبات جداگانه و دوتایی در ساخت مخلوط های بتنی خود متراکم ریخته شده در لایه های مجزا استفاده شده و نتایج مقاومت های برشی مستقیم، برشی مورب و کشش تحت شکافت بعد از گذشت زمانهای صفر، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ دقیقه مورد تحلیل قرار گرفته است. درصد ترکیب هریک از الیاف ها در مخلوطهای بتنی بر اساس ۰/۵، ۱، ۱/۵ درصد وزن سیمان بوده است. آزمایشات ۲۸ روزه برشی مستقیم، برشی مورب و کشش تحت شکافت بر روی نمونه های مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵ صورت گرفته است.

نتایج حاصله حاکی آن است که در بهینه ترین حالت استفاده از الیاف فولاد و شیشه باعث افزایش ۳۵ درصدی مقاومت برشی مورب و ۲۰ درصدی مقاومت برشی مستقیم شده است. همچنین استفاده از الیاف فولاد و شیشه باعث افزایش ۱۸ درصدی مقاومت کششی تحت فشار شده است.

کلمات کلیدی: بتن خود متراکم، الیاف فولاد، الیاف شیشه، مقاومت برشی مورب، مقاومت برشی مستقیم، مقاومت کششی تحت فشار

فهرست

فصل اول

مقدمه و اهداف پژوهش

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- تاریخچه و ضرورت انجام تحقیق: ۴
- ۳-۱- دامنه پژوهش: ۵
- ۴-۱- اهداف پژوهش: ۷
- ۵-۱- فرضیات پژوهش ۸
- ۵-۱- ساختار پایان نامه ۸

فصل دوم

کلیات و پیشینه پژوهش

- ۱-۲- مقدمه ۱۱
- ۲-۲- بتن خود تراکم ۱۲
- ۱-۲-۲- تاریخچه ۱۲
- ۲-۲-۲- ویژگی های بتن خودتراکم تازه ۱۳
- ۳-۲-۲- رئولوژی بتن خودتراکم ۱۴
- ۴-۲-۲- کارایی بتن خودتراکم ۱۵
- ۱-۴-۲-۲- قابلیت جریان و عبور ۱۵
- ۲-۴-۲-۲- قابلیت پر کنندگی ۱۸
- ۳-۴-۲-۲- قابلیت پایداری ۲۱
- ۵-۲-۲- آزمایش های بتن تازه خودتراکم ۲۳
- ۱-۵-۲-۲- آزمایش جریان اسلامپ و جریان اسلامپ ۵۰ سانتیمتر ۲۴

- ۲۹..... ۲-۵-۲-۲- آزمايش حلقه J.....
- ۳۲..... ۳-۵-۲-۲- آزمايش قيف V شكل و زمان ۵ دقيقه.....
- ۳۷..... ۴-۵-۲-۲- آزمايش جعبه L شكل.....
- ۴۱..... ۵-۵-۲-۲- آزمايش جعبه U.....
- ۴۵..... ۶-۵-۲-۲- آزمايش اورميت.....
- ۴۸..... ۶-۲-۲- نحوه توليد بتن خودتراكم SCC.....
- ۴۸..... ۱-۶-۲-۲- دپوي مواد اوليه.....
- ۴۹..... ۲-۶-۲-۲- تجهيزات اختلاط.....
- ۴۹..... ۳-۶-۲-۲- روش هاي اختلاط بتن خودتراكم.....
- ۵۰..... ۴-۶-۲-۲- انتقال بتن SCC.....
- ۵۰..... ۵-۶-۲-۲- كنترل كيفيت و پذيرش بتن خودتراكم.....
- ۵۱..... ۳-۲- بتن اليافي.....
- ۵۲..... ۱-۳-۲- تاريخچه.....
- ۵۳..... ۲-۳-۲- ويژگي بتن اليافي.....
- ۵۶..... ۳-۳-۲- موارد استفاده و محدوديت هاي کاربردي.....
- ۵۷..... ۴-۳-۲- توجيه اقتصادي بتن اليافي.....
- ۵۷..... ۴-۲- انواع الياف.....
- ۵۷..... ۱-۴-۲- الياف گياهي.....
- ۵۸..... ۲- ۴- ۲- الياف مصنوعي.....
- ۵۹..... ۲- ۴- ۲- ۱- الياف شيشه.....
- ۵۹..... ۲-۴-۲-۱-۱- انواع الياف شيشه.....
- ۶۰..... ۲-۴-۲-۱-۲- کاربرد الياف شيشه.....
- ۶۰..... ۲-۴-۲-۱-۳- مزيت الياف شيشه در بتن.....

- ۶۱..... ۲-۴-۲-۱-۴- نحوه استفاده الیاف شیشه
- ۶۱..... ۲-۴-۲-۱-۵- فرآیند تولید الیاف شیشه
- ۶۲..... ۲- ۴- ۳- الیاف فلزی
- ۶۳..... ۲- ۴- ۳-۱- الیاف فولادی
- ۶۳..... ۲- ۴- ۳-۱-۱- تاریخچه
- ۶۴..... ۲- ۴- ۳-۱-۲- انواع الیاف فولادی و ویژگیهای آنها
- ۶۶..... ۲- ۴- ۳-۱-۳- خواص بتن مسلح به الیاف فولادی
- ۶۶..... ۲- ۴- ۳-۱-۳- مقاومت استاتیکی
- ۶۷..... ۲- ۴- ۳-۱-۳- مقاومت خمشی
- ۶۷..... ۲- ۴- ۳-۱-۳- مقاومت برشی
- ۶۷..... ۲- ۴- ۳-۱-۳- مقاومت پیچشی
- ۶۸..... ۲- ۴- ۳-۱-۵- مقاومت ترک خوردگی
- ۶۸..... ۲- ۴- ۳-۱-۶- پوسیدگی و زنگ زدگی الیاف فولادی
- ۶۸..... ۲- ۴- ۳-۱-۷- قابلیت هدایت حرارتی
- ۶۹..... ۲- ۴- ۳-۱-۴- مکانیزم عملکرد الیاف در بتن
- ۷۰..... ۲- ۴- ۳-۱-۵- نحوه ساخت الیاف فولادی
- ۷۰..... ۲- ۴- ۳-۱-۶- نسبت ظاهری الیاف
- ۷۲..... ۲- ۴- ۳-۱-۷- ضریب ارتجاعی الیاف
- ۷۲..... ۲- ۴- ۳-۱-۸- پیوستگی الیاف به ماتریس
- ۷۳..... ۲- ۴- ۳-۱-۹- ضریب پواسون الیاف
- ۷۳..... ۲- ۴- ۳-۱-۱۰- خاصیت ارتجاعی
- ۷۳..... ۲- ۴- ۳-۱-۱۱- کرنش پذیری الیاف
- ۷۴..... ۲- ۴- ۳-۱-۱۲- حجم بحرانی الیاف

- ۲ - ۴ - ۳-۱-۱۳- شیوه قرار گرفتن و توزیع الیاف در ماتریس ۷۵
- ۲-۵- پوزولان در بتن خود تراکم ۷۶
- ۲-۵-۱- خاکستر بادی ۷۷
- ۲-۵-۱-۱- مقدمه ۷۷
- ۲-۵-۱-۲- منابع خاکستر بادی ۷۸
- ۲-۵-۱-۳- ساختار خاکستر بادی ۷۹
- ۲-۵-۱-۴- ساختار شیمیایی ۷۹
- ۲-۴-۱- فعالیت شیمیایی خاکستر بادی در بتن با سیمان هیدرولیکی ۸۳

فصل سوم

مواد و روش ها

- ۳-۱- مقدمه ۸۵
- ۳-۲- مواد و مصالح مصرفی ۸۶
- ۳-۲-۱- سیمان ۸۶
- ۳-۲-۲- آب ۸۷
- ۳-۲-۳- سنگدانه ها ۸۸
- ۳-۲-۳-۱- سنگدانه درشت ۸۸
- ۳-۲-۳-۲- سنگدانه ریز ۹۰
- ۳-۲-۳-۴- فوق روان کننده ۹۲
- ۳-۲-۳-۵- الیاف ۹۳
- ۳-۲-۳-۱- الیاف فولادی ۹۳
- ۳-۲-۳-۲- الیاف شیشه ۹۴
- ۳-۲-۳-۶- خاکستر بادی ۹۵
- ۳-۳- طرح اختلاط Scc ۹۷

- ۳-۳-۱- تعیین مقدار سنگدانه درشت ۹۷
- ۳-۳-۲- تعیین مقدار سنگدانه ریز ۹۷
- ۳-۳-۳- تعیین مقدارسیمان ۹۸
- ۳-۳-۴- تعیین نسبت آب به سیمان ۹۸
- ۳-۳-۵- تعیین مقدار فوق روان کننده ۹۸
- ۳-۳-۶- محاسبات طرح اختلاط ۹۹
- ۳-۳-۷- طرح اختلاط نهایی ۹۹
- ۳-۴-۱- روش ساخت مخلوط ها ۱۰۶
- ۳-۵-۱- قالب گیری بتن ۱۰۶
- ۳-۵-۱-۱- ساخت نمونه های آزمایش مقاومت برشی مورب ۱۰۶
- ۳-۵-۲- ساخت نمونه های آزمایش مقاومت برشی مستقیم ۱۱۰
- ۳-۵-۳- ساختن نمونه های آزمایش مقاومت کششی تحت شکافت ۱۱۲

فصل چهارم

بحث و بررسی نتایج

- ۴-۱-۱- مقدمه ۱۱۶
- ۴-۲-۱- آزمایش های بتن سخت شده ۱۱۷
- ۴-۱-۱- مقاومت برشی مورب ۱۱۷
- ۴-۲-۲- مقاومت برشی مستقیم ۱۲۶
- ۴-۳-۱- مقاومت کششی تحت شکافت ۱۳۵
- ۴-۴-۱- ارتباط مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب بتن خود متراکم حاوی الیاف ۱۴۴

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۵-۱-۱- مقدمه ۱۵۱

۱۵۱ ۲-۵- نتیجه گیری

۱۵۲ ۳-۵- پیشنهادات

فهرست جداول

- جدول ۱-۲- نتایج جریان اسلامپ بتن تازه طبق طبقه بندی موسسه EFNARC..... ۲۷
- جدول ۲-۲- رده بندی لزجت بتن خودتراکم در قیف V شکل طبق طبقه بندی موسسه EFNARC... ۳۶
- جدول ۳-۲- ویژگی های الیاف فولادی ۶۶
- جدول ۴-۲- یک روش طبقه بندی خاکستر بادی ۸۰
- جدول ۵-۲- ساختار شیمیایی خاکسترهای بادی معمول آمریکای شمالی برای منابع مختلف..... ۸۱
- جدول ۶-۲- الزامات شیمیایی خاکستر..... ۸۱
- جدول ۶-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی یک نمونه خاکستر بادی..... ۸۲
- جدول ۱-۳- ترکیبات شیمیایی سیمان معمولی کارخانه صوفیان تبریز..... ۸۶
- جدول ۲-۳- مشخصات فیزیکی سیمان تپ یک کارخانه صوفیان تبریز..... ۸۷
- جدول ۳-۳- دانه بندی سنگدانه درشت مورد استفاده..... ۸۹
- جدول ۴-۳- مشخصات آزمایشگاهی سنگدانه ریز..... ۹۰
- جدول ۵-۳- دانه بندی ماسه مورد استفاده..... ۹۱
- جدول ۶-۳- مشخصات فنی فوق روان کننده مورد استفاده..... ۹۲
- جدول ۷-۳- مشخصات فنی الیاف فولادی..... ۹۳
- جدول ۸-۳- مشخصات فنی الیاف فولادی..... ۹۴
- جدول ۹-۳- آنالیز شیمیایی خاکستر بادی مورد استفاده..... ۹۵
- جدول ۱۰-۳- طرح اختلاط بتن خودتراکم براساس آیین نامه - ۲۰۰۵ EFNARC..... ۹۸
- جدول ۱۱-۳- طرح اختلاط نمونه کنترل..... ۹۹
- جدول ۱۲-۳- طرح اختلاط نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه..... ۱۰۰
- جدول ۱۳-۳- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱ درصد الیاف شیشه..... ۱۰۰
- جدول ۱۴-۳- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف شیشه..... ۱۰۱
- جدول ۱۵-۳- طرح اختلاط نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولاد..... ۱۰۱

- جدول ۳-۱۶- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱ درصد الیاف فولاد ۱۰۲
- جدول ۳-۱۷- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف فولاد ۱۰۲
- جدول ۳-۱۸- طرح اختلاط نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت مساوی) ... ۱۰۳
- جدول ۳-۱۹- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت مساوی) ۱۰۳
- جدول ۳-۲۰- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت مساوی) ... ۱۰۴
- جدول ۳-۲۱- طرح اختلاط نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت ۷۰ درصد فولاد و ۳۰ شیشه) ۱۰۴
- جدول ۳-۲۲- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت ۷۰ درصد فولاد و ۳۰ شیشه) ۱۰۵
- جدول ۳-۲۳- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت ۷۰ درصد فولاد و ۳۰ شیشه) ۱۰۵
- جدول ۴-۱- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه کنترل ۱۱۷
- ۱۱۷
- جدول ۴-۲- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی الیاف شیشه ۱۱۸
- جدول ۴-۳- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی الیاف فولاد ۱۲۰
- جدول ۴-۴- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی الیاف شیشه و فولاد بصورت مساوی ۱۲۲
- ۱۲۲
- جدول ۴-۵- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد ۱۲۴
- ۱۲۴
- جدول ۴-۶- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه کنترل ۱۲۶
- ۱۲۶
- جدول ۴-۷- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف شیشه ۱۲۷
- ۱۲۷
- جدول ۴-۸- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف فولاد ۱۲۹
- ۱۲۹

- جدول ۹-۴- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف شیشه و فولاد بصورت مساوی
۱۳۱
- جدول ۱۰-۴- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰
درصد شیشه..... ۱۳۳
- جدول ۱۱-۴- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه کنترل..... ۱۳۵
- ۱۳۵
- جدول ۱۲-۴- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی الیاف شیشه ۱۳۶
- جدول ۱۳-۴- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی الیاف فولاد..... ۱۳۸
- جدول ۱۴-۴- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی الیاف شیشه و فولاد بصورت
مساوی ۱۴۰
- جدول ۱۵-۴- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰
درصد شیشه..... ۱۴۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- تصویر از مکانیزم انسداد ۱۶
- شکل ۲-۲- دستگاه مخروط اسلامپ و صفحه پایه ۲۵
- شکل ۳-۲- ابعاد مخروط اسلامپ و صفحه پایه ۲۶
- شکل ۴-۲- جداشدگی در آزمایش جریان اسلامپ ۲۹
- شکل ۵-۲- دستگاه مخروط اسلامپ و صفحه پایه و حلقه J ۳۰
- شکل ۶-۲- ابعاد حلقه J ۳۱
- شکل ۷-۲- عبور بتن از میان میلگردهای حلقه J ۳۲
- شکل ۸-۲- دستگاه قیف V شکل ۳۳
- شکل ۹-۲- ابعاد دستگاه V شکل ۳۴
- شکل ۱۰-۲- آب انداختگی بتن خودتراکم روی دستگاه قیف V شکل ۳۵
- شکل ۱۱-۲- دستگاه استاندارد آزمایش جعبه L ۳۷
- شکل ۱۲-۲- ابعاد دستگاه استاندارد آزمایش جعبه L ۳۸
- شکل ۱۳-۲- رفتار بتن خودتراکم بعد از باز شدن دریچه جعبه L شکل ۴۰
- شکل ۱۴-۲- دستگاه استاندارد آزمایش جعبه U شکل ۴۱
- شکل ۱۵-۲- ابعاد دستگاه استاندارد آزمایش جعبه U شکل ۴۲
- شکل ۱۶-۲- نحوه قرار گیری بتنی در داخل محفظه U شکل ۴۴
- شکل ۱۷-۲- دستگاه آزمایش اورمیت ۴۵
- شکل ۱۸-۲- ابعاد دستگاه آزمایش اورمیت ۴۶
- شکل ۱۹-۲- ترکیب دستگاه آزمایش اورمیت و حلقه J ۴۷
- شکل ۲۰-۲- رفتار بتن در آزمایش با دستگاه ترکیبی اورمیت و حلقه J شکل ۴۸
- شکل ۲۱-۲- انواع الیاف فولادی ۶۵

- شکل ۲-۲۲- اشکال مختلف الیاف ۷۱
- شکل ۲-۲۳ - تصویر میکرو گراف الکترونی از خاکستر بادی Class F ۸۲
- (a) ذرات کروی شکل (b) ذرات متخلخل خاکستر بادی (Plerosphere) ۸۲
- شکل ۳-۱- نمودار دانه بندی شن مورد استفاده ۸۹
- شکل ۳-۲- نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده ۹۱
- شکل ۳-۳- فوق روان کننده مورد استفاده ۹۲
- شکل ۳-۴- الیاف فولادی مورد استفاده ۹۳
- شکل ۳-۴- الیاف شیشه مورد استفاده ۹۴
- شکل ۳-۷- تصویر میکروسکوپی خاکستر بادی مورد استفاده ۹۶
- شکل ۳-۸- روند قالب گیری بتن ۱۰۸
- شکل ۳-۹- روند ساخت نمونه های برشی مورب ۱۰۹
- شکل ۳-۱۰- سطح مقطع نمونه ها بعد از شکست برشی مورب ۱۱۰
- شکل ۳-۱۱- قالب مخصوص برش مستقیم ۱۱۰
- شکل ۳-۱۲- روند ساخت نمونه های برشی مستقیم ۱۱۱
- شکل ۳-۱۳- سطح مقطع نمونه بعد از شکست برشی مستقیم ۱۱۲
- شکل ۳-۱۴- روند ساخت نمونه های کششی تحت فشار ۱۱۳
- شکل ۳-۱۵- سطح مقطع نمونه بعد از شکست کششی تحت فشار ۱۱۴
- شکل ۴-۱- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه کنترل ۱۱۷
- شکل ۴-۲- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه حاوی الیاف شیشه ۱۱۹
- شکل ۴-۳- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه حاوی الیاف فولاد ۱۲۰
- شکل ۴-۴- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه دارای الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۱۲۲
- شکل ۴-۵- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه ۱۲۴
- شکل ۴-۶- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه کنترل ۱۲۶

- شکل ۴-۷- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه حاوی الیاف شیشه ۱۲۸
- شکل ۴-۸- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه حاوی الیاف فولاد ۱۲۹
- شکل ۴-۹- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه حاوی الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۱۳۱
- شکل ۴-۱۰- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه ۱۳۳
- شکل ۴-۱۱- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه کنترل ۱۳۵
- شکل ۴-۱۲- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه حاوی الیاف شیشه ۱۳۷
- شکل ۴-۱۳- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه حاوی الیاف فولاد ۱۳۸
- شکل ۴-۱۴- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه حاوی الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۱۴۰
- شکل ۴-۱۵- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه ۱۴۲
- شکل ۴-۱۶- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان $T=0$ ۱۴۵
- شکل ۴-۱۷- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان $T=40$ ۱۴۶
- شکل ۴-۱۸- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان $T=80$ ۱۴۷
- شکل ۴-۱۹- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان $T=120$ ۱۴۸
- شکل ۴-۲۰- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان $T=160$ ۱۴۹

فصل اول

مقدمه و اهداف پژوهش

۱-۱- مقدمه

امروزه نقش بتن به علت تطبیق پذیری زیاد، پایداری و به صرفه بودن بعنوان رایج ترین مصالح ساختمانی غیر قابل انکار است و در تمام نقاط دنیا از بتن به صورت گسترده ای استفاده گردیده است. سال هاست که بتن به عنوان یک عنصر ساختمانی بسیار مهم با تحمل فشارهای بالا و امکان استفاده در شرایط و شکل های خاص جهت ساخت و ساز انواع سازه ها مورد استفاده است و تقریباً در ساخت اکثر سازه ها استفاده از بتن سهم بسزایی را ایفا نموده است. در سازه های بتنی برای رسیدن به مقاومت فشاری مدنظر و حصول کارایی، بتن به شیوه های مختلف لرزانده می شود. همسو با پیشرفت های مختلف محققان عرصه ساخت و ساز، نیز بنا به دلایلی مانند تراکم میلگرد، نبود نیروی کارگر ماهر و هزینه های نیروی انسانی و... به فکر ساخت بتن بدون نیاز به متراکم کردن با ابزار آلات و نیروی انسانی افتاده و ساخت بتنی بدون نیاز به لرزاندن پیشرفت بسیار محسوسی در این زمینه به نظر می رسد [۱].

در طراحی یک پروژه به کارگیری مصالح مناسب، مقاوم و ارزان از مهم ترین وظایف یک مهندس به حساب می آید. یکی از مهم ترین و ارزانتترین مصالح موجود که در دنیا کاربرد وسیع و زیادی دارد بدون شک بتن می باشد. مزایایی که بتن از آن برخوردار است، باعث شده که مورد علاقه اکثر مهندسين، طراحان و کارفرمایان

و غیره باشد. از عمده ترین مزایای بتن، امکان به کارگیری آن در اغلب مناطق جغرافیایی، استفاده از مصالح طبیعی و ارزان، دارا بودن هزینه کم در مقایسه با حجم زیاد عملیات، شکل پذیری آن با توجه به اشکال هندسی طرح، امکان مکانیزه کردن عملیات، عدم نیاز به نگهداری در طول عمر بهره برداری از بنا و... است [۲].

بتن خود متراکم پدیده جدیدی در علم مصالح ساختمانی است که کمتر از دو دهه از عمر آن می گذرد. چنین بتنی بدون نیاز به هیچ لرزاننده ای تحت اثر وزن خودتراکم شده و از کارایی بالایی برخوردار است. در اوایل دهه ۸۰ میلادی دوام سازه های 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 بتن خودتراکم توسط Okamura در سال ۱۹۸۶ گردید و اولین مدل بتن خودتراکم در سال ۱۹۹۸ تکمیل و ساخته شد [۳].

این بتن با ویژگی های خاص خود، امکانات جدیدی را در اختیار قرار داده که با استفاده از آن می توان بر مشکلاتی که ناشی از عدم تراکم مناسب در سازه های بتنی میباشد از جمله کاهش عمر و دوام سازه ها فائق آمد.

امروزه چنین بتنی به خصوص با تولید نسل جدید فوق روان کننده ها و افزودنی های بتن در بسیاری از پروژه ها مورد استفاده قرار می گیرد. از جمله مزایای استفاده از بتن خودتراکم می توان 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 صرفه جویی اقتصادی اشاره کرد. [۴]

۱-۲- تاریخچه و ضرورت انجام تحقیق:

بتن خودتراکم از نظر خواص دارای معایبی نیز می باشد که از مهمترین معایب آن مقاومت کششی کم آن است، به همین دلیل دارای شکل پذیری کم و تردی زیاد می باشد. برای رفع این عیب از تسلیح بتن توسط میلگردهای فولادی استفاده می شود. این میلگردها به صورت متمرکز در بتن قرار می گیرند و تا حد خیلی زیاد ضعف مقاومت کششی بتن را جبران می کند. استفاده از میلگرد در همه جا امکانپذیر نبوده یا باعث هزینه های زیادی می شود، مانند: پوسته کانال های آب، روسازی، فرودگاه ها و.... از این رو برای رفع این مشکل در چند دهه اخیر از رشته های الیاف که به صورت یکنواخت در حجم بتن پراکنده استفاده می شود که ایده آن به قرنهای قبل مانند استفاده از کاه یا موی دم اسب در خشت های گلی برمی گردد. انهدام و زوال بتن به شدت به تشکیل ترک ها و ریزترک ها در اثر بارگذاری و یا تأثیرات محیطی وابسته است. تغییرات گرمایی و رطوبتی در خمیر سیمان باعث ایجاد ریز ترک ها می شوند و چنین ریز ترک هایی در سطح دانه های درشت متمرکز می شوند. با تأثیر بیشتر بارگذاری و نیز سایر مسائل محیطی، ریز ترک ها در جسم بتن منتشر می شود [۵].

استفاده از الیاف در بتن های خود متراکم مزایا و معایبی در پی دارد. از مزایای آن میتوان به افزایش شکل پذیری بتن و بهبود خواص مکانیکی آن اشاره نمود. همچنین استفاده از الیاف میتواند خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن خود متراکم اجرا شده در لایه های مجزا را تحت تاثیر قرار دهد.

استفاده از الیاف مختلف در بتن و ساخت بتن الیافی به عنوان یک گام موثر در جلوگیری از انتشار ریزترک ها و ترک ها و جبران ضعف مقاومت کششی بتن محسوب می شود. مهمترین مشخصه بتن الیافی خاصیت جذب انرژی، انعطاف پذیری 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 [۶]. خاصیت جذب انرژی و طاقت بتن می تواند به نحو مطلوبی خطر شکست سازه های بتنی به خصوص در مناطقی که تحت بارهای مکرر و لرزه ای قرار می گیرند را کاهش دهد. ناحیه تماس که به اسامی مختلفی مانند لایه مرزی یا منطقه انتقالی نامیده می شود، ناحیه مرزی بین خمیر سیمان و سطح سنگدانه با الیاف پدید می آید که نقش مهمی در نفوذپذیری و مقاومت بتن دارد. ناحیه تماس دارای میکرو ساختاری متفاوت با خمیر سیمان بوده و دارای تخلخل و ریزترک های بیشتری است. ضخامت ناحیه تماس، تابع نوع الیاف، نوع سیمان، نوع پوزولان مصرفی، نسبت آب به سیمان و سن بتن می باشد.

بتن خودتراکم مسلح به الیاف به دلایلی نظیر لزجت مناسب، روانی بالا، بهبود دوام، پایایی و خواص مکانیکی همچون کرنش جمع شدگی و مقاومت های فشاری، کششی و خمشی در اهداف گوناگون از جمله نوسازی و بهسازی مورد استفاده قرار می گیرد. حضور الیاف در بتن خودتراکم تا حد زیاد می تواند 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 می کاهد [۷]. این مسئله باعث افزایش حجم هوای محبوس در مخلوط شده و در نتیجه کاهش مقاومت و عمر بهره برداری 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.

۱-۳- دامنه پژوهش:

با توجه به این که بتن ماده ای ترد است، امروزه کاربرد بتن الیافی با نرمی بالاتر به گونه ای که بتواند تغییر شکل های زیاد را بدون شکست تحمل نماید مورد تحقیق محققین و مهندسين است. تحقیقات در باره تامین نرمی لازم در بتن با الیاف مختلف و حتی در برخی موارد حذف آرماتور، در حال انجام است. با استفاده از ترکیب مناسب از سیمان، آب، ماسه با دانه بندی خوب، فوق روان کننده، الیاف و پوزولان ها می توان بتن

توانمندی ساخت (کامپوزیت سیمانی) که از تنش فشاری بالا، خواص کششی و دوام بالا برخوردار است. بخاطر خواص ممتاز مصالح کامپوزیت سیمانی مسلح شده با الیاف، می‌توان از آن برای تعمیر اجزا سازه‌ای خراب شده، قالبهای ماندگار، پل ها، باند فرودگاه‌ها و روسازی راه‌ها استفاده کرد. با این حال علی‌رغم خواص قابل توجه مصالح تازه و سخت شده، بتن توانمند مستعد برای ترک خوردن است. برای بالا بردن زمان سرویس‌دهی بتن توانمند، تحمل ترک و تنش کششی و خمشی بالا می‌توان با استفاده مناسب از الیاف جهت مسلح کردن این بتن استفاده نمود. متأسفانه استفاده از حجم بالای الیاف می‌تواند هزینه‌ی مصالح را بالا ببرد و استفاده از مقدار کم الیاف بمنظور تولید بتن توانمند به صرفه و اقتصادی‌تر پیشنهاد شده‌است [۸].

هدف کلی از کاربرد الیاف در بتن افزایش میزان جذب انرژی بتن و کنترل گسترش ترک است تا قطعه بتنی بتواند در مقابل بارهای وارده در یک مقطع ترک خورده، تغییر شکل‌های بیشتری را پس از ایجاد اولین ترک تحمل نماید. [۹]

تحقیقات و مطالعات آزمایشگاهی متعددی در خصوص تاثیر اندازه و نوع الیاف بر خصوصیات مکانیکی و رئولوژیکی بتن خود تراکم صورت گرفته است و نتایج این پژوهش‌ها نشانگر درصد‌های بهینه استفاده از الیاف مختلف جهت بهبود یک یا چندین ویژگی بتن خود تراکم است. یکی از فاکتورهای بسیار مهمی که کمتر مورد پژوهش قرار گرفته تاثیر اندازه و نوع الیاف بر خصوصیات مکانیکی و رئولوژیکی بتن خود تراکم که در لایه های مجزا اجرا شده می باشد.

در بتن ریزی های با حجم بالای بتن خود تراکم مانند پی ها و دیوارهای طویل ریختن بتن در لایه های با فاصله زمانی در برخی مواقع اجتناب ناپذیر می باشد و این موضوع مطابق بررسی های پژوهشگران باعث عدم یکپارچگی مکانیکی در صفحه ما بین بتن های ریخته شده با فاصله زمانی می گردد که می تواند خواص مکانیکی پایین تر و نفوذ ناپذیری کمتری نسبت به لایه های حجیم بتن به نمایش در آورد . پس از اجرای

لایه ای از بتن خودتراکم اغلب زمان کوتاهی برای سکون و لخته شدن بتن، قبل از اینکه لایه دوم بتن روی آن ریخته شود وجود دارد و اگر ذرات ریز بتواند لخته شوند ساختار سازه ای بتن در حالت ایستا می تواند فراتر از حد بحرانی افزایش یابد و از ترکیب دو لایه جلوگیری می کند و اجازه نمی دهد که بتن به شکل لایه یکپارچه درآید. در نتیجه منجر به تشکیل سطح مشترک ضعیفی بین دو لایه بتن (که اغلب بعنوان خط شکست تعریف میشود) می شود. مقاومت اتصالی بین دو لایه پیایی بستگی به چسبندگی سطح مشترک، اصطکاک، درگیری سنگدانه ها و ضریب تابع زمان دارد. درگیری سنگدانه ها در عوض به تعدادی از پارامترها همچو، اندازه سنگدانه ها، شکل و بافت بستگی دارد و مقاومت برشی با کاهش درگیری سنگدانه ها در سطح مشترک اتصال می تواند کاهش یابد. ضرورت این تحقیق به جهت یافتن درصد بهینه استفاده از پوزولان ها در بتن خود تراکم برای حصول به مقاومت اتصالی ماکزیمم در صفحه ما بین بتن های ریخته شده در لایه های مختلف و کمینه کردن تاثیر تاخیر در بتن ریزی لایه های متوالی بتن خود تراکم و همچنین کمک به طراحی بتن خود تراکم با رئولوژی مناسب می باشد [۱۰].

۱-۴- اهداف پژوهش:

از آنجایی که رفتار بتن خودتراکم تازه به طور کامل توسط پارامترهای رئولوژی قابل ارزیابی و شرح بوده و دستگاههای اندازهگیری این پارامترها علاوه بر حساسیت خیلی کم به متصدی انجام آزمایش، دارای دقت بالایی نیز میباشند، یکی از راههای بررسی وضعیت ابقا پذیری و کارایی بتن خودتراکم نسبت به تغییرات کوچک در کمیت اجزاء سازنده، بررسی حساسیت خواص رئولوژی و خواص مکانیکی نسبت به استفاده از الیاف بوده است. با در نظر گرفتن مطالب فوق، تحقیق حاضر با هدف بررسی تاثیر نوع و اندازه الیاف های مختلف در خصوصیات مکانیکی و رئولوژی نهایی بتن خود تراکم ریخته شده در لایه های مجزا با فاصله زمانی معین میپردازد.

۱-۵- فرضیات پژوهش

- افزودن الیاف به بتن خودتراکمی که در لایه‌های مجزا ریخته می‌شود می‌تواند باعث بهبود خواص اتصال شود.
- انتظار می‌رود استفاده از الیاف در بتن خودتراکم باعث افزایش مقاومت برشی مورب و مستقیم و مقاومت کشش تحت شکافت گردد.
- انتظار می‌رود استفاده از الیاف در بتن خود تراکم باعث افزایش چقرمگی (قابلیت جذب انرژی) گردد.
- انتظار می‌رود استفاده از الیاف در بتن خود تراکم باعث افزایش مقاومت اولیه در برابر ترک گردد.
- انتظار می‌رود استفاده از الیاف در بتن خود تراکم باعث کاهش کارایی بتن خود تراکم گردد.
- انتظار می‌رود استفاده از الیاف شیشه ای در مقایسه با الیاف فولادی در بتن خود تراکم در کاهش کارایی موثر تر واقع شده باشد.

۱-۵- ساختار پایان نامه

در فصل اول به بررسی مقدمات پژوهش و بیان مساله و ضرورت انجام تحقیق بیان شده است. همچنین اهداف پژوهش تبیین گردیده و فرضیات پژوهش روشن شده است و همچنین مشخصات کلی مصالح و روش کار به طور خلاصه آورده شده است.

در فصل دوم به بررسی کلیات و پیشینه ی موضوع طرح پرداخته و انواع مختلف الیاف تعریف و به خواص و تاثیر کاربرد آنها در بتن اشاره می گردد. همچنین در این فصل به مرور مقالات و تحقیقات انجام شده در خصوص جنبه های مختلف مرتبط با تحقیق پرداخته شده است.

در فصل سوم به بیان مشخصات مواد و مصالح مصرفی و آزمایش های انجام گرفته بر روی آنها پرداخته و جزییات طراحی مخلوط های بتن ارائه گشته است. در پایان این فصل نیز به شرح مختصری از آزمایش های انجام شده در راستای اهداف تحقیق پرداخته و روش کار با دستگاه ها توضیح داده شده است.

در فصل چهارم این تحقیق، نتایج بدست آمده از آزمایشهای انجام شده به صورت جدول ها و نمودار های مناسب و به تفکیک جنبه های مورد مطالعه، ارائه شده و مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است.

جمع بندی نتایج و تحلیل های صورت گرفته در بخش های مختلف تحقیق نیز در فصل پنجم بیان شده و در ادامه پیشنهادهایی جهت مطالعات بیشتر و تحقیق در خصوص جنبه های جدید مرتبط با موضوع پژوهش ارائه شده است.

فصل دوم
کلیات و پیشینه پژوهش

۲-۱- مقدمه

درسازه های بتنی برای رسیدن به مقاومت مورد نیاز و کاهش تخریب و هوای درون بتن و حصول پایایی، بتن به روشهای مختلف لرزانده می شود. با توسعه روزافزون کارهای بتنی و کمبود نسبی کارگران ماهر و یا سهل انگاری های آنان در کارگاه ها و یا به دلیل مزاحمت های جسمی و روحی و یا هزینه لرزاندن بتن در هنگام ریختن بتن در قالب، بویژه در مواقعی که تراکم میلگرد وجود دارد، عمل لرزاندن بطور کامل و صحیح انجام نگرفته و در نهایت مشخصات مکانیکی مطلوب بتن حاصل نمی گردد. استفاده از ویبراتور جهت متراکم کردن بتن، مشکلات زیادی به همراه دارد که از جمله آنها میتوان به موارد زیر اشاره نمود:

- جداشدگی دانه بندی بتن به علت ویبره زیاد در بعضی مناطق
- تراکم ناهمگن در نقاط مختلف سازه و در نتیجه مقاومت فشاری متفاوت در مقاطع مختلف سازه.
- گیر کردن شیلنگ ویبره بین آرماتورها در حین اجرا
- کرمو شدن بعضی مناطق به علت غیرقابل دسترس بودن
- کرمو شدن نقاطی از سطح بتن به علت ویبره بیش از حد و فرار شیره بتن
- جاگیری ناقص بتن در قالب.

به موارد فوق باید آلودگی صوتی و خطرات جانی عملیات ویبره در مورد دیوارها و ستون های بتنی را نیز افزود.

لذا ساخت بتنی بدون نیاز به لرزاندن همواره راه حلی برای این معضل به نظر می رسد و از این رو ساختن چنین بتنی رویایی برای تکنولوژیست های بتن بوده است که بتوانند با استفاده از مواد افزودنی شیمیایی مختلف و تغییر در مقادیر مصالح طرح اختلاط، به این مهم دست یابند و بتن را از نقص اجرایی لرزاندن رها سازند.

ابداع بتن خود تراکم (SCC) نتیجه این تلاش ها بوده است. البته افزایش روانی بتن از طریق مصرف مواد افزودنی روان کننده یا فوق روان کننده امکان پذیر بوده است ولی چنانچه از این طریق روانی بتن بیش از حد معین افزایش یابد، جداشدگی در بتن اتفاق افتاده و به کیفیت بتن صدمه می زند. با ابداع فوق روان کننده های نسل جدید که حاصل تلاش پژوهشگران ژاپنی بوده است امروزه می توان ضمن بدست آوردن روانی زیاد از ایجاد جداشدگی نیز جلوگیری نمود. می توان گفت امروزه استفاده از بتن خود تراکم نه تنها خیال مجریان پروژه های بزرگ را از عدم کارایی و یا ضعف اجرایی کارگران آسوده می سازد بلکه موجب صرفه جوئی های چشمگیری در مدت زمان اجرا و به تبع آن در هزینه ها می گردد.

۲-۲-۲- بتن خود تراکم

۲-۲-۱- تاریخچه

از آنجا که برای ایجاد سازه های بتنی با دوام، تراکم کافی توسط نیروی کار ماهر مورد نیاز است، بحران کاهش نیروی کار ماهر در صنعت ساخت و ساز ژاپن در اوایل دهه ۸۰ میلادی از یک سو و تراکم نامناسب ناشی از افزایش حجم میلگردهای مصرفی به تبع عملکرد بهتر سازه ای و همچنین تمایل به استفاده از

میلگردهای با قطر کمتر به منظور کنترل ترک خوردگی از طرف دیگر باعث کاهش کیفیت کارهای اجرایی انجام گرفته گردید. [۱۲] این موضوع برای چندین سال مورد بحث و بررسی قرار گرفت تا این که نظریه بتن خودتراکم، بتنی که خودش متراکم شود و احتیاج به تراکم توسط ویبراتور نداشته در سال ۱۸۶۰ مطرح باشد به عنوان راه حلی برای رفع مشکل دوام سازه های بتنی توسط Okamura گردید [۳].

بتن خودتراکم (SCC)، بتنی است که تحت اثر وزن خود متراکم شده و نیاز به هیچ لرزاننده ای برای ایجاد تراکم ندارد. این مسأله باعث صرفه جویی اقتصادی و کاهش زمان ساخت و ساز و در نتیجه بالا رفتن راندمان نهایی می شود [۱۱].

بتن خود تراکم علاوه بر استفاده فراوانی که در سازه های با تراکم بالای میلگرد دارد گاهی نیز بصورت غیرمسلح، مثلاً در خاکریزها مورد استفاده قرار می گیرد. از مزایای دیگر استفاده از آن می توان به کاهش آلودگی صوتی ناشی از سروصدای لرزاننده ها، کاهش نیروی انسانی، حفظ سلامت کارگران و جلوگیری از بیماری های ناشی از استفاده از لرزاننده ها و بالا رفتن کیفیت محصولات نهایی اشاره کرد [۱۱].

در مقایسه با ژاپن، تحقیقات در اروپا و آمریکا اخیراً آغاز گردیده و در حالیکه اکنون در ژاپن به بتن خودتراکم از نقطه نظر بتن با مقاومت بالا نگاه می شود، در اروپا بتن خودتراکم با مقاومت متوسط همچنان مورد نظر می باشد [۴]، همچنین امروزه استفاده از الیاف در بتن خودتراکم مورد توجه محققان قرار گرفته و پژوهش هایی در این زمینه آغاز شده است. [۱۲]

۲-۲-۲- ویژگی های بتن خودتراکم تازه

ویژگی خواص بتن تازه خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی به این موضوع ارتباط پیدا می کند که منظور از خودتراکم شونده چیست و چگونه تعریف می گردد. در بیان مکانیزم، چنین ویژگی به رفتار رئولوژی بتن

تازه و در بیان کاربردی، به پارامترهای کارایی مرتبط می شود. بنابراین به منظور درک بهتر ویژگی های بتن تازه خودتراکم، نیاز به نگرش صحیح از رفتار رئولوژی و کارایی بتن خودتراکم می باشد.

۲-۲-۳- رئولوژی بتن خودتراکم

خاصیت اصلی تاثیر گذار بر عملکرد بتن تازه در هنگام بتن ریزی و درحین متراکم شدن همان رفتار رئولوژی آن می باشد. [۱۱] بتن تازه را می توان مانند ذره ای معلق منظور کرد، هرچند که پیچیده تر است، زیرا دارای پراکندگی بسیار وسیعی در اندازه ذرات بوده و خواص آن وابسته به زمان بدلیل واکنش های شیمیائی می باشد. در صورت معلق فرض کردن آن، تعریف فازهای ذره و مایع آن می تواند بدلیل پراکندگی اندازه ذرات، تغییر کند. به عنوان مثال، می توان درشت دانه هادر یک ملات فاز شامل آب، سیمان و ریزدانه (و یا ذرات ماسه را دریک خمیر مایع فاز متشکل از آب، سیمان و دیگر ذرات پودری) در نظر گرفت. بنابراین، ارزیابی رفتار رئولوژی وابسته به اندازه ذرات نیز می باشد. رئولوژی بتن، ملات و خمیر همگی ابزارهای ارزشمندی در درک رفتار و پروسه بهینه سازی تلقی می گردند. همانند دیگر مواد معلق، برقراری تعادل بین خواص رئولوژیکی و جدائی در ارزیابی رئولوژی ضروری است [۱۳].

مکانیزم های اصلی مؤثر بر رفتار رئولوژی بتن، اصطکاک بین دانه ای ذره ای و میزان آب آزاد که بستگی به کشش سطحی و پراکندگی ذرات دارند، می باشد. با استفاده از فوق روان کننده به میزان مناسب و استفاده از مواد پودری و همچنین عامل لزج کننده می توان خصوصیات رئولوژی بتن خودتراکم را که شامل تنش تسلیم و لزجت خمیری مناسب می باشد تامین نمود که شاخص اخیر به مقدار زیادی به نوع مصالح مصرفی، تکنولوژی ساخت، نوع و شکل سازه هایی که باید ساخته شوند بستگی دارد. بررسی خصوصیات رفتار شناسی بتنی که می تواند تحت شتاب ثقلی زمین جاری شود و در برخورد با تراکم میلگردها دارای توانایی تغییر شکل عالی بدون جداشدگی است مستلزم پژوهشی در مقیاس میکروسکوپی است. [۱۳]

۲-۲-۴- کارایی بتن خودتراکم

کارایی مجسم کننده ویژگی های رئولوژی بتن با در نظر گرفتن شرایط خاص کارگاهی میباشد. از نظر کارایی، خودتراکم شوندگی، به صورت توانایی بتن برای جاری شدن فقط تحت شتاب ثقل پس از خروج از پمپ و همچنین قابلیت آن برای پر کردن فضاهای مورد نظر در قالب به منظور دستیابی به بتنی بی نقص و باکیفیت یکنواخت تعریف میگردد. [۱۲، ۱۳]

برای این منظور می توان به طور کلی خصویات بتن خودتراکم را در حالت تازه به سه دسته زیر تقسیم نمود:

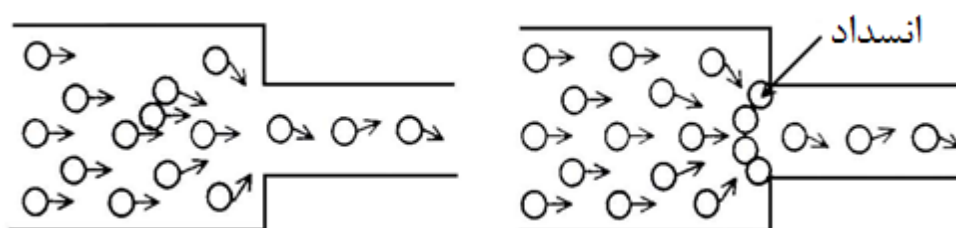
- قابلیت جریان و عبور (Passing ability)
- قابلیت پر کنندگی (Filling ability)
- قابلیت پایداری یا مقاومت در برابر جداشدگی (Resistance to segregation)

۲-۲-۴-۱- قابلیت جریان و عبور

قابلیتی که در بتن خودتراکم وجود دارد و به واسطه آن می تواند تحت تاثیر شتاب ثقلی زمین جریان یابد و از تراکم میلگردها بدون بروز پدیده انسداد و قفل شدگی عبور کند. عامل تاثیر گذار در قابلیت جریان میزان تنش تسلیم یا به عبارتی دیگر تنش جاری شدگی می باشد. ماکزیمم تنش که باید به بتن وارد شود تا در آستانه جریان قرار گیرد را تنش جاری شدگی گویند. هر چه میزان تنش تسلیم بتن تازه کم باشد، بتن بهتر می تواند جریان یابد. تنش تسلیم بتن نیز تحت تاثیر اصطکاک بین اجزای تشکیل دهنده بتن و ویژگی های خمیر سیمان قرار دارد، از این رو با کاهش اصطکاک درونی اجزای تشکیل دهنده میزان تنش تسلیم نیز کاهش می یابد. قابلیت عبور بتن تازه تابعی از هر دو پارمتر اساسی تنش تسلیم و لزجت می باشد. لزجت، عامل مقاومت کننده در برابر جریان است [۱۴].

میزان تنش تسلیم و لزجت باید در محدوده ای باشد که بتن توانایی حرکت تحت اثر وزن خود را داشته باشد تا امکان عبور از میلگردهای متراکم را داشته باشد. از این دیدگاه کاهش تنش تسلیم مطلوب می باشد. از طرف دیگر برای جلوگیری از پدیده قفل شدگی و انسداد باید مخلوط بتن تازه به صورت یک مخلوط معلق و غوطه ور بوده و لغزش سنگدانه ها به روی یکدیگر به آسانی انجام پذیرد. به این ترتیب به هنگام عبور بتن از میان میلگردها همگنی آن حفظ می گردد. در صورتی که تنش تسلیم و لزجت بتن پیش از اندازه کاهش داده شود، امکان دارد که سنگدانه ها تحت اثر وزن خود ته نشین شده و خمیر سیمان توانایی نگهداری سنگدانه ها را به صورت معلق نداشته باشد. تنش تسلیم در شروع به حرکت دانه ها و لزجت در سرعت سقوط آن ها در داخل خمیر سیمان موثر می باشد [۱۴، ۱۵].

بتن خودتراکم برای داشتن عملکرد مؤثر باید روانگرایی کافی همراه با مقاومت مناسب در برابر جدایش داشته باشد و در مواقعی که قالب ها دارای بازشوهای تنگ و باریک هستند و یا با تراکم بالای میلگرد مواجه هستند، نیاز به ارضاء الزام دیگری می باشد تا از ایجاد انسداد سنگدانه های درشت در دهانه های باریک جلوگیری کرد. بنابراین ایجاد سازگاری بین اندازه و مقدار ذرات درشت در بتن خودتراکم و فاصله آزاد بین میلگردها و بازشوهای قالب که بتن باید از میان آنها عبور کند، الزامی است.



شکل ۲-۱- تصویری از مکانیزم انسداد [۱۲]

همانگونه که در شکل ۲-۱ نشان داده شده است به سادگی بیان مکانیزم ایجاد پدیده انسداد است. در مدل دویبعدی نشان داده شده، عبور بتن از میان بازشو مشخص است و مکانیزم انسداد به این صورت اتفاق می

افتد که در زمان عبور بتن از بازشو، ذرات سنگدانه موجود در اطراف بازشو باید مسیر حرکتی خود را تغییر دهند و این امر باعث می شود برخورد بین ذرات سنگدانه زیاد شده و برخوردهای لحظه ای زیادی بین ذرات سنگدانه در مجاورت بازشو ایجاد گردد. با توجه به این برخوردها، امکان اینکه بعضی سنگدانه ها به شکل قوس پایدار در کنار هم قرار گیرند، می باشد که این عمل باعث توقف جریان حرکتی بتن می گردد.

این پدیده زمانی که اندازه ذرات بزرگی و همچنین میزان سنگدانه زیاد باشد آسانتر شکل میگیرد. برای ذرات کوچکتر این حالت برای مقدار بیشتر سنگدانه اتفاق می افتد و زمانی که ذرات جامد نسبت به ابعاد دریچه خیلی کوچک باشند، امکان شکلگیری پدیده قوسی شدن نیست. به طور خلاصه، برای بتن خودتراکم با توانایی پرکنندگی مطلوب و مقاومت مناسب در برابر جداشدگی، انسداد تحت شرایط زیر امکانپذیر است:

- حداکثر اندازه سنگدانه بسیار بزرگ باشد.

- میزان سنگدانه درشت بسیار زیاد باشد. [۱۲]

اگر بتن مستعد جداشدگی ذرات درشت تر باشد، امکان ایجاد انسداد افزایش می یابد. بنابراین امکان وقوع انسداد حتی اگر اندازه بزرگترین سنگدانه خیلی زیاد نباشد وجود دارد. زمانی که از بتن خودتراکم با حداکثر اندازه سنگدانه مشخص و میزان معینی از سنگدانه درشت استفاده می شود، با بکار بردن میلگرد با قطر زیاد ممکن است امکان وقوع پدیده انسداد در بتن افزایش یابد. زیرا میلگرد با قطر زیاد تکیه گاه پایداری را برای تشکیل قوس حاصل از قرار گرفتن سنگدانه در کنار هم فراهم می کند. [۱۲]

به طور خلاصه، برای فراهم کردن توانایی عبور مناسب اقدامات زیر باید در نظر گرفته شود.

- بالا بردن قوام به منظور کاهش جداشدگی سنگدانه ها

- نسبت آب به مواد پودری پائین

- استفاده ازعوامل لزوج کننده

و برای کاهش انسداد باید سازگاری مناسبی بین سنگدانه های درشت و فواصل آزاد در نظر گرفته شود به این منظور اقدامات زیر مؤثر می باشد.

- کاهش حجم سنگدانه درشت
- کاهش حداکثر اندازه سنگدانه ها

۲-۲-۴-۲-۲- قابلیت پر کنندگی

قابلیتی که در بتن خودتراکم وجود دارد که به واسطه آن می توان در برخورد با تراکم میلگردها توانایی تغییر شکل عالی داشته باشند و تمام سطح قالب را به صورت یکنواخت پر کند و در نهایت سطحی را که می سازد همتراز با افق باشد. برای دست یابی به توانایی پرکنندگی مناسب بتن خودتراکم، باید تا حد امکان اصطکاک بین ذرات تشکیل دهنده را کاهش داد. یکی از راه های کاهش میزان اصطکاک استفاده از سنگدانه هایی است که تا حد ممکن گرد گوشه باشند تا لغزش آن ها بر روی یکدیگر آسانتر انجام پذیرد. همچنین افزایش فاصله بین ذره ها توسط کاهش میزان سنگدانه و افزایش خمیر سیمان احتمال برخورد سنگدانه ها با یکدیگر را کاهش می دهد. برای داشتن خمیر سیمان با توانایی تغییر شکل عالی استفاده از فوق روان کننده ضروری است. اثر فوق روان کننده ها در اثر کاهش تنش تسلیم و همچنین کاهش محدوده در لزجت خمیر می باشد که نتیجه آن افزایش پرکنندگی است. از سوی دیگر لزجت بتن بر سرعت جریان یافتن بتن تازه تاثیر می گذارد و تاثیر چندانی بر قابلیت جریان یافتن بتن و پرکنندگی آن ندارد. [۱۴]

از آن جا که بتن خودتراکم باید قابلیت تغییرشکل یا ایجاد تغییر شکل خوبی تحت وزن خود داشته باشد، قابلیت پرکنندگی از هردو جنبه جریان مورد بررسی قرار می گیرد، اول بر حسب مقدار مسافتی که بتن می تواند از محل تخلیه طی کند (ظرفیت تغییر شکل)، دوم سرعتی که با آن جاری می شود (سرعت تغییر شکل)

با استفاده از آزمایش جریان اسلامپ ظرفیت تغییر شکل می تواند به عنوان قطر نهایی جریان بتن بعد از اینکه تغییر شکل بتن متوقف شد، مورد ارزیابی قرار گیرد. سرعت تغییر شکل نیز با استفاده از همان آزمایش می تواند بر اساس زمانیکه این سرعت، بتن را به تغییر شکل معینی می رساند مورد ارزیابی قرار بگیرد.

برای داشتن قابلیت پرکنندگی مناسب باید بین ظرفیت و سرعت تغییر شکل بتن تعادل برقرار باشد. به عنوان مثال، بتن مقاومت بالا با نسبت آب به سیمان خیلی پائین و میزان بالای فوق روانکننده، معمولاً ظرفیت تغییر شکل زیادی دارد در حالیکه سرعت تغییر شکل آن بسیار پائین است یعنی اینکه بسیار لزج است و احتیاج به ویریه دارد.

برای دستیابی به توانایی پرکنندگی مناسب، بتن باید ویژگیهای زیر را داشته باشد: [۱۶]

۱- اصطکاک بین ذره ای پائین

برای داشتن بتنی با تغییر شکل مناسب، باید اصطکاک بین ذرات جامد ادرشت دانه، ریزدانه و همه انواع پودرها را کاهش داد. لازم به ذکر است تعریف مواد پودری در کشورهای مختلف متفاوت بوده ولیکن در اروپا معمولاً ذرات کوچکتر از ۷۵ و ۱۲۵ میکرومتر و در ژاپن ذرات کوچکتر از ۹۰ میکرومتر به عنوان مواد پودری در نظر گرفته شده و مواد سیمانی و فیلرها در دامنه تعریف آن قرار می گیرند. [۱۲]

برای کاهش اصطکاک بین سنگدانه ها باید امکان تماس بین ذرات سنگدانه را کم کرد. یکی از راه های رسیدن به آن افزایش فاصله بین ذره ای توسط کاهش میزان سنگدانه یا به عبارت دیگر افزایش خمیر سیمان می باشد. البته اصطکاک بین مصالح پودری را نمی توان با افزایش فاصله بین ذره ای حاصل از افزایش آب خمیر کاهش داد، زیرا خود خمیر باید توانایی تغییر شکل بسیار زیادی داشته و بدین منظور ذرات ریز باید پراکنندگی مناسبی در خمیر داشته باشند. این امر توسط عوامل فعال کننده سطحی از قبیل فوق روان کننده ها صورت می گیرد. از طرفی استفاده از میزان آب بالا منجر به جداسدگی و عملکرد نامطلوب بتن سخت شده از جمله

مقاومت و دوام می گردد. همچنین شکل ذرات پودری بر میزان مصرف آب و فوق روان کننده مؤثر است. بدین منظور، استفاده از پوزولان های کروی شکل از قبیل خاکستر آتشفشانی در این زمینه مؤثر می باشد. البته باید توجه داشت که کاهش اصطکاک بین سنگدانه ها و مواد پودری منجر به کاهش مقاومت در برابر جداشدگی می گردد. در اینصورت، مؤثر است که افزایش در قابلیت تغییر شکل خمیر و بتن یک جا صورت نگیرد بلکه بیشتر افزایش در لزجت خمیر ایجاد شود. [۱۲]

۲- خمیر با توانایی تغییر شکل عالی

برای رسیدن به خودتراکم شونده، تنها کاهش اصطکاک بین ذرات فاز جامد کافی نیست، بلکه خمیر نیز باید شکل پذیری مناسب داشته باشد. بتن خودتراکم باید دو ویژگی توانایی روانگرایی بالا تنش تسلیم پائین و مقاومت بالا در برابر جداشدگی لزجت مناسب را تامین نماید تا بتواند به آسانی در اطراف موانع مختلف حرکت کند و قابلیت پرکنندگی مناسبی داشته باشد. توانایی تغییر شکل بتن رابطه نزدیکی با قابلیت شکل پذیری خمیر دارد و با استفاده از فوق روان کننده ها می تواند افزایش پیدا کند، درحالیکه استفاده از آب بیشتر، دو عامل تنش تسلیم و لزجت را کاهش می دهد ولی استفاده از فوق روان کننده باعث کاهش بیشتر تنش تسلیم اقلیت روانی بهتر (وکاهش محدود در لزجت می گردد. در نتیجه بتنی با روانگرایی بالا بدون کاهش قابل توجه در قوام قابل دستیابی است. از طرفی کاهش نسبت آب به مواد پودری می تواند توانایی تغییر شکل خمیر سیمان را محدود نماید. [۱۲]

بنابراین میزان نسبت آب به مواد پودری باید کنترل گردد، زیرا میزان خیلی زیاد یا خیلی کم این نسبت منجر به شکل پذیری نامناسب می گردد. خمیر دارای فوق روان کننده با نسبت آب به پودر خیلی کم منجر به ظرفیت تغییر شکل بالا و سرعت تغییر شکل پایین میگردد. مواد پودری شامل مواد سیمانی و انواع فیلرها،

به منظور متعادل کردن نسبت آب به مواد پودری برای رسیدن به قابلیت شکل پذیری مناسب و همچنین سرعت تغییر شکل کافی بکار می روند.

به منظور داشتن قابلیت پرکنندگی مناسب اقدامات زیر باید در نظر گرفته شود:

- افزایش قابلیت تغییر شکل خمیر:
 - فوق روان کننده ها
 - نسبت آب به مواد پودری متعادل
- کاهش اصطکاک بین ذره ای:
 - حجم کم سنگدانه درشت میزان بالای خمیر
 - مناسب ترین پودر دانه بندی شده نسبت به سنگدانه ها و سیمان مصرفی

۲-۲-۴-۳- قابلیت پایداری

قابلیتی است که بتن خودتراکم را در برابر وقوع انواع جداشدگی های محتمل حفظ می کند و عامل یک پارچگی آن در کلیه مراحل ساخت، حمل، بتن ریزی و تراکم می شود. انواع ناپایداری های محتمل در بتن تازه شامل جدا شدگی خمیر سیمان از مخلوط بتن، آب انداختگی، جداشدگی درشت دانه ها از مخلوط بتن، بروز پدیده انسداد و ته نشین شدن سنگدانه ها بعد از بتن ریزی و مواردی نظیر آن می باشد. قابلیت پایداری بتن همواره در دو حالت قبل از عملیات بتن ریزی و بعد از آن بررسی می شود. [۱۴]

جداشدگی بتن تازه، در اثر پخش غیر یکنواخت مواد تشکیل دهنده آن ایجاد می گردد، که این امر باعث توزیع ویژگی ها در سازه می شود. بتن امکان دارد تمایلی به جداشدگی در طی شرایط مشخصی از جابجایی،

از خود نشان ندهد، ولی در شرایط دیگر مثلاً در هنگام عبور از میان مقاطع با میلگرد زیاد، جداسدگی رخ دهد. در بتن خودتراکم نباید انواع جداسدگی های زیر در هنگام سکون یا حرکت اتفاق افتد [۱۲]:

- آب انداختگی
 - جداسدگی خمیر و سنگدانه
 - جداسدگی سنگدانه های درشت که منجر به انسداد (بلوکه شدن) شود
 - توزیع غیر یکنواخت حفرات هوا
- به منظور جلوگیری از جداسدگی بین آب و ذرات جامد، باید میزان آب قابل حرکت در مخلوط کم گردد. منظور از آب قابل حرکت، آبی است که چسبیده به ذرات جامد نیست و می تواند در مخلوط مستقل از ذرات جامد حرکت کند. آب منقول را می توان با مصرف آب کم، نسبت آب به مواد پودری پائین همچنین استفاده از مواد پودری با سطح مخصوص بالا کاهش داد، زیرا آب بیشتری در سطح مواد پودری که دارای سطح مخصوص بالاتری هستند باقی خواهد ماند. همچنین مقاومت در برابر جدایی بین آب و مواد جامد را می توان توسط اضافه کردن لزجت آب به کمک مواد لزج کننده بهبود بخشید. سایر جداسدگی ها با داشتن فاز خمیری که بتواند ذرات سنگدانه و هوا را با کمترین جابجایی نسبی فاز به فاز نگه دارد، قابل جلوگیری است. این امر با داشتن نیروی اندرکنش زیاد بین دو فاز میسر می شود. این نیرو می تواند ترکیبی از نیروی اصطکاک و چسبندگی در نظر گرفته شود. بالا بردن مقاومت در برابر جداسدگی با اضافه کردن اصطکاک زیاد بین ذرات اثر نامطلوبی بر توانایی شکل پذیری داشته و امکان ایجاد انسداد را بالا می برد. بنابراین، افزودن چسبندگی بین دو فاز روش مفیدتری بنظر می رسد. در اجرا، چنین عادت شده که از خمیر با نسبت آب به مواد پودری پائین به منظور افزایش چسبندگی فاز به فاز استفاده می شود. بعضی اوقات، از افزودنی های لزج کننده نیز استفاده می گردد. به نظر می رسد، از میان چهار نوع جداسدگی جدایی از نوع سنگدانه

های درشت در خودتراکم شونده‌گی مقاطع با تراکم بالای میلگرد قطعی است. به منظور داشتن مقاومت مناسب در برابر جداشدگی، اقدامات زیر باید انجام شود [۱۵]:

- کاهش فاصله بین ذرات جامد

که این امر از طریق محدود کردن سنگدانه های مصرفی، کاهش در حداکثراندازه سنگدانه مصرفی، نسبت آب به مواد پودری پائین و استفاده از مواد لزوج کننده انجام می‌گیرد.

- به حداقل رساندن آب انداختگی

که این عمل از طریق استفاده از آب کم، نسبت آب به مواد پودری پائین، مواد پودری با سطح مخصوص بالا و استفاده از مواد لزوج کننده انجام می‌گیرد. [۱۲]

۲-۲-۵- آزمایش های بتن تازه خودتراکم

بتن خودتراکم دارای قابلیت های متمایزی نسبت به سایر بتن ها است که پارامترهای موثر در هر یک از این قابلیت ها به صورت مستقل از یکدیگر می باشند، لذا برای سنجش ویژگی های خاص بتن خودتراکم و بررسی رفتارشناسی آن دستگاه های آزمایشی متعددی وجود دارد که هر کدام می توانند تنها تاثیر یک یا چند عامل را نشان دهند. هدف از ساخت این دستگاه های آزمایشی، مدلسازی شرایط سخت اجرا در محیط های مختلف بتن ریزی می باشد و با استناد بر نتایج بدست آمده از این آزمایش ها می توان میزان کارپذیری و پایداری بتن را سنجید. همچنین می توان پایداری بتن های مختلف در پایان آزمایش ها را با یکدیگر مقایسه نمود. [۱۲]

همانطور که اشاره شد، سه ویژگی اصلی بتن تازه که باید مورد سنجش قرار گیرند عبارتند از: قابلیت جریان و عبور، قابلیت پر کنندگی و قابلیت پایداری یا مقاومت در برابر جداشدگی.

این سه پارامتر همیشه مستقل از هم نیستند و با درجات مختلفی با یکدیگر ارتباط دارند. مولفه لزجت که توانایی پرکنندگی متأثر از آن می باشد، ارتباط نزدیکی با میزان مقاومت در برابر جداشدگی دارد. توانایی گذر نیز تحت تأثیر عواملی نظیر، ترکیب مصالح سنگی، شکل پذیری، مقاومت در برابر جداشدگی و شرایط سازه هایی که بتن در آن ها بکار می رود، می باشد.

حال با توجه به ارتباط نزدیک این سه ویژگی، روش های آزمایش مورد استفاده نمی توانند یک خصوصیت را به صورت منفک مورد سنجش قرار دهند و در نتیجه جنبه های مختلفی را پوشش می دهند. بعضی از روش ها با مقداری کم و بیش، سه ویژگی اساس بتن تازه را مورد سنجش قرار می دهند، که به نام آزمایش های خودتراکم شوندگی معروف هستند. [۱۲]

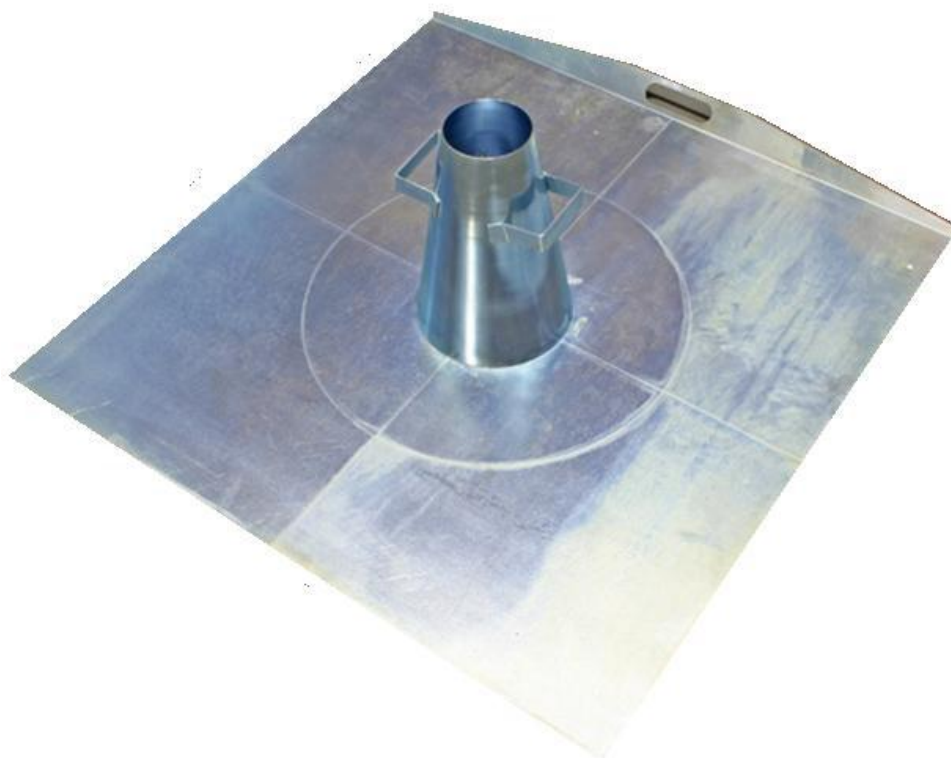
از آنجا که در حال حاضر استاندارد برای بتن خودتراکم وجود ندارد، اغلب مراکز تحقیقاتی با توجه به شیوه های قراردادی خود عمل می کنند و در نتیجه، مقایسه نتایج در حالت کلی وجود ندارد. با این حال، تعداد محدودی از آزمایش ها که به کرات در گزارش های مختلف به آن ها اشاره شده است به عنوان شیوه های مناسب جهت بررسی خصوصیات خودتراکم شوندگی به رسمیت شناخته شده است [۱۷] که در ادامه به شرح آن ها پرداخته شده است.

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

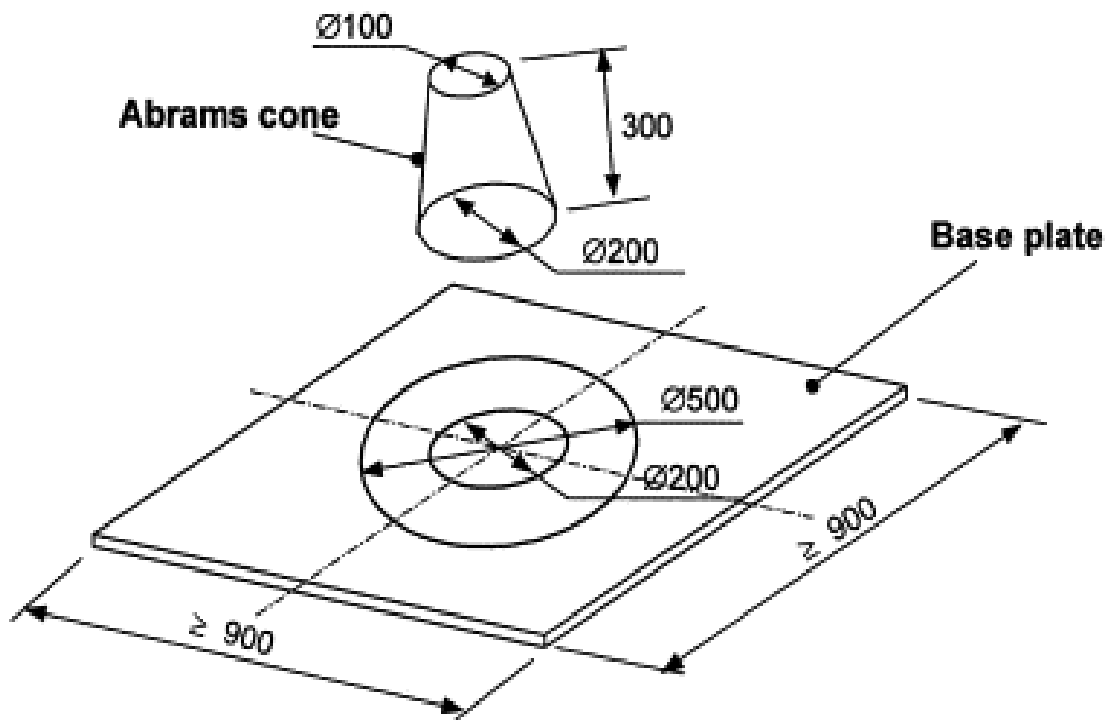
این آزمایش یکی از آزمایش های رایج برای سنجش خصوصیات بتن خودتراکم است و به منظور تعیین توانایی تغییر شکل بتن تحت اثر وزن خود بدون وجود هیچ قیدی بجز اصطکاک صفحه جریان تعریف شده است. این روش برای اولین بار در ژاپن برای استفاده در برآورد کارایی بتن های اجرا شونده در زیر آب مورد استفاده قرار گرفت. روش آزمایش بر مبنای آزمایش تعیین اسلامپ می باشد و قطر دایره بتن معیاری

برای قابلیت جریان و پرکنندگی بتن می باشد [۱۸]. دستگاه استاندارد آزمایش اسلامپ در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. ابعاد دستگاه آزمایش اسلامپ در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

باتوجه به اینکه میزان اسلامپ بتن خودتراکم معمولاً بیش از ۲۵۰ میلیمتر است، قطر توده پخش شده بتن به جای میزان اسلامپ به عنوان معیار سنجش مطرح می گردد و بتن با قطر توده ۶۲۵ میلیمتر می تواند به عنوان بتن خودتراکم در نظر گرفته شود. در این آزمایش همچنین جداشدگی ذرات در صورت وجود در اطراف حاشیه بتن پخش شده قابل مشاهده می باشد. [۱۷] این آزمایش، برای بتن های با اندازه ذرات بیشتر از ۴۰ میلیمتر کاربرد ندارد [۱۲].



شکل ۲-۲- دستگاه مخروط اسلامپ و صفحه پایه [۱۷]



شکل ۲-۳- ابعاد مخروط اسلامپ و صفحه پایه [۱۷]

روش انجام

محور مخروط را در مرکز صفحه تراز شده و مرطوب قرار داده و درون مخروط نیز مرطوب می شود. سپس یک لیتر بتن را به وسیله کمچه به داخل مخروط ریخته و سطح بتن را در بالای آن صاف می کنیم. پر کردن مخروط اسلامپ باید بدون هیچ گونه تراکم داخلی و خارجی انجام شود. همچنین ریختن بتن به داخل مخروط باید به صورتی باشد که از تجمع درشت دانه ها در یک سمت مخروط و ریز دانه ها در سمت دیگر اجتناب شود. پس از پر شدن کامل، مخروط را با سرعتی ثابت که نه سریع باشد و نه آهسته به صورت قائم بالا کشیده و از این لحظه زمان رسیدن بتن به قطر ۵۰ سانتیمتر را ثبت می شود. با مشاهده توقف حرکت بتن دو قطر عمود بر هم در دایره تشکیل شده را اندازه گیری کرده و میانگین آن ها را یادداشت می کنیم، در صورت وجود هرگونه شیره در اطراف بتن پنخس شده آن را ثبت می کنیم [۱۸].

تفسیر نتایج

قطر دایره ای که پس از پخش شدن ایجاد میشود نشان دهنده تنش تسلیم بتن تازه و معیار سنجش قابلیت پرکنندگی بتن است و با توجه به آزمایش های انجام شده روی بتن های گوناگون نتایج بدین گونه قابل تفسیرند که اگر مقدار میانگین دو قطر کمتر از ۵۵۰ میلیمتر باشد نشان دهنده تنش تسلیم زیاد و کارپذیری کم بتن است. اگر مقدار میانگین دو قطر از ۸۵۰ میلیمتر بیشتر باشد، تنش تسلیم کم بوده و بر مبنای نتایج به دست آمده از آزمایش جریان احتمال جداشدگی وجود دارد. موسسه EFNARC اسلامپ بتن تازه را مطابق با جدول ۱-۲ به سه رده طبقه بندی می کند.

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

رده بتن	جریان اسلامپ (Cm)
SF1	۶۵-۵۵
SF 2	۷۵-۶۶
SF 3	۸۵-۷۶

رده بتن ۱ SF برای موارد زیر توصیه می گردد .

- سازه های بتنی غیر مسلح یا کم میلگرد که بتن ریزی در آن ها از بالا صورت می گیرد و امکان جریان آزاد بتن از محل بتن ریزی وجود دارد، مانند دال های بتنی در ساختمان های متداول
- اجرای بتن به وسیله پمپ ، مانند پوشش تونل ها و نظایر آن
- مقاطع کوچکی که در آن ها نیازی به جریان افقی بتن طولانی نیست، مانند شمع ها و شالوده های عمیق

رده بتن ۲ SF برای بسیاری از کاربردهای متداول بتن ریزی مناسب می باشد. در صورت عدم نیاز به کاربرد خاص بتن تنظیم مقدار جریان اسلامپ بتن در این محدوده توصیه می گردد.

رده بتن SF^۳ که عمدتاً با سنگدانه‌هایی که اندازه حداکثر آن‌ها به ۱۶ میلیمتر محدود شده است ساخته می‌شوند برای بتن ریزی در مقاطع عمودی، سازه‌های بسیار پر میلگرد و سازه‌های با شکل پیچیده قالب بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

سطح نهایی بتن رده SF^۳ معمولاً بهتر می‌باشد. از سوی دیگر احتمال جداشدگی در این بتن‌ها افزایش می‌یابد. [۱۹]

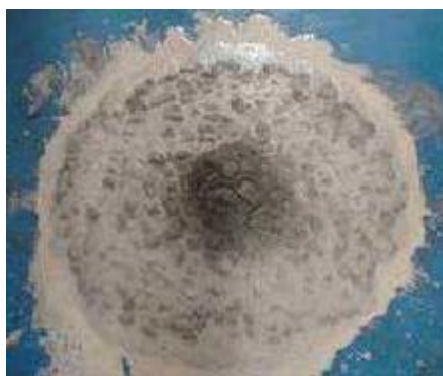
پارامتر دیگری که در آزمایش جریان اسلامپ اندازه‌گیری می‌شود، مدت زمان رسیدن بتن به شعاع ۵۰ سانتیمتر است که برای تعیین لزجت خمیری بتن تازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر بتن در زمانی بیش از ۵ ثانیه به قطر ۵۰ سانتیمتر برسد نشان دهنده لزجت خمیری زیاد بتن و اگر زمان اندزه‌گیری شده از ۱ ثانیه کمتر باشد لزجت کم بتن را نشان می‌دهد. در این موارد احتمال بروز جداشدگی و آب انداختگی در بتن افزایش می‌یابد و معمولاً به صورت شیره‌ای از بتن در لبه بیرونی دایره ایجاد شده پدید می‌آید. [۱۸، ۱۹]

Brite پیشنهاد می‌کند که زمان ۳-۷ ثانیه برای کاربرد‌های مهندسی و زمان بین ۲-۵ ثانیه برای کاربرد‌های خانه‌سازی قابل قبول می‌باشد. [۱۸]

کاربرد دیگر آزمایش اسلامپ تعیین میزان آب انداختگی و جداشدگی بتن به صورت کیفی است. در حالت جدایی خفیف، مرزی از ملات در لبه محفظه بتن پدید می‌آید، اگر هیچ‌یک از این پدیده‌ها ظاهر نشوند و بتن همگن و بدون جداشدگی بود تضمینی وجود ندارد که جدایی اتفاق نخواهد افتاد، زیرا این امر پدیده‌ای وابسته به زمان است که ممکن است بعد از دوره‌ای طولانی تر رخ دهد. انواع جداشدگی در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



جداشدگی جزئی



جدا شدگی خفیف



بدون جدا شدگی

شکل ۲-۴- جداشدگی در آزمایش جریان اسلامپ [۱۷]

آزمایش جریان اسلامپ به دلیل سادگی انجام و قابلیت تفسیر نتایج به دست آمده برای تعیین کارایی بتن خودتراکم بسیار متداول است.

۲-۲-۵-۲- آزمایش حلقه ز

این آزمایش به نوعی شبیه سازی عبور بتن از بین موانع بخصوص میلگردهای متراکم موجود در قالب می باشد. از این آزمایش می توان برای تعیین ویژگی قابلیت عبور بتن تازه که خود متاثر از دو پارامتر اساسی تنش تسلیم و لزجت خمیری می باشد استفاده نمود. این آزمایش همراه با آزمایش های اریمت و قیف V شکل نیز مورد استفاده قرار می گیرد. دستگاه استاندارد آزمایش حلقه ز در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



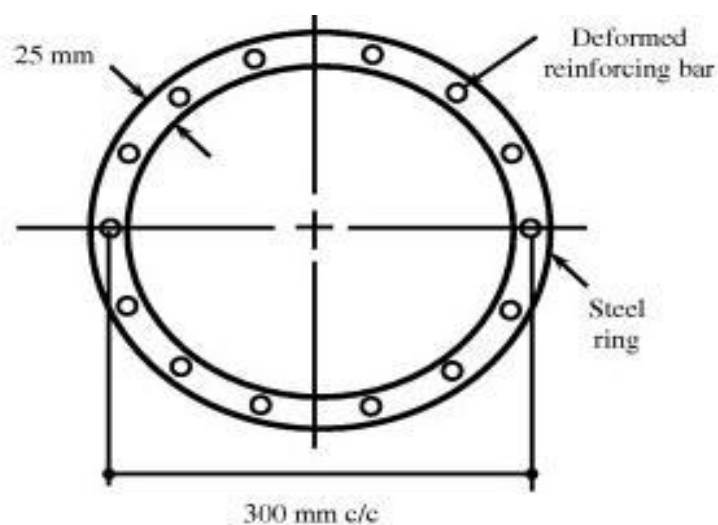
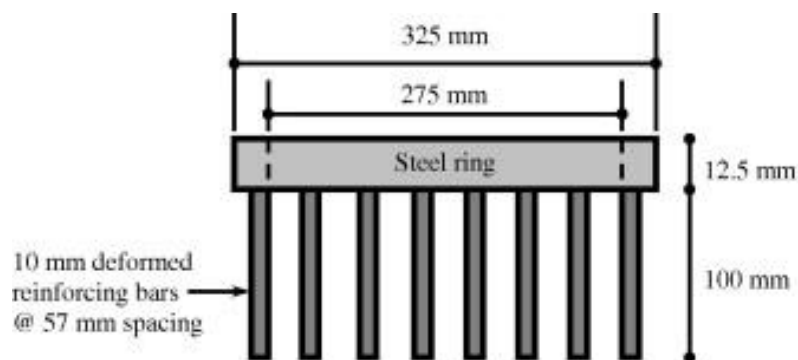
شکل ۲-۵- دستگاه مخروط اسلامپ و صفحه پایه و حلقه J [۱۷]

ابعاد دستگاه آزمایش اسلامپ حلقه J در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. صفحه و مخروط مورد استفاده همانند آزمایش اسلامپ است.

روش انجام

برای انجام این آزمایش لازم است صفحه پایه و قسمت درونی مخروط اسلامپ را مرطوب و مرکز حلقه J را بر مرکز صفحه پایه منطبق کرده، سپس مخروط اسلامپ را در مرکز آن قرار داده شود. پس از ریختن ۶ لیتر بتن به وسیله کمچه به داخل مخروط اسلامپ و صاف کردن سطح بتن در بالای آن بوسیله ماله، مخروط را با سرعتی ثابت که نه سریع باشد و نه آهسته به صورت قائم بالا کشیده و اجازه را در چهار نقطه داده می شود بتن به صورت آزاد جریان یابد. اختلاف ارتفاع بتن داخل و خارج حلقه J اندازه گرفته و میانگین گیری می شود. قطر نهائی بتن در دو جهت عمود بر هم در دایره تشکیل شده را اندازه گرفته و میانگین آن ها را یادداشت کرده. همچنین در صورت وجود هرگونه شیره در اطراف بتن پخش شده آن را اندازه گیری میکنند.

[۱۷]



شکل ۲-۶- ابعاد حلقه [۱۷]

تفسیر نتایج

هرچه اختلاف ارتفاع بتن موجود در قبل و بعد میلگردها بیشتر باشد، توانایی عبور کمتر است. بر همین اساس حداکثر اختلاف ارتفاع مجاز برای بتن خودتراکم ۱۰ میلیمتر در نظر گرفته می شود [۱۷].

اگر مقادیر اختلاف بیشتر از ۱۰ میلیمتر باشد، احتمال بروز پدیده انسداد افزایش می یابد. با توجه به تجربیات به دست آمده از آزمایش های انجام گرفته در بتن های با لزجت کم و زیاد مواردی وجود دارند که میزان اختلاف ارتفاع آن ها بیش از ۱۰ میلیمتر بوده است. بنابراین به نظر می رسد که نتایج به دست آمده از این آزمایش تابعی از لزجت خمیری بتن تازه نمی باشد. از سوی دیگر با افزایش میزان جریان اسلامپ (کاهش تنش تسلیم) مقدار اختلاف اندازه گیری شده تا حدی کاهش می یابد.

با این وجود در بتن های با میزان جریان اسلامپ یکسان میزان اختلاف ارتفاع اندازه گیری شده در محدوده صفر تا ۴۰ میلیمتر مشاهده شده است. بنابراین آزمایش حلقه J به تنهایی برای تعیین مشخصات اساسی بتن تازه یعنی تنش تسلیم و لزجت خمیری قابل استفاده نمی باشد. در مواردی که از برخی پودرها (مانند متاکائولن) در بتن استفاده می شود، لزجت بتن به شدت کاهش می یابد. در این حالت بتن با سرعت بسیار زیادی گسترده می شود و شکل بتن پخش شده به صورت گلبری در می آید که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است. همچنین میتوان همانند دستگاه جریان اسلامپ از روی آبی که در اطراف بتن جمع میشود، میتوان به صورت کیفی، میزان آب انداختگی را تخمین زد.



پخش بتن به صورت گلبری

پخش بتن به صورت کاملا همگن و یکنواخت

شکل ۲-۷- عبور بتن از میان میلگردهای حلقه J [۱۷]

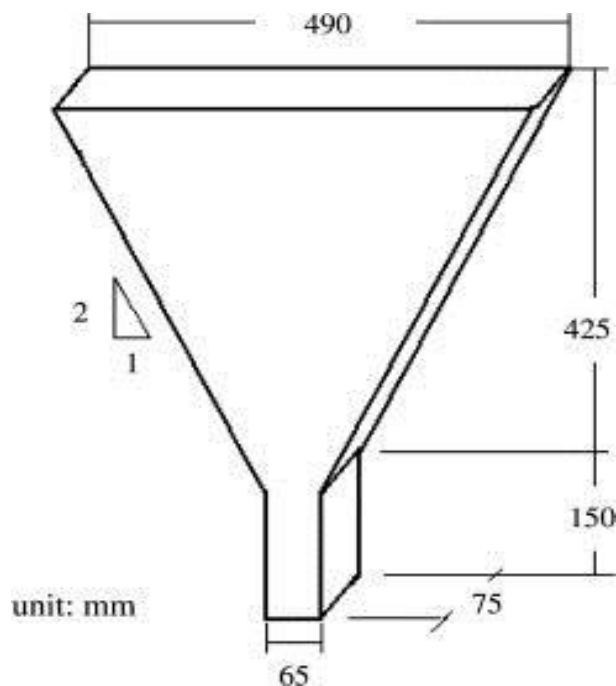
۲-۲-۵-۳- آزمایش قیف V شکل و زمان ۵ دقیقه

این آزمایش در کشور ژاپن توسعه یافته و توسط Ozawa و همکاران مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰].. مدت زمان خروج بتن از یک قیف V شکل استاندارد اندازه گیری شده و به عنوان معیاری برای تعیین قابلیت پرکنندگی و لزجت خمیری بتن مورد استفاده قرار میگیرد. همچنین این آزمایش میتواند به عنوان معیاری

برای تعیین جداشدگی بتن مورد استفاده قرار بگیرد. علاوه بر مدت زمان خروج بتن که در این آزمایش اندازه گیری میشود نحوه خروج بتن از قیف و یکنواختی بتن خارج شده نیز مهم می باشد. همچنین این دستگاه می تواند شاخص خوبی در خصوص میزان همگنی بتن به صورت شهودی باشد. دستگاه استاندارد آزمایش قیف V در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. ابعاد دستگاه آزمایش قیف V شکل در شکل ۲-۹ نشان داده شده است.



شکل ۲-۸- دستگاه قیف V شکل [۱۷]



شکل ۲-۹- ابعاد دستگاه V شکل [۱۷]

روش انجام

پس از قرار دادن قیف V شکل و پایه آن بروی زمین، سطوح درونی قیف را مرطوب و دریچه را بسته و سطحی ۱۲ لیتری زیر دستگاه قرار می گیرد. سپس حدود ۱۲ لیتر بتن که به صورت معمولی نمونه برداری شده را درون قیف ریخته می شود. در طول آزمایش هیچ گونه فشردگی، یا ضربه زدن به بدنه دستگاه نباید صورت گیرد. پس از گذشت ۱۰ ثانیه دریچه را باز کرده و اجازه داده می شود تا بتن تحت وزن خود به بیرون جریان یابد. زمان خروج بتن را یادداشت و در ادامه بار دیگر قیف را از بتن پر کرده و به مدت ۵ دقیقه رها گذاشته می شود، سپس دریچه را باز نموده و زمان خروج بتن از قیف اندازه گرفته می شود [۱۷].

تفسیر نتایج

زمان مناسب تخلیه بتن از دستگاه قیف V شکل برای بتن خود تراکم حدود ۶ تا ۱۲ ثانیه می باشد. با این وجود این پارامتر به تنهایی تعیین کننده نیست، البته بررسی های انجام گرفته نشان می دهد که بتن های خودتراکم با زمان تخلیه کاملاً متفاوت در محدوده کمتر از 1 ثانیه یا بیش از ۶۰ ثانیه نیز با موفقیت به کار

برده شده اند. اگر زمان تخلیه بتن بیشتر از ۱۲ ثانیه باشد، بیانگر لزجت خمیری زیاد است. در این صورت ممکن است تامین کارایی مورد نیاز بتن مشکل باشد. اگر زمان تخلیه بتن کمتر از ۶ ثانیه باشد نشان دهنده لزجت کم و احتمال وقوع پدیده جدا شدگی است [۱۷]. در این موارد باید تمهیدات ویژه‌ای برای تامین پایداری و یکنواختی بتن تازه مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اهمیت پارامتر زمان در بروز پدیده ناپایداری بتن اگر با گذشت ۵ دقیقه جدا شدگی در بتن رخ دهد، زمان تخلیه بتن از قیف افزایش می یابد که این امر ناشی از جدا شدگی بتن خودتراکم می باشد.

این دستگاه نمی تواند قابلیت عبور و آب انداختگی را نشان دهد، هر چند به صورت چشمی می توان از روی آبی که پس از ۵ دقیقه بر روی بتن جمع شده، به میزان آب انداختگی بتن خودتراکم پی برد. شکل ۲-۱۰-۱۰ میزان آب انداختگی بتن را بعد از گذشت ۵ دقیقه نشان می دهد.



شکل ۲-۱۰-۱۰- آب انداختگی بتن خودتراکم روی دستگاه قیف V شکل [۱۸]

تغییر سرعت خروج بتن، نشان دهنده ناهمگن بودن آن و جدا شدگی بتن است. در صورتی که تجمع سنگدانه های درشت در محل خروج وجود داشته باشد بتن دچار انسداد میشود. این بتن برای کاربرد به عنوان بتن خودتراکم، مخصوصا در مواردی که انتقال بتن به وسیله پمپ انجام می شود مناسب نیست. در صورتی که

بتن به صورت مخروطی به سمت پایین حرکت کند نشان دهنده وضعیتی است که چسبندگی بین بتن و فلز بیشتر از چسبندگی داخلی است که می تواند در موارد با سطح جانبی قالب بندی زیاد مشکل ساز باشد.

موسسه EFNARC ، بر مبنای نتایج به دست آمده از آزمایش جریان اسلامپ و مخروط V شکل لزجت بتن خودتراکم را به دو دسته تقسیم نموده است که در جدول ۲-۲ بیان شده است .

جدول ۲-۲- رده بندی لزجت بتن خودتراکم در قیف V شکل طبق طبقه بندی موسسه EFNARC [۱۸]

رده بتن	T(s)	T _{5min} (s)
VS ₁ /VF ₁	≤ ۲	≤ ۸
VS ₂ /VF ₂	≥ ۲	۹-۲۵

رده VS₁/VF₁ دارای ویژگی های زیر است:

- قابلیت پرکنندگی مناسب حتی در حضور میلگردهای متراکم
- دارای توانایی خود تراز
- سطح پرداخت مناسب

ولی در بتن هایی که در این رده قرار می گیرند احتمال وقوع جداشدگی و آب انداختگی وجود دارد.

رده VS₂/VF₂ دارای ویژگی های زیر است:

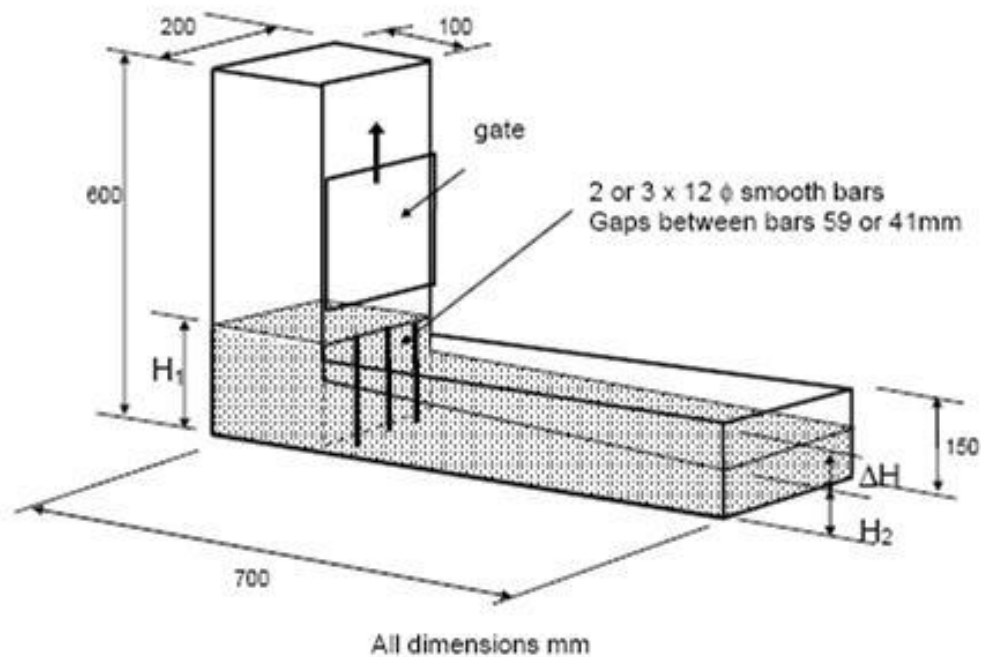
- با افزایش زمان در بتن تازه پدیده تیکسوتروپی بیشتری مشاهده می شود که ممکن است در کاهش فشار وارد بر قالب ها یا در بهبود بخشیدن مقاومت در برابر جداشدگی مفید باشد. ولی ممکن است سطح پرداخت نهایی را به دلیل محبوس شدن حباب های هوا دچار مشکل کند.

۲-۲-۵-۴- آزمایش جعبه L شکل

این آزمایش بر اساس یک طرح ژاپنی برای بتن های زیر آب توسط Petersson توسعه یافته است. [۲۱] قابلیت پر کنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم می باشد. همچنین میتوان وجود یا عدم وجود جداشدگی بتن را به صورت چشمی مشاهده نمود. این آزمایش به منظور بررسی قابلیت جریان بتن تازه و پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها طراحی شده است. دستگاه استاندارد آزمایش جعبه L در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است. ابعاد دستگاه آزمایش جعبه L شکل ۲-۱۲ داده شده است.



شکل ۲-۱۱- دستگاه استاندارد آزمایش جعبه L [۱۸]



شکل ۲-۱۲- ابعاد دستگاه استاندارد آزمایش جعبه L [۱۸]

روش انجام

دستگاه این آزمایش شامل دو قسمت می باشد. بخش عمودی که از بتن پر می شود به همراه دریچه ای در قسمت پائینی که پشت آن میلگردها به فواصل معینی تعبیه شده اند و بخش افقی که در فواصل ۲۰ و ۴۰ سانتیمتر از دریچه علامتگذاری شده است. نوع دیگری از دستگاه جعبه L شکل وجود دارد که محل میلگردها به فاصله ۷ سانتیمتری از دریچه تخلیه بتن قرار دارد. در حدود ۱۴ لیتر بتن که به صورت معمولی نمونه برداری شده است برای انجام آزمایش لازم می باشد که سطوح داخلی دستگاه را مرطوب و بخش عمودی دستگاه را با نمونه بتن پر می شود. آن را به مدت ۱ دقیقه رها کرده و دریچه متحرک را بلند کرده و اجازه داده می شود که بتن به داخل بخش افقی جریان یابد همزمان کرنومتر را فعال و مدت زمانی که طول می کشد بتن به نقاط ۲۰ سانتیمتر و ۴۰ سانتیمتر برسد ثبت می شود. پس از توقف جریان، ارتفاع بتن در انتهای بخش

افقی h_2 را اندازه گرفته و ارتفاع در بخش عمودی h_1 و از تقسیم این دو ارتفاع نسبت انسداد حاصل می شود [۱۷].

تفسیر نتایج

این دستگاه قابلیت عبور و پرکنندگی بتن را نشان می دهد. از روی اختلاف ارتفاع ابتدا و انتهای مسیر، می توان میزان عبور بتن را برآورد کرد. هر چه نسبت انسداد به یک نزدیکتر باشد، نشان دهنده قابلیت پرکنندگی بهتر بتن خودتراکم و کمتر بودن تنش تسلیم بتن است. [۱۷] پس از بازکردن دریچه زمان رسیدن جریان بتن به فواصل ۲۰۰ و ۴۰۰ میلیمتری از محل دریچه عاملی برای سنجش لزجت خمیری ملات به شمار می رود، به طوری که سرعت بیشتر جریان بتن تازه، نشان دهنده لزجت کمتر بتن تازه است.

علاوه بر آن بر اساس میزان قابلیت عبور سنگدانه ها از میان میلگردها توانایی قابلیت عبور بتن به صورت کیفی قابل توصیف است. مطابق شکل ۲-۱۳ امکان دارد که نسبت انسداد به ۱ نزدیک باشد ولی سنگدانه زیادی در پشت میله ها گیر کرده باشد. همچنین در مواردی که بتن همگن نباشد و جداشدگی رخ داده باشد در ۵ سانتیمتری از انتهای مسیر ارتفاع بتن به سرعت کاهش مییابد و جای خالی این فضا با دوغاب پر میشود. باید توجه داشت اگر لزجت و تنش تسلیم بتن تازه بالا باشد احتمال بروز پدیده انسداد را زیاد می کند که در نتیجه قابلیت عبور و پرکنندگی بتن تازه را با مشکل روبرو میکند و باعث بروز پدیده انسداد در بتن می شود. لازم به ذکر است که نتایج این آزمایش به سرعت باز شدن دریچه بستگی دارد، بنابراین سرعت بیرون کشیدن دریچه باید در تمامی آزمایش ها یکنواخت باشد.



جمع شدن لایه ای از شیر به بتن روی سطح آن



بروز پدیده انسداد و قفل شدگی

شکل ۲-۱۳- رفتار بتن خودتراکم بعد از باز شدن دریچه جعبه L شکل [۱۸]

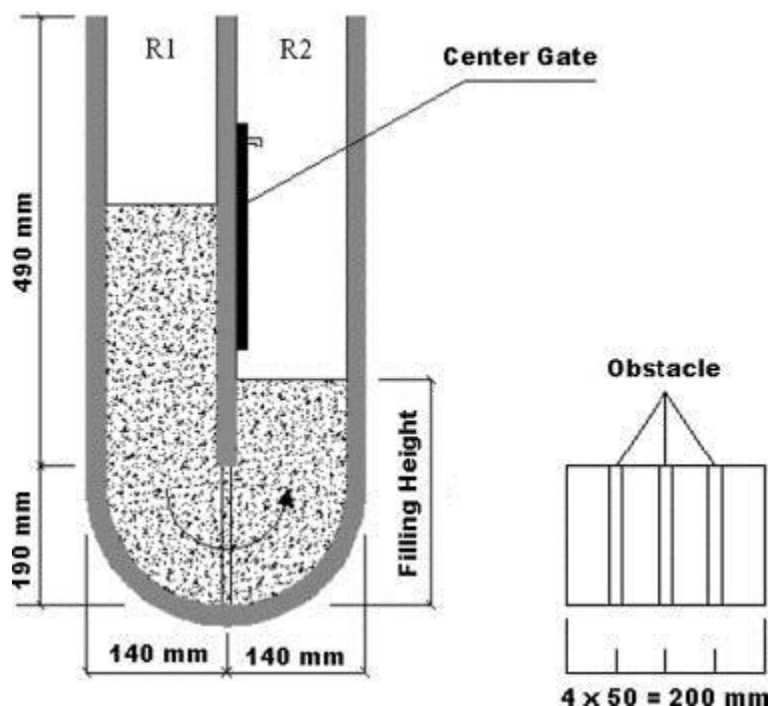
۲-۲-۵-۵- آزمایش جعبه U

این آزمایش توسط مرکز تحقیقات تکنولوژی شرکت Taisei در ژاپن توسعه یافته است [۲۲] و برای اندازه گیری قابلیت پر کردن و قابلیت عبور بتن خودتراکم استفاده می شود. این دستگاه شامل مجرایبی که توسط یک تیغه جداکننده و یک دریچه متحرک در وسط به دو قسمت تقسیم شده است. میلگردهایی با قطر اسمی ۱۳ میلیمتر در قسمت دریچه با فاصله مرکز به مرکز ۵۰ میلیمتر نصب شده اند. در نتیجه فاصله بین میلگرد ها ۳۵ میلیمتر است. به طور کلی این فاصله بر مبنای سه برابر اندازه حداکثر درشت دانه تعیین می گردد دستگاه استاندارد آزمایش جعبه U شکل در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴- دستگاه استاندارد آزمایش جعبه U شکل [۱۸]

ابعاد دستگاه استاندارد آزمایش جعبه U شکل در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵- ابعاد دستگاه استاندارد آزمایش جعبه U شکل [۱۷]

روش انجام

دستگاه U شکل را تراز کرده و از عملکرد مناسب دریچه کشویی اطمینان حاصل می گردد. پس از بستن دریچه، یک سمت مجرا را با ۲۰ لیتر بتن که به صورت معمولی نمونه برداری شده است پر کرده و پس از یک دقیقه دریچه متحرک را بلند کرده تا بتن در مجرای دیگر جریان یابد. پس از توقف جریان زمان تخلیه ثبت می شود. سپس اختلاف ارتفاع بتن، در مجرای اول و دوم اندازه گرفته می شود [۱۷].

تفسیر نتایج

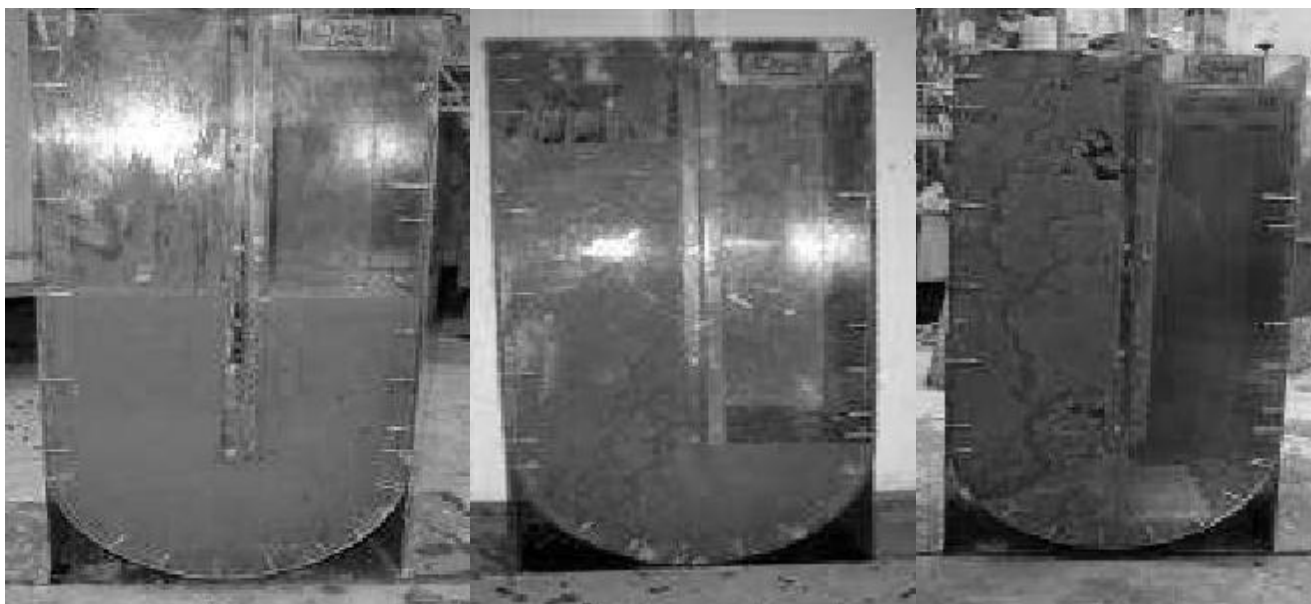
این آزمایش ترکیب آزمایش های قیف شکل V و جعبه L شکل می باشد. در این آزمایش بتن باید برخلاف نیروی وزن خود حرکت کند که این امر مستلزم مناسب بودن تنش تسلیم و لزجت بتن است. در واقع برای این که بتن این آزمایش ها را با موفقیت پشت سر بگذارد، ترکیب مناسبی از لزجت و تنش تسلیم مورد نیاز است. محدوده بهینه ای از تنش تسلیم و لزجت وجود دارد که در خارج از این محدوده، شکل را ندارد.

اگر جریان بتن مشابه جریان یک سیال ایده آل U بتن توانایی تامین ملزومات دستگاه فرض شود در پایان جریان سطح بتن در دو مجرا همتراز بوده بنابراین هرچه اختلاف ارتفاع به صفر نزدیکتر باشد، روانی و قابلیت عبور بتن بهتر خواهد بود و لزجت خمیری و تنش تسلیم بتن در محدوده بهینه قرار می گیرد. میزان اختلاف ارتفاع بتن در دو مجرا باید کمتر از ۳۰ میلیمتر باشد. در صورتی که بتنی ملزومات تعیین شده در این آزمایش را برآورده سازد تقریباً می توان از عملکرد مناسب آن به عنوان بتن خودتراکم اطمینان حاصل نمود. البته تامین ملزومات دستگاه آزمایش U شکل برای آنکه بتن دارای ویژگی های خودتراکمی باشد الزامی نیست، بلکه تامین این ملزومات برای خودتراکم بودن بتن معمولاً کافی میباشد. در صورتی که بتن نتواند این آزمایش را به خوبی پشت سر بگذارد، به طور قطعی نمیتوان در خصوص نامناسب بودن این بتن نظر داد. در این حالت با رجوع به نتایج سایر آزمایش های بتن خودتراکم میتوان نظر نهایی را در خصوص این بتن صادر نمود.

با توجه به تجربیات به دست آمده از آزمایش های انجام گرفته بتن های با لزجت و تنش تسلیم زیاد یا عبور نکرده و انسداد رخ می دهد و اگر هم عبور کرده اند اختلاف ارتفاع بیش از ۳۰ سانتیمتر میباشد. همچنین در بتن های با لزجت و تنش تسلیم کم که احتمال وقوع جدایش زیاد است، تخلیه بتن در مجرای دوم ناقص صورت می گیرد، به طوری که معمولاً شیره بتن عبور کرده و سنگدانه ها پشت میلگرد ها باقی میمانند. از این رو طبق توصیه انجمن مهندسی عمران ژاپن حداکثر اختلاف ارتفاع مورد قبول ۳۰ میلیمتر در نظر گرفته میشود. زمان تخلیه بتن در مجرای دوم به منظور سنجش لزجت خمیری مورد استفاده قرار میگیرد. در صورتیکه یک وجه دستگاه شفاف باشد میتوان پس از پر شدن کامل دستگاه، نحوه قرارگیری بتن در داخل محفظه را مشاهده نمود. همچنین می توان با دانه بندی و اندازه گیری چگالی نمونه هایی که از دو طرف

دریچه گرفته شده اند، میزان جداشدگی و همگنی بتن را درحالات مختلف مشخص گشته است. در شکل

۱۶-۲ نحوه قرارگیری بتن در جعبه U شکل نشان داده شده است. [۱۷]



بتن بطور کامل عبور کرده

عبور دوغاب بدون سنگدانه

بتن دچار انسداد

شکل ۱۶-۲- نحوه قرار گیری بتنی در داخل محفظه U شکل [۱۷]

۲-۲-۵-۶- آزمایش اورمیت

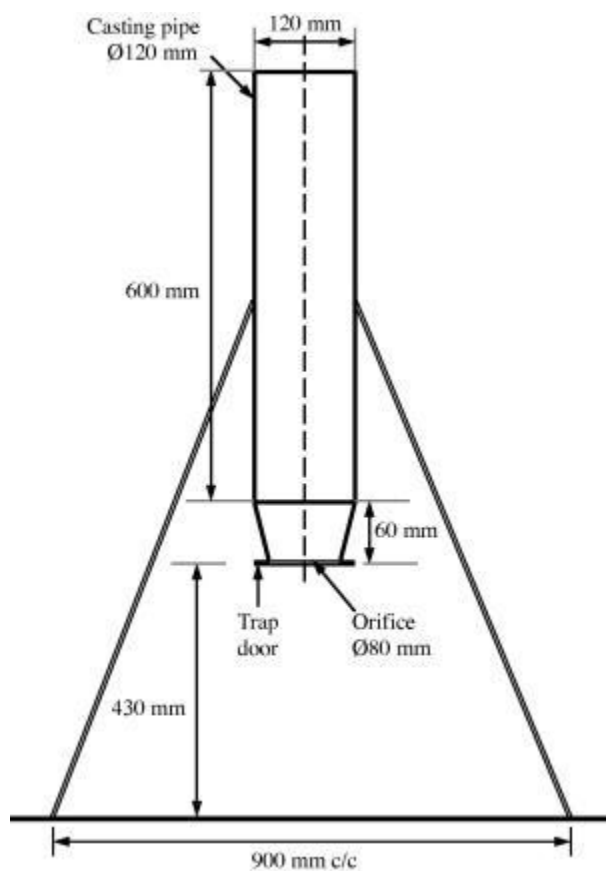
آزمایش اورمیت در دانشگاه paisley به عنوان روشی برای ارزیابی کارایی مخلوط های بتن تازه در محل گسترش پیدا کرده است [۲۳]. اورمیت شامل یک لوله چدنی قائم به قطر داخلی ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۶۰۰ میلیمتر که بر روی یک مخروط معکوس به ارتفاع ۶۰ میلیمتر با دهانه نازل به قطر ۸۰ میلیمتر قرار گرفته است می باشد. این آزمایش برای ارزیابی بتن با حداکثر اندازه درشت دانه ۲۰ میلیمتر مطلوب است. برای سایر اندازه حداکثر دانه معمولاً قطر نازل در محدوده ۷۰ تا ۸۰ میلیمتر متغیر می باشد. جهت بستن منفذ خروجی لوله از یک دریچه استفاده می شود. لوله بر روی یک سه پایه به ارتفاع ۴۰ سانتیمتری قرار داده شده است [۱۷]. دستگاه استاندارد آزمایش اورمیت در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است. ابعاد دستگاه آزمایش اورمیت در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۷- دستگاه آزمایش اورمیت [۱۸]

روش انجام

دستگاه را تراز و سطوح داخلی لوله چدنی را مرطوب می شود. سپس دریچه را بسته و صفحه پایه را به همراه حلقه J به صورت هم مرکز با محور لوله چدنی زیر آن قرار می دهیم. لوله را با ۸ لیتر بتن بدون ضربه زدن و فشردن پر کرده و سطح بتن را صاف می شود، ۱۰ ثانیه پس از پر کردن، دریچه را باز کرده تا بتن تحت وزن خودش تخلیه شود و پس از خروج کامل بتن از لوله، زمان خروج را ثبت نموده و بعد از توقف جریان بتن پخش شده اختلاف ارتفاع بتن داخل و خارج حلقه را اندازه گیری می شود [۱۷].



شکل ۲-۱۸- ابعاد دستگاه آزمایش اورمیت [۱۷]

تفسیر نتایج

این آزمایش به عنوان روشی برای ارزیابی کارایی مخلوط های بتن تازه در کارگاه گسترش یافته است این آزمایش شبیه به آزمایش قیف V شکل است و نشان دهنده روانی بتن در مدت جای دهی می باشد. زمان خروج بتن از داخل لوله، به عنوان شاخصی برای تعیین میزان لزجت بتن شناخته می شود. در صورتیکه در زیر دستگاه اورمیت مطابق شکل ۲-۱۹ حلقه J گذاشته شود، می تواند مدلسازی خوبی برای جداشدگی دینامیکی باشد. نتایج به دست آمده برای اغلب بتن های آزمایش شده در محدوده ۱ تا ۵ ثانیه قرار می گیرند. مشاهده می شود که بتن های با ویژگی های کاملاً متفاوت نتایج آزمایش اورمیت یکسانی دارند. به این ترتیب نتایج آزمایش اورمیت به تنهایی قابل استناد نیست اما ترکیب آزمایش اورمیت و حلقه J می تواند برای بررسی قابلیت عبور بتن مفید باشد. [۱۷]



شکل ۲-۱۹- ترکیب دستگاه آزمایش اورمیت و حلقه J [۱۸]

اختلاف ارتفاع بتن داخل و خارج حلقه J معیاری برای سنجش قابلیت عبور و پرکنندگی بتن می باشد . عمدتا در زمان های تخلیه بیشتر از 5 ثانیه اختلاف ارتفاع بیشتر بوده و در زمان های کمتر این اختلاف ارتفاع به حداقل می رسد در شکل ۲-۲۰ اختلاف ارتفاع مشخص گشته است.



اختلاف ارتفاع کم



اختلاف ارتفاع قابل توجه

شکل ۲-۲۰- رفتار بتن در آزمایش با دستگاه ترکیبی اورمیت و حلقه J شکل [۱۷]

۲-۲-۶- نحوه تولید بتن خودتراکم SCC

با توجه به حساسیت بیشتر بتن خودتراکم در قیاس با بتن معمولی از لحاظ تغییر در ویژگی های مواد اولیه مورد مصرف در بتن می بایستی تمامی مراحل اعم از مصالح مورد استفاده ، اختلاط بتن ، حمل و مصرف بتن باید زیر نظر افراد متخصص در این زمینه انجام گیرد و حدامکان تولید بتن در کارگاه های تولید بتن که دارای تجهیزات ، آزمایشگاه کنترل کیفیت و پرسنل مجرب می باشند تولید گردد.

۲-۲-۶-۱- دپوی مواد اولیه

دپوی مواد اولیه بتن SCC مشابه بتن معمولی می باشد ولی به دلیل حساسیت بیشتر به تغییرات باید مورد توجه بیشتری قرار گیرد به طوری که سنگدانه های با اندازه متفاوت ، جداگانه دپو شوند(استفاده از دیوار

جداکننده) و به منظور به حداقل رساندن نوسان رطوبت سطحی آنها در مقابل عوامل جوی حفظ گردند و رطوبت سنگدانه ها مستمراً رصد و اندازه گیری شود. زیرا مقدار رطوبت سنگدانه ها در تعیین نسبت مخلوط ها بسیار بسیار مهم می باشد. در خصوص دپوی سیمان، پوزولان ها و مواد افزودنی التزام اضافی نسبت به بتن عادی وجود ندارد. اما توصیه تولیدکنندگان این مصالح حتماً باید مورد توجه قرار گیرد.

۲-۲-۶-۲- تجهیزات اختلاط

مطابق راهنمای EFNARC و مبحث 9 مقررات ملی ساختمان استفاده از هر نوع مخلوط کن برای تهیه SCC بلامانع است، اما شرایط و وضعیت مکانیکی دستگاه باید در حد مطلوب باشد تا از مخلوط شدن یکنواخت مصالح اطمینان حاصل شود. زمان مورد نیاز برای مخلوط کردن بتن خودتراکم معمولاً طولانی تر از بتن معمولی است که این مسئله به علت حجم بالاتر خمیر سیمان و همچنین زمان لازم برای فعال شدن فوق روان کننده می باشد. نکته حائز اهمیت این است که ابتدا مخلوط های آزمایش ساخته شود (حجم بتن آزمایش نباید کمتر از نصف ظرفیت مخلوط کن باشد) تا مدت مورد نیاز و ترتیب اضافه کردن مواد و مصالح تعیین شود.

۲-۲-۶-۳- روش های اختلاط بتن خودتراکم

با عنایت به مقدار زیاد خمیر سیمان و روان پذیری SCC رسیدن به مخلوط یکنواخت و همگن سخت تر از بتن معمولی است. مشکل اساسی تشکیل کلوخه مصالح در مخلوط می باشد زیرا این کلوخه ها به سادگی از بین نمی روند. بنابراین بهتر است ابتدا مخلوط مصالح خشک با مقدار آب کمتر ساخته شود تا مخلوط یکنواخت تولید شده و سپس آب و فوق روان کننده بیشتری افزوده شود. زمان افزودن مواد افزودنی شیمیایی در هنگام مخلوط کردن بر موثر بودن آنها تاثیرگذار است. مواد افزودنی نباید مستقیماً به مصالح خشک

اضافه شوند بلکه باید همراه با آب مخلوط به بتن اضافه شوند . مقدار مواد افزودنی باید دقیقاً اندازه گیری شوند . در صورت استفاده از مواد افزودنی مختلف مجاز به اختلاط این مواد با همدیگر نمی باشیم .
بهرتر است اختلاط مصالح به این شرح باشد : ابتدا سنگدانه ها درون مخلوط کن ریخته و سپس سیمان و پوزولان اضافه شوند . بعد از میکس مصالح خشک حدود دو سوم آب مخلوط به جام ریخته و پس از میکس مابقی آب به همراه فوق روان کننده به مخلوط اضافه گردد .

۲-۲-۶-۴- انتقال بتن Scc

بتن خودتراکم را می توان با تمام وسایلی که برای بتن معمولی استفاده می شوند جابه جا کرد امام به دلیل روانی زیاد بتن SCC حجم بتن در جام تراک میکسر نباید بیشتر از ۸۰ درصد ظرفیت جام باشد . زیرا وقتی کامیون در شیب حرکت می کند بتن به دو قسمت در جلو و در عقب جام تقسیم نشود . در ضمن باید توجه داشت که ظرفیت تولید ، زمان حمل و قابلیت ریختن بتن با هم متوازن باشد تا بتن ریزی بدون ایجاد وقفه انجام گیرد و بتن قبل از اینکه قوام خود را از دست بدهد ریخته شود . چرا که فاصله در بتن ریزی باعث ایجاد درز سرد در بتن خواهد شد .

۲-۲-۶-۵- کنترل کیفیت و پذیرش بتن خودتراکم

قبل از تولید بتن و بتن ریزی باید اطمینان حاصل شود که تمام کارکنان دست اندرکار از کارگر تا مهندسین براساس مسئولیت های مربوط از تمام مراحل ساخت و اجرا مانند انبارش مصالح و مواد ، ساخت بتن ، انتقال بتن و بتن ریزی و آزمایش های بتن تازه آگاهی دارند و از آموزش کافی برخوردار شده اند . اهم موارد کنترل مطابق بندهای ذیل می باشند :

۱) کنترل مصالح ، نسبت های مخلوط و داده های آزمایش های مربوط

۲) روش های ساخت شامل پیمانہ کردن ، مخلوط کردن ، انتقال ، بتن ریزی ، پرداخت و عمل آوری

۳) آزمایش برای مصالح و خصوصیات بتن تازه و بتن سخت شده

۲-۳- بتن الیافی

بتن دارای مقاومت کششی ناچیزی است. برای افزایش مقاومت کششی بتن راههای مختلفی پیشنهاد شده است. یکی از این راه ها استفاده از الیاف مختلف است. در دهه های گذشته انواع الیاف، مانند الیاف فولادی، پلی پروپیلن، شیشه، آرامید، کربن و غیره مورد آزمایش و تحقیق قرار گرفته اند بتن ساخته شده از سیمان، آب، ماسه، و الیاف مجزا بتن مسلح به طبق تعریف. ACI544-82 IR بتن الیافی نامیده می شود [۲۴].

در بتن الیافی، مانند بتن معمولی، می توان از پوزولان ها و دیگر مواد مضاف استفاده کرد. الیاف در شکل ها و اندازه های متفاوت، و از جنس فولاد، مواد پلیمری، شیشه و مواد طبیعی مورد استفاده قرار میگیرد. خمیر سیمان هیدراته شده و بتن تا اندازه ای شکننده می باشد. هدف از مسلح نمودن بتن با الیاف ، افزایش مقاومت کششی ، جلوگیری از توسعه ترکها و افزایش سختی بوسیله انتقال تنش در عرض مقطع یک ترک می باشد. بدین ترتیب در مقایسه با بتن بدون الیاف، امکان تغییر شکلهای بزرگ تری فراهم می شود. [۲۵]

از زمانهای کهن، الیاف برای مسلح کردن مصالح فرد مورد استفاده قرار می گرفته اند. از کاه برای مسلح کردن آجرهای خشتی گلی و موی اسب برای مسلح کردن ملات بنایی استفاده شده است. در زمان های نزدیک تر الیاف آزیست در محصولات ساختمانی با پایه سیمانی در ابعاد صنعتی مورد استفاده قرار گرفته، اما به علت مشکلات زیست محیطی و بهداشتی آزیست، انواع جایگزین این نوع الیاف، از دهه ۱۹۶۰ به کار گرفته شده اند.

بتن غیر مسلح، مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی کمی در گسیختگی دارد. این کمبودهای بتن به طور سنتی بوسیله میل گردها و یا فولاد پیش تنیدگی جبران شده است. میل گردها متصل و پیوسته هستند و عملکرد سازه را بهینه می کنند. در مقابل الیاف نا پیوسته بوده و به صورت تصادفی در حجم بتن پراکنده اند. هر چند هنوز کاربردهای سازه های الیافی در کمیته ACI-318 ارایه نشده ولی در حال حاضر از الیاف به عنوان مسلح کننده مضاعف در سازه ها و قطعات بتنی استفاده میشود [۲۴].

۲-۳-۱- تاریخچه

بررسی ها نشان می دهند که تفکر استفاده از الیاف از روزگاران باستان وجود داشته است. مصریان قدیم از کاه برای مسلح کردن آجرهای گلی استفاده می کردند. همچنین الیاف پنبه نسوز برای مسلح کردن رس در ۵۰۰۰ سال پیش استفاده شده است. علاوه بر این از موی اسب نیز برای تسلیح استفاده شده است.

Joseph Lambot در سال ۱۸۴۷ پیشنهاد کرد که با اضافه کردن الیاف پیوسته به شکل سیم به بتن یک ماده ساختمانی جدیدی می توان تولید کرد. در سال ۱۹۱۰ یک سری آزمایش ها برای مقاومت بتن به وسیله الیاف های کوتاه توسط Porter انجام شد. او با اضافه کردن گل میخ به بتن، افزایش مقاومت کششی و خردشدگی بتن را بدست آورد. در سال های بعد از ۱۹۱۰ ساخت المان های کامپوزیت شامل سیمان و پنبه نسوز توسط Lhatshele توسعه یافت. در سال ۱۹۳۹ Zitkevic یک روش برای بهبود رفتار بتن مسلح یافت. او از الیاف های سیم آهنی تقریباً به طول ۱۰۰ میلیمتر و قطر ۱۰ میلیمتر که به الیاف فولادی مورد استفاده در بتن امروزی بسیار شبیه بود استفاده کرد و نتیجه گرفت که مقاومت های فشاری، کششی و برشی افزایش می یابند.

در دهه ۱۹۵۰ برای اولین بار در کشور شوروی سابق و در سال ۱۹۶۰ در ایالات متحده تحقیقاتی در مورد استفاده از الیاف فولادی در مخلوط بتن صورت گرفت و نشان داده شد که تمرکز تنش در محل ترک های به وجود آمده بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

J. Majumdar و P.L. Walton در سال ۱۹۷۵ در انگلستان در تحقیقات خود مشخص نمودند که افزودن الیاف پلیمری همچون نایلون و پلی پروپیلن حتی در نسبت های بسیار کم، مقاومت ضربه ای مخلوط بتن را بهبود می بخشد اما تاثیر بسیار کمی بر روی مقاومت کششی یا خمشی دارند و بنابراین استفاده از الیاف ثانویه غیرپلیمری را به عنوان تقویت کننده ثانویه به منظور بهبود مشخصات مقاومتی، پیشنهاد کردند [۲۶].

R. Cho و K. Kobayashi در بررسی رفتار خمشی نمونه های بتن تسلیح شده با الیاف پلی پروپیلنی در سال ۱۹۸۱ نشان دادند که تقویت الیافی با تحمل بار مفید بیشتر از بار اولین ترک، به وضوح سختی را افزایش می دهد و نیز رفتار بعد از ترک خوردگی به شدت متاثر از سرعت بارگذاری است چون تابع مشخصات ویسکوالاستیک الیاف پلی پروپیلنی است [۲۷].

۲-۳-۲- ویژگی بتن الیافی

در تسلیح الیافی بتن، در جریان عمل اختلاط، الیاف در درون بتن به طور نامنظم و در جهات مختلف پخش می شوند [۶۰]. در بتن تازه، با تعیین مقدار، نوع و اندازه مناسب الیاف، جمع شدگی و به تبع آن ترک ها به میزان قابل توجهی کاهش می یابند و از طرفی در بتن سخت شده، الیافی که به طور نامنظم پخش شده اند با متوقف کردن رشد ترک های ریز و ممانعت از ائتلاف آن ها و پل زدن ترک های بزرگی و انتقال نیرو از عرض این ترک ها، نفوذپذیری را به میزان قابل توجهی کاهش می دهند و در واقع الیاف با ایجاد پیوندهای مختلف با اجزای بتن، موجب انسداد و یا حبس تخلخل بتن شده و موجب کاهش نفوذپذیری آن می گردند [۲۸].

در حالت کلی مزایای بتن الیافی در مقایسه با بتن معمولی بدون الیاف بشرح زیر می باشد: [۲۹]

- افزایش دوام بتن
- قابلیت کششی بالای بتن و افزایش ظرفیت تغییر شکل نسبی آن
- قابلیت باربری بالا بعد از ترک خوردگی
- افزایش میزان جذب انرژی
- مقاومت در مقابل تنش های خستگی
- مقاومت بالا در مقابل ضربه
- مقاومت در مقابل تورق و سایش و هوازگی سطح بتن
- سرعت بالای اجرا

قابل ذکر است که بتن های مسلح الیافی مناسب ترین مصالح مورد استفاده در ساخت بناهای مقاوم در برابر ضربه همچون سازه پناهگاه ها و انبارهای نگهداری مواد منفجره نیز به شمار می روند و بناهای ساخته شده از این نوع بتن قابلیت فوق العاده ای در جذب انرژی ضربه دارند [۲۹]. استفاده از این نوع بتن در ساخت باند فرودگاه ها، کف سالن های مختلف صنعتی و ورزشی، پی ماشین آلات سنگین در کارخانه ها، پل ها، پارکینگ ها، پیاده روها، روسازی راه ها، سازه های دریایی، کانال های آب، ساخت قطعات پیشساخته ساختمانی همچون پانل ها و یا بتن شاتکریت روی سطوح انحنادار سازه ها و شیروانی ها توسعه فراوانی یافته است. [۲۹،۲۶]

بتن بعلت داشتن ویژگی های خاص، از جمله مشخصات مکانیکی مطلوب، سهولت تهیه و صرفه اقتصادی، علاوه بر استفاده های معمول، رایجترین کامپوزیت برای ساخت پانل های مقاوم حجیم میباشد. زمانی که یک پرتابه به هدف بتنی برخورد میکند، مانع در اثر فشار، سوراخ شده و پرتابه داخل آن نفوذ میکند. موج تنش بوجود آمده بعد از طی کردن ضخامت بتن و با رسیدن به سمت عقبی مانع، بصورت موج کششی برگشت میباشد که به علت ضعف بتن در کشش آسیب فراوانی ایجاد می شود [۲۹].

بتن الیافی چسبندگی بهتری به میلگردها دارد. در ضمن بتن الیافی بسیار دیرتر دچار خستگی می شود. به علت کاهش نفوذپذیری، بتن در برابر سیکل های ذوب و انجماد مقاومت بیشتری خواهد داشت. کاربرد الیاف در شاتکریت باعث کاهش برگشت به میزان قابل توجهی می شود و از نظر اقتصادی بسیار مناسب است.

همچنین آب انداختگی بتن باعث ایجاد ترک های ریزی می شود که اصطلاحاً ترک پوست سوسماری گفته می شود. الیاف در بتن مانند الیاف پلیروپیلن، باعث جلوگیری از آب انداختگی بتن شده و از انتقال آب به سطح بتن جلوگیری می کند که نتیجه آن همگن شدن بتن و یکسان سازی نسبت آب به سیمان در تمام بتن و تداوم عمل هیدراتاسیون می باشد. این الیاف نفوذپذیری سطح بتن را کاهش داده و موجب افزایش مقاومت سایشی بتن می شود و لذا سطح بتن دچار خردشدگی و ورقه شدن نمی گردد.

کاهش ترک خوردگی در سنین اولیه بتن و جلوگیری از آب انداختگی آن به معنی جلوگیری از ایجاد نقاط ضعف در بتن بوده و بعد از سخت شدن بتن، جلوی جمع شدگی آن را می گیرد و از ایجاد ترک های حرارتی به میزان بسیار زیادی جلوگیری می کند (جایگزین مناسبی برای میلگرد حرارتی). همچنین از نفوذپذیری بتن کاسته شده و نفوذ عوامل خوردنده به داخل بتن کمتر شده و دوام بتن افزایش میابد.

بتن الیافی دارای شکل پذیری بسیار زیادی میباشد حتی بعد از رسیدن به مقاومت نهایی هرگز خرد نمیشود. با توجه به تاکید زیاد متخصصان امر بر شکل پذیری اعضا بویژه در مناطق زلزله خیز که باعث کاهش خسارات و تلفات می شود، استفاده از بتن الیافی در ساخت و ساز بسیار مناسب می باشد. [۲۹]

در یک دسته بندی کلی میتوان نسلهای مختلف بین الباقی را به لحاظ کاربرد به صورت زیر دسته بندی نمود:

- بتن های الیافی با الیاف کم حجم الیاف کمتر از ۱٪ که جهت کاهش میزان جمع شدگی در بتن استفاده میشود.

- متن های الیافی با الیاف متوسط (حجم الیاف کمتر از ۱٪ تا ۲٪) که هدف افزودن الیاف اصلاح خواص سازه ای نظیر برش، عرض ترک و رقار خمشی میباشد که این نوع بتن بیشتر در کف های صنعتی بکار میرود.

- بتن های الیافی توانمند (HRFR) که از نسلهای پیشرفته بتن الیافی بشمار می آیند حجم الیاف در این دسته از بتن ها از ۲٪ تا ۲۰٪ متفاوت بوده و دارای انواع مختلف میباشد. [۳۰، ۳۱]

۲-۳-۳- موارد استفاده و محدودیت های کاربردی

هر فن آوری همواره کاربردها و محدودیت های خاص خود را دارد. بتن الیافی خواص مناسبی همچون شکل پذیری بالا، مقاومت فوق العاده، قابلیت جذب انرژی و پایداری در برابر ترک خوردن را دارا می باشد که متناسب با آنها می توان موارد کاربرد فراوانی برای آن بافت بطور مثال در ساخت کف سالنهای صنعتی، می توان از این نوع بتن به جای بتن آرماتوری متداول سود جست. این نوع بتن از بهترین مصالح مورد استفاده در ساخت بناهای مقاوم در برابر ضربه، همچون سازه پناهگاه ها و انبارهای نگهداری مواد منفجره به شمار میرود و بناهای شکل گرفته از بتن، قابلیت فوق العاده ای در جذب انرژی ضربه دارد. همچنین در ساخت باند فرودگاه ها به خوبی می توان از این نوع بتن کمک گرفت. موارد دیگری از بکارگیری این بتن، ساخت قطعات پیش ساخته ساختمانی همچون پانل ها و پاشش بتن روی سطح انحنای یک سازه می باشد. علاوه بر موارد یاد شده می توان از مزایایی همچون عایق بودن سازه در برابر صدا و سرعت بالای اجرا نیز بهره مند گردید.

اما از آنجا که نحوه قرار گرفتن الیاف داخل بتن، کاملاً تصادفی می باشد، از این بتن معمولاً نمی توان به نحو مطلوبی در ساخت تیرها و ستونها بهره گرفت و در این نوع سازه ها استفاده از روش سنتی و شبکه بندی

فولادی به صرفه تر و مناسب تر می باشد. لازم است به این نکته توجه شود که ناکارآمدی یک تکنولوژی جدید، نباید مانع نادیده گرفتن کاربردهای مناسب و نقاط قوت آن گردد [۳۲].

۲-۳-۴- توجیه اقتصادی بتن الیافی

باید اعتراف کرد که استفاده از بتن الیافی در همه موارد از بتن سنتی به صرفه تر نمی باشد. اما بر اساس برآوردهایی که توسط بعضی از متخصصین کشور انجام گرفته است، در جاهایی که سرعت اجرای بالا مدنظر است و یا نیاز به پاشش بتن (شات کریت) روی سطوح ویژه ای است، استفاده از این نوع بتن توصیه می گردد.

۲-۴- انواع الیاف

۲-۴-۱- الیاف گیاهی

به الیاف گیاهی و در بعضی موارد موی اسب و بز اصطلاحاً الیاف طبیعی اطلاق می شود. از الیاف گیاهی به غیر از بقیه و کتان و امثال آن در کشورهای آسیایی نور و بویژه هند و برزیل در بتن استفاده می شود. از جمله این الیاف میتوان به الیاف جنایی (Jute) سیسال (Sisal) پوسته نارگیل (Coir) تفاله نیشکر (Bagasse) کتان (Flax) و ... اشاره کرد. قابلیت بهبود رفتار بتن توسط این الیاف به طول، شکل ظاهری و مقاومت کششی الیاف بستگی دارد. اگر چه از این گونه الیاف به ویژه در مناطق روستایی استفاده عمده به عمل می آید، لیکن مقاومت کششی آنها در مقایسه با دیگر انواع الیاف (مصنوعی و فلزی) پائین است. قالب هایی که الیاف گیاهی در دو طرف ترک جهت جلوگیری از شکست کششی بتن میزنند مستحکم نبوده و با پارگی لیف یا بیرون کشیده شدن آن از درون ملات بتن شکست در سازه بتن ایجاد می گردد. از الیاف برگ نخل

نیز می توان برای بهبود رفتار ملات سود جست. به طور کلی با توجه به اینکه الیاف گیاهی در تماس با رطوبت پایداری حجمی ندارند، لذا لازم است تا قبل از استفاده از هر گونه الیاف گیاهی در ملات و بتن ، قابلیت جذب آب الیاف با اندود موادی از جمله سیمان روی سطح آنها محدود گردد. خصوصیات مربوط به برخی از الیاف در جدول ۴-۱ آورده شده است. [۳۳]

۲-۴-۲- الیاف مصنوعی

در اوایل قرن بیستم با شکوفایی صنعت پتروشیمی ، ساخت انواع مختلف الیاف مصنوعی آغاز شد . برخی از این الیاف در صنایع مختلف از جمله بارجه باقی (شامل تروریرا ، نایلن و کولار در ساخت جلیقه ضد گلوله) و نیز جهت مسلح کردن و مقاوم نمودن برخی قطعات در صنایع اتومبیل و هواپیماسازی استفاده میشود. همچنین در مقاوم نمودن کاغذهای کافت از این گونه الیاف استفاده میشود . از دیگر محصولات صنعت پتروشیمی الیاف کربن و بلی پروپیلین میباشد که از الیاف کربن عمدتا در کشور کانادا ، ژاپن و آمریکا و از الیاف پلی پروپیلن در کشورهای مختلف استفاده میشود. از الیاف مصنوعی با مقاومت بالا نیز به همراه یک رزین به هم چسبیده برای ساخت آرماتورهای پلاستیکی با الیاف (FRP) استفاده به عمل می آید . در ساخت بتن از الیاف شیشه که به طور دسته ای (هر دسته از چند صد رشته تشکیل شده است) می باشد ، استفاده زیادی می شود. استفاده از الیاف شیشه در زاین بیش از هر کشور دیگری است تردی شیشه ، روش خاص و دقیقی را جهت ساخت و تراکم مخلوط بتن می طلبد. از الیاف آزیست ، بتن سیمان آزیست با نرمی مناسب تهیه میشود که در ساخت لوله ها و سقف با دهانه کم و غیره استفاده میشود . اگر چه از تولیدات سیمان آزیست در گذشته استفاده می شده است، لیکن به علت خطرات ناشی از استنشاق الیاف آزیست ، به طور سریعی با دیگر کامپوزیت های پایه سیمان جایگزین شده اند. [۳۳]

۲-۴-۲-۱- الیاف شیشه

یکی از الیاف مورد استفاده در بتن الیاف شیشه میباشد. این الیاف تولید شده از مذاب شیشه بصورت رشته های بهم پیوسته ای که معمولاً برای مسلح کردن بافته ها بکار می روند. مطالعات نشان داده است که چنانچه الیاف شیشه به همراه یک ماده افزودنی پوزولانی نظیر دوده سیلیسی استفاده شود، در طول زمان خوردگی قابل ملاحظه ای در آن رخ نمیدهد. اضافه کردن الیاف شیشه در بتن به شدت بر کارایی بتن تاثیر می گذارد. این الیاف یکی از مهمترین و پرمصرفترین تقویت کننده ها در مواد اولیه کامپوزیتها در سراسر جهان است و اکثر کامپوزیتهای پلیمری از ترکیب رزینهای گرما دیده به الیاف شیشه تهیه میشود. کاربرد عمده الیاف شیشه در صنعت کامپوزیتها و تولید محصولات فایبر گلاس میباشد. ماده اصلی در تولید الیاف شیشه ماسه سیلیس است که بیش از نصف ماده اولیه را تشکیل می دهد و سایر اجزاء ترکیبات شیمیایی میباشد. این مواد ابتدا با هم مخلوط می شوند و سپس وارد کوره میشوند، در مرحله بعد مذاب حاصله بر روی سینیهای از جنس پلاتین جریان پیدا کرده و از روزنه های بسیار ریزی خارج شده و تا قطر معین نازکمی شود. سپس این تارها توسط آب یا هوا خنک شده و در انتها توسط ماده ای خاص آهار زنی می شود. اضافه کردن الیاف شیشه به بتن به شدت بر کاهش کارایی بتن تازه تاثیر می گذارد، بنابراین باید از روانسازهای مناسب استفاده کرد و شیوه درست اختلاط را نیز بدست آورد.

۲-۴-۲-۱-۱- انواع الیاف شیشه

ترکیبات شیمیایی این الیاف با هم متفاوت است و هر کدام برای کاربرد خاصی مناسب است. تقریباً ۸۵ درصد الیاف مورد استفاده در کامپوزیتهای مهندسی الیاف شیشه می باشد. الیاف شیشه استحکام و سختی مناسبی دارد، خواص مکانیکی خود را در دماهای بالا حفظ می کند، مقاومت رطوبت و خوردگی مناسبی دارد و

نسبتاً ارزان است. [۳۴] تقسیم بندی شش نوع الیاف شیشه و ترکیب درصدهای آن در زیر نشان داده شده است:

- مصارف عمومی glass- E
- خواص مکانیکی بالاتر glass- R
- خواص مکانیکی بالاتر glass-S
- مقاومت شیمیایی مناسب glass-c
- مقاومت اسید و باز خوب glass-ECR
- مقاومت اسید و باز خوب glass-AR

۲-۴-۲-۱-۲- کاربرد الیاف شیشه

- استفاده در بتن برای بتن های مقاوم و بتن پاششی
- استفاده در دیوارهای گچی و پلاستر گچی
- استفاده در پانلهای سیمانی و قطعات بتنی پیش ساخته
- استفاده در ملات سیمانی در ترمیم سطوح سیمانی و درزگیری
- استفاده در بتن جهت کفسازی ها و سقف
- استفاده در بتن ریزی اپرون ، رامپ و غیره.....
- استفاده جهت تهیه گوت های آماده با مقاومت فشاری بالا

۲-۴-۲-۱-۳- مزیت الیاف شیشه در بتن

- دوام بیشتر بتن

- افزایش مقاومت خمشی و کششی
- افزایش مقاومت در برابر نفوذ آب
- کاهش انقباض
- تقلیل ترکهای سطحی و موئی
- افزایش مقاومت سایش
- افزایش مقاومت بتن در برابر لرزش و تنش

۲-۴-۲-۱-۴- نحوه استفاده الیاف شیشه

در مصرف جهت جلوگیری از عدم پخش شدن و گره خوردن بهتر است الیاف در فواصل زمانی به میکسر اضافه شود تا حداکثر کیفیت را به قطعه بتنی بدهد. همانگونه که مطلع هستید در اختلاط بتن مواد از ریز دانه به درشت دانه به میکسر اضافه می گردد. بنابراین بهتر است زمان برای اختلاط الیاف طبق مراحل زیر صورت گیرد:

آب - سیمان - الیاف - ماسه و سپس شن به میکسر اضافه گردد با انجام مراحل زیر پخش شدن الیاف به بهترین نحو انجام می گیرد. زمان میکس لازم برای الیاف حدود ۵ دقیقه می باشد.

۲-۴-۲-۱-۵- فرآیند تولید الیاف شیشه

- آماده سازی مواد خام: بیش از نیمی از مواد اولیه مورد استفاده ماسه سیلیس است و قسمت اصلی هر نوع الیاف شیشه را تشکیل می دهد. سایر اجزاء شامل مقادیر ناچیز سایر ترکیبات شیمیایی می باشند.

- بخش اختلاط **Batch House**: در اینجا مواد با هم مخلوط شده برای قسمت کوره آماده می شوند. اصطلاحاً به این توده مخلوط **Batch**، گفته می شود.
- کوره: دمای کوره به اندازه کافی زیاد است تا ماسه و سایر اجزاء را ذوب کند و بصورت شیشه مذاب درآورد. سطح داخلی کوره با آجرهای مخصوصی ساخته شده است که در دوره های زمانی مشخص تعویض می شوند.
- بخش **Bushing**: شیشه مذاب روی سینی های پلاتینی مقاوم حرارتی متعدد، جریان پیدا می کند. در این سینی ها هزاران روزنه وجود دارد که بوشینگ نامیده می شوند.
- تشکیل الیاف: جریان شیشه مذاب از درون بوشینگ ها بیرون کشیده می شود و تا قطر معین نازک می شوند، سپس توسط آب یا هوا خنک می شوند تا الیاف تشکیل شوند.
- آهار زنی: الیاف مو مانند، با یک مخلوط شیمیایی مایع که **Sizing** نامیده می شود، پوشش داده می شوند. آهار زنی به دو علت اصلی انجام می شود:
 - الف) برای محفوظ ماندن الیاف از سایش به یکدیگر در طی فرآیند ساخت و کار
 - ب) به منظور حصول اطمینان از چسبندگی الیاف به رزین

۲ - ۴ - ۳ - الیاف فلزی

الیاف فلزی مورد استفاده در بتن عمدتاً از جنس فولاد و در برخی موارد از جنس مس می باشند. الیاف فولادی برای اولین بار در کشور آمریکا و در سال ۱۳۶۲ توسط رومالدی به ثبت رسید. اگر چه الیاف شیشه ، کربن ، پلی پروپیلین کاربردهای فراوانی دارند لیکن بیشترین کاربرد را الیاف فولادی نسبت به سایر الیاف دارند. این به سه دلیل است : اول اینکه الیاف فولادی بالا ترین افزایش را در مقاومت و شکل پذیری بتن را

ایجاد میکنند. دوم اینکه به شکل ظاهری گوناگون جهت بهبود رفتار بتن قابل ساخت هستند و سوم اینکه اختلاط آنها با دیگر مواد بتن به سهولت انجام پذیر است و این الیاف به اشکال مختلف جهت ایجاد پیوند بهینه بین الیاف و ملات بتن ساخته می شود. این الیاف با مقاومت کششی نسبتاً بالا در شکل های مختلف به صورتهای مستقیم و مستقیم قلابدار، مستقیم دم پهن، دندانهای، با انتهای برآمده، پیچیده قلابدار، و پا مقطع متغیر تولید میشود. سطح مقطع آنها معمولاً گرد، مستطیل، نیم گرد، بی قانده و یا متغیر می باشد.

[۳۳]

برای بیان هندسه آنها از یک مقدار علی به نام قسیت طول به قطر **Aspect Ratio** که عبارت است از نسبت طول الیاف به قطر معادل مقطع استفاده میشود. این نسبت لازم است دارای مقدار معینی باشد تا اینکه نرمی بهینه ای با حفظ مقاومت کششی در بتن به وجود آورد. محدودیت های مربوط به نسبت طول به قطر در مورد کلیه الیاف باید در نظر گرفته شود. نسبت طول به قطر بهینه در اکثر الیاف حدود ۵۰ الی ۱۰۰ است.

۲-۴-۳-۱- الیاف فولادی

۲-۴-۳-۱- تاریخچه

Joseph Lambot در سال 1847 پیشنهاد کرد که با اضافه کردن الیاف پیوسته به شکل سیم به بتن یک ماده ساختمانی جدیدی می توان تولید کرد [۳۵].

در سال 1939 Zitkevic یک روش برای بهبود رفتار بتن مسلح یافت. او از الیافهای سیم آهنی که به الیاف فولادی مورد استفاده در بتن امروزی بسیار شبیه بود تقریباً به طول ۱۰۰ میلی متر و قطر ۱ میلی متر استفاده کرد و نتیجه گرفت که مقاومتهای فشاری، کششی و برشی افزایش می یابند [۳۵].

از اوایل دهه 1960 تا کنون تحقیقات متعددی در زمینه بتن مسلح به الیاف فولادی صورت گرفته است.

L A Qureshi و همکاران خواص بتن با مقاومت بالا را با افزودن الیاف فولادی بررسی کردند. نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش الیاف فولادی، مقاومت کششی به صورت خطی افزایش می یابد و سرعت افزایش در 7 روز اول بیشتر می باشد. [۳۵]

M N Hadi آزمایشی را جهت مقایسه رفتار دال بتنی مسلح با استفاده از الیاف فولادی و پلی پروپیلن انجام داد. نتایج آزمایش نشان می دهد که افزایش 1% حجمی الیاف فولادی بهترین تاثیر را در شکل پذیری دالها دارد. [۳۶]

۲-۴-۱-۲- انواع الیاف فولادی و ویژگیهای آنها

الیاف فولادی دارای شکل و قطرهای گوناگونی بوده و نحوه ساخت آنها نیز متفاوت است. الیاف فولادی که در حال حاضر در بازارهای جهانی موجود است، عمدتاً بر اساس چهار روش زیر تولید می شوند:

- کشیدن و بریدن سیمهای فولادی (الیاف سیمی) با سطح مقطع دایره ای
- نورد و برش ورق های فولادی (الیاف برشی) با سطح مقطع مستطیلی
- با استفاده از مواد مذاب (الیاف ریخته گری) با سطح مقطع هلالی
- تراشیدن سطح ورقهای فولادی (الیاف ماشینی) با سطح مقطع هلالی، مثلثی یا تاب خورده

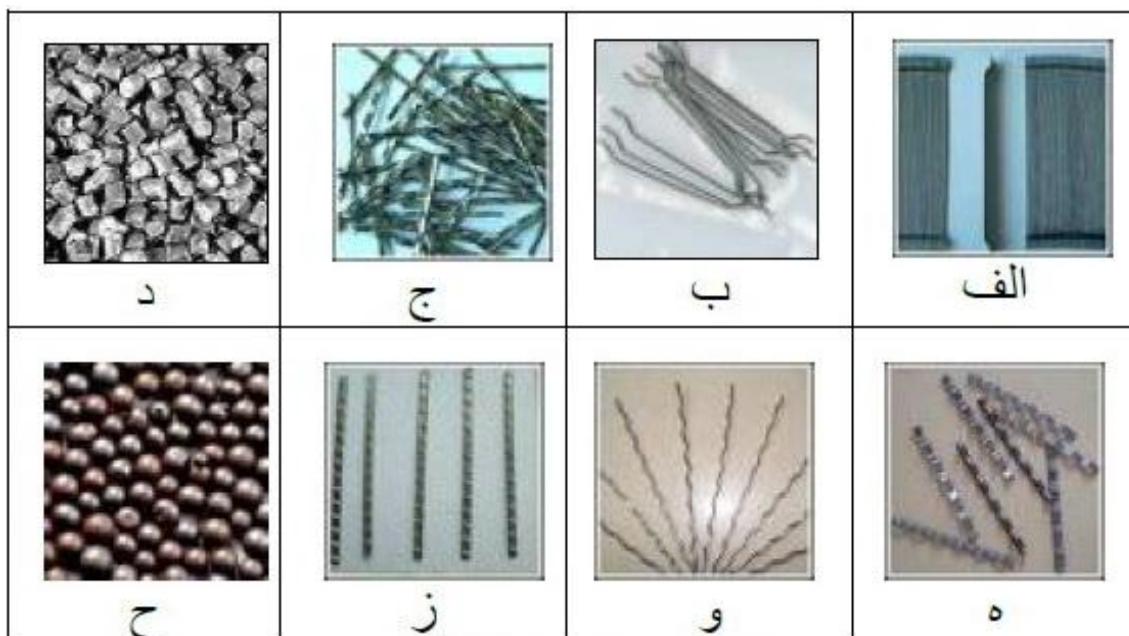
همچنین با توجه به شکل پذیری فولاد، به راحتی می توان گیرداری الیاف را در بتن تأمین کرد. به همین منظور می توان شکلهای مختلف از قبیل انتهای خمیده، انتهای قلابدار، دم پهن، موجدار، خورده تراشه نامنظم و... را تولید کرد [۳۷].

مهمترین شرکتهای تولید کننده الیاف فولادی در جهان عبارتند از: شرکتهای درامیکس، ویراند، هارکس و فایبرکان به ترتیب، به کشورهای بلژیک، ایتالیا، آلمان و آمریکا تعلق دارند. برای روشن شدن تأثیر شکل الیاف

فولادی بر روی مقاومتهای مکانیکی بتن الیاف دار، کومولوس تحقیقاتی بر روی انواع الیاف فولادی انجام

داد که مشخصات ۴ نوع از آنها عبارتند از:

- الیاف با انتهای قلاب دار، طول ۵۰ میلیمتر و قطر ۰,۴ میلیمتر.
- الیاف موجدار با طول ۲۵ میلیمتر و قطر ۰,۲۵ میلیمتر
- الیاف صاف با مقطع گرد، طول ۳۰ میلیمتر و قطر ۰,۳ میلیمتر.
- الیاف صاف با مقطع گرد، طول ۲۰ میلیمتر و قطر ۰,۲ میلیمتر



شکل ۲-۲۱- انواع الیاف فولادی [۳۷]

ردیف	نام	توضیحات	توصیه مقدار مصرف
الف	چسبی	پس از اختلاط چسبها در آب حل شده و بطور مساوی توزیع میشود.	$15-20kg/m^3$
ب	قلاب دار تك	l/d بیشتر باعث پدیده تراکم میشود	$15-20kg/m^3$
ج	چین چین موجدار	دارای درجه بالایی از پراکندگی میباشد و به آسانی مخلوط میگردد.	$35-40kg/m^3$
د-ح	شات فولاد	برای بتن شات قابل کاربرد است.	$20-30kg/m^3$
ه	مواج تسمه ای	برای آسفالت بتنی عرشه پل استفاده میشود.	$30-40kg/m^3$
و	مواج لوله ای	دارای استحکام کششی بالا میباشد.	$20-25kg/m^3$
ز	کبریتی	تولید آن مثل فولاد نورد سرد میباشد.	$20-25kg/m^3$

۲-۴-۳-۱-۳- خواص بتن مسلح به الیاف فولادی

۲-۴-۳-۱-۳- مقاومت استاتیکی

الیاف فولادی، مقاومت خمشی نخستین ترک بتون الیافی را تا چندین برابر مقاومت نخستین ترک بتون معمولی افزایش می دهد. اضافه کردن الیاف به بتون علاوه بر اینکه از نظر افزایش مقاومت های استاتیکی بتون مؤثر است، در ایزوتروپی و همگنی جسم بتون نیز تأثیر بسزائی دارد. تأثیر الیاف فولادی در مقاومت استاتیکی بتن شامل مقاومت خمشی، فشاری، برشی و شکافتگی می باشد که هر کدام از این مقاومت ها در بخش های بعدی شرح داده خواهد شد.

۲-۴-۳-۱-۳-۲- مقاومت خمشی

خاصیت مهم بتن الیافی مقاومت خمشی زیاد و مقاومت در مقابل ترک خوردگی است که این خاصیت راه حل مناسبی برای کاهش خاصیت تردی و شکنندگی بتن خالص است .

۲-۴-۳-۱-۳-۳- مقاومت برشی

الیاف فولادی می تواند جایگزین خاموت ها در تیرهای بتونی شود ، بدون اینکه در ظرفیت نهائی برشی ، کاهش به وجود آید . الیاف فولادی علاوه بر اینکه مقاومت برشی بتن را افزایش بتون را افزایش می دهد ، تیرهای بتون آرمه را در مقابل گسیختگی ناگهانی در ناحیه کششی تقویت می کند . این مزیت عمده الیاف فولادی در افزایش مقاومت برشی بتن است که باعث می شود از کاربرد خاموت بعنوان آرماتور برشی صرف نظر گردد.

۲-۴-۳-۱-۳-۴- مقاومت پیچشی

در رابطه با مقاومت پیچشی الیافی تحقیقات خاصی صورت نگرفته است . در یک مورد خاص بررسی هایی که توسط شرکت Bekaert در بلژیک انجام یافته مقاومت پیچشی بتن الیافی را ۱/۵ تا ۲ برابر بتن خالص ذکر کرده است .

۲-۴-۳-۱-۳-۵- مقاومت ترک خوردگی

الیاف نه تنها بر روی مقاومت بتن خالص تأثیر بسیار مثبتی دارد بلکه بعنوان یک عامل باز دارنده ترک نیز عمل می کند. بدین معنی که با شروع ترک خوردگی، الیاف نقش خود را در دوختن ترک و محدود کردن اندازه ترک بازی کرده و از ادامه ترک خوردگی حتی با ادامه بارگذاری جلوگیری بعمل می آورد.

۲-۴-۳-۱-۳-۶- پوسیدگی و زنگ زدگی الیاف فولادی

مطالعات اخیر نشان می دهد که اثر خوردگی و پوسیدگی آب شور روی ملات سیمانی (سیمان پرتلند) مسلح به ۲ درصد حجمی الیاف فولادی ناچیز بوده است، بطوریکه بعد از ۹۰ روز قرار گرفتن در داخل و خارج آب نمک اشباع شده، هیچ تغییری در مقاومت خمشی بتن الیافی مشاهده نگردید.

مقاومت فشاری یک ملات الیاف دار که بطور مداوم و به مدت ۱۰ سال در آب دریا غوطه ور بوده است از ۵۸۲ کیلوگرم بر سانتی متر مربع کاهش یافت که این کاهش در حدود ۴۹۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به ۱۵ درصد است، این در حالیست که تحت همان شرایط، مقاومت ملات ۴۰ درصد کاهش یافته بود.

مقاومت خمشی ملات الیاف دار نیز بعد از ۱۰ سال ۳۰ درصد تنزل کرده و به مقدار ۱۰۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع رسیده بود.

۲-۴-۳-۱-۳-۷- قابلیت هدایت حرارتی

الیاف فولادی ضریب هدایت حرارتی بتن را ۲۵ تا ۵۰ درصد افزایش می دهند. همچنین این الیاف باعث افزایش مقاومت بتن در تغییرات ناگهانی و زیاد درجه حرارت می شود.

۲-۴-۳-۱-۴- مکانیزم عملکرد الیاف در بتن

بطور کلی برای کاربرد در سازه الیاف فولادی می توانند نقش مکملی برای میلگرد داشته باشند. الیاف فولادی با بخش ترکها مقابله می کنند و مقاومت بتن را در برابر خستگی ضربه جمع شدگی و تنشهای حرارتی افزایش می دهند. الیاف فولادی میتوانند در همه مدهای شکست روی خواص مکانیکی بتن تاثیر بگذارند. مکانیزم تقویت را می توان بصورت زیر توجیه کرد:

تلتهای بوسیله برش محیطی و در صورتیکه رویه الیاف آجدار باشد بوسیله مقاومت چسبندگی (درون سطحی از ماتریس به الیاف منتقل می شود. بنابراین مادامی که ماتریس بتن ترک نخورده است، نقش کششی بین الیاف و ماتریس تقسیم می شود پس از ایجاد ترک، همه نقش به الیاف انتقال می یابد

مهمترین متغیرهایی که بر خواص بتن با الیاف فولادی اثر می گذارند عبارتند از:

خواص ماتریس بتن ، بازدهی الیاف و مقدار الیاف، بازدهی الیاف بوسیله مقاومت الباف در برابر بیرون کشیده شدن از مخلوط کنترل می شود این مقاومت به چسبندگی بین الیاف و ماتریس بستگی دارد . برای الیاف با مقطع نایت این مقاومت با افزایش طول ، افزایش می یابد. بنابراین هر قدر طول بیشتر باشد اگر آنها در بهبود خواص ماتریس بیشتر خواهد بود چون مقاومت در برابر بیرون کشیده شدن متناسب با سطح مقطع دو جسم میباشد. [۳۵]

معمولا الیاف با سطح مقطع گرد و قطر کوچک بیشتر از الیاف با سطح مقطع گرد و قطر بزرگتر بازدهی دارند. این امر به این خاطر است که الیاف دسته اول سطح بیشتری در واحد حجم دارا میباشد بنابراین هر چه سطح تماس الیاف بیشتر باشد (قطر آنها کوچکتر باشد) بازده چسبندگی آنها بیشتر خواهد بود بنابراین روشن می شود که نسبت طول به قطر الیاف باید به اندازه ای بزرگ باشد که در هنگام شکست ماتریس ، الیاف به حداکثر مقاومت کششی خود نزدیک باشند، با این وجود در عمل این کار معمولا ممکن نیست .

بسیاری از محققین نشان داده اند در صورتیکه از روشهای عادی اختلاط استفاده شود الیاف با نسبت طول به قطر بیشتر از ۱۰۰ باعث کم شدن کارایی بتن به مقدار قابل ملاحظه ای می شوند و یا بطور ناهمگون در بتن توزیع می گردند.[38]

۲-۴-۳-۱-۵- نحوه ساخت الیاف فولادی

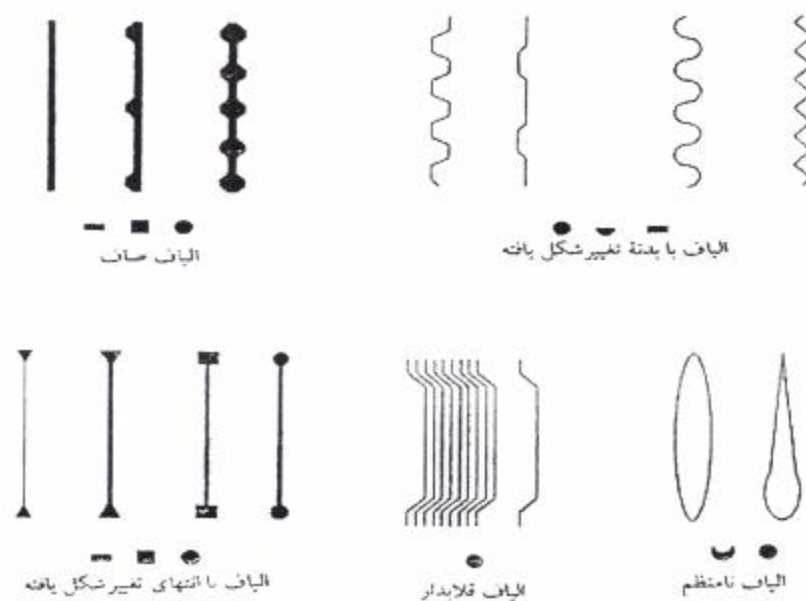
الیاف فولادی دارای شکل و قطرهای متفاوتی بوده و نحوه ساخت آنها نیز متفاوت میباشد. الیاف فولادی که در حال حاضر در بازارهای جهانی موجود میباشد، عمدتاً بر اساس چهار روش زیر تولید میشود

- کشیدن و بریدن سیمهای فولادی الیاف سیمی
 - نورد و برش ورقهای فولادی - الیاف برشی با نواری
 - با استفاده از مواد مذاب - الیاف ریخته گری
 - تراشیدن سطح ورقهای فولادی با استفاده از دستگاه صفحه تراش - الیاف ماشینی [۳۹]
- ۴-۴- ویژگیهای عمومی الیاف از جمله مهمترین خصوصیات عمومی الیاف شکل و اندازه و نسبت ظاهری الیاف است.

۲-۴-۳-۱-۶- نسبت ظاهری الیاف

یکی از ویژگی های مهم الباف که تاثیر بسزایی در افزایش مقاومت ماتریس دارد نسبت ظاهری یا نسبت طول به قطر معادل آن است هنگامی که الیاف درون ماتریس زیر بار قرار می گیرند ممکن است به یکی از دو طریق زیر گسیخته شوند اگر الیاف طولی کمتر از طول بحرانی داشته باشند، به دلیل از دست دادن خاصیت پیوستگی از ماتریس جدا می شوند. چنانچه طول الیاف از طول بحرانی بزرگتر باشد، الیاف گسیخته میشود

برای حالتی که طول الیاف کوچکتر از طول بحرانی باشد تنش های کششی الیافه و مقاومت برشی حاصل از تعادل نیروهای برشی بین سطوح مختلف، بدین صورت است چنانچه این رابطه نشان میدهد نقش مقاوم الیاف و در نتیجه میزان مقاومت پذیری آن، رابطه مستقیمی با نسبت ظاهری از دید اوریک دارد. معمولاً نسبت ظاهری برای الیاف به طول معادل $150\text{mm} - 30$ است.



شکل ۲-۲۲- اشکال مختلف الیاف [۳۹]

رفتار سختی بتن مسلح شده به الیاق بر روی چهار نوع الیاف را مورد بررسی (Wel Ling) قرار داده است. الیاف بکار رفته (سیم آهنی، الیاف فولادی، الیاف کتفی و شیشه ای می باشند. نمونه های بتن مسلح به الیاف با استفاده از چهار نوع نسبت آب به سیمان (w/c) و پنج نوع نسبت الیاف به سیمان (f/c) تهیه شده اند مشاهده شده است که بهترین رفتار سختی نمونه ها مربوط به الیاف فولادی میباشد و سپس به ترتیب سیم آهنی، الیاف شیشه ای و الیاف کتفی، سختی و اندیس با افزایش مقدار الیاف افزایش می یابند.

با افزایش (w/c) مقدار سختی کاهش می یابد. بهترین طرز مسلح کردن (موثرترین) استفاده از طول الیاف باید بین ۲۰ تا ۵۰ میلی متر باشد و بهترین درصد الیاف که $dl/1=100$ نسبت فولادی ۱-۲٪ حجمی

میباشد. [۴۰]

۲-۴-۳-۱-۷- ضریب ارتجاعی الیاف

در ترکیب های تحت بار هر اندازه که ضریب ارتجاعی الیاف بیشتر باشد تنشی که ترکیب با ماتریس های سیمانی مانند ملات با بتن تحمل میکند بیشتر است. این امر در صورتی امکان پذیر است که بین الیاف و ماتریس پیوستگی وجود داشته باشد. میزان ضریب ارتجاعی الباف عامل مهمی برای مقایسه و تشخیص مزایای آنها نسبت به هم میباشد. [۴۱]

۲-۴-۳-۱-۸- پیوستگی الیاف به ماتریس

توانایی پیوستگی الیاف با ماتریس یکی از مهمترین عوامل موثر در خاصیت مقاومت دهی الیاف است میزان انتقال نیرو از ماتریس به الیاف بستگی به تنش بین آنها دارد. شیوه پیوستگی الیاف به ماتریس شامل چسبندگی، اصطکاک و درگیری مکانیکی مشابه آرماتور فولادی در بتن مسلح است. عوامل مهم موثر در این پیوستگی عبارتند از:

- تجمع مواد بین سطوح مشترک

نتایج تحقیقات به عمل آمده نشان میدهد که بین سطوح مشترک سیمان هیدراته و الیاف مختلف (مانند الیاف فولادی، کربن، پلی پروپیلن) هیدروکسید کلسیم تجمع می یابد و به واسطه آن، مقاومت بتن در این نواحی کاهش می یابد.

- بافت سطحی و شکل الیاف

از روش های فیزیکی و شیمیایی می توان برای افزایش پیوستگی الیاف و ماتریس و در نتیجه افزایش مقاومت پذیری استفاده کرد به کار بردن روش های فیزیکی مانند خم کردن، زبر کردن سطوح، قلاب کردن انتهای

الیاف، موجودار کردن آنها و روشهای شیمیایی مانند ایجاد پوشش اپوکسی بر روی الیاف فولادی، مقاومتهای فشاری و کششی بتن الیافی را افزایش می دهد. [۴۲]

۲-۴-۳-۱-۹- ضریب پواسون الیاف

اختلاف بین ضریب پواسون ماتریس و الیاف، تنش های عمود بر سطح یبوند ایجاد می کند. اگر این تنش ها عمود بر سطح کششی باشند به مفهوم این است که ضریب پواسون الیاف از ماتریس بزرگتر است و در نتیجه الیاف تمایل به جدا شدن از ماتریس دارند. این عامل تاثیر نامطلوبی روی پیوستگی دارد. اگر این تنش های عمود بر سطح فشاری باشند، ضریب پواسون الیاف کمتر از ماتریس بوده و نهایتاً پیوستگی اصطکاکی بیشتر بوده و کلا پیوستگی افزایش می یابد. [۴۳]

۲-۴-۳-۱-۱۰- خاصیت ارتجاعی

اگر الیاف خاصیت ارتجاعی اندک داشته باشند و خصوصیتی مانند خزش تحت بار از خود نشان میدهند، مقاومت دهی آنها با زمان کاسته می شود. این مساله برای الیاف پلی پروپیلن محسوس تر است. [۴۴]

۲-۴-۳-۱-۱۱- کرنش پذیری الیاف

کرنش نهایی الیاف مصرفی در بتن، باید بیشتر کرنش ترک خوردگی ماتریس باند و از آنجا که معمولاً ماتریس های سیمانی شکننده اند، این موضوع برای اکثر الیاف صدق میکند. هنگامی که ماتریس تحت بار قرار می گیرد الیاف درون آن سبب می شوند که ابتدا سرعت گسترش ترکها آهسته باشد و با افزایش میزان بار مقدار ترکها به تدریج زیاد شود. از طرفی چون الیاف قادرند تنش در یک مقطع ترک خورده را منتقل سازند بنابراین

قسمتهای ترک خورده نیز در مقابل بار از خود مقاومت نشان میدهند و در نتیجه می توانند نسبت به ماتریس تقویت نشده از خود تغییر شکل بیشتری نشان دهند.

این کمیت تابع عواملی مثل نسبت حجم الیاف به ماتریس و مقاومت در مقابل بیرون کشیده شدن است که خود با نسبت ظاهری الیاف رابطه ای نزدیک دارد. در مواردی که بار گذاری از نوع ضربه ای است در صورت وجود الیاف مقاومت ضربه ای به مقدار زیادی افزایش می یابد. لازم به توضیح است الیافی که ضرب ارتجاعی کمی دارند و مقاومت ماتریس را افزایش نمی دهند می توانند سبب افزایش مقاومت ضربه ای و طاقت ماتریس گردند که دلیل اصلی آن کاهش تاثیر رفتار ویسکوالاستیک بر اثر گذشت زمان در بارگذاری سریع میباشد برای مثال ضریب ارتجاعی پلی پروپیلن هنگام بارگذاری ضربه ای، ۲ تا ۳ برابر ضریب ارتجاعی آن در هنگام بارگذاری تدریجی است در بارگذاری مکرر و دوره ای به علت وجود الیاف، گسترش و افزایش ترکها بسیار محدود شده و رفتار خستگی ترکیبها به مراتب بهتر از ماتریس های تقویت نشده است

یکی از مزایای استفاده از الیاف کاهش در میزان و سرعت بخش و گسترش ترکها هنگام بارگذاری انفجاری (که خود نظیر بارگذاری ضربه ای است می باشد). [۴۵]

۲ - ۴ - ۳ - ۱ - ۱۲ - حجم بحرانی الیاف

حجم بحرانی الیاف در ترکیبات سیمانی، حداقل حجمی از الیاف است که بعد از ترک خوردگی ماتریس، نیروی معادل تحمل شده توسط ترکیب قبل از ترک خوردن را تحمل میکند. حجم بحرانی الیاف در بتن با الیاف فولادی شیشه ای و پلی پروپیلن به ترتیب ۰,۳۱، ۰,۴۵ و ۰,۷۵ درصد خواهد بود

J . RL . bing و همکارانش تحقیقاتی را بر روی بتن مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن انجام دادند. در این تحقیق تاثیر الیاف و طول آن در موقع ترک خوردن بتن و مقاومت آن مورد بررسی قرار دادند که نتایج حاصله بدین صورت می باشد خواص بتن مسلح به الیاف در حالت ترک خورده فقط بستگی به خواص مکانیکی

الیاف مسلح کننده و مقدار درگیریشان در ترکیب دارد. مقاومت در برابر گسیختگی وقتی به بیشترین مقدار خود می رسد که طول الیاف مسلح کننده مساوی طول بحرانی آنها باشد. اضافه کردن میکرو سیلیس یا اکریلیک اسید به ترکیب سیمان باعث افزایش زبری داخلی آن برای ایجاد درگیری بیشتر میشود. [۴۶]

۲-۴-۳-۱-۱۳- شیوه قرار گرفتن و توزیع الیاف در ماتریس

شیوه قرار گرفتن الیاف در محور ترک در انتقال نیرو به سطح ترک موثر است. الیافی که موازی ترک باشند به انتقال نیرو کمک نمی کنند اما الیافی که عمود بر محور ترک قرار گرفته باشند حداکثر تاثیر را دارند میزان بازده تقویت ماتریس توسط الیاف به تعداد جهات تلاقی آنها در واحد سطح بستگی دارد که میزان این بازده به ترتیب زیر است:

- الیاف به موازات تنش وارد شده توزیع شوند
 - زمانی که الیاف در صفحه ای به موازات تنش وارد شده در دو بعد بصورت تصادفی توزیع شوند
 - زمانی که الیاف بصورت تصادفی و در سه بعد توزیع شوند
- معمولاً در بتن ریزی حجیم شیوه قرار گرفتن الیاف بصورت سه بعدی و تصادفی بوده و افزایش مقاومت و طاق در تمامی جهات صورت می گیرد. در پوسته ها و در لابه بتن باشی تا حدودی طرز قرار گرفتن الیاف دو بعدی و تصادفی است و افزایش مقاومت طاق بیشتر به موازات محور مقطع صورت می گیرد. لرزاندن بتن حاوی الیاف در برخی موارد امکان قرار گرفتن الیاف را به صورت دلخواه فراهم می سازد.
- مثلاً در روسازی راهها و فرودگاهها لازم است الیاق در تولید و به موازات محور افقی که در واقع در جهت تنشهای کششی وارد شده توزیع شوند. قرار گرفتن الیاف در یک بعد کاربری نداشته و آرماتورهای معمولی این نقش را به شکل بهتری ایفا می کنند. [۴۷]

۲-۵- پوزولان در بتن خود تراکم

واژه پوزولان برگرفته از نام محلی به اسم پوزولی در ایتالیا می باشد. رومی ها در آنجا و در منطقه ای آتشفشانی، مصالح سیلیسی فعال شده‌ای یافتند که آن را "پالویس پاتلانوس" نامیدند که بعدها به پوزولانا و پوزولان مشهور شد.

طبق استاندارد ASTM C618 پوزولان مصالحی سیلیسی و آلومینی می باشد که به تنهایی ، ارزش سیمانی نداشته و یا ارزش سیمانی آن ناچیز می باشد. اما اگر به صورت ذرات ریز در آید می تواند در دمای معمولی با هیدروکسید های کلسیم واکنش داده و ترکیباتی را بوجود آورد که دارای خواص سیمانی می باشند. [۴۸] لازم به ذکر است که سیلیس پوزولانها باید بصورت آمورف (بی شکل) باشد زیرا خاصیت واکنش دهی سیلیس های متبلور بسیار کم است.

قابل ذکر است که به طور کلی پوزولانها به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم بندی شده اند. در حدود ۵٪ سطح جامد کره زمین پوشیده از سنگ های آتشفشانی می باشد و هر ساله مقادیر زیادی از محصولات جانبی صنایع را مواد پوزولانی تشکیل می دهد. در این پژوهش از خاکستر بادی در اختلاط بتن الیافی خودمتراکم استفاده شده است که به توضیح آن پرداخته شده است. [۴۹]

۲-۵-۱- خاکستر بادی

۲-۵-۱-۱- مقدمه

خاکستر بادی که از سوختن زغال سنگ پودر شده بدست می آید بعنوان ماده پوزولانی در صنعت سیمان به دو صورت مورد استفاده قرار می گیرد. اول بعنوان ماده پوزولانی مجزا برای استفاده در ساخت بتن در کنار سیمان پرتلند و یا بصورت از پیش مخلوط شده با سیمان پرتلند که به صورت سیمان آمیخته عرضه می گردد. ACI 116R یک ماده پوزولانی را این گونه تعریف می کند که پوزولان بعنوان یک ماده سیلیسی یا یک ماده سیلیسی _ آلومینی است که در حضور آب به تنهایی، خاصیت سیمانی ندارد و یا میزان این خاصیت کم می باشد. اما با تقسیم به دانه های ریز و در برابر رطوبت با هیدروکسید کلسیم در دمای که معمولی واکنش شیمیایی داشته و ترکیب بدست آمده خاصیت سیمانی دارد. خاکستر بادی نوع F که دارای مقدار C کم می باشد ماده ای صرفاً پوزولانی است، لیکن خاکستر بادی نوع CaO دارای مقدار هست علاوه بر خواص پوزولانی، قدری خواص سیمانی نیز دارد CaO. قابل توجهی استفاده از خاکستر بادی که محصول سوختن زغال سنگ در نیروگاه های تولید نیروی برق می باشد، به سال ۱۹۳۰ میلادی باز می گردد. در سال ۱۹۳۷ دیویس نتایج آزمایشات خود را بر روی بتن حاوی خاکستر بادی منتشر نمود. تا به امروز تحقیقات زیادی در مورد عملکرد خاکستر بادی در بتن انجام شده است.

تحقیقات زیادی (دانستن ۱۹۷۶ و ۱۹۸۰ ؛ تیکالسکی، کاراسکوییلو و اسنو ۱۹۹۲ ؛ تیکالسکی و کاراسکوییلو ۱۹۹۳) نشان داده است که خاکستر بادی یک ماده افزودنی مفید و مؤثر در بتن برای کاهش نفوذ سولفات ها و کلرید ها می باشد. همچنین خاکستر بادی کارآیی بتن تازه را به علت کروی شکل بودن ذرات

خود، افزایش می دهد و نیز دمای حداکثر ناشی از هیدراسیون اولیه بتن را کاهش می دهد و تأثیر مفیدی در افزایش دوام و مقاومت بتن گذاشته است.

در برخی پروژه ها، از جمله سد تامس در بریتانیا و سد در ایالات متحد (Upper Still Water) ۳۰ تا ۷۵ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان هیدرولیکی برای کاهش دمای سنین اولیه بتن و نیز کاهش نفوذپذیری استفاده نموده اند. علاوه بر بهبود مسائل فنی، مزیت اقتصادی از دلایل استفاده خاکستر بادی در مخلوط بتن بوده است. [۵۰] همچنین خاکستر بادی در سازه های بتنی مختلفی مانند استفاده در ساخت سازه های جمع آوری فاضلاب جهت افزایش دوام، مورد استفاده قرار گرفته است. [۵۱]

همانطور که اشاره شد خاکستر بادی یک ماده زاید صنعتی است که در نیروگاه های تولید برق از سوختن زغال سنگ حاصل می شود. در نتیجه استفاده آن در صنعت دیگری مانند صنعت بزرگ بتن به حفاظت از محیط زیست کمک شایانی کرده است.

۲-۱-۵-۲- منابع خاکستر بادی

بدلیل افزایش استفاده از پودر زغال سنگ بعنوان سوخت برای بدست آوردن انرژی الکتریکی، خاکستر بادی در حال حاضر در بیشتر نقاط جهان در دسترس است. خاکستر بادی در فرآیند سوختن زغال سنگ تولید شده و بوسیله فیلترها جمع آوری می شوند و این مواد دارای ذراتی ریز و کروی شکل هستند به نحوی که ۷۰ تا ۸۰ درصد ذرات آن از الک ۲۰۰ ($75\mu\text{m}$) می گذرد.

تنها در ایالات متحده سالانه حدود ۶۳ میلیون تن خاکستربادی تولید می شود که تخمین می زنند، ۱۸ تا ۲۰ درصد از آن در بتن مورد استفاده قرار می گیرد.

بر اساس ترکیبات شیمیایی، خاکستر بادی را بعنوان گروه خاکسترهای کلاس F و C طبقه بندی می شود که مشخصه های عملکردی مختلف را نشان می دهند. کلاس F خاکستر بادی معمولاً از سوختن زغال سنگ های با انرژی گرمایی زیاد از جمله قیر و (آنتراسیت) زغال سنگ با کربن زیاد در حدود ۹۵ % بدست می آید. خاکسترهای بادی زغال سنگ های قیری و آنتراسیت بندرت اکسید کلسیم آنها بیشتر از ۱۵ درصد است. خاکسترهای بادی حاصل از سوختن زغال سنگ های نیمه قیری و لیگنیتی که کربن آنها در حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد می باشد، معمولاً اکسید کلسیم بالای ۲۰ درصد و خصوصیات پوزولانی و سیمانی را دارا می باشند. اختلاف های عملکردی قابل توجهی بین خاکسترهای بادی از منابع مختلف وجود دارند [۵۲].

۲-۵-۱-۳- ساختار خاکستر بادی

خاکستر بادی شامل ترکیبات ناهمگن مواد شیشه ای و کریستالی هستند که کره های شیشه ای به شکل کره های پر و توخالی و با خلل و فرج می باشند [۵۲].

۲-۵-۱-۴- ساختار شیمیایی

مقادیر چهار ترکیب اصلی خاکستر بادی ($\text{SiO}_2(35-60\%)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(10-30\%)$, $\text{Fe}_2\text{O}_3(4-20\%)$, $\text{CaO}(1-35\%)$ در مراجع مختلف متفاوت گزارش شده است. مجموع سه ترکیب اول ($\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$, Fe_2O_3) برای خاکستر بادی نوع F باید بالای ۷۰ درصد باشد درحالیکه برای نوع C بالای ۵۰ درصد باشد. همچنین کلاس C معمولاً شامل بیش از ۱۰ درصد اکسید کلسیم می باشد.

سیلیس موجود در خاکستر بادی اصولاً از رس معدنی و کوارتز موجود در زغال سنگ می باشد. زغال سنگ های قیری و آنتراسلیت اغلب شامل درصد زیادتری از رس های معدنی نسبت به زغال سنگ های لیگنیتی و نیمه قیری می باشد. در نتیجه هرچه درصد رس معدنی موجود در زغال سنگ ها بیشتر باشد مقدار سیلیس

خاکستر بادی بیشتر خواهد بود. سیلیس خاکستر بادی با آهک تولید شده در عملیات را تولید هیدراسیون سیمان و آب، به همراه آب ترکیب می شود و سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) از مقاومت آهک، می کند که این امر بدلیل بیشتر بودن مقاومت سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) در خاکستر بادی، افزایش مقاومت خمیر سیمان را در پی خواهد داشت. منبع اصلی آلومین Al_2O_3 رس موجود در زغال سنگ است.

خاکستر بادی ناشی از مواد حاوی آهن در زغال سنگ می باشد و اندازه این ذرات حاوی آهن Fe_2O_3 در زغال سنگ بین ۱۵ تا ۶۰ میکرون می باشد. منبع اکسید کلسیم خاکستر بادی ترکیبات کلسیم و سولفات کلسیم در زغال سنگ می باشد. خاکستر بادی که محصول سوختن زغال سنگ های رده بالا از جمله زغال سنگ آنتراسیت و قیر که از مواد غیرقابل اشتعال به شمار می آیند، می باشد. حاوی مقدار کمتر از ۵ درصد اکسید کلسیم است. اما این مقدار در خاکستر بادی که محصول سوختن زغال سنگ های رده پایین است به ۳۵ درصد نیز می رسد. مقدار اکسید کلسیم خاکستر بادی بعنوان یک معیار دیگر برای طبقه بندی خاکستر های بادی، پیشنهاد شده است. توماس و شهاتا و شاشپیراکاش طبقه بندی جدول ۳ را نسبت به اکسید کلسیم بیان کرده اند که به نظر این محققین این روش طبقه بندی بهترین روش برای تفکیک ساختار شیمیایی خاکستر بادی و تأثیر آن روی خصوصیات بتن است [۴۹].

جدول ۲-۴- یک روش طبقه بندی خاکستر بادی [۴۹]

نوع خاکستر بادی	CaO(%)	افت ناشی از سرخ شدن (%)
F	<8	8 Max
Cl	8-20	8 Max
C	>20	8 Max

کربن موجود در خاکستر بادی از احتراق ناقص زغال سنگ و نیز فعل و انفعالات آلی ایجاد شده در روند تولید زغال سنگ، بوجود می آید. در جدول ۲-۵ ساختار شیمیایی تعدادی از خاکستر های بادی معمول در آمریکای شمالی که از منابع مختلفی می باشند، آورده شده است.

جدول ۲-۵ - ساختار شیمیایی خاکسترهای بادی معمول آمریکای شمالی برای منابع مختلف [۴۹]

	Bituminous	Sub-bituminous	Northern lignite	Southern lignite
SiO ₂ , %	45.9	31.3	44.6	52.9
Al ₂ O ₃ , %	24.2	22.5	15.5	17.9
Fe ₂ O ₃ , %	4.7	5.0	7.7	9.0
CaO, %	3.7	28.0	20.9	9.6
SO ₃ , %	0.4	2.3	1.5	0.9
MgO, %	0.0	4.3	6.1	1.7
Alkalies, %*	0.2	1.6	0.9	0.6
Loss on ignition, %	3	0.3	0.4	0.4
Air permeability fineness, m ² /kg	403	393	329	256
45 μm sieve retention, %	18.2	17.0	21.6	23.8
Density, Mg/m ³	2.28	2.70	2.54	2.43

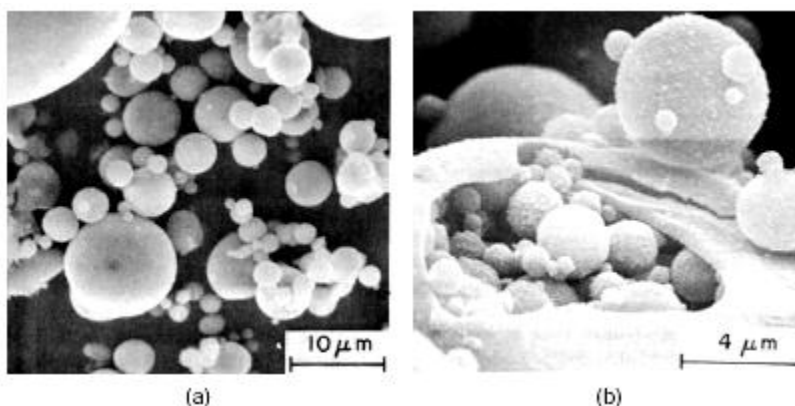
* Available alkalies expressed as Na₂O equivalent.

جدول ۲-۶ - الزامات شیمیایی خاکستر بادی [۵۳]

نوع			
C	F	N	
۵۰	۷۰	۷۰	حداقل مجموع اکسید های سیلیسیم، آلومینیوم و آهن (%)
۵	۵	۴	حداکثر SO ₃ (%)
۳	۳	۳	حداکثر رطوبت (%)
۶	۶	۱۰	حداکثر افت ناشی از سرخ شدن (%)

همانگونه که بیان شد ذرات خاکستر بادی دارای شکل کروی پر یا تو خالی و یا با خلل و فرج هستند. ذرات خاکستر بادی تو خالی هم به صورت شفاف و هم به صورت کدر موجود می باشند. اندازه ذرات خاکستر بادی بین ۱ تا ۱۰ میکرون می باشد. ذرات درشت خاکستر بادی اغلب ذرات خالص کروی تو خالی هستند. خاکسترهای بادی با اندازه بین ۵ تا ۸ میکرون واکنش زایی بیشتری نسبت به خاکستر بادی درشت دانه دارند.

همچنین طبق استاندارد ASTM C618 خاکستربادی که در نظر است برای ساخت بتن استفاده شود نباید بیشتر از ۳۴٪ درصد مانده روی الک ۳۲۵ (۴۵ میکرون) بماند در حالیکه استاندارد اروپایی BS EN ۴۵۰ این محدودیت را ۴۰ درصد عنوان کرده است. قطر میانگین ذرات خاکستر بادی معمولی بین ۱.۵ تا ۳.۵ میکرون است. تصویر میکرو گراف الکترونی از خاکستر بادی Class F در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است. [۴۹]



شکل ۲-۲۳ - تصویر میکرو گراف الکترونی از خاکستر بادی Class F
 (a) ذرات کروی شکل (b) ذرات متخلخل خاکستر بادی (Plerosphere) [۵۳]

در مورد چگالی خاکستر بادی، با توجه به تحقیقات لوک چگالی ذرات پر بین ۱,۹۷ تا ۳,۰۲ (Kg/m^3) می باشد، اما بطور معمول این مقدار برای کل خاکستر های بادی ۲,۲ تا ۲,۸ (Kg/m^3) گزارش شده اند. برخی ذرات خاکستر بادی از جمله خاکستر بادی دارای کره های توخالی تمایل به شناور شدن در سطح آب را دارند. به گفته دیگر چگالی آنها از چگالی آب کمتر است.

روی و لوک و دیاموند در نتایج آزمایشات خود عنوان کرده اند که هر چه آهن خاکستر بادی بیشتر باشد، خاکستر بادی چگال تر و هر چه کربن خاکستر بادی بیشتر باشد چگالی آن کمتر خواهد بود. خواص فیزیکی و شیمیایی نمونه هایی از خاکستربادی نوع C و F با الزامات نسبت به استاندارد ASTM C 618 در جدول ۶ مورد مقایسه قرار گرفته است. [۵۳]

جدول ۶-۲ - خواص فیزیکی و شیمیایی یک نمونه خاکستربادی [۵۳]

Results of chemical analysis	Class C fly ash, percent	Class F fly ash, percent	Requirements ASTM C 618, percent	
			Class C	Class F
Silicon dioxide, SiO ₂	34.2	48.4	—	—
Aluminum oxide, Al ₂ O ₃	19.3	27.0	—	—
Ferric oxide, Fe ₂ O ₃	5.8	6.6	—	—
Total, SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	59.4	82.0	50.0 min.	70.0 min.
Sulfur trioxide, SO ₃	3.1	0.6	5.0 max.	5.0 max.
Calcium oxide, CaO	29.2	8.5	—	—
Magnesium oxide, MgO	5.0	2.0	5.0 max.	5.0 max.
Titanium Dioxide, TiO ₂	1.5	1.3	—	—
Potassium oxide, K ₂ O	0.5	1.0	—	—
Sodium oxide, Na ₂ O	0.8	0.5	1.5 max.	1.5 max.
Moisture content	0.1	0.2	3.0 max.	3.0 max.
Loss of ignition	0.5	2.8	6.0 max.	6.0 max.
Physical properties				
Fineness retained on No. 325 sieve, percent	—	24.4	34 max.	34 max.
Strength activity index with lime, 7-days, MPa	12.4	—	5.5 min.	—
Strength activity index with cement, 28-days, percent of control	107.0	81.8	75 min.	75 min.
Water requirement, percent of control	96.0	104.2	105 max.	105 max.
Autoclave expansion, percent	+ 0.02	—	± 0.8 max.	± 0.8 max.
Specific gravity	2.59	2.24	—	—

۲-۲-۴-۱- فعالیت شیمیایی خاکستر بادی در بتن با سیمان هیدرولیکی

استفاده از خاکستر بادی همراه با سیمان پرتلند واکنش بین فاز غیر بلوری خاکستر بادی و هیدروکسید کلسیم

تولید شده از عملیات هیدراسیون سیمان پرتلند، را در پی داشته و سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) را

تولید می کند و در نتیجه باعث افزایش مقاومت و دوام بتن می گردد. [۴۹]



فصل سوم
مواد و روش ها

۳-۱- مقدمه

این پژوهش با هدف بررسی تاثیر الیاف فولادی و شیشه ای بر روی خواص مکانیکی بتن خودتراکم ریخته شده در لایه های مجزا انجام شده است. ابتدا مواد و مصالح مورد استفاده در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفتند تا کیفیت آنها مورد ارزیابی قرار گیرد و پارامترهای مورد نیاز جهت ساخت مخلوط های مورد نظر تعیین شوند. آزمایش های تعیین دانه بندی، جرم حجمی، جذب آب، هم ارز ماسه بر روی مصالح سنگی و آزمایش های تعیین مقادیر اکسیدها و ترکیبات، جرم حجمی، سطح ویژه، زمان گیرش و مقاومت فشاری ملات استاندارد بر روی سیمان و تعیین مقادیر اکسیدها آزمایش های جرم حجمی، افت ناشی از سرخ شدن و اندیس فعالیت پوزولانی برای خاکستر بادی انجام شده است.

در طراحی طرح مخلوط های طرح حاضر الیاف فولادی و شیشه ای به صورت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزن سیمان به نمونه ها افزوده شده است و مقدار پوزولان در طرح اختلاط ها ثابت میباشد. بعضی از طرح مخلوط های برای صحت سنجی تکرار شده اند. در ادامه این فصل تمامی طرح مخلوط ها در جداول تفسیر خواهند شد.

بنا به رعایت آیین نامه ملی بتن و ASTM برای کاربرد و دوام کافی نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی طرح های مخلوط ۰/۳۵ در نظر گرفته شده است و درصد هوای ناخواسته ایجاد شده ۲ درصد در نظر گرفته شده و با استفاده از روش آزمون خطا بهینه یابی افزودنی شیمیایی انجام شد .

در این فصل، ابتدا نتایج آزمایش های مقدماتی جهت تعیین خواص مصالح ارائه شده است . سپس روش ساخت مخلوط ها و نحوه ی آماده سازی و در پایان نحوه ی انجام آزمایش های مختلف بر روی نمونه ها توضیح داده شده است.

۳-۲- مواد و مصالح مصرفی

۳-۲-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع صادراتی محصول کارخانه سیمان صوفیان تبریز میباشد. وزن مخصوص این سیمان با فلاسک لوشاتلیه طبق دستور ASTM C188 در سه نوبت اندازه گیری و برابر ۳۱۳۰ کیلوگرم در متر مکعب بدست آمد. ضمناً نرمی آن برابر ۲۹۵۰ سانتیمتر مربع بر گرم بوده و مقدار ترکیبات آن در جداول زیر قابل مشاهده است.

جدول ۳-۱- ترکیبات شیمیایی سیمان معمولی کارخانه صوفیان تبریز

L.O.I	C ₄ A	C ₃ A	C ₂ S	C ₃ S	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	نوع سیمان
0.75	10.53	7	25.47	49.5	2.38	0.97	0.34	64.56	3.46	4.85	21.91	تیپ ۲

با توجه به مقدار C₃A این سیمان الزامات شیمیایی مربوط به سیمان نوع یک که کمتر از ۸ درصد می باشد را ارضا می کند.

خواص فیزیکی بدست آمده از کارخانه سازنده سیمان طبق استانداردهای ذیل عبارتند از:

- آزمایش خمیر نرمال برای تعیین نسبت آب به سیمان برای انجام آزمایش گیرش ASTM C188
- آزمایش گیرش تعیین زمان اولیه و گیرش نهایی ASTM C191
- آزمایش تعیین جرم حجمی سیمان ASTM C188
- آزمایش تعیین میزان ریزی ذرات سیمان تعیین سطح ویژه به روش بلین ASTM C204
- استاندارد 389 ملی ایران: آزمایش مقاومت فشاری و خمش ۲۸ روزه ملات استاندارد سیمان

جدول ۳-۲- مشخصات فیزیکی سیمان تیپ یک کارخانه صوفیان تبریز

استاندارد ۳۸۹ ایران	سیمان مورد استفاده	
۲۸۰۰	۲۸۶۰	سطح ویژه
-	-	باقیمانده روی الک ۹۰ میکرون
-	۰/۲۳	انبساط طولی
-	-	درصد آب
۴۵	۸۰	زمان گیرش اولیه (دستگاه ویکات دقیقه)
۳۷۵	۲۷۵	زمان گیرش ثانویه (دستگاه ویکات دقیقه)
-	-	مقاومت فشاری ۲ روزه (Kg/cm^2)
-	۱۷۹	مقاومت فشاری ۳ روزه (Kg/cm^2)
۱۷۵	۲۷۴	مقاومت فشاری ۷ روزه (Kg/cm^2)
۳۱۵	۳۷۰	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Kg/cm^2)

۳-۲-۲- آب

آب مصرفی در ساخت مخلوطها از آب لوله کشی شهر تبریز تأمین شد. میزان pH این آب در حدود ۷/۵ می باشد و غلظت یون کلرید آن نیز ۰,۱۳۴ می باشد.

۳-۲-۳- سنگدانه ها

دانه بندی سنگدانه ها عامل تعیین کننده ای در مقدار کارایی مخلوط بتن می باشد . کارایی به نوبه خود بر مقدار آب و سیمان لازم در مخلوط اثر می گذارد ، جداشدگی و آب انداختن بتن را کنترل می کند و بر نحوه جای دهی و پرداخت سطح بتن اثر دارد از طرفی بر خواص بتن سخت شده شامل مقاومت ، جمع شدگی و دوام و پایداری تاثیرگذار است . بنابراین دانه بندی سنگدانه در تعیین نسبت مواد متشکله مخلوط بتن اهمیت بسیار زیادی دارد .

۳-۲-۳-۱- سنگدانه درشت

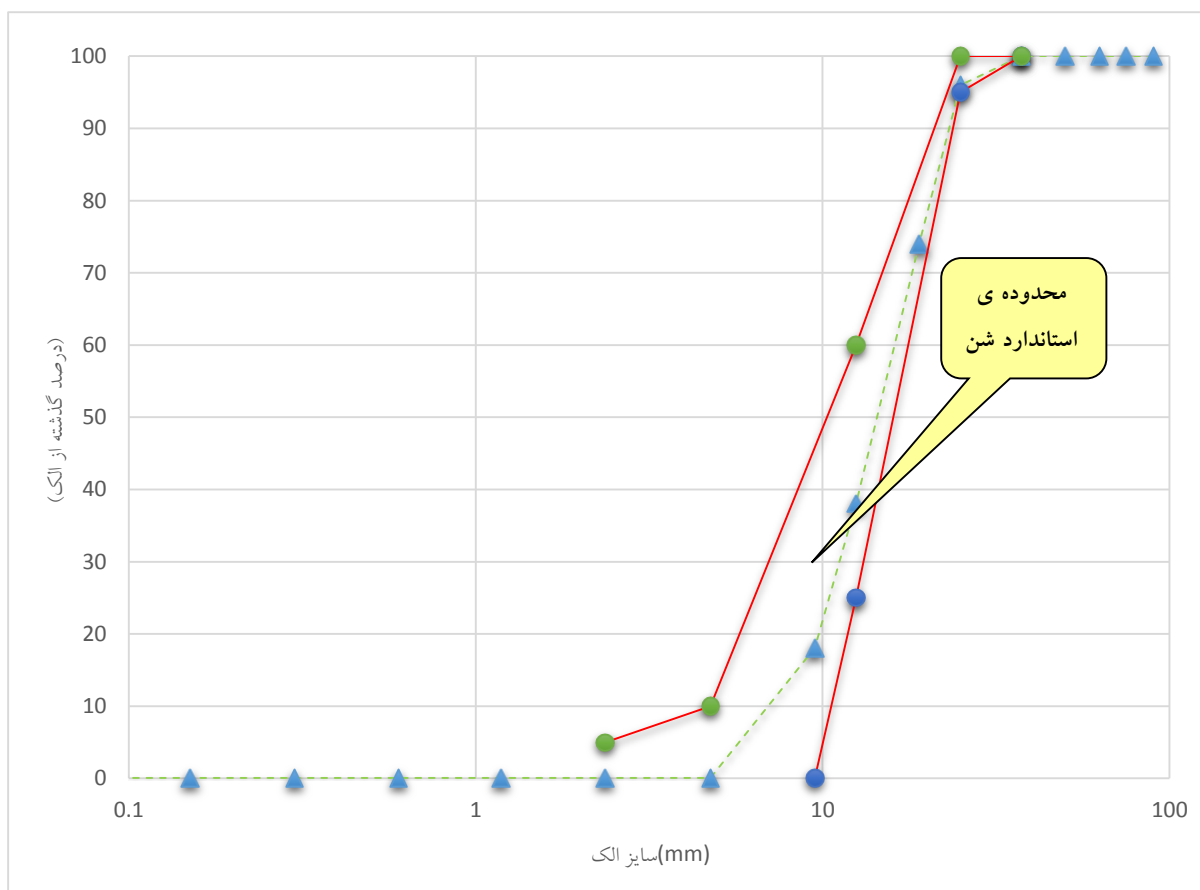
معمولاً حجم کل سنگدانه ها در بتن خودتراکم کمتر از حجم کل سنگدانه ها در بتن معمولی است . در نتیجه با افزایش حجم خمیر سیمان و کاهش حجم سنگدانه ها احتمال برخورد سنگدانه ها با یکدیگر کاهش یافته و حرکت بتن آسانتر صورت می گیرد . حجم سنگدانه ها و اندازه حداکثر دانه در میزان قابلیت عبور و بروز پدیده انسداد تاثیر قابل توجهی دارد . چنانچه اندازه حداکثر دانه از یک مقدار زیادتر باشد یکپارچگی دانه بندی از بین رفته و باعث افزایش ناپایداری بتن می شود.

سنگدانه درشت مصرفی در این تحقیق از نوع رودخانه ای شهر تبریز و کارخانه ماسه شویی سرام با وزن مخصوص ۲/۶۴ گرم بر سانتیمتر مربع و ظرفیت جذب آب ۲/۴٪ بر اساس استاندارد ASTM C128 بوده است و حداکثر اندازه قطر شن ها ۱۵ میلی متر می باشد.

جدول ۳-۳- دانه بندی سنگدانه درشت مورد استفاده

شماره الک	سایز الک (mm)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی رد شده از الک
# ۱	۲۵/۴	۸/۹	۰	۹۲
# ۳/۴	۱۹	۳۸/۸	۴۷/۷	۵۲/۷
# ۱/۲	۱۲/۷	۴۶/۶۸	۹۴	۶/۰۴
# ۳/۸	۹/۵۱	۴/۳۰	۹۸/۳	۱/۴۷
# ۴	۴/۷۵	۱/۷	۱۰۰	۰/۰۴
زیر الکی	-		۱۰۰	۰

شکل ۳-۱- نمودار دانه بندی شن مورد استفاده



۳-۲-۳-۲- سنگدانه ریز

دانه بندی سنگدانه ریز نسبت به دانه بندی سنگدانه درشت بر مشخصات رفتار شناسی بتن خودتراکم تاثیر بیشتری دارد. در حالت کلی با کاهش میزان مدول نرمی ماسه، آب موردنیاز برای دستیابی به یک کارایی معین به مقدار جزئی بیشتر می شود زیرا سطح مخصوص دانه ها افزایش می یابد. ولی از سوی دیگر اقوام، لزجت و پایداری بتن بهبود قابل ملاحظه ای می یابد. چنانچه بتن با دانه بندی نامناسب ماسه ساخته شود دچار ضعف در قابلیت عبور می شود و احتمال بروز جدایش در آن افزایش می یابد.

سنگدانه ریز مصرفی در این پژوهش از معدن شرکت سرام در منطقه آناختون شهر تبریز میباشد که در شمال غربی این شهر واقع شده است و سنگدانه های آن رودخانه ای میباشد که بعد از حمل از معدن در انبار آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد واحد تبریز دپو شده است.

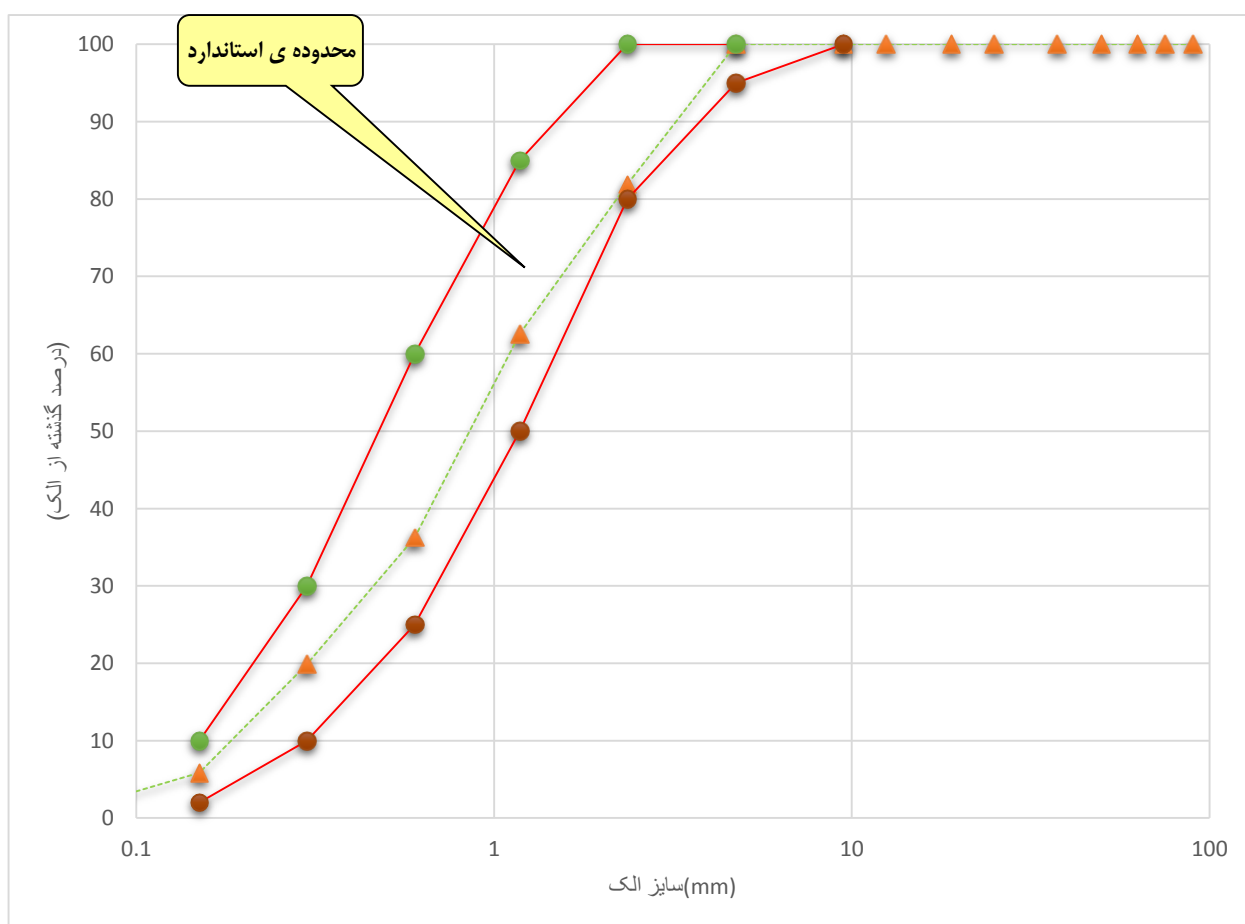
نتایج آزمایش های مشخصات فیزیکی شن و ماسه مصرفی برای ساخت اختلاط بتن ها در جدول ارائه گردیده است.

جدول ۳-۴- مشخصات آزمایشگاهی سنگدانه ریز

سنگدانه	ماسه سرام
چگالی (گرم برسانتیمترمکعب)	۲,۵۹
وزن مخصوص میله خورده (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۸۱۷
وزن مخصوص میله نخورده (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۶۶۶
درصد جذب آب SSD	۱/۸۲
هم ارز ماسه	۹۲

جدول ۳-۵- دانه بندی ماسه مورد استفاده

شماره الک	سایز الک (mm)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی رد شده از الک
#۴	۴/۷۵	۰	۰	۱۰۰
#۸	۲/۳۶	۱۸/۱۲	۱۸/۱۲	۸۱/۸۷
#۱۶	۱/۱۸	۱۹/۲۹	۳۷/۴۲	۶۲/۵۷
#۳۰	۰/۶	۲۶/۳۱	۶۳/۷۴	۳۶/۲۵
#۵۰	۰/۳	۱۶/۳۷	۸۰/۱۱	۱۹/۸۸
#۱۰۰	۰/۱۵	۱۴/۰۳	۹۴/۱۵	۵/۸۴
#۲۰۰	۰/۰۷۵	۴/۰۹	۹۸/۲۴	۱/۷۵
زیر الکی	-	۱/۷۵	۱۰۰	۰



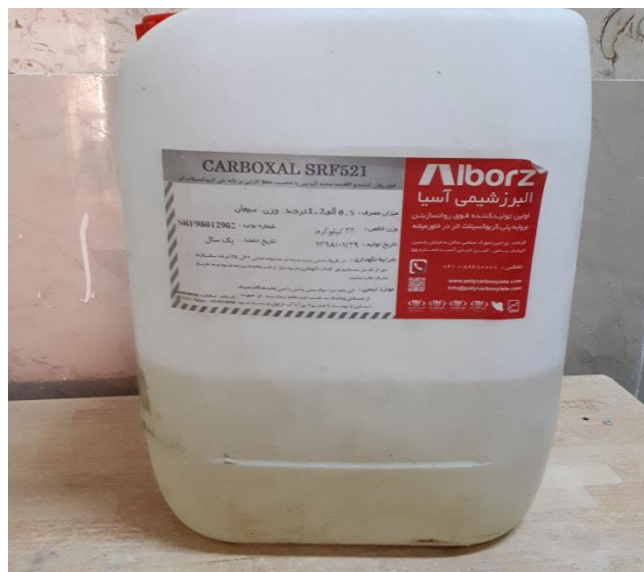
شکل ۳-۲- نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده

۳-۲-۴- فوق روان کننده

خواص بتن تماماً به نسبت آب به سیمان بستگی دارد. هر چه نسبت آب به سیمان کم باشد، کیفیت بتن بهتر است اما برای رسیدن به مقاومت بالا از طریق کاهش نسبت آب به سیمان با حفظ کارپذیری، تراکم بدون افزودنی های بتن امکان پذیر نیست. فوق روان کننده استفاده شده در این آزمایش با نام تجاری البرز شیمی آسیا و نام علمی پلی کربوکسیلات اصلاح شده (دیگرگیر) که برپایه کربوکسیلات اتر می باشد و مشخصات آن در جدول آورده شده است. برای رسیدن به بتن خودتراکم استفاده از فوق روان کننده پایه کربوکسیلاتی ضروری می باشد.

جدول ۳-۶- مشخصات فنی فوق روان کننده مورد استفاده

مشخصات فنی پلی کربوکسیلات اصلاح شده	
حالت فیزیکی	مایع (مایع ویکسوز)
نوع	دیگرگیر (افزایش کارایی بتن)
درصد مواد جامد	براساس استاندارد ASTM C 494 (TYPE G)
درصد تسویه شده	۰/۶ تا ۱/۵ درصد وزن سیمان
رنگ	شفاف یا شیری
پایه شیمیایی	پلی کربوکسیلات اتر
وزن مخصوص	۱/۱ گرم در سانتیمتر مکعب در ۲۰ درجه سانتیگراد
اسیدیته (PH)	۷±۱ (۸-۶)
میزان کلراید	حداکثر ۵۰۰ ppm (کمتر از ۰/۱ درصد)
مقدار نیترات	فاقد نیترات



شکل ۳-۳- فوق روان کننده مورد استفاده

۳-۲-۵- الیاف

۳-۲-۵-۱- الیاف فولادی

الیاف آلیاژی فولاد با سیم فولادی کربن پایین و نورد سرد با بهترین کیفیت توسط صنایع فولاد وندشیمی از بهترین و با کیفیت ترین مواد سیمی که در ردیف و رنج بالای می باشد تولید می شود. در جدول ۳-۸ مشخصات فنی الیاف ذکر شده است. در شکل ۳-۴ شکل ظاهری الیاف آورده شده است.

جدول ۳-۷- مشخصات فنی الیاف فولادی

شکل ظاهری	تیره رنگ
وزن مخصوص	۱۵۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب
طول	۳۵ میلی متر
قطر	۰,۴ میلی متر
مقاومت کششی	۵۴۰۰ کیلوگرم بر متر مربع



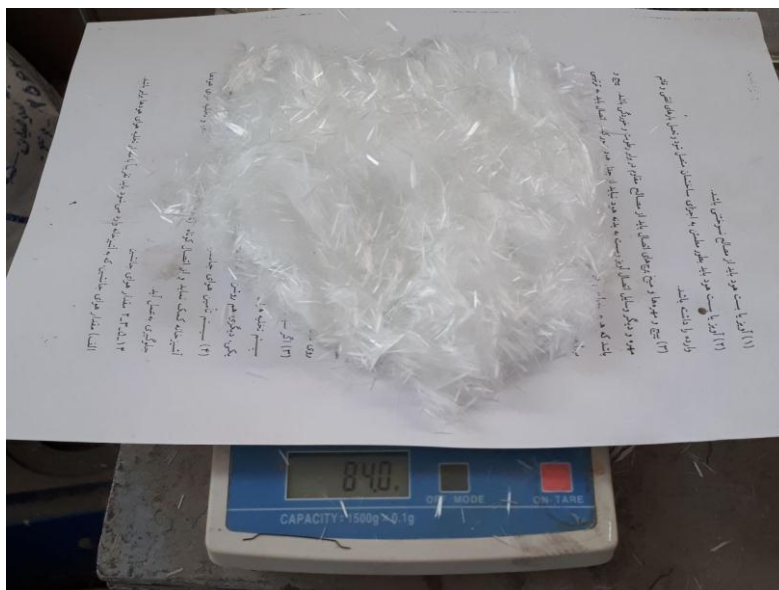
شکل ۳-۴- الیاف فولادی مورد استفاده

۳-۲-۵-۲- الیاف شیشه

این الیاف از نوع E-Glass میباشد که مشخصات فنی آن در جدول ۳-۹ ذکر شده است. همچنین شکل ظاهری این الیاف در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.

جدول ۳-۸- مشخصات فنی الیاف فولادی

شکل ظاهری	تیره رنگ
وزن مخصوص	۹۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب
طول	۶ میلی متر
قطر	۰,۲ میلی متر
مقاومت کششی	۳۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع



شکل ۳-۴- الیاف شیشه مورد استفاده

۳-۲-۶- خاکستر بادی

خاکستر بادی نوعی پوزولان سیلیسی آلومینیومی است که به خودی خود دارای کمی یا بدون خاصیت سیمانی شدن می باشد ولی به صورت ذرات ریز در حضور رطوبت به طور شیمیایی با هیدروکسید کلسیم در دمای معمولی واکنش برقرار می سازد و تشکیل ترکیباتی را می دهد که دارای خواص سیمانی می باشد .

خاکستر بادی مورد استفاده در این پروژه از نوع F وارداتی می باشد که محصول شرکت Dirk هندوستان میباشد. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاکستر بادی طبق استاندارد ASTM C 618 آنالیز شیمیایی به ترتیب در جداول ۳-۹ ارائه شده است شکل نمونه ای از خاکستر بادی را نشان می دهد و شکل ۳-۵ بسته بندی و شکل ۳-۶ مشخصات روی آن را نشان میدهند. در شکل ۳-۷ تصویر میکروسکوپی خاکستر بادی آورده شده است.

جدول ۳-۹- آنالیز شیمیایی خاکستر بادی مورد استفاده

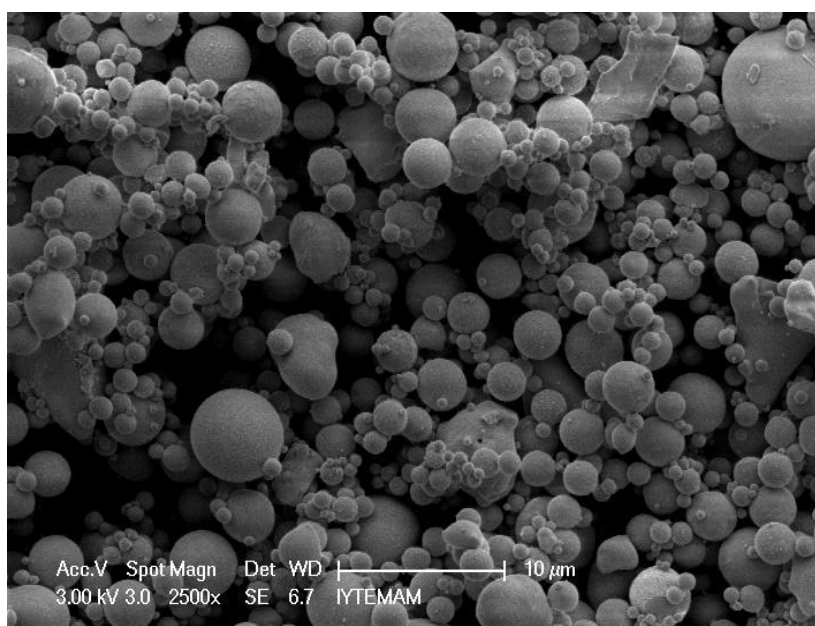
ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO
خاکستر بادی %	۷۰/۷۰	۲۰/۷۰	۳/۹۰	۰/۷۷	۱/۱۳	۱/۰۹	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۰۵



شکل ۳-۶- بسته بندی خاکستر بادی مورد استفاده



شکل ۳-۵- بسته بندی خاکستر بادی



شکل ۳-۷- تصویر میکروسکوپی خاکستر بادی مورد استفاده

۳-۳- طرح اختلاط Scc

روش طرح اختلاط در مرجع EFNARC براساس روش ابداع شده توسط okamura ارائه شده است .

خلاصه روش به شرح زیر می باشد .

- تعیین مقدار شن
- تعیین مقدار ماسه
- طراحی اجزا خمیر سیمان
- تعیین نسبت بهینه آب به پودر (سیمان) و مقدار فوق روان کننده

۳-۳-۱- تعیین مقدار سنگدانه درشت

حجم شن براساس چگالی انبوهی تعیین می شود . به طور کل شن باید بین 50 تا 60 درصد باشد . وقتی که مقدار شن از حد معین بیشتر باشد ، احتمال تصادم بین ذرات سنگدانه ها بیشتر می شود و خطر انسداد در هنگام عبور بتن از بین میلگردها افزایش می یابد . مقدار بهینه شن تابع عوامل زیر است:

- اندازه حداکثر سنگدانه : با کاهش اندازه سنگدانه ، مقدار شن افزایش می یابد .
- سنگدانه شکسته و گرد : برای سنگدانه گرد، می توان مقدار بیشتر سنگدانه نسبت به سنگدانه شکسته استفاده کرد .

۳-۳-۲- تعیین مقدار سنگدانه ریز

در طرح مخلوط ، ذرات بزرگتر از ۱۲۵mm و کوچکتر از ۴mm ماسه محسوب می شوند . ماسه براساس چگالی انبوهی تعیین می گردد . مقدار بهینه ماسه در ملات بین ۴۰٪ تا ۵۰٪ می باشد .

۳-۳-۳- تعیین مقدار سیمان

در کل این تحقیق مقدار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر هر مترمکعب بتن خود تراکم در نظر گرفته شده است.

۳-۳-۴- تعیین نسبت آب به سیمان

در این تحقیق دو نسبت آب به سیمان 0.36 در نظر گرفته شده است. این نسبت ها در ساخت بتن رایج بوده و منجر به رده های مقاومتی معمولی می گردد و در بسیاری از پروژه های عملی از آن استفاده می گردد.

جدول ۳-۱۰- طرح اختلاط بتن خودتراکم براساس آیین نامه - ۲۰۰۵ EFNARC

مواد	مقدار وزنی (kg/m^3)	مقدار حجمی (liters/m^3)
پودر چسبانده	۳۸۰-۶۰۰	—
خمیر	—	۳۰۰-۳۸۰
آب	۱۵۰-۲۱۰	۱۵۰-۲۱۰
سنگدانه درشت	۷۵۰-۱۰۰۰	۲۷۰-۳۶۰
سنگدانه ریز	محتوای توازن حجم سایر اجزای تشکیل دهنده، معمولاً ۴۸ تا ۵۵ درصد از کل وزن سنگدانه است	
نسبت حجمی آب به سیمان	—	۰/۸۵ الی ۱/۱۰

۳-۳-۵- تعیین مقدار فوق روان کننده

در این پژوهش با استفاده از روش آزمون و خطا در درصد های مختلف مقدار افزودنی بهینه جهت رضای الزامات بتن خود تراکم تعیین گردیده است که در درصد های مختلف، متفاوت است.

۳-۳-۶- محاسبات طرح اختلاط

در این پژوهش از دو نوع الیاف فولادی و شیشه ای و یک نوع پوزولان خاکستر بادی استفاده شده است. در طرح های اختلاط الیاف به صورت جداگانه و در ترکیب باهم به مقدار ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزن سیمان به بتن اضافه شده است. مقدار نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار خاکستر بادی در تمامی طرح های اختلاط ها ثابت است .

۳-۳-۷- طرح اختلاط نهایی

جدول ۳-۱۱- طرح اختلاط نمونه کنترل

نمونه کنترل (بدون الیاف)	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۶۲	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۱۵	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
--	الیاف شیشه (Kg/m^3)
--	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۴/۲	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۱۲- طرح اختلاط نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه

الیاف شیشه ۰/۵ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۶۰	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۱۲	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۲/۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
--	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۴,۳	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۱۳- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱ درصد الیاف شیشه

الیاف شیشه ۱ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۵۷	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۰۹	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
--	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۴/۸	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا Air (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۱۴- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف شیشه

الیاف شیشه ۱/۵ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۵۴	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۰۶	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۷/۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
--	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۶/۵	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۱۵- طرح اختلاط نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف فولاد

الیاف فولاد ۰/۵ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۵۸	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۱۲	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۲/۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
--	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۴/۳	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۱۶- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱ درصد الیاف فولاد

الیاف فولاد ۱ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۵۶	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۱۰	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
--	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۴,۸	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۱۷- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف فولاد

الیاف فولاد ۱/۵ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۵۴	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۰۸	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۷,۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
--	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۶/۵	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۱۸- طرح اختلاط نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت مساوی)

الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت مساوی) ۰/۵ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۶۰	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۱۳	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۱/۲۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
۱/۲۵	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۴/۳	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا Air (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۱۹- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت مساوی)

الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت مساوی) ۱ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۵۸	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۱۰	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۲,۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
۲,۵	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۶/۵	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۲۰- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت مساوی)

الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت مساوی) ۱/۵ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۵۷	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۰۸	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۳/۷۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
۳/۷۵	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۶/۵	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۲۱- طرح اختلاط نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت ۷۰ درصد فولاد و ۳۰ شیشه)

الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت ۷۰ درصد فولاد و ۳۰ شیشه) ۰/۵ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۶۰	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۱۳	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۱,۷۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
۰,۷۵	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۴,۳	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۲۲- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت ۷۰ درصد فولاد و ۳۰ شیشه)

الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت ۷۰ درصد فولاد و ۳۰ شیشه) ۱ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۵۷	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۱۱	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۳/۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
۱/۵	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۷/۸	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

جدول ۳-۲۳- طرح اختلاط نمونه حاوی ۱/۵ درصد الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت ۷۰ درصد فولاد و ۳۰ شیشه)

الیاف شیشه + الیاف فولاد (به صورت ۷۰ درصد فولاد و ۳۰ شیشه) ۱/۵ درصد سیمان	
۴۰۰	سیمان (Kg/m^3)
۱۸۱/۵	آب (Kg/m^3)
۷۵۴	سنگدانه درشت (Kg/m^3)
۸۰۸	سنگدانه ریز (Kg/m^3)
۵/۲۵	الیاف شیشه (Kg/m^3)
۲/۲۵	الیاف فولاد (Kg/m^3)
۱۰۰	خاکستر بادی نوع F (Kg/m^3)
۶/۵	فوق روان کننده (Kg/m^3)
۰/۰۲	هوا (Kg/m^3)
۰/۳۶	(W/C)

۳-۴- روش ساخت مخلوط ها

نحوه ساخت مخلوط ها بدین گونه بوده که ابتدا مصالح مورد نیاز به صورت دقیق توزین شده و سپس شن و ماسه توزین شده ، داخل مخلوط کن آزمایشگاه ریخته شده و به مدت یک دقیقه جهت حصول همگنی بصورت خشک مخلوط می شوند سپس سیمان و پوزولان از پیش توزین شده به مخلوط اضافه شده و بعد از ۱ دقیقه اختلاط در مرحله سوم ٪ ۶۰ آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه عمل اختلاط انجام می شود سپس به منظور بازدهی فرآیند اختلاط ابتدا فوق روان کننده با باقیمانده آب مخلوط گردیده و سپس به مخلوط اضافه می شود مخلوط حاصله پس از افزودن آخرین جزء به مدت ۵ دقیقه مخلوط شده و بدین ترتیب بتن مورد نظر حاصل شده است.

پس از اتمام عملیات ساخت ، بلافاصله آزمایش روانی بتن خودتراکم ، قیف V روی مخلوط بتن تازه انجام می شود تا پس از حصول نتیجه مطلوب از بتن تازه شروع به نمونه گیری شود.

۳-۵- قالب گیری بتن

۳-۵-۱- ساخت نمونه های آزمایش مقاومت برشی مورب

برای آزمایش مقاومت برشی مورب بتن خودتراکم مورد آزمایش تعداد ۳۰ عدد قالب $15 \times 15 \times 15$ را با زاویه ۴۵ درجه همانند شکل قرار داده و لایه اول بتن خودتراکم آماده شده را در تمامی قالب ها ریخته شده است . بعد از گذشت زمانهای ۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ دقیقه لایه دوم را برای هر زمان دو قالب بتن ریزی می نمایم که برای شکست ۲۸ روزه آزمایش گردید و میانگین مقاومت ها به عنوان نتیجه نهایی گزارش شده است.

بعد از گذشت ۲۴ ساعت از زمان بتن ریزی نمونه ها را از قالب خارج نموده و به مدت معین در دمای آزمایشگاه در حوضچه ی آب قرار می دهیم و بعد از گذشت ۲۸ روز نمونه های مورد نظر را برای به دست آوردن مقاومت ۲۸ روزه از داخل حوضچه بیرون آورده و بعد از خشک شدن ظاهری نمونه ها در عرض حدود ۴ ساعت آنها را زیر دستگاه تعیین کننده مقاومت فشاری قرار می دهیم و نتیجه را برای هر نمونه ثبت می نماییم. میانگین مقاومت 2 نمونه را به عنوان مقاومت فشاری آن نمونه محاسبه شده است.



شکل ۳-۸- روند قالب گیری بتن



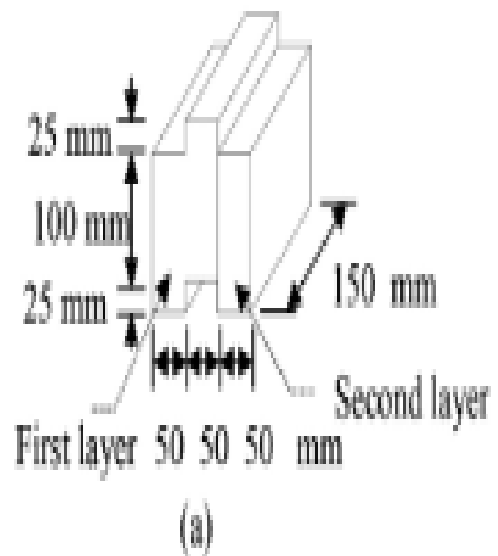
شکل ۳-۹- روند ساخت نمونه های برشی مورب



شکل ۳-۱۰- سطح مقطع نمونه ها بعد از شکست برشی مورب

۳-۵-۲- ساخت نمونه های آزمایش مقاومت برشی مستقیم

برای آزمایش مقاومت برشی مستقیم بتن خودتراکم مورد آزمایش تعداد ۳۰ عدد قالب مخصوص خودمان مطابق شکل ۳-۱۱ را در یک لایه بتن ریزی می کنیم و بعد از گذشت زمان های ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۶۰ دقیقه لایه دوم را برای هر زمان دو نمونه را بتن ریزی می نماییم .



شکل ۳-۱۱- قالب مخصوص برش مستقیم



شکل ۳-۱۲- روند ساخت نمونه های برشی مستقیم

عمل آوری نمونه های بتنی را همانند نمونه های آزمایش برش مورب انجام داده بعد از گذشت ۲۸ روز نمونه ها را برای تعیین مقاومت ۲۸ روزه از آب بیرون آورده و همانند شکل زیر جک قرار داده و نتیجه را ثبت می نمایم.



شکل ۳-۱۳- سطح مقطع نمونه بعد از شکست برشی مستقیم

۳-۵-۳- ساختن نمونه های آزمایش مقاومت کششی تحت شکافت

برای آزمایش مقاومت کششی تحت شکافت بتن خودتراکم مورد آزمایش تعداد ۳۰ عدد قالب $15 \times 15 \times 15$ را همانند شکل ۳-۱۴ قرارداداده و لایه اول بتن ریزی را به اندازه نصف ارتفاع قالب در تمامی قالب ها انجام می دهیم . بعد از گذشت زمان های ۰ ، ۴۰ ، ۸۰ ، ۱۲۰ ، ۱۶۰ دقیقه لایه دوم ریخته می شود برای هر زمان ۲ قالب بتن ریزی می نمایم که برای شکست ۲۸ روزه آزمایش گردید و میانگین مقاومت ها به عنوان نتیجه نهایی گزارش شده است.

عمل آوری نمونه های بتنی را عین بخش های قبلی انجام داده و بعد از گذشت زمان ها ۲۸ روز و نمونه های مورد نظر را مانند شکل در زیر دستگاه تعیین مقاومت قرار داده و مقاومت ۲۸ روزه را ثبت می نمایم میانگین مقاومت کششی سه نمونه زمان مورد نظر را به عنوان مقاومت کششی تحت شکافت همان زمان (زمان ریختن بتن لایه دوم) محاسبه می نمایم .



شکل ۳-۱۴- روند ساخت نمونه های کششی تحت فشار



شکل ۳-۱۵- سطح مقطع نمونه بعد از شکست کششی تحت فشار

فصل چهارم
بحث و بررسی نتایج

۴-۱- مقدمه

مقادیر مقاومت کششی و خمشی غالباً با مقاومت فشاری مرتبط هستند . البته باید یادآور شد که ویژگی های ناحیه انتقال ، تاثیر بیشتری بر مقاومت کششی و خمشی (در مقایسه با مقاومت فشاری) دارد با افزایش مقاومت فشاری ، مقادیر مقاومت کششی و خمشی نیز غالباً افزایش می یابد . در بتن خود تراکم همانند بتن معمولی مقاومت خمشی به مواردی چون نسبت آب به سیمان ، حجم سنگدانه درشت ، کیفیت ناحیه انتقال بین سنگدانه ها و خمیر سیمان بستگی دارد . برخی محققین معتقدند با بکارگیری نسبت های اختلاط مشابه مقاومت خمشی بتن خودتراکم از بتن معمولی بیشتر است [۵۴] .

در این فصل از تحقیق نتایج حاصل از مقاومت (برشی مورب ، برشی مستقیم و کشش تحت شکافت) نمونه های بتن خودتراکم مورد نظر به شرح جدول و نمودارهای لازم ثبت گردیده و شکست و یا عدم شکست بتن های ساخته شده از انواع مختلف الیاف ها در اندازه و حجم مختلف از محل درز سرد ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است . لازم به توضیح است که آزمایش های کاربردی اعم از آزمایش های جریان اسلامپ ، جعبه L شکل ، قیف V شکل صرفاً جهت کنترل ارضای ضوابط بتن خودتراکم انجام گردیده است .

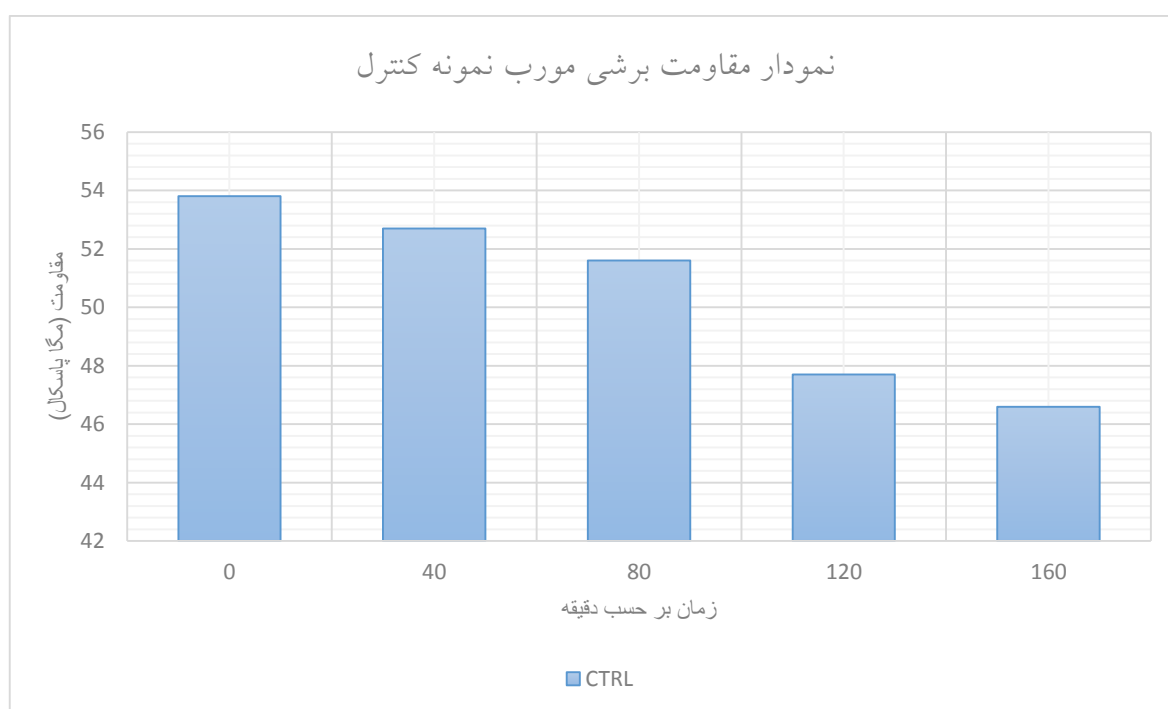
۴-۲- آزمایش های بتن سخت شده

۴-۱- مقاومت برشی مورب

نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب بر روی بتن خود متراکم بدون الیاف (نمونه کنترل) در جدول ۴-۱ و نتایج آزمایشات بتن خود متراکم دارای الیاف در جداول ۴-۲ تا ۴-۵ و نمودار های ۴-۲ تا ۴-۵ تحلیل شده است.

جدول ۴-۱- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه کنترل

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
بدون الیاف نمونه کنترل	۰	۵۳/۸
	۴۰	۵۱/۷
	۸۰	۵۰/۶
	۱۲۰	۴۷/۷
	۱۶۰	۴۶/۶

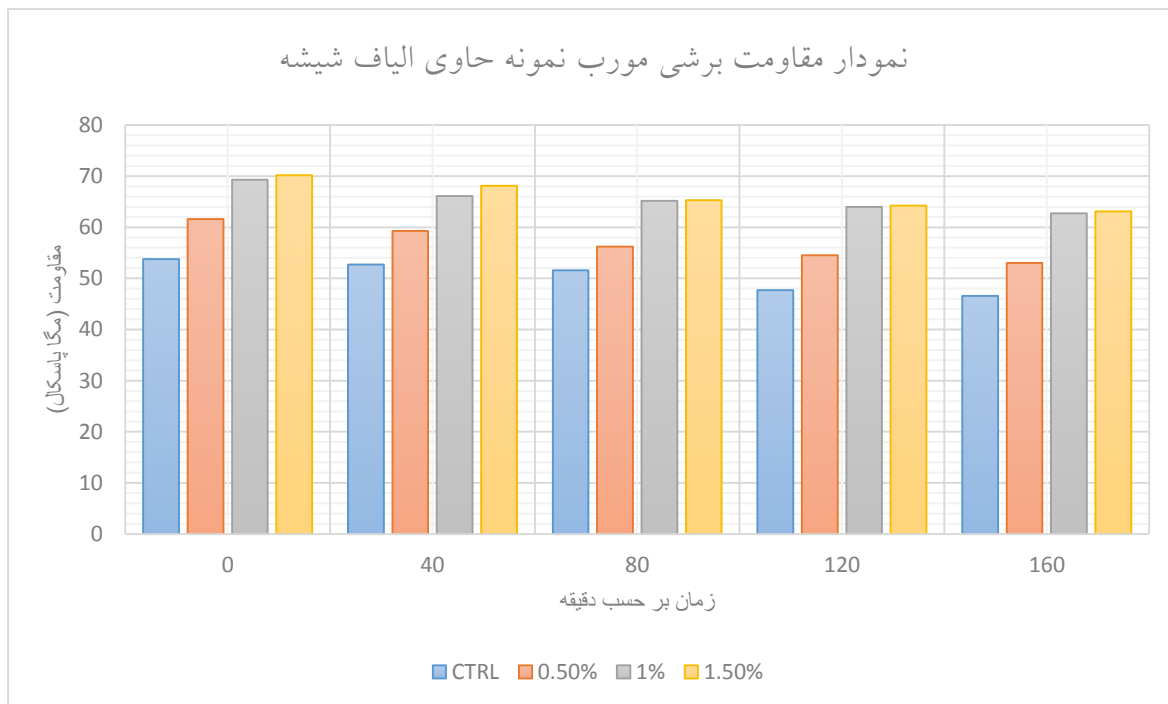


شکل ۴-۱- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه کنترل

چنانچه در نمودار شکل ۴-۱ نشان داده شده است مقاومت برشی مورب نمونه کنترل در زمان $T=40$ دقیقه ، ۴ درصد کاهش یافته است و با افزایش زمان بتن ریزی لایه دوم این مقدار افزایش یافته است. بطوریکه مقاومت برشی مورب در $T=160$ دقیقه ، ۱۴ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۲- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی الیاف شیشه

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
الیاف شیشه ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۶۱/۶
	۴۰	۵۹/۳
	۸۰	۵۶/۲
	۱۲۰	۵۴/۵
	۱۶۰	۵۳
الیاف شیشه ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۶۹/۳
	۴۰	۶۶/۱
	۸۰	۶۵/۲
	۱۲۰	۶۴
	۱۶۰	۶۲/۷
الیاف شیشه ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷۰/۲
	۴۰	۶۸/۱
	۸۰	۶۵/۳
	۱۲۰	۶۴/۲
	۱۶۰	۶۳/۱



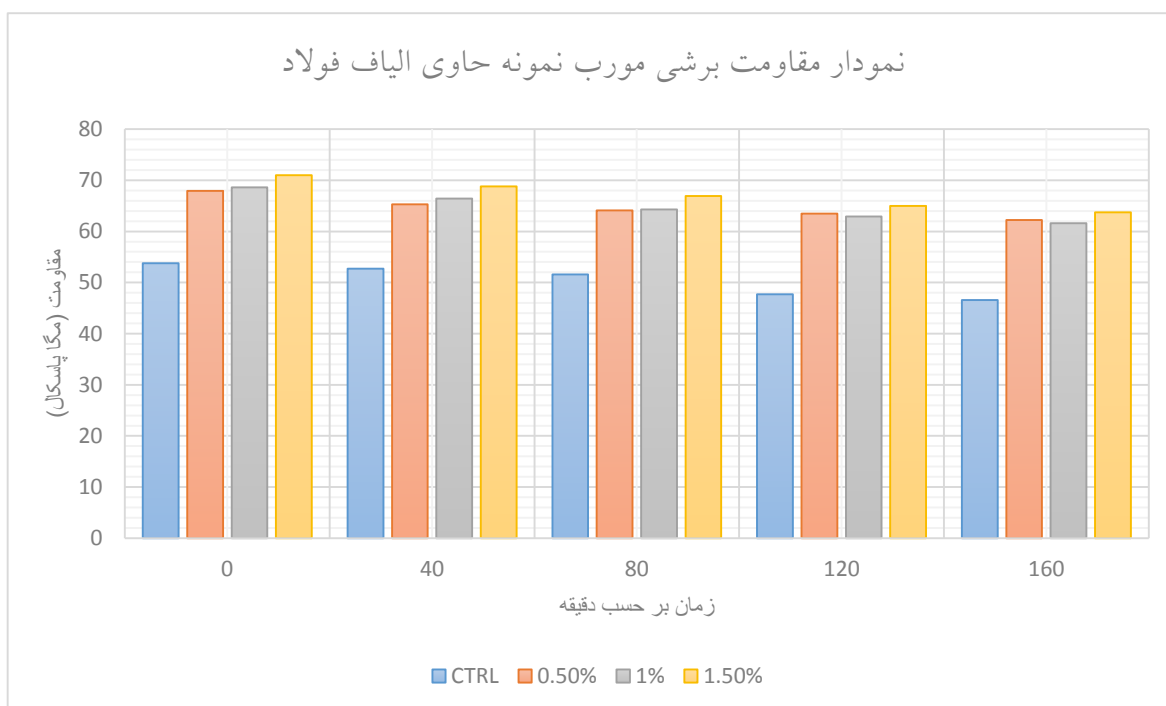
شکل ۴-۲- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه حاوی الیاف شیشه

چنانچه در نمودار شکل ۴-۲ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی الیاف شیشه نسبت به نمونه کنترل ۱۴ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۲۴ درصد و ۲۸ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی الیاف شیشه به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت برشی مورب ۲ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۲ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مورب مربوط به نمونه های حاوی الیاف شیشه به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی الیاف شیشه ، مربوط به نمونه های حاوی الیاف شیشه به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت برشی مورب در زمان $T=0$ دقیقه ، ۹ درصد کاهش یافته است.

جدول ۳-۴- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی الیاف فولاد

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
الیاف فولاد ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۶۷/۹
	۴۰	۶۵/۳
	۸۰	۶۴/۱
	۱۲۰	۶۳/۵
	۱۶۰	۶۲/۲
الیاف فولاد ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۶۸/۶
	۴۰	۶۶/۴
	۸۰	۶۴/۳
	۱۲۰	۶۲/۹
	۱۶۰	۶۱/۶
الیاف فولاد ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷۱
	۴۰	۶۸/۸
	۸۰	۶۶/۹
	۱۲۰	۶۵
	۱۶۰	۶۳/۷



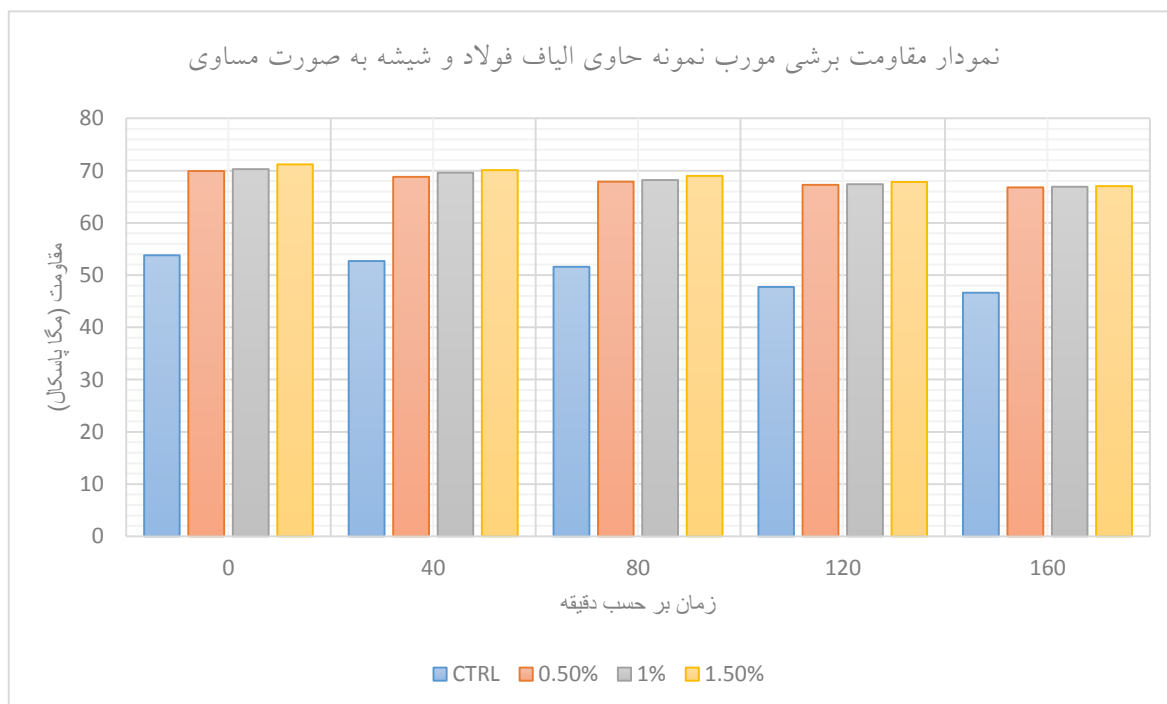
شکل ۳-۴- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه حاوی الیاف فولاد

چنانچه در نمودار شکل ۳-۴ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی الیاف فولاد نسبت به نمونه کنترل ۲۵ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد در صد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۲۷ درصد و ۳۱ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی الیاف فولاد به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت برشی مورب ۱/۵ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۲/۵ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مورب مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی الیاف فولاد، مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت برشی مورب در زمان $T=0$ دقیقه، ۸ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۴- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی الیاف شیشه و فولاد بصورت مساوی

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۶۹/۹
	۴۰	۶۸/۸
	۸۰	۶۷/۹
	۱۲۰	۶۷/۳
	۱۶۰	۶۶/۸
الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۷۰/۳
	۴۰	۶۹/۶
	۸۰	۶۸/۲
	۱۲۰	۶۷/۴
	۱۶۰	۶۶/۹
الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷۱/۲
	۴۰	۷۰/۱
	۸۰	۶۹
	۱۲۰	۶۷/۸
	۱۶۰	۶۷



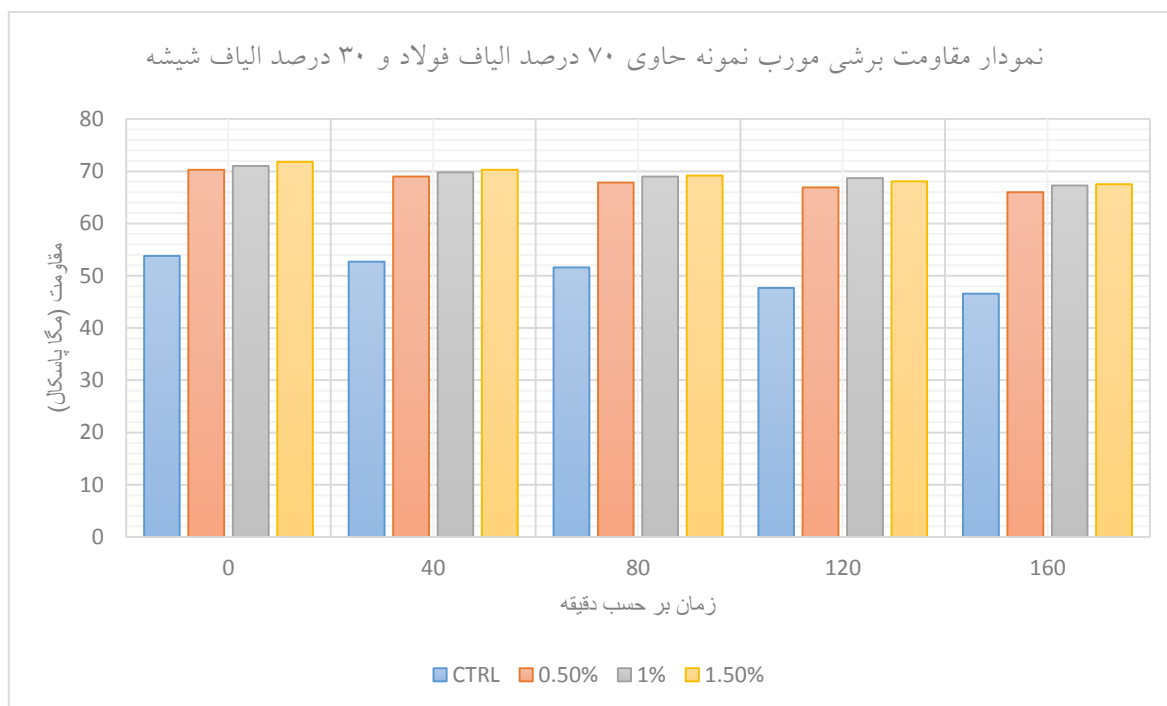
شکل ۴-۴- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه دارای الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی

چنانچه در نمودار شکل ۴-۴ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی نسبت به نمونه کنترل ۲۹ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۳۱ درصد و ۳۴ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت برشی مورب ۱/۵ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۲/۵ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مورب مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی ، مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت برشی مورب در زمان $T=0$ دقیقه ، ۷ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۵- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۷۰٪ الیاف فولاد ۳۰٪ الیاف شیشه ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷۰/۳
	۴۰	۶۹
	۸۰	۶۷/۸
	۱۲۰	۶۶/۹
	۱۶۰	۶۶
۷۰٪ الیاف فولاد ۳۰٪ الیاف شیشه ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۷۱
	۴۰	۶۹/۸
	۸۰	۶۹
	۱۲۰	۶۸/۷
	۱۶۰	۶۷,۳
۷۰٪ الیاف فولاد ۳۰٪ الیاف شیشه ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷۱/۸
	۴۰	۷۰/۳
	۸۰	۶۹/۲
	۱۲۰	۶۸/۱
	۱۶۰	۶۷/۵



شکل ۴-۵- نمودار مقاومت برشی مورب نمونه حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه

چنانچه در نمودار شکل ۴-۵ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی نسبت به نمونه کنترل ۳۰ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۳۲ درصد و ۳۵ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت برشی مورب ۱/۵ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۲/۵ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مورب مربوط به نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه، مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت برشی مورب در زمان $T=0$ دقیقه، ۵/۵ درصد کاهش یافته است.

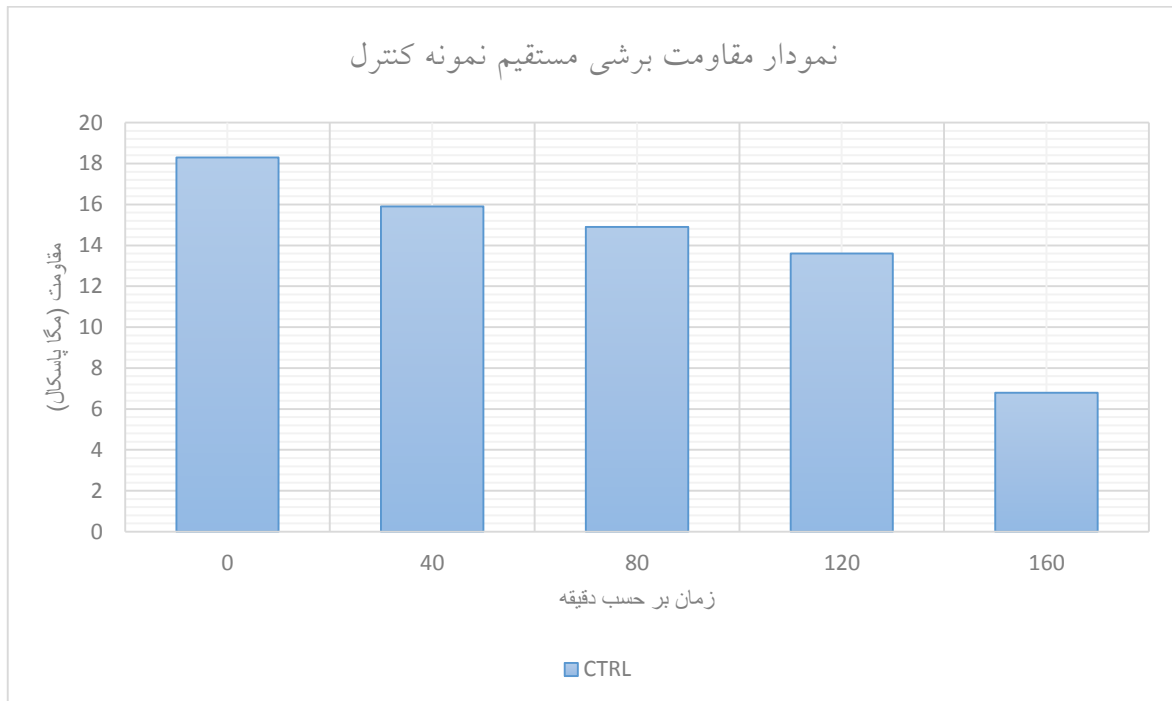
بهینه ترین عملکرد در مقاومت برشی مورب مربوط به نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه و به مقدار ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی بوده است که مقاومت برشی مورب را در زمان های ۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه نسبت به نمونه کنترل به ترتیب ۳۵، ۳۷، ۴۰، ۴۲ و ۴۵ درصد افزایش یافته است.

۴-۲- مقاومت برشی مستقیم

نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم بر روی بتن خود تراکم بدون الیاف (نمونه کنترل) در جدول ۴-۶ و نتایج آزمایشات بتن خودتراکم دارای الیاف در جداول ۴-۷ تا ۴-۱۰ و نمودار های ۴-۷ تا ۴-۱۰ تحلیل شده است.

جدول ۴-۶- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه کنترل

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
بدون الیاف نمونه کنترل	۰	۱۸/۳
	۴۰	۱۵/۹
	۸۰	۱۴/۹
	۱۲۰	۱۳/۶
	۱۶۰	۶/۸

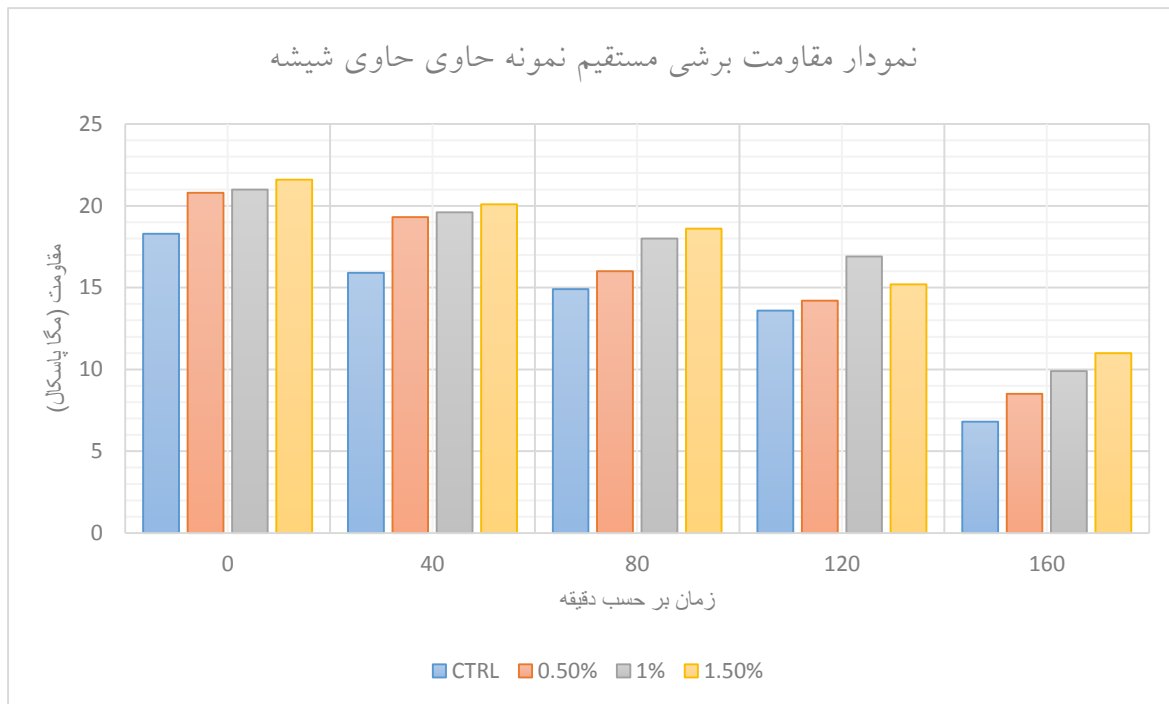


شکل ۴-۶- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه کنترل

چنانچه در نمودار شکل ۴-۶ نشان داده شده است مقاومت برشی مستقیم نمونه کنترل در زمان $T=40$ دقیقه ، ۱۳ درصد کاهش یافته است و با افزایش زمان بتن ریزی لایه دوم این مقدار افزایش یافته است. بطوریکه مقاومت برشی مستقیم در $T=160$ دقیقه ، ۶۲ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۷- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف شیشه

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
الیاف شیشه ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۲۰/۸
	۴۰	۱۹/۳
	۸۰	۱۶
	۱۲۰	۱۴/۲
	۱۶۰	۸/۵
الیاف شیشه ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۲۱
	۴۰	۱۹/۶
	۸۰	۱۸
	۱۲۰	۱۶/۹
	۱۶۰	۹/۹
الیاف شیشه ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۲۱/۶
	۴۰	۲۰/۱
	۸۰	۱۸/۶
	۱۲۰	۱۵/۲
	۱۶۰	۱۱



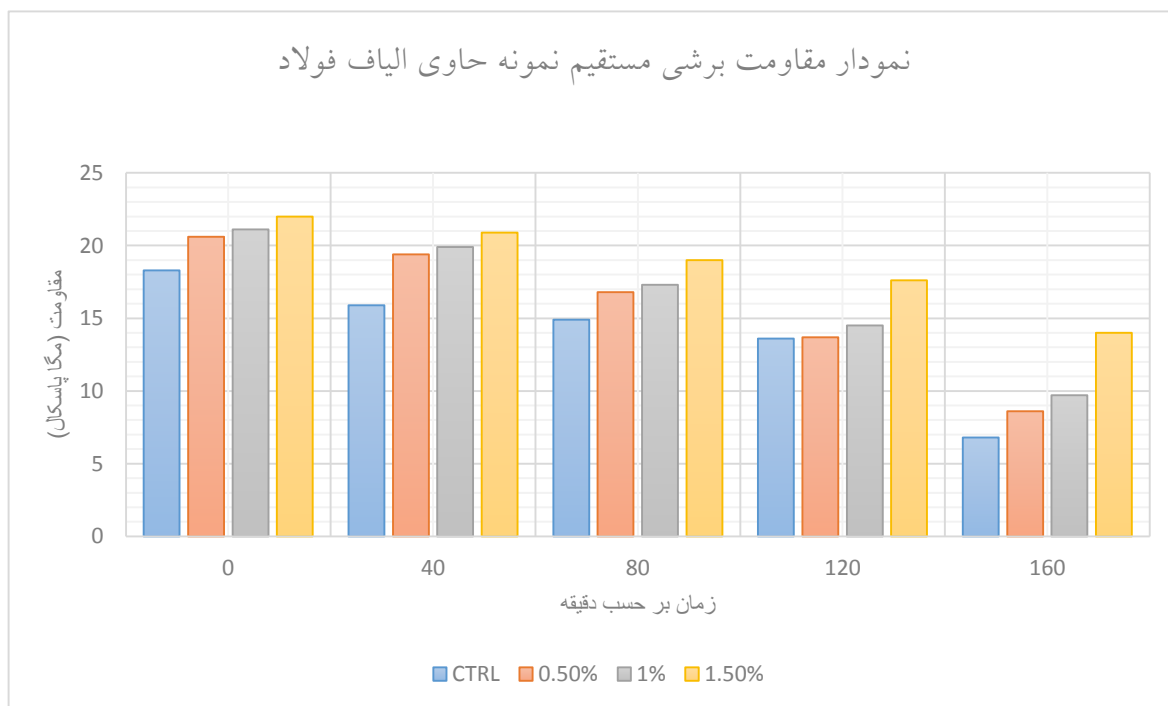
شکل ۴-۷- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه حاوی الیاف شیشه

چنانچه در نمودار شکل ۴-۷ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی الیاف شیشه نسبت به نمونه کنترل ۱۳ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۱۴ درصد و ۱۵ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی الیاف شیشه به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت برشی مستقیم ۵ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۸ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مستقیم مربوط به نمونه های حاوی الیاف شیشه به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف شیشه ، مربوط به نمونه های حاوی الیاف شیشه به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت برشی مستقیم در زمان $T=0$ دقیقه ، ۵۵ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۸- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف فولاد

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
الیاف فولاد ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۲۰/۶
	۴۰	۱۹/۴
	۸۰	۱۶/۸
	۱۲۰	۱۳/۷
	۱۶۰	۸/۶
الیاف فولاد ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۲۱/۱
	۴۰	۱۹/۹
	۸۰	۱۷/۳
	۱۲۰	۱۴/۵
	۱۶۰	۹/۷
الیاف فولاد ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۲۲
	۴۰	۲۰/۹
	۸۰	۱۹
	۱۲۰	۱۷/۶
	۱۶۰	۱۴



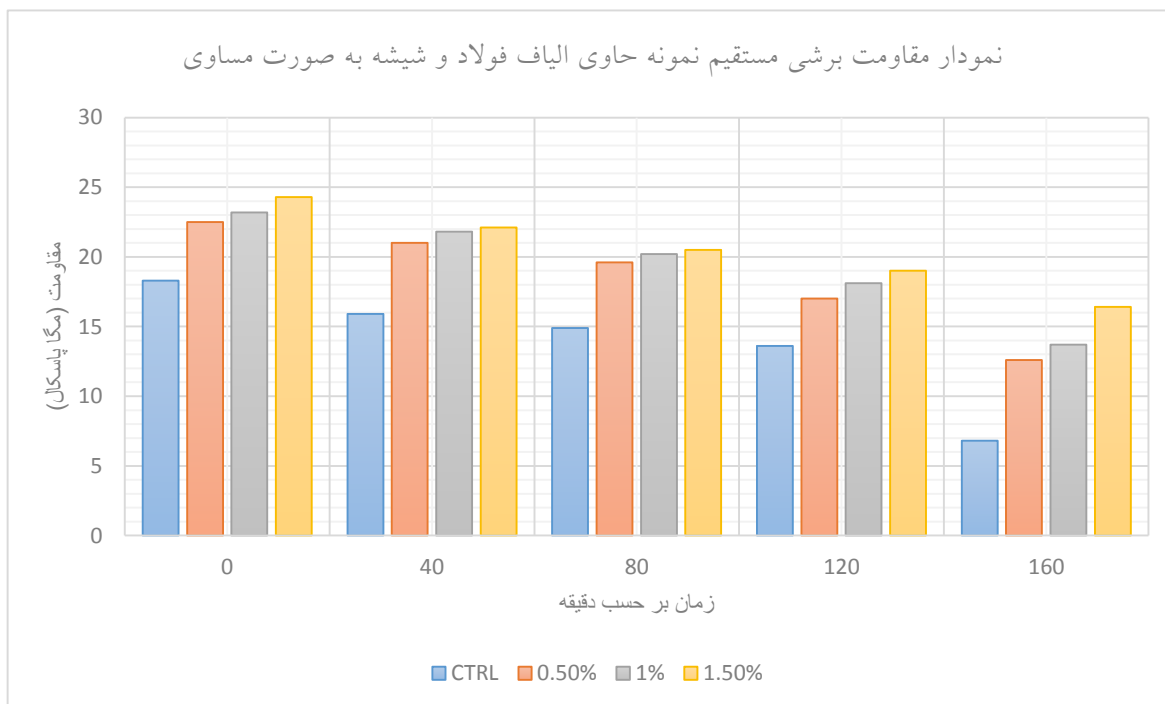
شکل ۴-۸- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه حاوی الیاف فولاد

چنانچه در نمودار شکل ۴-۸ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی الیاف فولاد نسبت به نمونه کنترل ۱۴ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد در صد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۱۵ درصد و ۱۶ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی الیاف فولاد به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت برشی مستقیم ۶ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۷ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مستقیم مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف فولاد، مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت برشی مستقیم در زمان $T=0$ دقیقه، ۵۱ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۹- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف شیشه و فولاد بصورت مساوی

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۲۲/۵
	۴۰	۲۱
	۸۰	۱۹/۶
	۱۲۰	۱۷
	۱۶۰	۱۲/۶
الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۲۳/۲
	۴۰	۲۱/۸
	۸۰	۲۰/۲
	۱۲۰	۱۸/۱
	۱۶۰	۱۳/۷
الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۲۴/۹
	۴۰	۲۲/۱
	۸۰	۲۰/۵
	۱۲۰	۱۹
	۱۶۰	۱۶/۴



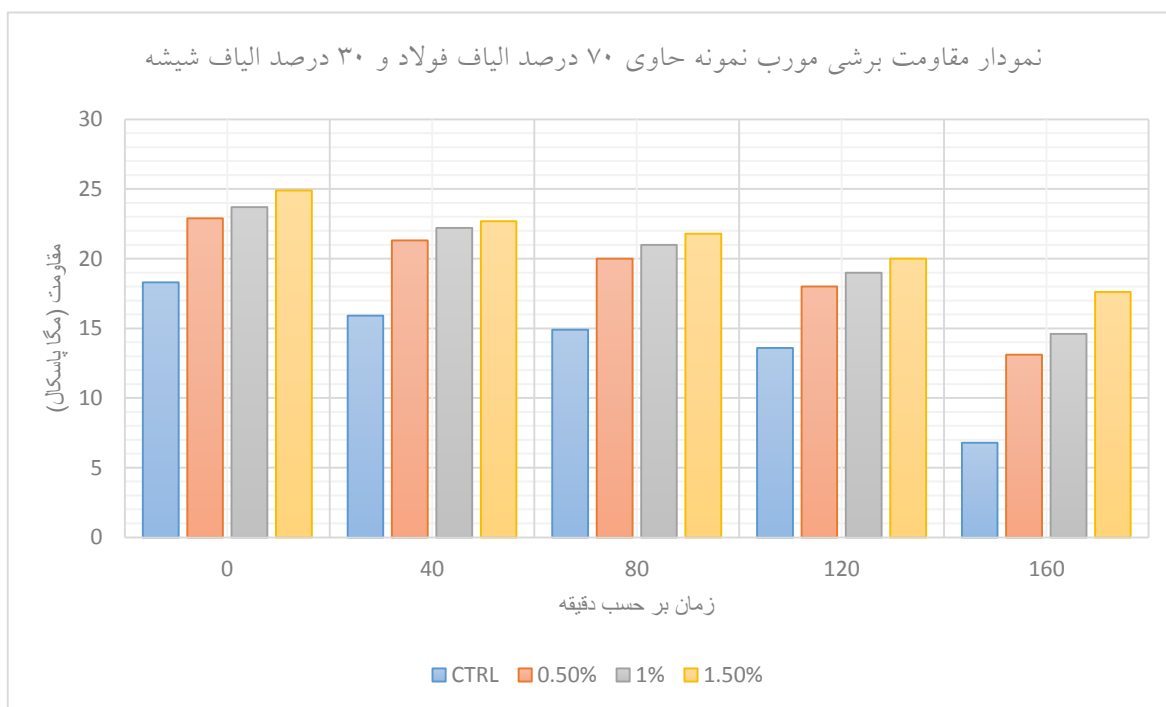
شکل ۴-۹- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه حاوی الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی

چنانچه در نمودار شکل ۴-۹ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی نسبت به نمونه کنترل ۱۷ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۱۹ درصد و ۲۰ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت برشی مستقیم ۷ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۶ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مستقیم مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی ، مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت برشی مستقیم در زمان $T=0$ دقیقه ، ۴۸ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۱۰- نتایج آزمایشات مقاومت برشی مستقیم نمونه های حاوی الیاف ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۷۰٪ الیاف فولاد ۳۰٪ الیاف شیشه ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۲۲/۹
	۴۰	۲۱/۳
	۸۰	۲۰
	۱۲۰	۱۸
	۱۶۰	۱۳/۱
۷۰٪ الیاف فولاد ۳۰٪ الیاف شیشه ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۲۳/۷
	۴۰	۲۲/۲
	۸۰	۲۱
	۱۲۰	۱۹
	۱۶۰	۱۴/۶
۷۰٪ الیاف فولاد ۳۰٪ الیاف شیشه ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۲۴/۹
	۴۰	۲۲/۷
	۸۰	۲۱/۸
	۱۲۰	۲۰
	۱۶۰	۱۷/۶



شکل ۴-۱۰- نمودار مقاومت برشی مستقیم نمونه حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه

چنانچه در نمودار شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی نسبت به نمونه کنترل ۱۸ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۲۰ درصد و ۲۲ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت برشی مورب ۸ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۵ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مورب مربوط به نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه، مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت برشی مورب در زمان $T=0$ دقیقه، ۴۵ درصد کاهش یافته است.

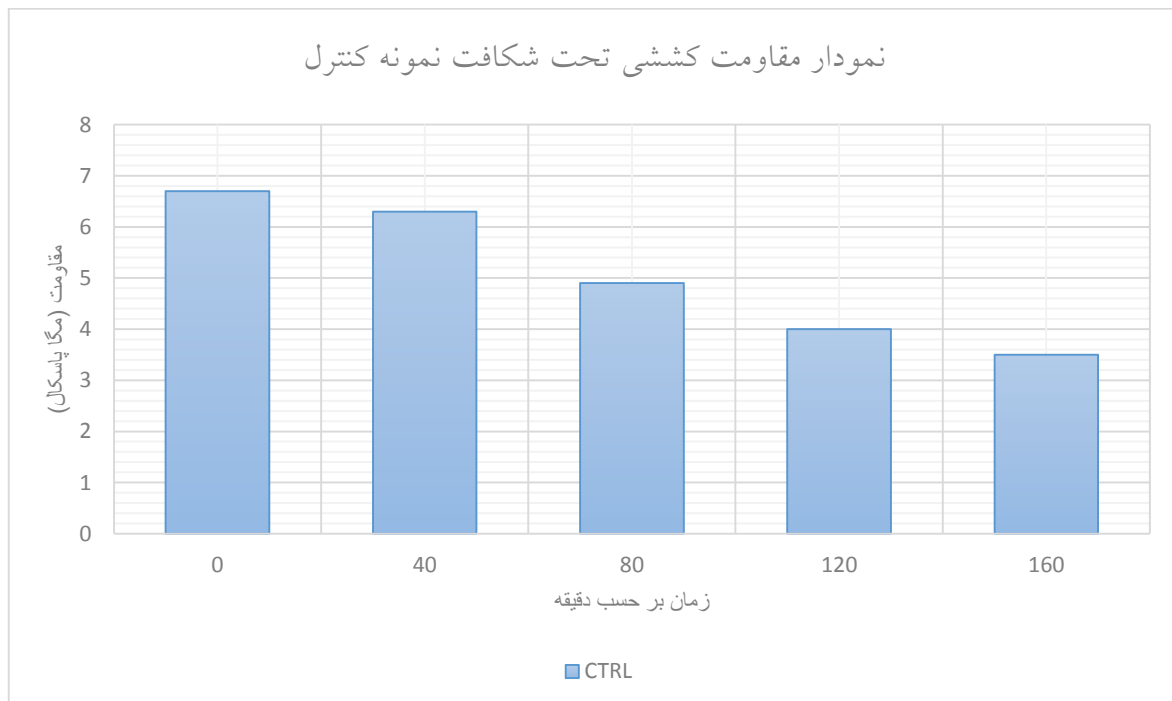
بهینه ترین عملکرد در آزمایش مقاومت برشی مستقیم مربوط به نمونه های دارای الیاف شیشه و فولاد به صورت مساوی و به مقدار ۱/۵٪ وزن مواد سیمانی بوده است که مقاومت برشی مورب را در زمان های ۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه نسبت به نمونه کنترل به ترتیب ۳۶، ۳۷، ۳۷، ۳۸ و ۳۹ درصد افزایش یافته است.

۳-۴- مقاومت کششی تحت شکافت

نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت بر روی بتن خود متراکم بدون الیاف (نمونه کنترل) در جدول ۴-۱۱ و نتایج آزمایشات بتن خود متراکم دارای الیاف در جداول ۴-۱۲ تا ۴-۱۵ و نمودار های ۴-۱۲ تا ۴-۱۶ تحلیل شده است.

جدول ۴-۱۱- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه کنترل

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
بدون الیاف نمونه کنترل	۰	۶/۷
	۴۰	۶/۳
	۸۰	۴/۹
	۱۲۰	۴
	۱۶۰	۳/۵

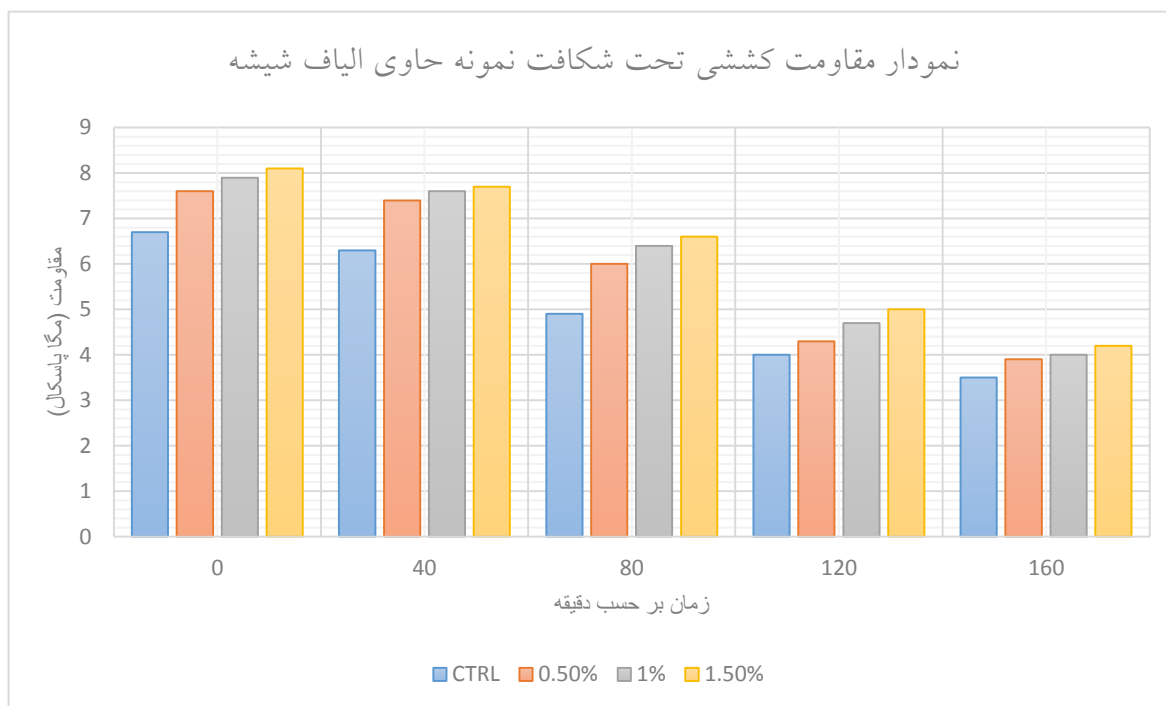


شکل ۴-۱۱- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه کنترل

چنانچه در نمودار شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است مقاومت کششی تحت شکافت نمونه کنترل در زمان $T=40$ دقیقه ، ۵ درصد کاهش یافته است و با افزایش زمان بتن ریزی لایه دوم این مقدار افزایش یافته است. بطوریکه مقاومت کششی تحت شکافت در $T=160$ دقیقه ، ۴۷ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۱۲- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی الیاف شیشه

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
الیاف شیشه ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷/۶
	۴۰	۷/۴
	۸۰	۶
	۱۲۰	۴/۳
	۱۶۰	۳/۹
الیاف شیشه ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۷/۹
	۴۰	۷/۶
	۸۰	۶/۴
	۱۲۰	۴/۷
	۱۶۰	۴
الیاف شیشه ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۸/۱
	۴۰	۷/۷
	۸۰	۶/۶
	۱۲۰	۵
	۱۶۰	۴/۲



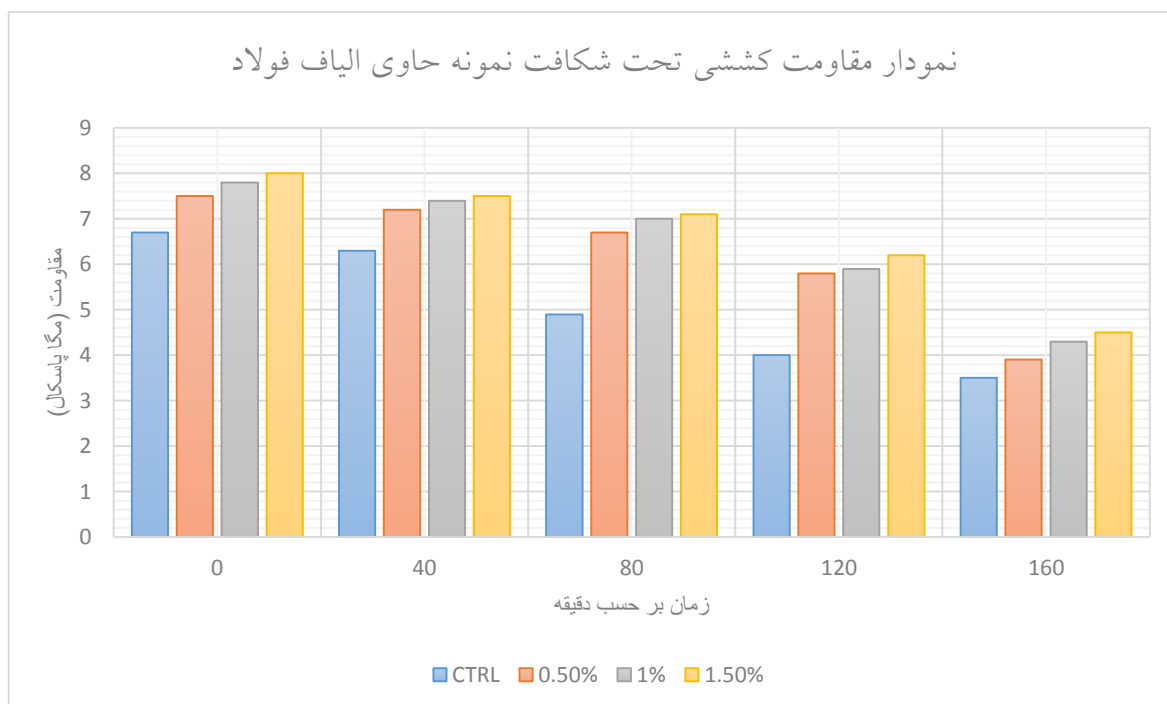
شکل ۴-۱۲- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه حاوی الیاف شیشه

چنانچه در نمودار شکل ۴-۷ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی الیاف شیشه نسبت به نمونه کنترل ۱۴ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۱۵ درصد و ۱۷ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی الیاف شیشه به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت کششی تحت شکافت ۲/۵ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۲/۵ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت کششی تحت شکافت مربوط به نمونه های حاوی الیاف شیشه به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی الیاف شیشه، مربوط به نمونه های حاوی الیاف شیشه به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت کششی تحت شکافت در زمان $T=0$ دقیقه، ۴۸ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۱۳- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی الیاف فولاد

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
الیاف فولاد ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷/۵
	۴۰	۷/۲
	۸۰	۶/۷
	۱۲۰	۵/۸
	۱۶۰	۳/۹
الیاف فولاد ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۷/۸
	۴۰	۷/۴
	۸۰	۷
	۱۲۰	۵/۹
	۱۶۰	۴/۳
الیاف فولاد ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۸
	۴۰	۷/۵
	۸۰	۷/۱
	۱۲۰	۶/۲
	۱۶۰	۴/۵



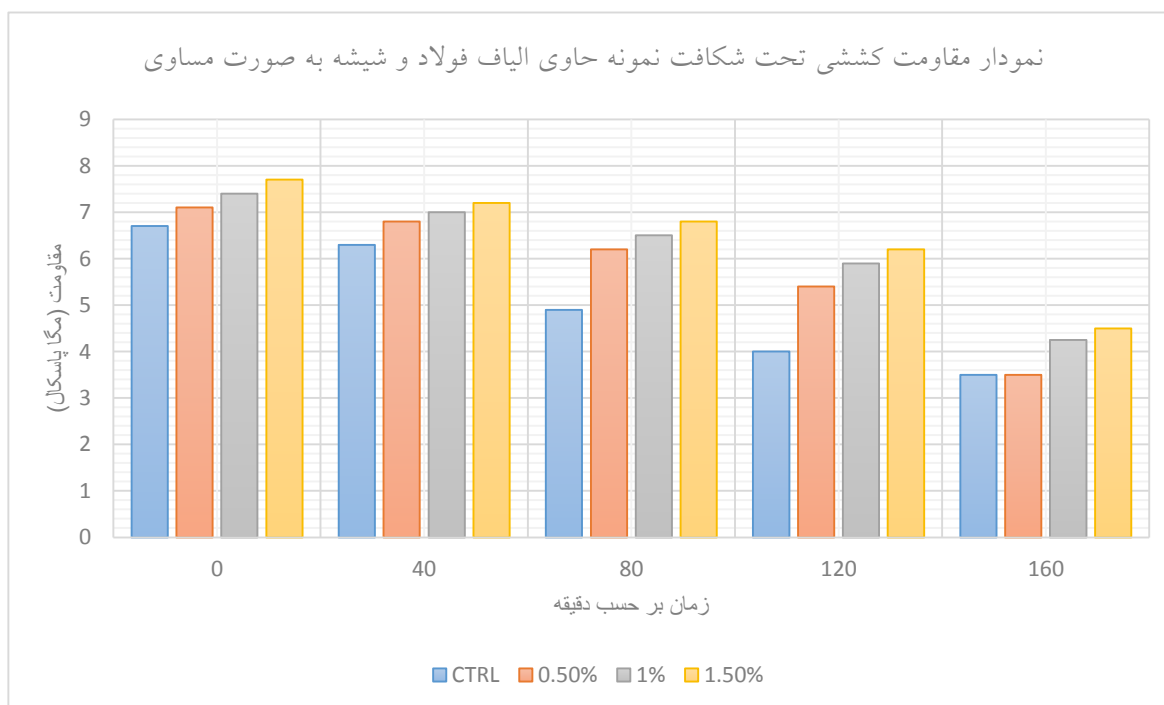
شکل ۴-۱۳- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه حاوی الیاف فولاد

چنانچه در نمودار شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی الیاف فولاد نسبت به نمونه کنترل ۱۳ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۱۵ درصد و ۱۷ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی الیاف فولاد به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت کششی تحت شکافت ۳ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۲ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مستقیم مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی الیاف فولاد ، مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت کششی تحت شکافت در زمان $T=0$ دقیقه ، ۴۸ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴-۱۴- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی الیاف شیشه و فولاد بصورت مساوی

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷/۱
	۴۰	۶/۸
	۸۰	۶/۲
	۱۲۰	۵/۴
	۱۶۰	۳/۵
الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۷/۴
	۴۰	۷
	۸۰	۶/۵
	۱۲۰	۵/۹
	۱۶۰	۴/۲۵
الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷/۷
	۴۰	۷/۲
	۸۰	۶/۸
	۱۲۰	۶/۲
	۱۶۰	۴/۵



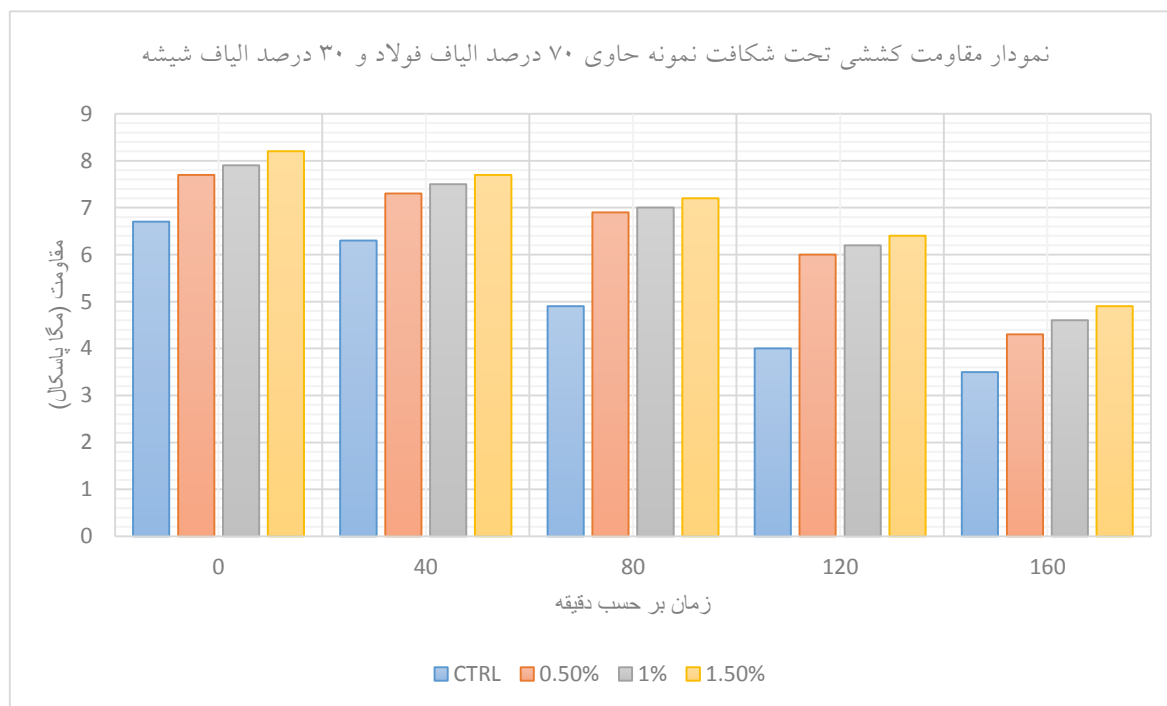
شکل ۴-۱۴- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه حاوی الیاف فولاد و شیشه به صورت مساوی

چنانچه در نمودار شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی نسبت به نمونه کنترل ۱۲ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۱۳ درصد و ۱۴ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت کششی تحت شکافت ۷ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۶ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت کششی تحت شکافت مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی ، مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت کششی تحت شکافت در زمان $T=0$ دقیقه ، ۴۸ درصد کاهش یافته است

جدول ۴-۱۵- نتایج آزمایشات مقاومت کششی تحت شکافت نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه

نوع و مقدار الیاف	زمان بتن ریزی لایه دوم بر حسب دقیقه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۷۰٪ الیاف فولاد ۳۰٪ الیاف شیشه ۰/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۷/۷
	۴۰	۷/۳
	۸۰	۶/۹
	۱۲۰	۶
	۱۶۰	۴/۳
۷۰٪ الیاف فولاد ۳۰٪ الیاف شیشه ۱ درصد مواد سیمانی	۰	۷/۹
	۴۰	۷/۵
	۸۰	۷
	۱۲۰	۶/۲
	۱۶۰	۴/۶
۷۰٪ الیاف فولاد ۳۰٪ الیاف شیشه ۱/۵ درصد مواد سیمانی	۰	۸/۲
	۴۰	۷/۷
	۸۰	۷/۲
	۱۲۰	۶/۴
	۱۶۰	۴/۹



شکل ۴-۱۵- نمودار مقاومت کششی تحت شکافت نمونه حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه

چنانچه در نمودار شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است در زمان $T=0$ دقیقه مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی نسبت به نمونه کنترل ۱۴ درصد افزایش یافته است که این مقدار با افزایش مقدار الیاف به ۱ درصد و ۱/۵ درصد درصد وزن مواد سیمانی به ترتیب به ۱۶ درصد و ۱۸ درصد افزایش یافته است.

همچنین در زمان $T=40$ دقیقه نمونه حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه به مقدار ۰/۵ درصد وزن مواد سیمانی مقاومت برشی مورب ۲ درصد کاهش یافته است که نسبت به نمونه کنترل ۳ درصد کاهش مقاومت کمتری داشته است. بیشترین مقاومت برشی مورب مربوط به نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه به مقدار ۱/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=0$ دقیقه میباشد. همچنین بیشترین کاهش مقاومت برشی مورب نمونه های حاوی ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد شیشه، مربوط به نمونه های حاوی الیاف فولاد و شیشه بصورت مساوی به مقدار ۰/۵ درصد مواد سیمانی در زمان $T=160$ دقیقه بوده است که نسبت به مقاومت برشی مورب در زمان $T=0$ دقیقه، ۴۴ درصد کاهش یافته است.

بهینه ترین عملکرد در آزمایش مقاومت کششی تحت شکافت مربوط به نمونه های دارای ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه و به مقدار ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی بوده است که مقاومت برشی مورب را در زمان های ۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۱۶۰ دقیقه نسبت به نمونه کنترل به ترتیب ۱۴، ۱۷، ۲۰، ۲۳ و ۲۷ درصد افزایش یافته است.

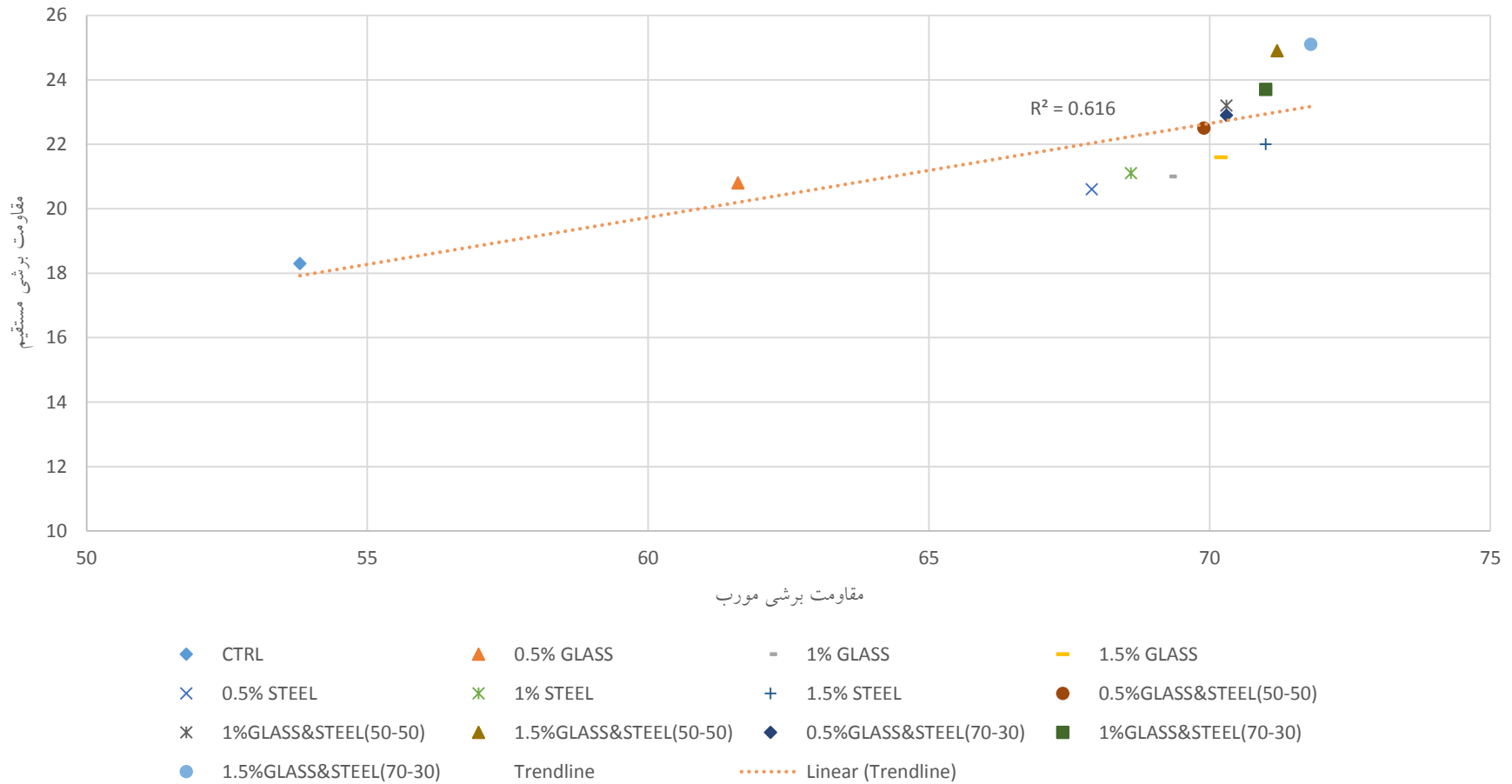
۴-۴- ارتباط مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب بتن خود متراکم حاوی

الیاف

در شکل های ۴-۱۶ تا ۴-۲۰ نمودار مقاومت برشی مستقیم بر حسب مقاومت برشی مورب برای هر کدام از زمان های ریختن لایه ی دوم رسم شده است و سپس برآزش بر مبنای رگرسیون خطی بر روی داده ها انجام شده و ضریب همبستگی گزارش شده است.

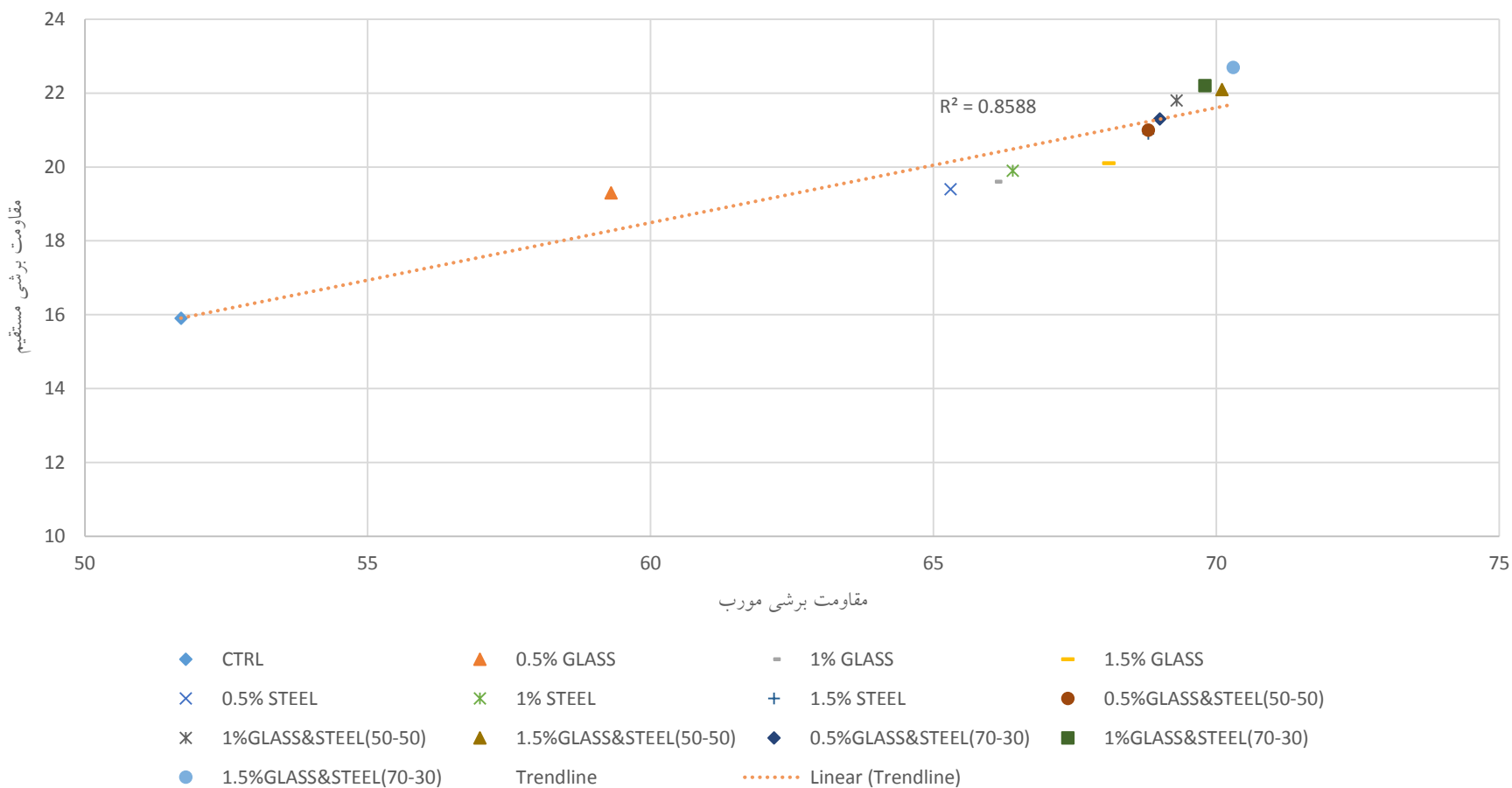
چنانچه از نمودار ها برداشت میشود همبستگی خوبی بین مقادیر بدست آمده برای مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان های ثابت وجود دارد.

رابطه بین مقاومت برشی مورب و مقاومت برشی مستقیم در زمان $T=0$



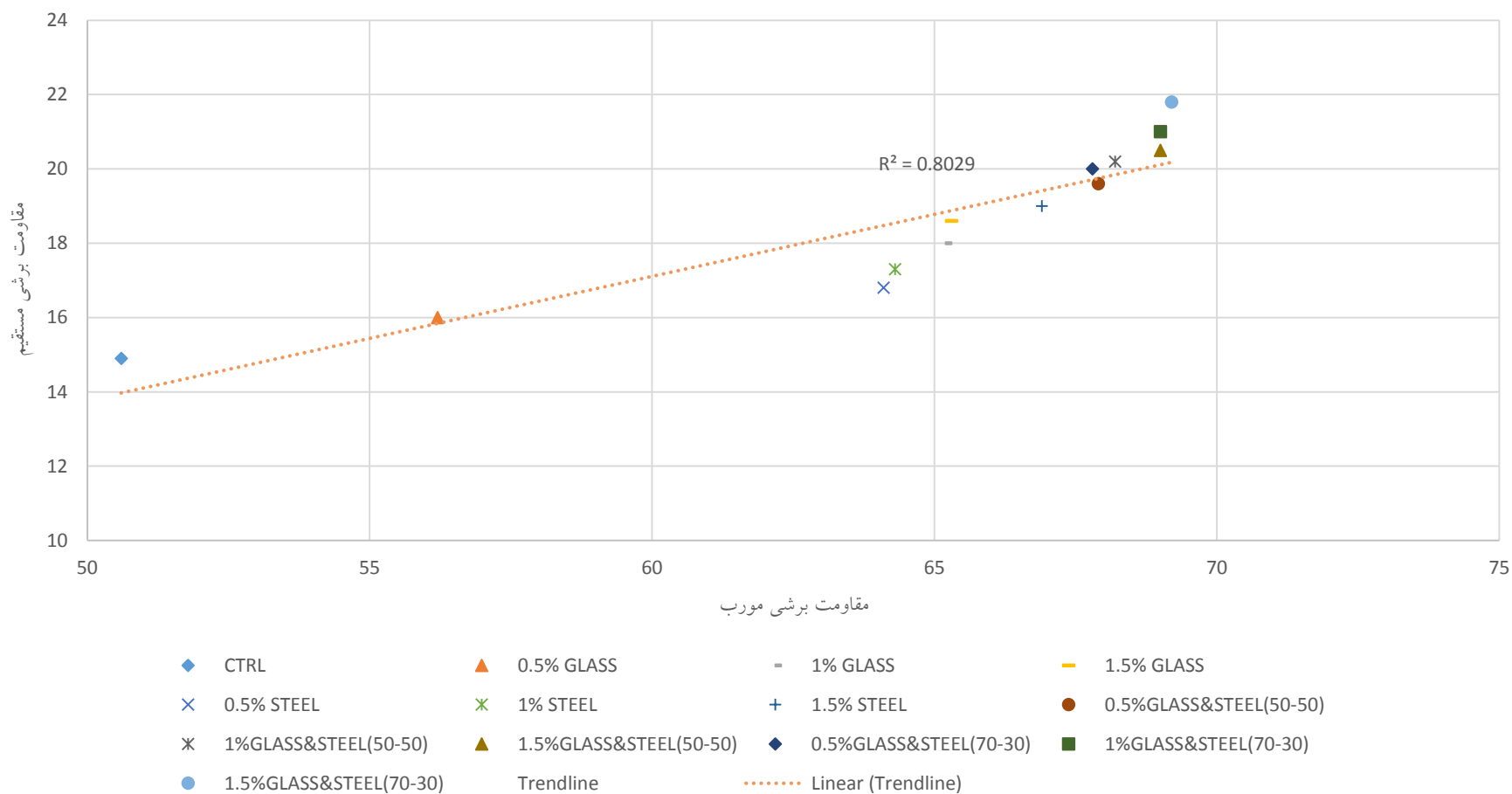
شکل ۴-۱۶- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان $T=0$

رابطه بین مقاومت برشی مورب و مقاومت برشی مستقیم در زمان $T=40$



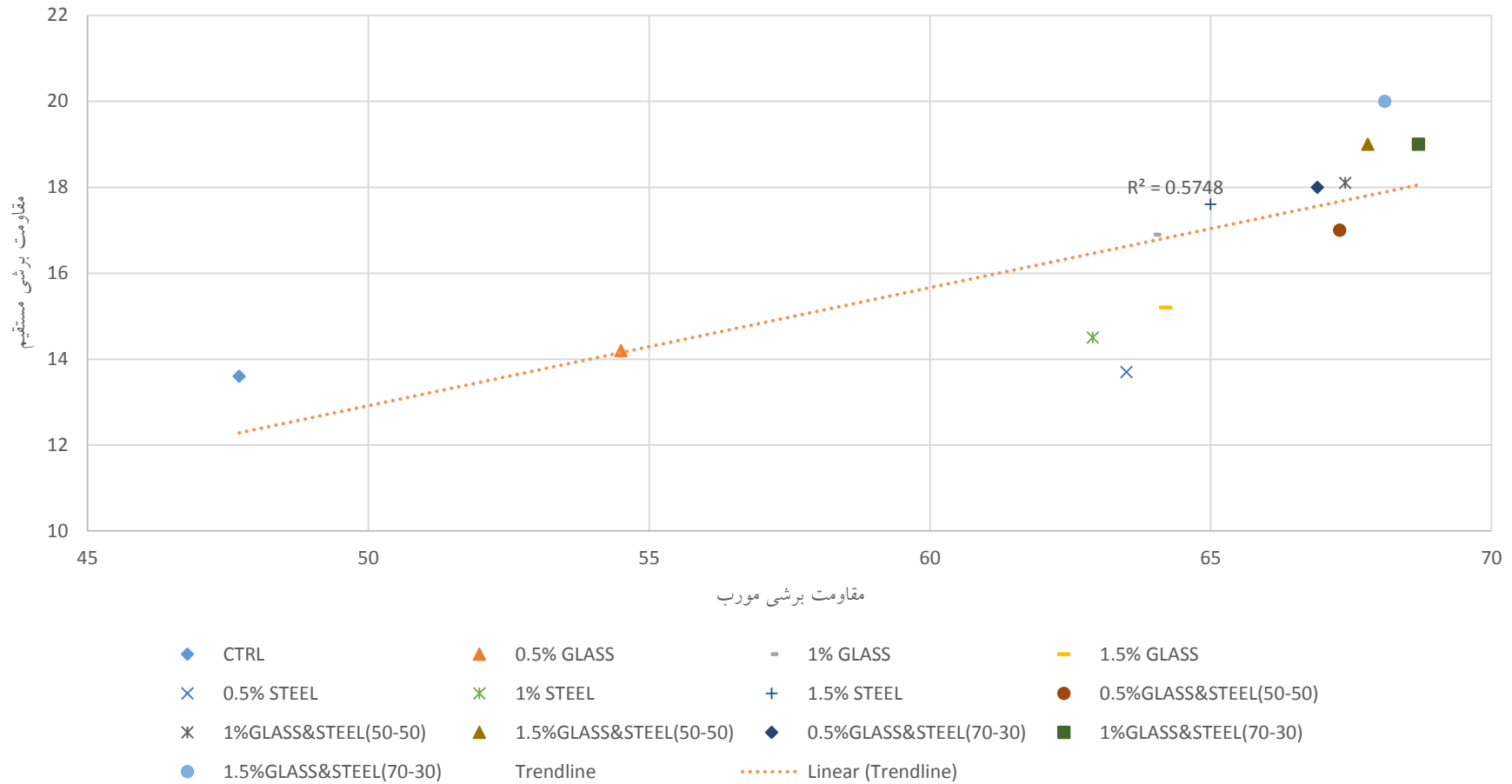
شکل ۴-۱۷- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان $T=40$

رابطه بین مقاومت برشی مورب و مقاومت برشی مستقیم در زمان T=80



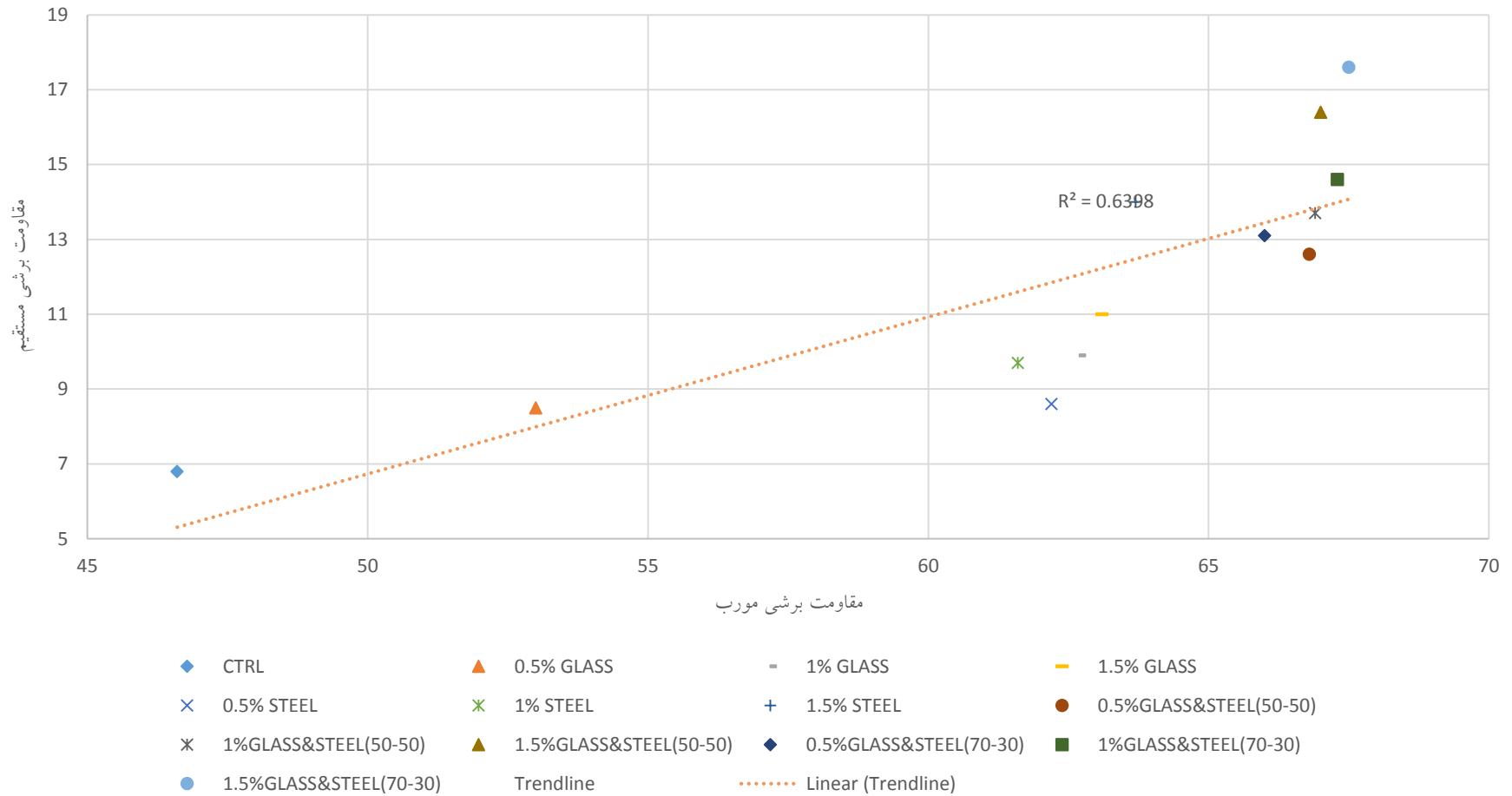
شکل ۴-۱۸- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان T=80

رابطه بین مقاومت برشی مورب و مقاومت برشی مستقیم در زمان T=120



شکل ۴-۱۹- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان T=120

رابطه بین مقاومت برشی مورب و مقاومت برشی مستقیم در زمان T=160



شکل ۴-۲۰- نمودار رابطه بین مقاومت برشی مستقیم و مقاومت برشی مورب در زمان T=۱۶۰

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

این پژوهش با هدف بررسی تاثیر کاربرد الیاف شیشه و فولاد بر روی خواص مکانیکی و دوام بتن خود تراکم انجام شده است. در طراحی طرح مخلوط های طرح حاضر از ۱۲ نوع طرح مخلوط استفاده شده است که الیاف شیشه و فولاد به تنهایی و در ترکیب با یک دیگر به مقدار ۰/۵ ، ۱ و ۱/۵ درصد وزن مواد سیمانی محاسبه شده اند و نمونه ی شاهد (کنترل) بدون استفاده از الیاف ساخته شده است و بعضی از طرح مخلوط های برای صحت سنجی تکرار شده اند.

در ادامه این فصل نتیجه گیری کلی از پژوهش حاضر و پیشنهادات برای ادامه پژوهش ذکر شده است.

۵-۲- نتیجه گیری

- افزودن الیاف به بتن خود تراکم سبب کاهش اسلامپ و روانی آن میگردد که ما در این پژوهش برای ارضای الزامات بتن خودتراکم به مقدار افزودنی شیمیایی آن اضافه کردیم.
- افزودن الیاف به بتن خود تراکم مقاومت برشی مورب را افزایش میدهد و از کاهش شدید مقاومت برشی در بتن خود تراکم ریخته شده در لایه مجزا جلوگیری میکند.

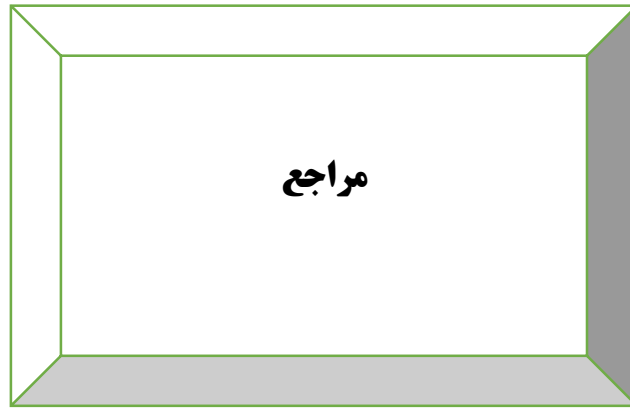
- بهینه ترین عملکرد در آزمایش مقاومت برشی مورب مربوط به نمونه های دارای ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه میباشد.
- عملکرد الیاف در مقاومت برشی مورب بهینه تر از مقاومت برشی مستقیم میباشد.
- افزودن الیاف به بتن خود تراکم مقاومت برشی مستقیم را افزایش میدهد و از کاهش شدید مقاومت برشی در بتن خود تراکم ریخته شده در لایه مجزا جلوگیری میکند.
- بهینه ترین عملکرد در آزمایش مقاومت برشی مستقیم مربوط به نمونه های دارای ۵۰ درصد الیاف فولاد و ۵۰ درصد الیاف شیشه میباشد.
- افزودن الیاف به بتن خود تراکم مقاومت کششی تحت شکافت را افزایش میدهد و از کاهش شدید مقاومت کششی در بتن خود تراکم ریخته شده در لایه مجزا جلوگیری میکند.
- بهینه ترین عملکرد در آزمایش مقاومت کششی تحت شکافت مربوط به نمونه های دارای ۷۰ درصد الیاف فولاد و ۳۰ درصد الیاف شیشه میباشد.
- الیاف فولاد عملکرد بهتری نسبت به الیاف شیشه در کاهش نقص درز سرد داشته است.
- عملکرد الیاف شیشه و فولاد در ترکیب باهم بهتر و بهینه تر میباشد.

۵-۳- پیشنهادات

پیشنهاد می گردد حدامکان از ایجاد درز سرد در بتن ریزی بتن خود تراکم جلوگیری به عمل آید . چرا که درز سرد مطابق نتایج باعث کاهش مقاومت بتن خودتراکم می گردد.

- استفاده از الیاف در شکل های دیگر
- استفاده از روشهای دیگر عمل آوری
- استفاده ازسیمان های مختلف

- استفاده از پوزولان های دیگر
- بررسی تاثیر افزودن الیاف بر مقاومت الکتریکی بتن
- بررسی تاثیر افزودن الیاف بر مقاومت حرارتی بتن



منابع فارسی

- [۱] فروغی اصل، علی، مقاله ارائه شده در اولین کارگاه آموزشی بتن خودتراکم " بررسی ویژگی های عمومی بتن خودتراکم و دلایل گسترش آن در دنیا "، ۱۰ اسفند ۱۳۸۵
- [۲] کیوانی، عبدالله. اصول و تکنولوژی بتن مسلح به الیاف فولادی. تهران: رودکی، ۱۳۶۹
- [۱۵] هورنهاد، ه، پایان نامه کارشناسی ارشد، " طراحی، ساخت و بررسی خواص مکانیکی بتن های خودتراکم "، پایان نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان، بهار ۶۳
- [۲۳] قدوسی، پ.، " روش های طراحی نسبت های اختلاط در بتن خود تراکم "، اولین کارگاه بتن خودتراکم، تهران، اسفند ۹۳
- [۲۴] صنعتی منفرد، سجاد، جاهد، سید حسین، بتن های الیافی و کاربردهای آن، دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران، ۱۳۸۳
- [۲۵] خالو، علیرضا، " رفتار ها و کنترل بتن الیافی "، مجموعه مقالات اولین کنفرانس تکنولوژی بتن الیافی، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۸
- [۳۴] صدر ممتازی، علی، افسوس بی ریا. حامد، باقری پور اصل. میثم " بررسی و مطالعه آزمایشگاهی بتن های مسلح به الیاف شیشه " هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشکده مهندسی شهید نیکبخت زاهدان
- [۳۷] قمبری چمازکتی، علی، رکرکیان، علی، اکبری، رضا " بررسی اثر الیاف فولادی بر روی مقاومت خمشی تیر بتنی " دومین کنفرانس ملی سازه - زلزله - ژئوتکنیک، ۱۳۹۱
- [۵۴] مجتبی دوستعلی نژاد، بررسی تاثیر پوزولانها بر خصوصیات مکانیکی بتن خودتراکم اجرا شده در لایه های مجزا، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی تبریز. ۱۳۹۸

منابع لاتین

- [3] Okamura, H., "Self-Compacting High-performance Concrete". Concrete International, Vol.19, No.7, July 1997
- [4] Takada, K., pelova, G.I. and Walraven, J.C., "Influences of Mixing efficiency on the mixture proportions of general purpose self-compacting concrete". International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Cements Sherbrooke Canada, pp.19-39, 2001
- [5] soroushian, p., "Secondary reinforcement adding cellulose fibers". ACI, Concrete International, pp. 28-38, 1986
- [6] Lin, Wei-ling., "Toughness behaviour of fiber reinforced concrete". Proceedings of the Fourth RILEM International symposium, Sheffield, UK, pp.299-315, 1992.
- [7] Sivakumar, A., and Santhanam, M., "A quantitative study on the plastic shrinkage crack in high strength hybrid fiber reinforced concrete". Cement & Concrete Composites, pp.571-581, 2007

- [8] Kamal H. Khayat, Weina Meng Effect of hybrid fibers on fresh, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost effective UHPC, April. 2-3, 2018
- [9] N.Banthia, N. Nadakumar; "Crack growth resistance of hybrid fiber cement composite", cement and concrete composite, p.p. 3-9, 2003
- [10] Khayat, K. H.; Omran, A.; and Megid, W. A., "Evaluation of Thixotropy of Self-Consolidating Concrete and Influence on Concrete Performance," 3rd Iberian Congress on Self-Compacting Concrete, Progress and Opportunities, Dec. 3-4, 2012, Madrid, Spain.
- [11] Skarendahl, A., Petersson, Ö., "State of the Art Report of RILEM". Technical Committee 174-SCC, Self-Compacting Concrete, No. 23, pp.141-149, 2001
- [12] Nehdi, M., Ladanchuk, J.D., "Fiber Synergy in Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete". ACI Material Journal, Vol.101, No.6, pp. 508-517, November- December 2004
- [13] R.Saleh Ahari, T. Kemal Erdem, K. Ramyar, "Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete",75 (2015) 89–98
- [14] Feys, D., Verhoeven, R., Schutter, G., "Fundamental study of the rheology of self-compacting concrete, composed with Belgian materials".
- [16] Hayakawa, M., Matsuoka, Y., Yokota, K., "Application of Super Workable Concrete in the Construction of 70-Story Building in Japan". ACI SP-154, Detroit, 1995
- [17] Qian, C.X., Stoeven, P., "Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fiber-Reinforced Concrete", Cement and Concrete Research, No.30, pp.63–69, 2000
- [18] EFNARC, "specification and Guidelines for self compacting concrete", <http://www.efnarc.org>, February 2002
- [19] EFNARC, "the European Guidelines for self-compacting concrete, specification, production and use ", <http://www.efnarc.org> , may 2005
- [20] Ozawa, k., sakata, N., Okamura, "Evaluation of self-compactibility of fresh concrete using the funnel test", concrete library of JSCE , pp.59-75, june 1995
- [21] Petersson, O., Billberg, P., Van, B.k., "A model for self-compacting concrete", proceedings of international RILEM conference on production Methods and Workability of concrete', edited by P.J.M.Bartos, et al., Chapman & Hall/E & FN spon, Paisley, pp. 483-490, 1996
- [22] Hayakawa, M., "development and Application of super workable concrete", proceeding of international RILEM workshop on 'special concretes workability and mixing', edited by prof.P.J.M. Bartons, Paisley, pp.183-190, 1993
- [26] Qian, C.X., Stoeven, P., "Development of Hybrid Polypropylene-Steel Fiber-Reinforced Concrete", Cement and Concrete Research, No.30, pp.63–69, 2000
- [27] Kobayashi, K., Cho, R., "Flexural Behavior of Polyethylene Fiber Reinforced Concrete", The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 3, No.1, 1981
- [28] Passuello, Alexandra., Moriconi, Giacomo. and Shah, Surendra P., "Cracking Behavior of Concrete with Shrinkage Reducing Admixtures and PVA Fibers". Cement & Concrete Composites, Vol.31, pp.699–704, 2009

- [29] Toutanji, Houssam A., "Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Silica Fume Expansive- Cement Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.13, pp. 177-186, 1999
- [30] Kormeling, H.A.; Reinhardt, H.W.; and Shah, S.P. „Static and Fatigue Propertiec of Concrete Beams Reinforced with Continuous Bar and with Fibers, *ACI Journal Proceedings* V.77, No. 1,Jan-Feb. 1980, pp. 36-43
- [31]. Batson, G.; Ball, C.; Bailey, L.; Landers,E; and Hooks, J., Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concerete Beames, *ACI Journal, Proceedings* V.69, No11, Nov, 1972, pp. 673-677
- [32]. Houghton, D.L.; Borge, O.E.; and Paxton,J.A., Cavitation Resistance of Some Special Concretes, *ACI Journal Proceedings* V.75, No. 12, Dec. 1978, pp. 664-667
- [33]. FIBER REINFORCEMENT OF CONCRETE STRUCTURES ,R. Brown, A. Shukla and K.R. Natarajan ,University of Rhode Island ,September 2002,URITC PROJECT NO. 536101
- [35] Beddar,M,(2008),"Development of steel fiber reinforced concrete from antiquity until the present day" *Proceedings.Int Conference Concrete: Constructions sustainable option*, Dundee,UK, PP 35-44
- [36] Okamura, H., " Self – Compacting high performance Concrete ", *Concrete International*,pp.54-50, 1999.
- [38] Quresh L A et al, (2008),"Effect of mixing steel fibers and silica fume on properties of high strength 10.
- [39] Steel fibre reinforced concrete (SFRC) – Quality, performance and specification, Alan Ross MIPENZ CPEng (Aust), BOSFA (Bekaert OneSteel Fibres Australasia)
- [40] Grunewald, S., "Performance-based Design of Self- Compacting Fiber Reinforced Concrete" P. hd. Thesis, Delft University of Technology, 2004.
- [41] FIBER REINFORCEMENT OF CONCRETE STRUCTURES ,R. Brown, A. Shukla and K.R. Natarajan ,University of Rhode Island ,September 200,URITC PROJECT NO. 536101
- [42] Lin,Wei-Ling. “Toughness behavior of fiber reinforced concrete “. *Fiber Reinforced Cement and Concrete Proceedings of the Fourth RILEM international symposium sheffield*, uk,pp 299-315,1992.
- [43] Tomasz Ponikiewski, Jacek Katzer. Properties of Fersh Scc Mix reinforced different types of steel and polymer fiber, *Construction and Building Materials*, Vol 62 PP96-101 , 2014.
- [44] A.Khaloo,EM.Raisi, P. Hosseini, H.Tahsiri. Mechanical performance of self compacting concrete reinforced with steel fiber. *Constr. Build. Mater .Vol 51,PP 179-186*, 2014.
- [45] Nataraja M.C., Dhang N., Gupta A.P., “Statisticalvariations in impact resistance of steel fiberreinforced concrete subjected to drop weight test”, *Cement and Concrete Research*, Vol.29, pp. 989–995, 1999.
- [46] Bing Chena, Juanyu Liu, " Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber ", *Cement and Concrete Research* 34, pp. 1259–1263, 2004.
- [47] Hideyuki, Horii. ”Fatigue Life Analysis of Reinforced Fiber Concrete”. Takashi Matsumoto, 2001.

- [48] Swamy, R.N., Barr, B.. "Fiber reinforced Concrete Recent Development ". Cement and Concrete., 1989.
- [49] ASTM International. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,2010.
- [50] ACI Committee 232, "Use of Fly Ash in Concrete (ACI 232.2R-03)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 2003, 41 pp.
- [51] Baoju, L.; Youjun, X.; Shiqiong, Z.; Qianlian, Y., "Influence of ultrafine fly ash composite on the fluidity and compressive strength of concrete," Cement and Concrete Research, V. 30, Issue 9, September 2000, pp. 1489-1493.
- [52] Bouzoubaa, Nabil. Bilodeau, Alain. Sivasundaram, Vasanthi. Fournier, Benoit. M.Golden, Dean. "Development of ternary blends for high-performance concrete', ACImaterial journal, No. 101- M 03, 2004, 19-29.
- [53] ASTM C618-03, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete", ASTM, 2003.

Abstract:

In concreting with a high volume of Self-compacting concrete, such as foundations and long walls, pouring concrete in layers with a time interval is sometimes unavoidable. Previous studies have shown that this could be due to the lack of mechanical integrity in the layers of concrete poured over a long period of time. Therefore, the mechanical properties and impermeability of this type of concreting are affected by the seam created in the subsequent layers of concreting.

The use of fibers in their dense concretes has advantages and disadvantages. Its advantages include increasing the ductility of concrete and improving its mechanical properties. The use of fibers can also affect the rheological and mechanical properties of self-compacting concrete applied in separate layers.

In the present study, two types of glass and steel fibers were used in separate and double compositions in the construction of self-compacting concrete mixtures poured in separate layers and the results of direct shear, diagonal shear and tensile strength after 0, 40, 80, 120, 160 minutes are analyzed. The percentage of composition of each fiber in concrete mixtures was 0.5, 1.5% by weight of cement. 28-day direct shear, diagonal shear and fissure tensile tests were performed on 15 * 15 * 15 cubic samples.

The results show that in the most optimal case, the use of steel and glass fibers increases the slope of the shear strength by 35% and the direct shear strength by 20%. Also, the use of steel and glass fibers increases the compressive tensile strength by 18%.

Key words: Self-compacting concrete, steel fibers, glass fibers, diagonal shear strength, direct shear strength, compressive tensile strength



Islamic azad university

Tabriz branch

Faculty of Engineering – Civil Department

Thesis «M. Sc.»

Construction Engineering and Management

Subject:

**Effect of Fiber Size and Type on Rheological and
Mechanical Properties of Self-Consolidating Concrete cast
in Distinct layers**

Supervisor:

Reza Saleh Ahari (Ph.D.)

By:

Meysam Khalil zadeh

June 2020